

Raisonner la fertilisation azotée du blé d'hiver sans objectif de rendement et sans reliquat sortie hiver

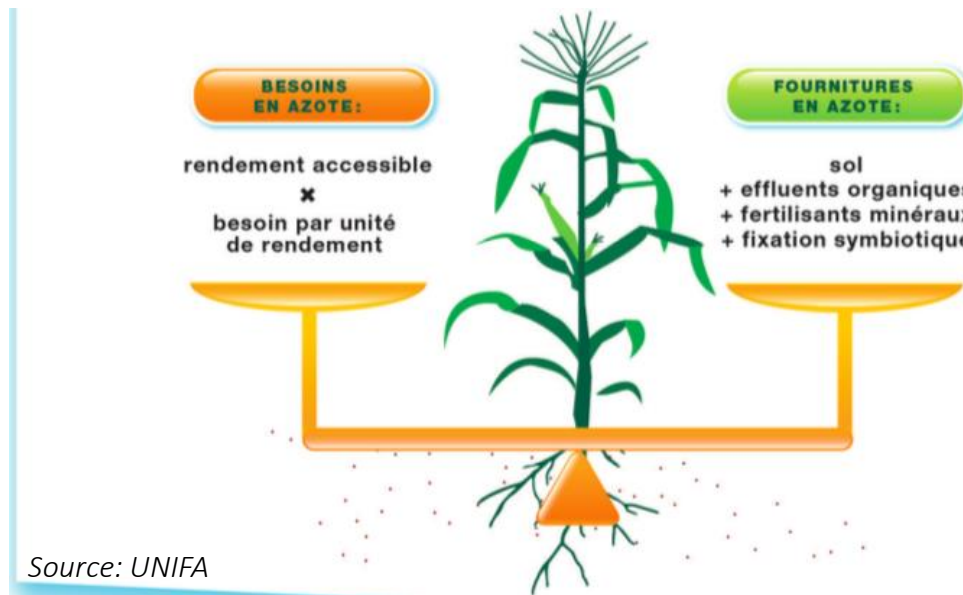
Présenté par Marie-Hélène JEUFFROY et Jean-Marc MEYNARD,
d'après la thèse de Clémence RAVIER (11/02/2017),
Thèse réalisée dans le cadre d'une collaboration Arvalis-INRA,
avec un financement ADEME



Origine de la demande

Un modèle de raisonnement unique depuis plus de 40 ans

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

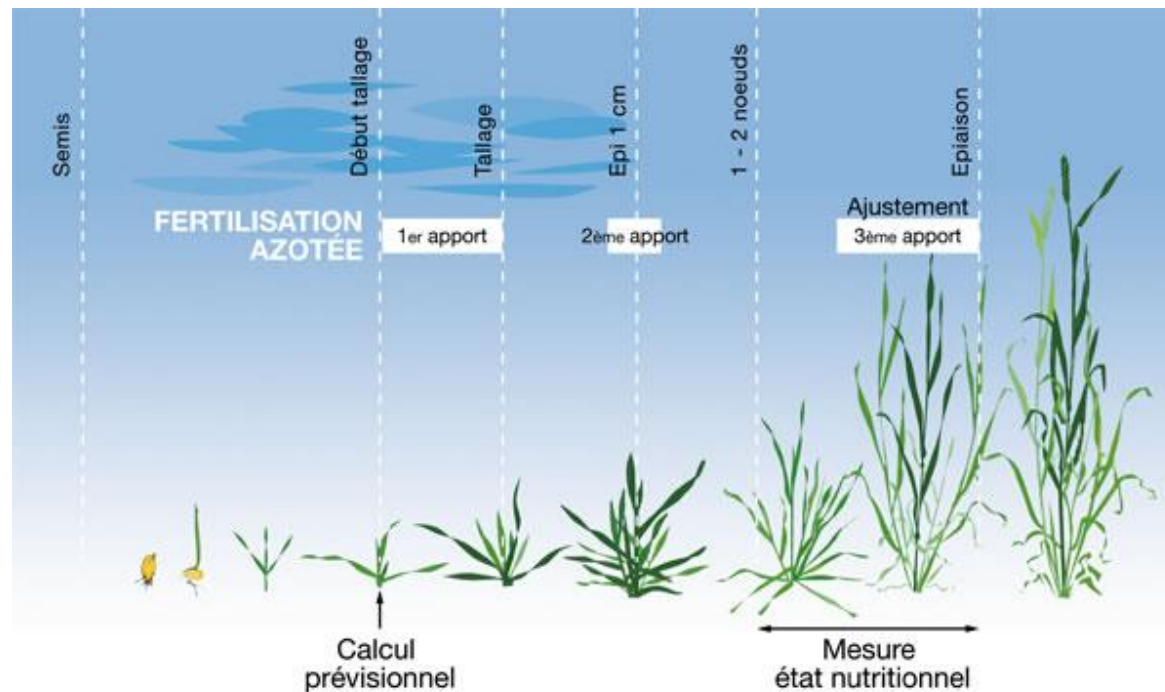


- ❖ Une amélioration continue du raisonnement par un affinement de l'estimation des différents postes (logique additive, cohérente avec la segmentation des recherches) ... depuis 40 ans !
- ❖ Une diffusion massive de la méthode, une procédure de raisonnement consensuelle, diffusée et références mises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

Origine de la demande

Des éléments de raisonnement qui font consensus :

- ❖ Calcul prévisionnel de la dose totale
- ❖ Règles de fractionnement calées sur stades ou dates
- ❖ Ajustement de la dose du dernier apport, avec outil de pilotage



Source: UNIFA

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

Origine de la demande

Mais ... des impacts environnementaux qui subsistent :

- ❖ Nitrates dans les eaux
- ❖ Emissions de GES; N₂O, CO₂
- ❖ Forte consommation en énergie fossile (fabrication engrais minéraux)
- ❖ Antagonisme enjeux environnementaux / économiques

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

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

Objectif de la thèse

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 contradictoires, autour de l'azote
- ❖ Valorise au mieux les connaissances disponibles
- ❖ Soit pertinente pour les utilisateurs

➔ intégrer les usages dans la démarche de conception !

Démarche de conception

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

Diagnostic des usages

- Mettre en avant les difficultés rencontrées avec méthode et outils existants
- Spécifier les attentes pour de nouveaux outils

Conception

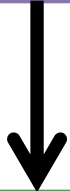
Test du prototype en situation d'usage

- Vérifier l'adéquation aux attentes

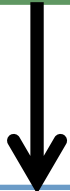
Démarche de conception

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

Diagnostic des usages



Processus de conception innovante



Test du prototype en situation d'usage

- 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 forçant les participants à sortir des cadres de raisonnement habituels
- Expansion conjointe des concepts et des connaissances

- Vérifier l'adéquation aux attentes

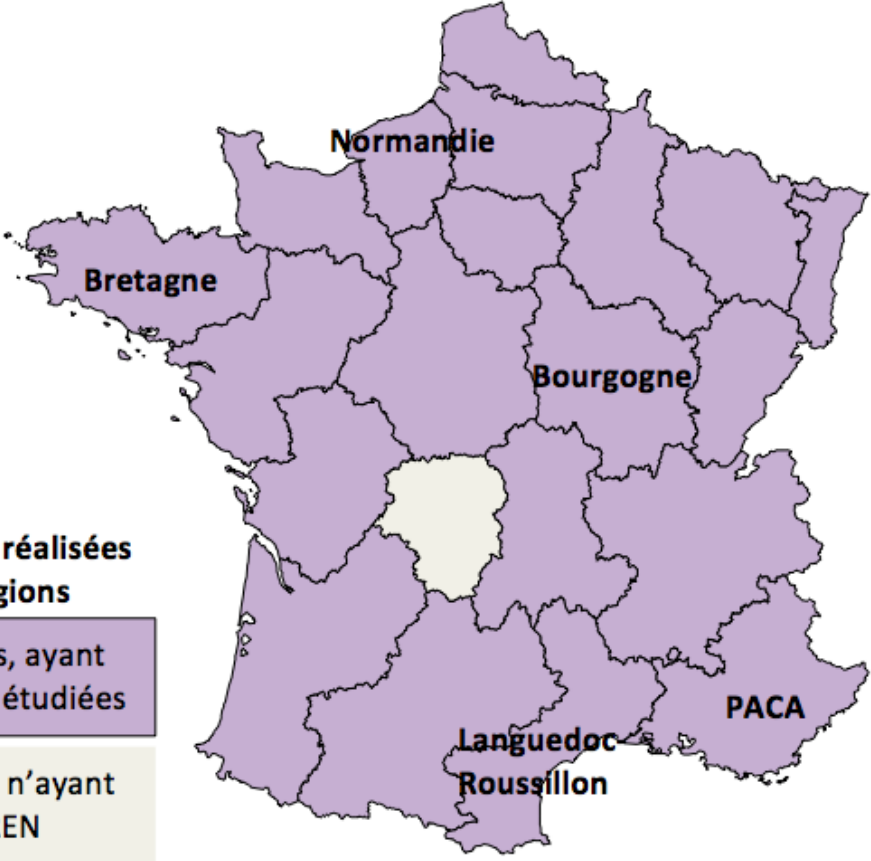
Dispositif

Enquêtes et documents officiels

Le diagnostic des usages des méthodes et outils existants

Concepts innovants / limite du modèle actuel

Critères d'évaluation / attentes des utilisateurs



Enquêtes réalisées dans 5 régions

20 régions, ayant un GREN, étudiées

2 régions, n'ayant pas de GREN

Résultats

❖ Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan:

- 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** »*

Résultats

❖ Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan:

- Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement
- L'analyse de sol: source d'incertitudes

Paradoxe: la mesure du RSH 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)

Résultats

- ❖ **Difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan:**
 - Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement
 - L'analyse de sol: source d'incertitudes
 - Standardisation versus Diversité permettant une adaptation aux spécificités locales
 - Pratiques actuelles ne permettant pas de maximiser l'efficacité d'utilisation des engrais (apports anticipés à cause des risques sécheresse)

Conséquences pour la conception :

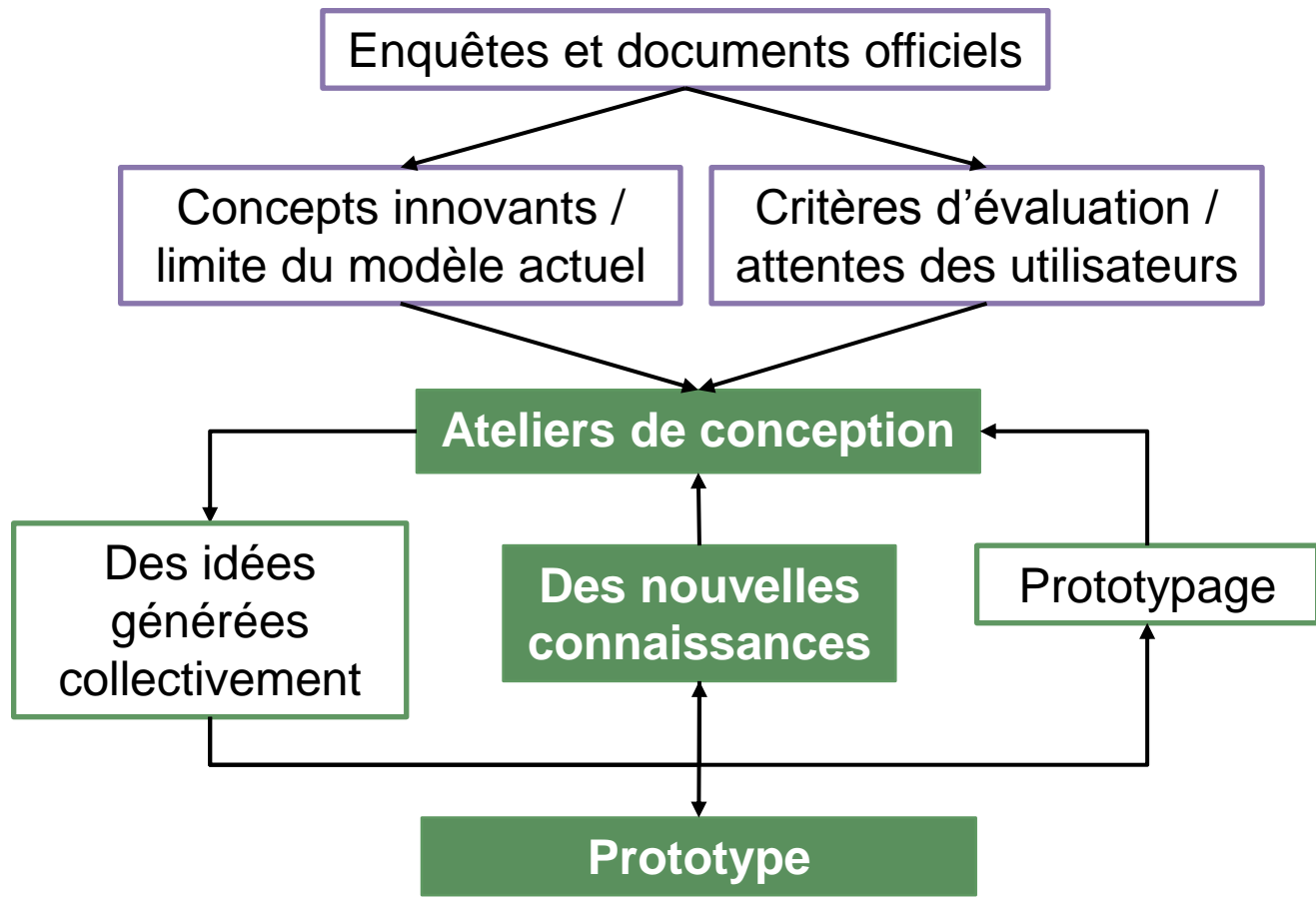
1= peut-on raisonner la fertilisation N sans objectif de rendement (et, si possible, sans reliquat de sortie d'hiver) ?

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

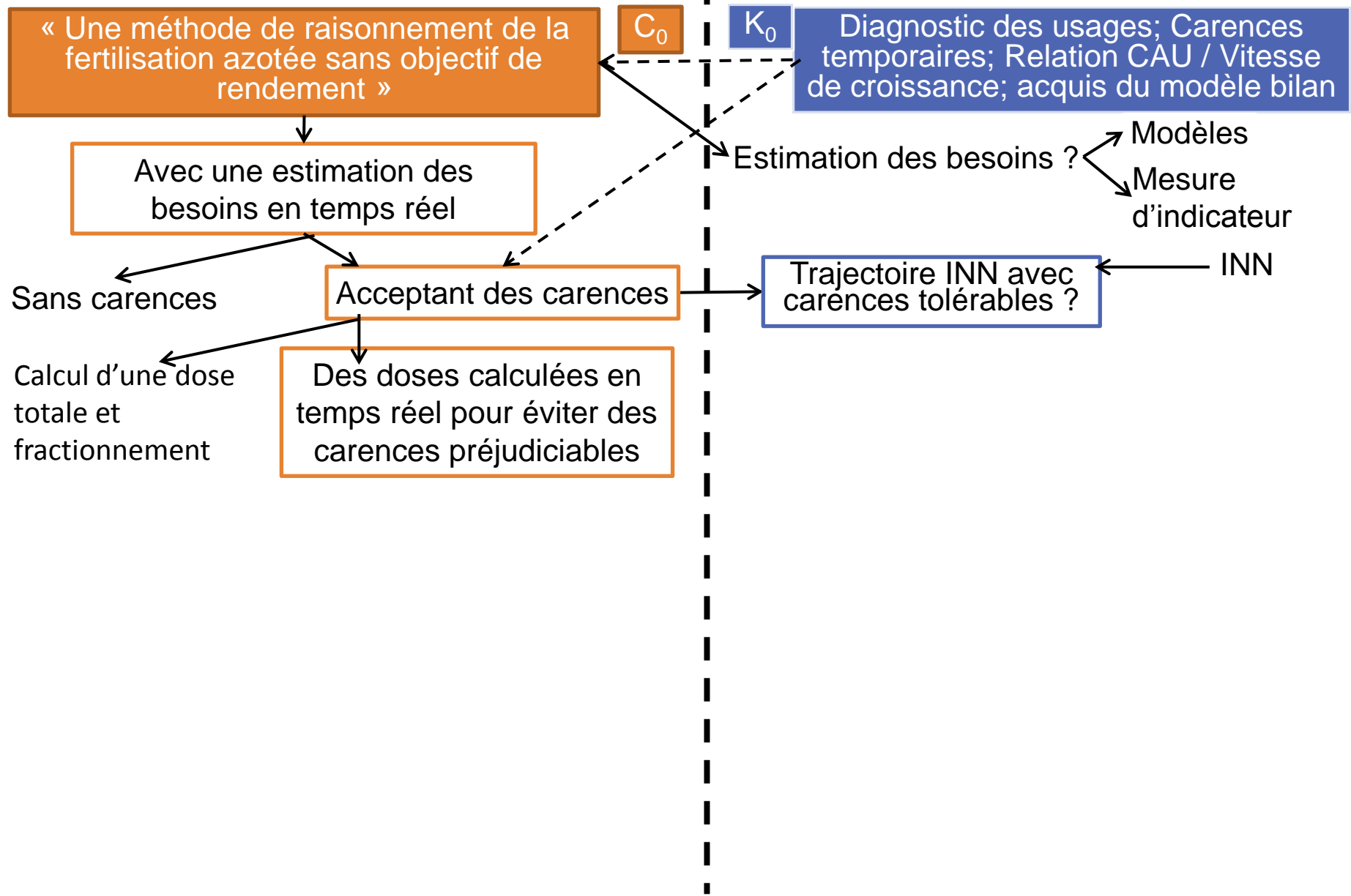
Diagnostic des usages

Processus de conception innovante

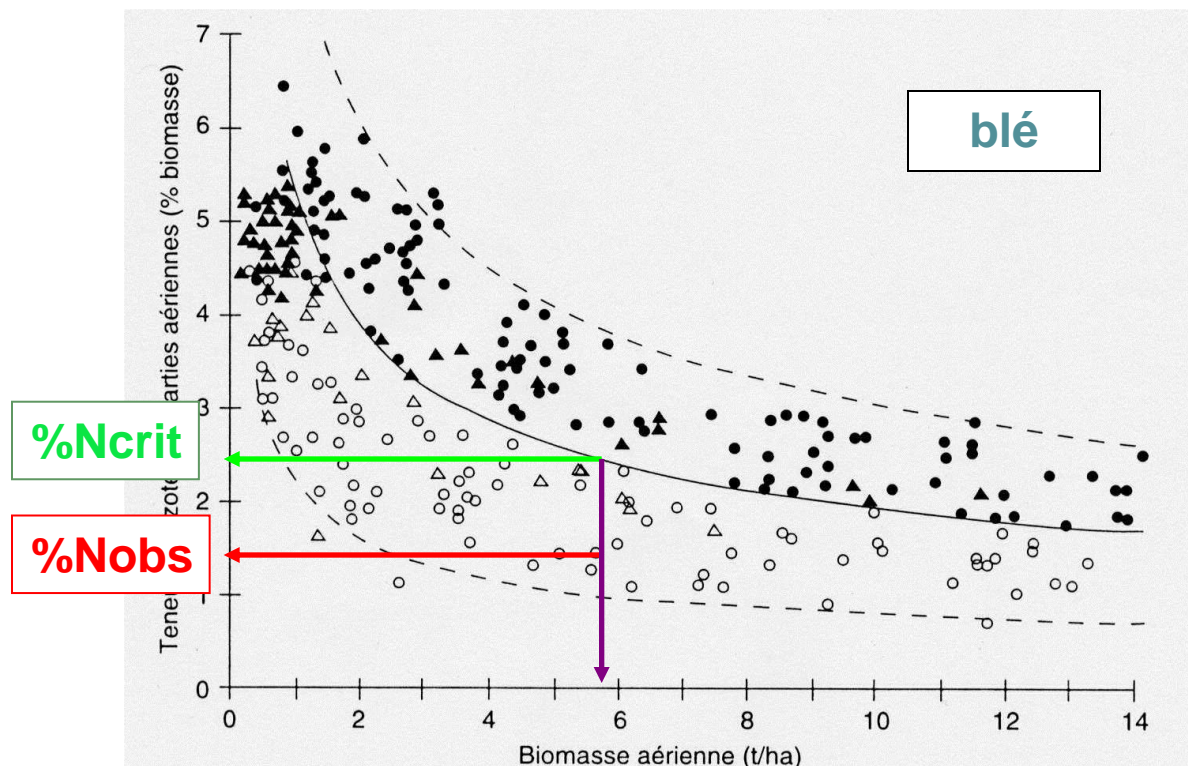
Test du prototype en situation d'usage



Atelier de conception



Caractériser les carences azotées avec l'Indice de Nutrition Azotée (INN)



Indice de nutrition azotée : $INN = \%Nobs / \%Ncrit$

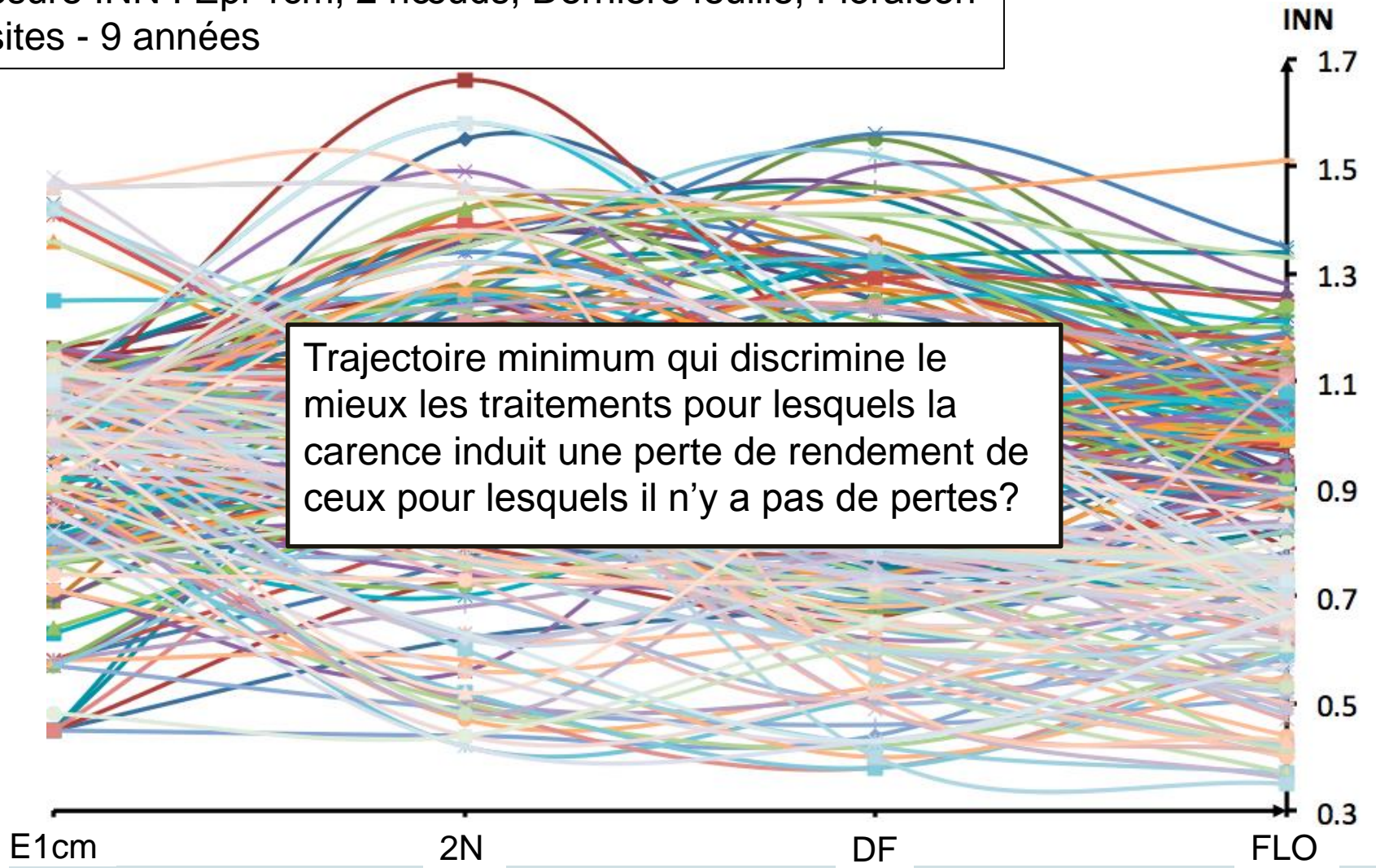
$INN \geq 1 \Rightarrow$ l'azote n'est pas limitant de la croissance du blé

$INN < 1 \Rightarrow$ la culture est en carence azotée

L'intensité de la carence est d'autant plus forte que l'INN est faible

Trajectoire d'INN avec carences tolérables

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



Trajectoire d'INN avec carences tolérables

Courbes ROC (Receiver-Operating Characteristic)

(Makowski et al., 2005;
Delacour et al., 2005)

1) Trier les traitements en 2 groupes:

Pertes de
rendement

Pas de pertes
de rendement

- ❖ Comment trier ?
- ❖ Yield Gap = écart de rendement entre traitement et le rendement maximum de l'essai
- ❖ À partir d'un seuil fixe de Yield Gap, ou d'une analyse statistique essai par essai?
 - Pas de consensus
 - Plus Petite Différence Significative non constante: de 0.1 t.ha⁻¹ à 1.6 t.ha⁻¹
- Fixer une gamme de Yield Gap allant de 0 à 1 t.ha⁻¹, avec un pas de 0.1 t.ha⁻¹
- Chercher la trajectoire la plus discriminante quelle que soit la valeur de Yield Gap

Trajectoire d'INN avec carences tolérables

Courbes ROC (Receiver-Operating Characteristic)

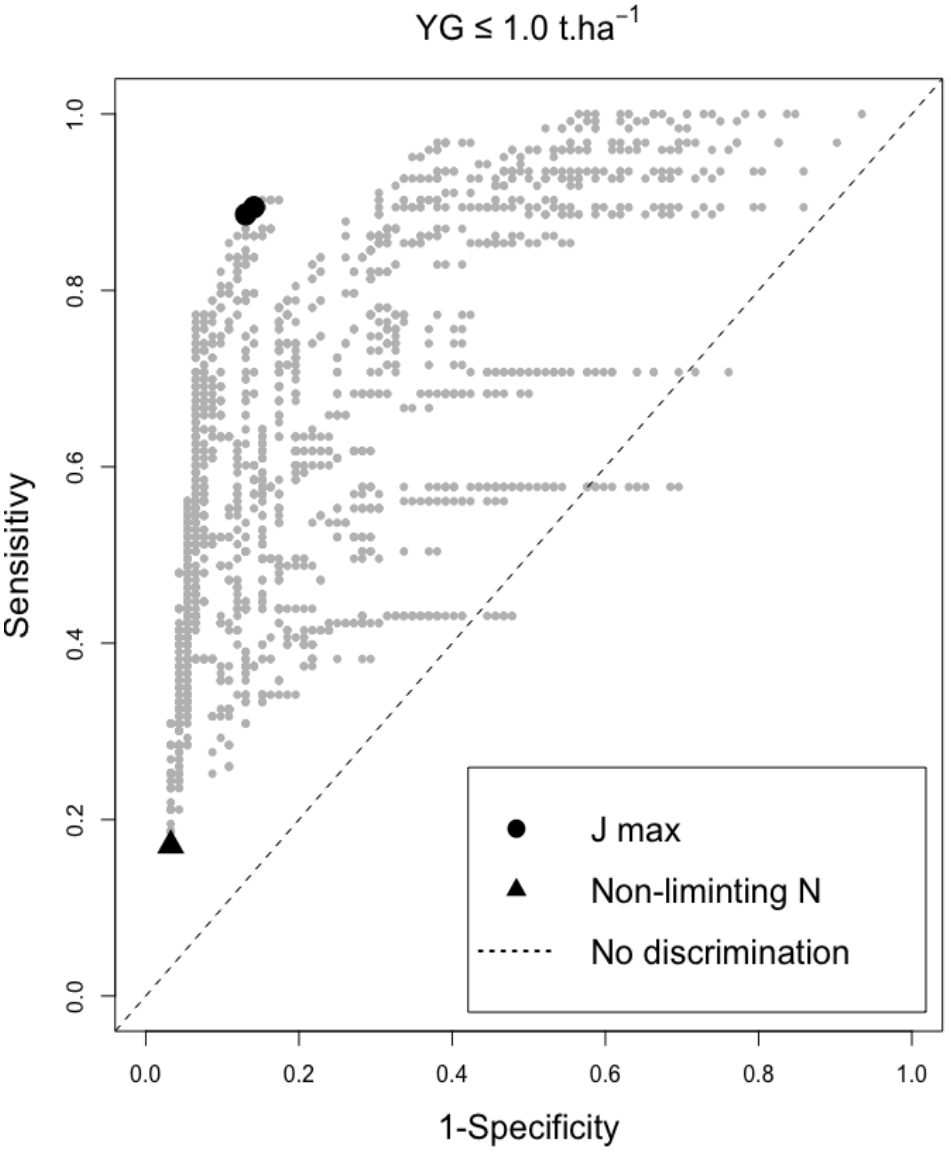
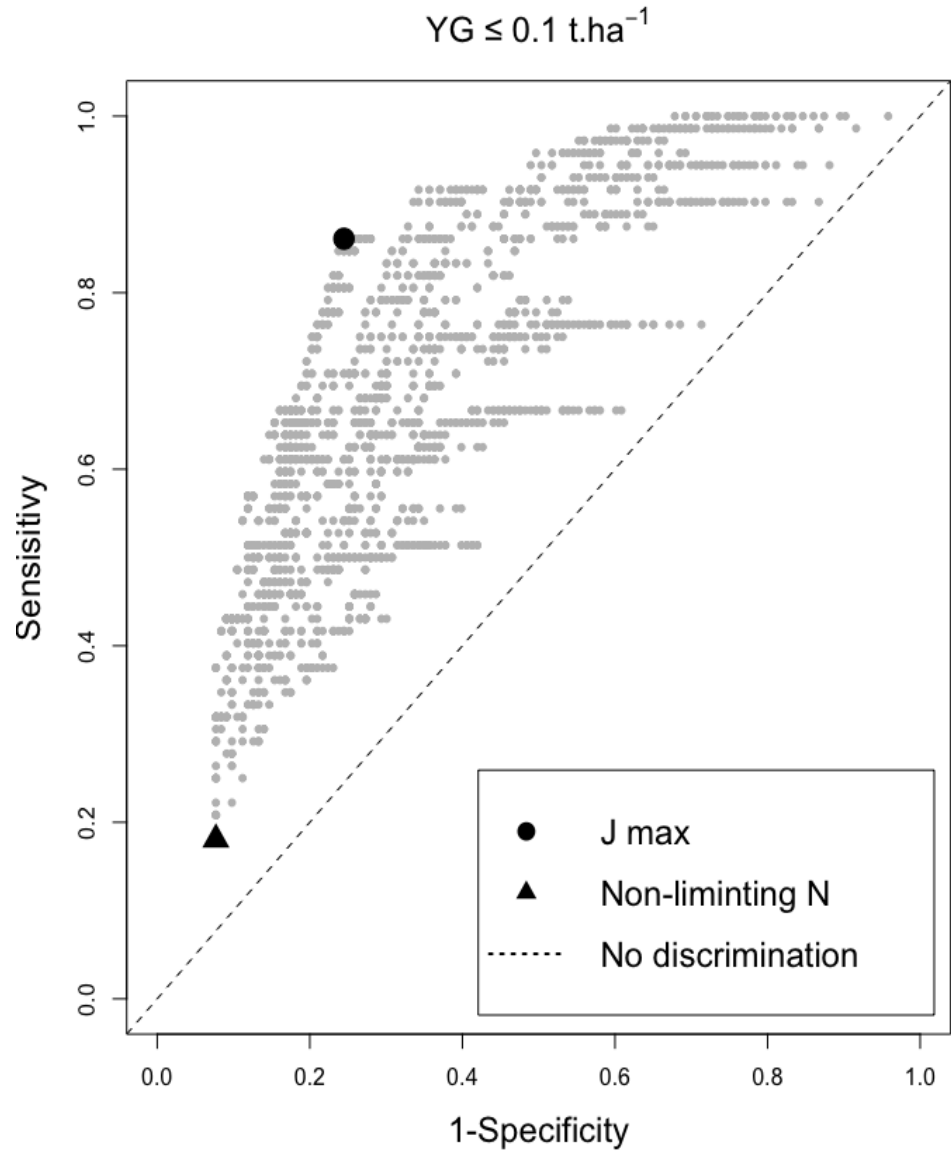
- 2) Comparer les trajectoires d'INN des traitements à des trajectoires théoriques
 - ❖ Toutes les trajectoires avec carences possibles (INN de 0.4 à 1, aux 4 stades) + 1 trajectoire sans carence (INN=1 aux 4 stades)
 - 2401 trajectoires théoriques à tester

		Trajectoire INN traitement / Trajectoire INN théorique	
Pertes		Au-dessus	Au moins un INN en-dessous
Non		INN traitement > INN théorique & Pas de pertes de rendement SENSIBILITE	INN traitement < INN théorique & Pas de pertes de rendement
	Oui	INN traitement > INN théorique & Pertes de rendement	INN traitement < INN théorique & Pertes de rendement SPECIFICITE

Youden Index (J) = Sensibilité + Spécificité – 1

(Youden, 1950;
Ruopp et al., 2008)

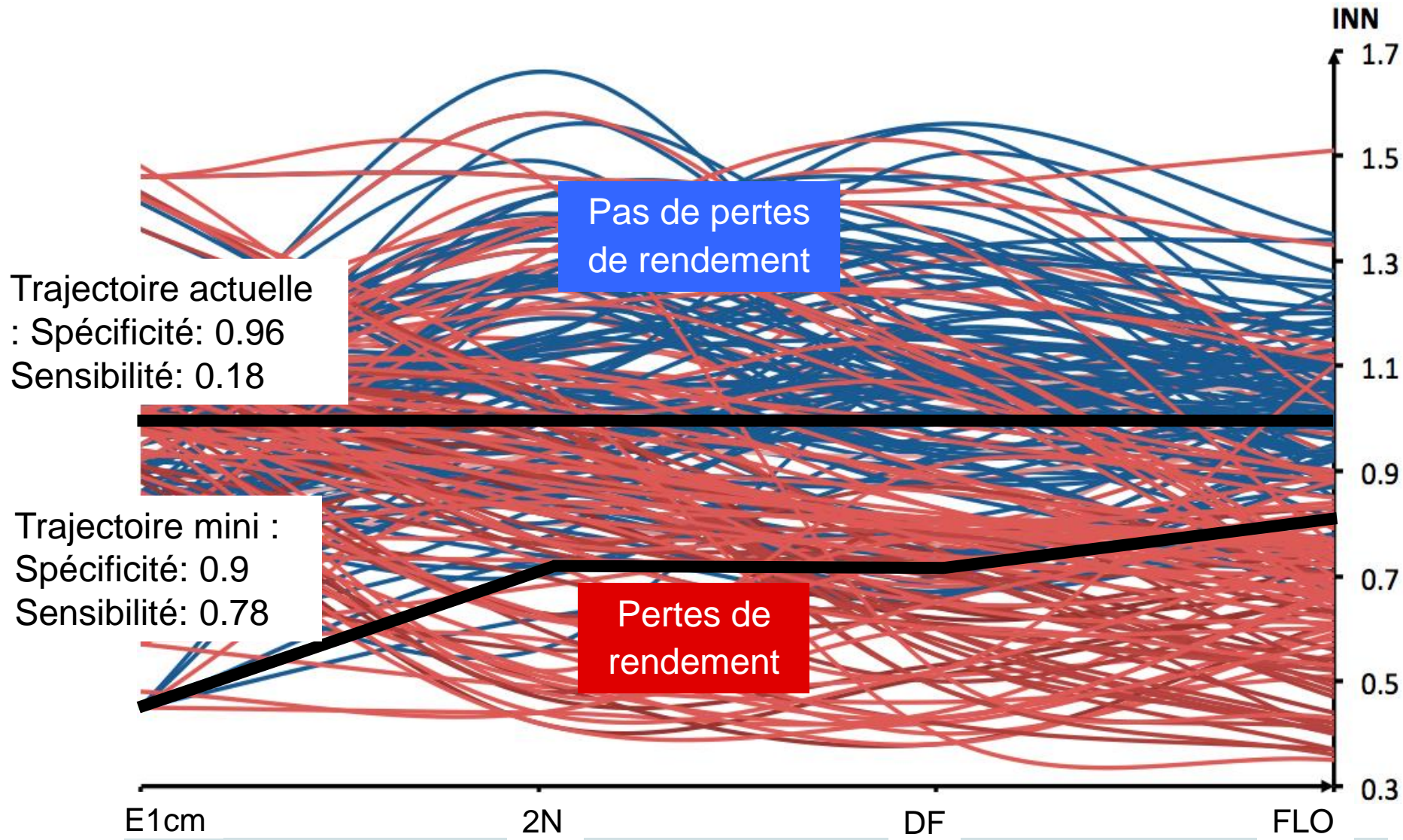
Trajectoire d'INN avec carences tolérables



Trajectoire d'INN avec carences tolérables

Courbes ROC (Receiver-Operating Characteristic)

(Ravier et al, 2017, EJA)



Trajectoire d'INN avec carences tolérables

- Effizienz et teneur en protéines des trajectoires mesurées

(Ravier et al, 2017, EJA)

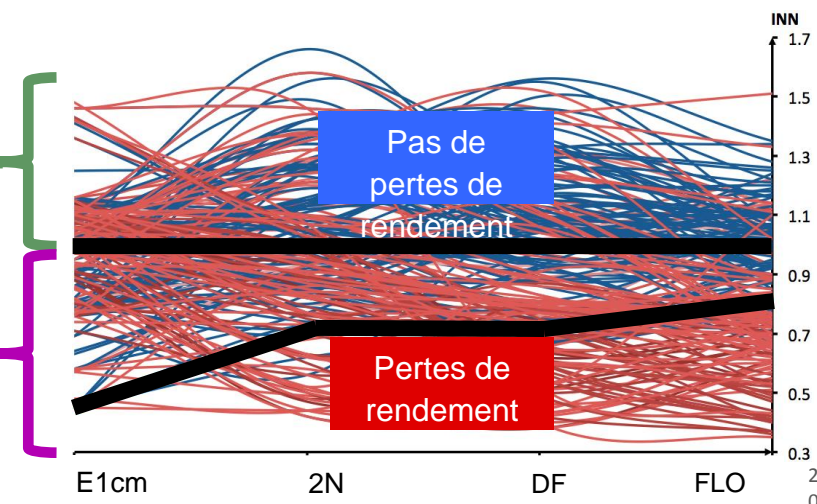
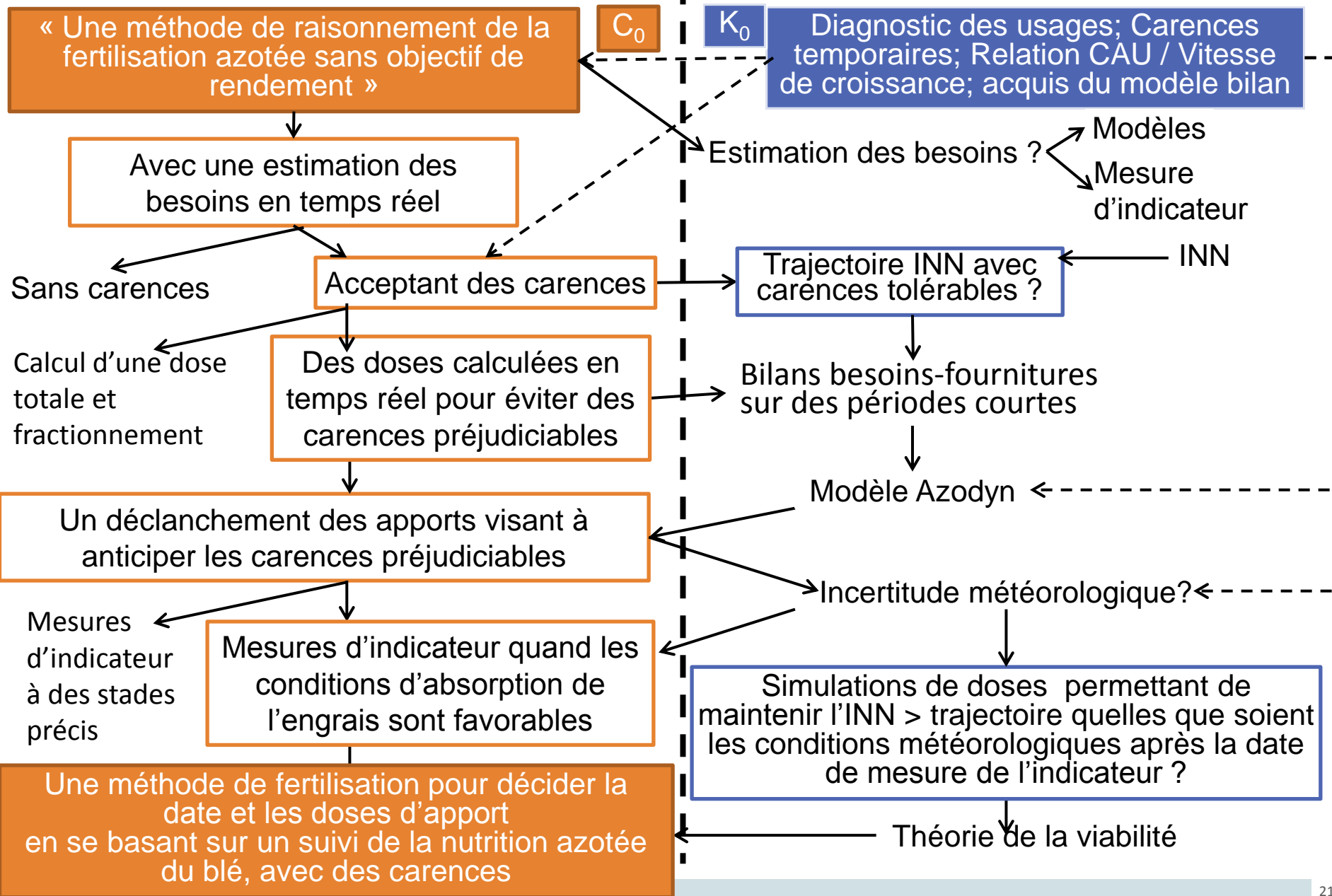


Table 3. Results for grain protein content (GPC) and rNUE for treatments with $I_{meas} \geq I_{thresh}$, depending on whether I_{meas} did or did not include a period of N deficiency

	Treatments without N deficiency (all NNI > 0.9)	Treatments with N deficiency (at least one NNI < 0.9)	Total
Number of treatments with GPC	36	53	89
Treatments with GPC < 11.5%	8	9	17
Treatments with GPC ≥ 11.5%	28	44	72
Mean GPC (***)	12.53 a	12.48 a	
Standard deviation	1.3	1.4	
Number of treatments with rNUE	45	70	115
Mean relative efficiency (*)	0.97 b	1.04 a	
Standard deviation	0.11	0.19	
Mean N rate (kg.N.ha ⁻¹) (**)	230 a	220 a	
Standard deviation	30	43	

Values in the same row followed by the same letter are not significantly different
 *P < 0.05, **P < 0.01 and ***P < 0.001

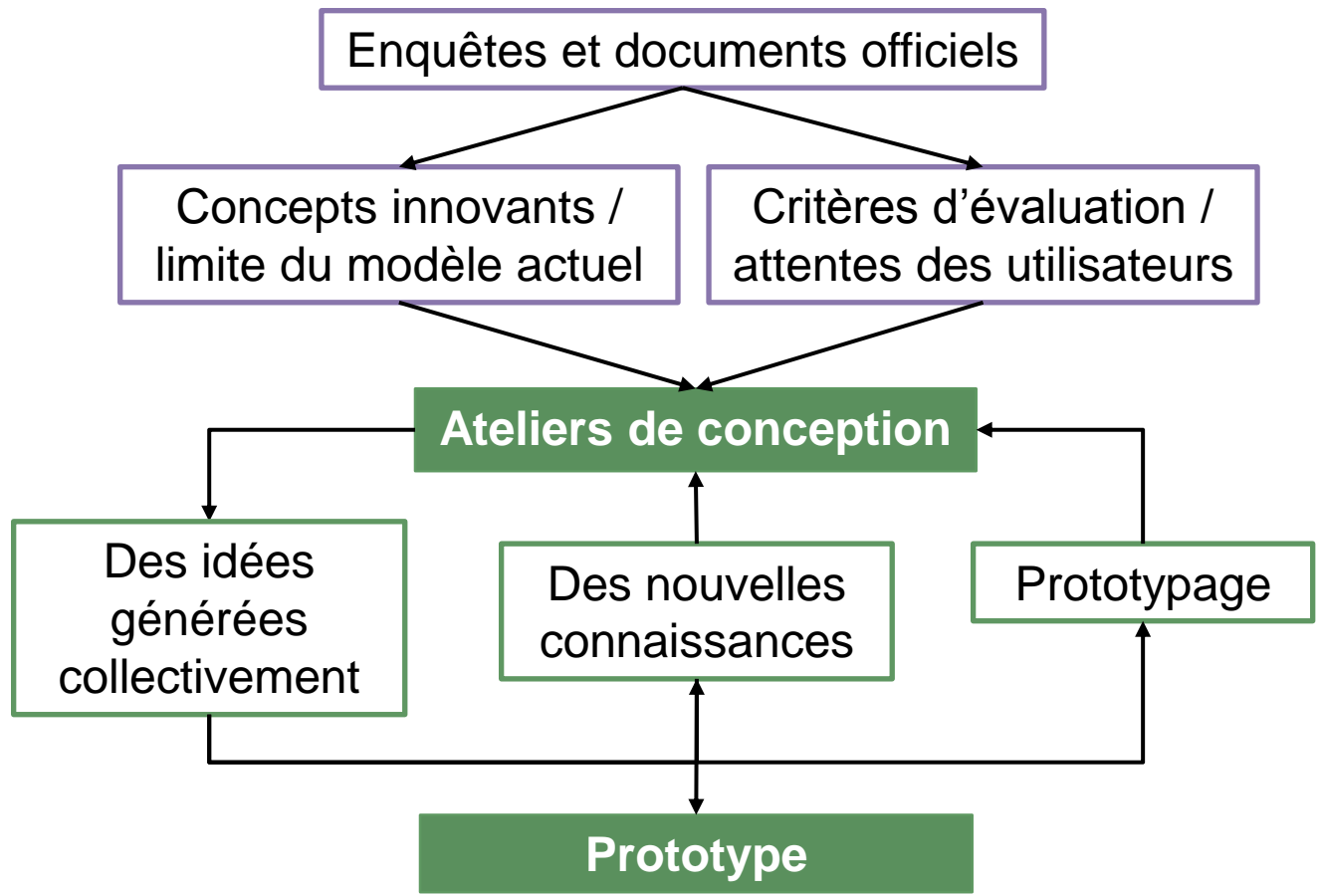
Atelier de conception



Diagnostic des usages

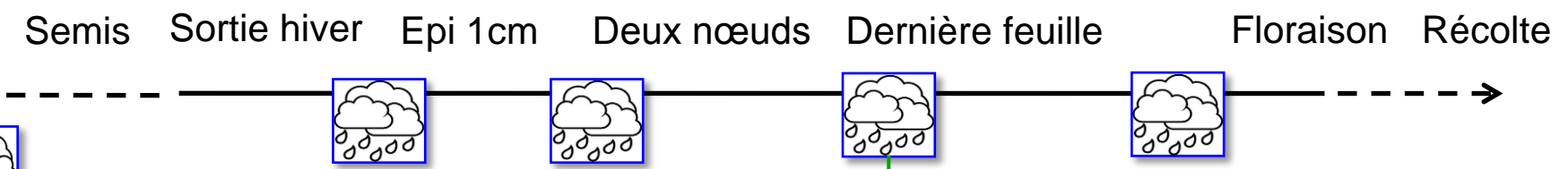
Processus de conception innovante

Test du prototype en situation d'usage



Prototype

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

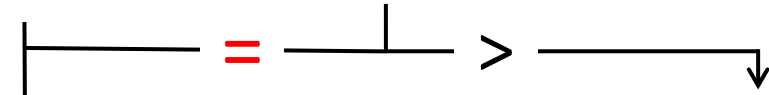


- Conditions favorables pour valoriser l'engrais :
- Conditions météorologiques optimales
 - Pas d'apport dans les 15 jours précédents

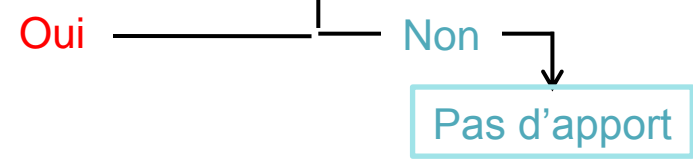
Mesure INN



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?



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

Construction des règles de décision

Azodyn (*Jeuffroy & Recous, 1999; David & Jeuffroy, 2009*) : simuler l'effet des choix des dates et des doses

- Simulations des stratégies de fertilisation :
- ❖ Simulations sur les 20 années passées
 - ❖ Identification des jours avec conditions favorables de chaque année
 - ❖ Simulations de toutes les options de fertilisation, chaque jour avec conditions favorables:
0, 40, 60, 80 ou 100 kg N ha⁻¹

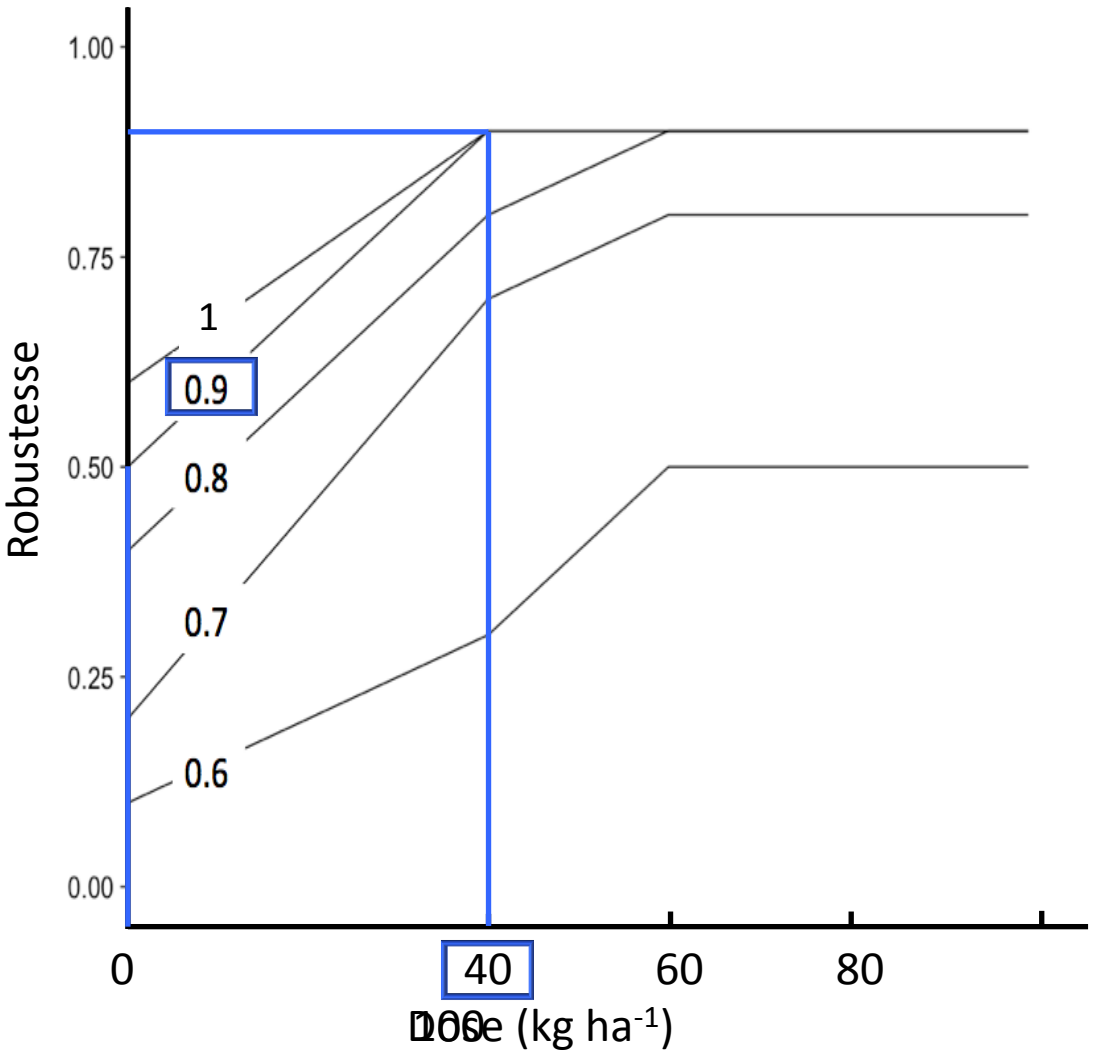
Théorie de la viabilité (*Aubin, 2010; Sabatier et al., 2015*) : trier et évaluer les simulations

- Critères de viabilité:
- ❖ INN au-dessus de la trajectoire minimum, de sortie hiver à floraison
 - ❖ Pertes d'azote sous la culture < 20 kg ha⁻¹
- Evaluer la robustesse de chaque option de fertilisation:
- $$R = \frac{\text{Nb années où [dose, date, INN] viable}}{\text{Nb années où [dose, date, INN] simulée}}$$

Construction des règles de décision

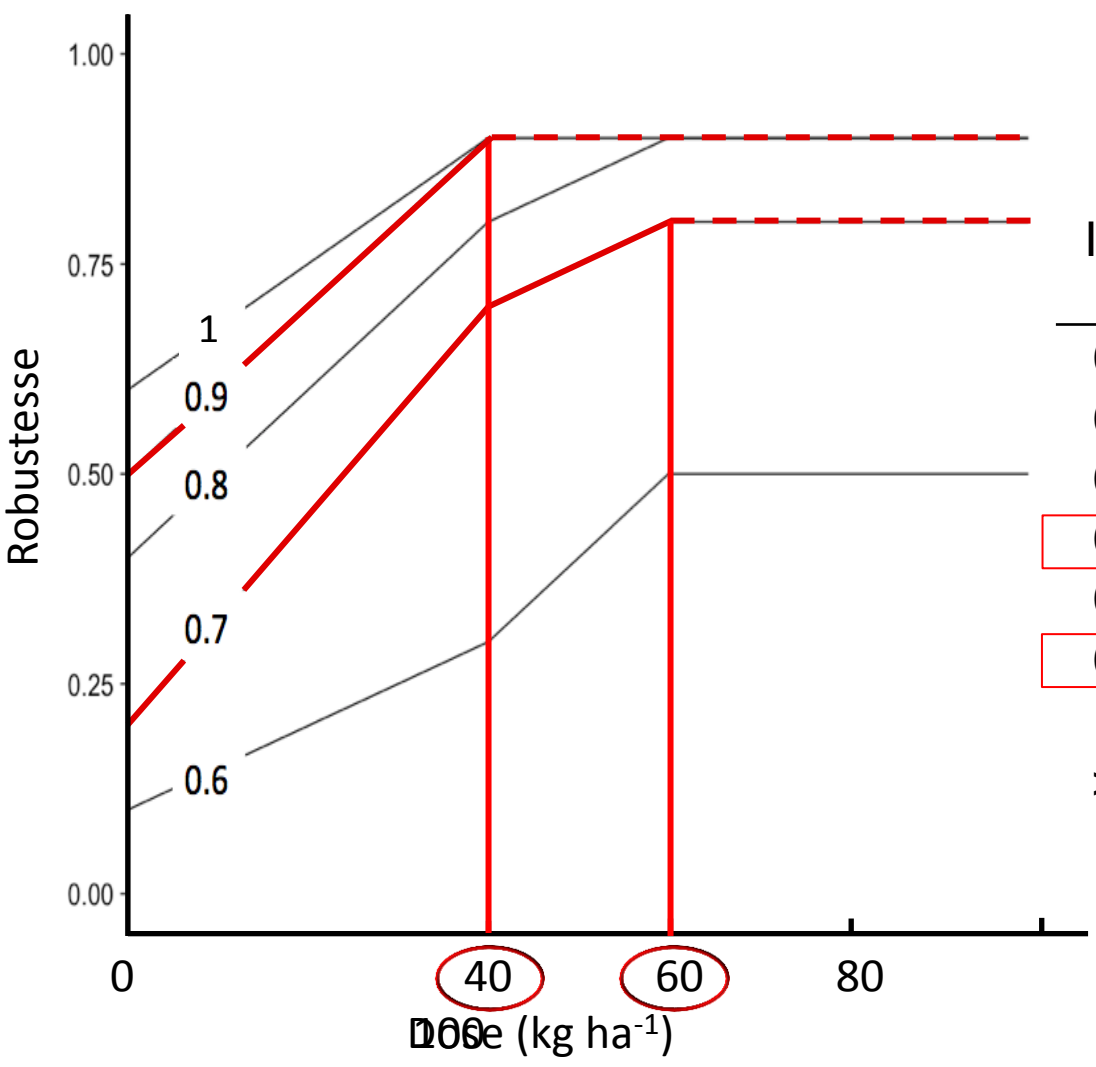
Du 15 mars au 31 mars

$$R = \frac{\text{Nb années où [dose, date, INN] viable}}{\text{Nb années où [dose, date, INN] simulée}}$$



Construction des règles de décision

Du 15 mars au 31 mars

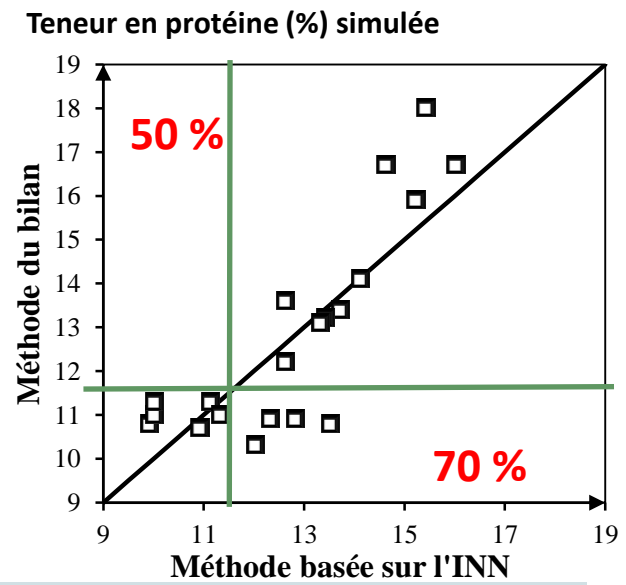
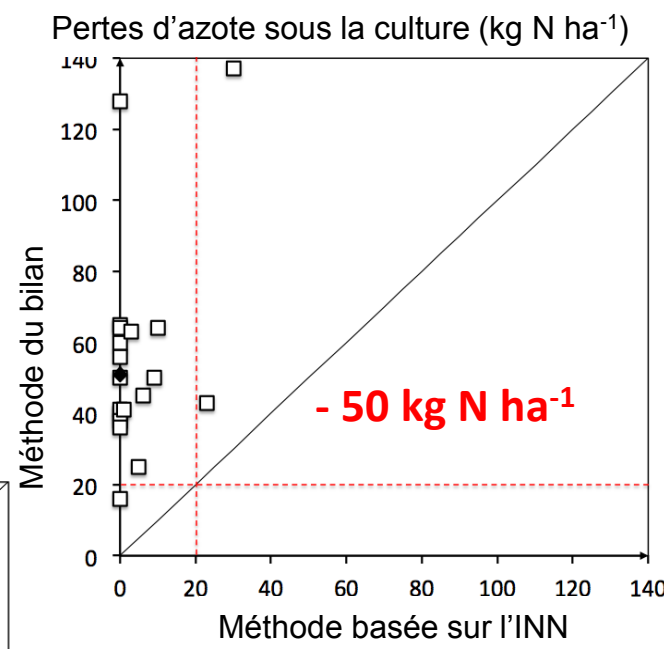
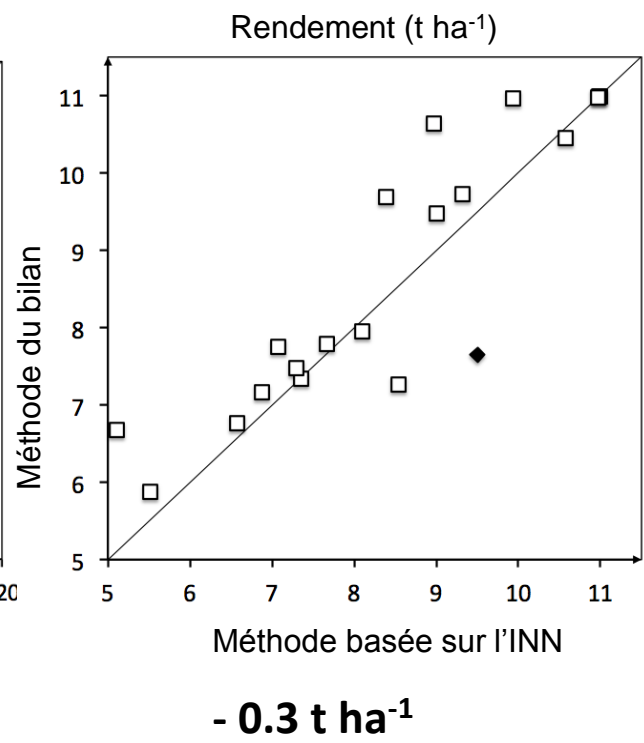
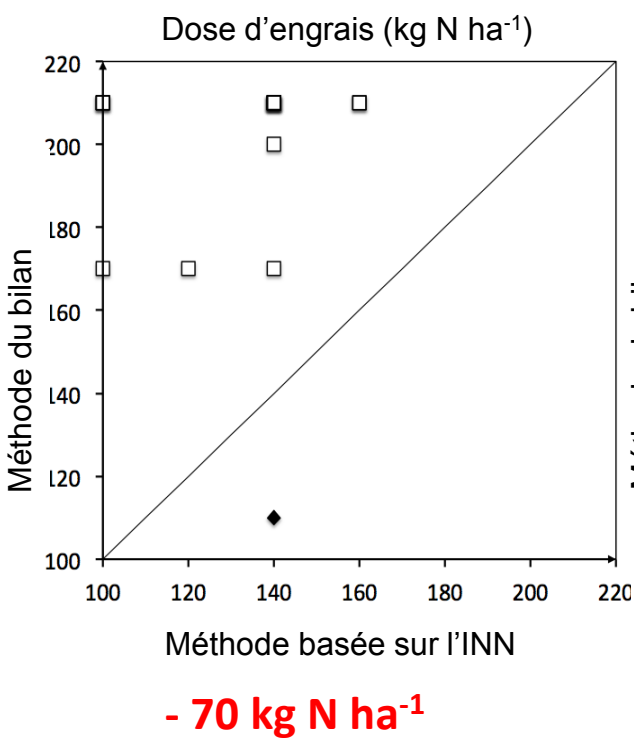


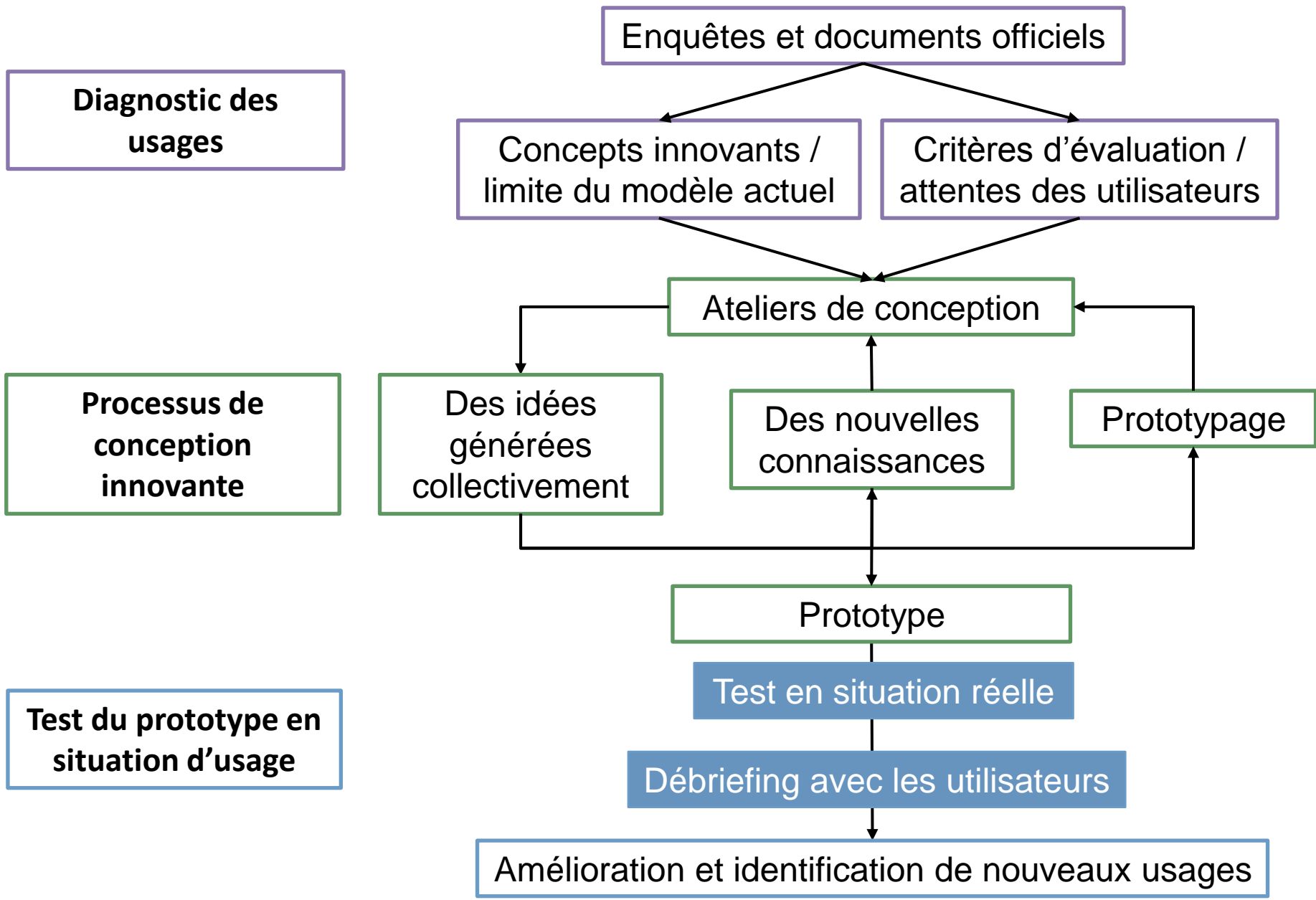
INN	1 ^{er} - 15 mars	15 - 31 mars	1 ^{er} - 15 avril	...
0.4	40			
0.5	40	60		
0.6	40	60		
0.7	40	60	100	
0.8	0	60	80	
0.9	0	40	60	
1	0	40	40	
> 1	0	0	0	

Comparaison 'méthode du bilan' vs 'prototype nouvelle méthode'

Simulations avec Azodyn :
1 situation, 20 années

Calcul bilan : données GREN, rendement régional
X = 210 kg N ha⁻¹, pas d'apport si conditions sèches





Dispositif

Test:

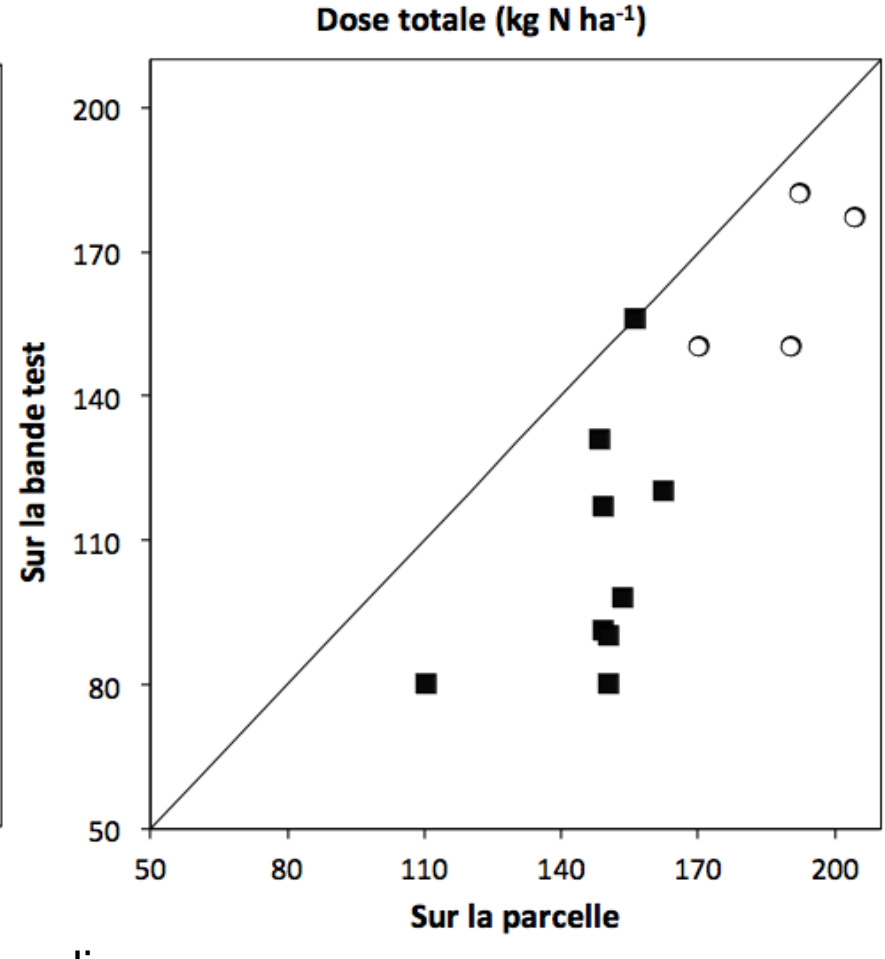
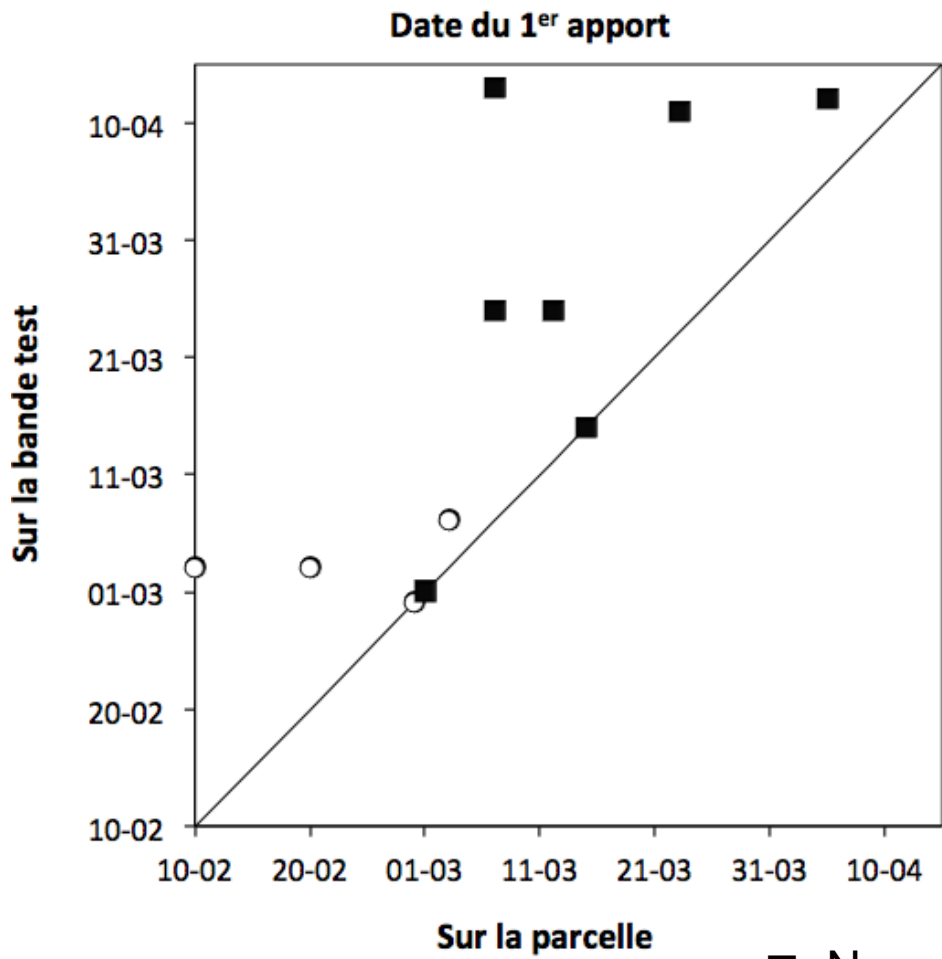
- 2 groupes d'agriculteurs – Normandie et Nouvelle Aquitaine
- Mettre en œuvre la procédure de suivi et de fertilisation sur une bande test
- Noter les observations faites



INN	1 ^{er} - 15 mars	15 - 31 mars	1 ^{er} -15 avril	...
0.4	40			
0.5	40	60		
0.6	40	60		
0.7	40	60	100	
0.8	0	40	80	
0.9	0	40	60	
1	0	40	40	
> 1	0	0	0	

Résultats

Des changements de pratiques



- Normandie
- Nouvelle Aquitaine

Résultats

Des usages inattendus

❖ Suivre la dynamique de l'azote

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

❖ Interpréter la fourniture en azote du sol

« 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 »

❖ Apprendre

« 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 » »

Conclusion: Vers un nouveau paradigme de la fertilisation azotée

- **Pas de dose a priori**
- **Indicateur plante au service de la décision**
- **Carences acceptées, et même recommandées**
 - Tant que l'on reste au dessus de la trajectoire seuil, pas d'effet sur le rendement et le taux de protéines des grains
 - Accepter des carences de début de cycle permet de retarder les apports, et donc d'augmenter leur CAU
 - Un blé qui n'est pas fertilisé s'alimente aux dépens du reliquat: la carence s'installe quand le reliquat est consommé: pas besoin de le mesurer !
 - Une carence au début de la montaison réduit le risque de maladies (oïdium, septoriose) et de verse

Conclusion: Vers un nouveau paradigme de la fertilisation azotée

- **Pas de dose a priori**
- **Indicateur plante au service de la décision**
- **Carences acceptées, et même recommandées**

- **Réduction des doses apportées**
- **Source d'apprentissage et d'autonomisation**

- **Compatible avec les nouvelles technologies émergentes (capteurs)**

- **Mais nécessité de faire évoluer la réglementation !**

- **Suites:**
 - **Tester la méthode : mesurer les conséquences sur RDT, TPI, CAU**
 - **Adapter la méthode à une diversité de situations**
 - **Proposer des règles pour les compromis à l'échelle de l'exploitation**
 - **Estimer les conséquences à l'échelle nationale (réduction GES, Rendement et Teneur en protéines des grains)**

Merci pour votre attention