



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

Marie-Hélène Jeuffroy, **Raphaël Paut**,  
Pierre Lebreton, Jean-Marc Meynard

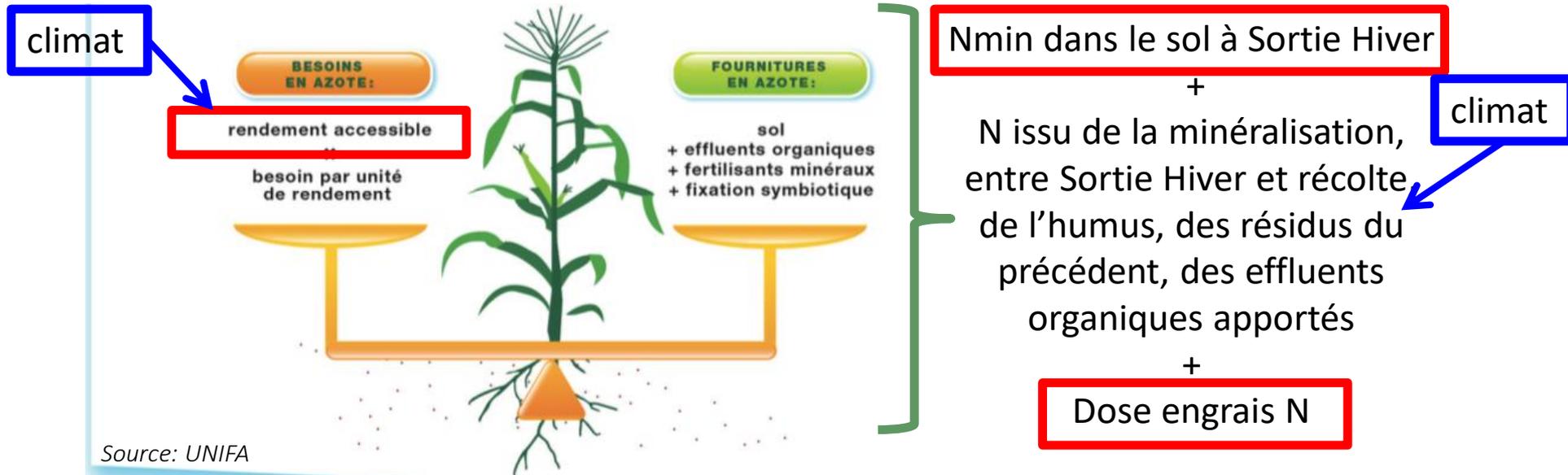
INRAE Grignon

10 mars 2022

# Origine de la demande

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

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

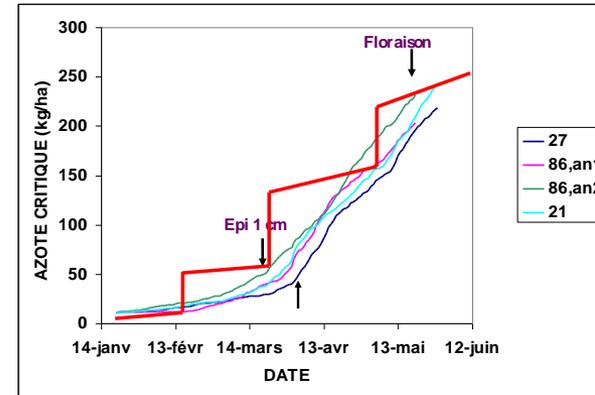


- ❖ Une amélioration continue du raisonnement par un affinement de l'estimation des différents postes (logique additive, cohérente avec la segmentation des recherches) ... depuis 40 ans !
- ❖ Une diffusion massive de la méthode, une procédure de raisonnement consensuelle largement diffusée, des références mises à jour par le COMIFER et des références locales proposées par les organismes de R&D

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 !**

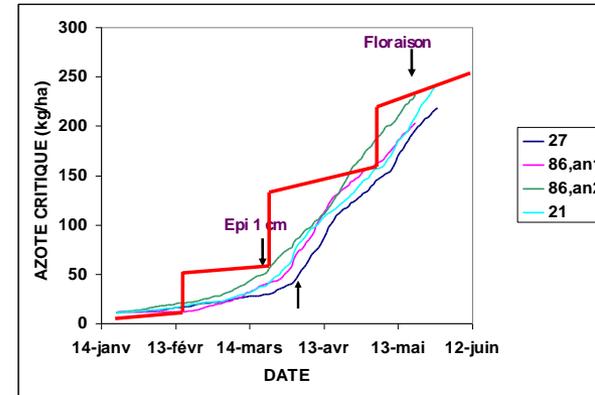


# Méthode de fertilisation dominante: principes du Bilan

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 !**



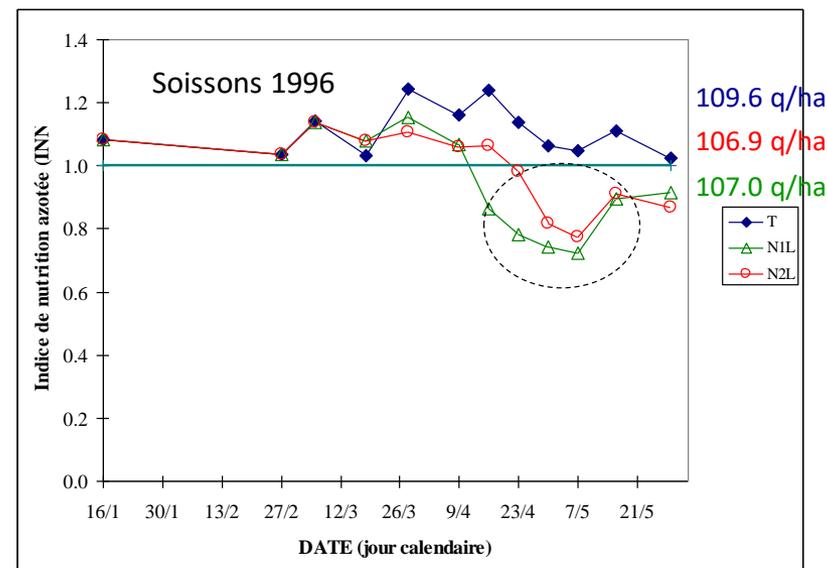
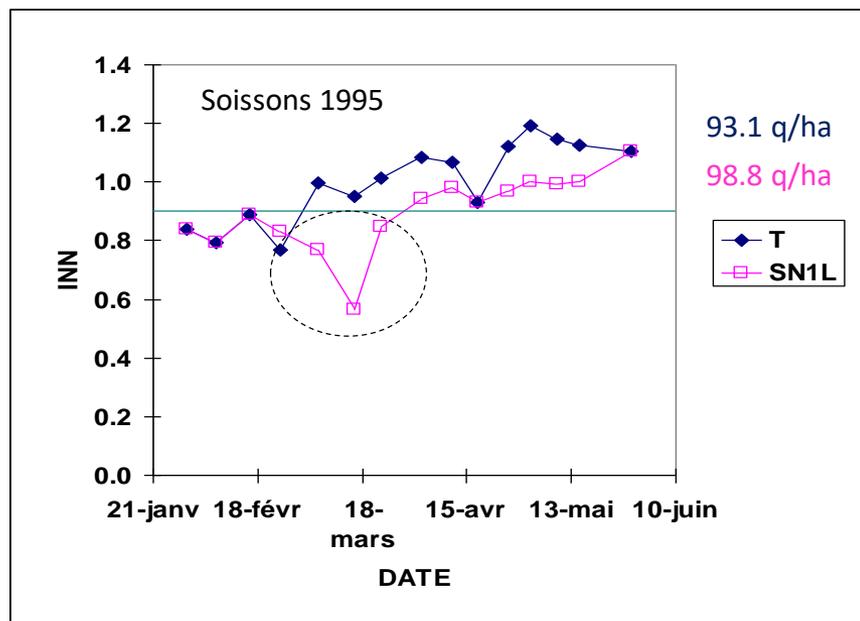
MAIS toujours des problèmes environnementaux !

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

Et antagonisme entre enjeux environnementaux et économiques

Des connaissances qui permettraient d'améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais ne sont pas valorisées:

- ❖ Existence de périodes de carence en azote **non préjudiciables** au rendement (*Jeuffroy et Bouchard, 1999*)



**INN  $\geq$  1** : Teneur en azote suffisante pour maintenir le niveau de croissance le plus élevé

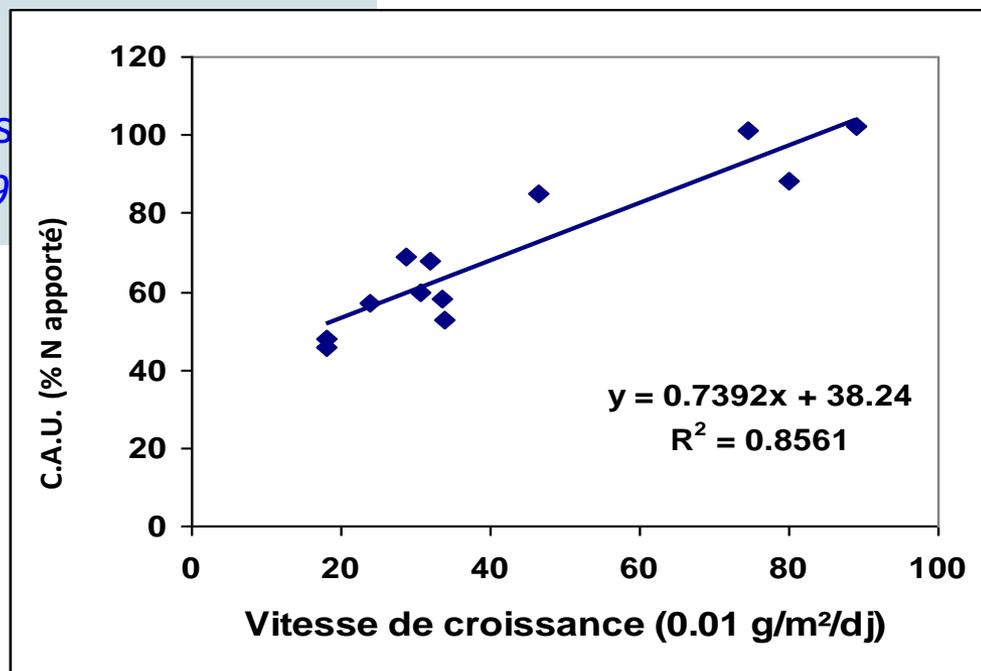
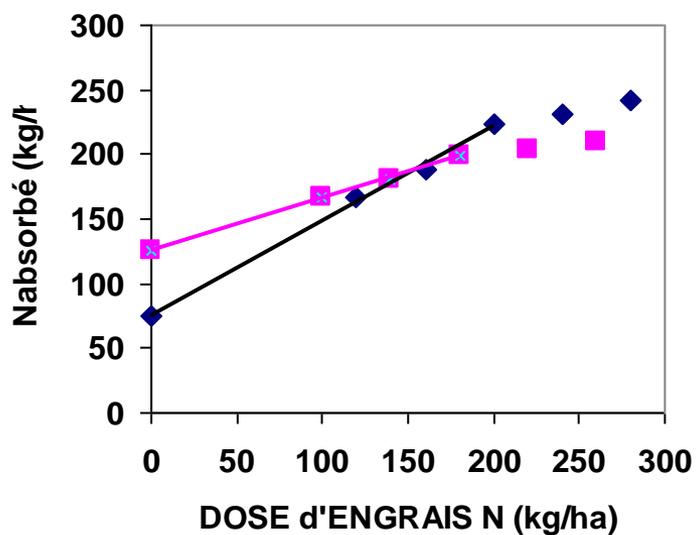
**INN  $<$  1** : Plante carencée en azote (impact sur la croissance)

Des connaissances qui permettraient d'améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais ne sont pas valorisées:

- ❖ Efficacité d'utilisation de l'engrais: plus liée à la vitesse de croissance au moment de l'apport (*Limaux et al., 1999*) qu'à des stades/dates

## VARIATIONS DU CAU :

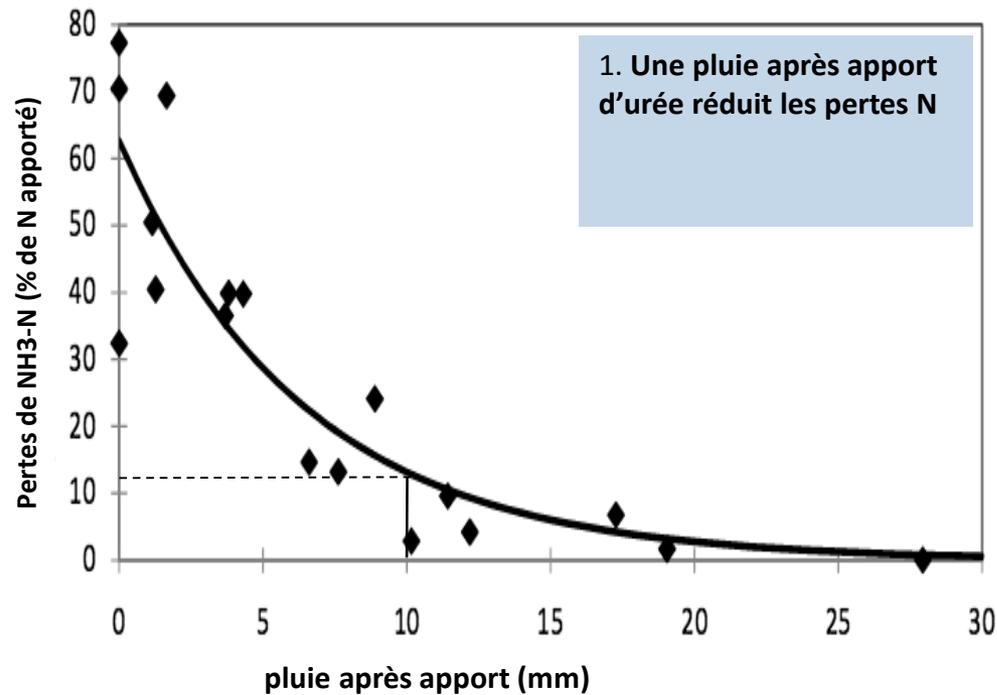
- 57% à 95% entre variétés
- 56% à 74% entre types de sol
- 46% à 102% entre lieux et dates  
(*Limaux, 1999*)



Limaux 1999

Des connaissances qui permettraient d'améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais ne sont pas valorisées:

- ❖ Les conditions climatiques après apport: déterminantes de l'utilisation de l'azote



Holcomb J, 2011

## Hypothèse:

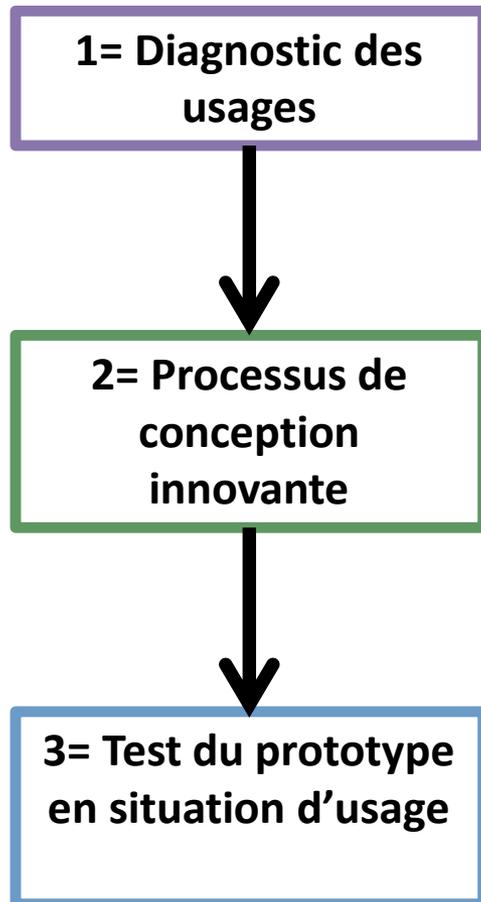
Le modèle scientifique sous-jacent à la méthode est précis et rigoureux, mais le problème serait plutôt dans l'usage : hypothèse d'un décalage conceptuel entre le modèle scientifique et sa mise en œuvre dans les pratiques.

## Objectif :

Reconcevoir une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée qui :

- ❖ Réponde aux enjeux, parfois antagonistes, autour de l'azote
  - ❖ Valorise les connaissances délaissées par « le bilan »
  - ❖ Soit pertinente pour les utilisateurs
- ➔ Explorer hors des sentiers battus, par la **conception innovante** !
- ➔ intégrer les **usages** dans la **démarche de conception** !

→ Démarche pour la **conception** d'outil d'aide à la décision intégrant les usages (Cerf et al., 2012)



Analyse des pratiques des différents utilisateurs potentiels :

- Mettre en avant les difficultés rencontrées avec méthode et outils existants
- Spécifier les attentes pour de nouveaux outils
- Théorie C-K (Le Masson et al., 2006) :
- L'objet à concevoir se définit au cours du processus
- Créer une dynamique d'exploration conviant les participants à sortir des cadres de raisonnement habituels
- Expansion conjointe des concepts et des connaissances
- Vérifier l'adéquation aux attentes

Enquêtes de conseillers et agriculteurs et analyse des 20 rapports GREN

**1= Le diagnostic des usages des méthodes et outils existants**

Concepts innovants / limite du modèle actuel

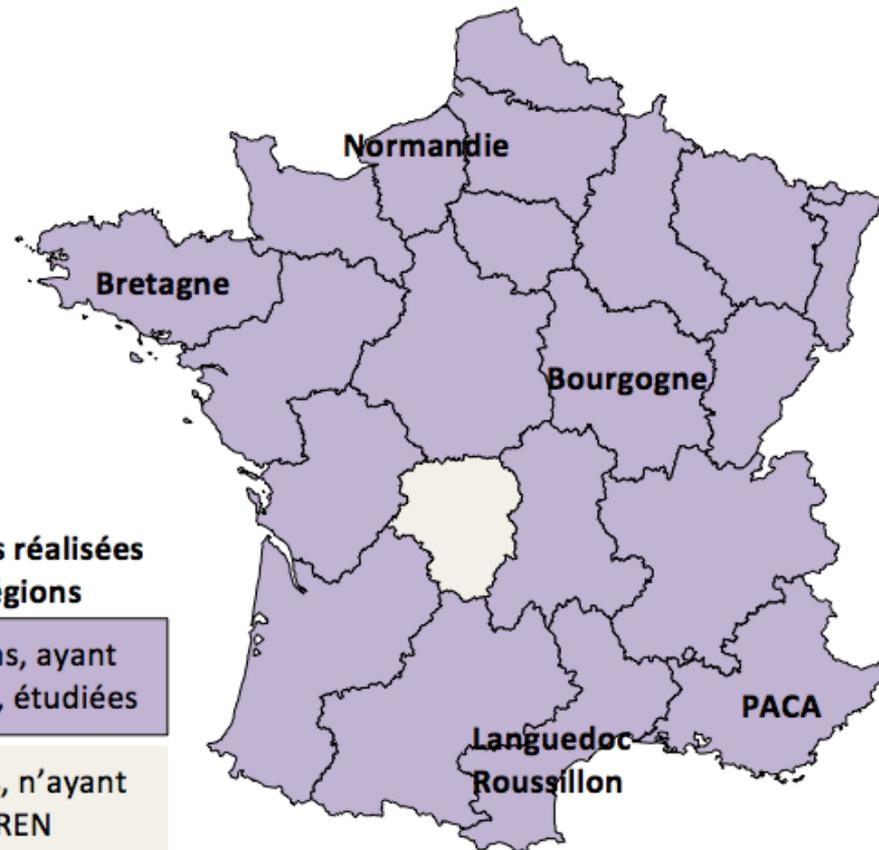
Critères d'évaluation / attentes des utilisateurs

GREN: groupe régional d'expertise Nitrate : paramétrage officiel du bilan

Enquêtes réalisées dans 5 régions

20 régions, ayant un GREN, étudiées

2 régions, n'ayant pas de GREN



- ❖ **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

- ❖ **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** »*

- ❖ **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

- ❖ **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)*

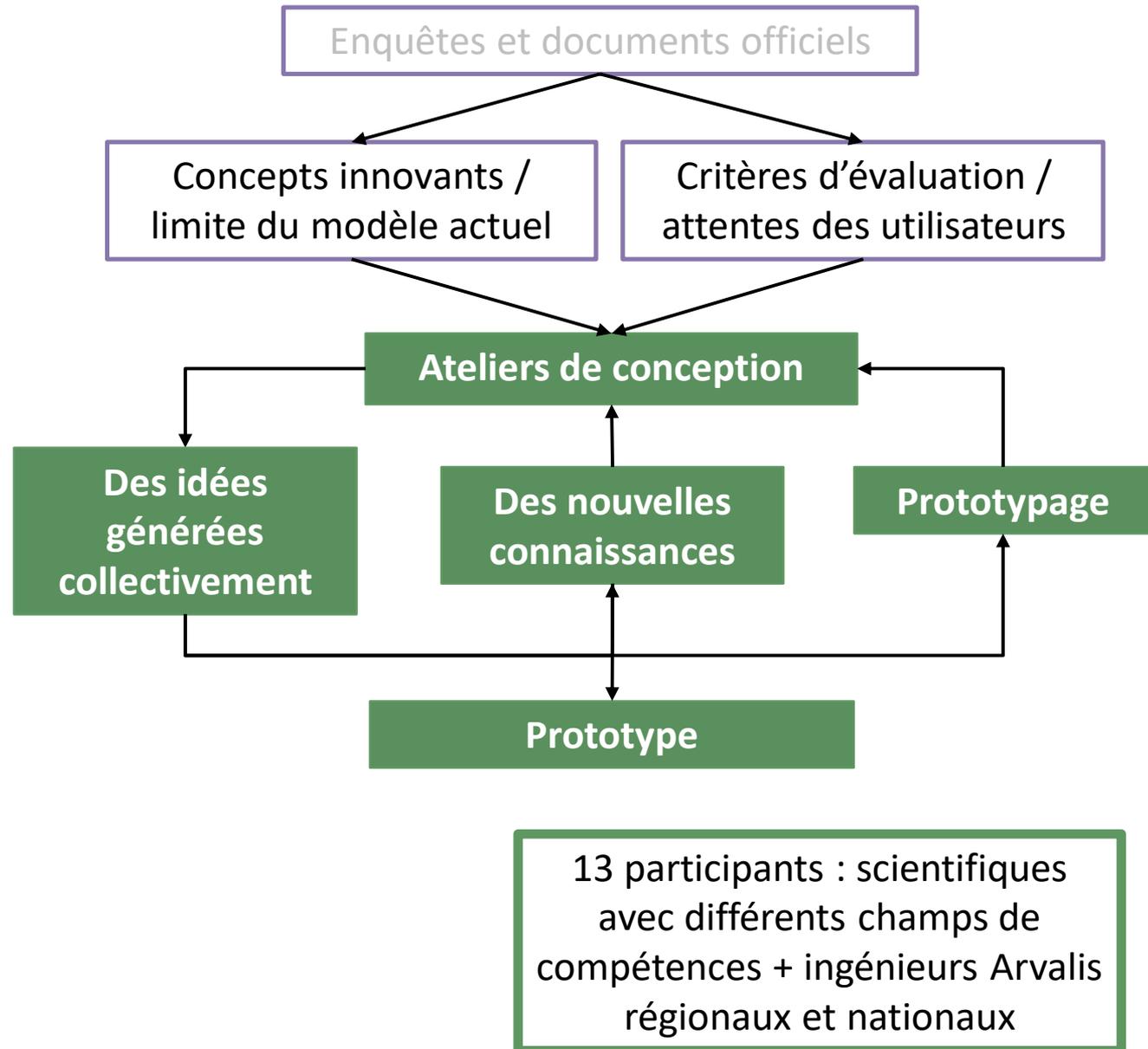
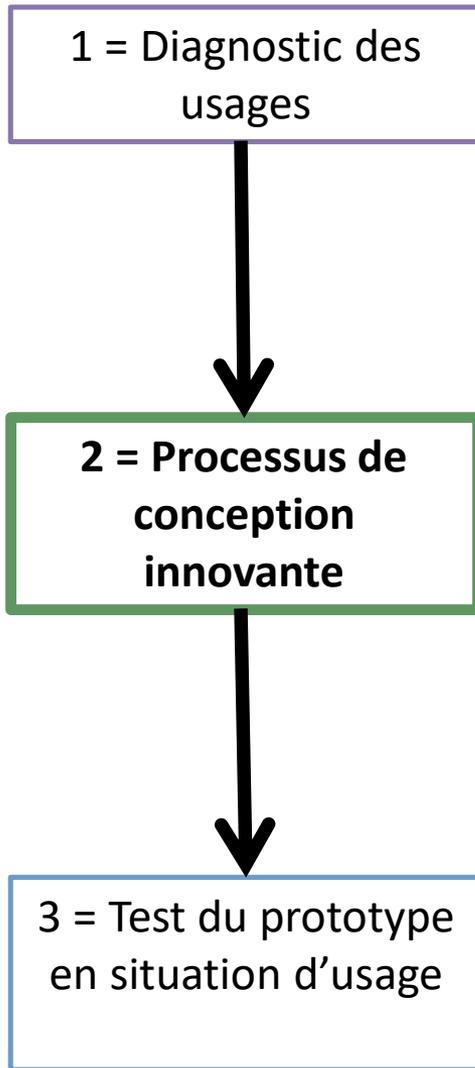
- ❖ **Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan (d'après enquêtes d'agriculteurs et de conseillers + analyse rapports GREN):**
  - Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement
  - L'analyse de sol: source d'incertitudes
  - Pratiques actuelles ne permettant pas de maximiser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

- ❖ **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'efficacité d'utilisation des engrais (apports anticipés à cause de la crainte de sécheresse)

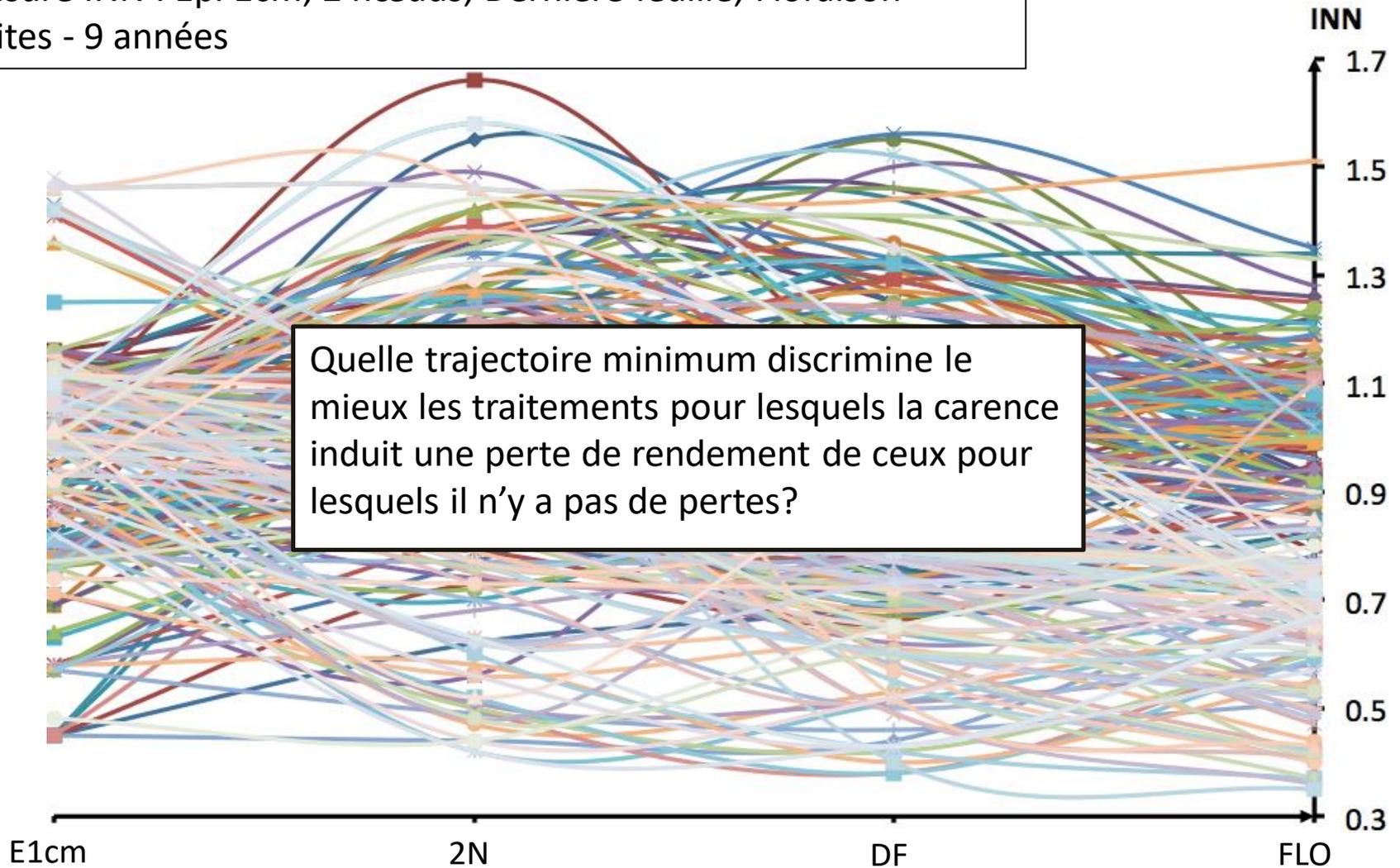
## ➔ **Conséquences :**

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'efficacité d'utilisation de l'engrais ?



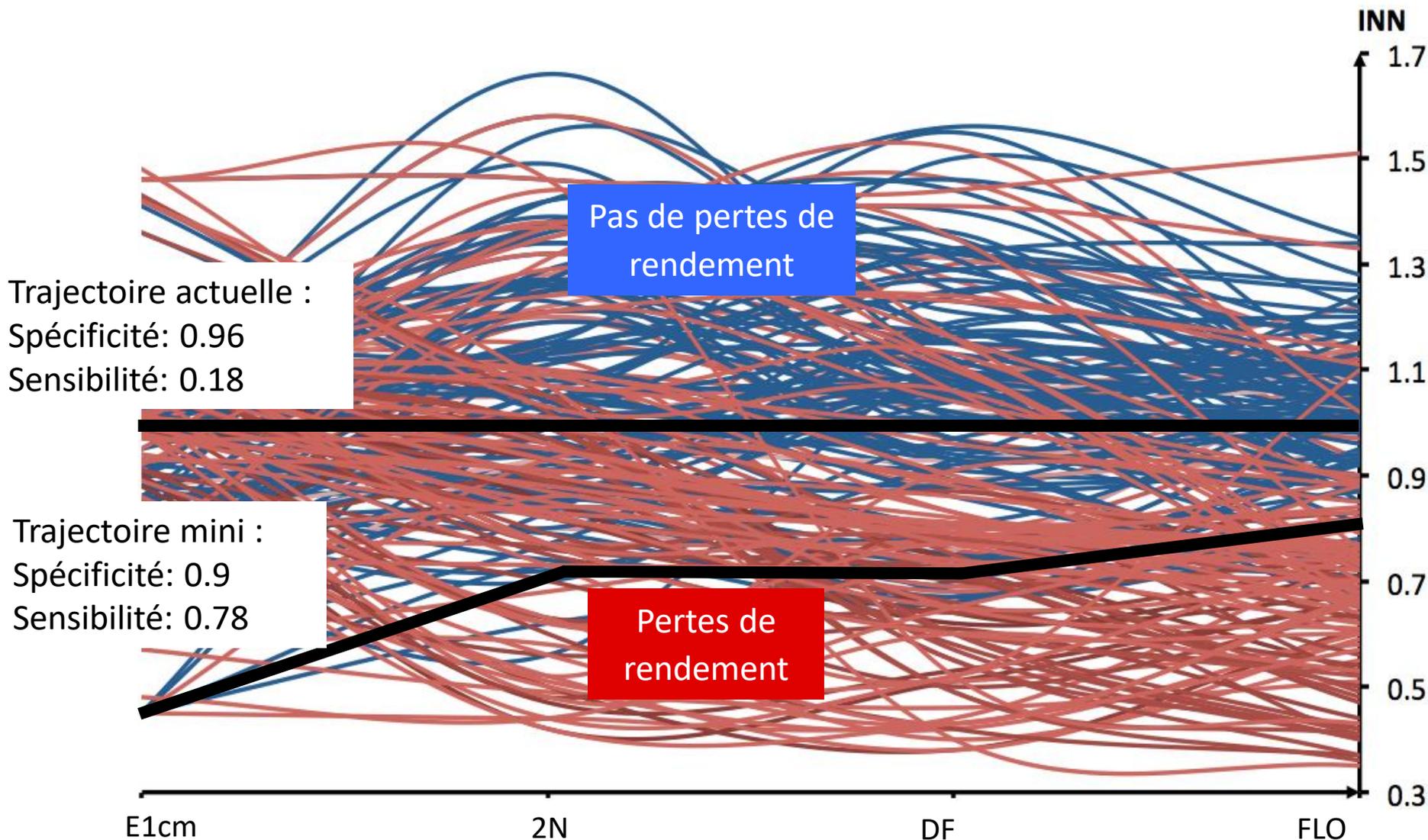
- 209 Traitements
- Issus d'essais Azote
- Mesure INN : Epi 1cm; 2 nœuds; Dernière feuille; Floraison
- 6 sites - 9 années



# Mise en évidence d'une trajectoire seuil d'INN

Courbes ROC ( Receiver-Operating Characteristic)

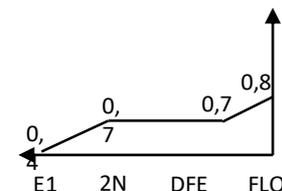
(Ravier et al, 2017, EJA)



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

❖ Maximiser **l'efficacité 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)

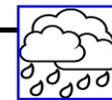
❖ Le **suivi régulier de l'INN** grâce à un outil d'estimation (HN-Tester®) de la **sortie hiver jusqu'à la floraison**, pour le pilotage intégral des apports

❖ 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



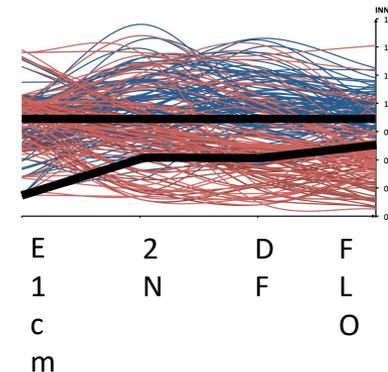
Conditions favorables pour valoriser l'engrais :

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

Mesure INN

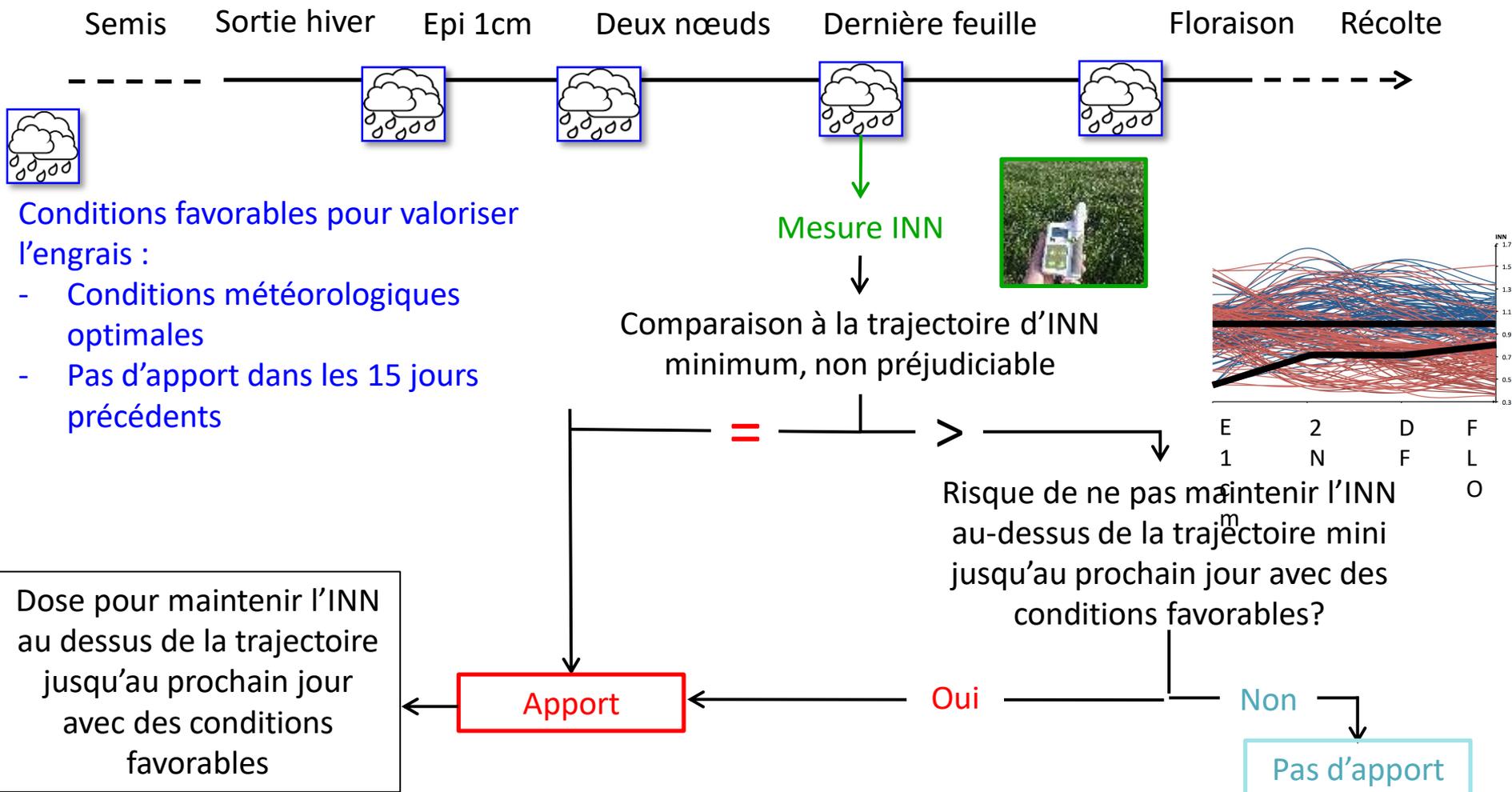


Comparaison à la trajectoire d'INN minimum, non préjudiciable



# 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



# 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

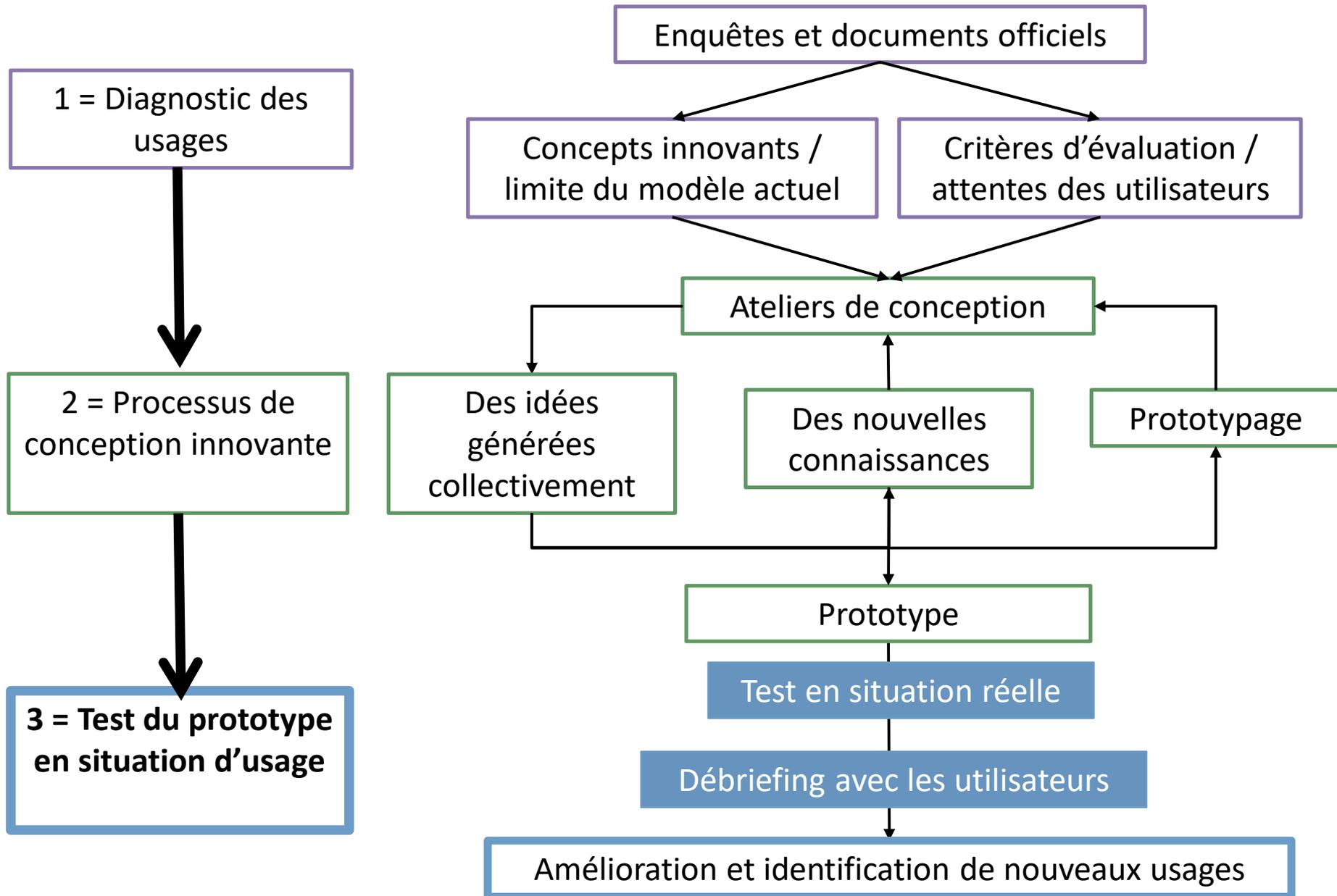
\*= apport d'N à réaliser uniquement si la date de floraison est prévue dans plus d'une semai

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

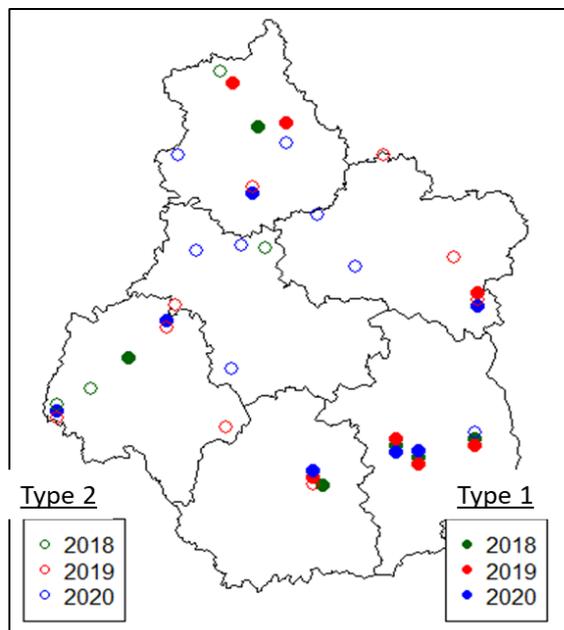
Doses plus élevées pour :

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

# Test du prototype en situation d'usage : méthode



# Evaluation de la méthode APPI-N en régions Centre-Val de Loire et Grand Est



4



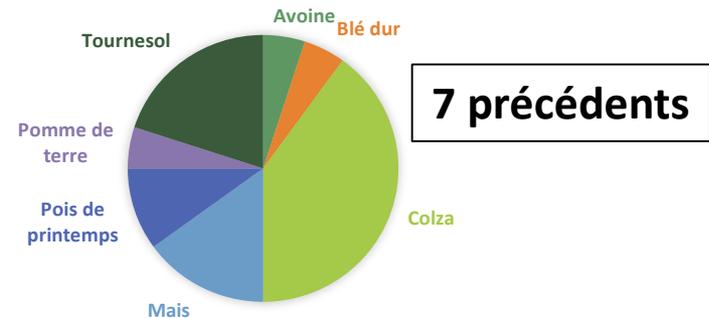
# Dispositif d'évaluation en région Centre-Val de Loire

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

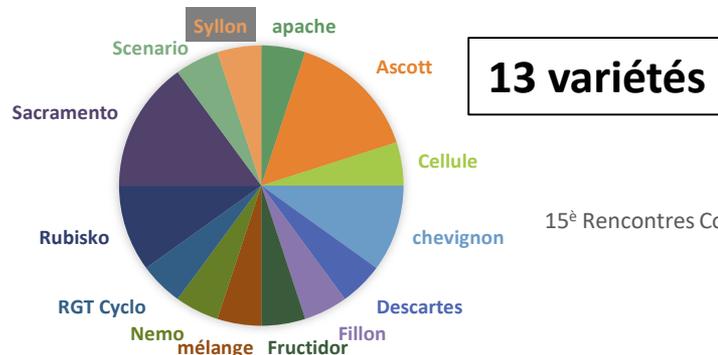
## Diversité de types de sol



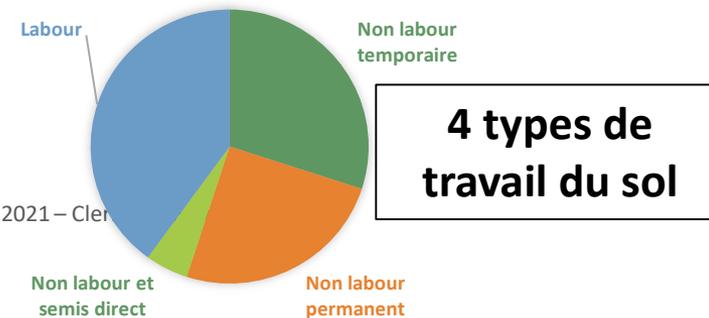
## Diversité de précédents



## Diversité de variétés



## Diversité de travail du sol



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

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

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

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

Type de résultats	Critères d'évaluation
Stratégie de fertilisation	Date du 1 <sup>er</sup> 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 <sub>2</sub> eq/ha)
	Émission de GES par quintal de produit récolté (kg CO <sub>2</sub> eq/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<sub>2</sub>O estimé par le CAU, aux passages de tracteur lors des apports

# 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)
<b>Stratégie de fertilisation</b>	Date du 1 <sup>er</sup> apport	<b>20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)</b>	<b>15 à 25 jours plus tard</b>
	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	<b>Réduite</b> de 16 kg N/ha (S)	<b>Réduite</b> 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)
<b>Stratégie de fertilisation</b>	Date du 1 <sup>er</sup> apport	<b>20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)</b>	<b>15 à 25 jours plus tard</b>
	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	<b>Réduite</b> de 16 kg N/ha (S)	<b>Réduite</b> de 25 kg N/ha
<b>Performance économique</b>	Rendement à 15%	<b>Equivalent</b> : Ecart de -1,3 q/ha (NS)	<b>Equivalent</b> : Ecart de + 0,9 q/ha
	Taux de protéine	<b>Equivalent</b> : Ecart de +0,1 point (NS)	<b>Equivalent</b> : Ecart de + 0,3 point
	Marge partielle	<b>Equivalent</b> : 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)
<b>Stratégie de fertilisation</b>	Date du 1 <sup>er</sup> apport	<b>20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)</b>	<b>15 à 25 jours plus tard</b>
	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	<b>Réduite</b> de 16 kg N/ha (S)	<b>Réduite</b> de 25 kg N/ha
<b>Performance économique</b>	Rendement à 15%	<b>Equivalent</b> : Ecart de -1,3 q/ha (NS)	<b>Equivalent</b> : Ecart de + 0,9 q/ha
	Taux de protéine	<b>Equivalent</b> : Ecart de +0,1 point (NS)	<b>Equivalent</b> : Ecart de + 0,3 point
	Marge partielle	<b>Equivalent</b> : Ecart de - 2€/ha (NS)	Ecart de + 38 €/ha
<b>Performance environnementale</b>	Pertes	<b>Réduites</b> de 9 kg N/ha (S) (n=19)	<b>Réduites</b> de 36 kg N/ha (n=7)
	Emission de GES par hectare	<b>Réduites</b> de 627 kg CO <sub>2</sub> eq/ha (S) (-26%) (n=19) <i>L'équivalent d'un trajet d'environ 3250 km en voiture</i>	<b>Réduites</b> de 1895 kg CO <sub>2</sub> eq/ha (-39%) (n=7)
	Émission de GES par quintal de produit récolté	<b>Réduites</b> de 8,6 kg CO <sub>2</sub> eq/q (S) (-28%) (n=19)	<b>Réduites</b> de 25,3 kg CO <sub>2</sub> eq/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 1 <sup>er</sup> apport	<b>20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)</b>	<b>15 à 25 jours plus tard</b>
	Nombre total d'apports	Bilan : 95% : 3 apports 5% : 2 apports	Bilan : 18% 2 apports 75% 3 apports

**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**

Performance environnementale	Emission de GES par hectare	<b>Réduites</b> de 627 kg CO2eq/ha (S) (-26%) (n=19) <i>L'équivalent d'un trajet d'environ 3250 km en voiture</i>	<b>Réduites</b> de 1895 kg CO2eq/ha (-39%) (n=7)
	Émission de GES par quintal de produit récolté	<b>Réduites</b> de 8,6 kg CO2eq/q (S) (-28%) (n=19)	<b>Réduites</b> de 25,3 kg CO2eq/q (-40%) (n=7)

# 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 non préjudiciables 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 particulièrement préjudiciables 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 web/smartphone 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 »*

# De nouvelles perspectives pour le raisonnement de la fertilisation en France

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

- Développement d'une application web/smartphone 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 pour d'autres **espèces** (colza, maïs, orge, associations de cultures), d'autres **modes de production** (AB, AC), d'autres **régions** climatiques (/!\ périodes de sécheresses)

# Merci !



**PARTAGE**  
Pour boucler le cycle de l'azote



**Grand Est**  
ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LOIRAIN  
*L'Europe s'investit chez nous*

**INRAE**



13

Lebrétón (INRAE), Guillier (CRAGE)



15<sup>e</sup> Rencontres Comifer-Gemas 24-25 nov 2021 – Clermont-Ferrand