Une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé, basée sur le pilotage intégral: la méthode APPI-N

Marie-Hélène Jeuffroy, Pierre Lebreton, Jean-Marc Meynard

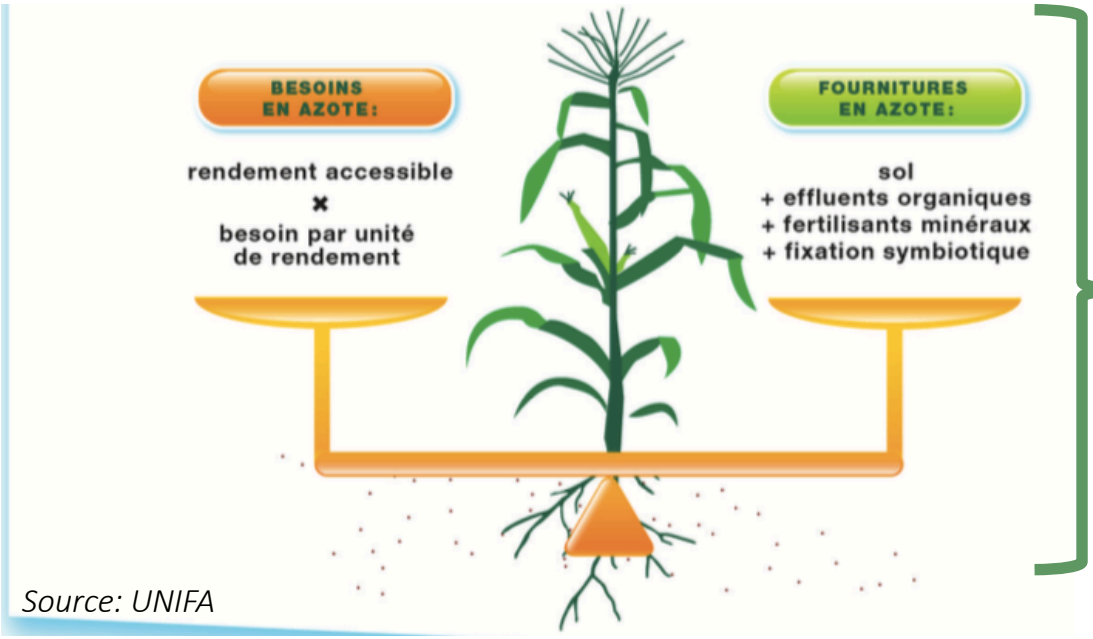
INRAE Grignon

7 décembre 2021

Méthode de fertilisation dominante: principes du Bilan

Un modèle de raisonnement de la fertilisation azotée, **unique** depuis plus de 40 ans

- Méthode du bilan *(Hébert, 1969; Rémy et Hébert, 1977)*:



Source: UNIFA

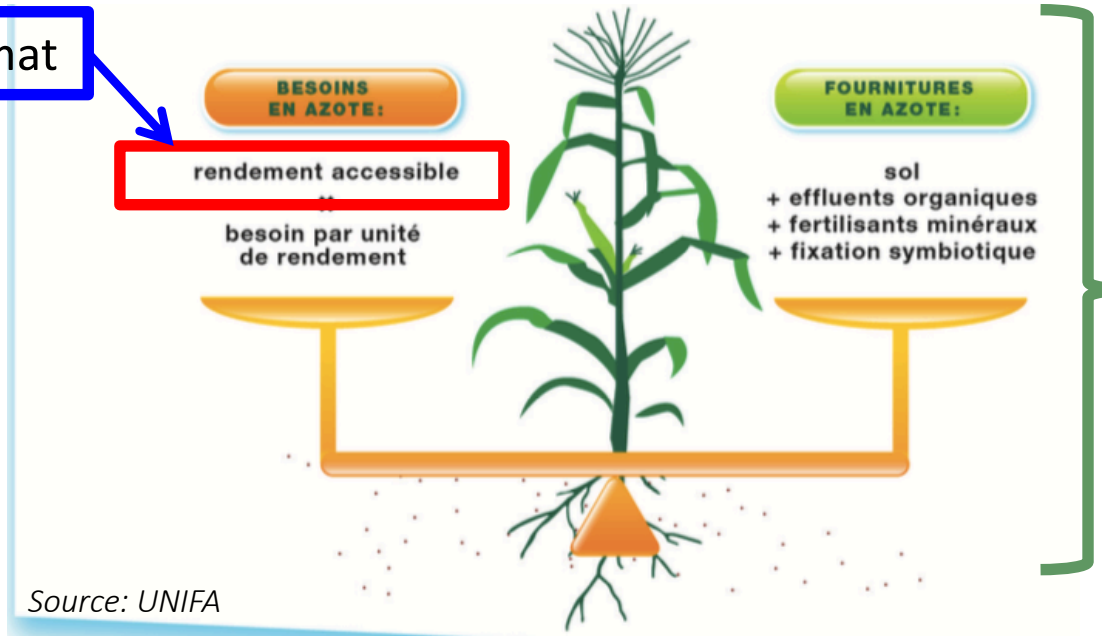
Nmin dans le sol à Sortie Hiver
+
N issu de la minéralisation, entre Sortie Hiver et récolte, de l'humus, des résidus du précédent, des effluents organiques apportés
+
Dose engrais N

Méthode de fertilisation dominante: principes du Bilan

Un modèle de raisonnement de la fertilisation azotée, **unique** depuis plus de 40 ans

- Méthode du bilan *(Hébert, 1969; Rémy et Hébert, 1977)*:

climat



Source: UNIFA

Nmin dans le sol à Sortie Hiver

+

N issu de la minéralisation, entre Sortie Hiver et récolte de l'humus, des résidus du précédent, des effluents organiques apportés

+

Dose engrais N

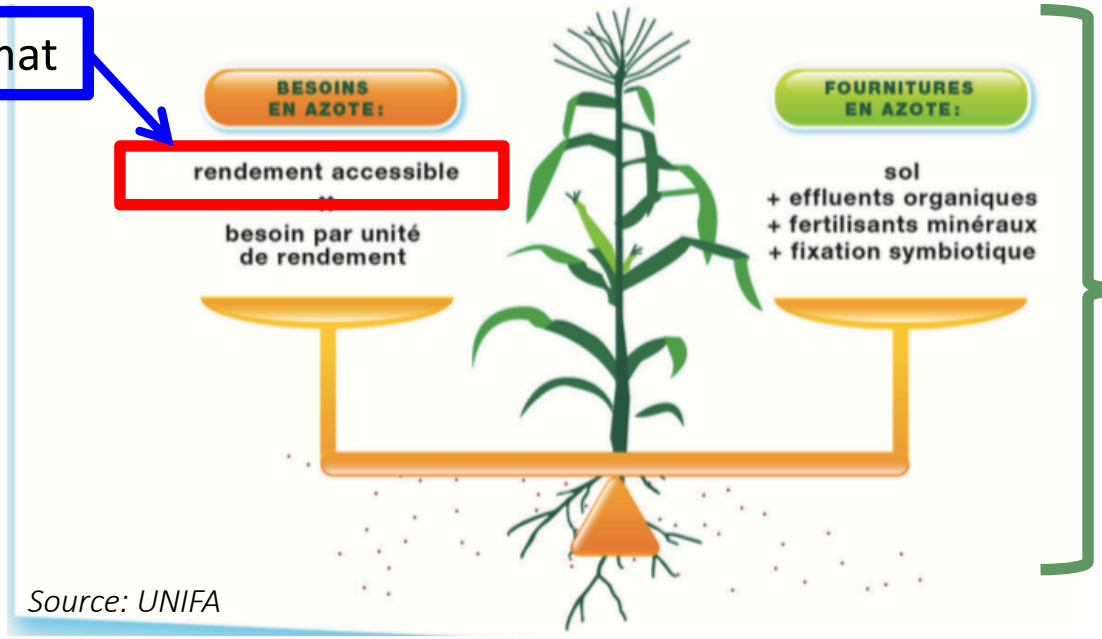
climat

Méthode de fertilisation dominante: principes du Bilan

Un modèle de raisonnement de la fertilisation azotée, **unique** depuis plus de 40 ans

- Méthode du bilan *(Hébert, 1969; Rémy et Hébert, 1977)*:

climat



Source: UNIFA

Nmin dans le sol à Sortie Hiver

+

N issu de la minéralisation, entre Sortie Hiver et récolte de l'humus, des résidus du précédent, des effluents organiques apportés

+

Dose engrais N

climat

- Une amélioration continue du raisonnement par un affinement de l'estimation des différents postes (logique additive, cohérente avec la segmentation des recherches) … depuis 40 ans !

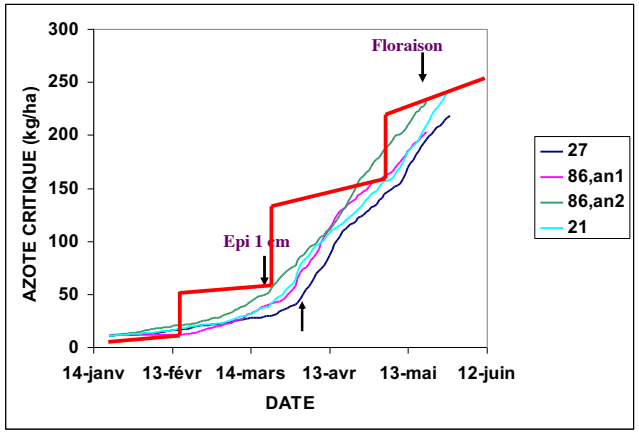
- Une diffusion massive de la méthode, une procédure de raisonnement consensuelle largement diffusée, des références mises à jour par le COMIFER et des références locales proposées par les organismes de R&D

Méthode de fertilisation dominante: principes du Bilan

Des éléments de raisonnement et des pratiques d'application qui font consensus :

- Calcul prévisionnel de la dose totale dès la sortie hiver
- Règles de fractionnement calées sur stades ou dates (Sortie Hiver, Epi1cm, 2Noeuds)
- Ajustement de la dose du dernier apport, avec outil de pilotage

Pour maintenir une nutrition azotée non limitante tout au long du cycle !

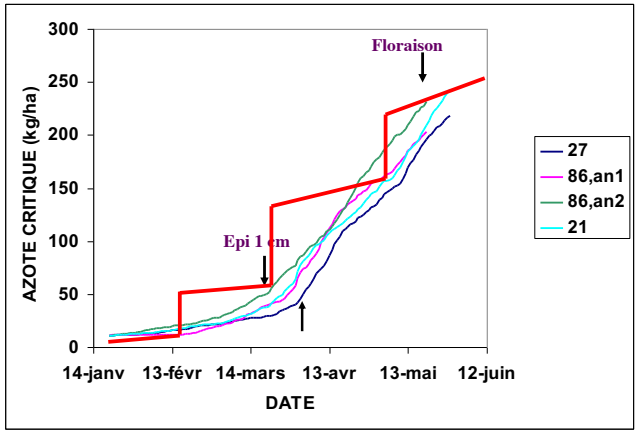


Méthode de fertilisation dominante: principes du Bilan

Des éléments de raisonnement et des pratiques d'application qui font consensus :

- Calcul prévisionnel de la dose totale dès la sortie hiver
- Règles de fractionnement calées sur stades ou dates (Sortie Hiver, Epi1cm, 2Noeuds)
- Ajustement de la dose du dernier apport, avec outil de pilotage

Pour maintenir une nutrition azotée non limitante tout au long du cycle !



MAIS toujours des problèmes environnementaux !

- Nitrates dans les eaux
- Emissions de GES: N_2O
- Forte consommation en énergie fossile (fabrication engrais minéraux)

Et antagonisme entre enjeux environnementaux et économiques

Problèmes rencontrés par les utilisateurs de la méthodes du Bilan

- **Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan (d'après enquêtes d'agriculteurs et de conseillers + analyse rapports GREN):**
  - Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement

Problèmes rencontrés par les utilisateurs de la méthodes du Bilan

- **Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan (d'après enquêtes d'agriculteurs et de conseillers + analyse rapports GREN):**
  - Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement

Pouvoirs publics:
Eviter les cas de sur-fertilisation

« L'objectif de rendement sera calculé comme la moyenne des rendements réalisés sur l'exploitation pour la culture […] concernée et, si possible, pour des conditions comparables de sol au cours des cinq dernières années en excluant les valeurs maximale minimale »
(Arrêté préfectoral)

Organismes professionnels agricoles:
Logique de potentiel

- Risque de ne pas atteindre les potentialités les années favorables
- Risque de stagnation des rendements
- Non prise en compte du progrès génétique
- N non suffisant pour teneur en protéine
- Non disponibilité de l'historique sur 5 ans

Agriculteurs: Rendement qu'ils estiment pouvoir réaliser:
*« Je mets 100 quintaux là où je sais que **je peux les faire** »*
*« Mon rendement est autour de 70-80 quintaux, 90 pour certaines parcelles […], je mets souvent 90 quintaux, parce que **je les ai déjà faits** »*

Problèmes rencontrés par les utilisateurs de la méthodes du Bilan

- **Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan (d'après enquêtes d'agriculteurs et de conseillers + analyse rapports GREN):**
  - Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement
  - L'analyse de sol: source d'incertitudes

Paradoxe: la mesure du Reliquat N minéral Sortie Hiver a des bases scientifiques et analytiques solides, mais son usage peut être source de doutes et d'erreurs

Problèmes rencontrés par les utilisateurs de la méthodes du Bilan

- **Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan (d'après enquêtes d'agriculteurs et de conseillers + analyse rapports GREN):**
  - Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement
  - L'analyse de sol: source d'incertitudes

Paradoxe: la mesure du Reliquat N minéral Sortie Hiver a des bases scientifiques et analytiques solides, mais son usage peut être source de doutes et d'erreurs

« On conseille, lorsque les valeurs de RSH sont aberrantes, supérieures à 70, de ne pas le prendre en compte » (Conseiller)

« Je fais un reliquat pour abonder la moyenne mais je prends la moyenne, est-ce que j'ai tort ? » (Agriculteur)

« Je fais des analyses de sol mais souvent mes valeurs sont supérieures à la moyenne régionale, je me demande si la mesure est fiable » (Agriculteur)

« Il y a tellement de conditions à réunir pour que la mesure soit fiable … Et c'est encore plus compliqué de savoir à quelle parcelle on a le droit d'extrapoler. C'est une méthode obsolète » (Conseiller)

Problèmes rencontrés par les utilisateurs de la méthodes du Bilan

- **Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan (d'après enquêtes d'agriculteurs et de conseillers + analyse rapports GREN):**
  - Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement
  - L'analyse de sol: source d'incertitudes
  - Pratiques actuelles ne permettant pas de maximiser l'efficience d'utilisation des engrais (apports anticipés à cause de la crainte de sécheresse)

Problèmes rencontrés par les utilisateurs de la méthodes du Bilan

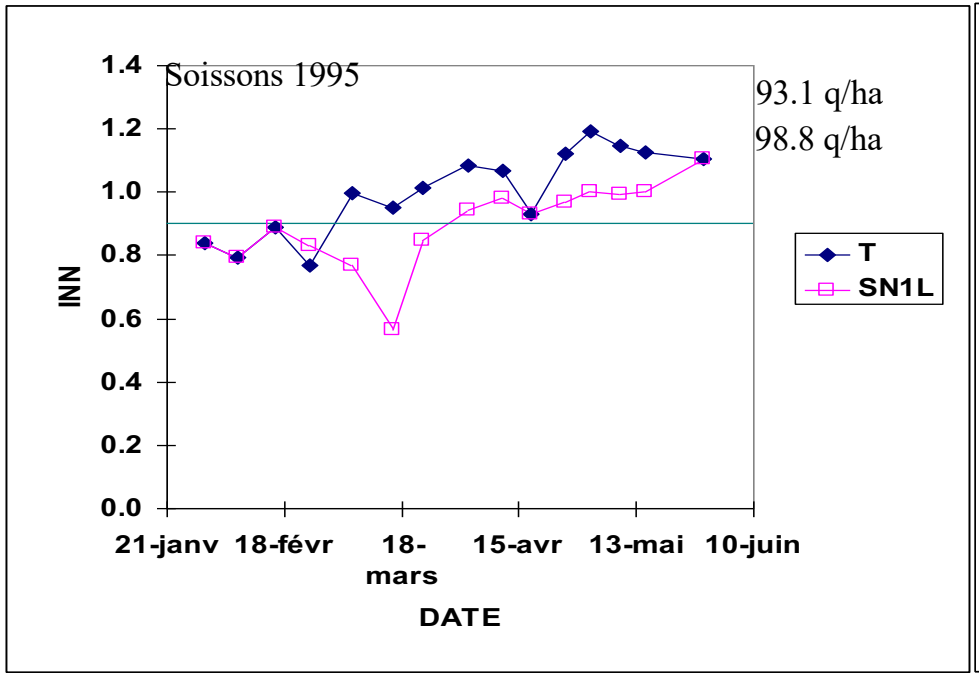
- **Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan (d'après enquêtes d'agriculteurs et de conseillers + analyse rapports GREN):**
  - Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement
  - L'analyse de sol: source d'incertitudes
  - Pratiques actuelles ne permettant pas de maximiser l'efficience d'utilisation des engrais (apports anticipés à cause de la crainte de sécheresse)

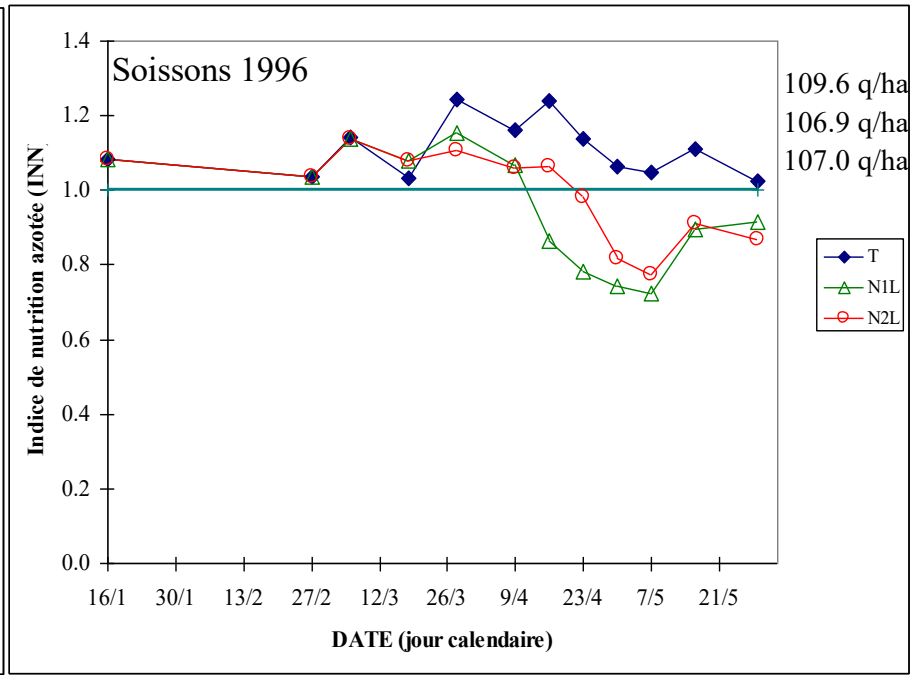
➔ **Conséquences :**

1= peut-on raisonner la fertilisation N sans objectif de rendement (et, si possible, sans reliquat de sortie d'hiver) ?

2= comment prendre en compte le risque de sécheresse pour maximiser l'efficience d'utilisation de l'engrais ?

Mise en évidence de carences azotées sans effet préjudiciable sur le rendement

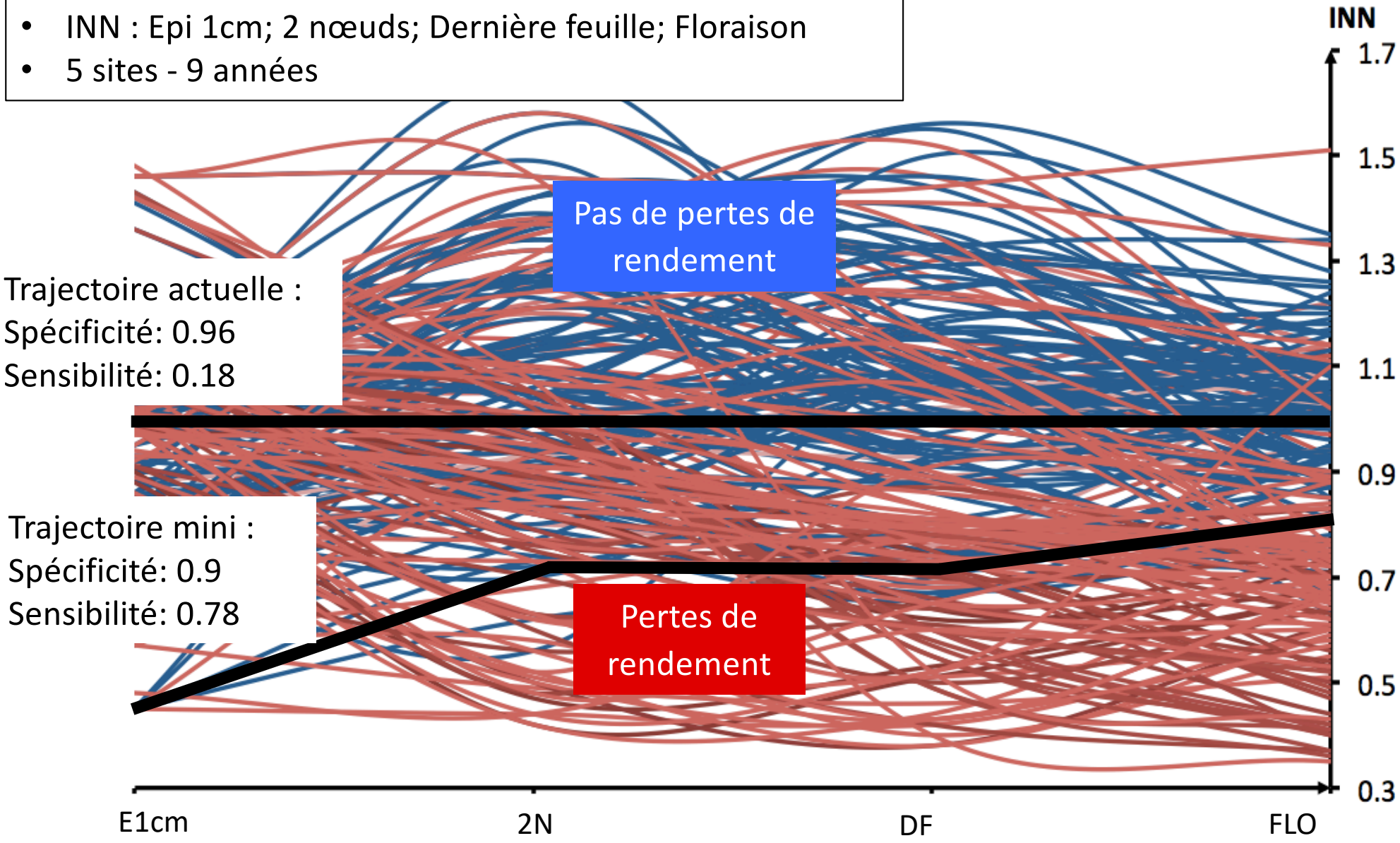




Mise en évidence d'une trajectoire seuil d'INN

- 209 Traitements
- Issus d'essais Azote
- INN : Epi 1cm; 2 nœuds; Dernière feuille; Floraison
- 5 sites - 9 années

(Ravier et al, 2017, EJA)

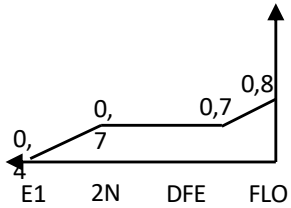


Principes de la méthode APPI-N

- Pas de Reliquat sortie hiver, ni d'objectif de rendement → **Pas de calcul a priori de dose totale**

- Maximiser **l'efficience d'utilisation de l'N** (CAU) grâce à :

  → Un **décalage** des apports, permis par **l'acceptation d'une carence tolérable en début de cycle,** pilotée grâce à une **trajectoire seuil d'INN** à ne pas franchir (Ravier et al., 2017)



  → Un déclenchement des apports uniquement lors de **« jours favorables »** c'est-à-dire lorsque **les conditions d'humidité du sol sont satisfaisantes** pour permettre la valorisation de l'azote (10 mm de pluie dans les 3 jours suivant apport ou sol humide)

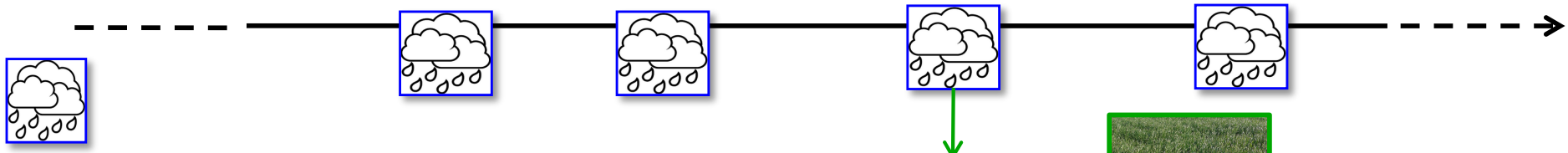
- Le **suivi régulier de l'INN** grâce à un outil d'estimation (HN-Tester®) de la **sortie hiver jusqu'à la floraison**, pour le pilotage intégral des apports

- **La définition des doses d'azote à apporter** en fonction de l'INN et de la date de contrôle, à partir d'une **analyse fréquentielle du climat des 20 dernières années** pour chaque site et **la simulation de nombreuses stratégies de fertilisation** → ABAQUE

Principes de fonctionnement de la méthode APPI-N

Une méthode de fertilisation pour décider la date et les doses d'apport en se basant sur un suivi de la nutrition azotée, tolérant des carences

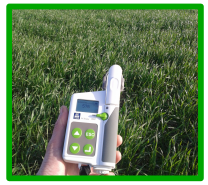
Semis | Sortie hiver | Epi 1cm | Deux nœuds | Dernière feuille | Floraison | Récolte



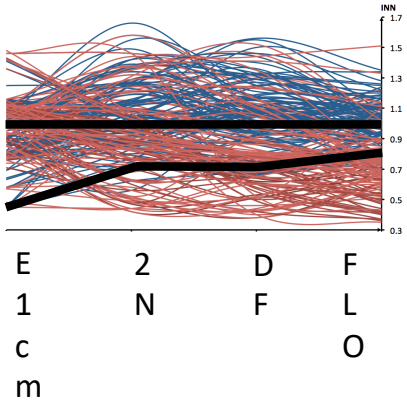
Conditions favorables pour valoriser l'engrais :

- Conditions météorologiques optimales
- Pas d'apport dans les 15 jours précédents

Mesure INN



Comparaison à la trajectoire d'INN minimum, non préjudiciable



Principes de fonctionnement de la méthode APPI-N

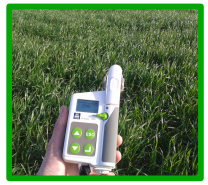
Une méthode de fertilisation pour décider la date et les doses d'apport en se basant sur un suivi de la nutrition azotée, tolérant des carences

Semis | Sortie hiver | Epi 1cm | Deux nœuds | Dernière feuille | Floraison | Récolte

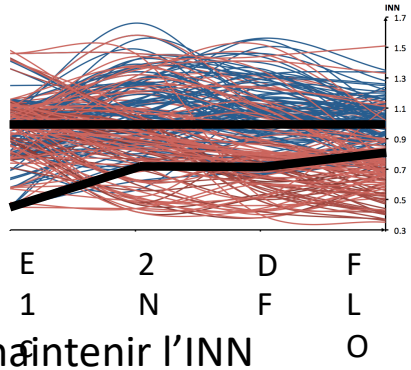
Conditions favorables pour valoriser l'engrais :

- Conditions météorologiques optimales
- Pas d'apport dans les 15 jours précédents

Mesure INN



Comparaison à la trajectoire d'INN minimum, non préjudiciable



= | >

Risque de ne pas maintenir l'INN au-dessus de la trajectoire mini jusqu'au prochain jour avec des conditions favorables?

Oui → Apport → Dose pour maintenir l'INN au dessus de la trajectoire jusqu'au prochain jour avec des conditions favorables

Non → Pas d'apport

Quelle dose d'apport d'N recommander ?

Prise en compte des risques de sécheresse sur les climats des 20 années passées pour définir la dose et la date d'apport

	15 - 28 février	1 - 15 mars	15 - 30 mars	1 - 15 avril	15 - 30 avril	1 - 15 mai	15 - 31 mai
INN seuil=	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,9
INN			E1cm		2N	DFE	Flo
<0.6	40	60	80	80			
0.6 - 0.7	0	40	80	60	80	60	
0.7 - 0.8	0	0	60	60	60	40	40
0.8 - 0.9	0	0	60	40	40	40	40*
0.9 - 1.0	0	0	40	0	0	0	0
1.0 - 1.1	0	0	0	0	0	0	0
1.1 - 1.2	0	0	0	0	0	0	0

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

La dose retenue est la dose minimale qui permet de rester **au-dessus de la trajectoire seuil** jusqu'au **prochain jour favorable**

Doses plus élevées pour :

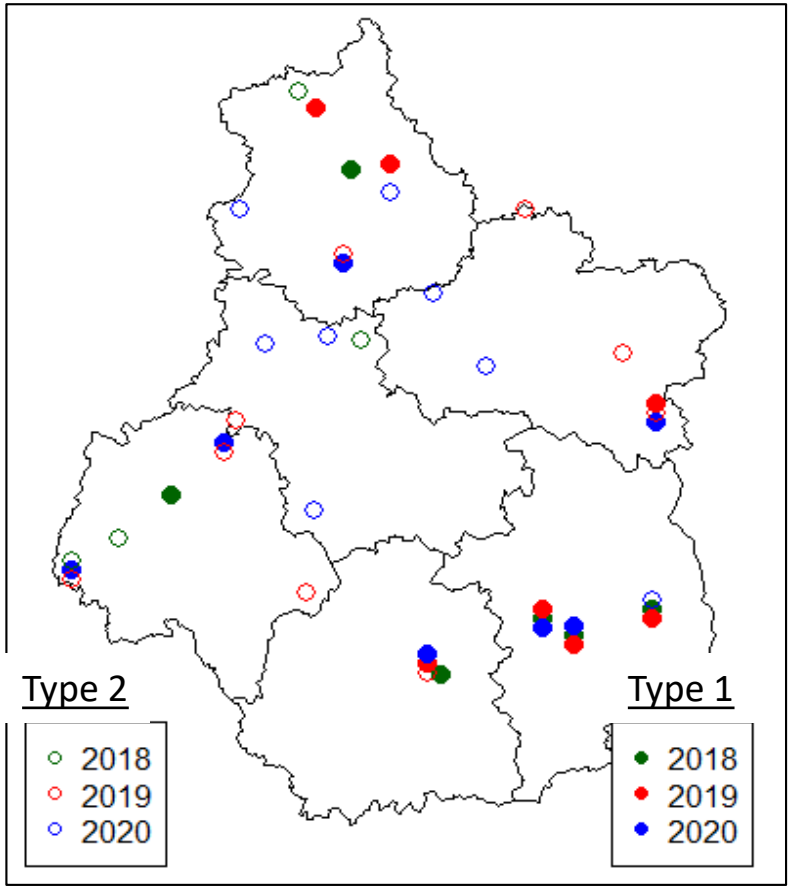
- des **INN faibles**
- Des périodes où la **croissance est forte**

Evaluation de la méthode APPI-N

Dispositif d'évaluation en région Centre-Val de Loire

3 années d'essais en micro-parcelles en Centre Val de Loire

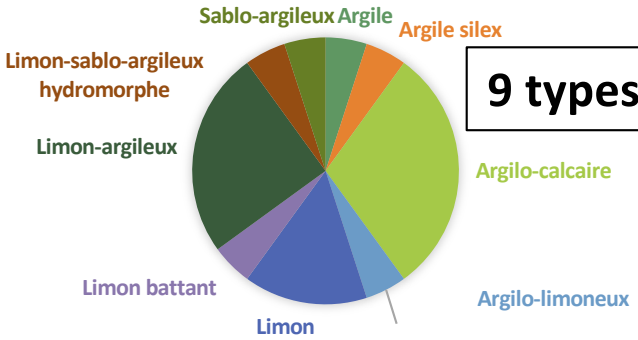
39 essais en micro-parcelles en alpha-blocs randomisés menés entre 2018 et 2021 dans la région ***Centre Val de Loire***
conduits par les partenaires du projet Solinazo



Dispositif d'évaluation en région Centre-Val de Loire

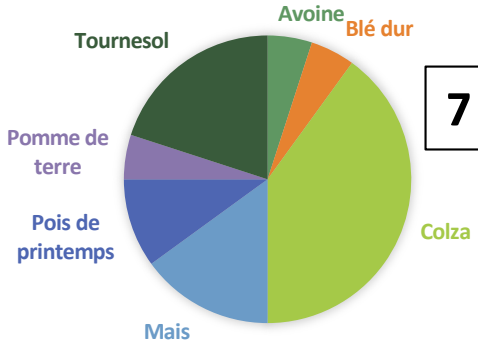
3 années d'essais en micro-parcelles en Centre Val de Loire couvrant une diversité de situations agricoles :

Diversité de types de sol



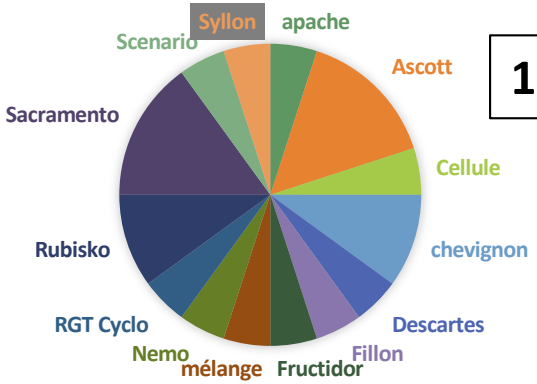
9 types de sol

Diversité de précédents



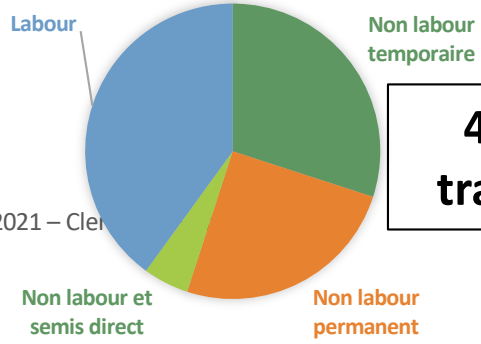
7 précédents

Diversité de variétés



13 variétés

Diversité de travail du sol



4 types de travail du sol

Critères d'évaluation de APPI-N, comparé au Bilan

Type de résultats	Critères d'évaluation
Stratégie de fertilisation	Date du 1er apport
	Nombre total d'apports
	Dose totale (kg N/ha)

Critères d'évaluation de APPI-N, comparé au Bilan

Type de résultats	Critères d'évaluation
Stratégie de fertilisation	Date du 1er apport
	Nombre total d'apports
	Dose totale (kg N/ha)
Performance économique	Rendement à 15% d'humidité (q/ha)
	Taux de protéine (%)
	Marge partielle (€/ha)

Prix utilisé pour les calcules de la marge partielle	2018	2019	2020
Prix du blé (€/t)	154	154	178
Prix de l'ammonitrate 33,5% (€/t)	272	285	256
Prix de la solution azotée 39% (€/t)	170	179	176

Prix de l'azote, du blé, bonification et réfaction selon la teneur en protéines et le coût du passage de tracteur lors des apports

Dispositif d'évaluation en région Centre-Val de Loire

Critères d'évaluation de APPI-N, comparé au Bilan

Type de résultats	Critères d'évaluation
Stratégie de fertilisation	Date du 1er apport
	Nombre total d'apports
	Dose totale (kg N/ha)
Performance économique	Rendement à 15% d'humidité (q/ha)
	Taux de protéine (%)
	Marge partielle (€/ha)
Performance environnementale	Pertes (kg N/ha)
	Emission de GES par hectare (kg CO_2eq/ha)
	Émission de GES par quintal de produit récolté (kg CO_2eq/q)

Prix utilisé pour les calculs de la marge partielle	2018	2019	2020
Prix du blé (€/t)	154	154	178
Prix de l'ammonitrate 33,5% (€/t)	272	285	256
Prix de la solution azotée 39% (€/t)	170	179	176

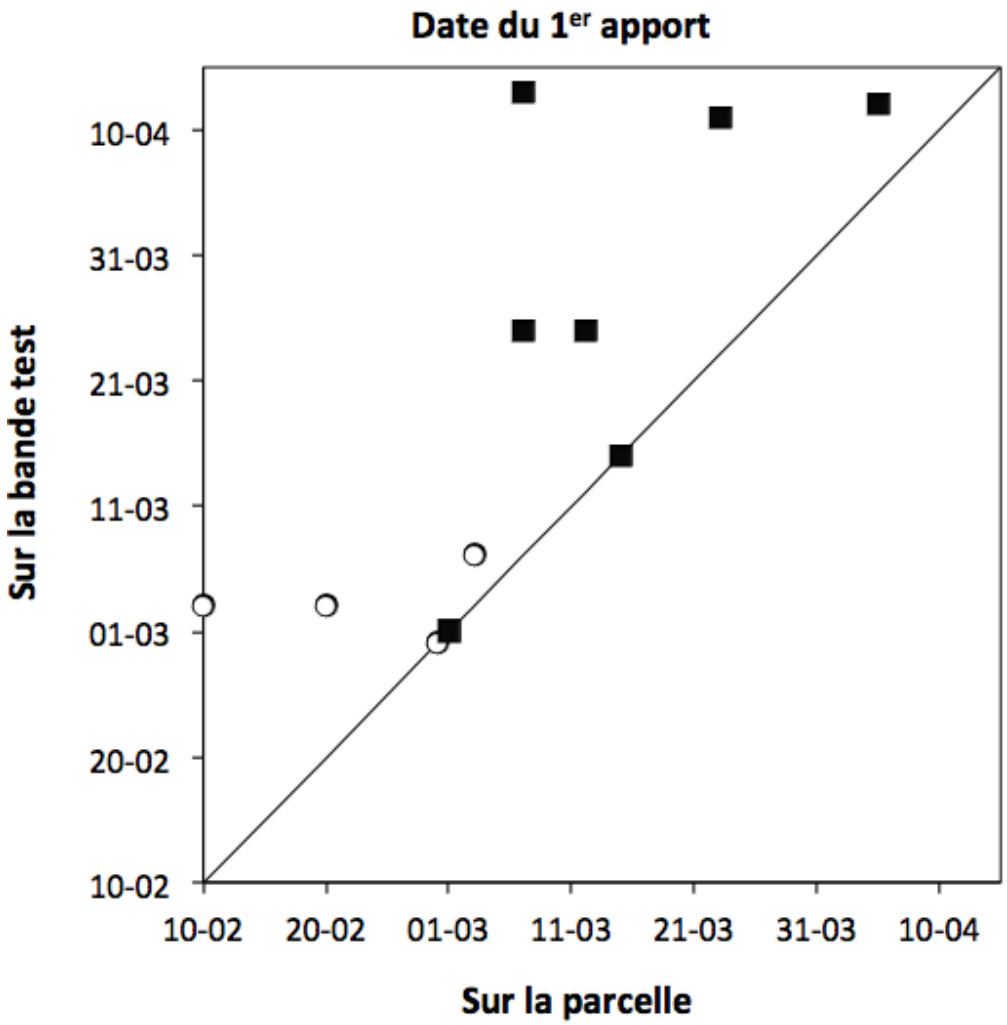
Prix de l'azote, du blé, bonification et réfaction selon la teneur en protéines et le coût du passage de tracteur lors des apports

Liée à la fabrication et le transport des engrais, les pertes de N_20 estimé par le CAU, aux passage de tracteur lors des apports

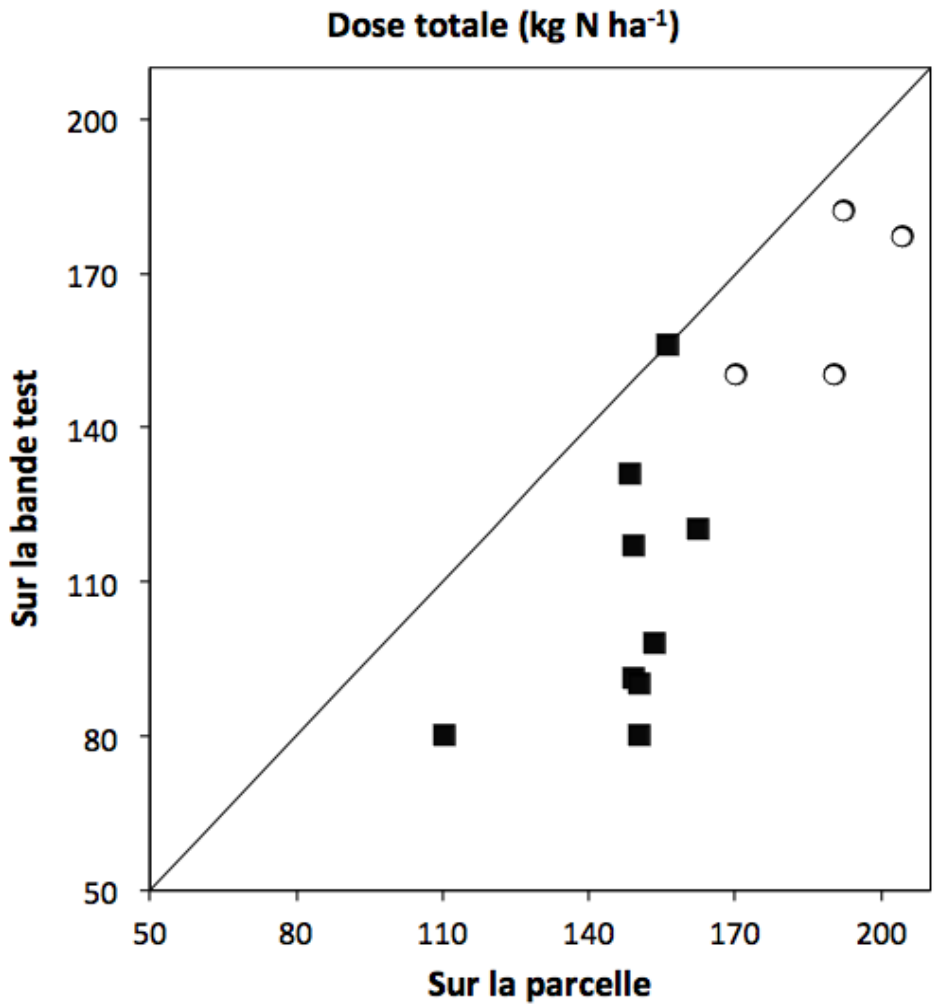
Test du prototype par deux groupes d'agriculteurs

➔Des changement de pratiques

1er apport plus tardif !



Dose totale plus faible



■ Normandie
○ Nouvelle Aquitaine

Résultats des essais en région Centre-Val de Loire (et Grand-Est)

Type de résultats	Paramètre d'évaluation	Résultats en micro-parcelles (n =20)	Résultats en bandes agriculteur (n=16)
Stratégie de fertilisation	Date du 1er apport	**20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)**	**15 à 25 jours plus tard**
	Nombre total d'apports	Bilan : 95% : 3 apports 5% : 2 apports APPI-N : 50% : 2 apports 50% : 3 apports	Bilan : 18% 2 apports 75% 3 apports APPI-N : 37% 2 apports 56% 3 apports
	Dose totale	**Réduite** de 16 kg N/ha (S)	**Réduite** de 25 kg N/ha

Résultats des essais en région Centre-Val de Loire (et Grand-Est)

Type de résultats	Paramètre d'évaluation	Résultats en micro-parcelles (n =20)	Résultats en bandes agriculteur (n=16)
Stratégie de fertilisation	Date du 1er apport	**20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)**	**15 à 25 jours plus tard**
	Nombre total d'apports	Bilan : 95% : 3 apports 5% : 2 apports APPI-N : 50% : 2 apports 50% : 3 apports	Bilan : 18% 2 apports 75% 3 apports APPI-N : 37% 2 apports 56% 3 apports
	Dose totale	**Réduite** de 16 kg N/ha (S)	**Réduite** de 25 kg N/ha
Performance économique	Rendement à 15%	**Equivalent** : Ecart de -1,3 q/ha (NS)	**Equivalent :** Ecart de + 0,9 q/ha
	Taux de protéine	**Equivalent** : Ecart de +0,1 point (NS)	**Equivalent :** Ecart de + 0,3 point
	Marge partielle	**Equivalent** : Ecart de - 2€/ha (NS)	Ecart de + 38 €/ha

Résultats des essais en région Centre-Val de Loire (et Grand-Est)

Type de résultats	Paramètre d'évaluation	Résultats en micro-parcelles (n =20)	Résultats en bandes agriculteur (n=16)
Stratégie de fertilisation	Date du 1er apport	**20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)**	**15 à 25 jours plus tard**
	Nombre total d'apports	Bilan : 95% : 3 apports 5% : 2 apports APPI-N : 50% : 2 apports 50% : 3 apports	Bilan : 18% 2 apports 75% 3 apports APPI-N : 37% 2 apports 56% 3 apports
	Dose totale	**Réduite** de 16 kg N/ha (S)	**Réduite** de 25 kg N/ha
Performance économique	Rendement à 15%	**Equivalent** : Ecart de -1,3 q/ha (NS)	**Equivalent :** Ecart de + 0,9 q/ha
	Taux de protéine	**Equivalent** : Ecart de +0,1 point (NS)	**Equivalent :** Ecart de + 0,3 point
	Marge partielle	**Equivalent** : Ecart de - 2€/ha (NS)	Ecart de + 38 €/ha
Performance environnementale	Pertes	**Réduites** de 9 kg N/ha (S) (n=19)	**Réduites** de 36 kg N/ha (n=7)
	Emission de GES par hectare	**Réduites** de 627 kg CO2eq/ha (S) (-26%) (n=19) *L'équivalent d'un trajet d'environ 3250 km en voiture*	**Réduites** de 1895 kg CO2eq/ha (-39%) (n=7)
	Émission de GES par quintal de produit récolté	**Réduites** de 8,6 kg CO2eq/q (S) (-28%) (n=19)	**Réduites** de 25,3 kg CO2eq/q (-40%) (n=7)

Résultats des essais en région Centre-Val de Loire (et Grand-Est)

Type de résultats	Paramètre d'évaluation	Résultats en micro-parcelles (n =20)	Résultats en bandes agriculteur (n=16)
Stratégie de	Date du 1er apport	**20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)**	**15 à 25 jours plus tard**
	Nombre total d'apports	Bilan : 95% : 3 apports 5% : 2 apports	Bilan : 18% 2 apports 75% 3 apports
Performance environnementale	Emission de GES par hectare	**Réduites** de 627 kg CO2eq/ha (S) (-26%) (n=19) *L'équivalent d'un trajet d'environ 3250 km en voiture*	**Réduites** de 1895 kg CO2eq/ha (-39%) (n=7)
	Émission de GES par quintal de produit récolté	**Réduites** de 8,6 kg CO2eq/q (S) (-28%) (n=19)	**Réduites** de 25,3 kg CO2eq/q (-40%) (n=7)

Un **maintien des résultats tant** quantitatif que qualitatif donc des performances économiques

Et

Une **diminution des pertes** d'azote vers l'environnement et des **émissions de CO2**

Le pilotage intégral permet de réduire à la fois les risques de faible CAU (source de nuisances environnementales) et de manque d'N préjudiciable à la production:

APPI-N permet de dépasser l'opposition classique entre production et respect de l'environnement

Retours des utilisateurs

- Comprendre ce qui se passe dans sa parcelle

« C'est intéressant d'avoir plusieurs mesures parce que ça montre si l'INN monte ou descend et comment est-ce que ça évolue »

- Apprendre à mieux faire, pour l'année suivante

« Je n'ai pas apporté d'engrais sur la bande test mais finalement l'INN n'a pas chuté, ça veut dire qu'il y avait de l'azote dans le sol »

- Donner confiance dans la méthode

« L'avantage de cette méthode c'est qu'elle permet d'apporter des éléments techniques. La mesure de l'INN c'est concret et la trajectoire d'INN est une bonne référence technique pour l'interpréter »

« Le pilotage avec l'INN c'est aller de la mesure à la décision par un agriculteur « comprenant » »

APPI-N, robuste dans l'usage

- **APPI-N s'applique de la même manière dans toutes les situations agricoles (abaques régionales, dépendant surtout du climat, mais pas du type de sol ou de la variété)**

- **APPI-N est robuste face aux écarts d'application observés lors des tests :**

3 types d'écarts <u>non préjudiciables</u> aux performances économiques d'APPI-N

→ Un apport déclenché sans pluie annoncée

→ Dose appliquée par l'expérimentateur légèrement plus élevée/faible que celle recommandée lors d'une date d'apport

→ Délai entre l'estimation et l'apport trop important et non justifié par les conditions climatiques

- **MAIS 2 types d'écarts sont <u>particulièrement préjudiciables</u> aux performances économiques d'APPI-N**

→ Le décrochage de l'étalon surfertilisé précocement

→ L'arrêt précoce/ le départ trop tardif du suivi ou irrégularité du suivi

De nouvelles perspectives pour le raisonnement de la fertilisation en France

❖ **Déploiement de la méthode APPI-N**

- Développement d'une application APPI-N (aide à la mise en œuvre d'APPI-N et enregistrement des données)
- Nouveaux outils pour estimer l'INN : Greenseeker, N-sensor®, Satellite
- Nouvelles échelles : Passage à l'échelle d'une exploitation

« Utilisable sur un petit nombre de parcelles homogènes »

❖ Approfondir les **effets indirects de cette nouvelle méthode de fertilisation** (adventices, verse, tolérance au stress hydrique)

❖ Adaptation de la méthode de fertilisation **pour des associations de culture et en couvert permanent**

De nouvelles perspectives pour le raisonnement de la fertilisation en France

- Evolution de la réglementation pour accepter les techniques de pilotage intégral

- Méthode à fort potentiel pour l'obtention du Label bas carbone (-26%/-39% d'émissions)

  ➡ Potentiel de financement pour les projets certifiés : « label bas carbone » dans un contexte où la fertilisation azotée est le poste le plus important de consommation d'énergie directe et indirecte des exploitations

- De nouveaux enjeux économiques autour de la réduction de l'utilisation des engrais minéraux, liés à l'augmentation importante du prix de ceux-ci

- Dans le projet d'une synthèse nationale, si vous avez conduit des essais avec cette nouvelle méthode, n'hésitez pas à prendre contact avec nous :

Pierre.lebreton@inrae.fr ; Raphael.paut@inrae.fr

Merci !