



Quelles pratiques de  
**fertilisation**  
pour accompagner la **diversité**  
des systèmes de culture ?



# Adaptations et limites des méthodes de raisonnement actuelles

Christine Le Souder (ARVALIS), Raphaël Paut (INRAE)



# Adaptations et limites des méthodes de raisonnement actuelles



## Au programme

1. Les limites des méthodes de raisonnement actuelles
2. Comment les « nouveaux systèmes » / « nouvelles pratiques » questionnent le raisonnement de la fertilisation azotée
3. Que se passe-t-il lorsqu'un grand nombre de ces pratiques sont mises en œuvre en même temps ?
4. Perspectives / conclusion



Jeuffroy & Meynard 2019

## Méthode du bilan largement reconnue

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
- Viser une nutrition N non limitante tout au long du cycle

Une amélioration continue (depuis Hébert 1969 et ITCF 1978) du raisonnement par affinement de l'estimation des différents postes

Une diffusion massive de la méthode et des références mises à jour par le COMIFER (et chez nos voisins Européens, Jordan-Meille et al. 2023)



# Les limites des méthodes de raisonnement actuelles

## Méthode du bilan largement reconnue

Jeuffroy & Meynard 2019

Des éléments de raisonnement du calcul de la dose et des modalités d'apport 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
- Viser une nutrition N non limitante tout au long du cycle

Une amélioration continue (depuis Hébert 1969 et ITCF 1978) du raisonnement par affinement de l'estimation des différents postes

Une diffusion massive de la méthode et des références mises à jour par le COMIFER (et chez nos voisins Européens, Jordan-Meille et al. 2023)

## Mais... ne résout pas un ensemble de problèmes :

Impacts environnementaux qui subsistent malgré améliorations de la méthode :

- Nitrate dans les eaux (*Beaudoin et al. 2005*)
- Émissions gaz à effet de serre (*Pellerin et al. 2014*)
- Forte consommation en énergie fossile (matière première, process, transport des engrais) (*Tilman et al. 2002*)

Performances parfois insuffisantes :

- Souvent de faibles CAU
- Teneur en protéines, et parfois rendement, non satisfaisants



# Les limites des méthodes de raisonnement actuelles



2 éléments font particulièrement débats :

Ravier et al. 2016

## 1. Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement

### **Pour les pouvoirs publics : éviter 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)

### **Pour les organismes professionnels agricoles : logique de potentiel**

- Limiter les risque de :
  - ne pas atteindre les potentialités les années favorables
  - stagnation des rendement
  - non prise en compte du progrès génétique
  - N non suffisant pour teneur en protéine

### **Pour les 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* »



# Les limites des méthodes de raisonnement actuelles



2 éléments font particulièrement débats :

Ravier et al. 2016

1. Pas de consensus sur la manière de fixer l'objectif de rendement

2. L'analyse de sol

Paradoxe: la mesure du Reliquat 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 des analyses de sol mais souvent mes valeurs sont supérieures à la moyenne régionale, je me demande si la mesure est fiable » (Agriculteur)*

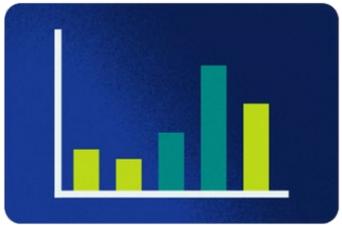
*« Il y a tellement de conditions à réunir pour que la mesure soit fiable ... Et c'est encore plus compliqué de savoir à quelle parcelle on a le droit d'extrapoler » (Conseiller)*



# Les limites des méthodes de raisonnement actuelles

2024

## 1. L'objectif de rendement

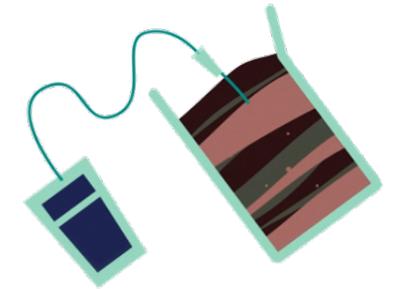


**Besoins =**  
rendement  
accessible \*  
besoins par  
unité de  
rendement



**Fournitures  
du sol**  
**Fertilisation  
N**

## 2. L'analyse de sol (RSH)



2 sources d'incertitudes...

—> Et l'effet des pratiques ?



# Comment les « nouveaux systèmes » / « nouvelles pratiques » questionnent le raisonnement de la fertilisation azotée



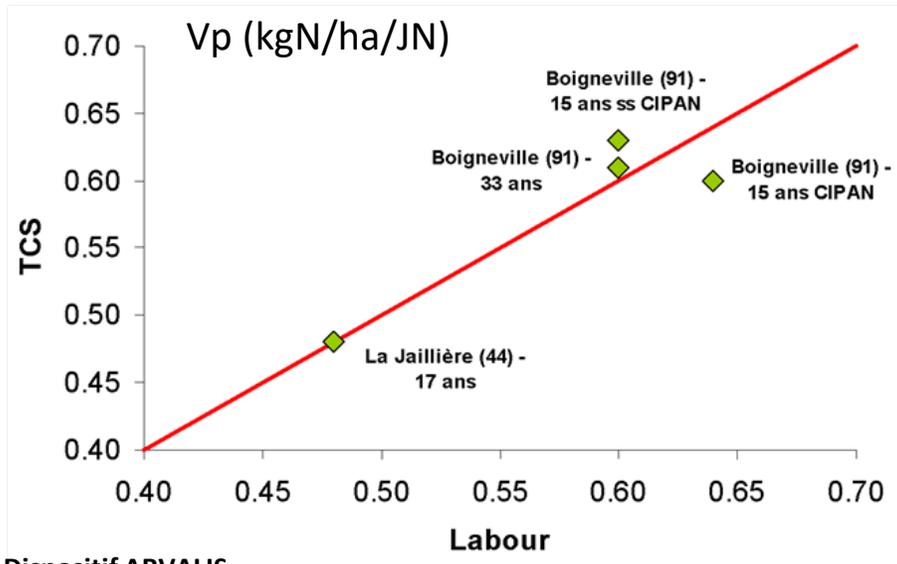
## 1- Pratiques et fournitures du sol

### Réduction du travail du sol

Références existantes \*

Références existantes \*

### Minéralisation nette de l'azote organique



Dispositif ARVALIS

Oorts et al. 2007 pour Boigneville

pas/peu de différence

### Les couverts intermédiaires

	Production de la CI (tMS/ha)	Ouverture du bilan en sortie hiver		Ouverture du bilan en Avril	
		Destruction Nov/dec	Destruction>Janv	Destruction Nov/dec	Destruction>Janv
CRUCIFERES (moutarde, radis, ...)	<= 1	5	10	0	5
	2 (>1 et <3)	10	15	5	10
	>= 3	15	20	10	15
GRAMINÉES DE TYPE SEIGLE, AVOINE, ...	<= 1	0	5	0	0
	2 (>1 et <3)	5	10	0	5
	>= 3	10	15	5	10
GRAMINÉES DE TYPE RAY-GRASS	<= 1	5	10	0	5
	2 (>1 et <3)	10	15	5	10
	>= 3	15	20	10	15
LÉGUMINEUSES	<= 1	10	20	5	10
	2 (>1 et <3)	20	30	10	20
	>= 3	30	40	20	30
HYDROPHYLLACEES (Phacélie)	<= 1	0	5	0	0
	2 (>1 et <3)	5	10	0	5
	>= 3	10	15	5	10
MÉLANGES GRAMINÉES - LÉGUMINEUSES	<= 1	5	13	3	5
	2 (>1 et <3)	13	20	5	13
	>= 3	20	28	13	20
MÉLANGES CRUCIFÈRES - LÉGUMINEUSES	<= 1	8	15	3	8
	2 (>1 et <3)	15	23	8	15
	>= 3	23	30	15	23

Brochure COMIFER

\* Date d'ouverture du bilan dans certains cas pour des cultures d'été (Maïs, Pomme de Terre)  
Source: Brochure "Cultures Intermédiaires - Impacts et Conduite", ARVALIS/CETIOM/ITB/ITL, août 2011 (chapitre 17)

Tableau 7 : Poste MrCi (kgN/ha) en fonction de la nature des résidus de la culture intermédiaire. (1) un niveau de croissance élevé se caractérise par une biomasse des parties aériennes supérieure à environ 3,0 t ms/ha. Sources : ARVALIS - Institut du végétal, INRA.

\*références à maintenir



# Comment les « nouveaux systèmes » / « nouvelles pratiques » questionnent le raisonnement de la fertilisation azotée



## 1- Pratiques et fournitures du sol

### Les couverts permanents

Références manquantes

Des questions :

- concurrence avec la culture principale lors d'un apport
- échanges et bénéfices entre les 2 cultures
- ...

### Les légumineuses dans la rotation

Références existantes \*

Nature du précédent	Mr (kgN/ha)	
	Ouverture du bilan en sortie hiver	Ouverture du bilan en Avril*
Betterave	20	10
Carotte	10	0
Céréales pailles enfouies	-20	-10
Céréales pailles enlevées ou brûlées	0	0
Colza	20	10
Endive	10	0
Féverole	30	20
Lin fibre	0	0
Luzerne (retournement fin été/début automne): année n+1	40	30
Luzerne (retournement fin d'été/début automne): année n+2	20	20
Luzerne (retournement printemps)		
Maïs fourrage	0	0
Maïs grain	-10	0
Pois protéagineux	20	10
Prairie	0	0
Pois, Haricots de conserve	20	10
Pomme de terre	20	10
Tournesol	-10	0
Ray-Grass dérobé	-10	0
Soja	20	10

\* Date d'ouverture du bilan dans certains cas pour des cultures d'été (Maïs, Pomme de Terre...)

Tableau 5 : Poste Mr (kgN/ha) en fonction de la nature des résidus de la culture précédente. Sources : ARVALIS - Institut du végétal, INRA, 2012.

\*références à maintenir



# Comment les « nouveaux systèmes » / « nouvelles pratiques » questionnent le raisonnement de la fertilisation azotée



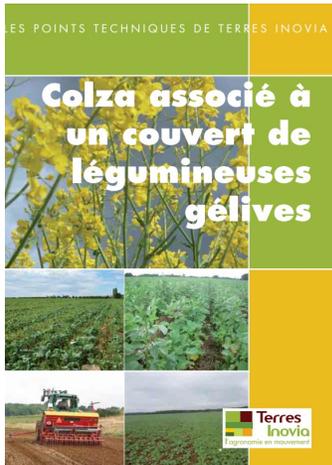
## 1- Pratiques et fournitures du sol

### Les associations de culture et plantes compagnes

Références à compléter

De nouveaux PROs

Références à compléter



#### Trois bénéfices possibles à tirer d'un couvert d'automne associé au colza

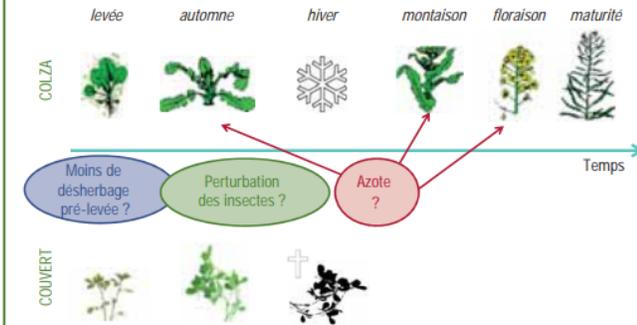


Figure 1 : Interactions possibles entre un colza et un couvert associé à l'automne. Trois types d'interaction peuvent exister entre colza et couvert d'automne : des échanges d'azote supplémentaires entre le couvert et le colza à l'automne ou au printemps, une compétition entre couverts et mauvaises herbes au début de l'automne pour réduire les herbicides, une perturbation du cycle des insectes d'automne.

Perspectives agronomiques

Exemples de PRO	Cultures concernées	Périodes d'apport	Coefficient d'équivalence azote [keqN]						
			keqN sur la période du bilan	Amplitudes ou écart-type (σ)*	SOURCES	keqN sur la période du cycle	Amplitudes ou écart-type (σ)*	SOURCES	
Compost MIATE**** (avec support carbonaté) de 6 mois et plus	de printemps (type maïs)	Printemps	0,15		IL (1)	0,15		IL (1)	
	d'automne (blé)	Automne	0,10		IL (1)				
Compost de déchets verts	de printemps (type maïs)	Printemps	0,10	0,05 à 0,15	IL (1)	0,10	0,05 à 0,15	IL (1)	
	de printemps (type maïs)	Automne	0,10		EC(2)				
	de printemps (type maïs)	Eté avant CIPAN**	0,10		EC(2)				
	d'automne (colza)	Fin été	0,05		EC(2)				
	d'automne (blé)	Automne	0,05		SA (1)				
Compost de déchets verts de moins de 6 mois	d'automne (blé)	Automne	0,00		SA (2)				
	Compost d'ordures ménagères résiduelles (par TMB)	de printemps (type maïs)	de printemps (type maïs)	Printemps	0,10	0,05 à 0,15	IL (2)	0,10	0,05 à 0,15
Compost urbain	d'automne (blé)	Automne	0,05		IL (1)				
	de printemps (type maïs) apport surface	Printemps	0,50		EC (5)	0,50		EC (5)	
Digestats bruts	de printemps (type maïs) injection	Printemps	0,90		EC (5)	0,90		EC (5)	
	d'automne (colza)	Printemps	0,80			0,80		EC (5)	
	d'automne (blé)	Printemps	0,65		EC (5)				
	Fraction liquide après séparation de phase	de printemps (type maïs)	Printemps	0,70		E (2) (rattachement au produit Lisier de Porcs)	0,70		E (2) (rattachement au produit Lisier de Porcs)
Digestats de méthanisation agricole	Fraction sèche après séparation de phase	de printemps (type maïs)	Printemps	0,30		RE (1)	0,30		RE (1)
	Boues activées liquides (AA-IC/N =								

Des bases reconnues (N minéral, Norganique, keqN) mais besoin de validations



# Comment les « nouveaux systèmes » / « nouvelles pratiques » questionnent le raisonnement de la fertilisation azotée



## 2- Nouvelles productions

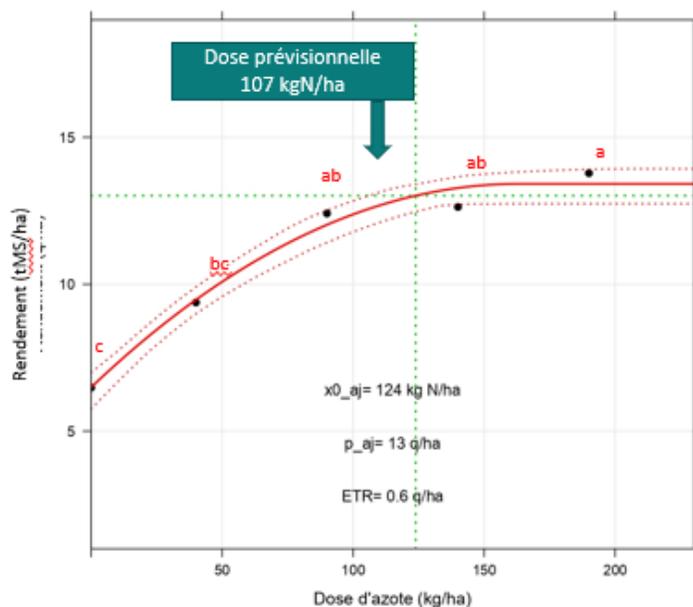
### Les CIVEs

#### Gestion de la Fertilisation azotée des CIVE<sup>1</sup>

#### Références pour le calcul de la dose totale prévisionnelle

en cours

$$X = [Pf - Pi + Rf - L] - [Ri + Mh + Mhp + Mr + Mpro1 + Mpro2 + Nirr + Xpro]$$



1 Culture Intermédiaire à  
Vocation Énergétique



# Comment les « nouveaux systèmes » / « nouvelles pratiques » questionnent le raisonnement de la fertilisation azotée



## 3- Objectif de production hors optimum de fertilisation

**Raisonnement de la fertilisation sous contrainte, pour plusieurs raisons :**

- Géopolitiques (€ engrais suite au conflit Russo-ukrainien)
- Économiques (tarissement des ressources)
- Réglementaires : le « Green Deal » pourrait tout changer (-20% consommation d'engrais à horizon 2030)

**ou choix délibéré volontaire**

Références à compléter

Des connaissances existent (fonction de production pour certaines cultures, objectifs de statut azoté en cours de végétation pour certaines cultures) mais il est nécessaire de compléter les études, de proposer et de valider des règles.



# Comment les « nouveaux systèmes » / « nouvelles pratiques » questionnent le raisonnement de la fertilisation azotée



## 4- combinaison de pratiques

### Dispositifs SYPPRE

# Syppre



### ACS\*

En cours

Expérimentations  
Se référer à la restitution de Grégory Véricel (Arvalis) ce jour



Plusieurs objectifs, selon les sites :

**Fertilité des sols: taux de MO, structure du sol,  
Robustesse économique,  
Résilience vis-à-vis des aléas climatiques,  
Marge,  
Productivité**

**Dépendance aux engrais azotés  
Dépendance aux phytos,  
Erosion,  
Pression adventice,  
Emissions de GES**

*A-t-on réussi à réduire la quantité d'azote minéral apportée ?*

*À l'échelle du système ? De la culture ?*

*Quels leviers a-t-on mobilisés ?*

*Quels effets sur la mutipformance des cultures et du système ?*

*Quels enseignements tirer de stratégies innovantes de fertilisation ?*

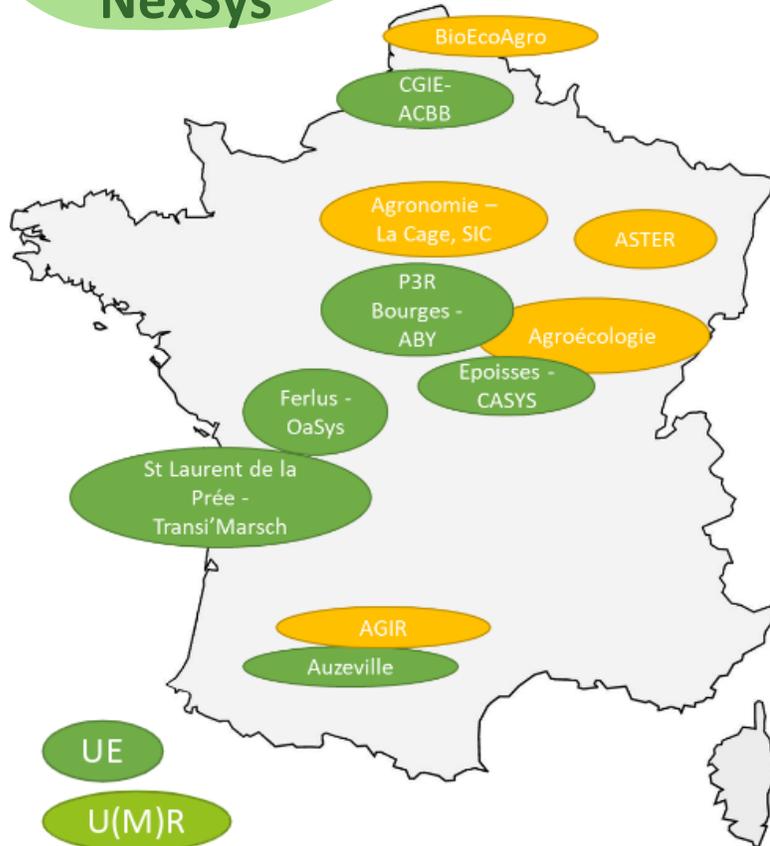


# Comment les « nouveaux systèmes » / « nouvelles pratiques » questionnent le raisonnement de la fertilisation azotée



## 4- combinaison de pratiques

### Dispositifs NexSys



20 essais-systèmes de grandes cultures ou polyculture-élevage

- **Diversité de conduite des systèmes**, avec un gradient (i) d'intégration de l'élevage ; (ii) de recours à la fertilisation N et diversité de modes d'apport de N ; (iii) de couverture du sol (sol nu vs couverture permanente) et (iv) de recours au travail du sol (AB vs ACS)

### Des questions et difficultés rencontrées vis-à-vis de la performance azotée

- Des difficultés à gérer les bioagresseurs => la gestion de N n'est pas la priorité
- Un manque de référence et connaissance sur cultures de diversification, sur certaines légumineuses, sur les associations de cultures, sur les systèmes diversifiés (régime restitution N des sols)
- La gestion de la fertilisation azotée pour les associations céréales - légumineuses

➤ Évaluation en cours





# En perspectives / conclusion



**L'accumulation des connaissances scientifiques et techniques sur le bilan, la place prise par le bilan dans la culture collective du monde agricole, les organisations mises en place autour de la mise en œuvre du bilan :**

- Constituent un atout pour l'efficacité d'une fertilisation raisonnée par le bilan ;
- Contribuent en même temps à freiner toute évolution du mode de raisonnement : verrouillage sociotechnique



# En perspectives / conclusion



**L'accumulation des connaissances scientifiques et techniques sur le bilan, la place prise par le bilan dans la culture collective du monde agricole, les organisations mises en place autour de la mise en œuvre du bilan :**

- Constituent un atout pour l'efficacité d'une fertilisation raisonnée par le bilan ;
- Contribuent en même temps à freiner toute évolution du mode de raisonnement : verrouillage sociotechnique

**L'avenir ne passe pas obligatoirement par le bilan: nécessité de rouvrir le champ d'innovation ;**

- Considérer les controverses comme révélant des axes d'amélioration de la méthode dominante
- Explorer des solutions nouvelles pour réconcilier production et environnement, en maximisant l'efficacité de l'engrais
- S'appuyer à la fois sur les acquis du bilan, les connaissances délaissées et les technologies du numérique (capteurs, modélisation...)



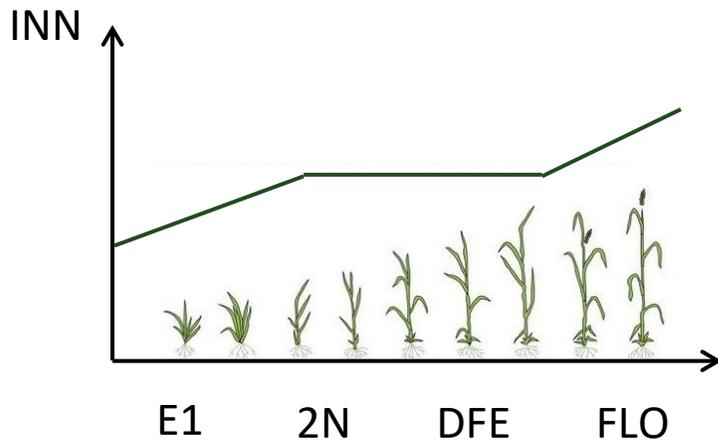
# En perspectives / conclusion



## Sortir d'une logique de planification (pronostic), qui fait du raisonnement de la fertilisation un pari sur l'avenir

—> Le **pilotage intégral**, i.e., le raisonnement dynamique de la fertilisation sur la base d'un suivi de l'INN (indice de nutrition azotée) et d'une trajectoire minimale d'INN

*Ravier et al. 2017, 2019; Paut et al. 2024*





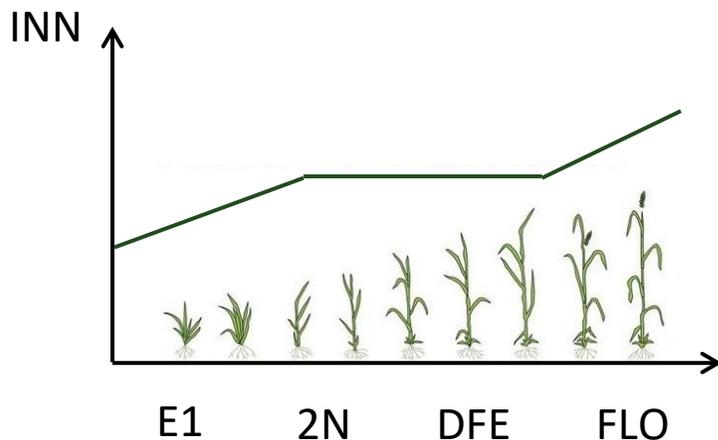
# En perspectives / conclusion



## Sortir d'une logique de planification (pronostic), qui fait du raisonnement de la fertilisation un pari sur l'avenir

—> Le **pilotage intégral**, i.e., le raisonnement dynamique de la fertilisation sur la base d'un suivi de l'INN (indice de nutrition azotée) et d'une trajectoire minimale d'INN

*Ravier et al. 2017, 2019; Paut et al. 2024*



- Suivi régulier de la nutrition azotée du blé (INN) de la sortie d'hiver jusqu'à floraison
- Répondre aux besoins réels de la plante
- Fertiliser lorsqu'il y a risque de carence, accepter les carences en début de cycle
- Maximiser l'efficacité d'utilisation de l'N (CAU) donc limiter les pertes N

Modèle CHN  
ARVALIS - Institut du végétal

CHN-conduite



## Donner aux acteurs les moyens de s'adapter aux situations locales

- Le Pilotage Intégral offre une souplesse qui favorise l'adaptabilité aux situations locales

/!\ uniquement disponible sur blé (travaux en cours sur colza)



Quelles pratiques de  
**fertilisation**  
pour accompagner la **diversité**  
des systèmes de culture ?

**Merci !**