



**François TAULEMESSE**

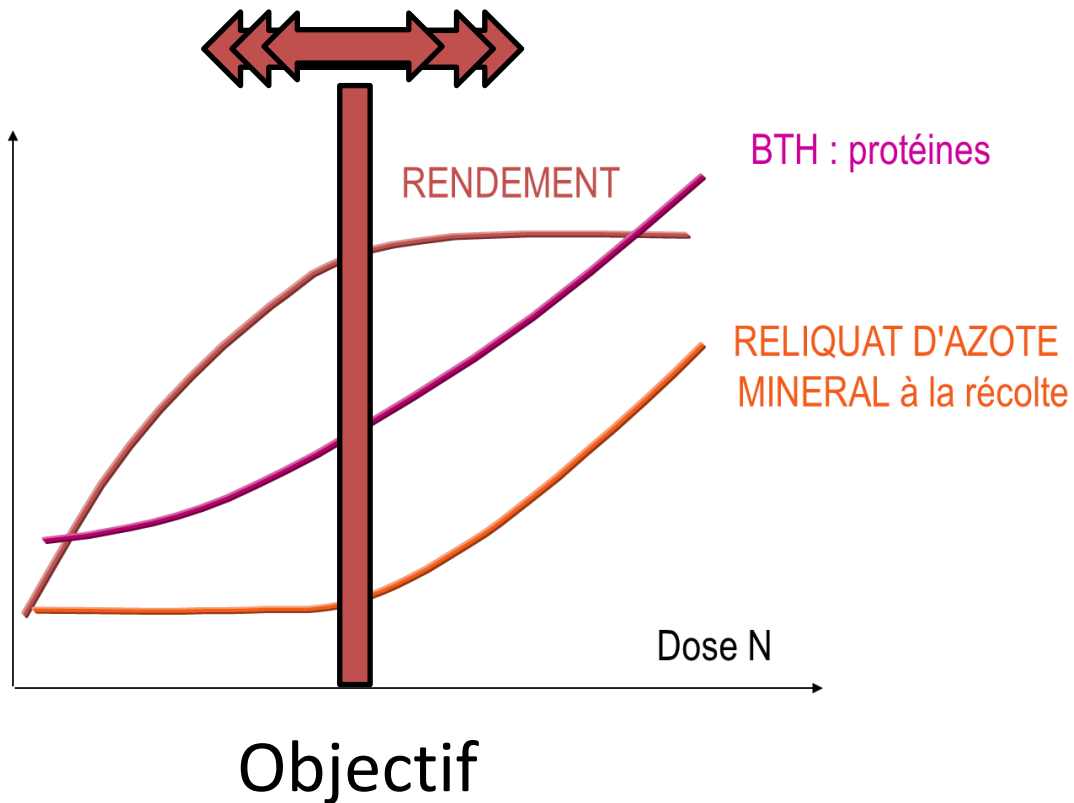
*Service Agronomie Economie  
Environnement*

# Pilotage intégral de l'azote CHN-conduite

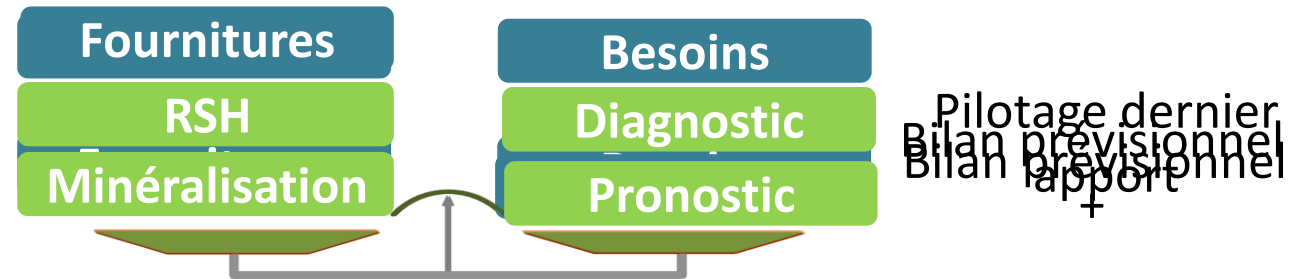
**ARVALIS**  
Institut du végétal

*Réunion groupe NS COMIFER Paris, 10/03/2022*

# Objectif et Outils de gestion de la fertilisation



## Echelle parcellaire :



*Pilotage : incertitudes autour de la dose mise en réserve*

- *Associée à l'incertitude du bilan prévisionnel*
- *Limitée dans certains contextes de dose totale faible*

## Echelle intra parcellaire :

- Modulation de la dose
- Spatialisation de la dose

# OAD de Pilotage de l'azote : des caps à franchir

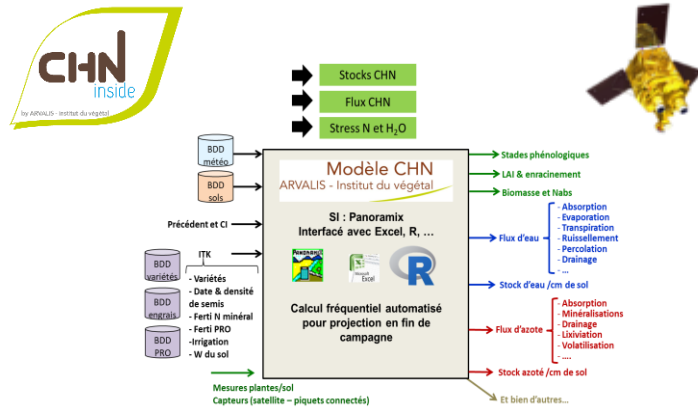
- Un raisonnement encore très dépendant de la notion controversée d'objectif de rendement
- Seul le dernier apport est piloté
- Des difficultés d'estimation du degré de valorisation des apports précédents
- Une date de livraison du conseil parfois peu flexible (nébulosité, logistique)
- Capacité limitée à spatialiser les conseils de fertilisation

**Le pilotage intégral a été conçu pour répondre à ces enjeux**

# CHN-conduite : un outil de pilotage intégral de l'azote

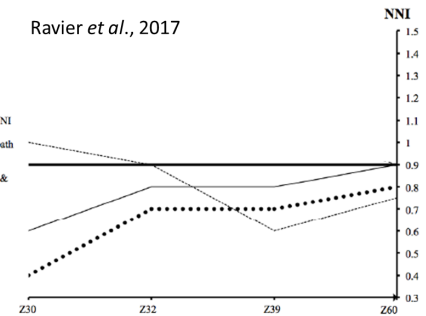
## 1. Utilisation du modèle de culture CHN pour des diagnostics – pronostics en cours de campagne

Ajustement des préconisations au contexte de l'année  
(stocks d'azote et potentiel de croissance)



## 2. Raisonnement des besoins en azote sur la base d'une dynamique d'INN minimale

Ajustement d'un seuil de carence tolérable

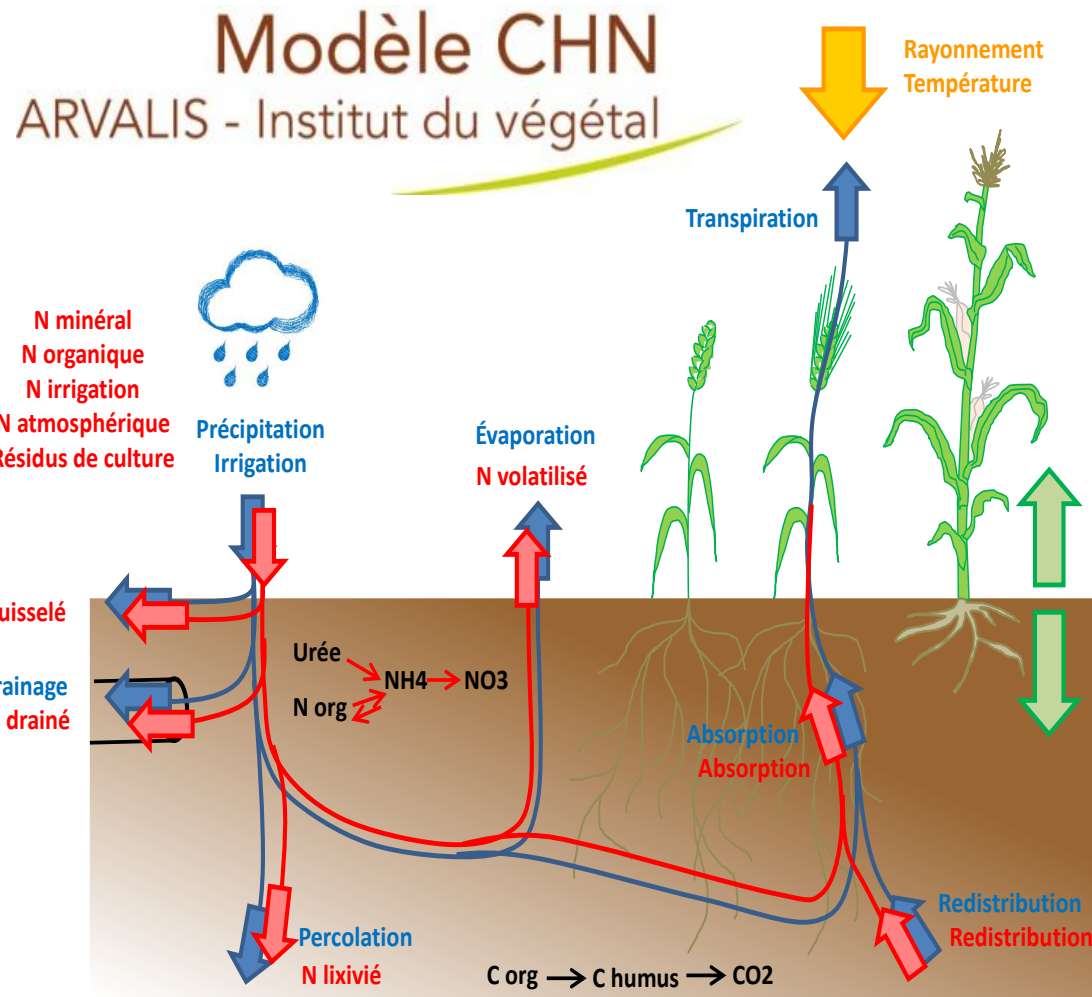
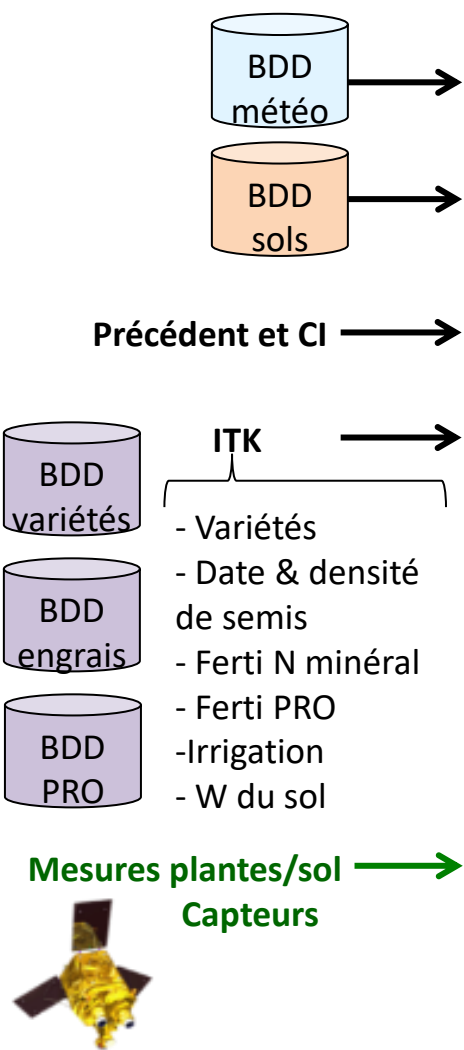


## 3. Gestion du risque climatique intégrée à l'outil

Optimisation des conditions de valorisation



# CHN : un modèle mécaniste à potentiel applicatif



→ Stades phénologiques

→ LAI & enracinement

→ Biomasse et Nabs

Blé tendre	Biomasse	Azote absorbé
Effectif	2102	1992
Biais	-0.2 tMS/ha	-14 kgN/ha
RMSE	1.4 tMS/ha	37.5 kgN/ha
EF	0.90	0.68



↘ 39.8 %

↘ 55.7 %

→ Flux d'eau

- Absorption
- Evaporation
- Transpiration
- Ruissellement
- Percolation
- Drainage
- ...

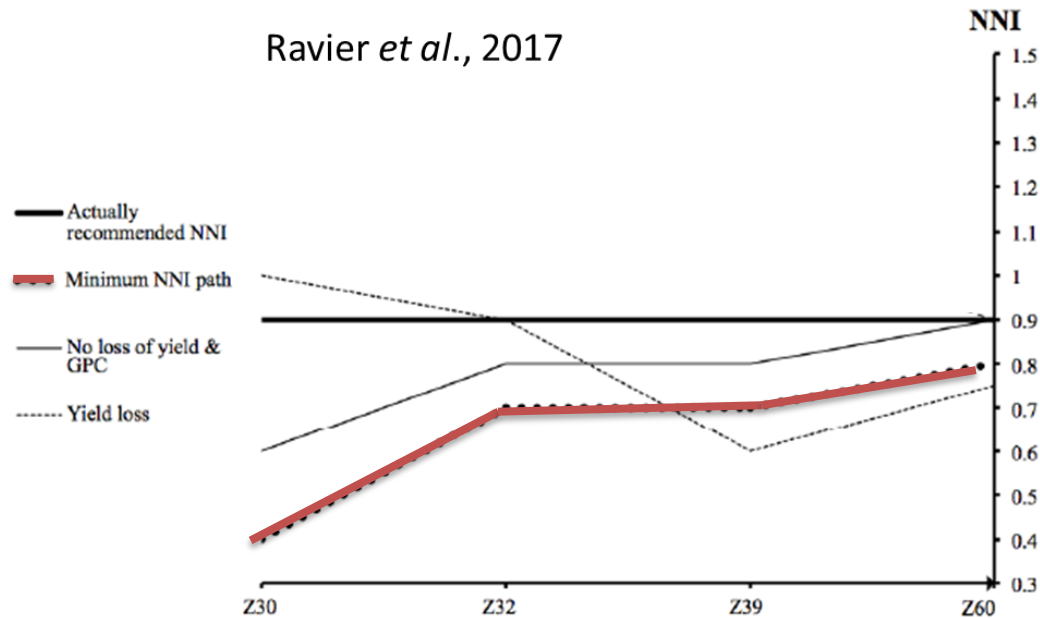
→ Stock d'eau /cm de sol

→ Flux d'azote

- Absorption
- Minéralisations
- Drainage
- Lixiviation
- Volatilisation
- ....

→ Stock azoté /cm de sol

# La notion de dynamique d'INN minimale bouleverse le raisonnement des apports d'azote



209 traitements issus d'essais azote (5 sites, 9 années)  
Mesures d'INN : E1c, 2 nœuds, DFE, Floraison

**Trajectoire « optimum » :**  
trajectoire visée par la méthode du bilan.

**Trajectoire « minimum » :**  
trajectoire plancher de la méthode CHN-conduite.

Un **pilotage maîtrisé** permet d'atteindre un **rendement optimal** malgré des **niveaux de nutrition azotée suboptimaux**

# Des dynamiques d'INN minimales adaptées au contexte de production

## Contextualisation des trajectoires d'INN minimales

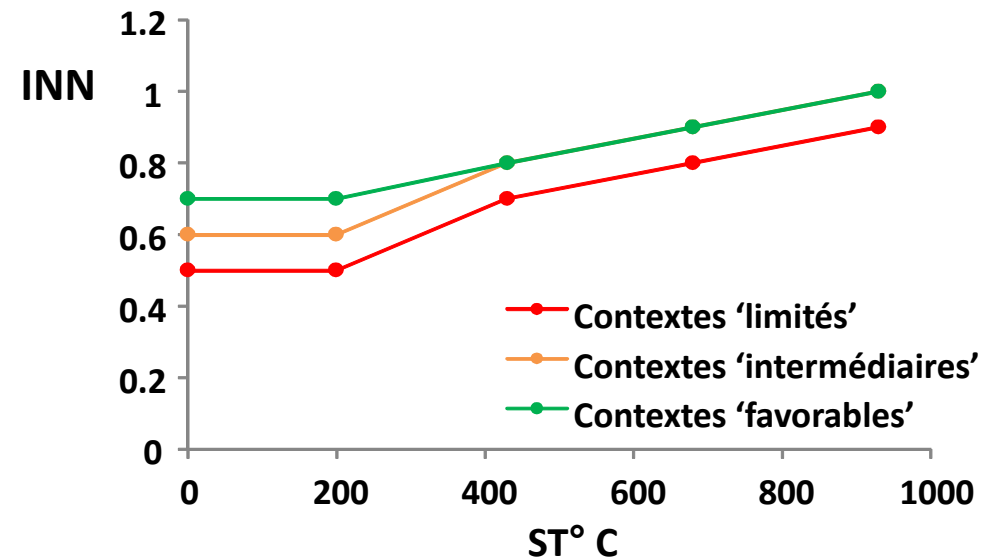
**Etape 1 : Sélection de covariables environnementales associées au besoin en épis /m<sup>2</sup>**

- Déficit hydrique montaison + remplissage
- Rapport rayonnement intercepté montaison / remplissage
- Quotient photothermique montaison

**Etape 2 : Ségrégation des environnements en classes**

- Modèle d'attribution des environnements à des classes sur la base de covariables environnementales

**Etape 3 : Ajustement de trajectoires minimales d'INN contextualisées**

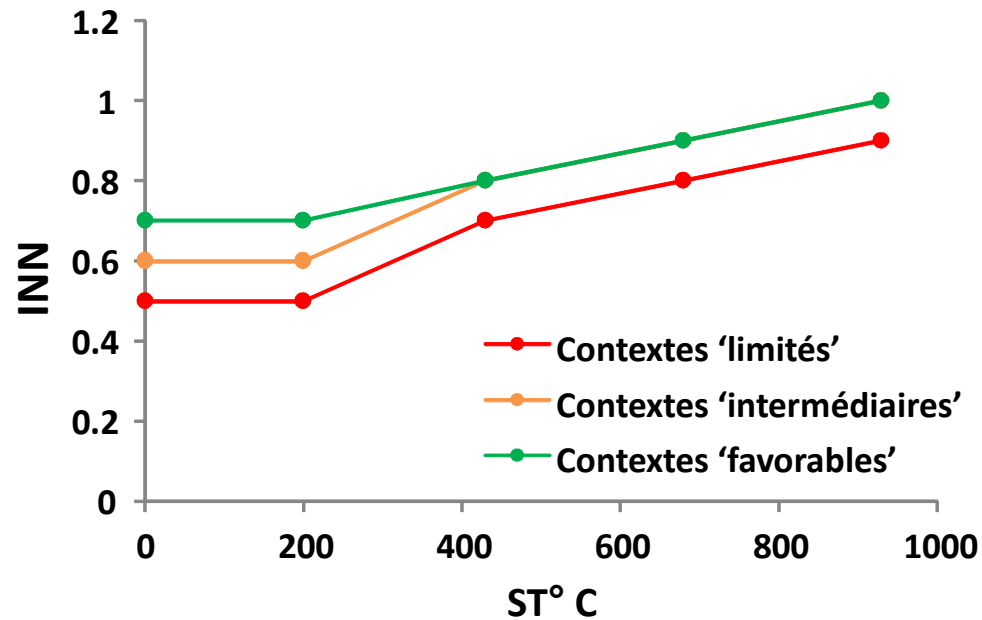


*Prototype 2020, évolutions possibles*

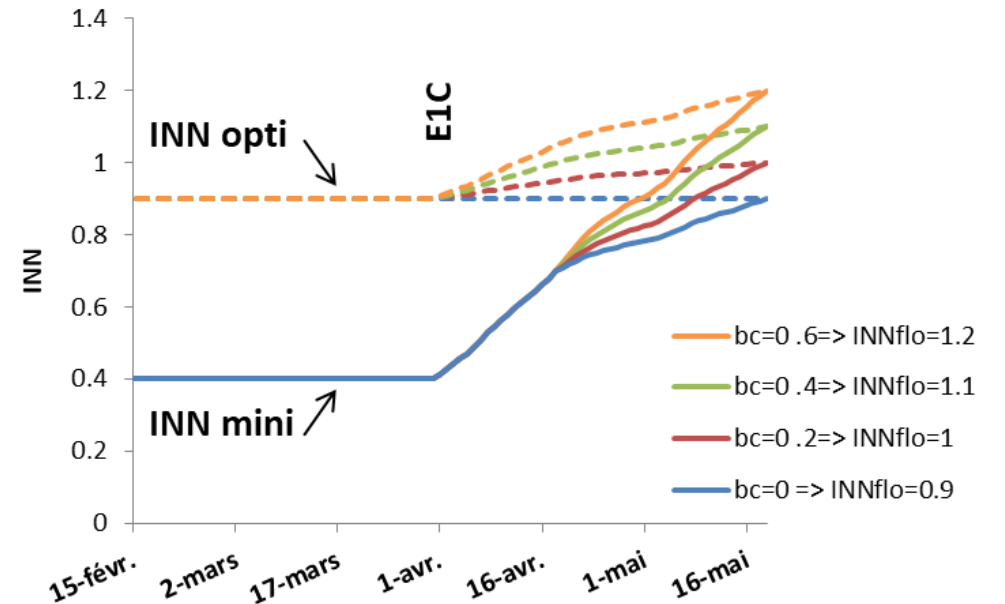
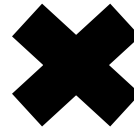
# Des dynamiques d'INN minimales adaptées au débouché

Dynamique d'INN minimale adaptée au contexte agropédoclimatique et objectif qualité :

- Contexte agropédoclimatique
- Objectif qualité et Variété pour enjeux protéines (classification selon bc)

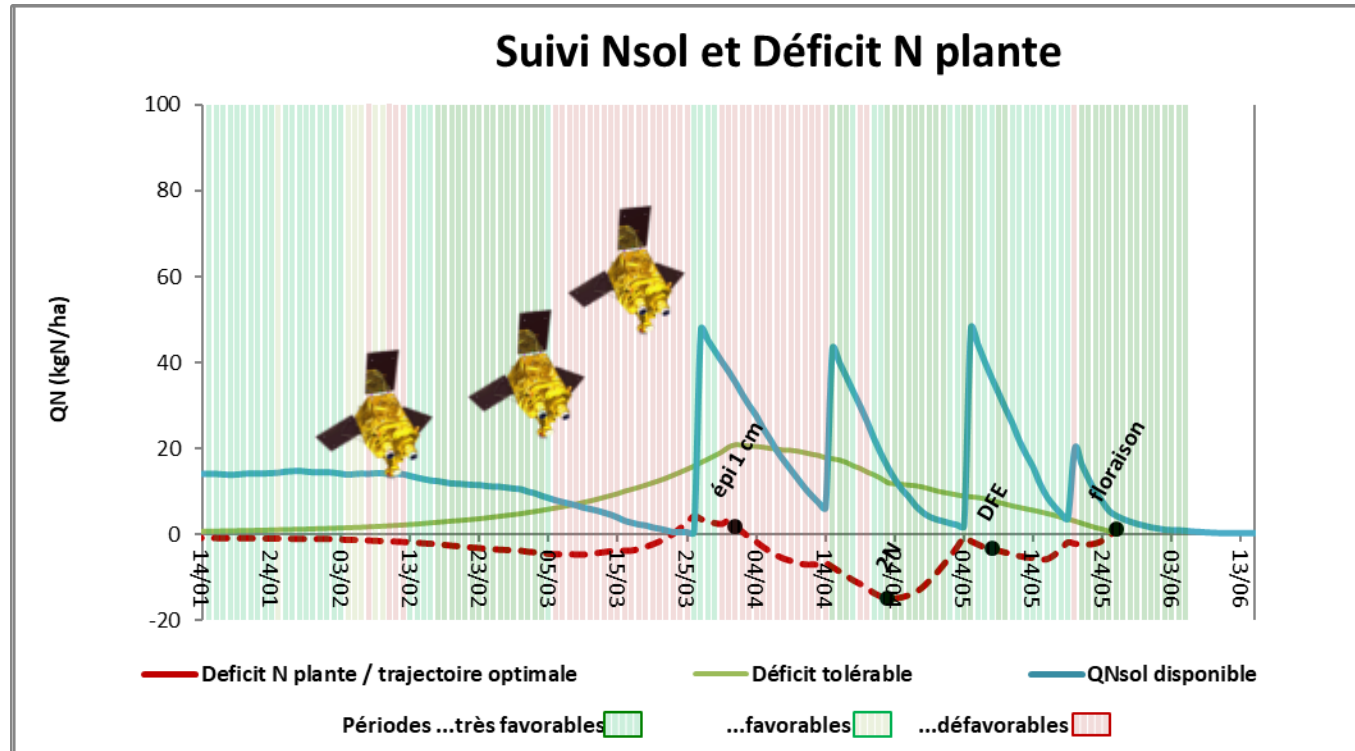


Prototype établi en 2020, évolutions possibles





# Une gestion du risque climatique intégrée à l'outil

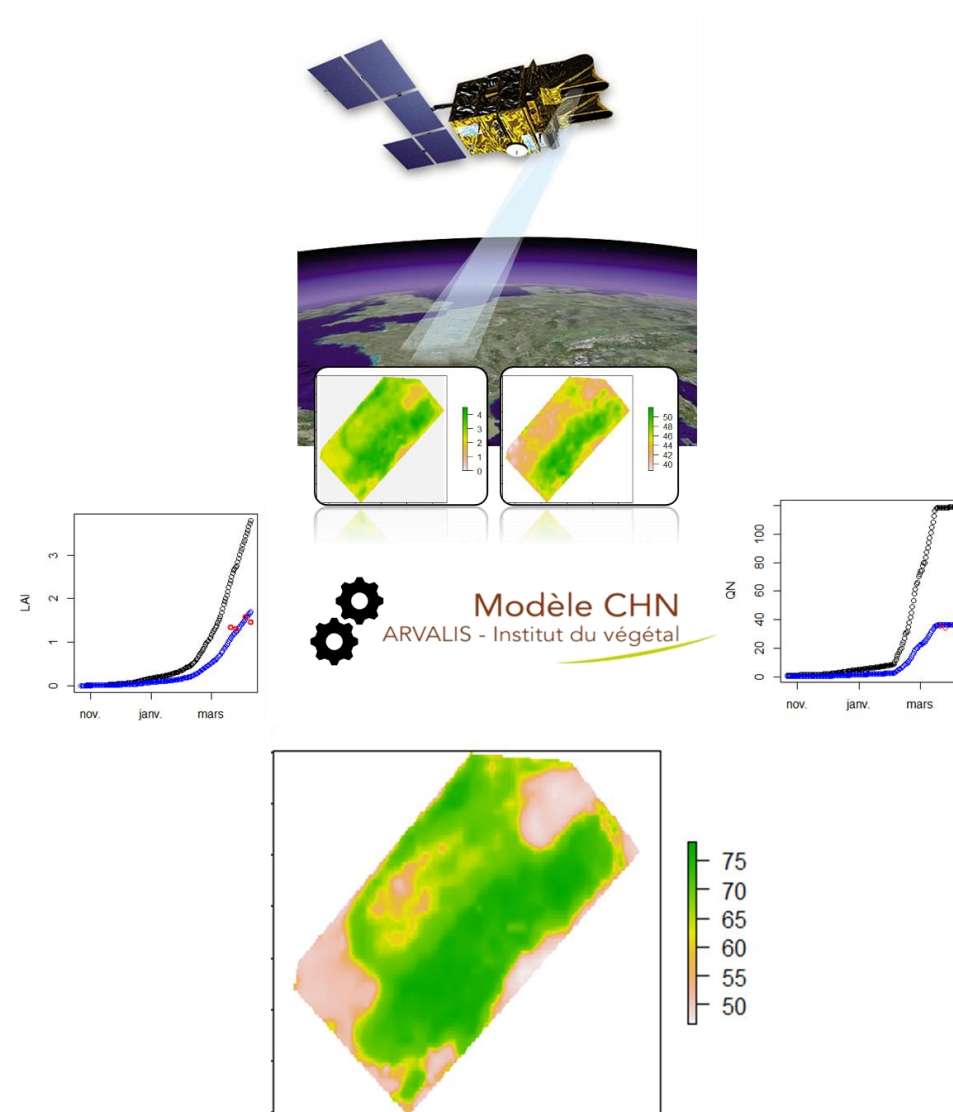


**Objectif : améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote**

1. Caractérisation du système agro-climatique  
Jour favorable :  $P > 10 \text{ mm}$  à 15j  
Période favorable :  $P > 10 \text{ mm}$  à 15j – au moins 4j consécutifs  
 (Fréquentiel climatique, décile 3)
2. Mise en œuvre de la simulation à l'échelle du complexe sol-plante-atmosphère
3. Définition de la trajectoire de pilotage
4. Raisonnement de chaque date de projection des besoins  
Prochaine période favorable :  $P > 10 \text{ mm}$  à 15j ; > 4j consécutifs ; > 14j après jour de consultation  
 (Fréquentiel climatique, décile 3)
5. Intérêt d'intervention établi sur un critère objectif  
Déficit N Plante > Déficit tolérable
6. Pronostic des besoins en azote  
Déficit N Plante
7. Préconisation d'intervention au jour j dépendante des conditions climatiques  
Jour favorable :  $P > 10 \text{ mm}$  à 15j  
 (Fréquentiel climatique, décile 3)

# Une spatialisation de tous les conseils de fertilisation

CHN-conduite valorise l'information satellitaire pour préconiser une dose d'azote adaptée au potentiel en tout point de la parcelle

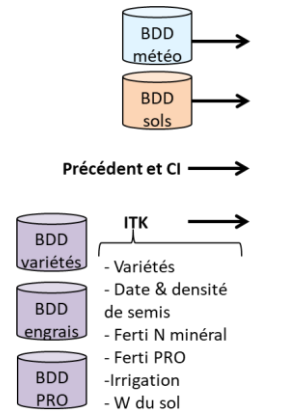


Une plus-value non négligeable en contextes hétérogènes

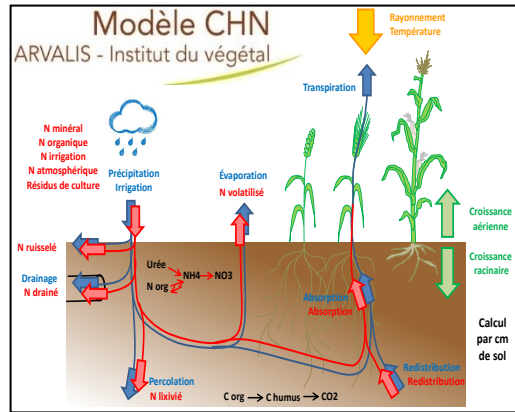
# Principe de l'outil CHN-conduite

## Pilotage intégral de la fertilisation azotée

Paramètres d'entrée



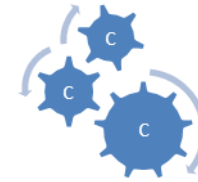
Modèle de culture



Simulations

- Stades phénologiques
- LAI & enracinement
- Biomasse et Nabs
- Flux d'eau
  - Absorption
  - Evaporation
  - Transpiration
  - Ruissellement
  - Percolation
  - Drainage
  - ...
- Stock d'eau /cm de sol
- Flux d'azote
  - Absorption
  - Minéralisations
  - Drainage
  - Lixiviation
  - Volatilisation
  - ...
- Stock azoté /cm de sol

Règles de décision

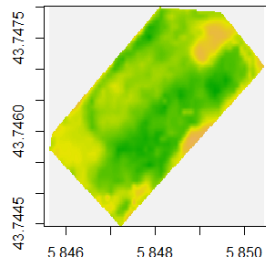


Conseil

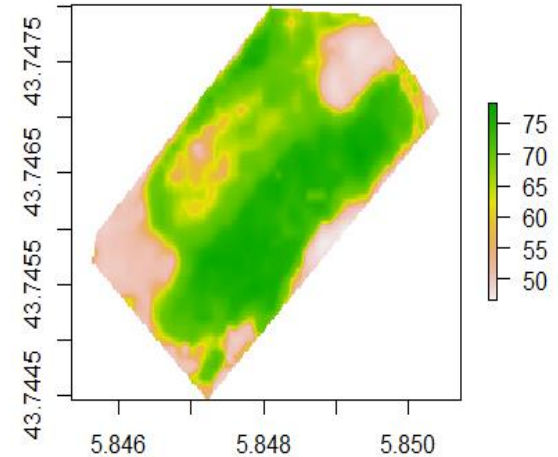
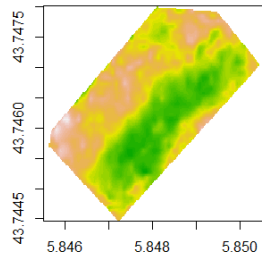
Apport conseillé

**60 KgN**

LAI



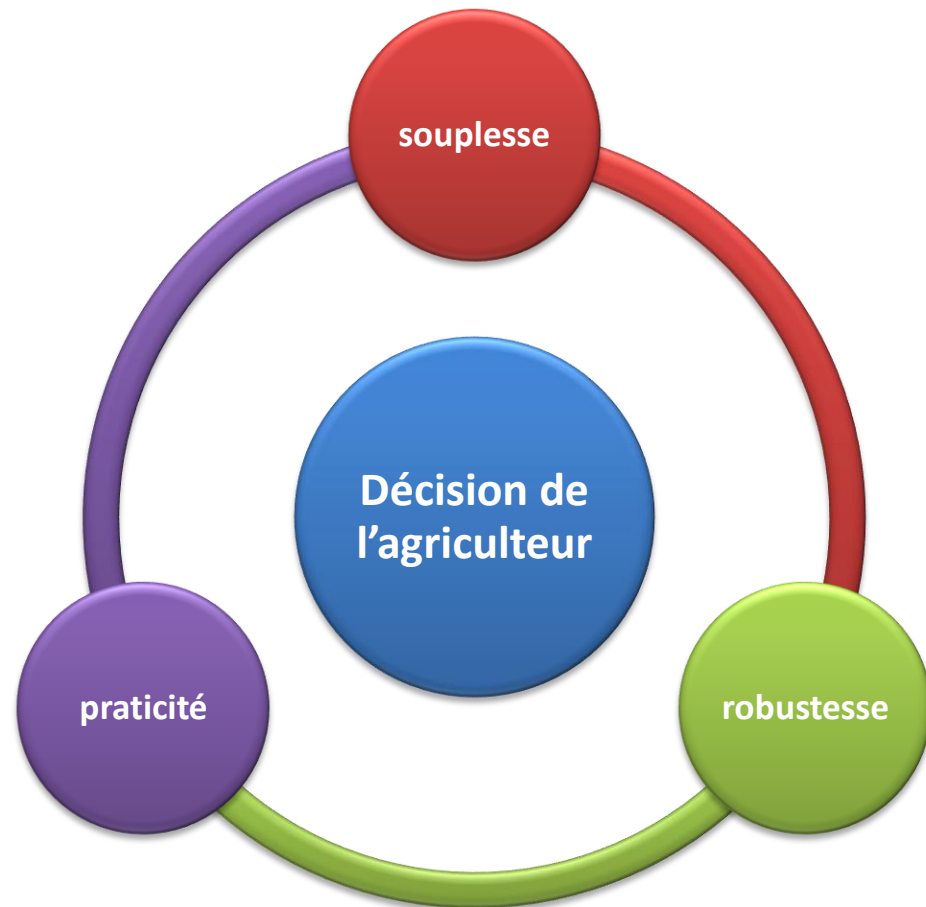
C<sub>AB</sub>



# Le Pilotage intégral de l'azote permet de franchir des caps

- Un raisonnement ~~encore très dépendant~~ indépendant de la notion controversée d'objectif de rendement
- ~~Seul le dernier apport est piloté~~ Tous les apports sont pilotés
- ~~Des difficultés d'~~estimation en temps réel du degré de valorisation des apports précédents
- Une date de livraison du conseil ~~parfois peu~~ flexible (~~nébulosité, logistique~~)
- Capacité ~~limitée~~ à spatialiser tous les conseils de fertilisation

# CHN-conduite : un outil de pilotage intégral de l'azote « clé en mains »



Décliner l'outil en variantes pour répondre aux contraintes des utilisateurs

# Et si CHN est utilisé en périodes « fixes » ?

*Stabiliser les périodes d'intervention = Evaluer les risques d'une simplification !*

La stratégie de l'agriculteur comme point de départ...

Dose minimale	30				
	Apport 1	Apport 2	Apport 3	Apport 4	Apport 5
Saisir dates d'intervention souhaitées	26/03/2021	24/04/2021	10/05/2021	24/05/2021	

... accompagnée d'un algorithme d'aide à la réflexion stratégique



- Risque de mauvaises conditions de valorisation
- Durée entre deux apports
- Démarrage trop précoce / Arrêt trop tardif des apports

Prototype évalué en 2021 :

- ✓ essais micro-parcelles
- ✓ 4 bandes agriculteurs

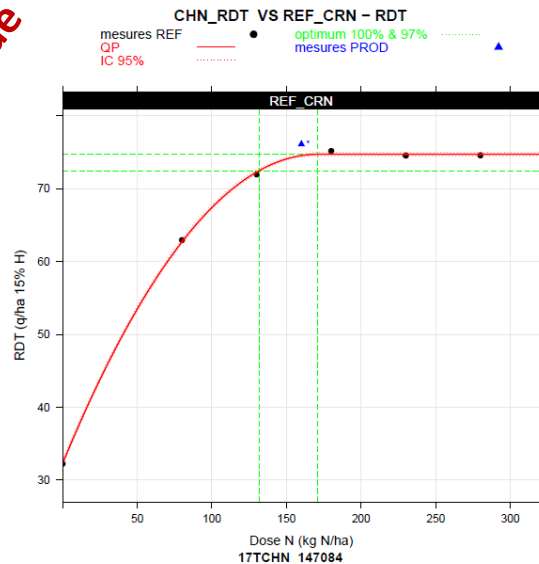
✓ L'outil préconise une dose adaptée à chaque intervention programmée

✓ La date exacte d'application de l'engrais est laissée à l'appréciation de l'utilisateur  
*Nous préconisons toujours d'intervenir lorsque des précipitations sont attendues*

# Deux échelles de travail, deux modes d'évaluation, des objectifs complémentaires

## Réseau d'évaluation en micro-parcelles

Comparaison des performances de CHN-conduite à un optimum de fertilisation



➕ Une évaluation précise

Paramétrage « expert », dispositif adapté, CRN

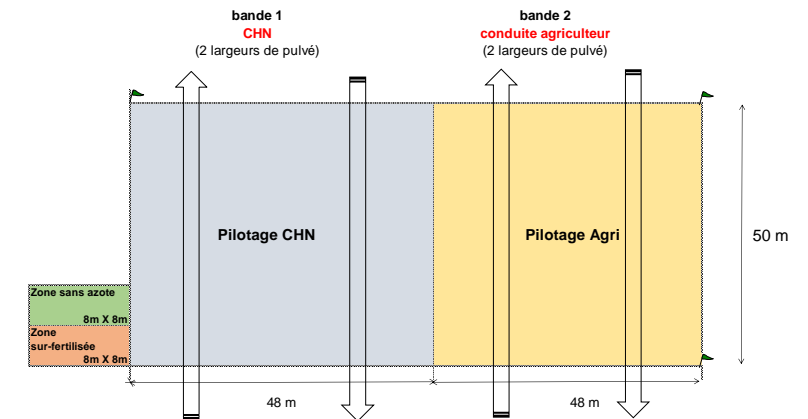
— Pas d'accès aux informations capteurs

Support de développement  
Evaluation de la méthode

Acceptabilité utilisateurs  
Evaluation de l'outil

## Réseau d'évaluation en parcelles agriculteurs

Comparaison des performances de CHN-conduite à des pratiques agricoles



➕ Une mise en situation réaliste

Couplage en temps réel avec capteurs

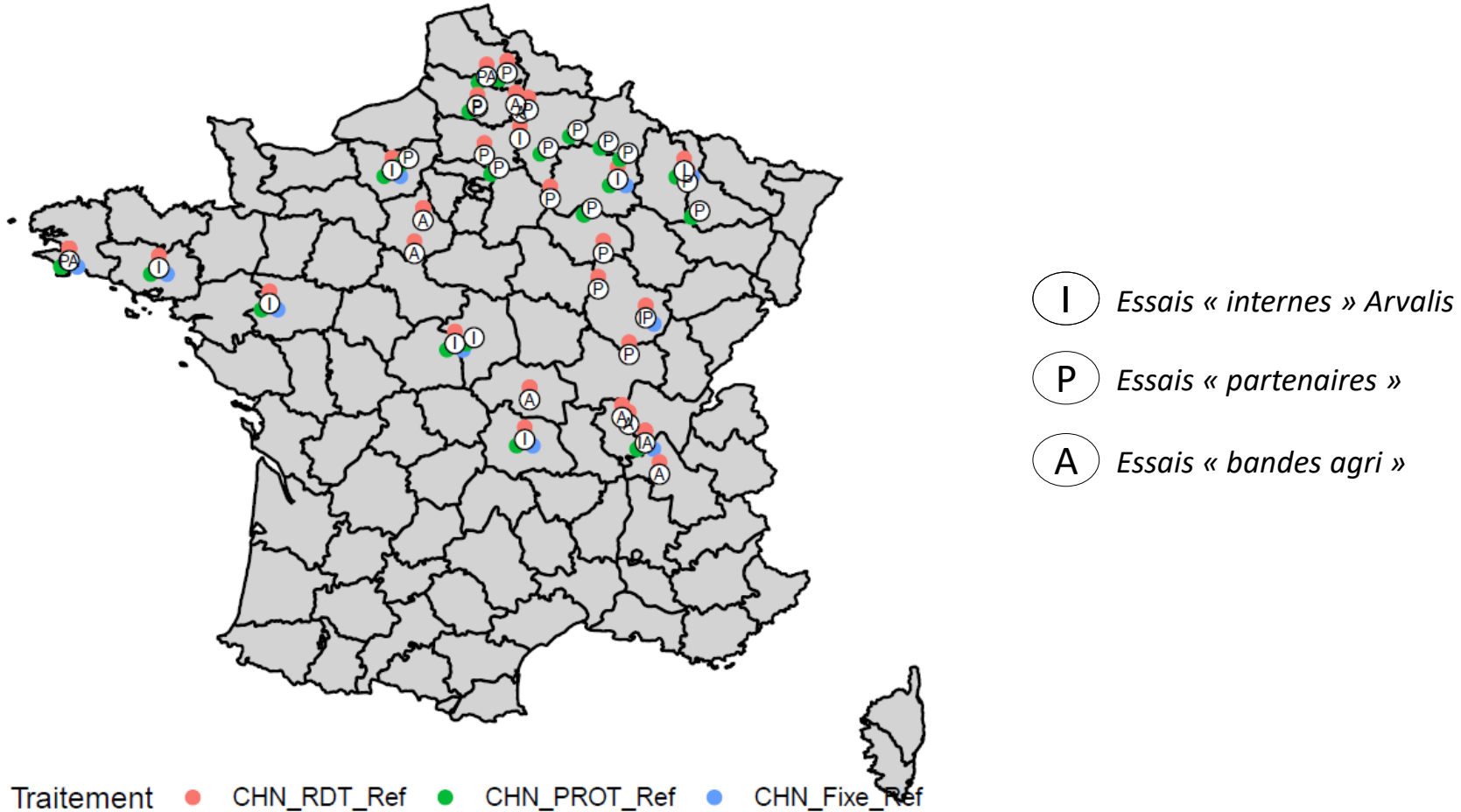
— Une évaluation moins précise

Paramétrage « non-initié », dispositif peu adapté, absence de CRN

# Réseaux de développement et d'évaluation

*Un maillage national conséquent*

Essais CHN-Conduite 2021





# Méthodes d'évaluation

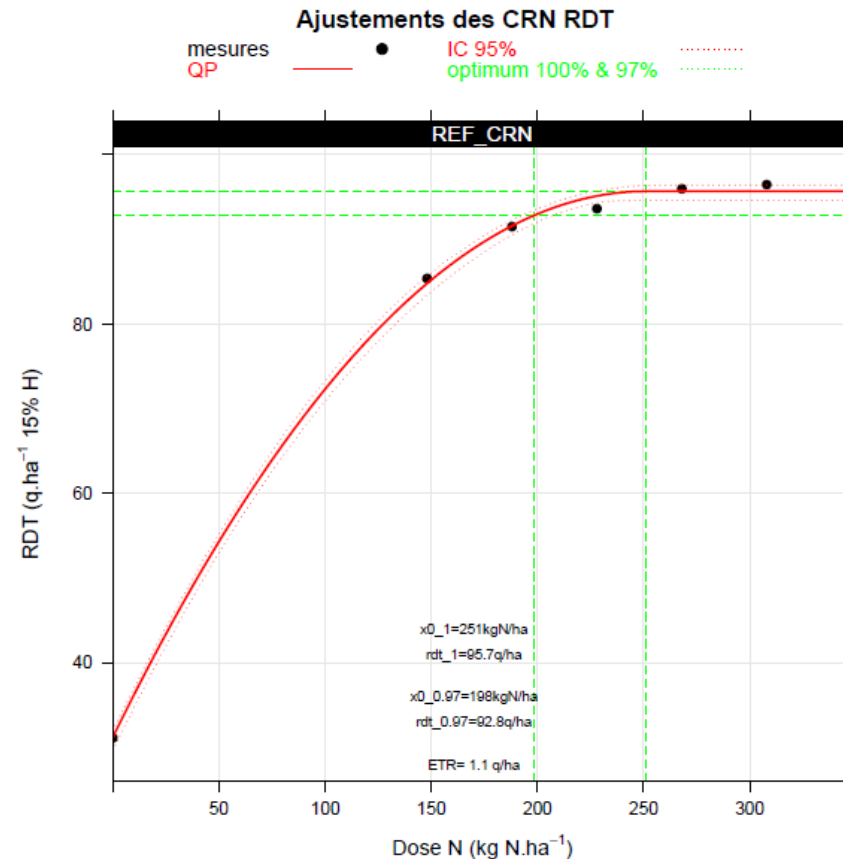
## Estimation du rendement à la dose optimale

Courbe de réponse à l'azote intégrée à chaque essai

Optimisation des paramètres d'une régression de type quadratique plateau, qui donne accès à :

- Dose optimale
- Rendement à la dose optimale

La dose optimale retenue pour les comparaisons représente la dose permettant d'atteindre 97% du rendement maximal

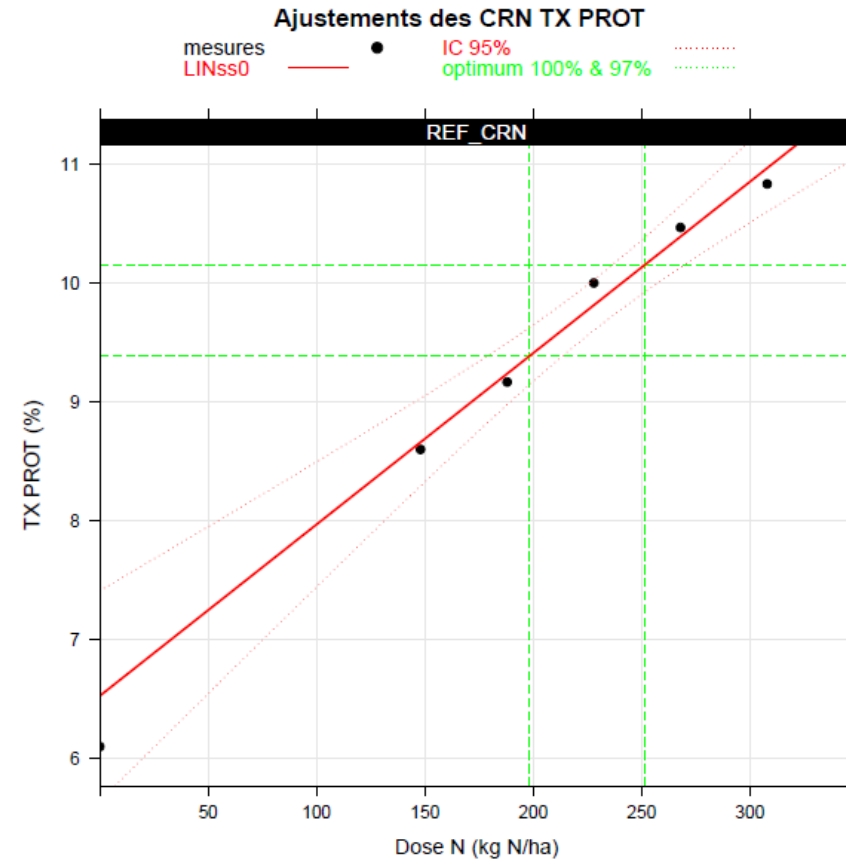


# Méthodes d'évaluation

## *Estimation de la concentration en protéines à la dose optimale*

Courbe de réponse à l'azote intégrée à chaque essai

Estimation de la concentration en protéines à la dose optimale

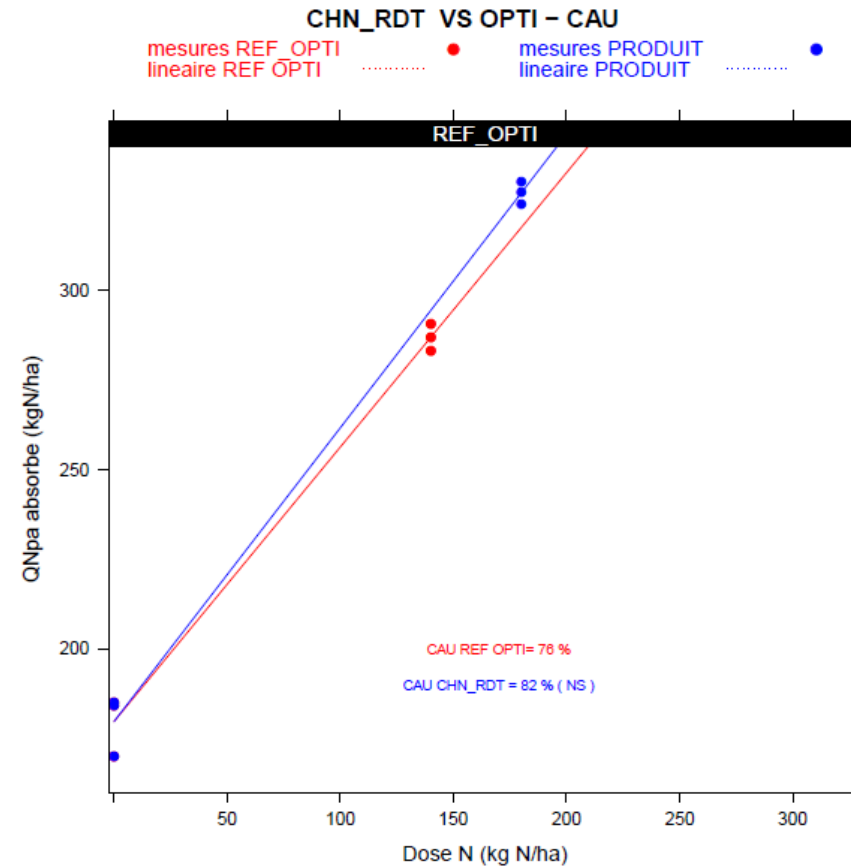


# Méthodes d'évaluation

*Estimation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote apporté*

Courbe de réponse à l'azote intégrée à chaque essai

Estimation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU)  
=> Fraction de l'azote apporté qui a été absorbé par le couvert



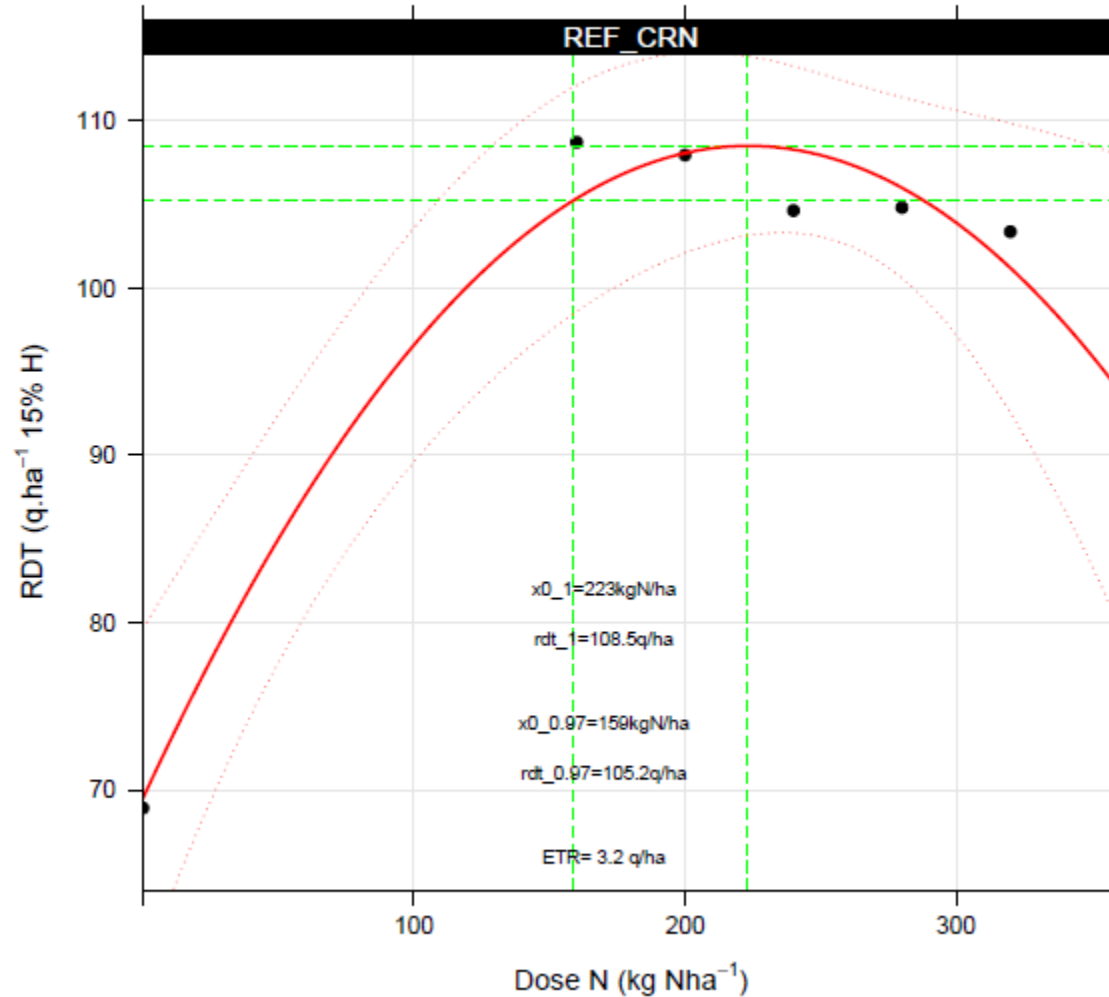
# SYNTHESE NATIONALE 2021 ESSAIS MICRO-PARCELLES

## Ajustements des CRN RDT

mesures QUA ● IC 95% optimum 100% & 97%

### Des résultats i

Référence	M
Optimum	CHN « F
97%	CHN « F
	CHN « F
Dose X	CHN « F
	CHN « F



Dose N (KgN/ha)	IS
+31**	IS
+62***	IS
+33**	VS
+2 <sup>NS</sup>	VS
+20*	;
+20 <sup>NS</sup>	VS

Optimums très faibles sur une partie Nord du réseau

Nb : Quelques es

d'ajustement CRN

17TCHN\_PNORIAP(80)\_2021

# SYNTHESE NATIONALE 2021 *ESSAIS BANDES-AGRI* - BLE TENDRE -

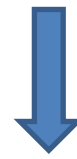
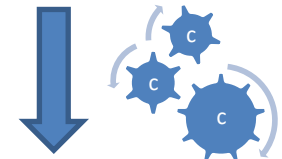
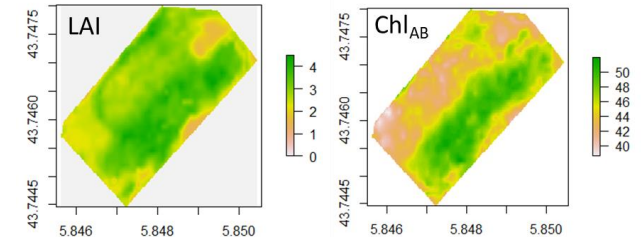
Une procédure de génération du conseil comparable à un produit commercial



Contour bande CHN



API 'Verde' AIRBUS



Date	LAI	CHL	sum_T_eic_acq	QN
13/01/2021	0.171683	50.4245	0	8.787891
17/01/2021	0.210477	54.3808	0	11.118582
08/02/2021	1.175630	49.0235	0	49.717980

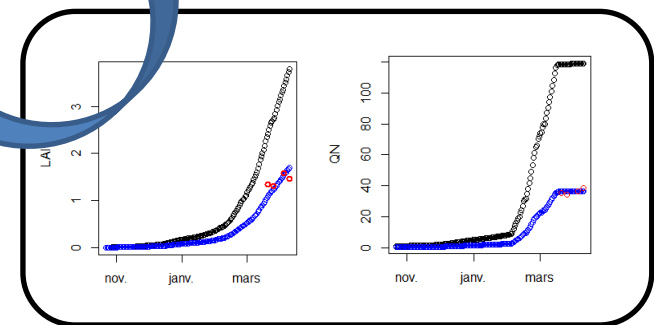
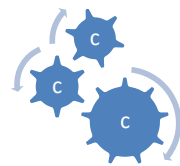
Paramétrage de la parcelle

Sol  
Climat  
ITK



**Modèle CHN**  
ARVALIS - Institut du végétal

*Module décisionnel  
CHN-conduite*




**Conseil\_Avec\_Assimilation.pdf**

# SYNTHESE NATIONALE 2021

## ESSAIS BANDES-AGRI

### - BLE TENDRE -

 Conseil\_Avec\_Assimilation.pdf

Conseils fournis chaque lundi et mercredi

page 1 of 2

**Modèle CHN**  
ARVALIS - Institut du végétal

**PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTEE A L'AIDE DU MODELE DE CULTURE CHN**  
Contact : [f.fabre@arvalis.fr](mailto:f.fabre@arvalis.fr)

Informations concernant les outils ARVALIS : Détails et contrôle du calcul CHN : [Fiche Ok](#)

- Agrobio : version 02.05.00 (08/02/2021)  
- Soilbox : version 01.14.03 (23/08/2020)  
- Cérébox : version 04.01.09 (10/02/2020)  
(Modèle validé jusqu'en 2101/2020)

Date de calcul : 17/02/2021 à 17h48 Pilotage CHN : Contextualisation : milieu\_Intermédiaire # Trajectoire INM : e0\_8\_f1\_3  
bc vérifié : 0.2 N parcelle irriguée : Non

**GRAPHIQUES POUR PRISE DE DECISION**

**Evolution INM**

INM<sub>sol/soil</sub> = 1.14

**Déficit azoté de la plante et azote du sol**

**Stock N sol**

Stock N sol P-90

**CALCULS D'INDICATEURS**

Moyenne d'azote absorbé par jour dans les 12 jours à venir : 0.8 kgN/ha/jour  
 Date de franchissement du déficit azoté maximal théorique : 08/02/21  
 Date d'épuisement du stock d'azote disponible dans le sol : 20/02/21  
 Prochaine période favorable pour apporter N : 21/02/21 - 18/03/21  
 Déficit probable période favorable : 38.1 kg/ha  
 Déficit théorique probable période favorable : 13.6 kg/ha  
**Préconisation de déclenchement d'un apport au 17/02/2021 :**  
 Apport conseillé (se reporter à la table)

**TABLE DES BESOINS EN AZOTE DU COUVERT**

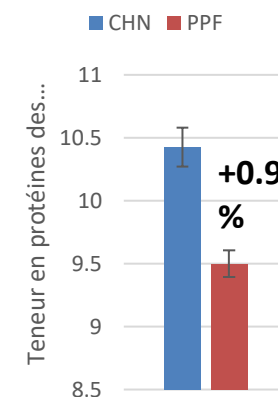
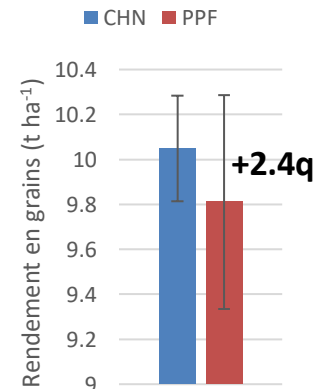
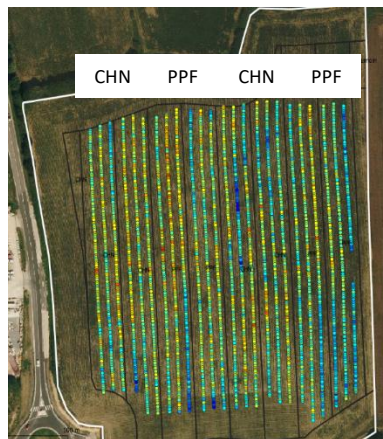
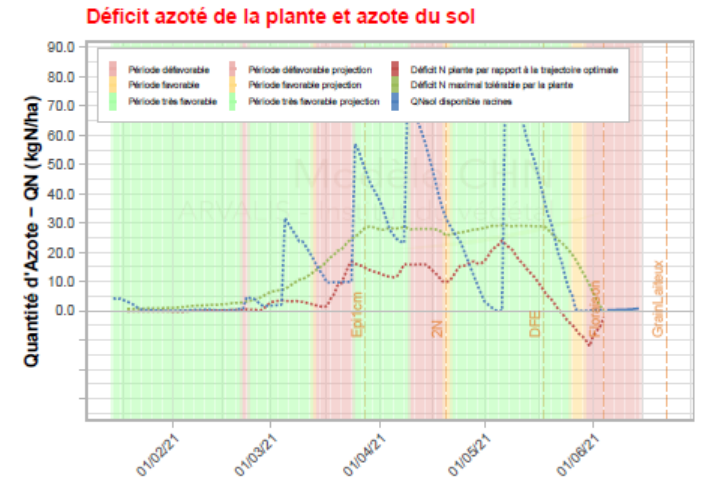
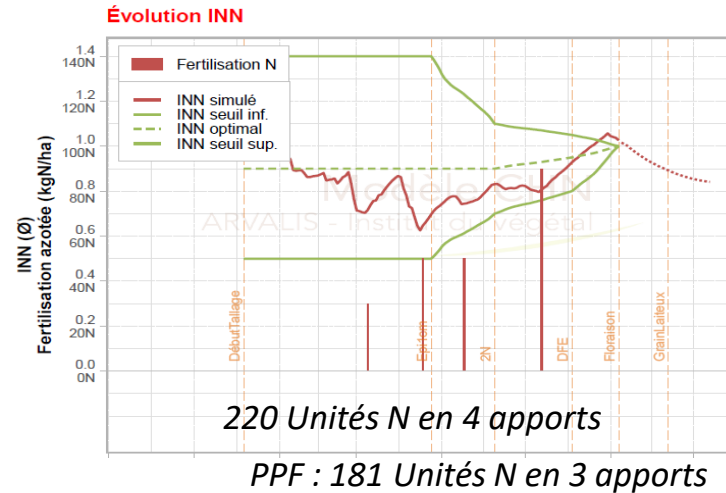
Table des besoins en azote du couvert, pour des dates d'observations potentielles du jour J à J+7. Les besoins en azote affichés correspondent au déficit cumulé du couvert à la prochaine période favorable, à condition que possible. Ce besoin s'ajoute au CRU de 80%. Ce tableau affiche également les seuils de probabilité obtenus à 50 (critère préconisé) et 100 (préconisé + fréquent), pour aider l'utilisateur à juger de l'opportunité de réaliser un apport. L'utilisateur peut évaluer la priorisation de déclenchement de l'apport si une intervention est possible (autre source de données même occupée ou de son contexte de culture).

Date d'observation	17/02/21	18/02/21	19/02/21	20/02/21	21/02/21	22/02/21	23/02/21	24/02/21
Date de prochaine période favorable	21/02/21	21/02/21	21/02/21	21/02/21	21/02/21	21/02/21	21/02/21	21/02/21
Besoins et seuils favorables (kg/ha)	50	50	50	50	50	50	50	50
Seuil de probabilité 50% - préconisé + fréquent	15.2	17.1	18.8					
Seuil de probabilité 100% - préconisé	1.3	1.3	1.8					

# SYNTHESE NATIONALE 2021 *ESSAIS BANDES-AGRI*

## - BLE TENDRE -

### Mise en œuvre opérationnelle et méthode d'analyse



# SYNTHESE NATIONALE 2021 *ESSAIS BANDES-AGRI*

## - BLE TENDRE -

### Résultats agronomiques

#### Synthèse des comparaisons

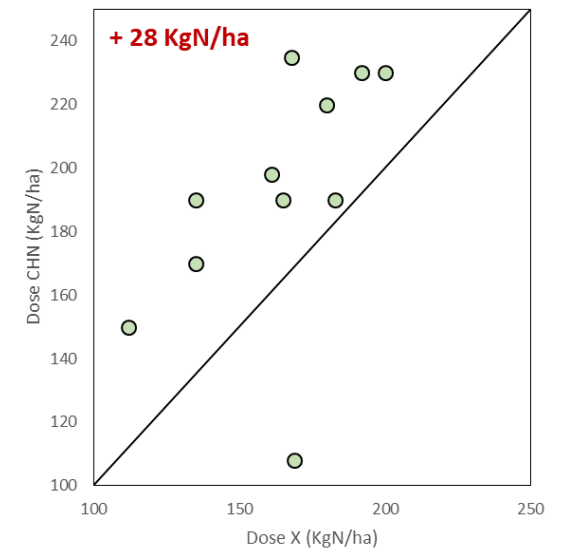
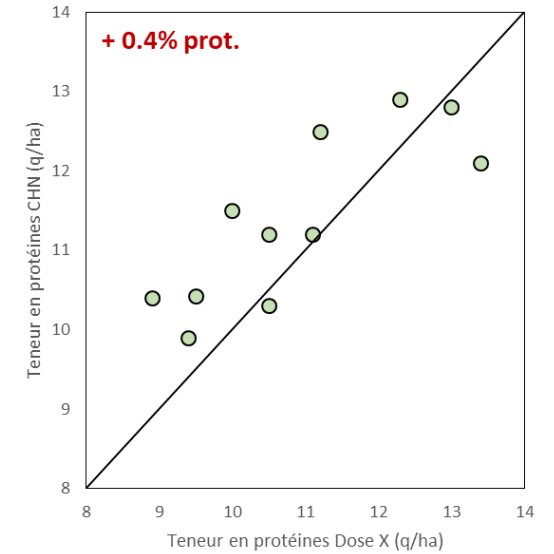
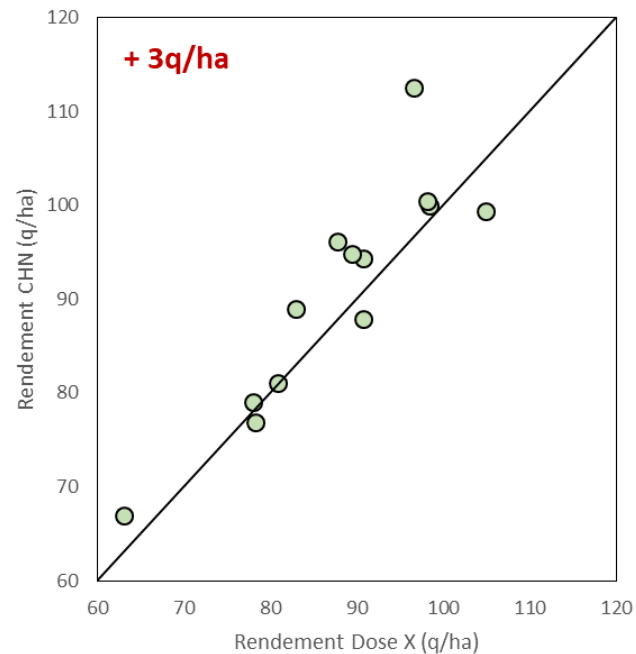
##### CHN vs Dose X

(n=13)

Rendement : **+3 q/ha**

Protéines : **+0.4 %**

Dose N : **+28KgN/ha**

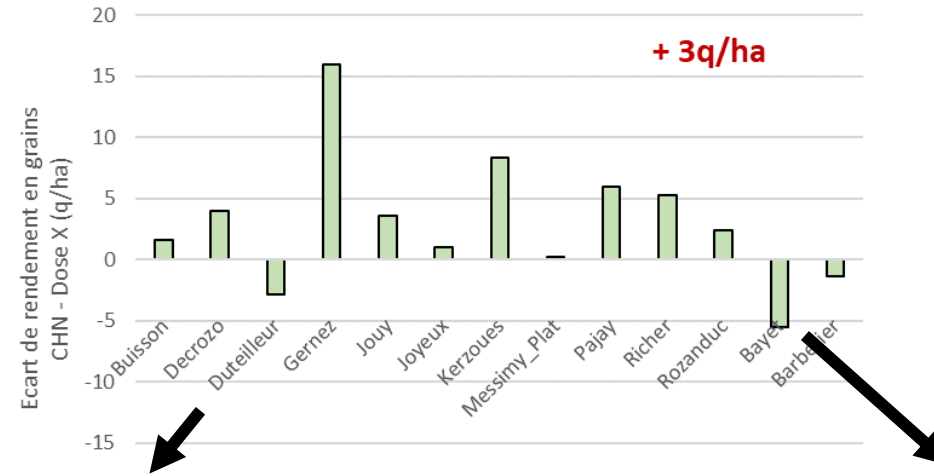




# SYNTHESE NATIONALE 2021 *ESSAIS BANDES-AGRI*

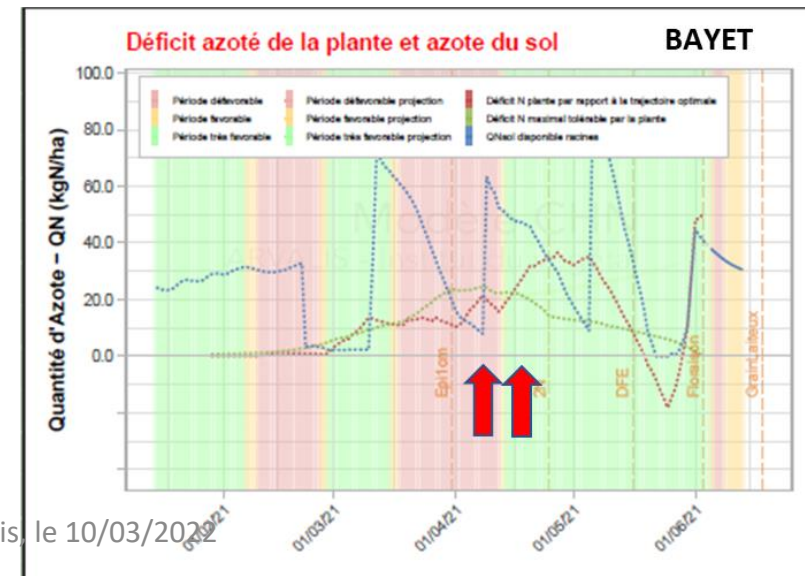
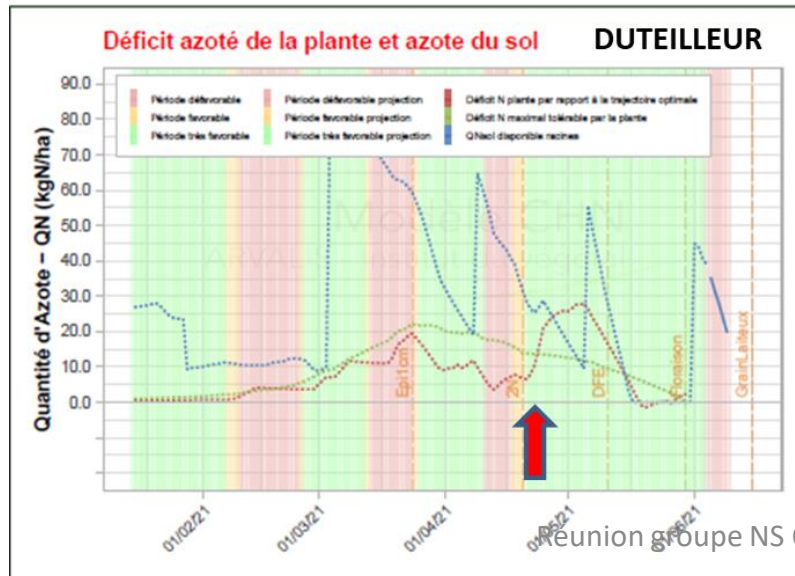
## - BLE TENDRE -

Point de vigilance...  
... La réactivité !



Retard de 10j dans l'exécution du conseil

Retard de 15j dans l'exécution du conseil



# SYNTHESE NATIONALE 2021 *ESSAIS BANDES-AGRI*

## - BLE TENDRE -

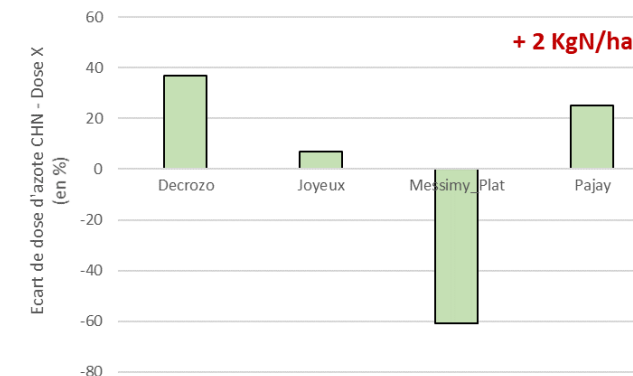
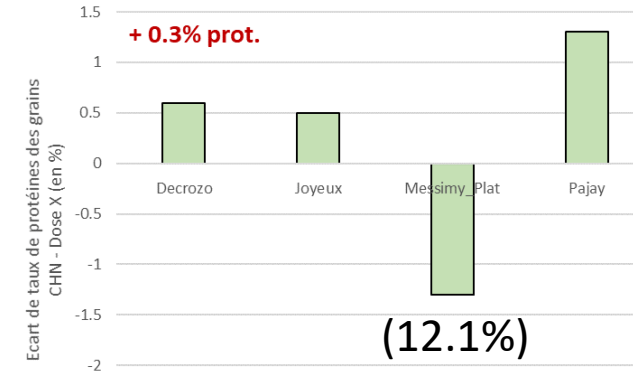
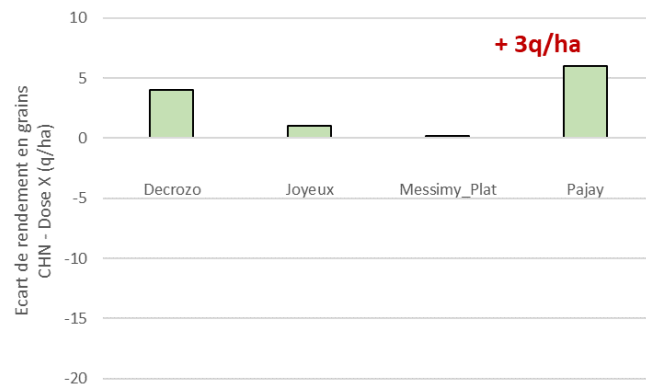
### Résultats agronomiques CHN « périodes fixes »

#### Synthèse des comparaisons CHN « Apports fixes » vs Dose X (n=4)

Rendement : **+3 q/ha**

Protéines : **+0.3 %**

Dose N : **+2KgN/ha**

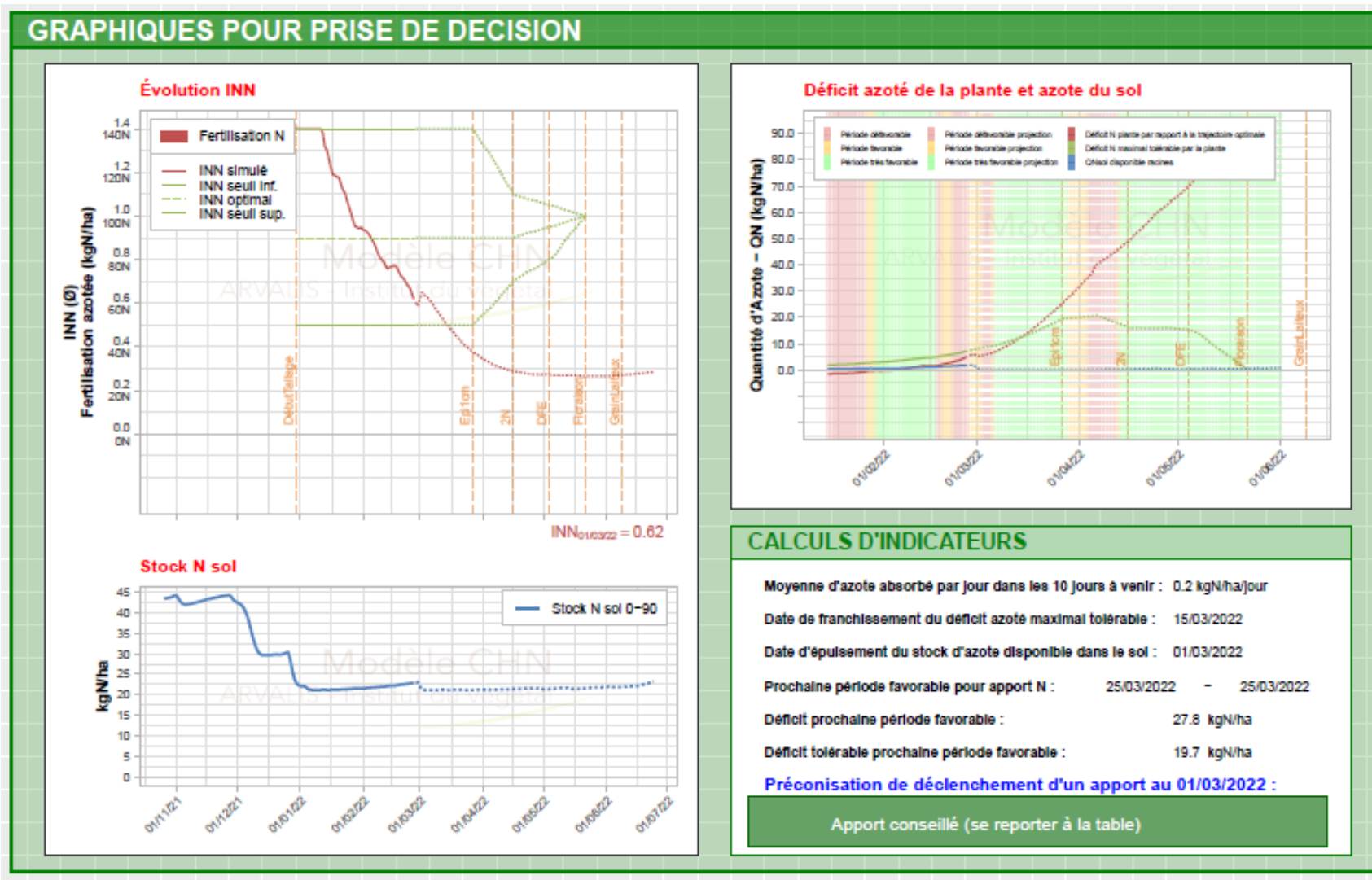


# Enseignements des essais en bandes agriculteurs 2021

- **Des performances à la hauteur des attentes**
  - ✓ L'enjeu en parcelles agricoles semble supérieur à celui observé en essais
  
- **Un accompagnement conséquent nécessaire**
  - ✓ Comprendre les principes de CHN-conduite
  - ✓ Être suffisamment réactif
  - ✓ Trouver l'équilibre entre suivi strict du conseil et prise d'initiative / Apports « fixes »
  
- **Un réseau étoffé pour la campagne 2022**
  - ✓ Plus de 50 parcelles bandes agriculteurs pilotées en 2022
  - ✓ Des dispositifs plus complets
  - ✓ Une « Preuve de Concept » CHN dans Farmstar® conduite sur plus de 50 parcelles



# CHN-conduite, un outil formateur...



## ... adapté aux contraintes des utilisateurs

### TABLE DES BESOINS EN AZOTE DU COUVERT

Table des besoins en azote du couvert, pour des dates d'interventions potentielles du jour J à J+7. Les besoins en azote affichés correspondent au déficit cumulé du couvert à la prochaine période favorable, à combler dès que possible. Ce besoin intègre un CAU de 80%. Ce tableau affiche également les cumuls de précipitations attendus à 5j (climat prévisionnel) et 15j (prévisionnel + fréquentiel), pour aider l'utilisateur à juger de l'opportunité de réaliser un apport. L'utilisateur peut décider d'outrepasser la préconisation de déclenchement de l'outil si une intervention lui semble pertinente (autre source de données météo ou expérience de son contexte de culture).

Date Intervention	06/04/2021	07/04/2021	08/04/2021	09/04/2021	10/04/2021	11/04/2021	12/04/2021	13/04/2021
Date de prochaine période favorable	20/04/2021	21/04/2021	22/04/2021	23/04/2021	24/04/2021	25/04/2021	26/04/2021	27/04/2021
Besoins si climat favorable (KgN/ha)	40	40	40	40	40	40	50	50
Cumuls de pluie sur 15j (mm) – prévisionnel + fréq.	21.4	21.8	22.5					
Cumuls de pluie sur 5 j (mm) – prévisionnel	0.1	19.5	19.5					

## ...et aux défis auxquels font face les agriculteurs

- Défis d'aujourd'hui...

- S'affranchir de la notion fragile de potentiel de rendement à la parcelle a priori, au profit d'une approche diagnostics-pronostics pour atteindre le potentiel de l'année, sur la base d'une réévaluation du potentiel de croissance de la culture en temps réel
- Accéder au conseil à tout moment au cours de la campagne de pilotage
- Tenir compte du degré de valorisation des apports d'azote précédents dans le raisonnement de chaque conseil, anticiper les périodes défavorables, permettre de s'ajuster aux caractéristiques de l'année climatique dans ses parcelles
- Valoriser toutes les données de télédétection disponibles
- Accéder à une spatialisation de tous les conseils de fertilisation
- Rendre compte de ses pratiques dans une démarche de traçabilité

- Et défis de demain...

- Un outil de gestion de l'azote (et de l'eau) à l'échelle de l'exploitation, intégrant davantage de cultures, des couverts complexes...
- **Des perspectives d'optimisation de la gestion de l'azote sur la base de critères économiques**
- Une capacité d'optimisation du paramétrage environnemental du modèle en temps réel, et de couplage avec d'autres variables d'état
- Un outil flexible à haut potentiel d'amélioration, capable d'assimiler rapidement les avancées scientifiques à venir

**Merci pour votre attention**