



HAL
open science

Développement d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver comme alternative à la méthode du bilan

Guy Deshayes

► **To cite this version:**

Guy Deshayes. Développement d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver comme alternative à la méthode du bilan. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-01959101

HAL Id: dumas-01959101

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01959101>

Submitted on 18 Dec 2018

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

**AGROCAMPUS
OUEST**

CFR Angers

CFR Rennes



AKERREAL
La terre, les hommes, le futur

Année universitaire : 2017-2018

Spécialité :

Ingénieur Agronome

Spécialisation / Parcours :

Sciences et Ingénierie du Végétal /

Agrosystèmes : Conception, Évaluation

Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Développement d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver comme alternative à la méthode du bilan

Par : Guy DESHAYES



Soutenu à RENNES le 11 septembre 2018

Devant le jury composé de :

Président : Matthieu CAROF

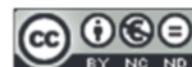
Rapporteur : Anne LAPERCHE

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 adresser tous mes remerciements à la coopérative Axéreal et plus particulièrement au service Agronomie et Innovations pour m'avoir permis de réaliser ce stage dans le cadre du projet SOLINAZO. Ce fut pour moi une expérience très intéressante, innovante et enrichissante tant sur le plan professionnel que personnel.

Merci à mon maître de stage, Ricardo Bidegain, pour m'avoir accompagné et encadré tout le long de ces 6 mois à la conduite de ces deux essais. Il a toujours été disponible pour m'aider lorsque j'en avais besoin, malgré ses autres responsabilités.

Je tiens à remercier Arthur Lenoir (INRA) pour le temps qu'il m'a consacré à la présentation des nouvelles méthodes proposées et pour l'aide fournie dans l'analyse de la fiabilité des outils. Les échanges que l'on a eu m'ont permis de bien comprendre le projet SOLINAZO et les modèles de culture sous-jacents.

Mes remerciements vont aussi à Michel Bonnefoy (Arvalis-Institut du Végétal) pour les réponses aux interrogations que j'avais concernant le modèle de culture CHN et la nouvelle méthode de fertilisation qui en découle.

Merci à Martine Chalât (Axéreal) pour la superbe carte des essais, à Dominique Rouiller (Axéreal) pour les analyses de sol des différents sites et à Danièle Gerriet (Axéreal) pour les données météorologiques.

Je remercie Séverine Baptiste, Thierry Desrats, Dominique Romelot et Jacky Reveillère (Axéreal) pour le temps consacré à la relecture de mon rapport.

Au-delà des connaissances et compétences agronomiques acquises, c'est aussi des moments partagés uniques que cela soit sur le terrain, au bureau, autour d'un café ou autour d'une bière. J'en garderai des très bons souvenirs.

Comme diraient les collègues de bureau, c'est l'heure pour moi maintenant de « poser le casque » ou bien de « ranger la moissonneuse »!

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
1) La production de blé tendre en France	1
2) Importance de l'azote dans les cultures céréalières	1
a) L'azote dans les plantes	1
b) Dynamique des besoins en azote du blé tendre.....	2
c) Le cycle de l'azote et les risques de pollution	2
3) La méthode du bilan prévisionnel	4
a) Rappel de la méthode	4
b) Les limites de son application.....	4
4) Un nouveau paradigme de raisonnement de la fertilisation azotée	5
a) Présentation de la méthode APPI-N	7
b) Présentation de la méthode CHN.....	7
5) Le projet SOLINAZO.....	8
I/ Matériel et méthodes.....	9
1) Présentation des parcelles expérimentales.....	9
a) Parcelle expérimentale à Tigy (45)	9
b) Parcelle expérimentale au Domaine du Chaumoy (18)	9
2) Structure des parcelles	10
3) Mesures et suivi des essais	10
a) Suivi de l'INN du couvert pour les modalités APPI-N et Alternative.....	10
b) Prélèvements de biomasse et de reliquat.....	11
c) Mesures à la récolte.....	11
4) Création d'une base de données pour l'étude de la fiabilité des outils.....	12
II/ Résultats	13
1) Stratégies de fertilisation des méthodes APPI-N et CHN	13
a) Les méthodes APPI-N et CHN sont économes en intrants	13
b) Des apports plus tardifs dans le cycle de la plante.....	13
c) Une culture mise sous stress azoté.....	14
2) Performances des différentes modalités	16
a) Analyse du nombre d'épis par m ²	16
b) Performance en terme de production	16
c) Performance économique.....	17

3)	Impact environnemental des modalités	18
a)	Une meilleure valorisation de l'engrais	18
b)	Un faible reliquat post-récolte.....	19
4)	Fiabilité des outils utilisés pour évaluer l'INN.....	19
a)	Fiabilité du N-Tester	19
b)	Fiabilité du Greenseeker	20
III/	Discussion	20
1)	Bilan des performances des nouvelles méthodes	20
2)	Adaptation des nouvelles méthodes aux conditions agropédoclimatiques.....	21
3)	Limites des outils de suivi d'INN pour la modalité APPI-N.....	22
4)	Limites et perspectives générales	23
	Conclusion.....	24
	Bibliographie.....	24
	Annexe	26
	Annexe 1 : Construction des abaques avec le modèle Azodyn.....	26
	Annexe 2 : Description du modèle CHN	28
	Annexe 3 : Analyse pédologique de la parcelle du Chaumoy.....	29
	Annexe 4 : Analyse pédologique de la parcelle de Tigy	31
	Annexe 5 : Protocole de mesure de la teneur en chlorophylle avec l'outil N-Tester.....	33
	Annexe 6 : Protocole pour la récolte 2018 - Blé Tendre - SOLINAZO	34
	Annexe 7 : Sorties finales de CHN pour Le Chaumoy et Tigy	36
	Annexe 8 : Description des différentes opérations réalisées sur le site du Chaumoy (18)	38
	Annexe 9 : Description des différentes opérations réalisées sur le site de Tigy (45).....	40
	Annexe 10 : Synthèse des différentes mesures réalisées avec l'outil N-Tester	42
	Annexe 11 : Etude de l'effet expérimentateur et appareil sur les mesures N-Tester	43
	Annexe 12 : Base de données utilisée pour l'analyse statistique de la fiabilité du N-Tester	44
	Annexe 13 : Base de données utilisée pour l'analyse statistique de la fiabilité du Greenseeker.....	45
	Annexe 14 : Présentation des outils utilisés dans le projet pour évaluer l'INN.....	46
	Annexe 15 : Projet CAP filière sur blé dur	47

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Evolution du taux moyen de protéines pour le blé tendre d'hiver depuis 1996 en France
- Figure 2 : Courbe de dilution d'azote critique pour le blé tendre d'hiver
- Figure 3 : Cycle simplifié de l'azote dans l'agrosystème
- Figure 4 : Teneur en nitrate moyenne des unités de distribution d'eau en région Centre Val de Loire
- Figure 5 : Equation de la méthode du bilan
- Figure 6 : Ecart de la méthode du bilan, de Farmstar © et de Jubil © par rapport à la dose optimale
- Figure 7 : Trajectoire d'INN avec carences tolérables (ou courbe de déficit maximum tolérable) du stade épi 1 cm à floraison
- Figure 8 : Présentation de quelques sorties du modèle CHN d'Arvalis
- Figure 9 : Localisation de l'ensemble des essais du projet
- Figure 10 : Itinéraire technique sur la parcelle du Chaumoy
- Figure 11 : Plan et dimensions des essais
- Figure 12 : Résultat graphique d'extrapolation de l'INN laboratoire et de l'INN N-Tester par la fonction approx de R pour le site de Châtillon-Coligny (45)
- Figure 13 : Plan de fertilisation moyen cumulé obtenu sur les seize sites du projet pour les modalités bilan, APPI-N et CHN
- Figure 14 : Présentation des valeurs d'INN selon les stades de la culture
- Figure 15 : Evolution de l'INN sur l'ensemble du cycle de la plante suivant les modalités
- Figure 16 : Présentation du rapport grain sur paille et de ses composantes des modalités témoin, bilan, APPI-N et CHN pour le site du Chaumoy
- Figure 17 : Positionnement des modalités APPI-N et CHN par rapport à la courbe de réponse azote établie à l'aide des modalités X-40, X et X+40
- Figure 18 : Dates d'apports du bilan, de CHN et d'APPI-N en fonction du nombre de jours nécessaires pour cumuler 20 mm de pluie
- Figure 19 : Nombre de mesures par classes d'écarts (= INN N-Tester relatif – INN laboratoire)
- Figure 20 : Nombre de mesures par classes d'écarts (=INN N-Tester brut – INN laboratoire)
- Figure 21 : Nombre de mesures par classe d'écart (= INN Greenseeker – INN laboratoire)
- Figure 22 : Photos de résidus de maïs laissés en surface qui nuisent à la densité de plante au m² sur le site de Tigy

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Evolution du CRU au cours du cycle du blé tendre d'hiver
- Tableau 2 : Présentation des abaques des deux sites expérimentaux d'Axéreal
- Tableau 3 : Présentation des modalités retenues pour les essais et leurs notations respectives
- Tableau 4 : Stades et modalités où sont réalisés les coupes de biomasse et les profils d'azote minéral
- Tableau 5 : Tableau de correspondances entre valeurs des appareils et INN
- Tableau 6 : Tableau récapitulant les doses totales pour les différentes situations et leurs différences par rapport à la méthode traditionnelle du bilan
- Tableau 7 : Résumé des dates et doses d'apport suivant les modalités pour les deux essais d'Axéreal
- Tableau 8 : Présentation des résultats de la récolte sur l'essai du Chaumoy
- Tableau 9 : Présentation des résultats de la récolte sur l'essai de Tigy
- Tableau 10 : Présentation des résultats économiques des différentes modalités sur nos deux sites
- Tableau 11 : Variation des Coefficients Appareils d'Utilisation de l'azote (CAU) en fonction du site et des différentes modalités
- Tableau 12 : Présentation des valeurs de reliquats et de minéralisation
- Tableau 13 : Tests de Student entre la valeur d'INN laboratoire et N-Tester selon le stade de la plante
- Tableau 14 : Tests de Student entre la valeur d'INN laboratoire et Greenseeker selon le stade de la plante

GLOSSAIRE

ADN : Acide DésoxyriboNucléique

ARS : Agence Régionale de Santé

BM : Biomasse

BPS : Blé Panifiable Supérieur

CAU : Coefficient Apparent d'Utilisation

CDA : Chambre Départementale d'Agriculture

CHN : Carbone Hydrogène Azote

CRU : Coefficient Réel d'Utilisation

CUMA : Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole

DFE : Dernière Feuille Etalée

DT : Dose Totale

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

GES : Gaz à Effet de Serre

GREN : Groupes Régionaux d'Expertise Nitrates

Ha : Hectare

HNT : Hydro N-Tester

INN : Indice de Nutrition Azotée

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

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

MOS : Matière Organique du Sol

N : Azote

Nabs : Teneur en azote absorbé par la plante

Nc : Teneur en azote critique

OPA : Organisation de Producteurs Agricoles

PEI : Projet Européen de l'Innovation

q : Quintaux

RUE : Radiation Use Efficiency

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

TCS : Techniques Culturelles Simplifiées

u : unité équivalent à 1 kgN/ha

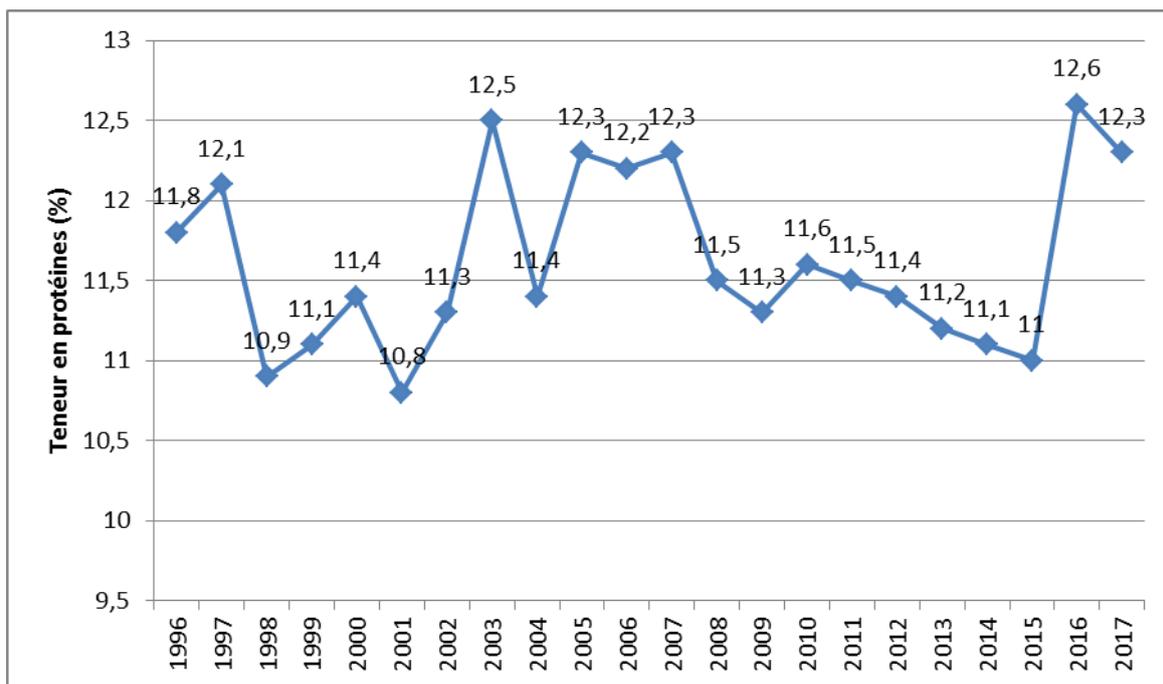


Figure 1 : Evolution du taux moyen de protéines pour le blé tendre d'hiver depuis 1996 en France (FranceAgriMer, 2017)

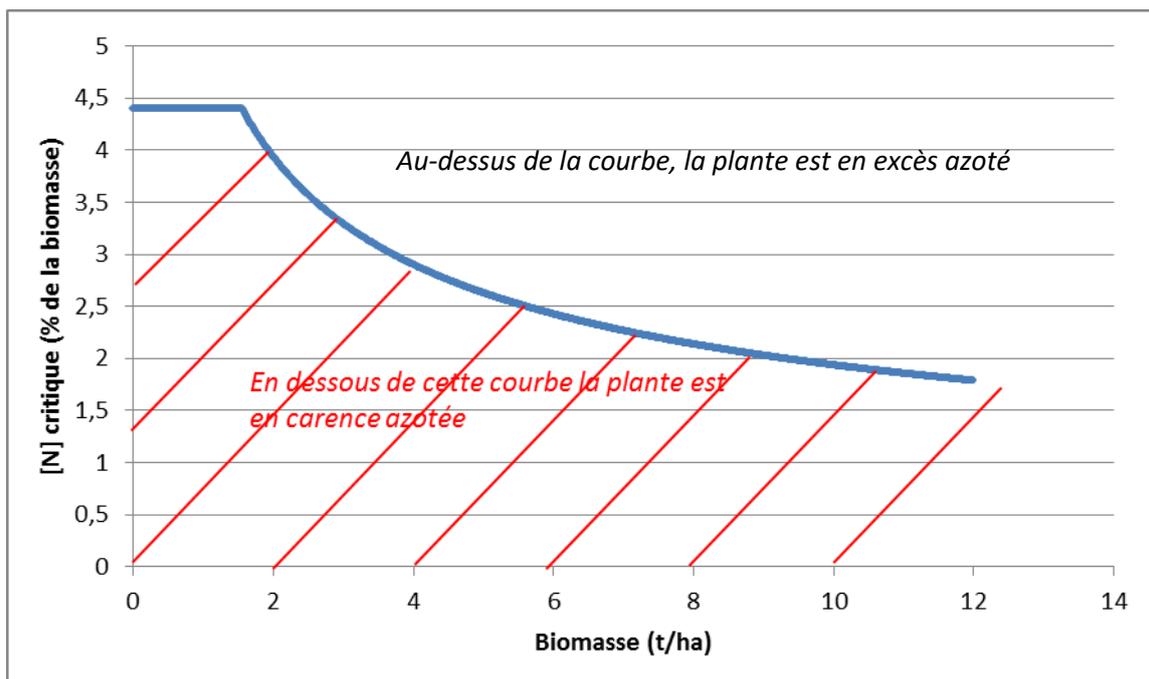


Figure 2 : Courbe de dilution d'azote critique pour le blé tendre d'hiver

L'équation est :

- si BM (Biomasse) < 1.55 t/ha, $[N]_{critique} = 4.4\%$;
- si $1.55 \text{ t/ha} < BM < 12 \text{ t/ha}$, $[N]_{critique} = 5.35 * (BM)^{-0.442}$.

Source : Juste et al., 1994

Introduction

1) La production de blé tendre en France

Les céréales contribuent fortement à l'excédent commercial français. En 2015, les céréales représentaient plus de 12% des exportations agroalimentaires françaises avec un total exporté de 7.2 milliards d'euros (Agreste Centre-Val de Loire, 2016). A l'échelle de l'Europe, la France est l'un des principaux producteurs de céréales (elle représente 28% de la production européenne de blé, 12% de maïs et 10% d'orge en 2016) (Agreste Centre-Val de Loire, 2017).

La région Centre Val de Loire est une des premières régions de production céréalière en France. Les exploitations agricoles, majoritairement tournées vers les grandes cultures, sont spécialisées autour du blé, du colza et de l'orge qui représentent 54% de la surface agricole utile régionale (soit environ 3,9 millions d'hectare). Avec une production de céréales de 92 millions de quintaux en 2015, la région Centre Val de Loire contribue donc à une part importante de la production céréalière nationale (Agreste Centre-Val de Loire, 2016).

Parmi les différentes céréales cultivées, le blé tendre d'hiver est celle qui est la plus cultivée dans la région. En 2014, elle occupait 40% de la surface en grandes cultures. Sa prépondérance régionale lui a valu d'ailleurs le surnom de « pétrole doré ». Les rendements moyens obtenus en 2015 étaient de 76 q/ha (Agreste Centre-Val de Loire, 2016).

Les débouchés du blé tendre sont nombreux et chacun d'entre eux a des exigences de qualité spécifiques (protéiques, poids spécifique, taux d'humidité, état sanitaire du grain...). Sa principale utilisation est pour l'alimentation humaine (panification, biscuiterie, amidonnerie et alcool). Il est aussi utilisé pour l'alimentation animale. Quels que soient les débouchés, les opérateurs des filières ont de fortes attentes en termes de taux de protéines qui représente une valeur technologique et nutritionnelle du produit (Arvalis-Institut du Végétal, 2014).

Depuis quelques années en région Centre, les problématiques principales pour le blé tendre sont la stagnation des rendements, une baisse de la qualité des grains et une dépendance importante aux intrants azotés. La figure 1 élaborée par FranceAgriMer présente l'évolution de la teneur en protéines à la récolte depuis 1996. Depuis quelques dizaine d'années, il semble que ce taux soit sur une tendance baissière ce qui ne permet pas de satisfaire les besoins de qualité des opérateurs en aval (les années 2016 et 2017 se distinguent par leurs valeurs plus élevées, conséquences des conditions climatiques particulières survenues dans la région en juin 2016). La gestion de l'azote est l'un de ces principaux déterminants.

2) Importance de l'azote dans les cultures céréalières

a) L'azote dans les plantes

La teneur en azote des plantes est comprise entre 1 et 3% du poids sec. Il se trouve essentiellement sous forme de protéines et de composés aminés ou amidés solubles (par exemple sous forme de nitrite). L'azote est crucial puisqu'il intervient dans la constitution de molécules à rôle catalytique (enzymes), de réserves (protéines), d'information génétique (base azotée de l'ADN) et de photosynthèse (composant de la chlorophylle). Sur une plante, il se trouve en grande concentration dans les feuilles jeunes bien vertes (Carloti, 1992).

Au cours du cycle de la plante, la concentration en azote des tissus diminue. Ce phénomène est lié à la croissance en biomasse et une accumulation en carbone qui dilue l'azote de la plante (Lemaire, Salette, 1981). La courbe de dilution critique présentée dans la figure 2 traduit cette relation non linéaire entre biomasse et teneur en azote. Elle correspond à la teneur en azote minimale nécessaire pour produire le maximum de biomasse. Cette valeur est appelée la teneur en azote critique et ne varie pas suivant les conditions culturales et

Stades	Date approximative	Coefficient Réel d'Utilisation (CRU)
Tallage	Début février	40 – 50 %
Epi 1-cm	Fin mars	60 – 70 %
Dernière feuille étalée (DFE)	Mi-mai	80 %

Tableau 1 : Evolution du CRU (analogue au CAU) au cours du cycle du blé tendre d'hiver (Arvalis-Institut du Végétal, Cetiom, 2014)

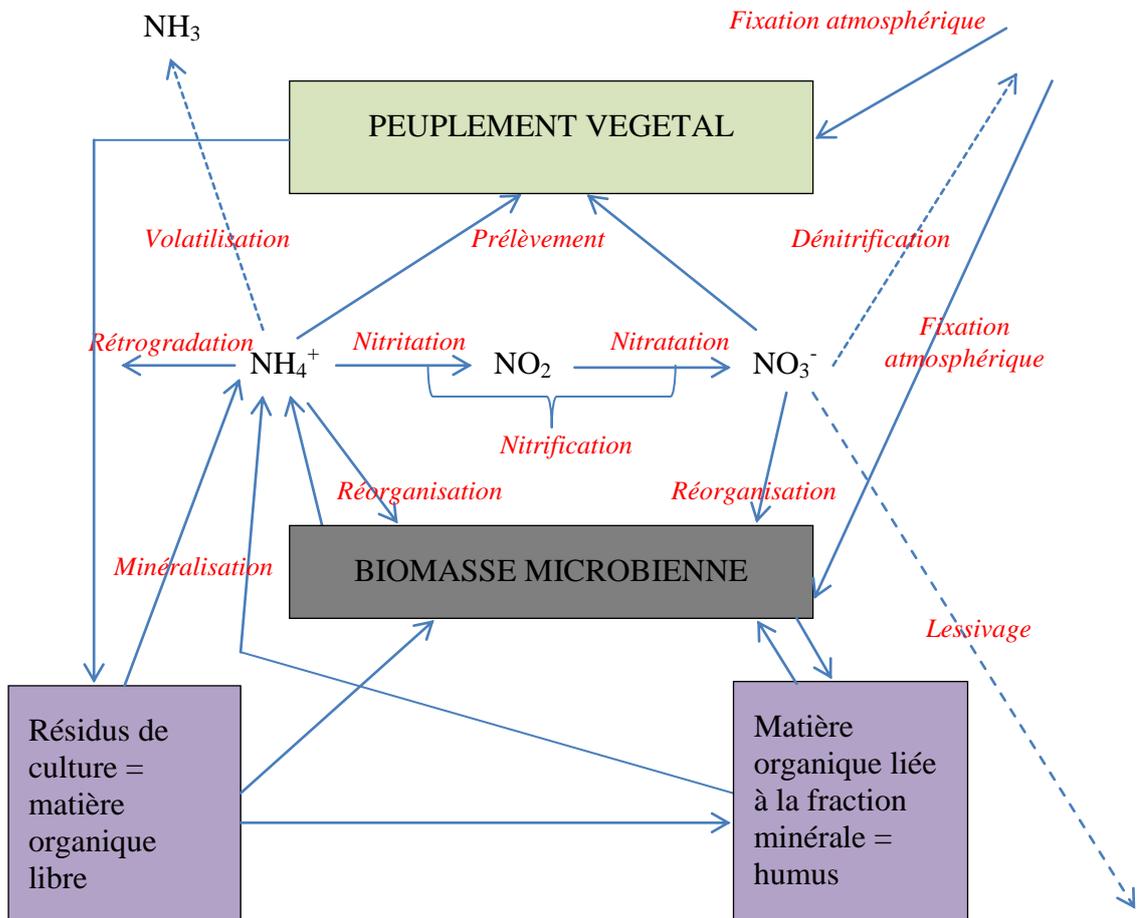


Figure 3 : Cycle simplifié de l'azote dans l'agrosystème (Carloti, 1992)

pédoclimatiques. La courbe est valable du tallage jusqu'à floraison (Justes et al., 1994).

A l'échelle de la plante, l'azote est un des moteurs essentiels de l'interception des rayons lumineux (favorise l'augmentation de la surface foliaire du couvert) et de la photosynthèse (augmente l'efficacité d'utilisation du rayonnement, la RUE) (Lemaire, Gastal, 1997). Il est à l'origine de la croissance en biomasse de la plante. A l'échelle du peuplement, il est corrélé au nombre de grains (Coïc, 1956) et d'épis au m² (Meynard et al., 1981). Il est donc un paramètre fondamental dans l'élaboration du rendement (Carloti, 1992).

En tant que constituant des protéines, il est un des facteurs de la qualité de la récolte. La concentration en protéines du grain provient à la fois avant la floraison d'une remobilisation de l'azote absorbé contenu dans les parties végétatives (représente entre 60 et 92% de l'azote du grain) (Austin et al., 1977) et de l'absorption post-floraison de l'azote du sol (entre 8-35 %) (Van Sanford, Mackown, 1987). Cette quantité totale d'azote dans le grain est diluée par l'amidon, synthétisé pour la plus grande partie après floraison.

b) Dynamique des besoins en azote du blé tendre

Les besoins en azote du blé tendre sont estimés à 3kg d'azote/q (Jeuffroy et al., 2013). Ils fluctuent suivant la variété implantée, la densité et la date de semis (Meynard, 1985).

Les besoins en azote du blé sont directement proportionnels à la biomasse produite quand la fertilisation est non limitante (Lemaire, Gastal, 1997) et évoluent donc au cours du cycle de la plante. Jusqu'au stade épi 1 cm, les besoins du blé tendre sont faibles (en général inférieurs à 50 kgN/ha) liés à une biomasse peu importante et un arrêt du développement végétatif du blé pendant la phase hivernale. A la sortie de l'hiver, lorsque les températures remontent, la croissance du blé s'accompagne d'une forte hausse des besoins en azote (1 à 4.5 kgN/ha/jour). La minéralisation du sol redémarrant plus lentement, les fournitures du sol ne permettent généralement pas de satisfaire ces besoins. Il est donc souvent nécessaire de réaliser des apports de fertilisants organiques ou minéraux au cours de la phase de montaison de la plante. A la floraison, la majeure partie de l'azote a été absorbée (75-80%), les besoins sont donc moins importants à partir de ce stade (Carloti, 1992).

Les apports azotés ont une efficacité variable pour la plante suivant la période et les conditions climatiques où il a été réalisé. Le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU) est un indicateur de l'efficacité des apports. Il correspond à la fraction d'azote total d'un fertilisant absorbée par la plante (Schvartz et al., 2005). Le tableau 1 présente les différentes valeurs du CRU au cours du cycle de la plante. Le CAU est positivement corrélé à la vitesse de croissance du couvert (Collin, 2012). Il est d'autant meilleur que l'apport est réalisé tardivement dans le cycle (Carloti, 1992) et qu'il est suivi d'une forte irrigation ou pluie (Holcomb et al., 2011). Le choix des dates d'apports est donc un compromis entre maximiser le CAU et satisfaire les besoins de la plante sans compromettre le rendement. De plus, l'état structural du sol lors des interventions a un impact sur la valorisation de l'engrais. Un mauvais état structural (forte compaction) peuvent diminuer la capacité du couvert à prélever de l'azote dans son milieu et engendrer une carence (Meynard et al., 1981).

c) Le cycle de l'azote et les risques de pollution (*figure 3*)

Les sols contiennent 2 à 10 tonnes d'azote par hectare qui se trouve principalement sous forme organique dans la couche labourée. Pour l'azote minéral, sa quantité est de quelques dizaines de kg par ha et il se trouve sous trois formes distinctes : l'ion ammonium (NH₄⁺), l'ion nitrite (NO₂⁻) et l'ion nitrate (NO₃⁻). Les plantes absorbent l'azote principalement sous

LES TENEURS MOYENNES EN NITRATES DANS LES EAUX DISTRIBUÉES

en région Centre-Val de Loire en 2016

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.

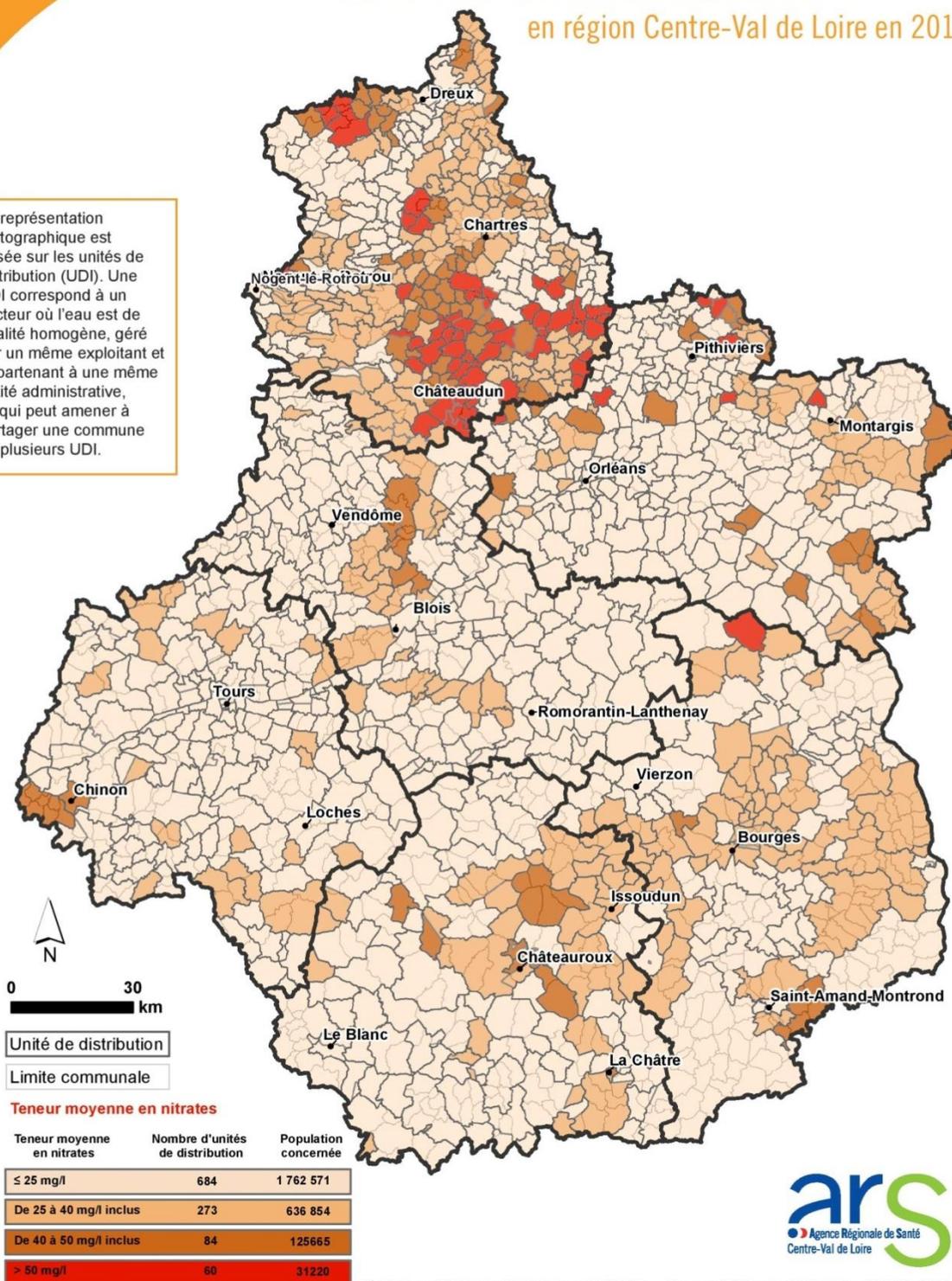


Figure 4 : Teneur en nitrate moyenne des unités de distribution d'eau en région Centre Val de Loire (ARS Centre-Val de Loire, 2017)

forme d'ion ammonium et d'ion nitrate (COMIFER, 2013).

L'azote sous sa forme minérale est la seule source assimilable pour la plante. Aussi, le stock d'azote minéral disponible pour la culture est entretenu par divers processus (COMIFER, 2013) :

- La minéralisation des matières organiques du sol (MOS). La MOS est renouvelée grâce aux divers apports organiques (fumiers, composts) et par les résidus de culture.
- Les apports d'azote minéraux et la fraction minérale ou très rapidement minéralisable des matières organiques apportées (compost, fumiers, résidus de culture).
- La fixation symbiotique par les légumineuses.

A contrario, certains processus tendent à diminuer ce stock. Le principal est le prélèvement par le système racinaire des plantes cultivées. Dans un objectif de production agricole, ce poste est à maximiser. L'azote minéral peut-être aussi immobilisé sous forme organique par la biomasse microbienne du sol (organisation de l'azote minéral) et être indisponible pour la plante pendant une certaine période. Il peut aussi être perdu sous formes gazeuses par dénitrification (N_2) (COMIFER, 2013). L'azote peut être lessivé sous forme d'azote nitrique pendant les périodes d'intenses précipitations (hivernales). Il est source de pollution à forte concentration pour les eaux souterraines et superficielles. Enfin, l'azote du sol peut se volatiliser sous forme d'ammoniac (NH_3). Ce dernier concerne exclusivement les apports minéraux et la fraction minérale des fertilisants organiques. Ce phénomène s'observe pour des apports réalisés à des températures élevées.

A travers ce cycle, nous pouvons voir que l'azote est un élément très mobile impliqué dans de nombreux processus. S'il est non capté par la plante ou s'il est mis en excès, il y a un risque de perte vers l'environnement. Dans l'Union Européenne, le coût estimé de cette pollution se situe entre 70 et 320 milliards d'euros par an, ce qui représente le double de ce qu'apporte les fertilisants azotés en valeur ajoutée à l'agriculture (Sutton et al., 2011). L'excès de composés azotés menace à la fois la qualité de l'air, de l'eau et du sol. Ceci a des impacts sur les écosystèmes aquatiques et forestiers (processus d'eutrophisation et efflorescences algales), sur l'émission de gaz à effet de serre (comme le protoxyde d'azote, N_2O) et sur la santé humaine (diminution de l'espérance de vie) (Sutton et al., 2011). En région Centre-Val de Loire, 1.2 % de la population régionale a consommé en 2016 une eau dont la teneur en nitrates est supérieure au seuil réglementaire des 50 mg/l (ARS Centre-Val de Loire, 2017). La figure 4 présente la teneur moyenne en nitrates des unités de distribution de la région. Le département d'Eure-et-Loir concentre le plus d'unités dépassant le seuil des 50 mg/L.

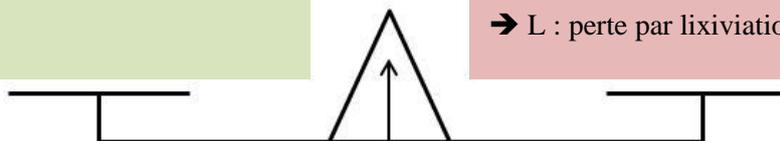
En définitive, la gestion de l'azote est cruciale pour la production à l'échelle d'une exploitation agricole. Elle détermine à la fois le rendement et la qualité de la récolte. Les besoins en azote du blé sont proportionnels à la croissance en biomasse et varient au cours de son cycle. Ils sont couverts par la fourniture d'azote du sol et les apports d'engrais organiques ou minéraux. Bien que la dose d'azote soit corrélée positivement aux nombre de grains par m^2 , de forts apports auront tendance à augmenter le risque de lessivage du nitrate. Il a été montré que pour une situation donnée, il existait une dose optimale d'azote à apporter pour maximiser la production (Makowski et al., 1999). Au-delà de ce seuil, le gain qu'apportent de nouveaux apports ne permet pas de compenser le coût de l'engrais utilisé et est même susceptible de nuire à la production (verse). Tout ceci impose de raisonner la fertilisation azotée pour atteindre cette dose optimale.

Entrées d'azote :

- Ri : Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan
- Mh : minéralisation nette de l'humus du sol (intègre l'arrière-effet des produits résiduaux organiques)
- Fs (resp. Fns) : fixation symbiotique (resp. non symbiotique) d'azote atmosphérique
- Mhp (resp. Mr, MrCi, Mpro) : minéralisation nette due à un retournement de prairie (resp. aux résidus de récolte, aux résidus de culture intermédiaire et aux PRO)
- A : Apports atmosphériques (dépôts secs et humides)
- Nirr : Apport apporté par l'eau d'irrigation
- X : apport d'azote sous forme d'engrais minéral de synthèse
- Xpro : Azote de la fraction minérale d'un PRO apporté après la date d'ouverture du bilan

Sorties d'azote :

- Rf : Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan
- Pf (resp. Pi) : Quantité d'azote absorbée par la culture à la fermeture du bilan (resp. à l'ouverture du bilan)
- Ix : Organisation par voie microbienne
- Gs (resp. Gx) : perte par voie gazeuse de l'azote du sol (resp. de l'engrais apporté)
- L : perte par lixiviation du nitrate



$$R_i + P_i + M_h + F_s + F_{ns} + M_{hp} + M_r + M_{rCi} + M_{pro} + A + N_{irr} + X + X_{pro} = R_f + P_f + I_x + G_s + G_x + L$$

Figure 5 : Equation de la méthode du bilan (COMIFER, 2013)

3) La méthode du bilan prévisionnel

a) Rappel de la méthode (*figure 5*)

La méthode de raisonnement de la fertilisation azotée actuellement reconnue et utilisée est la méthode du bilan. Sa première formalisation a été faite en 1969 par Hébert. Elle est depuis une quarantaine d'années constamment améliorée et largement utilisée pour déterminer la quantité d'azote à apporter aux cultures (Van der Mijnsbrugge et al., 2017). Depuis 2012, elle est un outil réglementaire par la directive Nitrates. Les agriculteurs présents dans les zones d'actions renforcées (ZAR) sont dans l'obligation de l'appliquer.

Une des principales caractéristiques de cette méthode est de viser une nutrition azotée non-limitante tout au long du cycle de culture. Pour cela, elle confronte les besoins de la plante aux fournitures du sol et en déduit une dose à apporter (Rémy, Hébert, 1977). Pour évaluer les besoins de la culture, elle se base sur la définition d'un objectif de rendement. Le coefficient multiplicateur « b » lié à la variété cultivée permet d'estimer les besoins totaux de la culture. Il correspond à un besoin d'azote par unité de production qui est compris entre 2.8 et 3.2 kgN/q pour le blé tendre (Arvalis, 2018). Après estimation des termes de l'équation de la figure 5, la quantité d'engrais à apporter est calculée sur l'ensemble du cycle cultural. Elle est appelée la dose totale prévisionnelle X.

Habituellement, cette dose d'azote est fractionnée en 3 apports sur le cycle cultural afin d'optimiser l'absorption par la plante et de limiter ses pertes. Les dates d'interventions ont été déterminées empiriquement comme des phases critiques en termes de nutrition azotée pour la culture et interviennent à des stades précis. Le premier apport, de l'ordre de 40-50 kgN/ha, est réalisé au tallage. Celui-ci permet de compenser un reliquat en sortie d'hiver faible et stimuler la production de tiges. Le deuxième est réalisé au début de la phase de montaison lors de la croissance en biomasse de la plante. Il est un des déterminants du nombre d'épis au m². Sa valeur s'obtient en déduisant de la dose prévisionnelle celle apportée au premier apport et celle mise en réserve pour le dernier apport. Enfin, le troisième apport est réalisé entre le stade 2 nœuds et gonflement. Il vaut généralement entre 40 et 80 kgN/ha. Il joue un rôle dans le nombre de grains par épi (Demotes-Mainard et al. 1999) et l'élaboration du taux de protéines.

D'autres outils existent en complément de cette méthode du bilan. Un des plus utilisés est Farmstar®. Il se base sur le calcul d'une dose totale prévisionnelle en sortie d'hiver. Une partie de celle-ci est mise en réserve pour un apport tardif. Par la mesure de la réflectance du couvert fin montaison par satellite, il est mesuré la variabilité de la biomasse et de la teneur en chlorophylle du couvert sur la parcelle. Le résultat sous forme cartographique permet de moduler le troisième apport mis en réserve en fonction des potentialités du couvert (Coquil et al. 2005). La méthode JUBIL® établie par l'INRA et l'ITCF (ancien nom d'Arvalis) est un autre outil de pilotage de la fertilisation basé sur la teneur en nitrates du jus de base de tige. De même que Farmstar, une partie de la dose prévisionnelle est mise en réserve (40 kgN/ha). Les mesures entre 1 Nœud et DFE permettent d'évaluer les besoins réels de la plante à ces stades et d'adapter l'apport (entre 0 et 80 kgN/ha) (Justes et al., 1997).

b) Les limites de son application

La diffusion de la méthode du bilan s'est faite très largement depuis les années 1970. Néanmoins, force est de constater que sa mise en place n'a pas permis de répondre aux problèmes environnementaux en termes de qualité de l'eau et d'émissions de GES.

Tout d'abord, il n'y a pas de consensus établi sur le choix de l'objectif de rendement. D'un côté, les pouvoirs publics ont défini une norme pour sa détermination. Il est égal à la moyenne des rendements réalisés sur l'exploitation au cours des cinq dernières années en excluant la

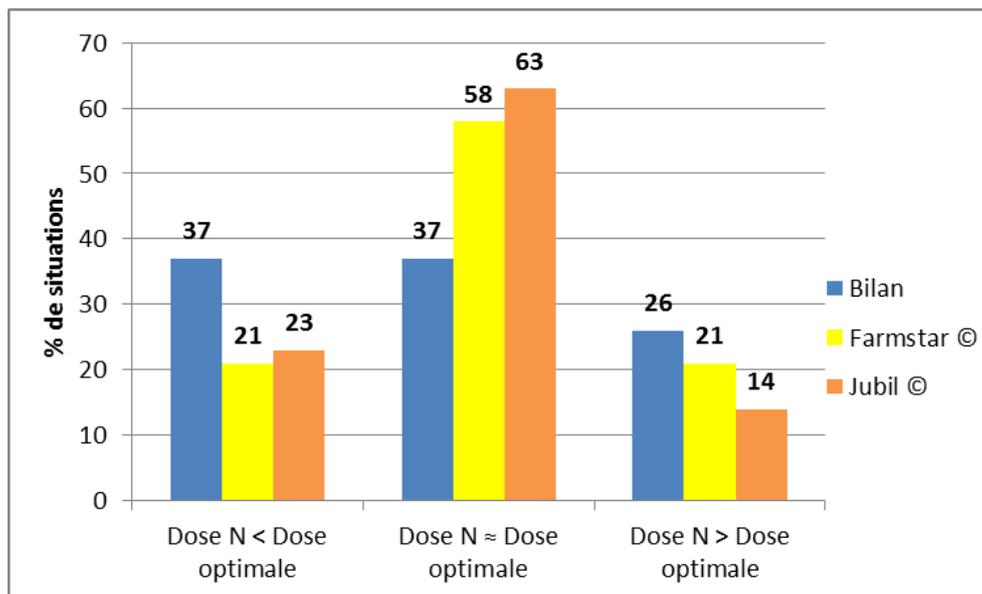


Figure 6 : Ecart de la méthode du bilan, de Farmstar © et de Jubil © par rapport à la dose optimale (Baranger, 2015)

valeur maximale et minimale (Ministère de l'Écologie, 2011). Cette standardisation tend à limiter l'atteinte de forts rendements et de bonne teneur en protéines en rapport avec le potentiel génétique des nouvelles variétés (Ravier, 2017). De l'autre côté, les organisations de production agricole (OPA) et agriculteurs ont tendance à viser le rendement maximum atteignable. Ceci amène à des pratiques de surfertilisation (Sebillotte, Meynard, 1990). En 1988, ¼ des utilisateurs de la méthode bilan surestimaient l'objectif de rendement (Cerf, Meynard, 1988). De plus, le coefficient « b » est variable en fonction du potentiel de rendement (Lacroix, 1994) ce qui amène à fausser l'évaluation des besoins réels du couvert.

L'estimation du reliquat azoté en sortie d'hiver est un des postes centraux à évaluer pour la réalisation de la méthode. Son échantillonnage est réalisé à la tarière. Les mesures effectuées ne sont pas toujours représentatives de la diversité des sols présents à l'échelle de l'exploitation (Goos, Prunty, 1990). De plus, certains sols très caillouteux rendent difficiles son prélèvement (Meynard et al., 1997).

Par la suite, la standardisation de références nécessaires à la méthode du bilan à une échelle régionale (GREN) s'oppose à la diversité des situations agronomiques d'un territoire (Ravier et al. 2016). En Champagne-Crayeuse, l'application de règle homogène de fumure a abouti à de mauvaises performances économiques (Boiffin et al., 1981). A l'échelle de la parcelle, la méthode établit un calcul et une dose à apporter sur une parcelle homogène sans l'adapter aux potentielles hétérogénéités de cette dernière.

La méthode du bilan ne prend pas en compte les facteurs susceptibles d'évoluer pendant le cycle cultural. L'offre en azote du sol (Rf) et les besoins culturaux (Pf) peuvent varier en fonction du climat et des processus biologiques (comme des problèmes sanitaires ou de ravageurs). Or, il a été montré que la fertilisation azotée doit être ajustée autour de 10% des besoins réels de la culture pour éviter des pertes vers l'environnement (Jeuffroy et al., 2013). L'absence de prise en compte de ces facteurs dans l'élaboration de la dose totale rend la prévision moins fiable et est susceptible d'aboutir à des pertes d'azote vers l'environnement.

Enfin, en figeant le fractionnement des apports à des stades précis de la plante, ces apports ne sont pas synchronisés avec les périodes maximisant l'efficacité de l'engrais. Il a été montré par exemple que l'application plus tardive d'azote dans le cycle de la culture permet d'augmenter le CAU de l'engrais (Limaux, 1999).

En conclusion, la méthode du bilan ne permet donc pas de régler les apports au plus près des besoins réels du couvert. Dans la figure 6, le graphique montre qu'avec l'utilisation de la méthode du bilan, 26% des doses préconisées sont supérieures à la dose optimale et 37% inférieures. Face à ce constat, il a été jugé nécessaire de proposer une nouvelle manière de raisonner la fertilisation azotée.

4) Un nouveau paradigme de raisonnement de la fertilisation azotée

Face aux limites de la méthode du bilan, Clémence Ravier a formalisé dans sa thèse un nouveau raisonnement de la fertilisation azotée issu de travaux de recherche conduits depuis les années 1990. Ce dernier s'affranchit de la définition d'un objectif de rendement et de l'évaluation du reliquat sortie hiver. Cette méthode vise à remplacer la dose prévisionnelle du bilan par une dose incrémentée évoluant au cours du cycle de la plante en fonction des conditions climatiques et des besoins de la culture.

Cette nouvelle méthode repose sur une observation régulière de l'état de nutrition azotée du couvert entre sortie hiver et floraison. L'état de nutrition azotée est évalué par l'INN (Indicateur de Nutrition Azotée). Il correspond au rapport entre la teneur en azote total des

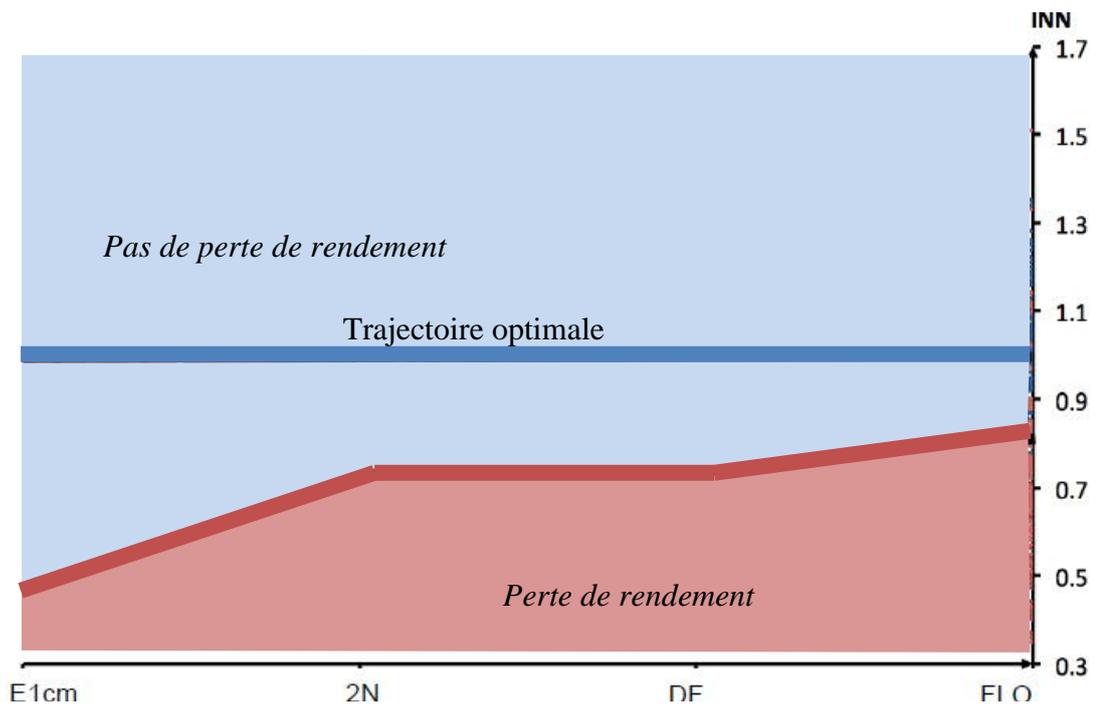


Figure 7 : Trajectoire d'INN avec carences tolérables (ou courbe de déficit maximum tolérable) du stade épi 1 cm à floraison (Ravier, 2017)

parties aériennes et la teneur critique en azote (Lemaire, Gastal, 1997). Sa valeur est déterminée par la courbe critique de dilution d'azote présentée dans la figure 2 (Justes et al., 1994). L'évaluation de l'INN permet de savoir si un apport d'azote se justifie au regard de l'état azoté de la culture et d'adapter la quantité à apporter. Si sa valeur est en dessous de 0.95, la culture est considérée en carence azotée (Justes, 1993).

Il a été montré qu'une culture de blé conduite avec carence n'avait pas systématiquement un rendement inférieur à celui mené à l'optimum de nutrition azotée tout le long du cycle (Jeuffroy et al., 2013). Un état de carence limité et ponctuel à certains moments de la culture (stades précoces) peut être non préjudiciable pour le rendement si la nutrition azotée est remontée à un niveau satisfaisant le mois précédant la floraison. La teneur en protéines quant à elle est peu affectée par ces carences car elle est principalement liée à l'absorption d'azote par la culture et aux conditions de stress autour et après floraison (Jeuffroy et al., 2013).

Dans sa thèse, Clémence Ravier a construit une trajectoire d'INN avec carences tolérables pour le blé tendre d'hiver du stade épi 1 cm à floraison (figure 7). Elle est issue de l'exploitation de données collectées sur 63 combinaisons site-année localisées en France. Les résultats obtenus sont valables au niveau national et pour toutes les situations possibles. Elle a montré que cette courbe discrimine au mieux les traitements pour lesquels une carence azotée induit une perte de rendement de ceux n'en n'induisant pas (90% des traitements strictement au-dessus de cette courbe n'induisent pas des pertes de rendement significatives) (Ravier, 2017).

Ainsi, en suivant régulièrement l'INN du couvert et en ajustant les apports de sorte à ce qu'il soit toujours au-dessus de cette trajectoire, le rendement et la qualité de la culture sont maintenus tout en minimisant les pertes azotées à 20kg par ha. Il est important de noter que cette courbe ne correspond pas à un INN de 1. En effet, en cherchant à maintenir l'INN du couvert à 1, l'efficacité de production de biomasse de la plante est maximisée mais cela n'optimise pas nécessairement l'élaboration du rendement et de la teneur en protéines du grain. Ainsi, cette méthode ne peut être utilisée dans des situations où l'agriculteur chercherait à maximiser sa production de biomasse (cas de l'herbe par exemple).

Il a été montré que, dans certaines conditions agronomiques, cette méthode permet de diminuer les besoins en azote du blé de 3 à 2.7 kg par quintal de grain produit. Ceci revient à économiser 20 à 30 unités d'azote par hectare à rendement et teneur en protéines fixés ce qui est un gain économique pour l'agriculteur. Les conséquences sont la suppression du premier apport au tallage et le décalage de 66% de la dose apportée au stade épi 1cm au stade « dernière feuille ». Pour ce qui est de la teneur en protéine, elle peut être augmentée de +1.2 à +1.7 point (Jeuffroy et al., 2013). Enfin, les apports étant plus tardifs, la valorisation de l'engrais par la culture est plus forte ce qui diminue les pertes d'azote vers l'environnement.

Suite à ces travaux et à la thèse de Clémence Ravier, Arvalis et l'INRA ont repris ces résultats et ont chacun développé des outils de pilotage (méthode APPI-N pour l'INRA et CHN pour Arvalis). Ces outils permettent de déterminer les dates et doses d'apport à réaliser pour maintenir l'INN de la culture au-dessus de la trajectoire avec carences tolérables.

Ces deux outils se distinguent par l'usage de deux modèles de culture différents que sont Azodyn pour l'INRA et CHN pour Arvalis (cf présentation dans les annexes 1 et 2). Leurs simulations permettent de définir une dose d'azote à apporter. Les dates d'apport doivent répondre à des conditions spécifiques (pédoclimatiques et du couvert) qui diffèrent entre les deux méthodes. Dans la suite du rapport, ces dates d'apports seront appelées « rendez-vous ». Elles varient d'une année sur l'autre puisqu'elles dépendent des conditions climatiques, de l'état du sol, de la pression des ravageurs...

INN	15 - 28 février	1 - 15 mars	15 - 30 mars	1 - 15 avril	15 - 30 avril	1 - 15 mai
< 0.6	0	60	80	60		
0.6 - 0.7	0	40	80	60	80	60
0.7 - 0.8	0	0	60	40	80	60
0.8 - 0.9	0	0	40	40	40	40
0.9 - 1.0	0	0	0	0	40	40
1.0 - 1.1	0	0	0	0	0	0
1.1 - 1.2	0	0	0	0	0	0

Abaque pour l'essai de Tigy

Note : Si entre le 15 et 30 mars, on observe un INN du couvert à Tigy entre 0.8 et 0.9, l'abaque préconise d'apporter 40u d'azote (cf cadre rouge sur figure ci-dessus).

INN	15 - 28 février	1 - 15 mars	15 - 30 mars	1 - 15 avril	15 - 30 avril	1 - 15 mai
< 0.6	0	60	100			
0.6 - 0.7	0	40	100	80	80	60
0.7 - 0.8	0	0	80	80	60	40
0.8 - 0.9	0	0	40	60	40	40
0.9 - 1.0	0	0	0	40	0	0
1.0 - 1.1	0	0	0	0	0	0
1.1 - 1.2	0	0	0	0	0	0

Correspond à des dates/doses dont la viabilité n'a pas été testée

Abaque pour l'essai du Chaumoy

Tableau 2 : Présentation des abaques des deux sites expérimentaux d'Axéreal

a) Présentation de la méthode APPI-N

L'une des caractéristiques principales de cette méthode est l'usage d'abaques pour les préconisations d'apport. Chaque parcelle a un abaque spécifique. Ceux de Tigy et du Chaumoy sont présentés dans le tableau 2. A partir de la valeur d'INN du couvert et de la date de mesure, l'abaque nous fournit une quantité d'azote à apporter pour maintenir l'INN au-dessus de la trajectoire jusqu'au prochain jour favorable (cf note sur tableau 2).

La construction des abaques (cf annexe 1) est faite pour un lieu et une année climatique donnés. Ils sont issus du modèle de culture Azodyn. Les sorties de ce dernier sont l'INN, le CAU et l'azote lixivié. Pour une date et intervalle d'INN donnés, il est retenu du modèle la dose qui permet de maintenir la valeur d'INN jusqu'au prochain rendez-vous au-dessus de la trajectoire avec carences temporaires et qui minimise l'azote non utilisé par la plante.

Cette méthode recherche aussi à maximiser l'efficacité d'utilisation de l'azote par la culture (CAU). Pour cela, le choix des rendez-vous vise des jours où les conditions de valorisation de l'azote par la plante sont optimales. Elles correspondent aux règles de décisions suivantes :

- Il doit y avoir au moins 15 jours d'intervalle entre deux apports consécutifs
- Il a été montré qu'un sol humide pendant l'apport d'engrais (Campbell et al., 1995) ou une pluie juste après son application (Powlson et al., 1992) maximisaient sa valorisation. Pour APPI-N, un apport est réalisé soit si le total des pluies annoncées dans les trois jours suivants l'apport est supérieur à 10 mm soit si le sol est suffisamment humide (c'est-à-dire que sur les cinq derniers jours, les précipitations ont été supérieures à l'évapotranspiration du couvert).

Enfin, la méthode APPI-N évalue l'INN en cours de culture par des mesures régulières avec l'outil N-Tester ou Greenseeker. Ces dernières servent de données d'entrée pour l'abaque et permettent donc de déterminer la dose d'azote à apporter selon l'état azoté du couvert.

b) Présentation de la méthode CHN

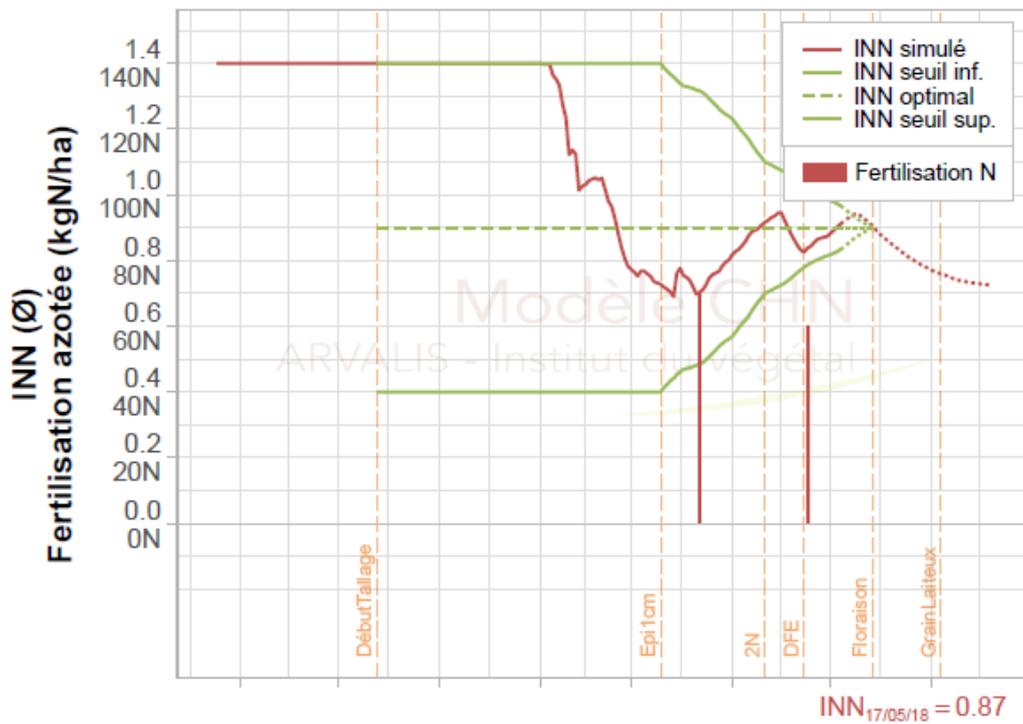
Le modèle de culture CHN (Carbone Hydrogène et Azote) a été développé par l'institut Arvalis depuis plusieurs années et est utilisé dans le cadre de cette étude comme un outil pour le pilotage en temps réel de la fertilisation azotée (date et dose d'apport). Il permet de modéliser l'INN en cours de culture et d'adapter les apports en fonction de cette modélisation. Il est possible de forcer le modèle en incluant des données mesurées sur le terrain.

L'apport est réalisé si :

- il permet de remonter la valeur d'INN au niveau de la trajectoire optimale d'absorption jusqu'au prochain « rendez-vous ». Cette dernière est définie comme la valeur d'INN que l'on souhaite atteindre à floraison. Ici, l'INN visé est de 0.9.
- l'INN simulé atteint le seuil critique inférieur (c'est-à-dire qu'il va passer en dessous de la trajectoire avec carences tolérables).

Des sorties obtenues par CHN sont présentées dans la figure 8. Le premier graphique présente l'évolution de l'INN simulé au cours du cycle de la plante. Il y est aussi reporté la trajectoire minimale à ne pas franchir ainsi que la trajectoire optimale visée à floraison (INN = 0.9). Les barres rouges correspondent aux apports faits ou que l'on souhaite faire. En réalisant plusieurs simulations avec des dates et doses différentes, on peut déterminer celle à apporter pour éviter de franchir la trajectoire minimale jusqu'au prochain rendez-vous. Le deuxième graphique permet de suivre le déficit azoté de la plante par rapport au déficit maximal tolérable ainsi que la quantité d'azote présente dans le sol. Cette dernière peut être corrigée par des mesures faites sur le terrain et qui sont renseignées dans les données d'entrée du modèle.

Évolution INN



Suivi de la quantité d'azote du sol et du déficit azoté de la plante

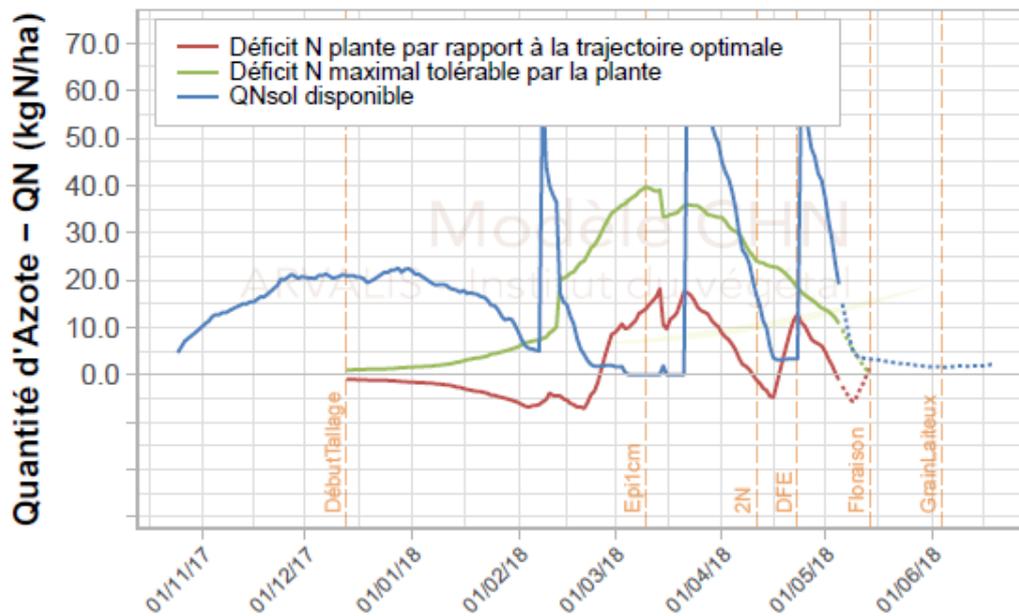


Figure 8 : Présentation de quelques sorties du modèle CHN d'Arvalis

Pour les apports, les conditions météorologiques devront être les plus optimales possibles (sols humides, pluies annoncées dans les jours qui suivent). Néanmoins, à la différence de la méthode APPI-N, il est possible d'apporter de l'azote en condition sèche si cela permet d'éviter le franchissement de la trajectoire avec carences tolérables.

5) Le projet SOLINAZO

Le projet SOLINAZO entre dans le cadre des Projets Européens pour l'Innovation (PEI). Son but est de développer et de mettre au point ces nouvelles méthodes de pilotage en vue d'une diffusion ultérieure aux agriculteurs. Il permet aussi de comparer les nouvelles méthodes entre elles et d'évaluer leur intérêt par rapport aux raisonnements plus traditionnels de la méthode du bilan. Il confronte les nouvelles règles de décisions proposées à la diversité des situations pédoclimatiques et culturales (précédents...) de la région Centre.

Nous retrouvons comme partenaires du projet la FDGEDA 18, les Chambres d'Agriculture (CDA) 28, 36, 37, 41, 45, deux coopératives (SCAEL et Axéreal), Arvalis et l'INRA. L'organisme chef de file est la Chambre Régionale d'Agriculture du Centre Val de Loire. Chaque partenaire est chargé de mettre en place deux essais et d'assurer leur suivi. Les résultats sont collectés et transmis ensuite à Arvalis et l'INRA.

Les objectifs de ce projet sont de :

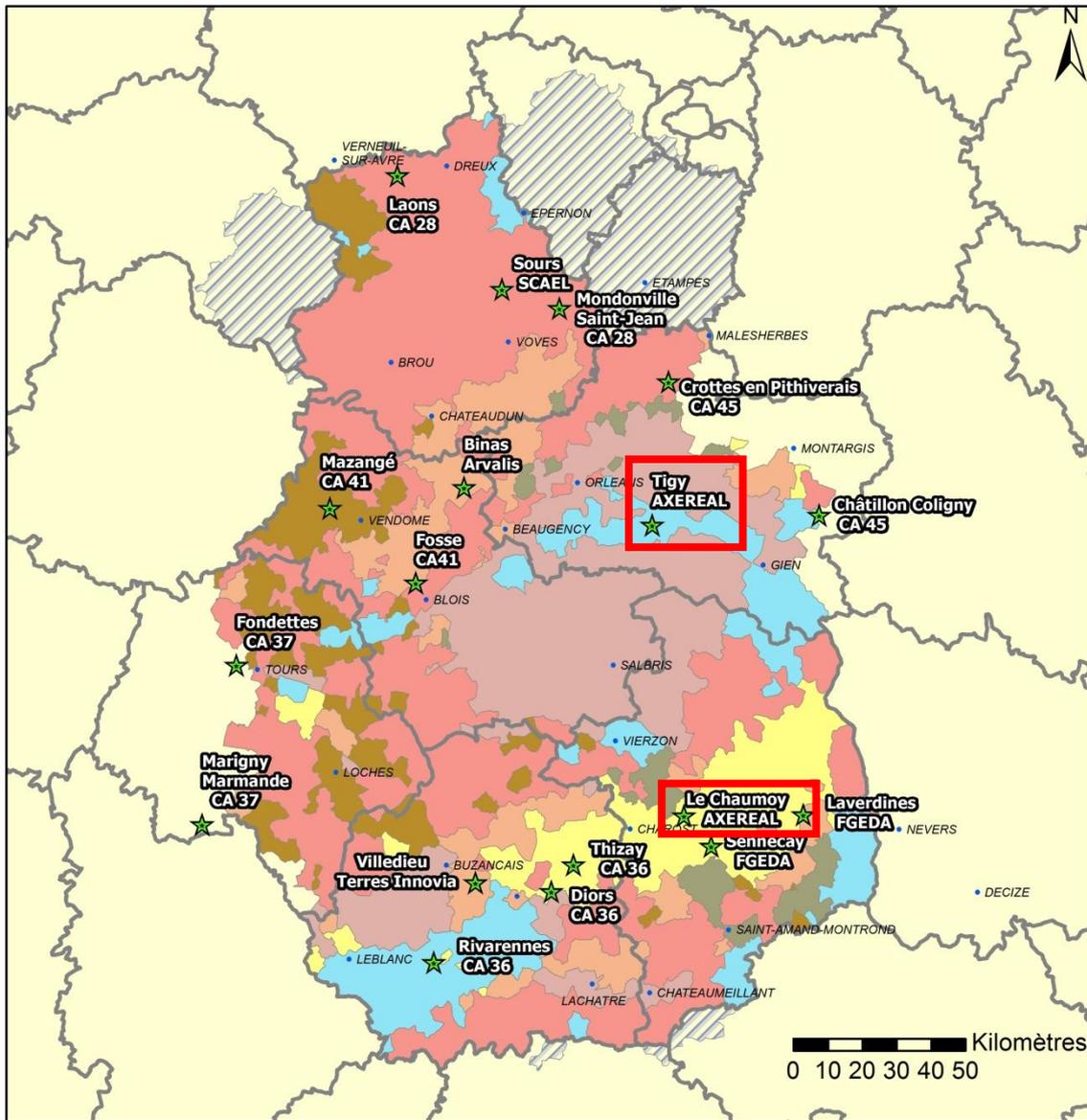
- Comparer expérimentalement les performances des différentes stratégies de fertilisation azotée de ces différentes méthodes (rendement, teneur en protéines des grains, pertes azotées)
- Tester les nouvelles stratégies dans des situations agricoles représentatives de la région
- Tester les nouvelles stratégies dans des situations extrêmes qui risquent de les mettre en défaut, pour étudier leurs limites potentielles
- Tester et diffuser cette nouvelle méthode aux agriculteurs du territoire

Au travers des différents partenaires du projet, le projet veut évaluer leurs modèles et les règles de décisions choisies dans une diversité de situations climatiques, pédologiques et culturales. Suite à cette évaluation, les règles de décision d'apport d'azote au blé seront réadaptées et optimisées. Elles seront comparées aux méthodes préconisées actuellement comme la méthode du bilan et Farmstar. En tant que partenaire du projet, Axéreal est en charge du suivi de deux essais qui sont situés au Chaumoy (18) et à Tigy (45). Mes missions ont donc été de réaliser un suivi des deux essais, de choisir les dates d'apports selon l'état azoté du couvert, les conditions climatiques et les modalités, d'analyser les résultats obtenus et d'évaluer les performances et limites des nouvelles méthodes proposées. A l'échelle du projet, j'ai été aussi en charge d'évaluer la fiabilité des outils utilisés pour estimer l'INN.

Les problématiques de mon stage sont donc :

- Quelles sont les performances agronomiques, environnementales et économiques des nouvelles méthodes proposées par rapport à la méthode traditionnelle du bilan sur les essais menés par Axéreal ?
- Quelles sont leurs stratégies de fertilisation et en quoi se différencient-elles ?
- Les nouvelles méthodes proposées sont-elles adaptées aux situations pédoclimatiques de nos deux essais expérimentaux ?
- Quelles limites et perspectives pouvons-nous identifier à ces nouveaux paradigmes suite à la réalisation et au suivi de nos essais ?
- Enfin, quel est l'outil le plus pertinent pour évaluer l'INN au cours du cycle de la plante ?

Localisation des essais du projet Solinazo sur la carte agro-pédologique de la région Centre - Val de Loire



Sols dominants	
★ Essais	Sables limoneux
▨ Sols non déterminés	Sables sains
■ Argilo-calcaires moyens sur calcaire dur	Terres caillouteuses/Argiles
■ Argilo-calcaires profonds - Limons argileux sur calcaire	Terres très argileuses
■ Limons	

Guy Deshayes - Service agronomie et innovations - Axéreal

Figure 9 : Localisation de l'ensemble des essais du projet (en rouge, ceux d'Axéreal)

I/ Matériel et méthodes

1) Présentation des parcelles expérimentales

Dans le cadre du projet, le choix des parcelles expérimentales est particulièrement important puisqu'il doit permettre de tester les nouvelles méthodes dans des conditions pédoclimatiques de la région Centre les plus diverses possibles. La figure 9 présente l'ensemble des essais réalisés par les différents partenaires. Ils couvrent l'ensemble du territoire hormis la zone centrale occupée par la Sologne.

a) Parcelle expérimentale à Tigy (45)

Localisée sur les terrasses de Loire, le sol est un sable profond sain (75,6% de sable) de 90 cm de profondeur formé par des dépôts alluvionnaires issus de l'érosion du massif Central. C'est un sol à structure fragile car il est instable et sensible à la battance. Les interventions après les pluies sont donc à limiter fortement. La réserve utile est moyenne (65 mm). Ce sol a un capital limité par un faible taux de matière organique (de 1.5‰) et un pH non optimum (autour de 6) pour la culture de blé tendre.

Le climat est tempéré de type océanique dégradé. Il se caractérise par des hivers doux (3 à 4°C) et des étés frais (autour de 17°C). La moyenne annuelle des précipitations est de 640 mm et la somme des degrés jours de 4350.

Le semis a été réalisé le 28 octobre 2017 avec une dose de 345 grains par m². La variété de blé tendre d'hiver utilisée est Sy Mattis. Elle est la 16^{ème} variété cultivée dans la coopérative avec 2% des surfaces et est de qualité Blé Panifiable Supérieur (BPS). Elle se caractérise par un potentiel de production correct et une très bonne résistance au froid, à la verse et aux maladies du feuillage et de l'épi. Le précédent cultural est du maïs récolté le 10 octobre 2017 pour un rendement de 13 tonnes par hectare. L'agriculteur étant en techniques culturales simplifiées (TCS), les résidus de maïs ont été enfouis avec des disques mais une partie est restée en surface. L'inconvénient de cette pratique est le possible développement de fusarioses. Le choix de la variété Sy Mattis s'explique par sa relativement bonne tolérance à cette maladie.

b) Parcelle expérimentale au Domaine du Chaumoy (18)

Le sol est de type limon argilo-sableux. Il repose sur un plateau calcaire de Bourges de profondeur moyenne supérieure à 90 cm. Le sol s'est formé à partir de l'érosion de ce calcaire auquel se sont ajoutés des dépôts éoliens de limon de la dernière glaciation. Sa réserve utile est importante (168 mm). Par sa tendance limoneuse, il est sensible au tassement et au risque de battance. L'activité biologique du sol est limitée par le manque d'aération du sol.

Au niveau chimique, la matière organique est moyenne (1.9‰) et le bilan humique déficitaire sur la parcelle du fait d'un manque de restitutions de produits organiques au sol (pas de cultures intermédiaires). Le pH est de 6.8, ce qui est parfait pour le blé tendre.

Le climat est océanique dégradé (les hivers sont frais, humides et les étés chauds). La moyenne annuelle des précipitations est de 742 mm et la somme des degrés jours de 4500.

Le semis a été réalisé le 20 octobre 2017 avec la variété RGT Sacramento. Cette dernière a été choisie car elle est la quatrième variété cultivée au sein de la coopérative en occupant 10% des surfaces de blé tendre d'hiver. Elle possède un potentiel de rendement élevé, une bonne teneur en protéines et une qualité Blé Panifiable Supérieur (BPS). La densité de semis est plus faible qu'à Tigy avec 220 grains par m². L'itinéraire technique de la culture est présenté dans la figure 10. Le précédent cultural était un colza avec un rendement de 40 q/ha dont les résidus ont été enfouis.

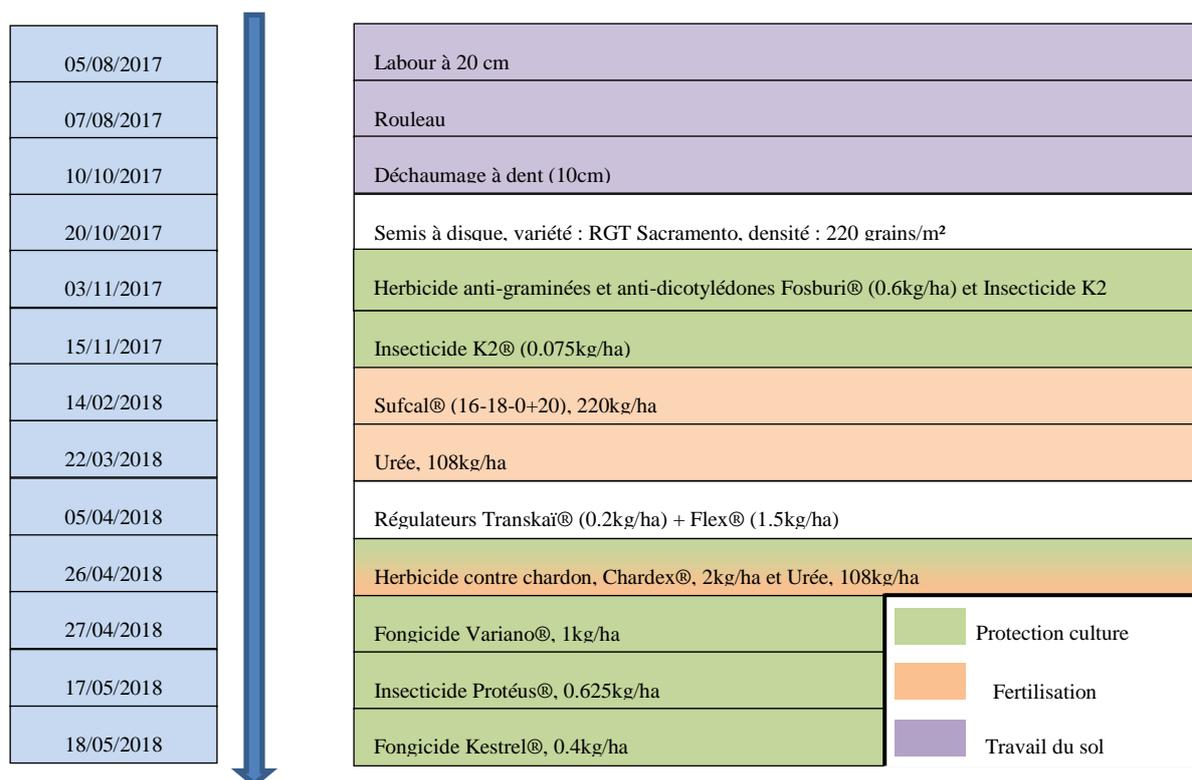


Figure 10 : Itinéraire technique sur la parcelle du Chaumoy

Modalités	Usage	Notations Axérial	Notations INRA	Présentation de la modalité
Témoin	Rendement	1	S0	Aucun apport d'azote réalisé
Témoin	Prélèvement	2	S0	Aucun apport d'azote réalisé
Bilan	Rendement	3	S1	Suivi de la méthode du bilan : 3 ou 4 apports d'azote (tallage, Epi 1cm et DFE)
Bilan	Prélèvement	4	S1	Suivi de la méthode du bilan : 3 ou 4 apports d'azote (tallage, Epi 1cm et DFE)
APPI-N	Rendement	5	S2	Suivi de la méthode APPI-N
APPI-N	Prélèvement	6	S2	Suivi de la méthode APPI-N
CHN	Rendement	7	S3	Suivi de la méthode CHN
CHN	Prélèvement	8	S3	Suivi de la méthode CHN
Farmstar	Rendement	9	S4	Méthode du bilan avec modulation du dernier apport par Farmstar
X-40	Rendement	10	S5	Méthode du bilan en retirant 40u au deuxième apport
X+40	Rendement	11	S6	Méthode du bilan en ajoutant 40u au deuxième apport
Alternative	Rendement	12	S7	40u apportées au tallage, apport suivant une observation visuelle du couvert et dernier apport modulé à la pince N-Tester

Tableau 3 : Présentation des modalités retenues pour les essais et leurs notations respectives

A l'échelle de nos essais, les nouvelles méthodes proposées sont donc bien testées dans deux situations différentes (sols sableux vs limoneux, pratiques conventionnelles vs techniques culturales simplifiées).

2) Structure des parcelles

Sur chaque site expérimental, les différentes modalités correspondent aux raisonnements de fertilisation azotée que l'on souhaite évaluer et comparer. Elles sont présentées dans le tableau 3. Le nom des modalités diffère suivant que l'on considère les notations utilisées par l'INRA (de S0 à S7) ou celles d'Axérial (de 1 à 12). Pour plus de clarté, nous retiendrons la notation de l'INRA dans ce rapport.

Pour les modalités S0 (témoin), S1 (méthode du bilan), S2 (méthode APPI-N) et S3 (méthode CHN), les microparcelles sont doublées pour chaque répétition. En effet, pour ces modalités, de nombreuses mesures et prélèvements sont à prévoir. Afin de ne pas pénaliser ces modalités par nos passages réguliers, une des microparcelles servira à la réalisation des mesures. Pour la modalité S0, on l'appellera S0' (respectivement S1', S2' et S3' pour les trois autres). L'autre microparcelle que l'on notera soit S0, S1, S2 et S3 est laissée intacte pour la détermination du rendement et du taux de protéines à la récolte.

Pour la modalité Farmstar (S4), la résolution des satellites ne permet d'avoir un conseil d'apport à la microparcelle. Le conseil fourni pour l'ensemble de la parcelle agriculteur est utilisé pour réaliser les apports.

Les dimensions et le plan des essais sont présentés dans la figure 11 (page suivante) et sont communs pour les deux sites. La longueur de 9,5 m est liée à la dimension du pulvérisateur de l'agriculteur. La largeur des microparcelles correspond à la largeur de la barre de coupe de la moissonneuse expérimentale (1,5 m) à laquelle est ajoutée 1,5 m pour prendre en compte l'effet bordure (contaminations accidentelles des parcelles voisines lors d'apports d'azote). Les essais sont organisés en 4 blocs soit 4 répétitions par modalité. Dans les quatre blocs, les modalités sont randomisées. Il est à noter que pour les modalités S0, S1, S2 et S3, les parcelles doublées (par exemple S0 et S0') sont toujours accolées. Cela permet de limiter les risques d'hétérogénéité entre la zone de prélèvement et celle servant à la récolte.

Sur les bords de l'essai, nous pouvons retrouver des microparcelles de garde. Elles permettent d'isoler l'essai du reste du champ et d'éviter toute potentielle contamination extérieure (notamment lorsque l'agriculteur fertilise le reste de sa parcelle). Quatre de ces zones sont surfertilisées (c'est-à-dire qu'elles ont reçu une dose d'azote supérieure de 100 unités à ce que préconise la méthode du bilan) et servent comme zone étalon pour la pince N-Tester.

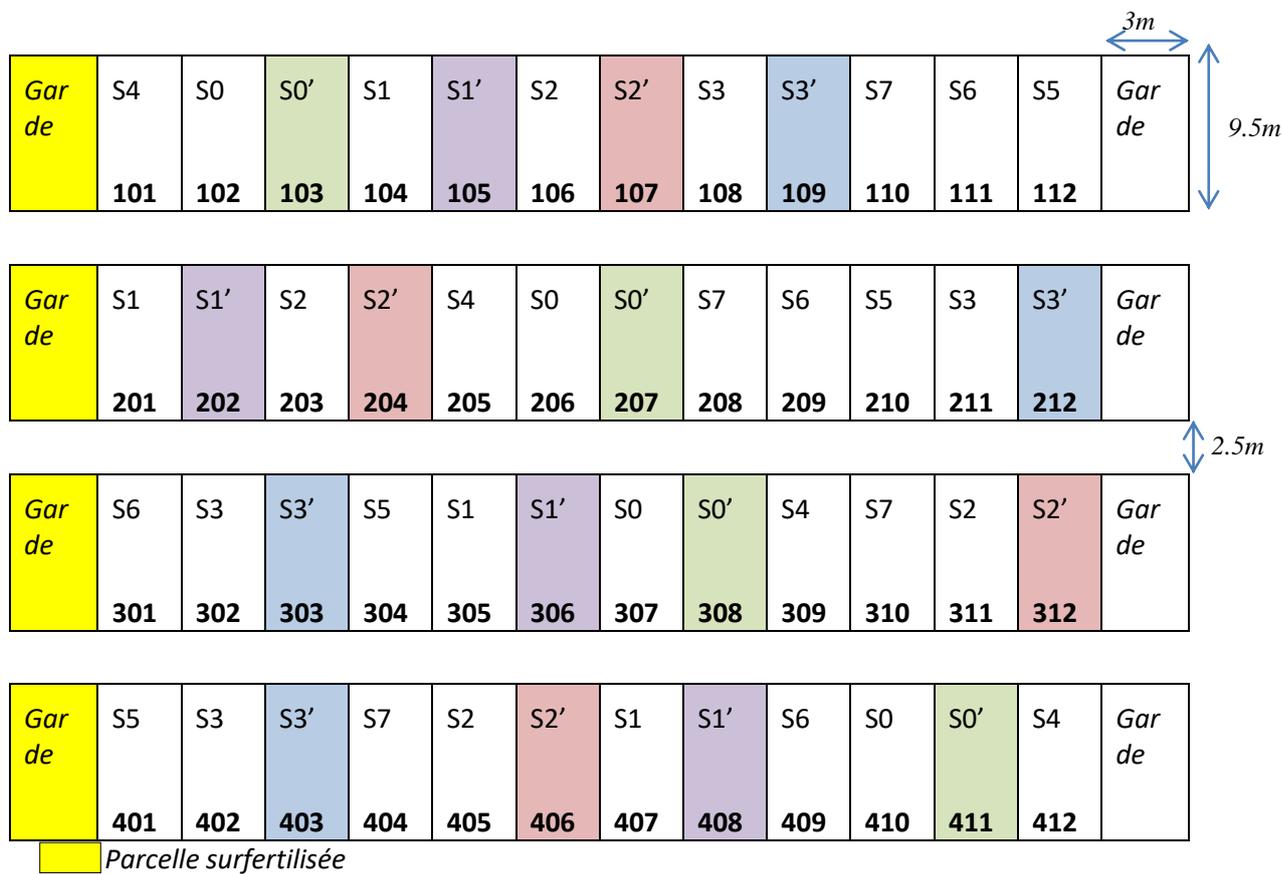
3) Mesures et suivi des essais

Suivant la méthode de pilotage, différentes mesures sont à réaliser. Elles sont résumées dans tableau 4 (page suivante). A chaque visite de la parcelle, nous notons le stade de la culture ainsi que des observations sur l'état du couvert (présence de maladies, ravageurs, adventices...).

a) Suivi de l'INN du couvert pour les modalités APPI-N et Alternative

Pour la modalité S2, des mesures N-Tester sont réalisées à intervalle régulier (tous les 10-15 jours) depuis le tallage jusqu'à la floraison de la plante. Cela permet de suivre régulièrement l'INN de la plante et donc son état de nutrition azotée, données nécessaires ensuite pour déterminer la dose à apporter.

L'outil utilisé est la pince N-Tester de Yara. Cet outil dispose de deux diodes qui émettent de la lumière rouge et infrarouge et mesure leur transmittance à travers la feuille. Cette grandeur



Les autres microparcelles colorées correspondent aux zones de prélèvement des modalités associées

Figure 11 : Plan et dimensions des essais

Modalité	Témoin (S0')	Bilan (S1')	APPI-N (S2')	CHN (S3')
Entrée et sortie hiver	Profil d'azote minéral			
Tallage	Coupe Biomasse			
Epi 1-cm		Coupe Biomasse	Coupe Biomasse	Coupe Biomasse
2 Noeuds		Coupe Biomasse	Coupe Biomasse	Coupe Biomasse +profil d'azote minéral
Dernière Feuille Etalée		Coupe Biomasse	Coupe Biomasse	Coupe Biomasse
Floraison	Coupe Biomasse	Coupe Biomasse	Coupe Biomasse	Coupe Biomasse +profil d'azote minéral
Récolte	Coupe Biomasse +profil d'azote minéral			

Tableau 4 : Stades et modalités où sont réalisés les coupes de biomasse et les profils d'azote minéral

est liée à la teneur en chlorophylle de la plante qui est corrélée à sa teneur en azote (Padilla et al., 2014). Cette mesure est non destructive et se réalise sur le limbe foliaire.

Avant usage sur le terrain, l'outil est calibré à l'aide d'un disque à valeur de transmittance connue. Ensuite, la mesure se fait directement au champ sur trente feuilles aléatoirement prises dans la microparcelle. L'appareil fournit une valeur moyenne de teneur en chlorophylle. Pour une modalité, nous mesurons cette valeur pour les quatre répétitions et calculons une moyenne. Nous suivons le même procédé pour la parcelle surfertilisée dite étalon. L'INN du couvert est déduit du ratio entre la valeur de la modalité et de l'étalon. Par l'abaque, cet INN nous préconise ensuite une dose à apporter.

Sur la modalité alternative (S7), les derniers apports sont pilotés avec la pince N-Tester. Le protocole suivi est le même que pour la modalité S2.

b) Prélèvements de biomasse et de reliquat

Aux stades tallage, épi 1 cm, 2 nœuds, DFE et floraison sont réalisés des prélèvements de biomasse. Le tableau 4 résume les stades d'intervention en fonction des modalités. Pour les quatre répétitions de chaque modalité, deux placettes de 2 rangs de 1 mètre linéaire sont coupées. Elles sont ensuite pesées pour déterminer la biomasse fraîche. Après passage à l'étuve (2 jours à 80°C), la biomasse sèche est évaluée. Ensuite, un sous-échantillon pour chaque modalité est prélevé. Il est envoyé au laboratoire pour doser l'azote Dumas. Cette technique consiste en une combustion des tissus végétaux, une réduction par le cuivre puis à une analyse du diazote obtenue par chromatographie en phase gazeuse. Elle permet de mesurer la quantité totale d'azote contenue dans la plante (Jeuffroy, Recous, 1999).

Les mesures obtenues pour la modalité CHN permettent de corriger le modèle de culture. Pour S0, S1 et S2, les mesures de la biomasse et de la teneur en azote du couvert permettent de comparer l'évolution du couvert et de l'INN au cours du cycle en fonction de la méthode de fertilisation choisie.

Concernant le reliquat azoté, il est mesuré en entrée et sortie d'hiver. Il est nécessaire pour déterminer la dose prévisionnelle X de la méthode du bilan. Il est déterminé une nouvelle fois au stade 2 nœuds et à la floraison pour la modalité S3. Les valeurs obtenues permettent de corriger le modèle CHN. Enfin, il est évalué en post récolte pour les modalités S0, S1, S2 et S3 afin de faire un bilan azoté complet.

Les reliquats sont réalisés, à l'aide d'une tarière, sur 3 horizons (0 – 30, 30 – 60 et 60 – 90 cm). Les échantillons de chaque horizon sont ensuite envoyés séparément au laboratoire. Les résultats permettent de connaître la teneur en nitrate (NO₃⁻) et ammonium (NH₄⁺) par horizon et d'en déduire la valeur globale du reliquat azoté du sol.

c) Mesures à la récolte

Le nombre d'épis par m² est évalué avant la récolte. Il est calculé sur 2 rangs de culture sur une longueur de 50 cm. Pour chaque microparcelle, 2 répétitions sont réalisées.

A la récolte, 3 types d'indicateurs sont évalués:

- Des indicateurs de production qui sont des variables quantitatives (rendement, poids de mille grains et le nombre d'épis par m²). Ils sont mesurés séparément pour les quatre répétitions de chaque modalité. Ils permettent ensuite de calculer le nombre de grains par m² et le nombre de grains par épi.
- Des indicateurs de qualité de production (taux d'humidité et de protéines) pour toutes les modalités. Le taux de protéines est évalué par analyseur de céréales (Infratec™).
- Des indicateurs permettant de réaliser un bilan d'azote en fin de culture. Pour cela, la

Valeurs brutes du HNT		Valeurs du ratio modalité/surfertilisé pour HNT et Greenseeker	INN
Avant 2 Nœuds	Après 2 Nœuds		
< 470		< 0,81	< 0.6
470 - 500	< 490	0,82 - 0,86	0.6 - 0.7
500 - 540	490 - 520	0,87 - 0,91	0.7 - 0.8
540 - 570	520 - 560	0,92 - 0,93	0.8 - 0.9
570 - 610	560 - 590	0,94 - 0,96	0.9 - 1.0
610 - 645	590 - 625	0,96 - 0,97	1.0 - 1.1
645 - 680	625 - 660	0,97 - 0,98	1.1 - 1.2

Tableau 5 : Tableau de correspondances entre valeurs des appareils et INN

matière sèche des pailles, des épis et des grains ainsi que leurs teneurs en azote respectives sont déterminées. En complément, un reliquat azoté du sol est réalisé.

Dans chaque microparcelle des modalités S0, S1, S2 et S3 et juste avant récolte, il est prélevé deux répétitions de deux rangs de 1m linéaire. En station, les épis sont ensuite séparés des pailles, puis sont battus. Les balles obtenues sont mélangées aux pailles et placées à l'étuve pour détermination de la biomasse sèche. Les grains sont aussi séchés et pesés. Des sous-échantillons sont ensuite envoyés au laboratoire pour mesurer le pourcentage d'azote. Le protocole plus précis est présenté en annexe.

Le rendement est mesuré par la moissonneuse expérimentale et le taux d'humidité, le taux de protéines et le PMG par les techniciens en station expérimentale.

4) Création d'une base de données pour l'étude de la fiabilité des outils

Pour APPI-N, l'évaluation de l'INN est primordiale car il permet de déterminer, par les abaques, la dose d'azote à apporter. Sur l'ensemble du projet SOLINAZO, l'INN a été mesuré par deux appareils : le Hydro N-Tester (HNT) et le Greenseeker. Le Greenseeker mesure la lumière réfléchiée par le couvert pour deux longueurs d'ondes (rouge et proche infra-rouge) et en déduit l'Indice de Végétation par Différence Normalisé (NDVI). Ce dernier est corrélé à la teneur en azote et à la biomasse de la plante ce qui permet d'obtenir une valeur d'INN du couvert. Au vu des retours des différents partenaires, une étude de la fiabilité de ces appareils est nécessaire afin d'estimer le biais qu'ils engendrent dans la réalisation de la méthode.

Pour cette étude, les données de 11 sites du projet ont été récupérées. Elles sont constituées de mesures obtenues par HNT et Greenseeker, de biomasse et de teneur en azote à différents stades de la culture pour la modalité APPI-N.

Avec le N-Tester, deux manières existent pour obtenir les valeurs d'INN :

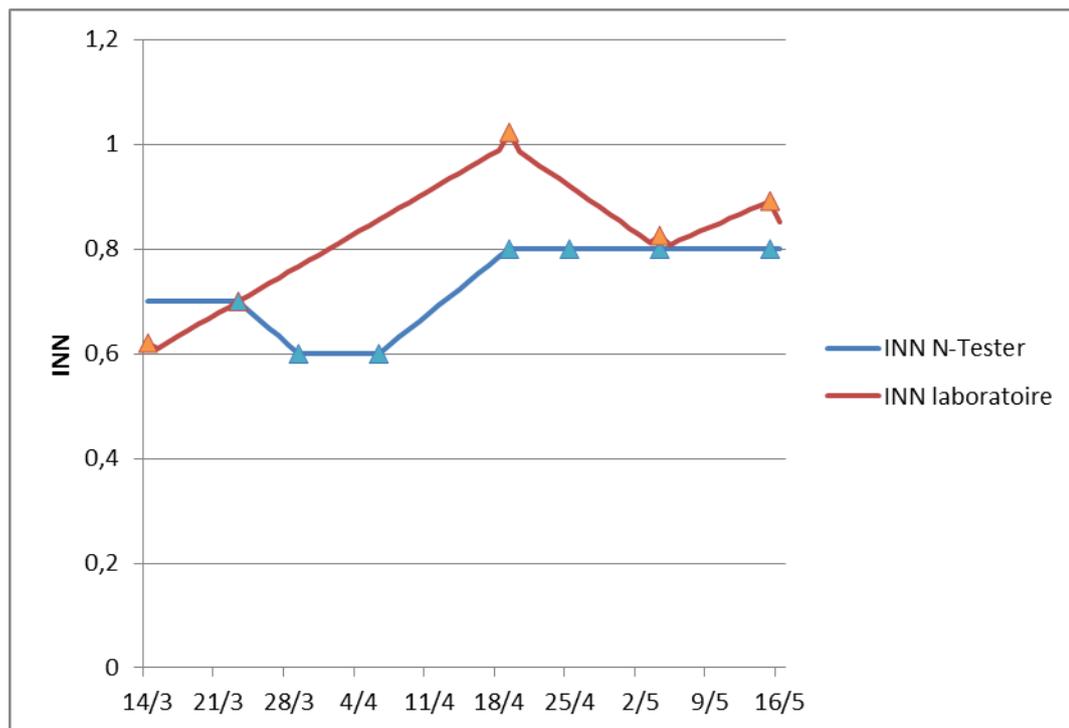
- La première est de calculer le ratio entre la mesure faite sur la modalité et celle sur la parcelle surfertilisée. Le ratio est ensuite converti en INN par le tableau de correspondance présenté du tableau 5.
- La deuxième est d'utiliser directement les valeurs mesurées par l'appareil. Par le tableau de correspondance du tableau 5, la valeur de l'INN est récupérée.

Dans la base de données, les deux INN ont été calculés. Pour plus de clarté, nous appellerons INN HNT relatif celui obtenu par le ratio et INN HNT brut celui calculé sans ratio. Pour l'outil Greenseeker, seul l'INN relatif est utilisée. Les INN obtenus par les outils se présentent sous forme d'un intervalle. Afin de pouvoir comparer statistiquement les INN entre eux, les intervalles de ces derniers ont été convertis en valeurs numériques en ne retenant que la borne supérieure.

En utilisant la formule établie par Justes et al. en 1994 (cf partie II2)), l'INN, que l'on appellera INN laboratoire par la suite, a pu être calculé avec les données de biomasses et de teneur en azote.

Au regard des abaques (cf tableau 2) la fiabilité demandée aux appareils est de 0.1 (écart minimum d'INN pour lequel l'abaque peut induire un conseil de dose à apporter différent pour APPI-N). Dans la base de données, les INN labo ont donc été arrondies au nombre supérieur (pour être en cohérence avec le chiffrage des intervalles HNT et Greenseeker) à une décimale après la virgule.

Enfin, pour certaines données, les mesures de Greenseeker et de HNT n'ont pas été réalisées le même jour que le prélèvement servant à évaluer la biomasse et teneur en azote. Ceci induit



NB : Les points mis en exergue correspondent aux mesures terrain

Figure 12 : Résultat graphique d'extrapolation de l'INN laboratoire et de l'INN N-Tester par la fonction approx de R pour le site de Châtillon-Coligny (45)

Partenaire	Site	DT Bilan (u)	DT APPI-N (u)	Diff. avec le bilan	DT CHN (u)	Diff. avec le bilan
Axéréal	Le Chaumoy	170	140	-30	130	-40
Axéréal	Tigy	190	160	-30	190	0
Scael	Sours	195	140	-55	170	-25
Arvalis	Binas	200	120	-80	155	-45
FDGEDA	Gindre	160	180	20	120	-40
FDGEDA	HDLC	186	140	-46	190	4
CA 37	Fondettes	185	160	-25	120	-65
CA 37	Marigny Marmande	200	160	-40	163	-37
CA 36	Diors	170	100	-70	170	0
CA 36	Rivarennnes	130	100	-30	150	20
CA 41	Mazangé	140	120	-20	150	10
CA 41	Fosse	130	120	-10	140	10
CA 45	Châtillon-Coligny	173	80		120	-53
CA 45	Crottes-en-Pithiverais	260	80		180	-80
CA 28	Mondoville Saint-Jean	150	180	30	90	-60
CA 28	Laons	230	180	-50	140	-90
Total		179.3	135	-31.1	148.6	-30.7
Ecart-type		34.9	33.9		28.2	

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des doses totales (DT) pour les différentes situations et leurs différences par rapport à la méthode traditionnelle du bilan (diff. avec bilan)

Note : les cases en rouge et bleu correspondent aux valeurs extrêmes de la variable

donc un biais pour la comparaison de l'INN laboratoire à celui obtenu par l'outil. Sur R, il a été réalisé une approximation des valeurs d'INN (fonction approx) sur l'ensemble du cycle de la plante pour chaque site et outil. Un exemple de résultat obtenu est présenté sur la figure 12. Une fois les données récupérées, il a été retenu uniquement les INN labo, HNT et Greenseeker des dates où un prélèvement de biomasse a été réalisé. Ceci permet de comparer dans l'étude statistique des valeurs réelles ou approximées de HNT ou Greenseeker à des valeurs mesurées d'INN labo. La nouvelle base de données ainsi constituée (annexe 12 et 13) comporte 44 lignes, c'est-à-dire 44 couples de valeurs INN labo et outils, sur laquelle vont être réalisées différentes études statistiques.

II/ Résultats

1) Stratégies de fertilisation des méthodes APPI-N et CHN

a) Les méthodes APPI-N et CHN sont économes en intrants

Pour les sites d'Axéreal, les doses totales du bilan sont présentées dans les deuxièmes et troisièmes lignes du tableau 6. Les caractéristiques sableuses de Tigy font que sa dose totale est supérieure de 20u à celle du Chaumoy. La dose totale d'APPI-N est inférieure de 30u pour les deux sites par rapport à celle de la méthode du bilan. Celle de CHN est 40u en dessous du bilan au Chaumoy et égale à la méthode traditionnelle pour Tigy. Pour nos essais, les nouvelles méthodes se caractérisent donc par une diminution de la dose totale d'azote apporté aux cultures.

Par la suite, les données des doses totales par modalité ont pu être récupérées pour seize sites du projet SOLINAZO. Le tableau 6 en fait la synthèse. Sur l'ensemble des essais du projet, la dose totale moyenne pour la méthode du bilan est de 179.3u (=kgN/ha). Celle d'APPI-N est inférieure de 31.1u et celle de CHN de 30.7u. Cette année, les deux méthodes ont donc permis de réduire en moyenne les apports azotés de 16% par rapport à la méthode traditionnelle. Cette économie d'apport est dépendante du site et de la méthode utilisée.

Pour APPI-N, seulement deux essais sur l'ensemble du projet ont une dose totale plus importante que celle du bilan. Pour les autres, la dose est réduite par rapport à la méthode de référence (quatre sites sur les seize présentent des écarts au bilan de plus de 50u). Pour CHN, nous notons 3 essais qui ont une dose supérieure et 4 essais qui présentent des écarts de dose de plus de 50u par rapport à la méthode de référence. Ceci nous montre que l'impact des nouvelles méthodes sur la dose d'engrais à apporter est fortement dépendant du contexte pédoclimatique et que l'économie d'intrants prévue par la méthode doit être considérée à une échelle globale. Dans le cadre du projet, nous pouvons estimer cette moyenne à 30u pour les deux méthodes.

Par la suite, les écarts-types de CHN et APPI-N sont du même ordre de grandeur que celui du bilan ce qui signifie que leurs distributions autour de la moyenne sont similaires et qu'elles n'induisent pas de valeurs extrêmes d'apports. Enfin, pour douze des seize sites, l'écart entre dose totale APPI-N et CHN dépasse 20u, ce qui montre bien que les deux méthodes diffèrent fortement et présentent des stratégies de fertilisation différentes dans les mêmes conditions pédoclimatiques.

b) Des apports plus tardifs dans le cycle de la plante

Les apports CHN et APPI-N de Tigy et du Chaumoy sont résumés dans le tableau 7. La figure 13 présente la moyenne des dates et doses des apports pour les modalités bilan, APPI-N et

Date	Bilan (S1)	APPI-N (S2)	CHN (S3)	Farmstar (S4)	X-40 (S5)	X+40 (S6)	Alternative (S7)
13/03/2018	40	0	0	40	40	40	40
22/03/2018	0	80	70	0	0	0	0
29/03/2018	90	0	0	110	50	130	0
24/04/2018	40	0	60	60	40	40	80
27/04/2018	0	60	0	0	0	0	0
Total	170	140	130	210	130	210	120

Site du Chaumoy

Date	Bilan (S1)	APPI-N (S2)	CHN (S3)	Farmstar (S4)	X-40 (S5)	X+40 (S6)	Alternative (S7)
14/03/2018	40	0	40	40	40	40	40
23/03/2018	0	40	0	0	0	0	0
11/04/2018	110	40	0	100	70	100	0
25/04/2018	0	40	70	30	0	50	60
11/05/2018	40	40	0	0	40	40	60
22/05/2018	0	0	80	70	0	0	0
Total	190	160	190	240	150	230	160

Site de Tigy

Tableau 7 : Résumé des dates et doses d'apport suivant les modalités pour les deux essais d'Axérial

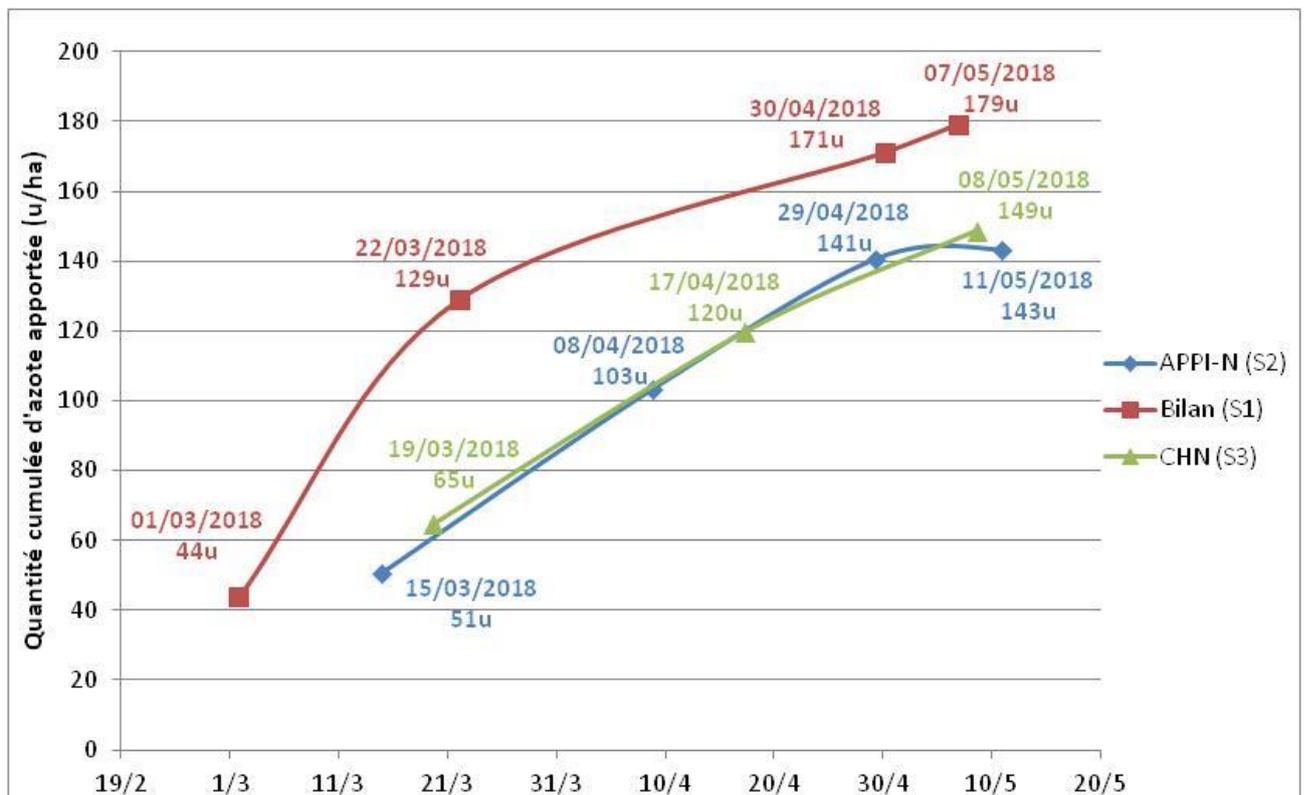


Figure 13 : Plan de fertilisation moyen cumulé obtenu sur les seize sites du projet pour les modalités bilan, APPI-N et CHN

CHN pour seize sites du projet pour lesquels les données ont été récupérées.

Pour nos essais (tableau 7), le premier apport de ces modalités a été retardé de 10 jours par rapport à la méthode de référence hormis pour Tigy où le premier apport de CHN a été réalisé le même jour que celui du bilan. Pour les apports suivants, APPI-N et CHN se distinguent par des apports plus tardifs. Au Chaumoy, ces modalités ont reçu leurs deuxièmes apports à DFE. A Tigy, les derniers apports de CHN ont été faits entre 2N et floraison et APPI-N se caractérise plus par des apports réguliers de 40u de fin mars à début mai.

Sur l'ensemble des sites du projet (figure 13), nous retrouvons que les apports d'APPI-N et de CHN sont réalisés en moyenne plus tard dans le cycle de la plante que les apports du bilan. Le premier apport des modalités APPI-N (resp. CHN) est décalé de 14 jours (resp. 18) par rapport à celui du bilan. Il se rapproche du deuxième apport bilan (entre 6 et 3 jours d'écart en moyenne). Les doses apportées pour cette première intervention de la modalité APPI-N (resp. CHN) représentent 58% (respectivement 74%) de la dose du deuxième apport du bilan.

Les deuxième et troisième apports d'APPI-N sont reportés entre 1 nœud et fin montaison (7 et 30 avril). Pour CHN, le second est 13 jours avant fin montaison (17 avril) et le dernier une dizaine de jours après ce stade (8 mai). Les deuxième et troisième apports pour CHN sont donc plus tardifs de 10 jours en moyenne par rapport à APPI-N. Pour les deux méthodes, les doses du deuxième apport sont de 50u et de 30-40u pour le troisième apport. La faible valeur observée de ce dernier est liée à l'absence pour certains sites d'un troisième apport.

En résumé, les nouvelles méthodes proposent des apports d'azote plus tardifs dans le cycle cultural de la plante que la méthode du bilan. CHN se distingue sur l'ensemble du projet par des interventions retardées de 10 jours en moyenne par rapport à la méthode APPI-N.

c) Une culture mise sous stress azoté

Pour évaluer l'INN, il est nécessaire de connaître la teneur en azote réelle du couvert (Nabs) et la teneur critique (Nc). Cette dernière est corrélée à la biomasse sèche du couvert en t/ha par la relation suivante : si la biomasse sèche < 1.55 t/ha, $N_c = 4.4$ sinon $N_c = 5.35 * [\text{Biomasse sèche}]^{(-0.442)}$ (Justes et al., 1994). Des prélèvements de biomasse à épi 1-cm, 2 nœuds, DFE et floraison ont été réalisés. Ils permettent d'évaluer pour chacune des modalités la biomasse sèche après passage à l'étuve et la teneur en azote des plantes par analyse laboratoire (Nabs). Nous ne nous intéresserons ici qu'à l'INN obtenu en laboratoire car il est considéré comme plus fiable que celui mesuré par N-Tester ou calculé par la méthode CHN.

i) Données d'INN pour le site du Chaumoy et de Tigy

Les courbes d'évolution d'INN pour les deux sites d'Axéreal sont présentées dans la figure 14 (page suivante). Pour le site du Chaumoy, les modalités présentent un INN < 0.95 à épi 1 cm et en fin de cycle de la plante. Le couvert a donc subi un stress azoté intense pour ces périodes. Entre DFE et floraison, ceci est lié au fait que les derniers apports ont été faits fin avril et qu'aucun autre apport n'a été réalisé par la suite (tableau 7). Ceci a entraîné une baisse de l'INN de DFE (INN entre 0.8 et 1) à Floraison (INN entre 0.6 et 0.8) et a entraîné les trajectoires d'INN des 3 modalités sous la courbe de déficit maximum tolérable (la plus basse étant APPI-N). Le franchissement de cette courbe signifie que le rendement optimum ne devrait être atteint pour aucune de ces modalités. Néanmoins, la coupe de biomasse ayant été réalisée 6 jours après floraison, l'INN obtenu pour ce stade est à nuancer.

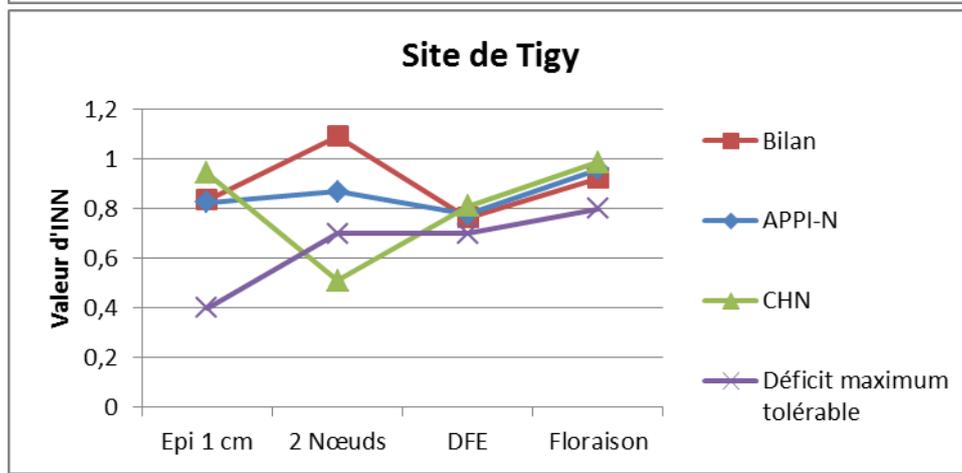
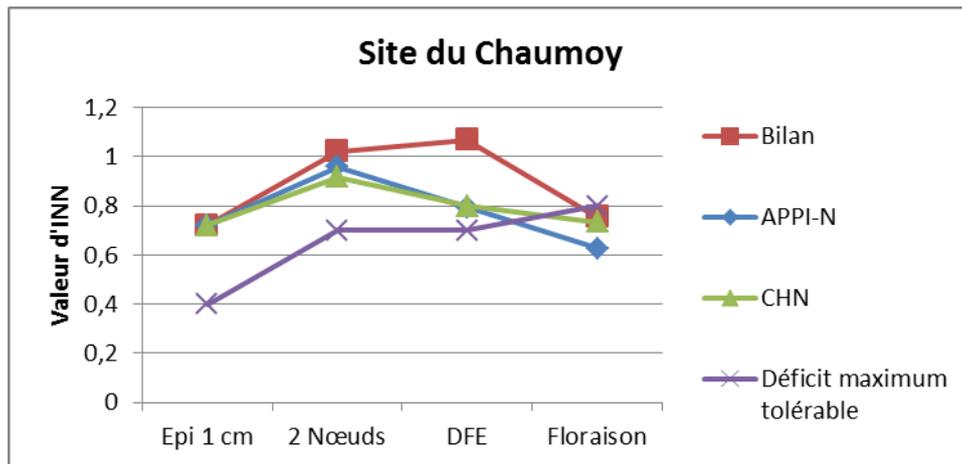


Figure 14 : Présentation des valeurs d'INN selon les stades de la culture

Note : les courbes tracées entre les points n'ont aucune validation expérimentale, elles permettent juste de faciliter la lecture des graphiques et les comparaisons entre modalités

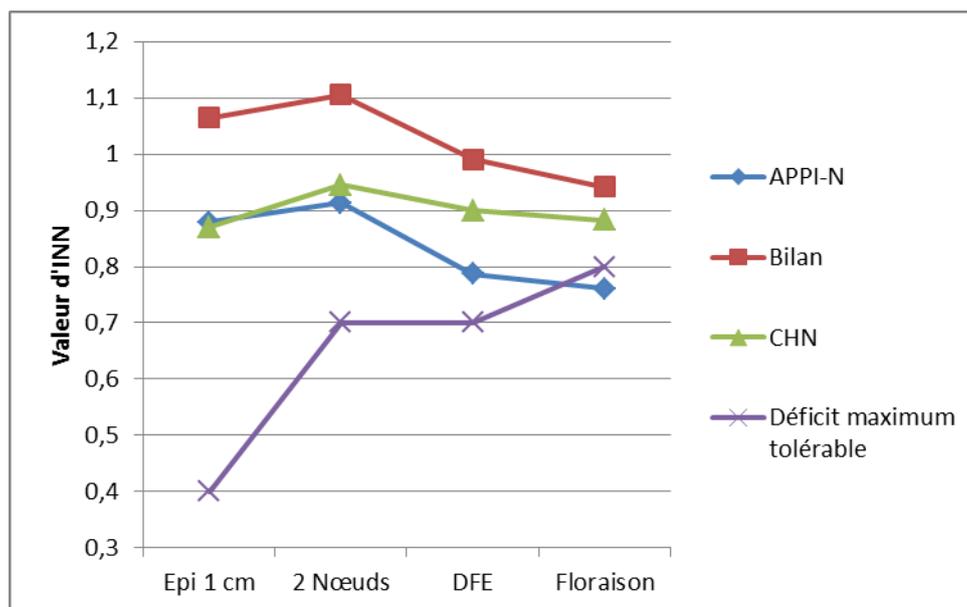


Figure 15 : Evolution de l'INN sur l'ensemble du cycle de la plante suivant les modalités (moyennes obtenues sur 10 sites du projet)

De plus, une distinction apparaît entre les modalités au stade DFE. En effet, la méthode du bilan présente un INN supérieur de 0.3 environ. La raison principale est que la modalité conduite avec la méthode de référence, à ce stade, avait reçu 130u d'azote alors que les deux autres ont eu autour de 80u. A floraison, APPI-N se distingue par une valeur d'INN inférieure aux deux autres modalités. Au Chaumoy, les nouvelles méthodes ont donc mis le couvert dans un état de stress azoté plus conséquent que la méthode du bilan.

Pour le site de Tigy, l'état de stress pour l'ensemble des méthodes est observée pour épi 1 cm et DFE. Une distinction intervient au stade 2 nœuds entre les modalités. Le bilan présente un INN autour de 1.1, APPI-N de 0.85 et CHN de 0.5. La forte valeur d'INN pour le bilan résulte d'un apport conséquent à épi 1 cm de 110u. Celle du CHN, très faible, vient du report de la plus grande partie des apports (80%) entre 2 nœuds et floraison. En conséquence, sa trajectoire d'INN est passée sous la courbe minimale à ce stade, ce qui va limiter ses valeurs de rendement.

Pour les autres stades, aucune différence n'apparaît entre modalités. L'INN à floraison est pour les 3 entre 0.9 et 1 (l'objectif visé est donc atteint) alors même que la dose totale d'apport azoté de la méthode APPI-N est inférieure de 30u par rapport à S1 et S3.

ii) Données pour l'ensemble des sites du projet

Les données de biomasse sèche et de Nabs ont été récupérées pour 6 partenaires (10 sites). Pour chacune des 3 modalités et 4 stades, l'INN a été calculé et une trajectoire moyenne par modalité est présentée dans la figure 15. Nous observons que la courbe d'INN moyenne du bilan se situe autour de 1. Les courbes CHN et APPI-N prennent des valeurs d'INN inférieures à la méthode du bilan pour les 4 stades. Pour ces modalités, elles présentent un INN de 0.85 à épi 1 cm ce qui montre un état de carence azotée à ce stade. Ceci est lié à l'absence d'apport au tallage par rapport à la méthode traditionnelle. L'azote apporté à épi 1 cm a permis de remonter leurs valeurs d'INN entre 0.9 et 1 au stade 2 nœuds. Aux stades suivants, elles se distinguent avec des valeurs plus élevées d'INN pour la modalité CHN (autour de 0.9) que pour APPI-N (autour de 0.8).

A floraison, l'INN obtenu est de 0.88 pour CHN. CHN est en cohérence avec son objectif de 0.9 à floraison. Trois sites sur les 10 présentent un INN à floraison inférieur à l'objectif pour cette modalité. Sur l'ensemble du cycle, 6 sites ont une courbe d'INN qui ne franchit jamais le seuil minimum tolérable établi par Clémence Ravier (=courbe de déficit maximum tolérable en violet sur le graphique).

Pour APPI-N, la méthode laisse un couvert en carence azotée en fin de cycle. L'INN à floraison (INN=0.76) est en moyenne inférieur au seuil minimal toléré. Seulement la moitié des sites (4 sur 8) ont une trajectoire d'INN ne franchissant pas le déficit maximum tolérable pour cette modalité. Il apparaît donc que CHN permet, à dose totale égale, de rester au-dessus de ce déficit pour plus de sites qu'APPI-N et de mieux atteindre l'objectif de 0.9 fixé.

En conclusion, ces courbes montrent que sur l'ensemble du projet, CHN et APPI-N sont systématiquement en dessous de la méthode du bilan et d'un INN de 0.95, quel que soit le stade. Le couvert est donc en stress azoté tout le long du cycle. Ce dernier est plus accentué pour la modalité APPI-N que pour CHN. L'INN de la modalité APPI-N diminue progressivement au cours du cycle de la plante et les valeurs les plus basses prises par APPI-N (resp. par CHN) sont au stade DFE et floraison (resp. au stade épi 1 cm).

Modalité	Rdt (q/ha)	PMG	Nbre grain au m ²	Nbre épis au m ²	Nbre grains/épi	% Prot	% Hum	P.S.
Témoin (S0)	45.6 F	39.8	11458 E	428 C	26 C	8.5 D	11.5 B	73.6 D
Bilan (S1)	95.3 B	39.9	23885 A	700 AB	34 AB	11.2 B	11.7 AB	76.8 AB
APPI-N (S2)	93.1 BC	40.0	23294 AB	645 AB	35 AB	11.1 BC	11.6 AB	77.0 AB
CHN (S3)	90.2 CD	40.1	22470 BC	598 AB	36 AB	10.7 BC	11.7 AB	76.4 BC
Farmstar (S4)	100.0 A	41.6	24036 AB	666 AB	35 AB	12.3 A	11.8 A	77.3 A
X-40 (S5)	88.9 D	41.4	21459 CD	671 AB	31 AB	10.5 C	11.5 B	75.7 AB
X+40 (S6)	99.6 A	40.6	24496 A	703 A	34 A	12.2 A	11.7 AB	76.8 C
Altern. (S7)	85.1 E	41.4	20561 D	578 B	35 B	10.6 BC	11.7 AB	77.1 AB
Moyenne	87.2	40.4	21567	623	623	10.9	11.6	76.3
Moyenne sans témoin	93.2	40.5	23012	651	651	11.2	11.7	76.7
p.value	<2e-16		<2e-16	2.03e-08	0.00199	1.98E-13	0.0104	3.67E-12

Tableau 8 : Présentation des résultats de la récolte sur l'essai du Chaumoy

Modalité	Rdt (q/ha)	PMG	Nbre grain au m ²	Nbre d'épi au m ²	Nbre grains/épi	% Prot	% Hum	P.S.
Témoin (S0)	42.0 C	42.40	9641 D	363 B	27 B	11.1	12.7	74.3
Bilan (S1)	94.1 A	41.11	22262 AB	460 AB	49 A	12.5	12.6	75.4
APPI-N (S2)	89.9 AB	41.25	21123 BC	554 A	39 AB	12.9	12.3	75.6
CHN (S3)	88.6 AB	38.79	22112 ABC	480 AB	46 A	13.8	12.2	75.3
Farmstar (S4)	96.5 A	42.60	21960 BC	518 AB	43 A	14.1	12.3	75.8
X-40 (S5)	88.4 AB	40.91	21004 BC	465 AB	46 A	12.3	12.6	76.2
X+40 (S6)	97.5 A	38.74	24383 A	538 A	46 A	13.7	12.3	75
Altern. (S7)	84.3 B	41.06	19897 C	522 AB	38 AB	13.2	12.3	75.7
Moyenne	85.1	40.86	20298	487	42	13.0	12.4	75.4
Moyenne sans témoin	91.3	40.6	21820.2	505.2	43.9	13.2	12.4	75.6
p.value	9.83E-15		3.63E-15	0.004936	0.000277			

Tableau 9 : Présentation des résultats de la récolte sur l'essai de Tigy

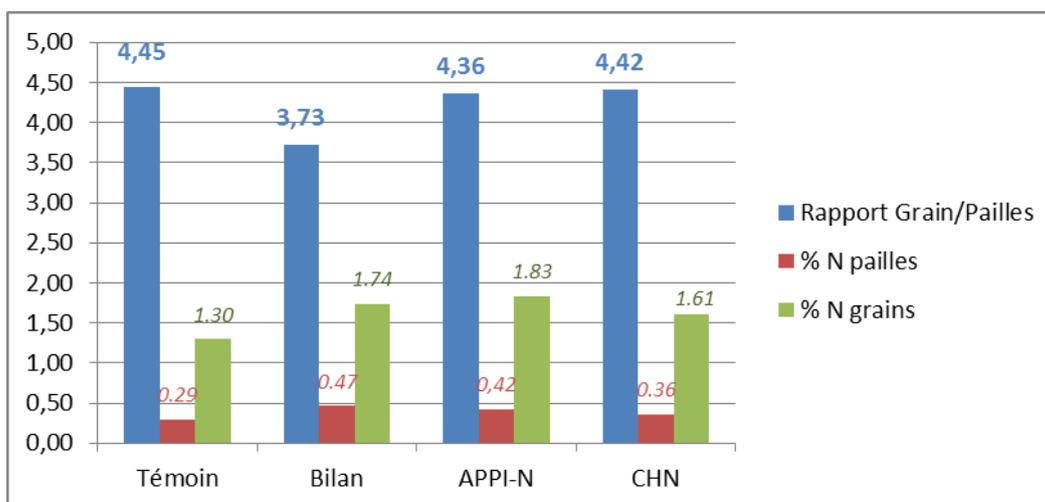


Figure 16 : Présentation du rapport grain sur paille et de ses composantes des modalités témoin, Bilan, APPI-N et CHN pour le site du Chaumoy

2) Performances des différentes modalités

a) Analyse du nombre d'épis par m²

L'observation du jeu de données montre une distinction entre les deux sites d'Axéreal (tableau 8 et 9). Toutes modalités confondues, le site de Tigy a en moyenne 130 épis de moins qu'au Chaumoy. Une analyse de variance a été réalisée sur le logiciel R. Le seuil de significativité retenu ici est de 5%. L'effet site (Tigy ou Chaumoy) est bien significatif (Estimate = 68, p.value = 3.18e-16). Pour les deux essais confondus, nous observons un nombre plus important d'épis pour la modalité APPI-N (Estimate = 44, p.value = 0.021440). En réalisant une analyse de variance par site, nous observons que :

- Pour Le Chaumoy, le nombre d'épis est plus important pour la méthode du bilan (Estimate= 76, p.value = 0.00450) alors que celui de la méthode APPI-N n'est pas significatif par rapport à la moyenne de l'essai.
- Pour Tigy, la méthode du bilan n'est plus significative (p.value = 0.27191), c'est la méthode APPI-N qui a un nombre d'épis significativement plus conséquent (Estimate = 67, p.value= 0.00938).

La significativité de la modalité S2 pour les deux sites confondus résulte donc d'une performance particulière de cette dernière sur Tigy (son nombre d'épis est le plus dense de l'essai). La méthode du bilan semble quant à elle avoir souffert des conditions agro-pédoclimatiques de cet endroit (son nombre d'épis est semblable à la modalité X-40).

b) Performance en terme de production

Pour ce qui est de la récolte, l'analyse de variance montre bien qu'il y a un effet modalité sur les variables rendement, teneur en protéines et poids spécifique. Pour le rendement, il a été converti en rendement normé à 15% d'humidité. Le test de Newman-Keuls au seuil de 5% permet de définir différents groupes homogènes.

i) Site du Chaumoy (*tableau 8*)

La modalité bilan se caractérise par un fort nombre de grains au m² (25000) de même que Farmstar et X+40. Leur point commun est un apport important à épi 1 cm ce qui explique le fort nombre de grains. Son PMG est faible par rapport aux autres modalités ce qui laisse supposer un moindre remplissage des grains.

En rendement, la modalité APPI-N n'est pas significativement différente de la modalité bilan mais possède des valeurs plus basses (2 q/ha de différence en moyenne). APPI-N a moins de grains au m² (23500). La différence dans le nombre de grains au m² entre bilan et APPI-N s'explique par la densité d'épis avant récolte significativement plus forte pour le bilan. Le rapport grains sur pailles d'APPI-N étant supérieur de 20% par rapport à celui du bilan (figure 16), cette modalité a donc eu un bon remplissage du grain. La méthode du bilan a donc favorisé un nombre important d'épis et de grains alors qu'APPI-N a compensé un nombre de grains faible par un meilleur remplissage. Pour la teneur en protéines, aucune différence entre modalités n'est à constater.

Le rendement pour CHN est inférieur de 3-5 quintaux aux deux modalités précédentes. Il en est de même pour la teneur en protéines Nous pouvons rapprocher cette méthode des résultats obtenus avec X-40. Le PMG est correct (autour de 40), c'est le nombre de grains qui est faible et qui limite le rendement.

	Prix du blé		Prix engrais (urée)		Coût d'un passage		
	182 €/t		0.65 €		6.20 €		
Modalité	Rendement normé (q/ha)	Chiffres d'affaires (€)	Dose d'engrais (u)	Coût de l'engrais (€)	Nombre de passages	Coût des interventions (€)	Marge économique (€)
Témoïn	45.6	829.8	0	0	0	0	829.8
Bilan	95.3	1733.6	170	110.5	3	18.6	1604.5
APPI-N	93.1	1694.3	140	91	2	12.4	1590.9
CHN	90.2	1641.5	130	84.5	2	12.4	1544.6
Farmstar	100.0	1820.0	210	136.5	3	27.6	1655.9
X-40	88.9	1617.7	130	84.5	3	18.6	1514.6
X+40	99.6	1812.1	210	136.5	3	18.6	1657.0
Altern.	85.1	1548.9	120	78	2	12.4	1458.5

Essai du Chaumoy

Modalité	Rendement normé (q/ha)	Chiffres d'affaires (€)	Dose d'engrais (u)	Coût de l'engrais (€)	Nombre de passages	Coût des interventions (€)	Marge économique (€)
Témoïn	42	764.4	0	0	0	0	764.4
Bilan	94.1	1712.6	190	155.8	3	18.6	1538.2
APPI-N	89.9	1636.2	160	131.2	4	24.8	1480.2
CHN	88.6	1612.5	190	155.8	3	18.6	1438.1
Farmstar	96.5	1756.3	240	196.8	4	24.8	1534.7
X-40	88.4	1608.9	150	123	3	18.6	1467.3
X+40	97.5	1774.5	230	188.6	4	24.8	1561.1
Altern.	84.3	1534.3	160	131.2	3	18.6	1384.5

Essai de Tigy

Tableau 10 : Présentation des résultats économiques des différentes modalités sur nos deux sites

ii) Site de Tigy (*tableau 9*)

Les rendements obtenus pour ce site sont légèrement inférieurs en moyenne à ceux obtenus au Chaumoy. Ceci s'explique par les conditions pédoclimatiques particulières de la parcelle (sol sableux, précédent maïs et présence de fusariose sur épi). Le nombre d'épis au m² étant inférieur de 130 par rapport au Chaumoy, ce déficit a été compensé par une fertilité accrue des épis (en moyenne 8 grains de plus par épi toutes modalités confondues). La teneur en protéines est en moyenne supérieure de 2 points pour Tigy par rapport au Chaumoy.

APPI-N a un rendement qui n'est pas significativement différent du bilan. Malgré le nombre d'épis au m² significativement plus important avant récolte, la méthode APPI-N a un nombre de grains au m² faible. Les modalités ayant un nombre de grains au m² aussi faible sont la méthode alternative et X-40. Elles se caractérisent par une dose totale inférieure par rapport aux autres modalités (*tableau 7*) entraînant une perte de grains au m². Le nombre de grains par épi d'APPI-N est de 38 alors qu'il est de 45 pour les autres modalités. Une autre hypothèse pourrait être que le fort nombre d'épis a entraîné une diminution du nombre de grains par épi et donc du nombre de grain par m².

Pour CHN, le rendement n'est pas significativement différent de celui du bilan et d'APPI-N bien qu'il soit en moyenne inférieur. Le nombre de grains est correct et le PMG très faible. Le remplissage du grain est le facteur qui a limité le rendement final. Les apports tardifs pour cette modalité et les conditions de stress hydrique de fin de cycle peuvent en être à l'origine.

Pour ce qui est de la teneur en protéine, CHN a des valeurs particulièrement élevées. Ceci est lié à des apports tardifs conséquents (150u apportées de fin avril à fin mai). APPI-N a un taux autour de la moyenne. Enfin, le bilan est celle qui a le taux le plus bas (12.5). La méthode traditionnelle a favorisé plutôt un nombre de grains important qu'un taux de protéine élevé.

En résumé, pour les deux sites, APPI-N et CHN n'ont pas dépassé en rendement le bilan dû à une dose d'azote apportée faible qui a conduit à un nombre de grain au m² limité. Cette perte de grain est compensée par un meilleur remplissage du grain. Pour ce qui est du taux de protéine, son analyse (en excluant le cas particulier de la modalité CHN à Tigy) montre que les nouvelles méthodes n'impactent aucunement sa valeur.

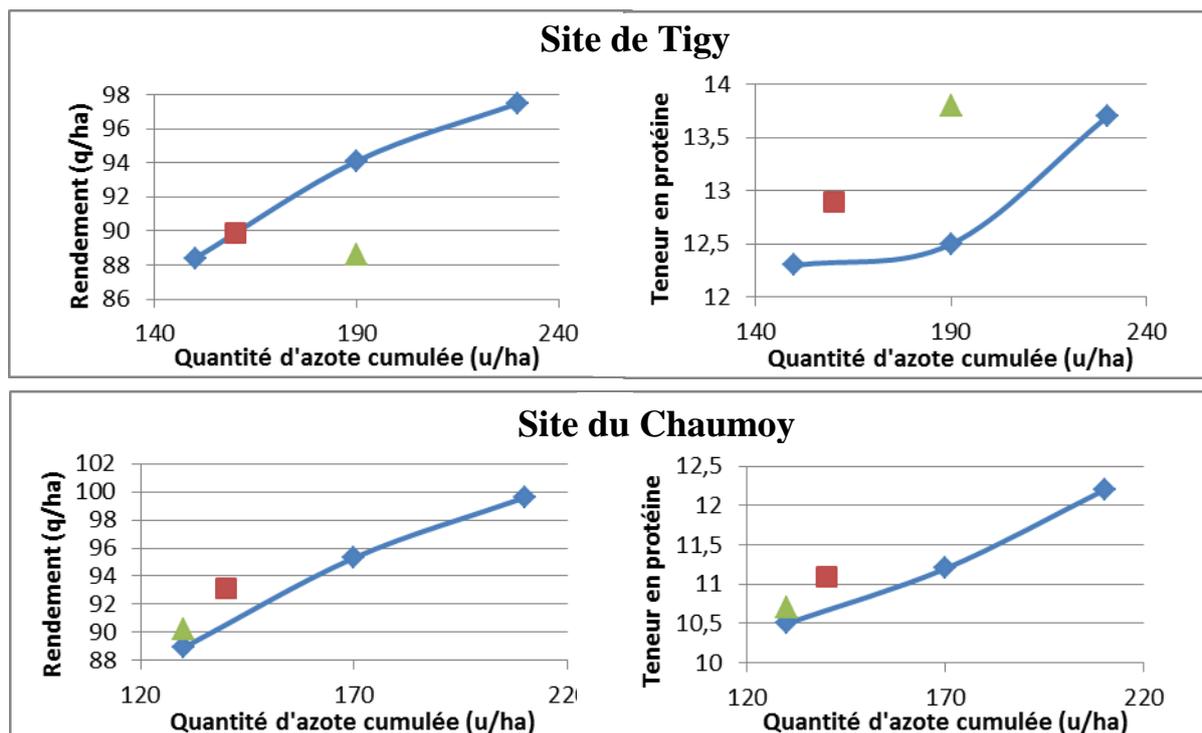
c) Performance économique

Le *tableau 10* présente le résultat économique et les différentes charges suivant la méthode utilisée. Le coût de l'équipement a été évalué grâce à des barèmes CUMA (CUMA Ouest, 2017) et le prix du blé et des engrais correspondent aux prix d'achat/de vente d'Axéreal de début juillet 2018. Pour Farmstar, l'équipement inclut l'abonnement estimé à 9€/ha.

Pour le Chaumoy, la méthode du bilan a une marge de 1604 €/ha. Bien que plus économes en intrants, APPI-N et CHN sont en dessous du bilan du point de vue économique. Le meilleur rendement et la teneur en protéines d'APPI-N rendent cette méthode plus rentable de 50 €/ha par rapport à CHN pour ce site.

Pour Tigy, la méthode du bilan est la modalité la plus performante de l'essai. APPI-N et CHN font partie des marges les plus faibles à l'hectare. De même que pour Le Chaumoy, la méthode APPI-N permet un meilleur gain (+42€/ha) que CHN par sa plus forte productivité.

En conclusion, sur nos essais et cette année, les nouvelles méthodes engendrent une



Légende : ■ Modalité APPI-N ▲ Modalité CHN ◆ Courbe de réponse

Figure 17 : Positionnement des modalités APPI-N et CHN par rapport à la courbe de réponse azote établie à l'aide des modalités X-40, X et X+40

	CAU site du Chaumoy	CAU site de Tigy	CAU moyen
Témoin			
Bilan	0.72	0.66	0.69
APPI-N	0.81	0.77	0.79
CHN	0.76	0.71	0.74
Farmstar	0.72	0.70	0.71
X-40	0.76	0.82	0.79
X+40	0.71	0.63	0.67
Alternative	0.77	0.85	0.81

Tableau 11 : Variation des Coefficients Apparents d'Utilisation (CAU) de l'azote en fonction du site et des différentes modalités

diminution de la production et du résultat économique par hectare par rapport à la méthode actuellement utilisée par les agriculteurs. Il est à noter que la modalité qui est la plus performante tant au niveau de la production (rendement et teneur en protéine) qu'au niveau économique est Farmstar sur nos essais.

3) Impact environnemental des modalités

a) Une meilleure valorisation de l'engrais

La figure 17 montre le positionnement d'APPI-N et de CHN par rapport à la courbe de réponse à l'azote. Pour le Chaumoy, les nouvelles méthodes se situent au-dessus de cette courbe pour le rendement et la teneur en protéines. Pour une même dose d'azote, elles réalisent de meilleures performances que le bilan. Pour Tigy, APPI-N est au-dessous de la courbe de réponse pour la teneur en protéines mais pas pour le rendement. CHN est fortement en-dessous pour le rendement en lien avec des apports importants en fin de cycle qui n'ont pas pu être valorisés par la plante (cf tableau 7) et un stress azoté important subi au stade 2 nœuds (cf partie 1)c)i) et figure 14). Hormis le cas particulier de Tigy, ces graphiques suggèrent donc que les nouvelles méthodes valorisent mieux les engrais azotés que le bilan.

Pour évaluer la valorisation des engrais par la modalité *i*, le CAU a été calculé par la formule :

$$CAU = \frac{QN_i - QN_{\text{témoin}}}{D_i}$$

Avec :

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

Les valeurs de CAU pour toutes les modalités sont présentées dans le tableau 5. Pour les deux sites, le bilan se caractérise par un CAU faible. Ce résultat se retrouve pour Farmstar et X+40. Ces modalités présentent les meilleurs rendements. L'augmentation de la productivité s'accompagne d'une diminution du CAU de l'engrais et favorise donc plus de pertes.

La méthode APPI-N a permis d'augmenter le CAU sur les deux sites (10% de différence en moyenne avec le bilan). Le CAU moyen d'APPI-N est le même que celui de X-40 qui a pourtant reçu une dose totale d'azote inférieure (cf tableau 7). Le gain en CAU de la méthode n'est donc pas seulement lié à la diminution de la dose totale qu'engendre cette méthode. Pour CHN, le CAU est en moyenne de 74%. Sa valeur est particulièrement faible pour le site de Tigy liée à une dose totale forte et tardive (190u). Néanmoins, en la comparant aux modalités ayant reçu une dose équivalente sur chaque site (au bilan pour Tigy et à X-40 pour Le Chaumoy), cette méthode permet bien d'accroître légèrement le CAU.

Pour les deux sites, le meilleur CAU de CHN et d'APPI-N est lié à un meilleur positionnement des dates d'apports. Ces derniers ont été réalisés plus tardivement dans le cycle de la plante, là où le CAU de l'azote est le plus important. Pour APPI-N, l'obligation de faire une intervention avec 10mm de pluie annoncée dans les 3 jours ou sur un sol humide a permis une meilleure valorisation de l'engrais.

La figure 18 résume les dates d'apports pour les principales modalités en fonction du nombre de jours nécessaires pour atteindre 20mm de pluie. Selon Arvalis, un apport est correctement valorisé si ce nombre est inférieur à 15 jours. Dans le cadre de nos essais, la plupart des

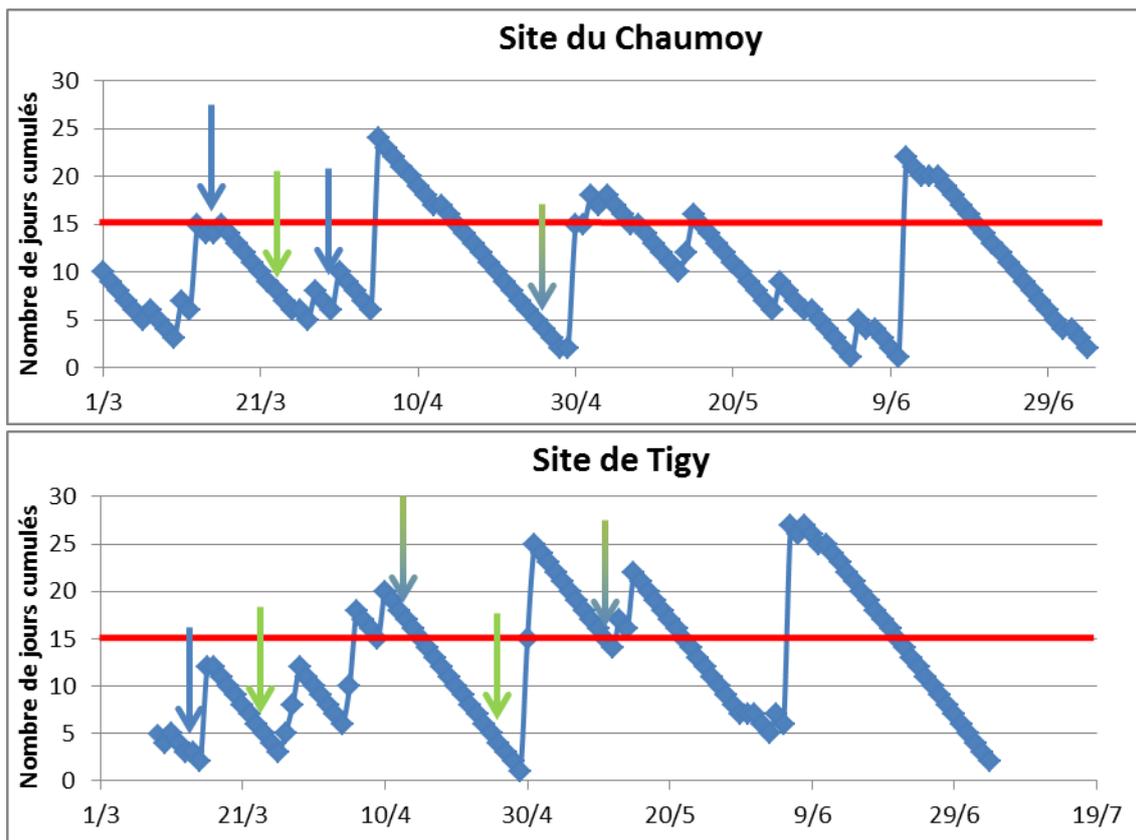


Figure 18 : Dates d’apports du bilan (flèche bleue foncée), CHN et APPI-N (flèche verte claire) en fonction du nombre de jours nécessaires pour cumuler 20 mm de pluie
Note : Les flèches en double couleurs sont celles correspondant aux dates communes d’apports du bilan, CHN et APPI-N

		<i>Le Chaumoy</i>	<i>Tigy</i>
Reliquat Post récolte (u)	Témoïn	10	39
	Bilan	19	28
	APPI-N	20	30
	CHN	22	89
RSH		46	28
Estimation de l’azote fourni à la culture par la minéralisation		33	87

Tableau 12 : Présentation des valeurs de reliquats et de minéralisation

apports satisfont ce critère. Néanmoins, le nombre de jour nécessaire est plus faible pour les apports APPI-N et CHN que pour la méthode du bilan. Les nouvelles méthodes ont donc eu pour leurs apports des conditions plus favorables à la valorisation de l'engrais que la méthode traditionnelle. En définitive, les méthodes permettent bien une meilleure valorisation de l'engrais, d'avoir de meilleure performance à dose d'azote apportée égale mais pas d'atteindre le rendement optimum.

b) Un faible reliquat post-récolte

Au Chaumoy, la mesure du reliquat post-récolte ne montre aucune différence significative entre modalités hormis pour la parcelle témoin (tableau 12). Ce dernier allant être soumis aux pluies automnales et hivernales, il apparaît que le lessivage post récolte ne sera pas moins important pour l'une ou l'autre des modalités. Pour Tigy, CHN se distingue par un très fort reliquat lié à un apport de 80u en fin de cycle (22/05) qui n'a pas été entièrement valorisé. Pour APPI-N et le bilan, aucune différence dans la valeur des reliquats n'est observable.

Mis à part la modalité CHN à Tigy, les niveaux des reliquats post-récolte sont faibles (entre 30 et 40u) et conformes aux valeurs habituellement observées (COMIFER, 2013). Les reliquats étant très bas, les nouvelles méthodes proposées n'ont pas permis de diminuer la valeur du reliquat post-récolte par rapport au bilan.

En définitive, les nouvelles méthodes permettent bien d'augmenter l'efficacité de l'engrais utilisé et donc réduisent l'impact de la fertilisation sur son environnement par son usage plus modéré. Néanmoins, sur nos essais, aucun effet d'APPI-N et CHN n'a été observé sur le lessivage des nitrates post-récolte.

4) Fiabilité des outils utilisés pour évaluer l'INN

a) Fiabilité du N-Tester

A partir de la base de données précédemment constituée (partie I4)), la réalisation d'une régression linéaire entre les valeurs d'INN HNT relative et d'INN labo du jeu de données ne montre aucune relation entre les deux variables ($R^2=0.0168$). La moyenne des écarts (=INN HNT – INN labo) entre ces dernières est de 0.014. Le N-Tester a, en moyenne, tendance à surestimer l'INN. L'écart-type des INN HNT relatif est supérieur de 50% à celui d'INN labo. Le HNT induit donc plus de variabilité dans les mesures que le laboratoire.

La distribution des écarts entre les INN relatif est présentée sur la figure 19. Les écarts se répartissent essentiellement entre -0.3 et 0.3. Uniquement 16% des mesures N-Tester réalisées (soit 7 sur 44) sont dans un écart de moins de 0.1 des INN laboratoire. L'outil n'offre donc pas une précision suffisante à la méthode APPI-N.

Le stade pour lequel l'écart entre les deux INN est le plus important est à floraison (0.136 de différence entre les deux moyennes avec des écarts pouvant aller jusqu'à 0.6). Il semble que pour les stades précoces (épi 1 cm et 2 nœuds), le HNT sous-estime l'INN alors qu'il les surestime à DFE et floraison par rapport à l'INN labo (cf tableau 13).

Pour les INN labo élevés ($INN > 1$), le N-Tester mesure en moyenne un INN inférieur de 0.1 (p.value=0.05427) alors que pour les INN labo faibles ($INN \leq 0.7$), sa moyenne est supérieure de 0.17 (p.value = 0.1428).

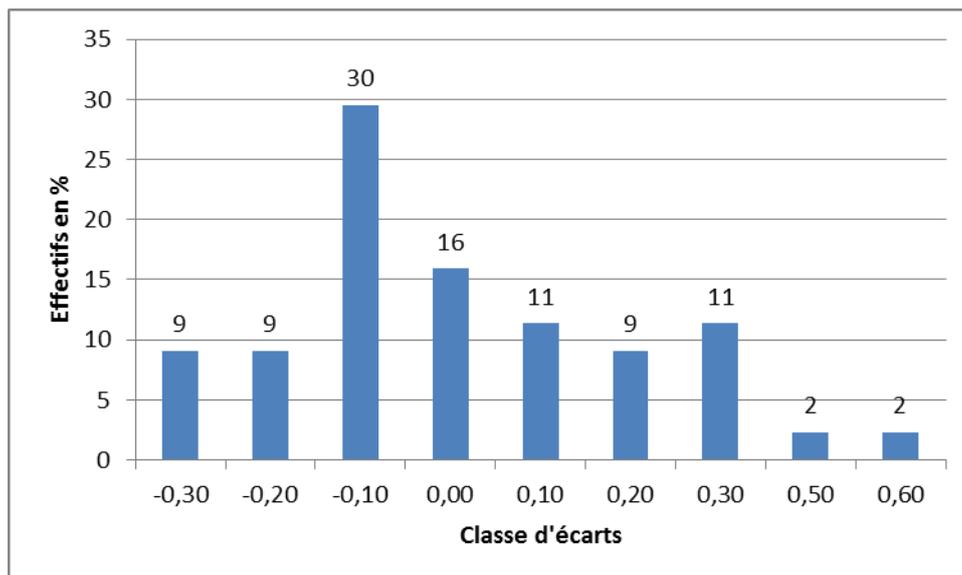


Figure 19 : Nombre de mesures par classes d'écarts (= INN N-Tester relatif – INN laboratoire)

	Epi 1-cm	2 Nœuds	DFE	Floraison
p.value	0.695	0.101	0.539	0.118
INN N-Tester	0.909	0.873	0.864	0.954
INN labo	0.936	0.964	0.827	0.818
Ecart N-Tester et labo	-0.027	-0.091	0.036	0.136

Tableau 13 : Tests de Student entre la valeur d'INN laboratoire et N-Tester selon le stade de la plante

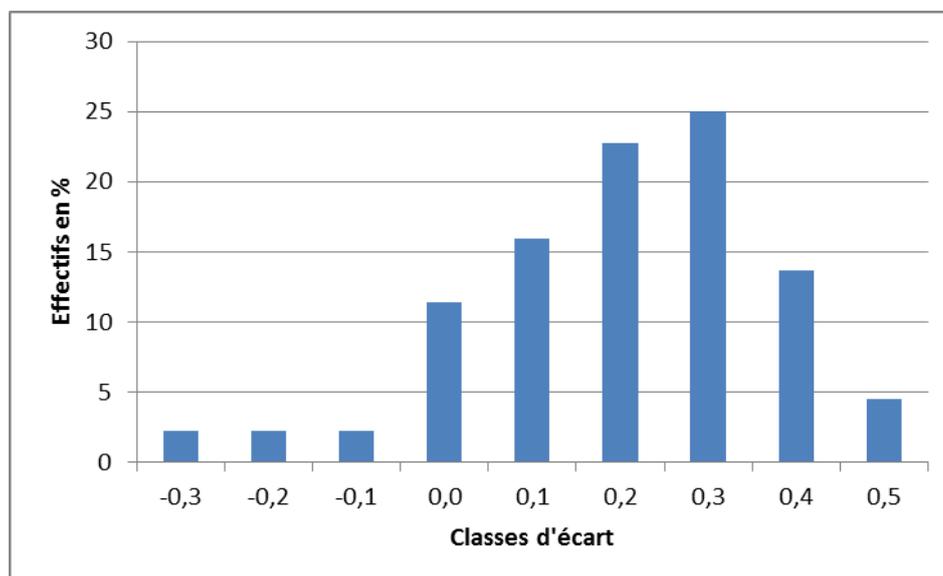


Figure 20 : Nombre de mesures par classes d'écarts (=INN N-Tester brut – INN laboratoire)

En définitive, les écarts les plus importants sont observés à floraison, pour des INN très forts (>1) et très faibles (<0.7). L'INN relatif N-Tester ne fournit donc pas suffisamment de précision pour la méthode APPI-N. Nous allons donc étudier ce qu'il en est pour l'INN brut.

En réalisant un test de Student sur R entre les valeurs d'INN brutes N-Tester et celles du laboratoire, une différence significative entre les deux moyennes est observée (p.value= 8.586e-10). L'écart est de 0.2 entre les deux ce qui signifie que dans ce cas, l'INN brut HNT surestime les valeurs d'INN du couvert. La distribution des écarts est présentée sur la figure 20. Elle s'apparente à une distribution de loi normale centrée autour de 0.2. Seuls 10% des données présentent un écart nul. Cette méthode induit donc un biais dans l'évaluation de l'INN. La réalisation du test de Student en fonction du stade de la culture montre une différence significative entre INN brut et INN labo pour 2 nœuds, DFE et floraison.

Finalement, pour cet outil, il faut privilégier le calcul de l'INN relatif par rapport à celui de l'INN brut. Néanmoins, le N-tester n'est pas assez précis dans les valeurs d'INN fournies pour être utilisé dans la méthode APPI-N. Il est particulièrement peu fiable pour des valeurs extrêmes d'INN et au stade floraison. Ceci explique d'ailleurs pourquoi la trajectoire d'INN de la modalité APPI-N du Chaumoy soit passée juste avant floraison sous la courbe de déficit maximum tolérable malgré que les mesures N-Tester ne déclenchent aucun apport azoté à réaliser à ce stade (au 07/05, le HNT a mesuré un INN de 1.1-1.2).

b) Fiabilité du Greenseeker

Pour cette partie, le jeu de données utilisé comporte 20 mesures réalisées sur 5 sites différents. Aucune relation linéaire n'existe entre l'INN Greenseeker et celui obtenu en laboratoire ($R^2=0.134$). L'écart entre la moyenne du Greenseeker et celle du laboratoire étant de 0.167, le test de Student montre un écart significatif entre les deux (p.value= 0.0005294). Le Greenseeker a donc tendance à sous-estimer les valeurs d'INN de la plante. La distribution des écarts entre l'INN Greenseeker et celui du laboratoire est présentée sur la figure 21. Celle-ci est centrée autour de -0.2 avec 30% des mesures et varie de -0.5 à +0.4.

Au regard des écarts entre les deux INN selon le stade de la culture (tableau 14), ces derniers sont plus importants pour les stades épi 1 cm et 2 nœuds (moyenne de -0.32) que pour DFE et floraison (moyenne de -0.01). En début de cycle, la végétation ne couvre pas entièrement le sol ce qui induit un biais en mesurant la réflectance du couvert et du sol. Ainsi, le Greenseeker sous-estime l'INN de la plante aux stades précoces. Des applications smartphone sont en développement pour tenter de corriger ces valeurs suivant le taux de couverture de la végétation. Néanmoins, aux autres stades (DFE et floraison), 70% des valeurs dépassent le seuil de fiabilité de 0.1 recherché pour APPI-N.

En conclusion, il apparaît au vu de nos résultats que les deux outils ne permettent pas fournir suffisamment de précision pour mener à bien la modalité APPI-N. Ces derniers induisent un fort biais dans la réalisation de la méthode, ce qui peut expliquer en partie la plus faible performance d'APPI-N par rapport aux attendus initiaux du projet.

III/ Discussion

1) Bilan des performances des nouvelles méthodes

Bien qu'elles aient dépassé le rendement objectif fixé sur Le Chaumoy et Tigy, les performances des nouvelles méthodes n'ont pas permis d'égaliser celles du bilan et de Farmstar. Le nombre de grains au m² a été limité par une dose totale faible. Au niveau teneur en protéines, leurs résultats sont similaires voire meilleurs que pour le bilan. Ceci s'explique

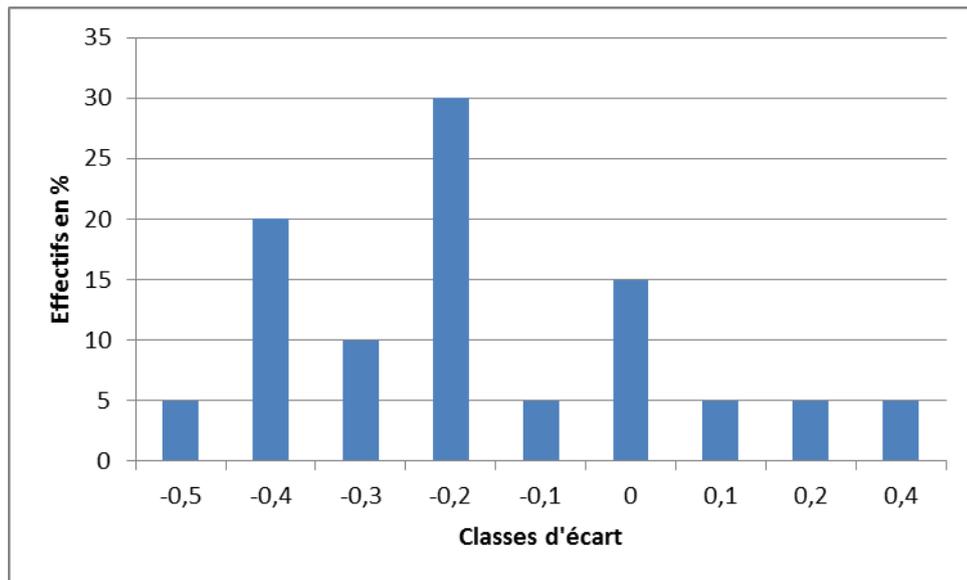


Figure 21: Nombre de mesures par classe d'écart (= INN Greenseeker – INN laboratoire)

	Epi 1-cm	2 Nœuds	DFE	Floraison
p.value	0.01047	0.002862	1	0.8385
INN Greenseeker	0.68	0.7	0.82	0.82
INN labo	0.96	1.06	0.82	0.84
Ecart N-Tester et labo	-0.28	-0.36	0	-0.02

Tableau 14 : Tests de Student entre la valeur d'INN laboratoire et Greenseeker selon le stade de la plante

par les apports plus tardifs dans le cycle de la plante qu'engendrent APPI-N et CHN.

Au niveau économique, la méthode traditionnelle et Farmstar sont les plus performantes. Dans le cadre de nos essais et pour cette année, la diminution de la dose d'engrais d'APPI-N et CHN n'a pas permis d'obtenir une meilleure marge économique que le bilan. La rentabilité des nouvelles méthodes doit donc s'appuyer sur la maximisation de cette marge tout en minimisant l'usage d'intrants. Néanmoins, il faut souligner que ces résultats sont dépendants du contexte économique de l'année. Pour conclure de manière plus définitive, il faudrait porter l'étude sur une période plus longue.

APPI-N et CHN ont permis d'accroître l'efficacité des engrais (CAU élevé) par un meilleur positionnement des apports et de diminuer les quantités à apporter. Ceci permet de réduire la consommation d'énergie fossile, à la fois par la diminution de la production industrielle d'engrais et par moins d'interventions au champ. Une meilleure valorisation de l'azote limite sa volatilisation sous forme d'ammoniac. Ces méthodes permettent bien de diminuer l'émission des gaz à effet de serre. L'enjeu est important car le poste fertilisation représente 46% des émissions totales de GES de l'agriculture qui le deuxième secteur économique le plus émetteur à l'échelle française derrière les transports (Vandaele et al., 2010).

D'un autre côté, les nouvelles méthodes n'ont pas permis de réduire le reliquat post récolte et donc le potentiel lessivage d'azote pendant les périodes automnales et hivernales. Le décalage des apports plus tardivement dans le cycle peut entraîner même un accroissement de leur volatilisation s'ils sont apportés dans de mauvaises conditions (fortes températures et présence de vents).

Une hypothèse pouvant expliquer les moindres performances obtenues sur nos essais est que les trajectoires d'INN des modalités sont passées sous le seuil maximal tolérable (figure 14). Pour Le Chaumoy, cette situation s'est observée à floraison pour toutes les modalités. A ce stade, le début de la remobilisation de l'azote des parties végétatives de la plante vers ses grains commence ce qui diminue les valeurs d'INN mesurées sur les feuilles. La réalisation du prélèvement de biomasse 6 jours plus tard que la date d'atteinte du stade auquel il aurait dû être fait peut donc expliquer le franchissement de la courbe de déficit maximum tolérable. Pour APPI-N, cette justification ne suffit pas puisque la valeur d'INN atteinte à floraison est nettement plus faible que le bilan et CHN ce qui suggère un franchissement de la courbe bien avant ce stade. L'erreur vient donc de la conduite même de cette modalité. La surestimation des valeurs d'INN par le N-Tester en fin de cycle de la plante ne nous a pas permis d'anticiper ce franchissement et de programmer un apport en conséquence.

Pour Tigy, seule la modalité CHN est passée en-dessous de la courbe minimale d'INN. Ceci est lié au décalage entre temps de retour des résultats de mesure de la biomasse sèche en laboratoire, simulation et réalisation des apports. La modalité APPI-N est la seule modalité à n'être pas passée sous le seuil minimal tolérable. Elle reste pour autant en-dessous du bilan en terme de performance ce qui montre bien que la méthode n'offre pas une meilleure production par rapport à la méthode de référence cette année.

Enfin, sur nos deux essais, APPI-N a eu de meilleurs résultats que CHN en termes de rendement et de marge économique.

2) Adaptation des nouvelles méthodes aux conditions agropédoclimatiques

Des distinctions nettes entre méthodes apparaissent selon le site. Au Chaumoy, APPI-N se caractérise par un faible nombre d'interventions avec de gros apports alors qu'à Tigy ce nombre est plus élevé avec à chaque fois, des petites quantités apportées. La méthode s'est donc bien adaptée au type de sol. Les sols sableux étant plus sensibles au lessivage des éléments, l'apport de petites quantités tout le long du cycle permet de maximiser la



17/04/2018, Guy Deshayes



29/05/2018, Guy Deshayes

Figure 22 : Photos de résidus de maïs laissés en surface qui nuisent à la densité de plante au m² sur le site de Tigy

valorisation des engrais. Au Chaumoy, la texture limono-argileuse est moins soumise au drainage et les gros apports sont susceptibles d'être mieux valorisés.

Le précédent maïs à Tigy a laissé des résidus en surface ce qui nuit à la densité de plantes (cf figure 22). Il a aussi exposé les plantes à un risque fusariose qui s'est manifestée sur quelques épis juste avant récolte. En conséquence, le nombre d'épis s'est trouvé diminué par rapport au Chaumoy. La compensation par un fort nombre de grains par épi a permis de maintenir un très bon rendement de 85 q/ha en moyenne pour l'essai. Les deux nouvelles méthodes proposées ont aussi pu maintenir un rendement autour de 90 q/ha ce qui montre qu'elles ne sont pas plus ou moins sensibles que la méthode du bilan aux facteurs extérieurs impactant la production. Néanmoins, les maladies foliaires peuvent jouer sur la qualité de l'évaluation de l'INN avec la pince N-Tester et c'est pourquoi il serait intéressant d'estimer leurs effets sur la réalisation de la méthode.

Pour APPI-N, un des facteurs limitants est les conditions d'apports qui impliquent d'avoir 10 mm de pluie dans les 3 jours qui suivent. A partir des données météorologiques collectées pour chacun des deux essais, ces conditions étaient atteignables au moins une fois par quinzaine (temps d'attente entre deux apports successifs). Cette condition n'était donc pas limitante pour nos essais cette année. Une année plus sèche aurait amené à plus de restrictions sur les dates d'apports et nuirait à sa mise en œuvre. De plus, avec l'évolution climatique prévue par le GIEC, il est fortement probable que ces jours favorables pour des apports voient leur nombre diminuer avec de grandes disparités suivant les régions.

3) Limites des outils de suivi d'INN pour la modalité APPI-N

La fiabilité des appareils ne semble pas quels que soient les stades de la culture, être adaptée au suivi de l'état azoté des plantes pour la méthode APPI-N. Sur l'ensemble du projet, la courbe moyenne des INN de cette modalité a franchi la courbe de déficit maximum tolérable à floraison, ce qui a induit une perte de rendement potentiel. La surestimation de la valeur d'INN par le N-Tester pour ce stade semble être la principale raison. A l'échelle de l'ensemble des partenaires, une étude complémentaire sur le biais qu'a engendré ce manque de précision des appareils dans les doses apportées et donc sur le rendement pourrait confirmer cet impact.

Plusieurs raisons peuvent être avancées pour expliquer la faible fiabilité des appareils :

- L'INN relatif se base sur le calcul d'un ratio. Ceci nécessite la mise en place d'une microparcelle surfertilisée sur l'essai (+120kg N/ha par rapport à la méthode du bilan). Or, cette dernière n'a pas été conduite de la même manière suivant les partenaires. Son nombre de répétitions ainsi que sa position sur l'essai ont aussi varié selon les sites.
- L'effet expérimentateur et la manière dont est prise la mesure affecte la valeur obtenue par l'appareil. Sur certains sites, les mesures par HNT se faisaient sans rentrer dans la microparcelle alors que sur d'autres essais, elles étaient effectuées dedans et de manière homogène.
- Les outils ont été utilisés en dehors de leur domaine de validité. Dans leurs notices, les constructeurs indiquent un usage entre 2 nœuds et DFE. Ils préconisent aussi de réaliser 3 mesures dans la parcelle pilotée et 3 dans la zone étalon pour obtenir la valeur de l'INN. Dans le projet, il n'a été recommandé que d'en faire une.

Tout ceci engendre donc un biais dans les valeurs obtenues par les outils et empêche une réalisation adéquate de la méthode. Pour la suite du projet, quelques pistes pour mieux évaluer l'INN peuvent être de :

- Utiliser l'INN prédit par le modèle CHN comme valeur d'entrée pour les abaques d'APPI-N. Ceci nécessite une évaluation de la fiabilité de l'INN fourni par ce modèle.
- Changer d'appareil de mesure : l'évaluation de l'INN pourrait se faire via des images satellites couplées à des mesures de terrain ou par l'outil Dualex® par exemple.
- Combiner l'usage du N-Tester et du Greenseeker sur une même microparcelle. La réalisation d'une régression linéaire multiple entre l'INN labo et les deux INN des outils pourrait amener à mieux prédire l'INN du couvert. Ici, le nombre de données étant insuffisant, l'étude n'a pas pu être réalisée. De plus, dans le cadre du projet, cela alourdirait la procédure d'évaluation de l'INN déjà gourmande en temps.

Ces pistes vont être discutées entre les différents partenaires du projet pour la mise en place de la prochaine année d'expérimentation.

4) Limites et perspectives générales

Il est à noter que pour la partie récolte, les conclusions précédentes ont été tirées uniquement des essais gérés par Axéreal (les autres données ne m'étaient pas accessibles avant la fin de mon stage). Il serait donc intéressant de voir les résultats à l'échelle de l'ensemble des partenaires du projet et de comparer les performances des différentes modalités à l'échelle de la région. De plus, ces résultats correspondent à la première année d'expérimentation d'un projet qui en comptera trois. Aussi, il y a un effet « prise en main » des nouvelles méthodes qui peut influencer les conclusions tirées. Pour réellement conclure sur la pertinence d'APPI-N et CHN, il faudra réaliser une synthèse pluriannuelle et régionale des résultats.

Dans la suite du projet, l'objectif est d'introduire, dès l'année prochaine, des agriculteurs afin qu'il puisse suivre les nouvelles méthodes sur leurs parcelles. Ceci permettra d'avoir des premiers résultats de mise en œuvre sur le terrain et de collecter des premiers retours de céréaliers sur cette nouvelle manière de raisonner les apports. En parallèle, les partenaires continueront encore pendant 2 ans de mener des essais afin d'exposer la méthode à de nouveaux scénarii climatiques, pédologiques et agronomiques.

Outre l'outil de suivi d'INN, cette année d'expérimentation a permis de mettre en évidence quelques limites et perspectives aux nouvelles méthodes proposées :

- Le rationnement en azote qu'elles imposent se fait au détriment de la production de grains au m² et donc du rendement. Il faut donc se demander si les objectifs d'INN fixés pour CHN ou bien de quantité d'azote minimale lixiviée pour APPI-N ne sont pas trop restrictifs pour être économiquement intéressants pour les acteurs agricoles. Il pourrait aussi être pertinent de faire varier ces objectifs suivant le milieu et son potentiel de production. Des sols superficiels qui retiennent peu d'eau devraient avoir des objectifs plus souples que des sols profonds à forte capacité de rétention.
- Les conditions météorologiques imposées par APPI-N pour maximiser l'efficacité de l'engrais (10 mm de pluie sur 3 jours) sont fortement dépendantes de la qualité des prévisions météo. Certains de nos apports n'ont pas satisfait à ces conditions car les prévisions annoncées étaient inexactes. L'importance d'une source fiable pour ces données est donc nécessaire pour la bonne réalisation de la méthode. Axéreal s'est doté par exemple d'un réseau de stations météorologiques Sencrop® qui permet de couvrir son territoire de collecte plus précisément.
- L'adaptation de ces méthodes par les agriculteurs nécessite de changer leur vision de la conduite d'une culture. Ces méthodes mettent sous stress azoté les couverts végétaux ce qui fait que leurs aspects diffèrent de celui observé avec la méthode de référence. Il faudra donc habituer les agriculteurs à voir un couvert manquant d'azote en début de cycle et à attendre le bon moment pour apporter.
- Les nouvelles méthodes imposent, pour décider d'un apport, de suivre l'INN tout le

long du cycle de la culture. Dans le cadre du projet, nous avons utilisé soit un N-tester soit des prélèvements destructifs dans la microparcelle pour le déterminer. Or, ceci ne pourra pas être réalisé par les agriculteurs par manque de temps et du fait du coût.

- Sur les microparcelles d'Axéreal, le bilan azoté, c'est-à-dire la différence entre les exportations et les apports sous forme d'engrais, est négatif pour APPI-N et CHN. Ces dernières induisent plus de déstockage de l'azote du sol et une potentielle surminéralisation de la matière organique. Sur le long terme, cela aura pour conséquence d'appauvrir les sols en azote et matière organique et ainsi de nuire à ses propriétés de rétention d'eau et d'éléments minéraux. Etudier sur une longue période l'effet sur l'écosystème agricole de ces nouvelles pratiques serait donc pertinent.

A l'avenir, si ces méthodes se révèlent concluantes et rentables, l'usage de capteurs embarqués sur drones, satellites et avions pourrait être une alternative à la pince N-Tester et aux prélèvements destructifs. Aujourd'hui, Farmstar utilise, pour délivrer un conseil de 3^{ème} apport, des capteurs de biomasse et de teneur en chlorophylle du couvert. En combinant ces mesures à la formule établie par Juste et al. (cf partie résultat2)), il est possible d'obtenir une valeur d'INN par parcelle qui, par les abaques, se traduit en dose à apporter.

Conclusion

Les méthodes APPI-N et CHN proposent une nouvelle manière de raisonner la fertilisation azotée du blé tendre d'hiver en répondant aux problématiques soulevées par la méthode du bilan. En s'appuyant sur des connaissances agronomiques récentes, elles cherchent à mieux valoriser l'engrais et à diminuer l'impact de l'agriculture sur son environnement. Néanmoins, cette nouvelle approche n'a pas, cette année, atteint le niveau de production optimum pour les deux sites d'Axéreal. Les conclusions sur cette dernière ne peuvent être définitives car le manque de fiabilité des outils de mesure de l'INN et les difficultés dans la réalisation même des nouvelles méthodes ont nui à leurs performances. Les deux années suivantes du projet vont proposer des solutions à ces limites et les expérimentateurs iront vers une meilleure maîtrise de la méthode. Ceci permettra de conclure de manière plus sûre sur la pertinence d'utiliser APPI-N et CHN dans le contexte pédoclimatique de la région Centre-Val de Loire.

La diffusion de ces dernières auprès des céréaliers pourrait être à l'origine d'une révolution dans le domaine de la fertilisation azotée. Cependant, elles semblent chronophages au vu du temps nécessaire pour le suivi de l'INN et de la météo. Un besoin d'automatisation de l'évaluation de l'INN et du choix des dates optimales d'apport sur une parcelle agricole (par un OAD par exemple) se dégage. APPI-N et CHN proposent aussi une nouvelle vision de la parcelle. La plante ne devra plus être cultivée dans des conditions non-limitantes mais dans des états de carences temporaires qui ne portent pas préjudice au rendement et aux taux de protéines finaux. Au vu du changement radical qu'elles proposent, les agriculteurs devront être fortement accompagnés par les instituts, chambre d'agricultures et coopératives pour éviter des pertes de productivité par manque de maîtrise.

L'application de ces méthodes sur d'autres cultures (colza, orge...) pourrait être aussi des pistes intéressantes. La combinaison avec d'autres leviers (restitution de résidus de récolte au sol, CIPAN, couverture du sol, précédent légumineuses et variétés plus efficaces en azote) pourrait amener à des diminutions drastiques de l'usage des intrants azotés à l'échelle d'une exploitation agricole et apporter une réponse aux défis environnementaux de l'agriculture.

Bibliographie

- AGENCE RÉGIONALE DE SANTÉ (ARS) CENTRE-VAL DE LOIRE, 2017. La Qualité de l'eau potable en 2016. [en ligne]. [Consulté le 1 mai 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.centre-val-de-loire.ars.sante.fr/system/files/2017-09/bilan_eau_2016_version_imprimable.pdf.
- AGRESTE CENTRE-VAL DE LOIRE, 2016. Memento de la statistique agricole - Edition 2016, p. 1-31.
- AGRESTE CENTRE-VAL DE LOIRE, 2017. Memento de la statistique agricole - Edition novembre 2017, p. 26-29.
- ARVALIS-INSTITUT DU VÉGÉTAL, 2014. Teneur en protéines des blés : relever le double défi agronomique et économique. [en ligne]. [Consulté le 1 mai 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis-infos.fr/relever-la-teneur-en-proteines-des-bles-francais-@/view-14683-arvarticle.html>.
- ARVALIS-INSTITUT DU VÉGÉTAL et CETIOM, 2014. Optimiser l'alimentation de la plante en fractionnant l'azote. *Arvalis-Cetiom Infos* [en ligne]. [Consulté le 1 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis-infos.fr/cereales-et-colza-reussir-ses-interventions-de-printemps-2014-@/view-14727-arvarticle.html>.
- ARVALIS, Institut de Végétal, 2018. Besoins unitaires en azote des variétés : de nouvelles références pour assurer rendement et protéines. [en ligne]. [Consulté le 1 mai 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis-infos.fr/les-besoins-unitaires-en-azote-des-varietes-de-ble-tendre-reactualises-pour-2017-@/view-14925-arvarticle.html>.
- AUSTIN, R.B., FORD, M.A., J.A., Edrich et BLACKWELL, R.D., 1977. The Nitrogen economy of winter wheat. *The Journal of Agricultural Science, Cambridge*. Vol. 88 (1), n° 1, p. 159-167. DOI : 10.1017/S002185960003389X.
- BARANGER, Edouard (Arvalis-Institut du Végétal), 2015. Protéines des céréales à paille Trouver des marges de manoeuvre. *Réunions Techniques 2015* [en ligne]. [Consulté le 1 août 2018]. Disponible à l'adresse : <http://docplayer.fr/68371742-Proteines-des-cereales-a-paille-trouver-des-marges-de-manoeuvre.html>.
- BOIFFIN, Jean, CANEILL, Jacques, MEYNARD, Jean-Marc et SEBILLOTTE, Michel, 1981. Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse I. Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie*, Vol. 1, p. 549-558. DOI : 10.1051/agro:19810705.
- CAMPBELL, C.A., MYERS, R.J.K. et CURTIN, D., 1995. Managing nitrogen for sustainable crop production. *Springer Link*, Vol. 42, n° 1-3, p. 277-296. DOI : <https://doi.org/10.1007/BF00750521>.
- CARLOTI, Bruno, 1992. *Recueil de bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures*. Paris : s.n.
- CERF, M. et MEYNARD, Jean-Marc, 1988. Enquête sur la mise en oeuvre des méthodes de fertilisation raisonnée. *3ème Forum de la « Fertilisation raisonnée »*. Nancy, p. 5-12.
- COÏC, Y., 1956. La nutrition et la fertilisation azotée du blé d'hiver. I. Les besoins en azote du blé d'hiver, conséquences agronomiques. *Annales Agronomiques* 5, p. 115-131.
- COLLIN, François, 2012. Modélisation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote issu d'un engrais minéral apporté sur blé tendre d'hiver. *Sciences agricoles* [en ligne]. [Consulté le 1 août 2018]. Disponible à l'adresse : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00741001>.
- COMIFER, 2013. *Calcul fertilisation azotée*. ISBN : 9782910393090.
- COQUIL, B., BORDES, J. P. et STAFFORD, J. V., 2005. FARMSTAR: an efficient decision support tool for near real time crop management from satellite images. STAFFORD, J.V. (éd.), *Precision agriculture*, p. 873-880. ISBN : 978-90-76998-69-5.

- CUMA OUEST, 2017. Epandeur d'engrais minéral Dossier 1 : Vers la précision de la dose appliquée. [en ligne]. [Consulté le 1 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.ouest.cuma.fr/sites/default/files/epandeurs_engrais_mineral-dossier_1_0.pdf.
- DEMOTES-MAINARD, Sabine, JEUFFROY, Marie-Hélène et ROBIN, Stéphane, 1999. No Spike dry matter and nitrogen accumulation before anthesis in wheat as affected by nitrogen fertilizer: relationship to kernels per spike. *ScienceDirect*. Vol. 64, n° 3, p. 249-259. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00046-5).
- FRANCEAGRIMER, 2017. Enquête Qualité des blés Récolte 2017. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.franceagrimer.fr/content/download/53574/517509/file/06> - Présentation enquête qualité des blés 2017.pdf.
- GOOS, R.J. et PRUNTY, L., 1990. Yield variability and the yield goal decision. J.L. Havlin (éd.), *Proceedings of the Great Plain Soil Fertility Conference*. Manhattan, p. 187-189.
- HOLCOMB, Jess C., SULLIVAN, Dan M., HORNECK, Donald A. et CLOUGH, George H., 2011. Effect of Irrigation Rate on Ammonia Volatilization. *ScienceDirect*. Vol. 75, n° 6, p. 8. DOI : [doi:10.2136/sssai2010.0446](https://doi.org/10.2136/sssai2010.0446).
- JEUFFROY, M. H. et RECOUS, S., 1999. Azodyn: A simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy*. Vol. 10, n° 2, p. 129-144. DOI : [10.1016/S1161-0301\(98\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00059-8).
- JEUFFROY, Marie Hélène, GATE, Philippe, MACHET, Jean Marie et RECOUS, Sylvie, 2013. Gestion de l'azote en grandes cultures : Les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales. *Cahiers Agricultures*. Vol. 22, n° 4, p. 249-257. DOI : [10.1684/agr.2013.0639](https://doi.org/10.1684/agr.2013.0639).
- JUSTES, E., 1993. *Diagnostic de la nutrition azotée du blé à partir de la teneur en nitrate de la base de la tige. Application au raisonnement de la fertilisation azotée*. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- JUSTES, E., MARY, B., MEYNARD, J.-M., MACHET, J.-M. et THELIER-HUCHE, L., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany*. Vol. 74, n° 4, p. 397-407. DOI : [10.1006/anbo.1994.1133](https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133).
- JUSTES, E., MEYNARD, J.-M., MARY, B. et PLÉNET, D., 1997. *Diagnosis Using Stem Base Extract : JUBIL Method*. S.1.
- LACROIX, Anne, 1994. Les solutions agronomiques à la pollution azotée. [en ligne]. [Consulté le 1 août 2018]. Disponible à l'adresse : <http://www7.inra.fr/lecourrier/assets/C24Lacroix.pdf>.
- LEMAIRE, G. et GASTAL, F., 1997. N Uptake and Distribution in Plant Canopies. *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops* [en ligne]. Vol. 53, n° 370, p. 3-43. DOI : [10.1007/978-3-642-60684-7_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7_1). Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-60684-7_1.
- LEMAIRE, G. et SALETTE, J., 1981. *Analyse de l'influence de la température sur la croissance de printemps de graminées fourragères*. C.R. Académie des Sciences Paris.
- 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*. [en ligne]. Institut National Polytechnique de Lorraine. Disponible à l'adresse : http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL_T_1999_LIMAUX_F.pdf.
- MAKOWSKI, David, MEYNARD, Jean-Marc et WALLACH, Daniel, 1999. Models of Yield, Grain Protein, and Residual Mineral Nitrogen Responses to Applied Nitrogen for Winter Wheat. *Agronomy Journal*. Vol. 91, n° 3, p. 377-385. DOI : [10.2134/agronj1999.00021962009100030005x](https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030005x).
- MEYNARD, J.-M., JUSTES, E., MACHET, J.M. et RECOUS, S., 1997. Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champs. G. LEMAIRE AND B. NICOLARDOT (éd.), *Maîtrise de l'azote*

dans les agrosystèmes, p. 183-200.

MEYNARD, J M, BOIFFIN, J, CANEILL, J et 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*. Vol. 1, n° 9, p. 795-806. DOI : 10.1051/agro:19810912.

MEYNARD, Jean-Marc, 1985. Les besoins en azote du blé d'hiver jusqu'au début de la montaison. Vol. 5, n° 7, p. 579-589.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, 2011. *Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions nationales à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole* [en ligne]. 2011. FRANCE. Disponible à l'adresse : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2011/12/19/DEVL1134069A/jo/texte>.

PADILLA, F.M., PEÑA-FLEITAS, M.T., GALLARDO, M. et THOMPSON, R.B., 2014. Threshold values of canopy reflectance indices and chlorophyll meter readings for optimal nitrogen nutrition of tomato. *Annals of Applied Biology*. Vol. 166, n° 2. DOI : <https://doi.org/10.1111/aab.12181>.

POWLSON, D.S., HART, P.B.S., POULTON, P.R., JOHNSTON, A.E. et JENKINSON, D.S., 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*. Vol. 118, n° 83. DOI : 10.1017/S0021859600068040.

RAVIER, Clémence, 2017. *Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation*. PARIS-SACLAY.

RAVIER, Clémence, JEUFFROY, Marie-Hélène et MEYNARD, Jean-Marc, 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: the case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *ScienceDirect* [en ligne]. Vol. 79, p. 31-40. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.10.001>. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573521416300525>.

RÉMY, JC et HÉBERT, J, 1977. Le devenir des engrais dans le sol. *Comptes Rendus Académie Agriculture France 163*, p. 700-714.

SCHVARTZ, Christian, MULLER, Jean-Charles et DECROUX, Jacques, 2005. *Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies*. Editions F. Paris. ISBN : 2-85557-120-0.

SEBILLOTTE, Michel et MEYNARD, Jean-Marc, 1990. Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. INRA (éd.), *Colloque nitrates, agriculture, eau*. Paris, p. 289-312.

SUTTON, Mark A., OENEMA, Oene, ERISMAN, Jan Willem, LEIP, Adrian, VAN GRINSVEN, Hans et WINIWARTER, Wilfried, 2011. *Too much of a good thing*. 2011. ISBN : 0028-0836.

VAN DER MIJNSBRUGGE, Adriaan, TORDEUR, Alexis, MÉLÉARD, Benoît et LE SOUDER, Christine, 2017. Fertilisation azotée du blé : Raisonner sans objectif de rendement. *Perspectives Agricoles, N°445*, p. 40-46.

VAN SANFORD, D.A. et MACKOWN, C.T., 1987. Cultivar Differences in Nitrogen Remobilization during Grain Filling in Soft Red Winter Wheat. *Crop Science*. Vol. 27, n° 2, p. 295-300. DOI : 10.2135/cropsci1987.0011183X002700020035x.

VANDAELE, Diane, LEBRETON, Amandine et FARASCO, Benoît, 2010. Agriculture et gaz à effet de serre : état des lieux et perspectives. [en ligne]. [Consulté le 1 août 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.fondation-nature-homme.org/sites/default/files/publications/101110_agriculture_et_gaz_a_effet_de_serre-etat_des_lieux_et_perspectives.pdf.

Annexe 1 : Construction des abaques avec le modèle Azodyn

1) Présentation du modèle

Azodyn est un modèle de culture mécaniste et dynamique. Il a été développé pour le blé, le colza, le pois et l'association blé-pois. Il simule le développement de la culture sur l'ensemble de son cycle et permet de confronter les fournitures en azote du sol aux besoins de la plante. Il fonctionne sur un pas de temps journalier et à l'échelle du mètre carré. Il est valide dans un grand nombre de situations agronomiques d'Europe du Nord-Ouest.

Il est organisé en deux sous-modèles : un pour le sol et l'autre pour la plante. Le module de sol se base sur la méthode du bilan (il vient de l'ancien modèle Azobil). Selon les caractéristiques du sol, le précédent, les apports réalisés et le climat, le modèle évalue les différents postes de la méthode du bilan et détermine l'évolution de la teneur en azote du sol jour par jour. Pour le module plante, la production de biomasse journalière est calculée grâce au formalisme de Monteith. En combinant ce résultat avec la courbe de dilution critique établie par Juste et al. en 1994, le modèle obtient les besoins journaliers de la plante en azote. Ensuite, pour chaque jour, la valeur du reliquat du module sol est confrontée aux besoins de la culture. Le modèle est donc capable de prédire les jours potentiels de carence azotée.

Les variables d'entrées comprennent des données climatiques (rayonnement, température, pluviométrie et ETP), pédologiques, sur les pratiques culturales et sur les stades de développement de la culture (dates de levée, épi 1 cm, 2 nœuds, DFE, épiaison et maturité). Il a aussi besoin d'une valeur de reliquat réalisée entrée ou sortie hiver pour s'initialiser. Pour ce qui est des variables de sortie, il fournit des indicateurs de production agricole (rendement, nombre de grains/m²...), de qualité (teneur en protéine) et de quantité azotée du sol, de la plante ou perdue par lixiviation.

Azodyn permet bien de prédire les dates de carence azotée d'une culture. Néanmoins, les limites de ce modèle est qu'il ne prend pas en compte la teneur en eau du sol (n'évalue pas l'effet du stress hydrique sur l'absorption en azote de la plante, la perte du nitrate par lixiviation...), les pertes gazeuses par volatilisation (notamment lors d'apport d'urée) et le développement racinaire de la culture qui joue sur l'accessibilité à la ressource azotée.

2) Construction des abaques

Un abaque est construit pour un site et une année donnée. La figure ci-dessous présente les différentes étapes de construction des abaques.

Pour chaque site, il est identifié tous les jours favorables entre le 15 février et floraison (intervalle qui correspond au domaine de validité de la courbe de dilution critique de Justes et al.). Un jour est dit favorable s'il satisfait l'une de ces deux conditions :

- ⇒ soit le cumul des pluies dans les 3 jours suivants est supérieur à 10 mm
- ⇒ soit les précipitations des 5 jours précédents dépassent l'évapotranspiration du couvert

Pour les identifier, des données fréquentielles sur 20 ans des stations météorologiques les plus proches du site sont utilisées.

Une fois fait, la période du 15 février à floraison est divisée en période de deux semaines (correspond à la période minimale nécessaire entre deux apports d'azote successifs). Par la suite, on appellera « période favorable », deux semaines où il y a au moins un jour favorable.

Pour chaque période favorable, différentes doses d'azote peuvent être appliquées. Elles vont de 0 à 100U d'azote avec un intervalle de 20U. L'ensemble des doses d'azote appliquées à chaque période favorable sur l'ensemble du cycle de la plante constitue une stratégie de fertilisation. Ensuite, chacune d'elle est saisie sur le modèle Azodyn. Les sorties du modèle

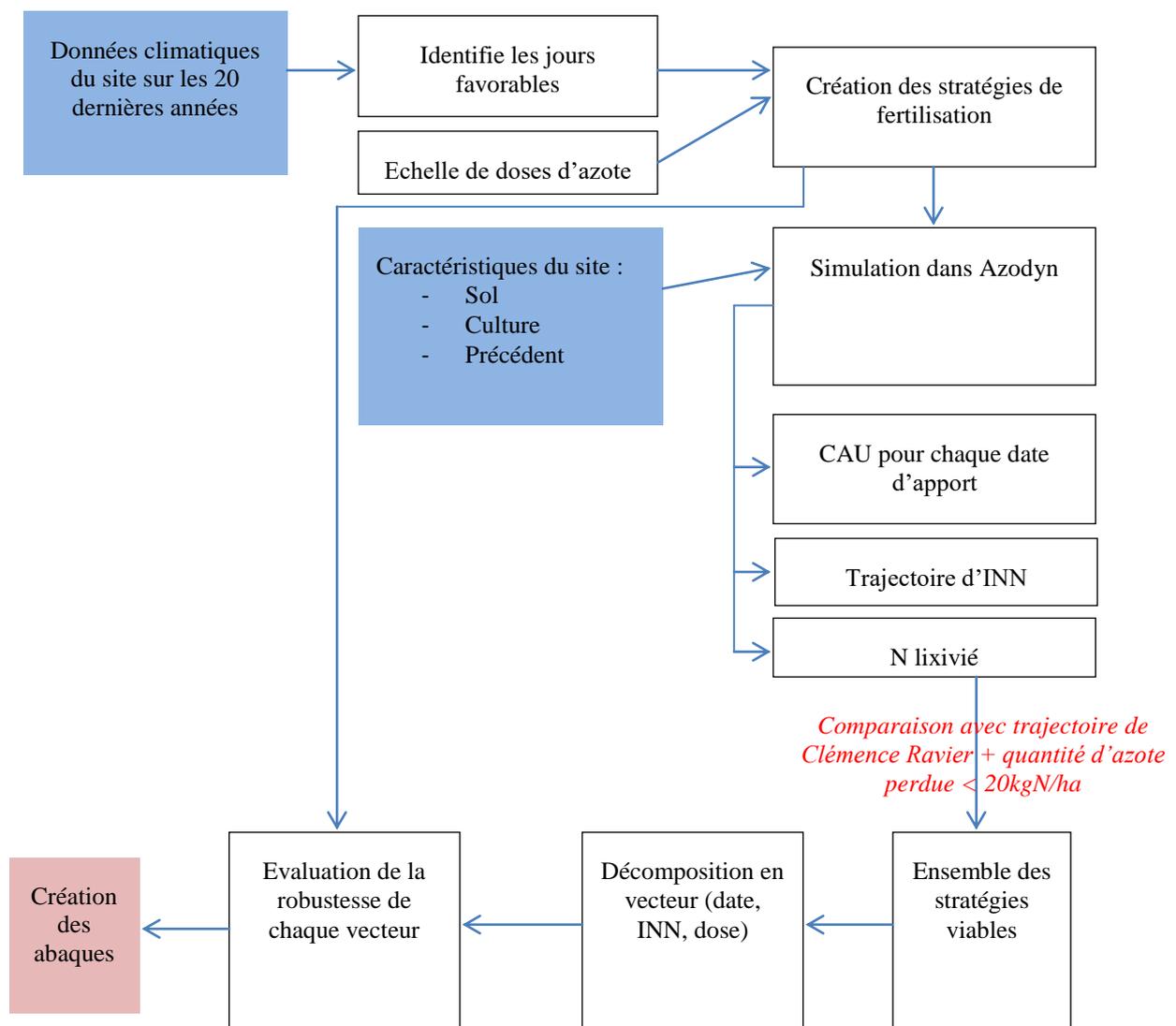
retenues pour chaque stratégie sont la valeur du CAU (coefficient apparent d'utilisation de l'azote), la trajectoire d'INN sur le cycle et l'azote lixivié.

Parmi toutes les stratégies, seules celles répondant aux deux critères suivants sont retenus :

- la trajectoire d'INN simulée ne doit pas passer une seule fois en-dessous de la courbe minimale d'INN(Ravier, 2017).
- La quantité d'azote perdue doit être inférieure à 20 kg par hectare. Cette dernière est obtenue en sommant la quantité d'azote des apports non valorisée par la culture ($= (1 - \text{CAU}) * \text{dose}$) à la quantité d'azote lixiviée obtenue en sortie de modèle.

Celles qui sont retenues sont dites « viables ». Pour le Chaumoy par exemple, seules 6% de toutes les stratégies possibles ont satisfait le deuxième critère et 2.6% les deux à la fois.

Enfin, chaque stratégie « viable » est décomposée en vecteurs {date, dose, valeur d'INN}. Pour chaque vecteur, on évalue la robustesse de ce dernier sur l'ensemble des stratégies initiales c'est-à-dire viables et non viables. La robustesse consiste à dénombrer le nombre de stratégies viables qui passent par ce vecteur et à le diviser par le nombre total de stratégies qui passent par ce vecteur et ceux, sur l'ensemble des 20 dernières années climatiques. Pour chaque période favorable et valeur d'INN, on ne retient que le vecteur qui est le plus robuste et qui minimise le plus la dose apportée. En rassemblant toutes les vecteurs obtenus en un tableau, on retrouve les abaques fournis.



Annexe 2 : Description du modèle CHN

CHN est un modèle culture mécaniste et dynamique paramétré sur blé tendre, blé dur et maïs. Il comprend trois compartiments que sont le sol, la plante et l'atmosphère. Ils ont chacun été développés séparément par Arvalis-Institut du Végétal puis regroupés il y a une dizaine d'années en un seul modèle. Il s'appuie sur quatre bases de données différentes (sol, variétés, engrais et météorologique). Avec plus de 500 types de sols, 400 variétés et 700 stations météorologiques, le modèle couvre une large gamme de situations agronomiques possibles. Grâce à des données réelles, prévisionnelles et fréquentielles, CHN offre une évolution de la culture sur l'ensemble de son cycle. Il est actuellement utilisé pour le pilotage des cultures (fertilisation azotée et irrigation), le diagnostic agronomique, la construction de référence et est intégré dans des outils d'aide à la décision.

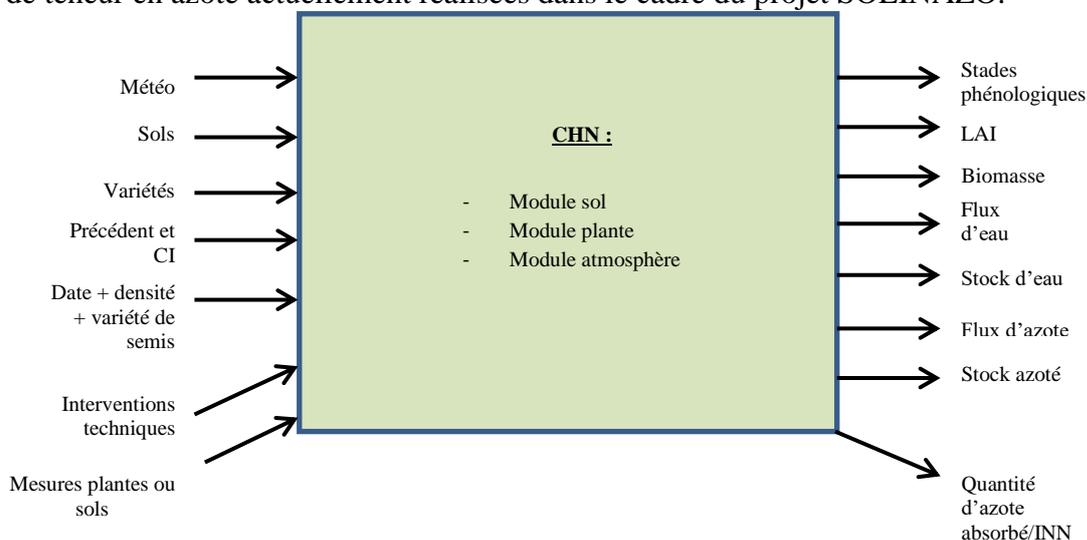
CHN est composé de trois modules :

- le module « carbone ». Pour le compartiment sol, on retrouve le modèle AMG pour le formalisme et le paramétrage du carbone organique du sol. L'accumulation de carbone dans la plante se base sur les équations développées par Monteith.
- Le module « eau » avec un modèle de bilan hydrique. Une caractéristique de CHN est la distinction entre l'évaporation du sol et la transpiration des plantes.
- Le module « azote ». Le compartiment sol s'appuie sur des références du COMIFER et pour la partie plante, sur l'INN.

Les calculs du modèle sont réalisés sur un pas de temps journalier et pour chaque centimètre d'épaisseur du sol. Pour le blé tendre, le modèle a été validé grâce aux données recueillies sur 34 sites différents des années 2000 à 2014 qui couvre la plupart des bassins de production de la céréale. Les résultats montrent une très bonne prédiction de la biomasse et LAI produites et une légère surestimation de l'azote absorbée en conditions non limitantes.

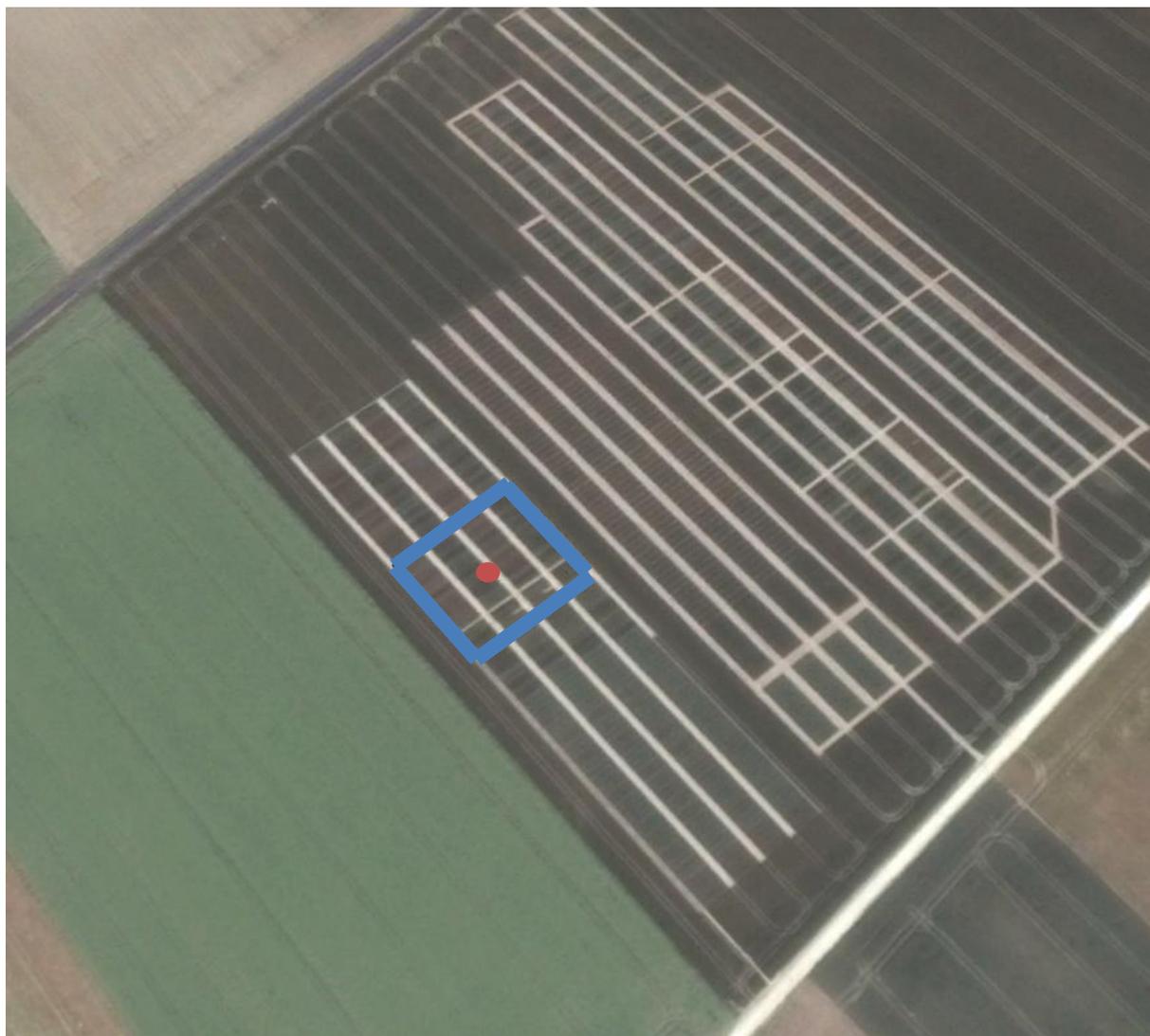
La figure ci-dessous présente les entrées et sorties du modèle. La liste des données de sorties présentée est non-exhaustive. Dans notre projet, les données d'entrées sont rassemblées dans un fichier Excel déposé ensuite sur un site SITAR. Après réalisation de la simulation, uniquement les données pouvant être utiles pour le pilotage de la fertilisation azotée sont retenues (quantité d'azote absorbée, biomasse produite, reliquat azotée...). Elles sont ensuite mises sous forme graphique et constituent les sorties présentées dans la figure 10 du rapport.

Le modèle CHN nécessite pour gagner en fiabilité d'être corrigé par des mesures terrain (comme la LAI). Une des perspectives d'améliorations de ce modèle serait de le coupler à des capteurs (piquet connecté, satellites, drones...). Cela se substituerait aux mesures de biomasse et de teneur en azote actuellement réalisées dans le cadre du projet SOLINAZO.



Annexe 3 : Analyse pédologique de la parcelle du Chaumoy

Cet essai est situé dans la Champagne Berrichone. Cette dernière est un vaste plateau d'inclinaison Nord-Ouest peu ondulé qui repose sur les calcaires issus du Jurassique supérieur (Malm). Leur épaisseur varie entre 200 et 400m. Sur cette parcelle, le type de sol est limono argilo-sableux. Ce sol est issu d'un processus d'érosion du plateau calcaire sous-jacent. L'argile provient d'une décalcification (=suppression du calcium) du plateau. Les limons résultent d'un dépôt éolien datant de la glaciation de Würm (quaternaire) et le sable de l'érosion du Massif central.



La photo ci-dessus présente le positionnement de la microparcelle dans le champ. Les lignes apparaissant sur la photo correspondent aux allées délimitant une série d'essais. Le point rouge correspond au prélèvement à la tarière réalisé pour établir le profil de sol. Ce dernier montre 3 horizons distincts :

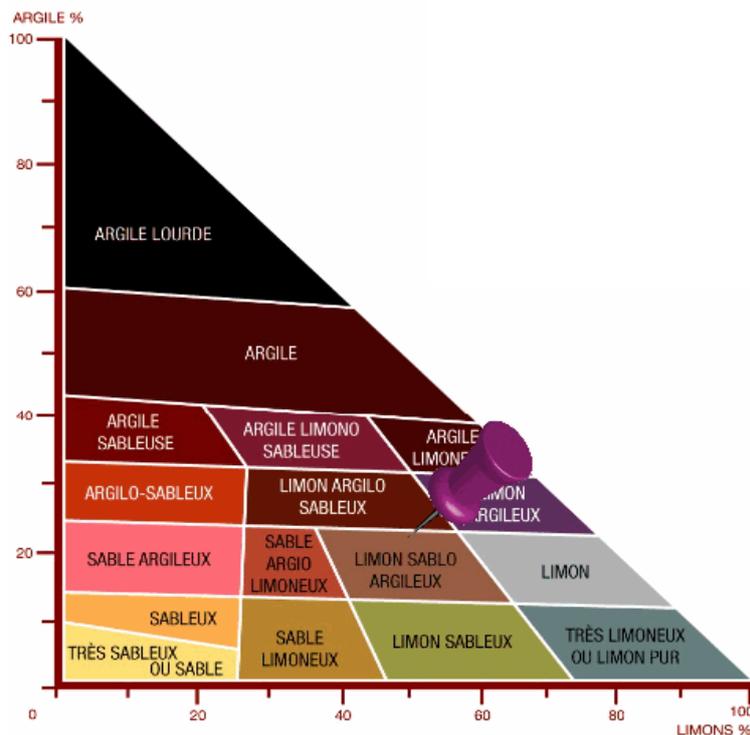
- 0 à 25 cm : argilo-limoneux (argile à plus de 30%)
- 25 à 80 cm : argile franche. Il n'y a aucune trace d'engorgement. A 60cm, nous notons une apparition de cailloux (=calcaire décalcifié), de racines et quelques traces de calcaire visibles

- Au-delà de 80 cm : plateau calcaire. C'est un calcaire érodé dont la profondeur est fortement variable (de 80cm à 5m).

Sur la parcelle, la zone est assez homogène. La profondeur du calcaire sur la parcelle varie entre 40 et 80cm. Néanmoins, le plateau étant fissuré, l'enracinement des plantes peut aller au-delà de cette profondeur.

Analyse chimique du premier horizon :

Le prélèvement a été réalisé le 3 novembre 2017. La texture du sol est la suivante :



Argile : 22.3%, Limons : 49.8% et Sables : 27.9%.

Le sol est très sensible à l'asphyxie. Le manque d'aération du sol nuit à l'activité biologique de ce sol. La texture limoneuse du sol impose de bien suivre l'état d'humidité du sol avant toute intervention.

Le pH est de 6.8 (optimum pour le blé tendre). La teneur en matière organique est de 1.9%. Cette valeur est moyenne mais à surveiller pour les cultures suivantes. De plus, le bilan humique annuel est déficitaire (perte de 5064 kg d'humus par hectare). Ceci suggère à l'avenir de développer des pratiques favorisant la restitution de la matière organique au sol (enfouissement des résidus, cultures intermédiaires...) afin de ne pas appauvrir l'état organique du sol tout juste suffisant actuellement.

La CEC est moyenne (104.2 meq/kg). 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. Enfin, le manganèse est fortement présent ce qui peut être à l'origine d'une toxicité.

Annexe 4 : Analyse pédologique de la parcelle de Tigy

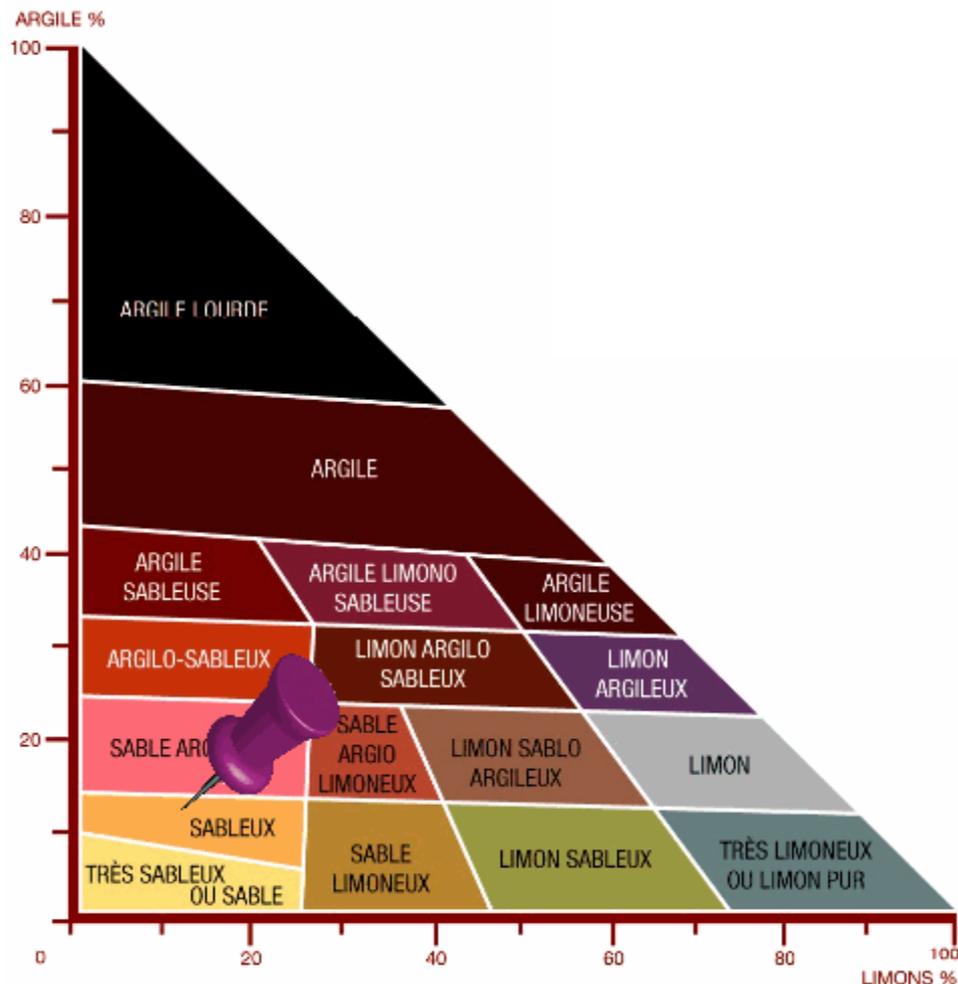


Le point vert représente le point où le prélèvement à la tarière a été réalisé. Le profil de sol observé permet de dégager 3 horizons:

- 0 à 30cm : limons sablo-argileux
- 30 à 60cm : argilo-sableux (l'argile est le plus présent dans cette horizon) qui se caractérise par une couleur plus claire et plus ocre. Cette dernière par altération donne de l'argile. Vers 50 cm, on note la présence de micas (minéraux brillants) qui sont de la muscovite blanche. Il y a aussi du quartz provenant de la sédimentation de débris érodé du massif central.
- Au-delà de 60cm, il y a retour d'un horizon argilo-sableux mais plus riche en argile que le premier horizon.

Le site est localisé sur les terrasses de Loire. Il a été formé par des dépôts alluvionnaires de la Loire dont la composition varie au cours du temps. Ici, les différences de texture entre les 3 horizons est liée à la variabilité des dépôts de la Loire (parfois dépôts d'argile, d'autres fois, dépôts de sables). Les dépôts proviennent de l'érosion du massif Central. Sur l'ensemble du profil, nous n'observons aucune trace d'hydromorphie ce qui est lié à la texture sableuse du sol.

Analyse chimique du 1^{er} horizon :



Argile : 11.9%, Limons : 12.4% et Sables : 75.6%

Le sol est de type sableux. Il est léger à structure fragile et sensible à la battance. La réserve utile est faible d'où la nécessité d'irriguer les parcelles.

Le pH est de 6. Ceci est faible et nécessite de chauler régulièrement (chaulage d'entretien) mais aussi pour certaines cultures de réaliser un chaulage de redressement (notamment pour le colza).

La teneur en matière organique est de 1.498% ce qui est inférieur au seuil de 2% recommandé ou souhaitable. Malgré tout, les pratiques avec forte restitution au sol permettent d'avoir un bilan humique annuel positif (237kg d'humus/ha/an) ce qui permettra de l'augmenter ce taux à l'avenir. Pour les sols sableux, cette dernière est particulièrement importante car elle constitue une des réserves principales d'eau et de minéraux. L'activité biologique des sols est optimum ici ce qui est lié aux techniques culturales simplifiées pratiquées par l'agriculteur.

La CEC est très faible (62.5 meq/kg) ce qui limite le capital de la parcelle. Il y a un risque de carence en bore.

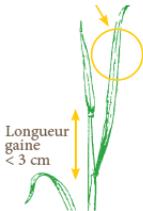
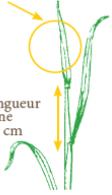
Annexe 5 : Protocole de mesure de la teneur en chlorophylle avec l’outil N-Tester

Source : Yara N-Tester, Mode d’emploi (2017)

Les mesures réalisées ne sont valables que si :

- La variété de blé tendre cultivée est la même sur les microparcelles étudiées. Il y a un fort effet variétal sur les valeurs obtenues par l’appareil.
- Le seul facteur limitant est l’azote. Les autres carences (phosphore, soufre...) faussent les conseils. Sur nos parcelles, nous supposons que l’itinéraire technique habituellement suivi par l’agriculteur suffit à les éviter.
- Les mesures sont réalisées sur une végétation sèche. Nous évitons donc d’intervenir après pluie ou après la rosée du matin.
- Les mesures sont faites au milieu du limbe d’une feuille saine à un stade précis de la plante.

De plus, la feuille sur laquelle doit être réalisée la mesure dépend du stade de la plante. Elle correspond en général à la dernière feuille ligulée. Ci-dessous un tableau présentant la feuille à sélectionner suivant le stade de la culture :

Stade	Feuille	Localisation sur la plante
2 Noeuds	F3	
Dernière feuille pointante (DFP)	F2	
Dernière feuille ligulée	F2	
Dernière feuille étalée (DFE)	F1	

Il est à noter que Yara ne préconise d’utiliser le N-Tester sur blé tendre d’hiver que du stade 2 Noeuds au stade DFE. Pour le projet, nous avons étendu son utilisation au tallage et à la floraison.

Prélèvement de biomasse bottillon sur parcelle prélèvement (en italique, facultatif)

- Couper au ras du sol avec un sécateur 30 tiges par microparcelle. Cette coupe est à réaliser sur toutes les répétitions des modalités S0, S1, S2 et S3. Pour chaque couple (blocs, modalités), placer les bottillons dans les sacs étiquetés



- A la station, sortir les biomasses des sacs en récupérant les feuilles et épis au fond du sac. Les peser. Noter la **MF Totale nette** (ou brute si gardé dans sacs puis peser sacs à vide)
- Couper les épis à la base du col avec un sécateur, les peser → **MF épi + grain nette**
- Sécher les épis à 80°C pendant 48 h, puis les compter les par bloc X modalité et les peser → **MS épi + grain nette**
- Peser les pailles sans épis → **MF paille nette**
- Sécher les pailles à 80 °C pendant 48 h et peser les → **MS paille nette**
- Battre les épis, récupérer les grains et *les balles séparément*



- Peser les grains (**MS grains nette**) et les compter par bloc X modalité. Peser les balles (**MS balles nette**). En déduire le PMG
- Rassembler les balles avec les pailles
- Prélever un sous-échantillon du lot paille + balle pour analyse %N en laboratoire par modalité en notant son poids (**Ps-echp**)

- Prélever un sous-échantillon de grains pour analyse de la teneur en azote en laboratoire par modalité (**Ps-echgr**)

Reliquats azotés post-récolte (*le faire le plus vite après récolte et surtout avant déchaumage*)

- Les modalités concernées sont 2, 4, 6 et 8. Bien noter la date de prélèvement
- Pour une modalité, prélever les trois horizons et les placer dans le seau correspondant à la bonne profondeur, répétitions groupées
- Les différents échantillons sont placés dans des sacs spécifiques puis envoyés en laboratoire pour analyse.



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

Pour chaque modalité, par bloc :

- rendement brut,
- humidité des grains sur échantillon machine,
- taux de protéines des grains (par infralyseur) / bloc
- poids de mille grains sur échantillon machine par parcelle (mélange 4 blocs)



Annexe 7 : Sorties finales de CHN pour Le Chaumoy et Tigy

Modèle CHN
ARVALIS - Institut du végétal

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

Contact : b.soenen@arvalis.fr

Informations concernant les outils ARVALIS :

- AgroBox : version 2.58.08MB (01/06/2018MB)
- SoilBox : version 1.10.02 (15/02/2018)
- ClimBox : version 4.01.08 (30/05/2018)

(Météo validée jusqu'au 18/06/2018 + 9 jours de prévision)

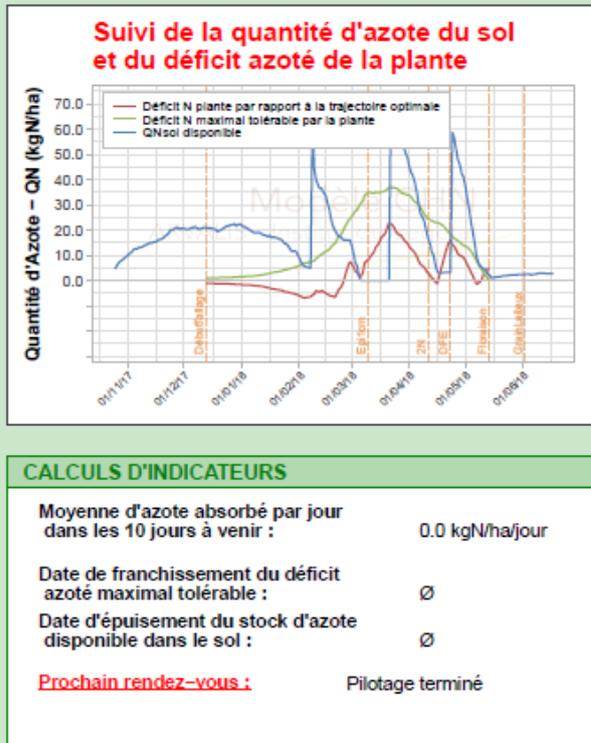
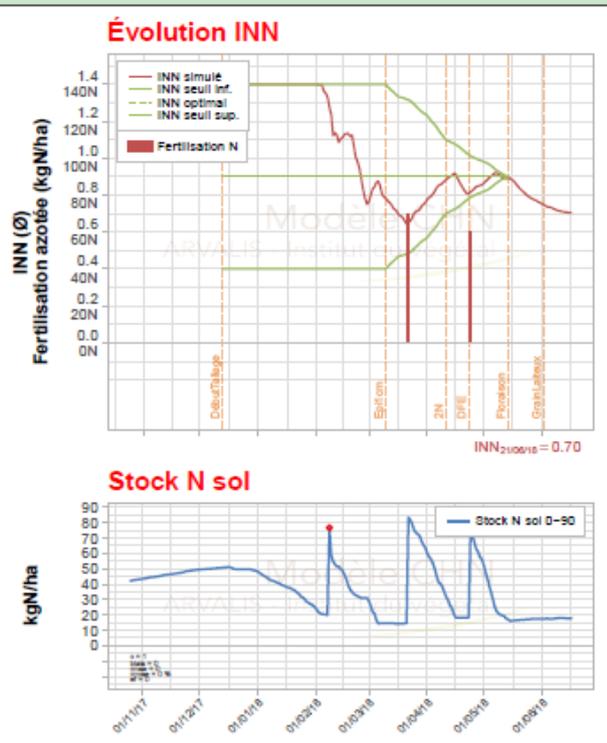
Date de calcul : 21/06/2018 à 08h37

Détails et contrôle du calcul CHN : Fiche Ok

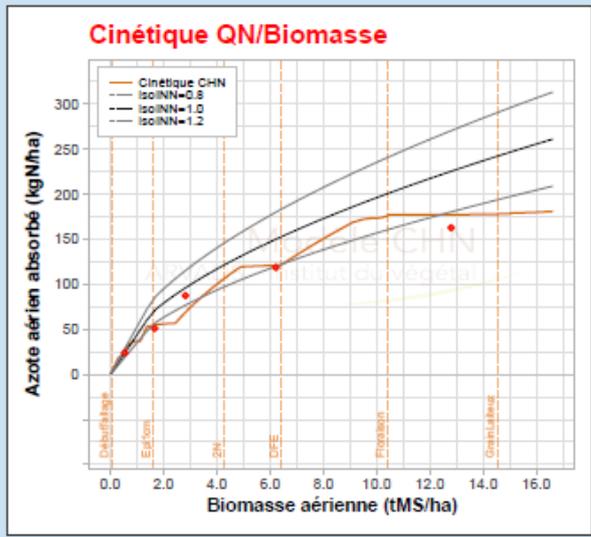
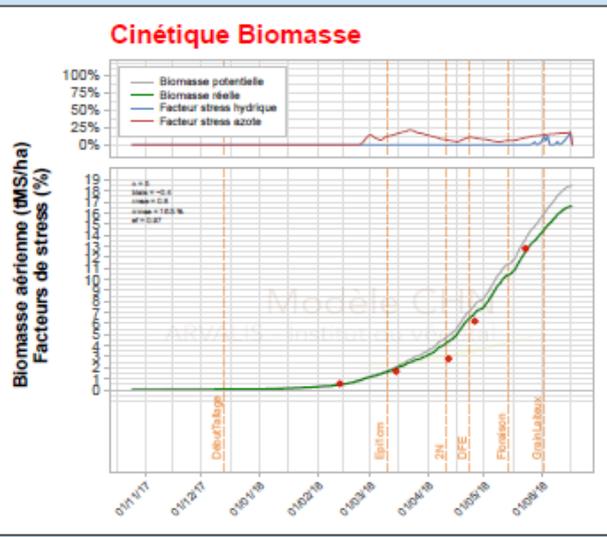
- Équipe régionale : AXEREAL
- Site de l'essai : **Le Chaumoy**
- Modalité pilotée : S3 = T07 (CHN rendement) INN Flo 0.9
- Fertilisation azotée : 130 unités en 2 apports | Irrigation : Ø

Pilotage CHN : INN Début de cycle = 0.4 / INN Floraison = 0.9

GRAPHIQUES POUR PRISE DE DECISION



GRAPHIQUES POUR CONTRÔLE DES SORTIES CHN



Modèle CHN

ARVALIS - Institut du végétal

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

Contact : b.soenen@arvalis.fr

Informations concernant les outils ARVALIS :

- AgroBox : version 2.58.08MB (01/06/2018MB)
 - SoilBox : version 1.10.02 (15/02/2018)
 - ClimBox : version 4.01.08 (30/05/2018)
- (Météo validée jusqu'au 12/06/2018 + 9 jours de prévision)

Date de calcul : 14/06/2018 à 13h23

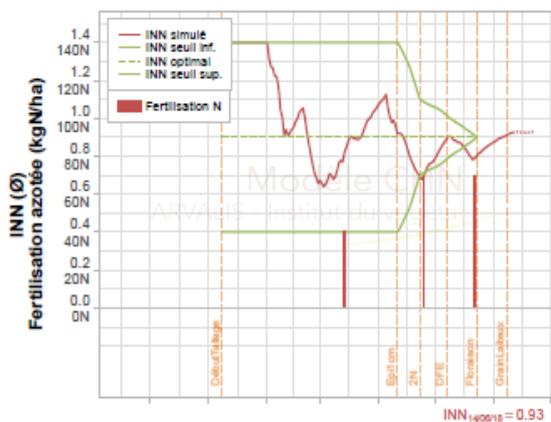
Détails et contrôle du calcul CHN : Fiche Ok

- Équipe régionale : AXEREAAL
- Site de l'essai : finy
- Modalité pilotée : S3 = T07 (CHN rendement) INN Flo 0.9
- Fertilisation azotée : 180 unités en 3 apports | Irrigation : Ø

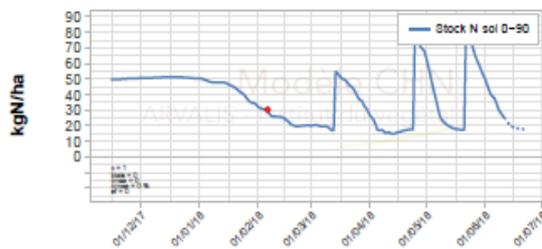
Pilotage CHN : INN Début de cycle = 0.4 / INN Floraison = 0.9

GRAPHIQUES POUR PRISE DE DECISION

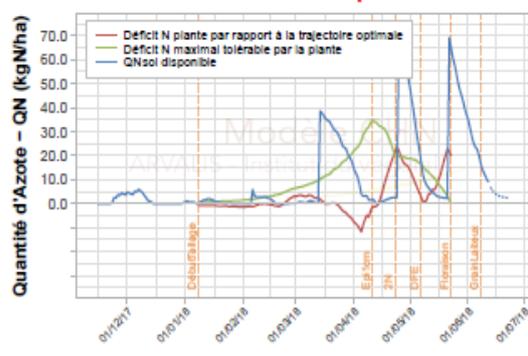
Évolution INN



Stock N sol



Suivi de la quantité d'azote du sol et du déficit azoté de la plante



CALCULS D'INDICATEURS

Moyenne d'azote absorbé par jour dans les 10 jours à venir : 0.3 kgN/ha/jour

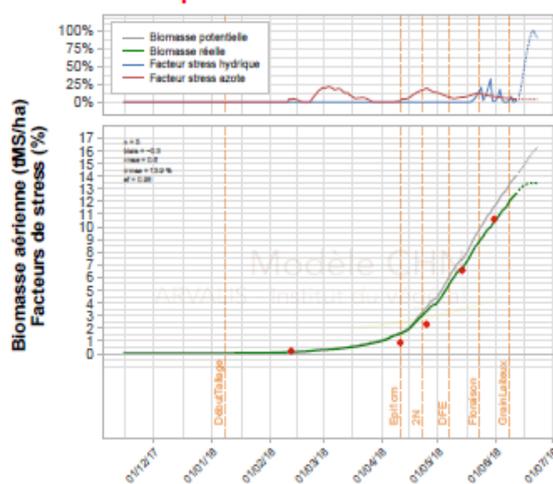
Date de franchissement du déficit azoté maximal tolérable : Ø

Date d'épuisement du stock d'azote disponible dans le sol : Ø

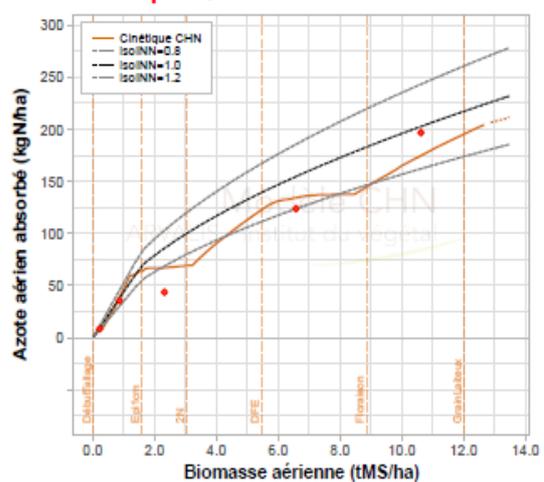
Prochain rendez-vous : Pilotage terminé

GRAPHIQUES POUR CONTRÔLE DES SORTIES CHN

Cinétique Biomasse



Cinétique QN/Biomasse



Annexe 8 : Description des différentes opérations réalisées sur le site du Chaumoy (18)

Date	Stades	Mesures terrain et simulations	Prélèvements	Apports
08/02/2018			1 ^{er} profil d'azote minéral	
13/02/2018			1 ^{ère} coupe biomasse sur Témoin	
02/03/2018				100u sur parcelle étalon
09/03/2018	Epi 1 cm			40u sur Farmstar et alternative
12/03/2018	Epi 1.5 cm			
13/03/2018	Epi 1.8 cm	1 ^{ère} simulation CHN		40u sur bilan, X+40 et X-40
15/03/2018			2 ^{ème} coupe biomasse sur Bilan	
21/03/2018		1 ^{ère} mesure N-Tester		
22/03/2018	Epi 2.8 cm			80u sur APPI-N et 70u sur CHN
29/03/2018	1 Nœud (Epi 3.8 cm)	2 ^{ème} mesure N-Tester		60u sur étalon, 90u sur bilan, 110u sur Farmstar, 50u sur X-40 et 130u sur X+40
03/04/2018		2 ^{ème} simulation CHN		
05/04/2018		3 ^{ème} mesure N-Tester		
11/04/2018	2 Nœuds			
12/04/2018			3 ^{ème} coupe de biomasse sur Bilan, APPI-N et CHN; 2 ^{ème} profil d'azote minéral	
13/04/2018				80u sur parcelle étalon
17/04/2018		4 ^{ème} mesure N-Tester		
18/04/2018		3 ^{ème} simulation CHN		
23/04/2018	DFE	4 ^{ème} simulation CHN		

24/04/2018				50u sur parcelle étalon, 40u sur bilan, 60u sur Farmstar, 40u sur X-40, 40u sur X+40, 60u sur CHN et 80u sur méthode alternative
26/04/2018			4 ^{ème} coupe de biomasse sur bilan, APPI-N et CHN	
27/04/2018				60u sur méthode APPI-N
07/05/2018		5 ^{ème} mesure N-Tester		
09/05/2018		5 ^{ème} simulation CHN		
17/05/2018	Floraison	6 ^{ème} simulation CHN		
23/05/2018		6 ^{ème} mesure N-Tester	5 ^{ème} coupe de biomasse sur témoin, bilan, APPI-N et CHN 3 ^{ème} profil d'azote minéral	
15/06/2018	Comptage d'épis sur toutes les modalités			
03/07/2018			5 ^{ème} coupe de biomasse sur témoin, bilan, APPI-N et CHN	
04/07/2018	Récolte			
05/07/2018			4 ^{ème} profil d'azote minéral	



Photo de la parcelle au 17/04/2018

Annexe 9 : Description des différentes opérations réalisées sur le site de Tigy (45)

Date	Stades	Mesures terrain et simulations	Prélèvements	Apports
06/02/2018			1 ^{ère} coupe de biomasse sur témoin	
12/02/2018			1 ^{er} profil d'azote minéral	
15/02/2018	Tallage			
07/03/2018				100u sur parcelle étalon
13/03/2018		1 ^{ère} simulation CHN		
14/03/2018	Epi 0.3 - 0.5 cm			40u sur bilan, CHN, sur Farmstar, sur X-40, sur X+40 et sur alternative
21/03/2018		1 ^{ère} mesure N-Tester		
22/03/2018				40u sur APPI-N
29/03/2018		2 ^{ème} mesure N-Tester		
03/04/2018		2 ^{ème} simulation CHN		
05/04/2018	Epi 0.6 - 1 cm	3 ^{ème} mesure N-Tester		
11/04/2018	Epi 1 cm		2 ^{ème} coupe de biomasse sur bilan, APPI-N et CHN	110u sur bilan, 40u sur APPI-N, 100u sur Farmstar, 70u sur X-40, 100u sur X+40 et 80u sur parcelle étalon
17/04/2018		4 ^{ème} mesure N-Tester		
18/04/2018		3 ^{ème} simulation CHN		
23/04/2018		4 ^{ème} simulation CHN		
25/04/2018	2 Nœuds		3 ^{ème} coupe de biomasse sur bilan, APPI-N et CHN	40u sur APPI-N, 70u sur CHN, 30u sur Farmstar, 50u sur X+40 et 60u sur alternative

26/04/2018			2 ^{ème} profil d'azote minéral	
07/05/2018	DFE	5 ^{ème} mesure N-Tester		
09/05/2018		5 ^{ème} simulation CHN		
11/05/2018	Gaine fendue à épiaison			40u sur bilan, 50u sur APPI-N, 40u sur X-40, 40u sur X+40 et 60u sur méthode alternative
14/05/2018			4 ^{ème} coupe de biomasse sur bilan, APPI-N et CHN	
17/05/2018		6 ^{ème} simulation CHN		
22/05/2018	Début floraison			80u sur CHN et 70u sur Farmstar
29/05/2018		6 ^{ème} mesure N-Tester		
31/05/2018			5 ^{ème} coupe de biomasse sur témoin, bilan, APPI-N et CHN et 3 ^{ème} profil d'azote minéral	
22/06/2018	Comptage d'épis			
12/07/2018			6 ^{ème} coupe de biomasse sur témoin, bilan, APPI-N et CHN	
19/07/2018	Récolte		4 ^{ème} profil d'azote minéral	



Photo de la parcelle au 17/04/2018

Annexe 10 : Synthèse des différentes mesures réalisées avec l’outil N-Tester

Mesure Pince N-tester sur parcelle de Tigy (45)												Conseil Abaque
Date de mesure	Opérateur	Stade de la plante	Modalité mesurée	Bloc I	Bloc II	Bloc III	Bloc IV	Moyenne Surfertilisée	Moyenne Bloc	Ratio	INN	
21/03/2018	30004150	Fin tallage	Méthode APPI-N	618	597	635	603	700	613	0.88	0,7 - 0,8	60 u
21/03/2018	30004167	Fin tallage	Méthode APPI-N	508	579	558	541	572	547	0.96	0,9 - 1,0	0 u
29/03/2018	30004150	Fin tallage	Méthode APPI-N	561	560	573	614	651	577	0.89	0,7 - 0,8	60 u
29/03/2018	30004167	Fin tallage	Méthode APPI-N	575	582	610	564	665	583	0.88	0,7 - 0,8	60 u
05/04/2018	30004167	Fin tallage (Epi 0.8 cm)	Méthode APPI-N	693	680	670	663	716	677	0.95	0,9 - 1,0	0 u
05/04/2018	30004150	Fin tallage (Epi 0.8 cm)	Méthode APPI-N	666	699	713	673	746	688	0.92	0,8 - 0,9	40 u
17/04/2018	30004150	1N	Méthode APPI-N	687	705	684	706	748	696	0.93	0,8 - 0,9	40 u
17/04/2018	30004167	1N	Méthode APPI-N	690	695	664	703	743	688	0.93	0,8 - 0,9	40 u
07/05/2018	30004150	DFE/ Gonflement	Méthode APPI-N	650	633	619	660	681	641	0.94	0,9 - 1,0	40 u
07/05/2018	30004167	DFE/ Gonflement	Méthode APPI-N	653	614	657	652	671.5	644	0.96	0,9 - 1,0	40 u
07/05/2018	30004150	DFE/ Gonflement	Méthode Alternative	609	632	620	639	681	625	0.92	0,7 - 0,8	60 u
29/05/2018	30004167	Floraison	Méthode APPI-N	696	691	701	716	694.5	701	1.01	1,1 - 1,2	0 u
29/05/2018	30004167	Floraison	Méthode Alternative	687	714	678	695	694.5	693.5	1.00	1,1 - 1,2	0 u

Mesure Pince N-tester sur parcelle du Chaumoy (18)												Conseil Abaque
Date de mesure	Appareil utilisé	Stade de la plante	Modalité mesurée	Bloc I	Bloc II	Bloc III	Bloc IV	Moyenne Surfertilisée	Moyenne Bloc	Ratio	INN	
21/03/2018	30004150	Epi 1,8 cm	Méthode APPI-N	619	546	583	597	738.5	586.25	0.794	<0,6	100 u
21/03/2018	30004167	Epi 1,8 cm	Méthode APPI-N	561	549	541	569	624	555	0.889	0,7 - 0,8	80 u
29/03/2018	30004150	1 Nœud (Epi 3,76)	Méthode APPI-N	615	588	597	606.5	711	601.625	0.846	0,6 - 0,7	100 u
29/03/2018	30004167	1 Nœud (Epi 3,76)	Méthode APPI-N	628	594	579	639.5	675	610.125	0.904	0,7 - 0,8	80 u
05/04/2018	30004167	2 Nœuds	Méthode APPI-N	690	554	615	666	738	631.25	0.855	0,6 - 0,7	80 u
05/04/2018	30004150	2 Nœuds	Méthode APPI-N	688	579	627	710	761	651	0.855	0,6 - 0,7	80 u
17/04/2018	30004150	2N - 3N	Méthode APPI-N	745.5	723	768	786.5	828	755.75	0.913	0,7 - 0,8	60 u
17/04/2018	30004167	2N - 3N	Méthode APPI-N	720.5	681	730	702	792.5	708.375	0.894	0,7 - 0,8	60 u
07/05/2018	30004150	Epiaison/Gaine éclatée/Gonflement	Méthode APPI-N	742	688	705	738	706	718.25	1.017	1,1 - 1,2	0 u
07/05/2018	30004167	Epiaison/Gaine éclatée/Gonflement	Méthode APPI-N	704	675	712	699	703.5	697.5	0.991	1,1 - 1,2	0 u
07/05/2018	30004150	Epiaison/Gaine éclatée/Gonflement	Méthode Alternative	670	677	684	682	706	678.25	0.961	0,9 - 1,0	0 u
23/05/2018	30004150	Floraison	Méthode APPI-N	867	837	856	839	820.5	849.75	1.036	1,1 - 1,2	0 u
23/05/2018	30004150	Floraison	Méthode Alternative	846	862	861	817	820.5	846.5	1.032	1,1 - 1,2	0 u

Annexe 11 : Etude de l'effet expérimentateur et appareil sur les mesures N-Tester

Pour les sites d'Axéreal, la réalisation des mesures N-Tester pour l'évaluation de l'état azoté du couvert a été réalisée par deux appareils et deux expérimentateurs différents. Ces derniers sont susceptibles d'influencer sur les valeurs obtenues par les HNT et donc sur le calcul de l'INN pour la modalité APPI-N. Une de nos interrogations a été de savoir s'il existait un effet « expérimentateur » ou « appareil » sur les valeurs brutes collectées par le N-Tester. Le but est d'adapter, en fonction des résultats, l'évaluation de l'INN et les règles de décisions des apports.

Pour l'étude, 216 mesures ont été récupérées. Elles ont été évaluées uniquement sur les deux parcelles expérimentales d'Axéreal (Tigy et Le Chaumoy) et sur les microparcelles des modalités surfertilisées, APPI-N et Alternative. Le jeu de données comporte les variables suivantes : Date, Site, Appareil, Expérimentateur, Modalité et Valeurs mesurées. Une analyse de variance a été réalisée sur le logiciel R. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Modalités	Df	Sum Square	Mean square	F value	p.value	Significativité
Date	11	750580	68235	62.069	< 2e-16	Signif.
Site	2	50922	25461	23.160	9.25e-10	Signif.
Expérimentateur	1	106	106	0.096	0.756697	
Appareil	1	13609	13609	12.379	0.000539	Signif.
Modalité	2	95501	47751	43.436	2.36e-16	Signif.
Résidus	197	216570	1099			

L'analyse révèle un effet du type d'appareil utilisé au seuil de 5%. Une des raisons à évoquer est la calibration des appareils qui n'est pas la même suivant le HNT. L'un des deux était calibré sur une valeur étalon de 70.6 et l'autre sur la valeur de 71.7.

Les résultats montrent aussi qu'il n'y a aucun effet expérimentateur au seuil de 5%. Ceci peut s'expliquer par le fait que Ricardo et moi échangeons sur quelle feuille prendre sur la plante selon le stade observé. De plus, l'échantillonnage pour une microparcelle était réalisé d'une manière homogène et suivant un chemin précis. Ceci a donc limité le biais expérimentateur.

Sur nos essais, les mesures étaient réalisées avec les deux appareils et par les deux expérimentateurs pour une date, site et microparcelle donnée. Au vu des résultats précédents et afin de prendre en compte l'effet du type de N-tester dans les mesures, l'INN par appareil a donc été évalué pour chaque microparcelle. Si les deux appareils aboutissent au même INN, celui-ci est retenu. Si les deux HNT fournissent deux valeurs différentes, la moyenne des INN est utilisée pour les prises de décision d'apports.

Néanmoins, il est nécessaire de préciser que ces résultats ne sont valables que dans le cadre de nos essais. Afin de les confirmer, il serait intéressant de réaliser cette expérience sur une plus grande échelle et avec un plus grand nombre d'expérimentateurs.

Les postulats de l'analyse de variance (la normalité des résidus (test de Shapiro-wilk), l'homoscédasticité des variances (test de Barlett) et l'indépendance des résidus) sont bien vérifiés pour cette étude.

Annexe 12 : Base de données utilisée pour l'analyse statistique de la fiabilité du N-Tester

Site	Date	Stade	INN labo	INN HNT relatif	INN HNT brut
chaumoy	15/03/2018	epi 1 cm	0.8	0.70	0.1
chaumoy	12/04/2018	2 N	1	0.80	0.2
chaumoy	26/04/2018	DFE	0.8	0.90	0.4
chaumoy	23/05/2018	Floraison	0.7	1.20	0.5
tigy	11/04/2018	epi 1 cm	0.9	0.90	0.3
tigy	25/04/2018	2 N	0.9	0.90	0.3
tigy	14/05/2018	DFE	0.8	1.00	0.4
tigy	31/05/2018	Floraison	1	1.30	0.2
gindre	13/03/2018	epi 1 cm	0.8	0.90	0.0
gindre	17/04/2018	2 N	0.9	1.20	0.0
gindre	25/04/2018	DFE	1	0.90	-0.2
gindre	23/05/2018	Floraison	0.9	1.10	0.2
hdlc	13/03/2018	epi 1 cm	1	0.80	-0.3
hdlc	17/04/2018	2 N	0.9	0.90	0.3
hdlc	25/04/2018	DFE	0.9	1.20	0.3
hdlc	23/05/2018	Floraison	0.7	0.80	0.3
chatillon	14/03/2018	epi 1 cm	0.7	0.70	0.0
chatillon	19/04/2018	2 N	1.1	0.80	0.1
chatillon	04/05/2018	DFE	0.9	0.80	0.3
chatillon	16/05/2018	Floraison	0.9	0.80	0.3
diors	19/03/2018	epi 1 cm	1	1.20	0.2
diors	20/04/2018	2 N	0.8	0.90	0.4
diors	02/05/2018	DFE	0.8	0.70	0.2
diors	16/05/2018	Floraison	0.7	0.70	0.4
rivarennnes	05/04/2018	epi 1 cm	1	1.30	0.2
rivarennnes	20/04/2018	2 N	0.8	0.80	0.3
rivarennnes	04/05/2018	DFE	0.7	0.80	0.3
rivarennnes	22/05/2018	Floraison	0.8	1.00	0.3
mazangé	27/03/2018	epi 1 cm	1	1.00	0.0
mazangé	20/04/2018	2 N	1.1	0.80	0.1
mazangé	07/05/2018	DFE	0.8	0.70	0.1
mazangé	24/05/2018	Floraison	1	0.90	0.1
fosse	27/03/2018	epi 1 cm	1.1	0.80	-0.1
fosse	20/04/2018	2 N	1	0.70	0.2
fosse	07/05/2018	DFE	0.8	0.70	0.2
fosse	24/05/2018	Floraison	0.9	0.80	0.3
crottes	11/04/2018	epi 1 cm	1	0.80	0.0
crottes	25/04/2018	2 N	1	0.80	0.2
crottes	15/05/2018	DFE	0.8	0.70	0.2
crottes	28/05/2018	Floraison	0.7	0.60	0.4
sours	05/04/2018	epi 1 cm	1	0.90	0.1
sours	23/04/2018	2 N	1.1	1.00	0.1
sours	11/05/2018	DFE	0.8	1.10	0.4
sours	28/05/2018	Floraison	0.7	1.30	0.5

Annexe 13 : Base de données utilisée pour l'analyse statistique de la fiabilité du Greenseker

Site	Date	INN labo	Stade	INN Green relatif
chatillon	14/03/2018	0.7	epi 1 cm	0.6
chatillon	19/04/2018	1.1	2 N	0.6
chatillon	04/05/2018	0.9	DFE	0.7
chatillon	16/05/2018	0.9	Floraison	0.7
mazangé	27/03/2018	1	epi 1 cm	0.70
mazangé	20/04/2018	1.1	2 N	0.80
mazangé	07/05/2018	0.8	DFE	0.80
mazangé	24/05/2018	1	Floraison	0.80
fosse	27/03/2018	1.1	epi 1 cm	0.70
fosse	20/04/2018	1	2 N	0.60
fosse	07/05/2018	0.8	DFE	0.80
fosse	24/05/2018	0.9	Floraison	0.70
crottes	11/04/2018	1	epi 1 cm	0.60
crottes	25/04/2018	1	2 N	0.60
crottes	15/05/2018	0.8	DFE	0.80
crottes	28/05/2018	0.7	Floraison	0.80
sours	05/04/2018	1	epi 1 cm	0.80
sours	23/04/2018	1.1	2 N	0.90
sours	11/05/2018	0.8	DFE	1.00
sours	28/05/2018	0.7	Floraison	1.10

Annexe 14 : Présentation des outils utilisés dans le projet pour évaluer l'INN



- Boutons de navigation
- Ecran où s'affichent les données
- Tête de mesure
- Guide de profondeur d'échantillon
- Zone de mesure où est insérée la feuille

Photo de la pince N-Tester

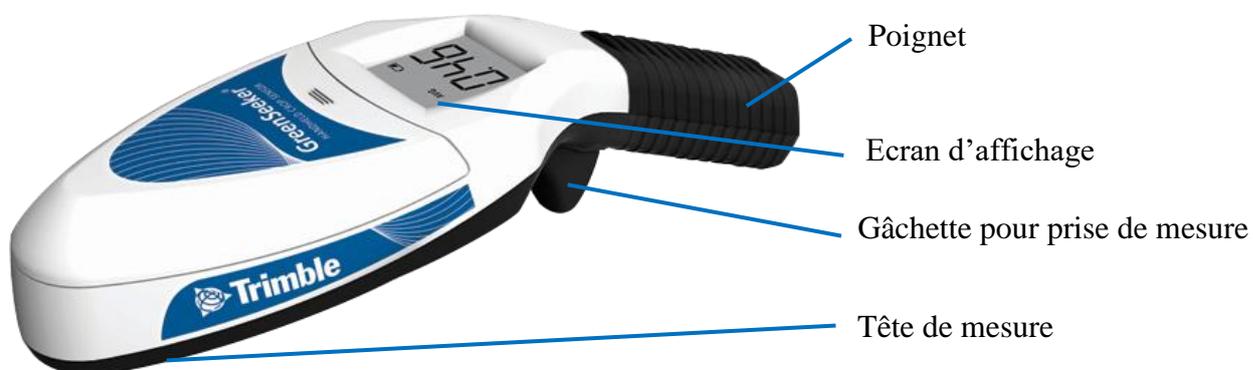


Photo du Greenseeker

Source photo : <https://www.geoproospaceclient.com/photos/greenseeker-portatif-250p.png>

Enfin, la modalité APPI-N n'était initialement pas présente au début du projet, ce n'est que cette année qu'elle a été intégrée dans l'étude. Une zone étalon a été mise en place afin de suivre l'INN avec l'outil N-Tester.

Nom de la modalité	Numéro	Brève description
Témoin	1	<i>Non fertilisé sur l'ensemble du cycle</i>
X-80	2	<i>Basé sur la méthode du bilan avec 80U de moins au deuxième apport</i>
X-40	3	<i>Basé sur la méthode du bilan avec 40U de moins au deuxième apport</i>
X	4	<i>Suit les règles de décision de la méthode du bilan (le $b=3.5$ pour la variété Relief). Après estimation des différents postes du bilan grâce au logiciel Wiuz, la dose prévisionnelle est de 190U pour un objectif de 85 quintaux</i>
X+40	5	<i>Basé sur la méthode du bilan avec 40U de plus au deuxième apport</i>
X+80	6	<i>Basé sur la méthode du bilan avec 80U de plus au deuxième apport</i>
Pilotage CHN rendement	7	<i>Utiliser CHN comme OAD pour obtenir un rendement similaire à la méthode du bilan en visant un objectif d'INN de 0.9 à floraison</i>
Pilotage CHN rendement et protéine	8	<i>Utiliser CHN comme OAD pour obtenir un rendement similaire à celui du bilan et une teneur en protéine de 14% en visant un objectif d'INN de 1.1 à grain laitex (cet objectif est lié à la variété utilisée)</i>
Méthode APPI-N	9	<i>Suivi de l'INN du couvert et utilisation des abaques élaborés par Azodyn pour prendre les décisions d'apports</i>

Description de l'essai

Le plan de l'essai est présenté dans la figure ci-dessous :

garde	9	7'	5	9'	6	8	2	1	8'	4	7	4'	3	garde
Garde surf	7	4'	8'	1	9	7'	3	8	5	9'	6	2	4	garde
garde	4	8	6	8'	7	9'	4'	2	9	3	1	5	7'	garde
Garde surf	1	2	3	4	4'	5	6	7	7'	8	8'	9	9'	garde

Le dispositif est en bloc complet. Les modalités sont répétées quatre fois chacune et sont randomisées dans les blocs II, III et IV. Les modalités 4, 7, 8 et 9 sont doublées (4', 7', 8' et 9') afin de pouvoir réaliser les différents prélèvements et reliquats sans influencer le rendement. A la différence du projet SOLINAZO, les microparcelles prélèvement ne sont pas nécessairement frontalières des microparcelles rendement.

L'essai est entouré de cellule de garde dont deux sont surfertilisées (120kgN/ha en plus de la méthode du bilan). Ces dernières servent de zone étalon pour le HNT utilisé pour piloter APPI-N.

Protocole de mesure

A la sortie d'hiver est réalisée une mesure du reliquat azoté sur une profondeur de 0-90 cm. Cette donnée sert au calcul de la dose X de la méthode du bilan (ici de 190U) et au forçage des stocks d'azote dans le modèle CHN. Les différentes mesures réalisées dans le cycle de la culture sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Stade	Nature de l'opération	Mode Opérateur	Modalités concernées
Tallage (Sortie Hiver)	Profil d'azote minéral	Carottes à la tarière sur 0-30, 30-60 et 60-90 cm	Réalisé sur les 4 blocs
	Biomasse par unité de surface et teneur en N Dumas	Par microparcelle, prélèvement de 3*2 rangs sur 1 mètre linéaire, puis pesée, séchage et envoi au laboratoire.	Modalité 4'
Epi 1cm	Déterminer la date d'apparition du stade		Tout l'essai
Montaison	Biomasse par unité de surface et teneur en N Dumas	Idem que pour le tallage	Modalité 4', 7', 8' et 9'
Floraison	Nombre d'épis par m ²	Comptage du nombre d'épis sur un mètre linéaire (X2 par microparcelle)	Toutes les modalités
	Biomasse par unité de surface et teneur en N Dumas	Idem que pour le tallage	Modalité 1, 4', 7', 8' et 9'
	Profil d'azote minéral	Carottes à la tarière sur 0-30, 30-60 et 60-90 cm	Modalité 4', 7', 8' et 9'
Epiaison	Déterminer la date d'apparition du stade		Toute la parcelle
Récolte	Profil d'azote minéral	Carottes à la tarière sur 0-30, 30-60 et 60-90 cm à faire après moisson de la parcelle	Modalité 1, 4', 7', 8' et 9'
	Rendement Machine et PMG		
	Biomasse par unité de surface, détermination du rapport grain/paille, % N pailles et %N grains	Par microparcelle, prélèvement de 3*10 tiges puis pesée, séchage et envoi au laboratoire.	Toutes les modalités

Les prélèvements de biomasses, de reliquats et les relevés de stades servent à corriger le modèle CHN au fur et à mesure du cycle par forçage. Ceci permet de gagner en précision dans le suivi de l'INN du couvert. Dans notre cas, les mesures de biomasse ont fortement changé les simulations faites en fin de cycle. Elles ont permis de corriger des valeurs d'INN du modèle trop basses par rapport à ce qui était observé sur le terrain.

Résultat

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

Modalité	Témoin	X-80	X-40	X	X+40	X+80	CHN rdt	CHN qualité	APPI-N
14/03	0u	40u	40u	40u	40u	40u	0u	0u	0u
29/03	0u	0u	0u	0u	0u	0u	0u	0u	40u
10/04	0u	30u	70u	110u	150u	190u	40u	40u	50u
27/04	0u	0u	0u	0u	0u	0u	60u	80u	0u
17/05	0u	40u	40u	40u	40u	40u	0u	0u	40u
23/05	0u	0u	0u	0u	0u	0u	60u	120u	0u
Total	0u	110u	150u	190u	230u	270u	160u	240u	120u

Les nouvelles méthodes proposées (CHN et APPI-N) permettent bien sur ce site de supprimer le premier apport (du 14 mars) et de le reporter en fin de cycle de la plante quel que soit l'objectif d'INN fixé. Le nombre d'interventions est le même quel que soit la modalité. Le premier apport APPI-N commence un peu moins de 15 jours avant CHN. Les doses totales sont inférieures à celles du bilan : CHN rendement la diminue de 30U tandis que APPI-N de 70U. CHN rendement se caractérise par des apports conséquents en fin de cycle (120U du 27/04 au 23/05) alors qu'APPI-N a une distribution des apports plus homogène. Pour la modalité CHN qualité, la dose totale est supérieure de 50U par rapport à celle du bilan. Les apports sont plus importants un mois avant floraison (200U) par rapport aux autres modalités en lien avec l'objectif de protéine de 14% fixé.

Pour la partie récolte, les microparcelles de l'essai n'ont pas été moissonnées. Ceci est lié à l'association de deux produits, un herbicide (Provalia LQM, 1l/ha) et un fongicide (Amistar Xtra, 0.9l/ha). Ces derniers appliqués en post floraison ont provoqué une phytotoxicité qui a très fortement affecté la fertilité des épis et le nombre de grain au m².

Les résultats collectés par un autre essai d'Axérial réalisé en 2017 dans le cadre du même projet sont présentés dans le tableau ci-dessus. Les rendements atteints dépassent l'objectif de rendement fixé liés aux conditions pédo-climatiques très favorables de l'essai et de l'année. Le rendement de la méthode CHN est similaire à celui du bilan (autour de 110 quintaux). Bien qu'elle ait reçu 60u de moins, la modalité CHN permet d'obtenir la même teneur en protéine que X+80.

Pour cet essai, le deuxième et troisième apports pour la modalité CHN avaient été retardés de 15 jours par rapport à la méthode du bilan (le premier apport avait été accidentellement fait au tallage comme pour le bilan). Le report des apports en fin de cycle préconisé par CHN a donc bien permis cette année d'atteindre le meilleur rendement et la meilleure teneur en protéine réalisable tout en minimisant la quantité apportée.

Modalité	Dose totale	Rendement	Taux de Protéine
<i>Témoin</i>	50u	96.7	11.4
<i>X-40</i>	130	110.2	13.3
<i>X</i>	170	110.3	14.3
<i>X+40</i>	210	109.3	14.6
<i>X+80</i>	250	109.2	16.1
<i>CHN</i>	190	110.3	16.2

	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, horticoles et du Paysage Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation : Sciences et Ingénierie du Végétal Parcours : Agrosystèmes : Conception et Evaluation; Responsable de parcours : Matthieu CAROF
Auteur(s) : Guy DESHAYES Date de naissance* : 24/10/1994	Organisme d'accueil : AXEREAAL Adresse : 36 rue de la manufacture CS 40639, 45166 OLIVET
Nb pages : 25 pages; Annexe(s) : 25 pages	
Année de soutenance : 2018	Maître de stage : Ricardo BIDEgain
Titre français : Développement d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver comme alternative à la méthode du bilan	
Titre anglais : Development of a new method of fertilization thinking on winter wheat as an alternative to the balance sheet method.	
Résumé (1600 caractères maximum) :	
<p>Deux nouvelles méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver, APPI-N et CHN, ont été mis au point par l'INRA et Arvalis dans l'objectif d'optimiser la dose d'intrants azotés à apporter tout en garantissant une production en quantité et qualité.</p> <p>Dans le cadre du projet SOLINAZO, Axéreal a mis en place deux essais au Chaumoy (18) et à Tigy (45) sur la campagne 2017-2018. La stratégie de fertilisation de ces nouvelles méthodes y est étudiée et leurs performances évaluées par rapport à la méthode du bilan prévisionnelle. Des mesures d'INN, de biomasse, de reliquats ont été réalisées tout le long du cycle de la plante, et à la récolte, les variables de production ont été collectées.</p> <p>Cette année, APPI-N et CHN ont été caractérisées par des apports azotés plus tardifs et une dose totale apportée moindre par rapport à la méthode du bilan. La diversité pédoclimatique des deux essais a permis de tester les méthodes dans des conditions différentes. L'analyse des résultats des essais met en évidence que les nouvelles méthodes sont économiquement moins performantes en tendance mais plus respectueuses de l'environnement en permettant une meilleure valorisation de l'engrais. Néanmoins, le manque de fiabilité des outils utilisés pour évaluer l'INN au champ (N-Tester et Greenseeker) limite les conclusions.</p> <p>L'analyse doit être poursuivie dans les deux années à venir du projet. Si les résultats s'avèrent positifs, il restera à adapter ces nouvelles techniques au cadre d'une exploitation agricole puis à accompagner l'agriculteur dans leurs utilisations au quotidien.</p>	
Abstract (1600 caractères maximum) :	
<p>Two new methods of reasoning concerning nitrogen fertilization on winter wheat, APPI-N and CHN, have been finalized by INRA and Arvalis in order to optimise the total input of nitrogen, while guaranteeing quantitative and qualitative production.</p> <p>Within the framework of the project SOLINAZO, Axéreal has carried out two experiments in Chaumoy (18) and Tigy (45) in the 2017-2018 campaign. The fertilization strategy of these new methods were studied there and their performances compared to the balance sheet method. Measures of NNI, biomass, nitrogen balance were made during the whole plant cycle, and at harvest, the production variables were collected.</p> <p>This year, APPI-N and CHN have been characterized by later applications in the plant cycle and a smaller total amount of N brought in than with the balance sheet method. The pedoclimatic diversity of the two sites provided different conditions for the setting of the methods. The analysis of results reveals that the new methods have a tendency to be economically less effective but more respectful of the environment by maximizing fertilizer use efficiency. However, the lack of reliability of the tools used to assess the values of NNI in field (N-Tester and Greenseeker) limits the conclusions.</p> <p>The analysis needs to be followed up during the future two-year project. If the results are positive, the main issues will be to adapt these new techniques to the farms and to assist farmers in their daily use.</p>	
Mots-clés : blé tendre d'hiver, fertilisation azotée, réduction apports, méthode APPI-N, méthode CHN, carences azotées, Indice de Nutrition Azotée, N-Tester, innovation	
Key Words: winter wheat, nitrogen fertilization, reduced applications, APPI-N, CHN, N deficiencies, Nitrogen Nutrition Index, N-Tester, innovation	

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