

PILOTAGE INTÉGRAL DE LA FERTILISATION AZOTÉE DU BLÉ DANS LES RÉGIONS CENTRE-VAL DE LOIRE ET GRAND EST : PLUS D'EFFICIENCE POUR MOINS DE PERTES



LEBRETON Pierre¹, GUILLIER-WEENS Maëva², BRUNET Anne³,
GABRIEL Honorine², JEUFFROY Marie-Hélène¹, MEYNARD Jean-Marc¹



¹ INRAE, Avenue Lucien Bretignières, 78850 THIVERVAL-GRIGNON

² Chambre Régionale d'agriculture Grand Est, Complexe Agricole du Mont Bernard, Route de Suippes, 51 000 CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE

³ Chambre Régionale d'agriculture Centre-Val de Loire, 13 Avenue des Droits de l'Homme 45 000 ORLEANS

1- Introduction

La méthode du Bilan, aujourd'hui devenue réglementaire dans les pratiques de fertilisation azotée, montre des limites dans sa mise en œuvre, qui entachent notablement ses performances : difficulté (et même désaccords entre acteurs) sur la manière d'estimer l'objectif de rendement ; manque de confiance dans les résultats de reliquat sortie hiver ; apports calés sur des stades de la culture, induisant une mauvaise prise en compte des conditions météo favorisant l'utilisation, par la culture, de l'engrais azoté apporté ; avancement des apports, en lien avec les risques de sécheresse en mars-avril, plus fréquents ces dernières années, réduisant de fait l'efficacité d'utilisation de l'engrais. De fait, ces difficultés affectent les performances agronomiques, économiques et environnementales de la méthode. Pour pallier ces difficultés, une nouvelle méthode, basée sur le pilotage intégral de la fertilisation et sur l'acceptation d'une période de carence azotée en début de montaison, a été mise au point (Ravier et al., 2018). Cet article présente les résultats d'essais de la méthode, dans deux régions de France.

2- Principe d'APPI-N

a. Fondements de la méthode

APPI-N est une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée, mise au point sur le blé tendre d'hiver, qui est née de la combinaison entre un diagnostic des usages de la méthode du Bilan (visant à comprendre les problèmes liés à sa mise en œuvre), et un travail de conception innovante participative, durant la thèse de Clémence Ravier (Ravier, 2017 ; Ravier et al., 2018). A la différence de la méthode du bilan, APPI-N ne nécessite pas de reliquat sortie hiver et de prévision d'un objectif de rendement. APPI-N repose sur un raisonnement dynamique, depuis la sortie hiver jusqu'à floraison, en se basant sur le suivi d'un indicateur de l'état de nutrition azotée de la culture (indice de nutrition azotée, INN) et sur une trajectoire seuil d'INN à ne pas franchir, sous peine de perte de rendement. L'objectif de cette nouvelle méthode est de maximiser le CAU (pour minimiser les pertes azotées) en maintenant les performances de production tant en terme qualitatif que quantitatif. Pour cela, APPI-N se base sur 2 piliers :

- (1) Accepter et favoriser une période de carence, non préjudiciable au rendement et à la teneur en protéines, en début de cycle, l'élaboration d'une trajectoire d'INN seuil qui ne doit pas être franchie, sous risque de perdre du rendement
- (2) S'appuyer sur les conditions climatiques pour décider des dates des apports, en objectivant le risque de sécheresse, et surtout en tenant compte des possibilités, généralement élevées, d'apports assez tardifs (peu de risques de sécheresse, en fréquentiel, dans la seconde moitié de

la montaison), c'est-à-dire en définissant une notion de « jour favorable à un apport » correspondant à des conditions d'humidité dans les 3 jours suivant l'apport, qui permettent de maximiser la valorisation de l'azote.

Ces 2 piliers sont intégrés dans la méthode lors de la création des abaques. Celles-ci sont calculées à partir d'un très grand nombre de simulations de stratégies de fertilisation (grâce au modèle Azodyn®), dans lesquelles les apports d'N sont réalisés (virtuellement) lors de jours favorables, identifiés chaque année (simulations réalisées sur 20 ans). Le tri des simulations sur la base de leurs performances (pas de franchissement de la trajectoire seuil et faibles pertes d'N) permet d'identifier les stratégies « viables ». Les abaques sont alors basés sur les stratégies viables les plus fréquentes sur les 20 années testées : ils permettent de définir les doses d'azote recommandées selon la date du contrôle et la valeur de l'INN de la culture, pour satisfaire ces deux contraintes.

En comparaison des méthodes de raisonnement classiquement utilisées jusqu'à maintenant, APPI-N propose une nouvelle manière de raisonner la fertilisation par le pilotage intégral des apports selon le protocole de mise en œuvre détaillé ci-dessous.

b. Mise en œuvre d'APPI-N :

Dès la sortie hiver (autour du 15 février en général), une placette étalon surfertilisée, d'une surface d'environ 2m² est positionnée : un apport de 50 uN à la sortie hiver est réalisé, puis un apport de 50 uN toutes les 3 semaines environ, jusqu'à la floraison, en tenant compte des jours favorables.

La méthode recommande de réaliser le suivi de l'INN du 15 février (sortie hiver, à condition que l'étalon sur-fertilisé ait déjà absorbé son azote) jusqu'à la floraison, de manière régulière pour ne pas passer à côté d'une recommandation de l'abaque. La mise en œuvre d'APPI-N consiste tout d'abord à identifier un jour favorable, c'est-à-dire un jour où une pluie est prévue dans les 3 jours (si possible de 5-10 mm au moins) ou que le sol est suffisamment humide pour que l'engrais apporté diffuse. Lorsqu'un jour favorable se présente, l'INN est estimé grâce à un outil (ici, le HN-Tester®, qui mesure la transmittance, en pinçant les feuilles, corrélée au contenu en chlorophylle des feuilles). Les mesures sont faites à deux endroits : une série de 30 mesures sur une zone représentative de la partie de la parcelle où APPI-N est appliquée, et une autre série de mesures sur l'étalon « surfertilisé ».

Grâce à ces 2 valeurs, le ratio $\frac{\text{Valeur HN-Tester® zone pilotée}}{\text{Valeur HN-Tester® étalon surfertilisé}}$ est calculé et permet d'estimer la valeur de l'INN. Enfin en fonction de la date du contrôle et de l'INN estimé, l'abaque recommande, ou non, de réaliser un apport, et indique la dose optimale. Il est recommandé d'attendre 15 jours entre deux apports, afin que l'azote soit complètement valorisé. Cependant, il est possible de réaliser des contrôles plus fréquents de l'INN pour suivre la dynamique de nutrition azotée de la culture.

3- Dispositif d'évaluation en région Centre Val de Loire et Grand Est

Afin d'évaluer APPI-N, de nombreux essais ont été mis en place dans le cadre du PEI SOLINAZO dans la région Centre-Val de Loire et du PEI PARTAGE en région Grand Est. Deux types de dispositif ont été mis en place : un dispositif en micro-parcelles en Centre-Val de Loire et un dispositif en bandes agriculteur en région Grand Est.

a. Dispositif en micro-parcelles en région Centre-Val de Loire

En Centre-Val de Loire, le dispositif expérimental a été mis en œuvre en collaboration avec INRAE, les Chambres d'agriculture de chaque département de la région (et la FDGEDA pour le Cher), deux coopératives agricoles et deux instituts techniques (voir la localisation des essais sur la Figure 1). Il est composé de 39 essais, en micro-parcelles (50 m²) de 4 blocs randomisés chacun, répartis sur 3 années de 2018 à 2020. En plus de la modalité « APPI-N », une modalité témoin « zéro azote » et une modalité « méthode du bilan prévisionnel » ont été mises en place afin de comparer les stratégies de fertilisation et les performances obtenues. 20 essais ont été conservés pour la synthèse des résultats

présentée ici, les 19 autres ayant présenté des écarts trop importants par rapport aux recommandations de la méthode APPI-N. Ils ont cependant été utilisés pour tester la robustesse de la méthode.

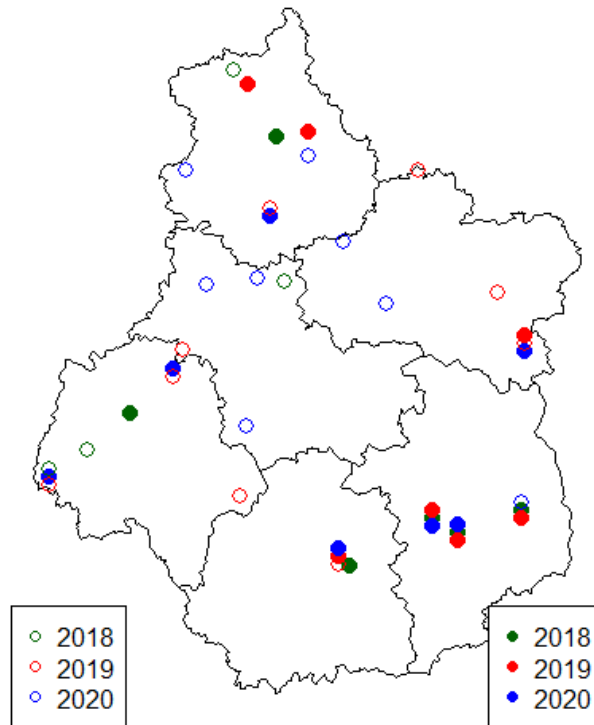


Figure 1 - Localisation des essais du projet SOLINAZO en région Centre-Val de Loire. En rond plein, les essais retenus pour la synthèse ; en rond vide, les essais retenus pour tester la robustesse de la méthode, dans des situations avec écarts aux recommandations

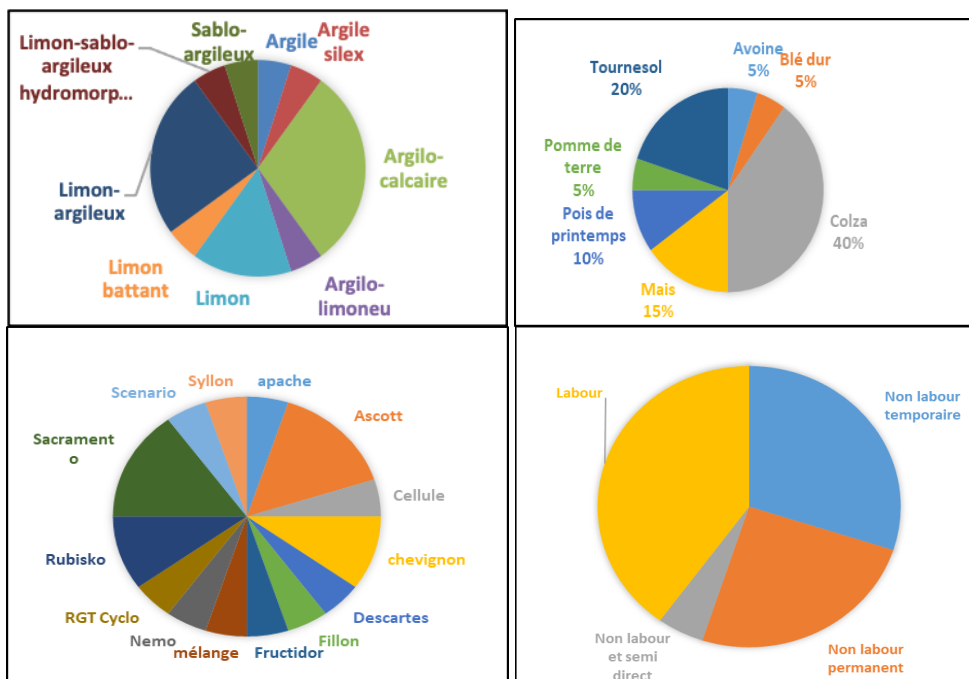


Figure 2 - Diversité des situations rencontrées dans les essais en Centre Val de Loire. Les types de sol (en haut à gauche), les précédents culturaux (en haut à droite), les variétés de blé mises en culture lors des tests (en bas à gauche) et les types de gestion du sol (en bas à droite).

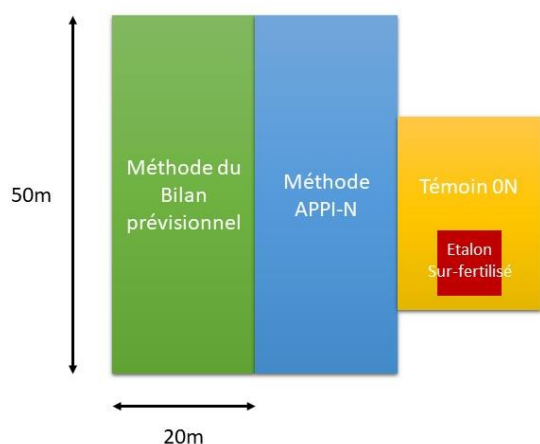
Ces expérimentations ont été réalisées dans diverses situations culturales (Figure 2) : 9 types de sol, 7 précédents culturaux, 13 variétés pures et 1 association variétale, et 4 types de travail du sol (dont environ ¼ des parcelles en non travail du sol permanent). Cette diversité de conditions a été recherchée pour tester la méthode dans une large gamme de situations. Alors que, dans la méthode du Bilan, ces situations nécessitent des paramètres variés, le même abaque a été appliqué dans le cas d'APPI-N sur toutes ces situations. Seule une différence d'abaque a été proposée aux utilisateurs, en fonction de l'analyse fréquentielle du climat de la région. En effet, les différences liées à la variété, au type de sol, au précédent ou au type de travail du sol se révèlent essentiellement par la dynamique d'évolution de l'INN de la culture.

b. Dispositif en bandes dans des parcelles d'agriculteurs en région Grand Est

Dans la région Grand Est, la méthode APPI-N est testée, depuis 2019, en parcelles d'agriculteurs, sur blé et orge d'hiver, fertilisées avec de l'azote minéral et/ou organique (digestats de méthanisation) soit un total de 42 essais. Les résultats présentés ici concernent uniquement les essais sur blé d'hiver fertilisés avec de l'azote minéral, soit 36 essais dans différents contextes pédoclimatiques caractérisés par les petites régions agricoles de la région (Figure 3).



Figure 3 - Essais menés de 2019 à 2021 en Grand Est dans différentes petites régions agricoles avec différents précédents culturaux



Le dispositif expérimental, suivi par des conseillers du réseau des Chambres d'agriculture Grand Est, est constitué d'essais en bandes de 20m de large par 50m de long en parcelles d'agriculteurs. A minima deux modalités sont présentes dans chaque essai : une bande pilotée par la « méthode du bilan prévisionnel » et une bande pilotée par la « méthode APPI-N ». Depuis 2020, un étalon surfertilisé d'environ 2m² est également mis en place (4). Sur certains essais, une modalité témoin « zéro azote » non fertilisée est aussi installée.

Figure 4 - Dispositif en bandes dans des parcelles d'agriculteurs

c. Variables d'évaluation de la méthode APPI-N

Dans une première étape, nous avons comparé les modalités de fertilisation azotée appliquées entre les stratégies testées : dates et doses des apports réalisés, dose totale appliquée.

Afin d'évaluer la fiabilité de la méthode APPI-N, les performances agronomiques, économiques et environnementales de cette méthode de pilotage intégral ont été comparées à celles d'une méthode de référence : la méthode du bilan prévisionnel.

Ainsi, nous avons calculé : le rendement normé à 15% d'humidité, la teneur en protéine des grains récoltés (%), et la marge partielle dégagée (produit brut – coût de l'engrais azoté appliqué – coût des passages liés à l'application d'engrais). Cette dernière est calculée à partir : des prix moyens de l'azote et du blé de chaque année, de la réfaction ou bonification de ce dernier selon la teneur en protéine obtenue, et du coût de mécanisation selon le nombre d'apports, et par conséquent de passages de tracteur.

Les performances environnementales sont évaluées par les pertes d'azote estimées à partir du CAU, et affectées d'un facteur d'émissions liées aux pertes de N₂O, et des émissions de CO₂-équivalent liées à la fabrication et à l'épandage de l'engrais (volatilisation potentielle et passages de tracteur).

4- Résultats des tests

a. Résultats en Micro-parcelles en région Centre-Val de Loire

La région Centre-Val de Loire a fait l'objet de longues périodes de sécheresse en 2019 et 2020, en comparaison aux 20 dernières années : le cumul de jours sans pluies a été très élevé entre le 10 mars et le 15 ou 28 avril pour les deux années (Figure 5).

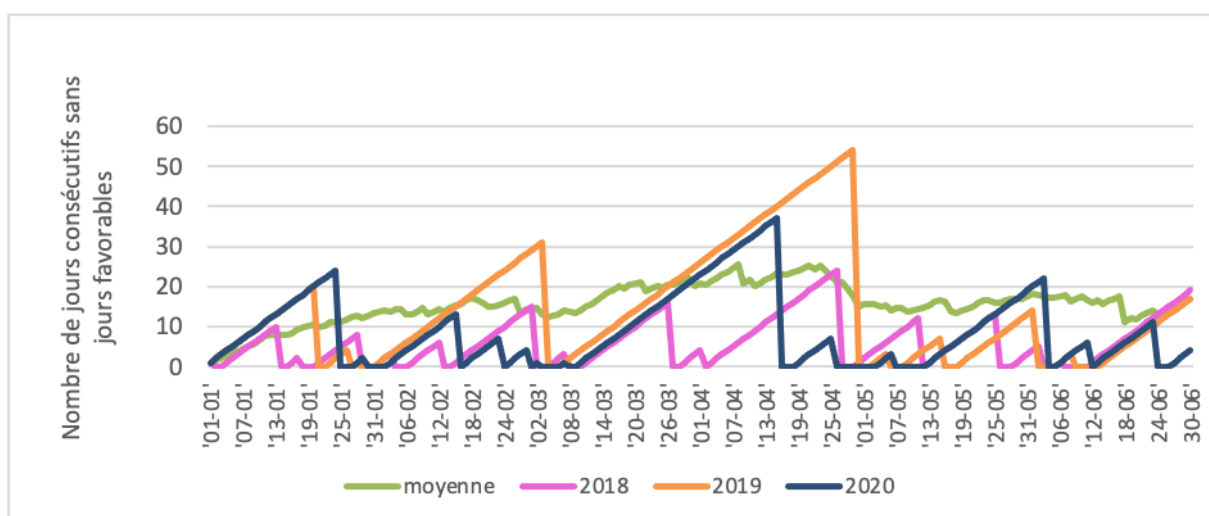


Figure 5 - Représentation du cumul de jours sans condition favorable (nombre de jours sans pluie) sur la période de début janvier à fin juin, en moyenne sur les 20 dernières années (en vert), en 2018 (en rose), 2019 (en orange) et 2020 (en bleu)

a1. Des changements de pratiques (retardement du 1^{er} apport et diminution du nombre d'apports)

Les expérimentations ont révélé des changements dans les modalités d'apports appliquées. On constate un retardement du 1^{er} apport d'une vingtaine de jours en moyenne, par rapport à la méthode du bilan : alors que le 1^{er} apport est réalisé sur celle-ci autour du 24 février, il est déclenché vers le 16 mars en moyenne sur APPI-N (Figure 6a). Cependant, on note également une grande variabilité entre parcelles sur cet écart, ce qui montre la forte adaptation de la méthode aux caractéristiques de la parcelle. L'existence régulière d'un écart entre les deux stratégies s'explique par le fait de favoriser une période de carence azotée en début de cycle dans la méthode APPI-N, alors que la méthode du bilan vise à maintenir non limitante la nutrition azotée tout au long du cycle, et en particulier dès la sortie hiver. On constate également une diminution du nombre moyen d'apports sur la modalité « APPI-N »

(Figure 6b) : la moitié des essais ont reçu 3 apports et l'autre moitié n'en a reçu que 2, sur la modalité APPI-N, alors que pour la modalité « méthode du bilan », un fractionnement de 3 apports a été réalisé sur 95% des essais et de 4 apports sur 5% des essais. La réduction du nombre d'apports permet en moyenne de diminuer de 18% les émissions liées aux passages de tracteur pour l'épandage d'engrais (à raison d'une émission de 6,24 kg CO₂ eq/ha/passage).

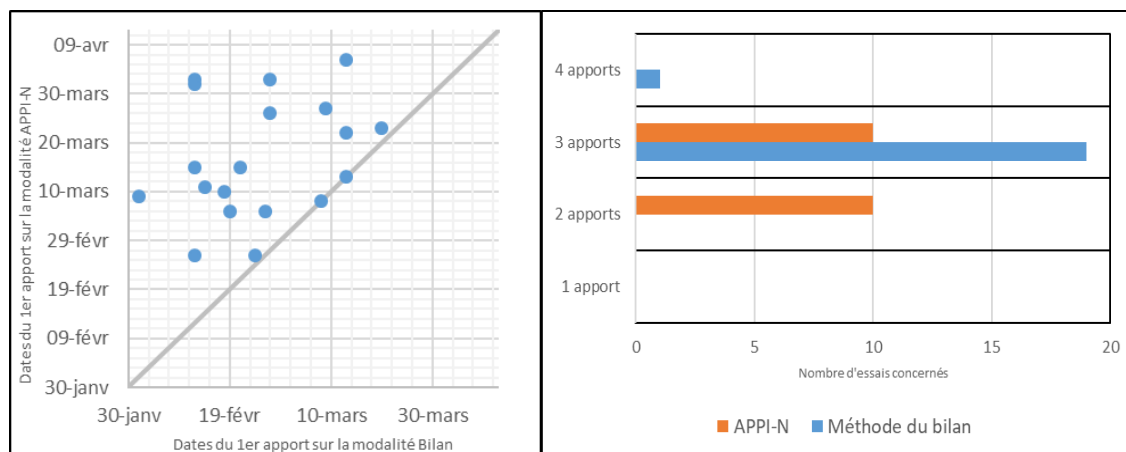


Figure 6 – Comparaison de la date du 1^{er} apport (Figure 6a, à gauche) et du nombre d'apports (Figure 6b, à droite), entre la modalité APPI-N et la modalité Bilan sur les parcelles expérimentales en région Centre-Val de Loire.

a2. Un maintien des performances économiques pour une meilleure performance environnementale

En moyenne sur les 20 essais en Centre-Val de Loire, la dose totale d'engrais N apporté a été réduite significativement de 16 kg N/ha sur la modalité « APPI-N », par rapport à la modalité « Bilan », pour un rendement et une teneur en protéine équivalents (Tableau 1 ; Figure 7). Les écarts de dose se sont étalés entre -80 et + 30 kg/ha : sur certaines parcelles, la dose « APPI-N » a même été légèrement supérieure à la dose « Bilan », ainsi que le rendement, montrant ainsi la capacité de la méthode à s'adapter à chaque situation. Enfin, la marge partielle dégagée est similaire entre les 2 méthodes. Ainsi, pour une quantité d'azote plus faible, les performances économiques sont maintenues.

Tableau 1 - Performances économiques moyennes des 20 essais sur les 3 années de test (2018, 2019, 2020) en région Centre-Val de Loire

	Dose totale apportée (kg N/ha)	Rendement à 15 % d'humidité (q/ha)	Teneur en protéine (%)	Marge partielle dégagée (€/ha)
Bilan	171	85,6	11,6	1273
APPI-N	155	84,3	11,7	1270
Ecart de moyenne	-16	-1,3	+0,1	-3
p-value	0,03648	0,2808	0,1976	0,8894

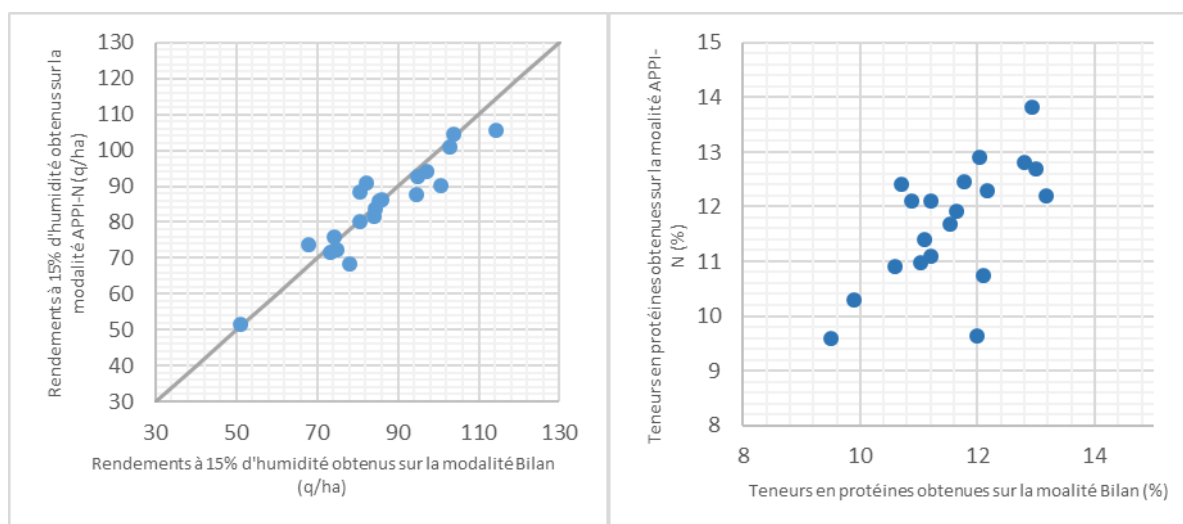


Figure 7 – Comparaison des rendements à 15 % d’humidité en q/ha (à gauche) et des teneurs en protéines en % (à droite) obtenus sur la modalité APPI-N (en ordonnée) et sur la modalité bilan (en abscisse).

En moyenne, les pertes associées aux apports d’engrais, estimées par le CAU, ont été significativement réduites de 9 kg N/ha (Tableau 2; Figure 8). Les émissions de CO₂eq. liées à la fabrication et à l’épandage de l’engrais, y compris les passages de tracteur, ont été réduites de 627 kg CO₂eq/ha, soit une diminution de 26% en comparaison des émissions de CO₂eq calculées sur la modalité « bilan ». Enfin, le calcul de ces émissions, ramenées aux rendements de blé obtenus, ont également été réduites de 8,6 kg CO₂eq/q grâce à APPI-N.

Tableau 2 - Performances environnementales moyennes des essais sur les 3 années de tests

Modalités de fertilisation azotée	Pertes (kg N/ha)	Emissions de GES par hectare	Emissions de GES par quintal de produit
		(kg CO ₂ eq/ha)	(kg CO ₂ /q)
Bilan	28	2349	31,1
APPI-N	19	1725	22,2
Ecart	-9	-627	-8,6
p-value	0,05084	0,03588	0,02299

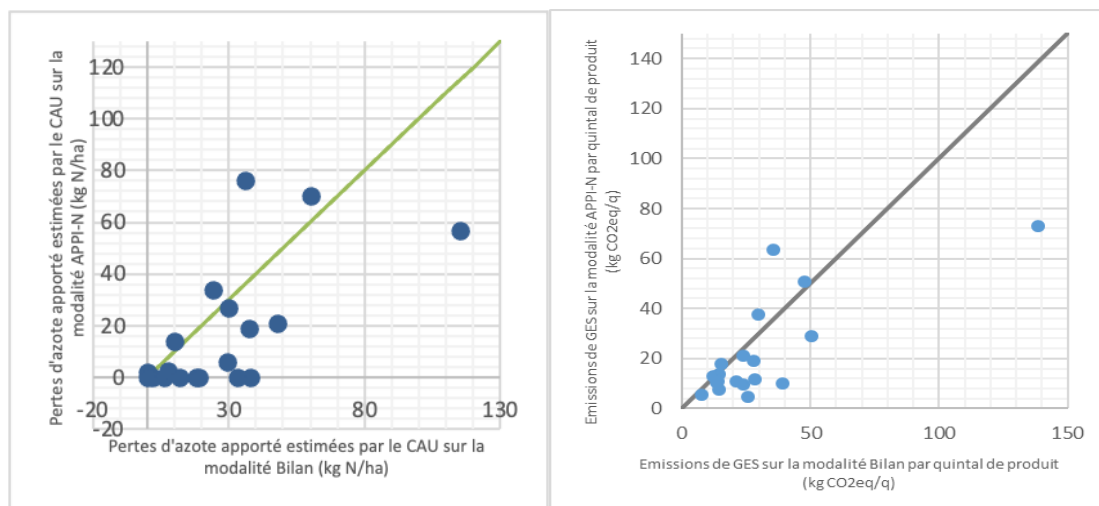


Figure 8 -Comparaison des pertes estimées par le CAU en kg N/ha (à gauche) et des émissions de GES en kg CO2eq/q (à droite) sur la modalité APPI-N (en ordonnée) et sur la modalité bilan (en abscisse).

b. Résultats des Bandes agriculteurs en région Grand Est

La méthode de pilotage « APPI-N » est testée en Grand Est depuis 2019. Différentes évolutions dans la méthode de pilotage ont été proposées durant ces trois années de test, notamment sur les abaques qui permettent de piloter les apports d'azote. En effet, les apports étaient préconisés, en 2019, en fonction de l'INN et du stade du blé, puis en 2020, en fonction de l'INN et de la date de mesure. En 2020, les abaques ont été recalculés en tenant compte du pédo-climat de Bourgogne Franche-Comté. En 2021, les apports ont pu être pilotés en fonction de l'INN et de la date de la mesure, avec des abaques adaptés à trois pédo-climats de Grand Est (Champagne Crayeuse, Plateau Lorrain et Plaine alsacienne). Seuls les essais suivis en 2020 et 2021 sont retenus ici. De plus, les conseillers en charge du suivi des essais ont parfois adapté le protocole à la marge selon le contexte et les contraintes des agriculteurs hébergeant les essais, les essais sont alors qualifiés de « Type 2 ». Ainsi, seules 16 parcelles ont été pilotées en suivant strictement le protocole (appelées de « Type 1 ») en 2020 et 2021, ce sont les résultats de ces essais qui sont présentés ci-après. A noter également que 2020 fut une année très sèche dans la région Grand Est au regard des 20 dernières années (record de niveau bas de Réserve Utile du sol depuis 1998 atteint en mars).

b1. Des changements de pratiques (retardement du 1^{er} apport et diminution du nombre d'apports)

Les tests d'évaluation ont également révélé des changements dans la stratégie d'apport. On constate un retardement du 1^{er} apport de 15 à 25 jours par rapport à la méthode du bilan, le premier apport s'étalant du 15 Février au 1^{er} Mars pour la modalité « méthode du bilan » selon les secteurs, et du 27 Février au 30 Mars pour la modalité « méthode APPI-N ». On constate également une tendance à la diminution du nombre d'apports sur la modalité « APPI-N » (Figure).

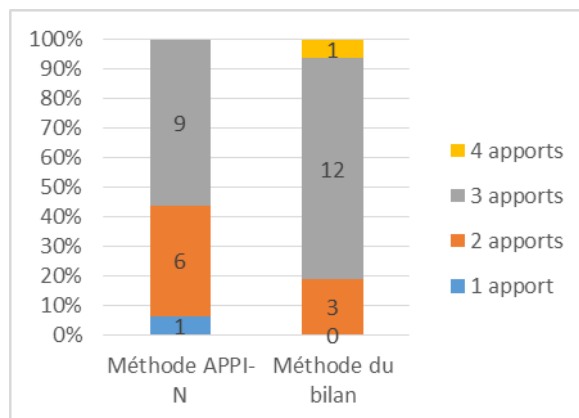


Figure 9 – Répartition des parcelles selon le nombre d'apports d'azote reçus (n=16)

b2. Un maintien des performances économiques pour une meilleure performance environnementale

L'ensemble des résultats d'essais de 2019 à 2021 de Type 1 et de Type 2 est représenté en Figure 10. On considère dans ces essais en bandes, qu'une différence de rendement n'est significative qu'au-delà de ± 6 q/ha.

Pour les essais de 2020 et 2021 de Type 1, le rendement de la modalité « méthode APPI-N » est équivalent au rendement de la modalité « méthode du bilan » (+ 0,9 q/ha pour la modalité « méthode APPI-N » en moyenne). Le taux protéique est également équivalent avec en moyenne + 0,3 point pour la modalité « méthode APPI-N ». La marge partielle moyenne est supérieure de 38 €/ha avec une valeur moyenne de 1 295 €/ha pour la modalité « méthode APPI-N » et 1 257 €/ha pour la modalité « méthode du bilan ».

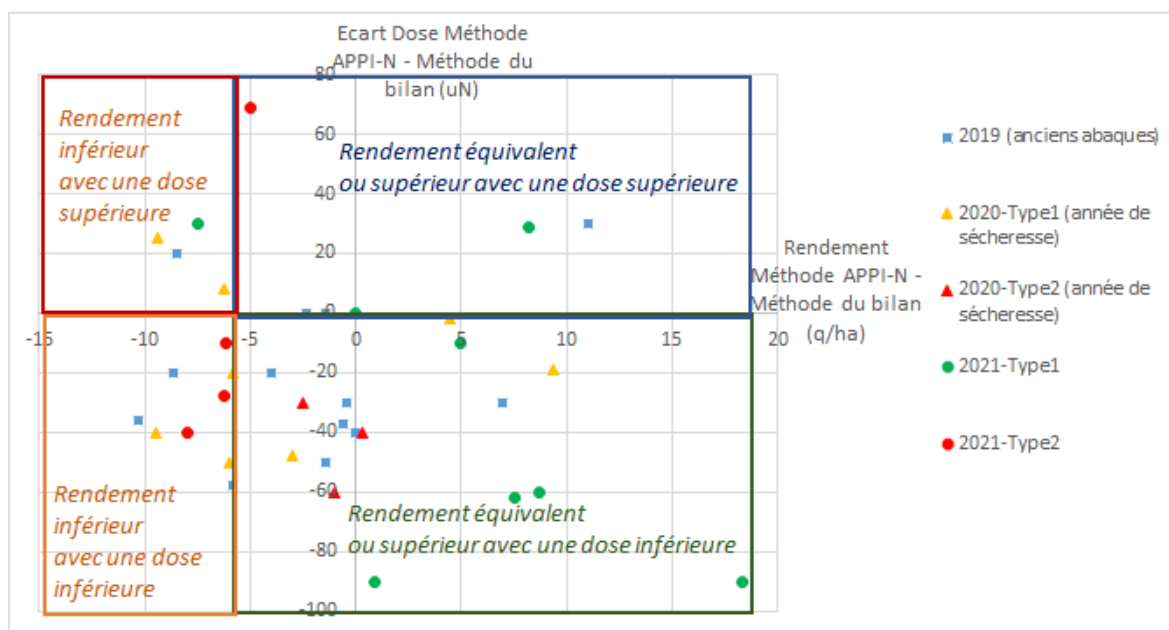


Figure 10 - Comparaison des écarts de rendement aux écarts de dose totale d'azote entre APPI-N et Bilan sur l'ensemble des essais menés en Grand Est (n=36)

Par ailleurs, le CAU est amélioré par la « méthode APPI-N » avec une valeur moyenne de 74% contre 59% pour la « méthode du bilan » soit une réduction des pertes moyenne de 36 kg N/ha (calculé sur les parcelles 2020-2021 de Type 1 avec témoin 0N, soit n=7).

Les émissions de GES en kg CO₂eq./ha, estimées en considérant la fabrication des engrais, les pertes à l'épandage ainsi que les émissions liées aux passages de tracteur, sont réduites de 39% pour la modalité « méthode APPI-N » comparativement à la modalité « méthode du bilan ».

Tableau 3 - Emissions de CO₂ estimées sur chacune des modalités

	<i>Emissions liées à la fabrication d'engrais (kg CO₂éq/ha)</i>	<i>Emissions liées aux pertes à l'épandage (kg CO₂éq/ha)</i>	<i>Emissions liées à l'épandage (passages de tracteur) (kg CO₂éq/ha)</i>	<i>Total des Emissions (kg CO₂éq/ha)</i>	
<i>Méthode du bilan</i>	926	3878	18	4 823	
<i>Méthode APPI-N</i>	791	2120	16	2 928	Soit -39%

c. Les retours d'usages

Etant donné les différences de raisonnement de la stratégie de fertilisation proposée par APPI-N, des changements dans les habitudes des expérimentateurs ont été observés durant les tests, conduisant parfois même à des difficultés d'application de la méthode APPI-N, basée sur un raisonnement radicalement différent de celui de la méthode du Bilan. Plusieurs entretiens ont été menés auprès de 10 usagers en Centre-Val de Loire pour étudier ces changements.

Un premier changement, observé et mis en avant par les utilisateurs de la méthode, réside dans la couleur du blé en début de cycle. En effet, on peut observer un léger jaunissement du blé sur APPI-N, dû au retardement du 1^{er} apport, mais qui n'a pas de conséquence préjudiciable sur le rendement : c'est la tolérance aux carences de début de cycle qui est un principe de base de APPI-N. Le jaunissement du blé peut être vecteur d'inquiétude, ce qui a parfois engendré des écarts dans l'application d'APPI-N, avec des apports déclenchés trop précocement par rapport aux préconisations. La reprise de couleur verte est constatée dès le premier apport, ce qui rassure les usagers sur l'absence d'impact de la carence. Certains usagers ont proposé d'utiliser cette décoloration transitoire comme support pédagogique pour illustrer la notion de carence tolérable avec les résultats de rendement à la clef.

Un deuxième retour d'usage concerne l'estimation de l'INN grâce à une pince HN-Tester® de la sortie hiver jusqu'à la floraison. C'est un changement dans les habitudes puisque cet outil était, au mieux, utilisé une fois, pour le pilotage du 3^{ème} apport. Pour APPI-N, c'est un suivi avec des mesures régulières qui est proposé pour ne pas passer à côté de bonnes conditions d'humidité et du besoin de la culture. Il est important de noter que ce suivi doit être réalisé jusqu'à la floraison, alors que, dans les pratiques habituelles, la fertilisation est arrêtée bien avant ce stade. En effet, sur certains essais, le suivi a été arrêté trop tôt, lors du dernier apport de la méthode du bilan (mi-fin avril), ce qui a engendré parfois des carences de fin de cycle, préjudiciables au rendement. Il y a donc ici un point de vigilance important à noter. Ensuite, certains utilisateurs aimeraient pouvoir utiliser d'autres outils pour estimer l'INN : GreenSeeker®, N-Sensor®, Satellite Sentinel 2, les pinçages étant perçus comme chronophages et compliqués en début de cycle. Mais, sur ce point, on observe de la variabilité puisque certains agriculteurs, profitant de leur tour de plaine hebdomadaire, réalisent ces mesures sans noter un surcroît de temps trop important. Au contraire, ils mentionnent que ces mesures leur permettent d'observer plus finement les parcelles et de surveiller le bon état des plantes.

5- Conclusion globale de l'évaluation

a. APPI-N, adaptée à la diversité des contextes et robuste dans l'usage

APPI-N a permis d'adapter les stratégies de fertilisation au potentiel de l'année et des parcelles, dans une grande diversité de contexte pédoclimatiques et techniques (types de sol, variétés, types de travail du sol).

La méthode APPI-N s'est également montrée résiliente face aux écarts d'application observés lors des tests. 3 types d'écarts sur les 5 identifiés n'ont pas eu d'impact sur les performances économiques d'APPI-N : un apport déclenché sans pluie annoncée (mais avec une pluie arrivant moins de 5 jours après), un écart à la dose recommandée (au maximum de +40 kgN/ha, et compensé par un apport faible par la suite) non justifié par l'expérimentateur, un délai entre l'estimation de l'INN et l'apport trop important et non justifié par les conditions climatiques. Néanmoins, les 2 autres types d'écarts sont préjudiciables à ses performances économiques : le décrochage de l'étalon surfertilisé et l'arrêt

précoce ou le début trop tardif du suivi d'INN; une irrégularité de suivi de l'INN non justifié par les conditions climatiques.

APPI-N est une méthode qui s'adapte en temps réel aux caractéristiques des situations, en prenant en compte les aléas de l'année. Le pilotage intégral, basé sur une application d'azote en fonction des caractéristiques de la culture, lui confère une robustesse face à certains écarts de mise en œuvre.

b. APPI-N, vecteur d'autonomie et catalyseur d'apprentissage et d'interactions

Catalyseur d'interaction :

APPI-N exige de nouveaux repères (capacité d'interprétation de l'INN, et couleur du blé, et leurs variations aux cours du temps) et de nouvelles pratiques (retardement du 1^{er} apport, possibilité d'apports d'N quel que soit le stade de la culture, y compris proches de la floraison) qui engendrent de nouvelles réflexions. Les échanges entre utilisateurs sont riches pour interpréter et discuter ces changements. La mise en œuvre d'APPI-N est donc un moyen de stimuler les discussions entre les conseillers et les agriculteurs dans la prise de décision sur les apports d'azote, les observations du couvert et l'interprétation de l'évolution de l'INN, tout ceci étant généralement favorable à de meilleures pratiques.

Par ailleurs, elle a initialement été développée par un travail de co-conception avec des agriculteurs et des conseillers. Cette volonté de collaboration avec les praticiens a été maintenue durant cette évaluation afin d'obtenir leurs retours d'usages, et leurs idées d'amélioration. Elle représente donc aussi un support d'interaction entre les agriculteurs, les conseillers et les chercheurs.

Catalyseur d'apprentissage :

APPI-N et ses nouveaux repères représentent des supports pédagogiques clés pour illustrer les notions fondamentales utilisées dans cette nouvelle méthode de pilotage intégral (carence précoce tolérable). Les agriculteurs mentionnent également que cette méthode est très pédagogique pour suivre le cycle de l'azote dans chaque parcelle : elle permet de suivre de manière indirecte la minéralisation de l'azote du sol en sortie hiver via la date de déclenchement du 1^{er} apport, de voir directement l'influence des conditions climatiques sur la dynamique d'absorption de l'azote par la culture, l'influence du précédent cultural via les différences de date de 1^{er} apport et de dose recommandée ensuite.

L'utilisation de la pince HN-Tester®, la lecture des abaques, le choix dans les doses, le choix de l'apport en fonction des conditions climatiques ainsi que les repères précédemment cités sont des éléments que les utilisateurs doivent s'approprier du fait de la rupture forte par rapport aux pratiques de fertilisation habituelles. Les habitudes parfois persistent et empêchent la bonne application de la nouvelle méthode APPI-N. On observe également un besoin de s'approprier progressivement la méthode que le temps et l'expérience permettent d'acquérir.

Vecteur d'autonomie :

La méthode APPI-N favorise l'autonomie des agriculteurs dans leur raisonnement de la fertilisation. L'INN, même s'il peut servir de support de discussion, permet à l'utilisateur d'être autonome pour décider des jours de contrôle (y compris les jours nuageux ou les week-ends), déclencher ses apports et autoévaluer ses décisions a posteriori, lui redonnant donc la main sur sa gestion des risques dans ses pratiques.

c. De nouvelles perspectives pour le raisonnement de la fertilisation en France

L'amélioration et le développement d'APPI-N continuent :

- Une application internet, utilisable sur smartphone et ordinateur, est en cours de développement. Elle permettra de mettre en œuvre APPI-N de façon plus automatisée (calcul du ratio d'INN, détermination de la dose d'apport selon l'abaque) et fournira des

recommandations supplémentaires afin d'accompagner l'utilisateur dans la prise de décision et l'aider à faire ses choix. Elle donnera également la possibilité d'enregistrer les données issues de la mise en œuvre d'APPI-N tout au long de la campagne et sur plusieurs parcelles.

- Des travaux sont en cours pour mettre au point d'autres outils que la pince HN-Tester® pour estimer l'INN par les utilisateurs : Greenseeker®, systèmes embarqués sur le tracteur (N-Sensor®), des images satellites (Sentinel 2), etc.
- De nombreux tests ont été réalisés, depuis plusieurs années, dans différentes régions de France : il serait intéressant d'en faire une synthèse globale.
- Après ces tests validant la méthode à l'échelle de la parcelle, des questions se posent pour adapter la mise en œuvre d'APPI-N à plus grande échelle (exploitation agricole, territoire).
- Enfin, l'adaptation de la méthode APPI-N à d'autres cultures devrait être étudiée dans les années à venir.

D'autres perspectives sont envisagées pour cette nouvelle manière de gérer sa fertilisation azotée : d'une part, étudier ses effets indirects sur la dynamique de population d'adventices, ainsi que les risques de verse. D'autre part, des travaux seront conduits dans l'avenir sur son utilisation pour gérer des systèmes pour lesquels il n'existe pas encore de stratégie claire pour raisonner leur fertilisation azotée, comme les associations plurispécifiques, les systèmes en couvert permanent ou les mélanges de variétés. Enfin, une évolution s'amorce pour l'intégration des méthodes de pilotage intégral dans la réglementation.

Pour conclure, de nouveaux enjeux économiques et environnementaux se jouent actuellement autour de la fertilisation azotée, notamment avec l'augmentation importante des prix des fertilisants azotés minéraux sous toutes les formes. De plus, une méthode sectorielle grandes cultures a été approuvée au label bas carbone du ministère français, favorisant ainsi des changements de pratiques permettant de réduire les émissions de CO₂ des exploitations agricoles, dont la fertilisation azotée est un axe majeur.

6- Références bibliographiques

- Ravier C, Jeuffroy MH, Meynard JM., 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: the case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS – Wageningen J. Life Sci.*, 79, 31-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.njas.2016.10.001>
- Ravier, C., 2017. Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation. PARIS-SACLAY.
- Ravier C., Meynard J.M., Cohan J.P., Gate P., Jeuffroy M.H., 2017. Early nitrogen deficiencies favor high yield, grain protein content and N use efficiency in wheat. *Eur J Agr*, 89, 16-24
- Ravier C., Quemada M., Jeuffroy MH. 2017. Use of a chlorophyll meter to assess nitrogen nutrition index during the growth cycle in winter wheat. *Field Crops Research*. 214, 73-82
- Ravier C., Jeuffroy MH., Gate P., Cohan JP., Meynard JM., 2018. Combining diagnosis of uses with participatory design to develop new methods for managing N fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110: 117–134 ; <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9891-5>
- Ravier, C., Sabatier, R., Beillouin, D., Meynard, J.-M., Trépos, D., Jeuffroy, M.-H., 2021. Decision rules for managing N fertilization based on model simulations and viability assessment. *Eur. J. Agron.*, 125, 126247. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126247>