



DYNAMISATION DU BILAN D'AZOTE AVEC LE MODELE DE CULTURE CHN POUR UN RAISONNEMENT EN TEMPS REEL

B. SOENEN, P. BESSARD DUPARC, M. LABERDESQUE, B.
PIQUEMAL, JP. COHAN, X. LE BRIS


Institut du végétal

Contexte actuel de la gestion de la fertilisation azotée des blés français

Raisonnement basé aujourd'hui sur le calcul d'une dose prévisionnelle recalée en cours de campagne par un outil de pilotage :

1. Calcul d'une dose prévisionnelle *a priori*
2. Choix du fractionnement et du produit
3. Pilotage du dernier apport via un diagnostic de l'état de nutrition azotée de la plante (+/- 40 kg N/ha par rapport à la dose prévisionnelle)
4. Modulation intraparcellaire de la dose du dernier apport dans certains cas

Apporte des solutions techniques intéressantes mais avec des limites que la technologie d'aujourd'hui peut permettre de dépasser

Les limites de cette approche :

- > Peut-on atteindre systématiquement le potentiel de la parcelle quand le besoin d'azote prévisionnel est basé sur l'historique parcellaire ? (même avec l'utilisation des OAD, la dose totale N est fortement conditionnée par les hypothèses sur l'objectif de rendement)
- > Piloter le dernier apport est-il suffisant pour s'adapter à l'année ? (pas de réactualisation de la dose N prévisionnelle en cours de campagne)
- > Comment prendre en compte les flux azotés sol-plante lors du pronostic des OAD ? (on fait l'hypothèse que les apports N précédents ont été entièrement valorisés lors du diagnostic)
- > Comment prendre en compte l'interaction eau-azote ? (l'azote n'est pas le seul facteur limitant...)

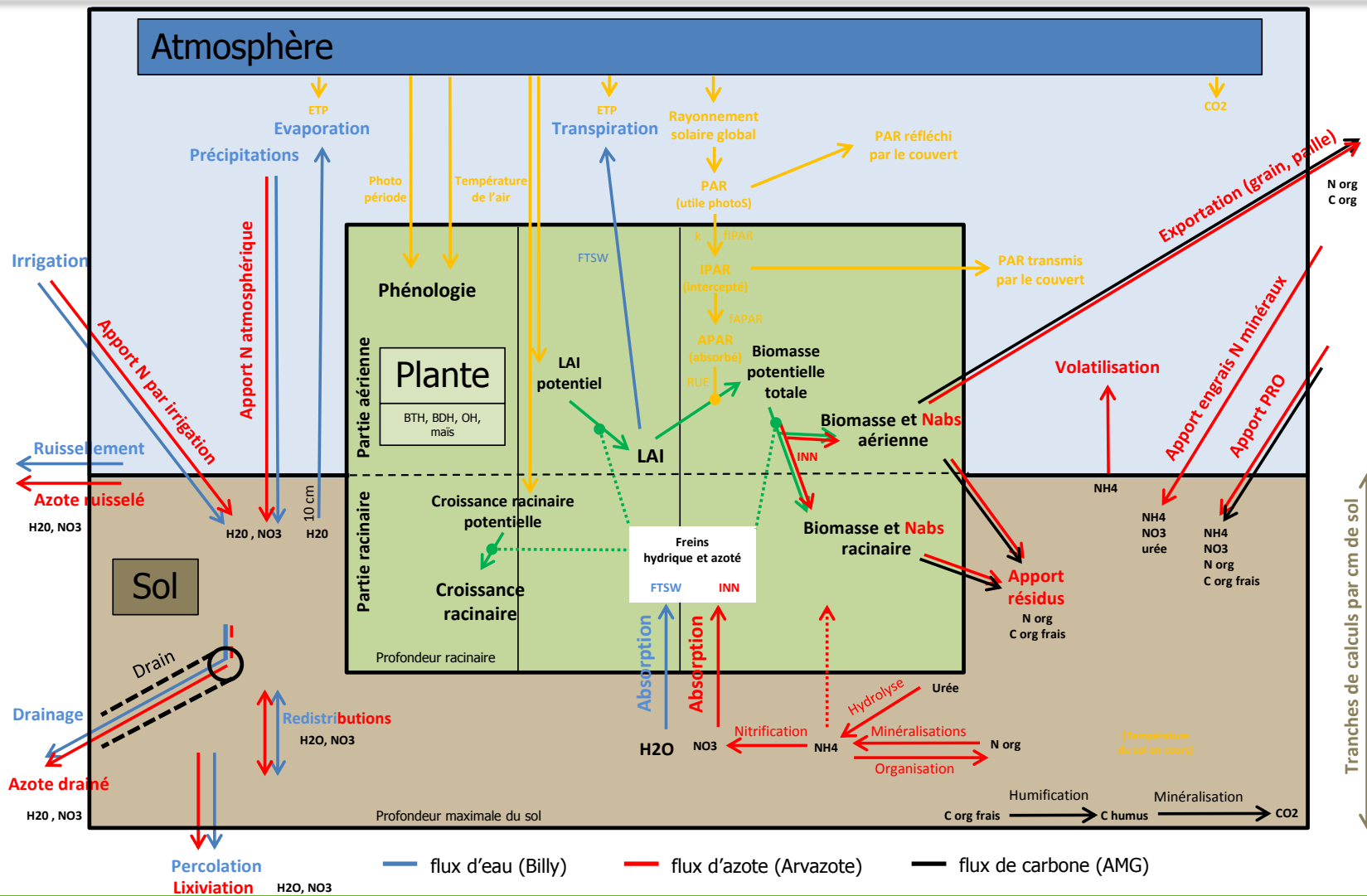
Vers une dynamisation du bilan prévisionnel à pas de temps fin

Pour s'adapter au contexte climatique de l'année, de plus en plus variable, un raisonnement basé sur l'évaluation en continu du besoin en azote au cours du cycle de la culture s'impose

- A.** nécessite d'avoir des modèles permettant d'évaluer de façon fiable le besoin en azote, sous des scénarios de contraintes azotées ou hydriques très variés
- B.** et de mettre au point des règles de pilotage de la fertilisation azotée en temps réel, en fonction de l'état de croissance de la culture (cf. topo JM. Meynard), des flux azotés sol-plante-atmosphère et des prévisions météo

Synoptique du modèle de culture CHN

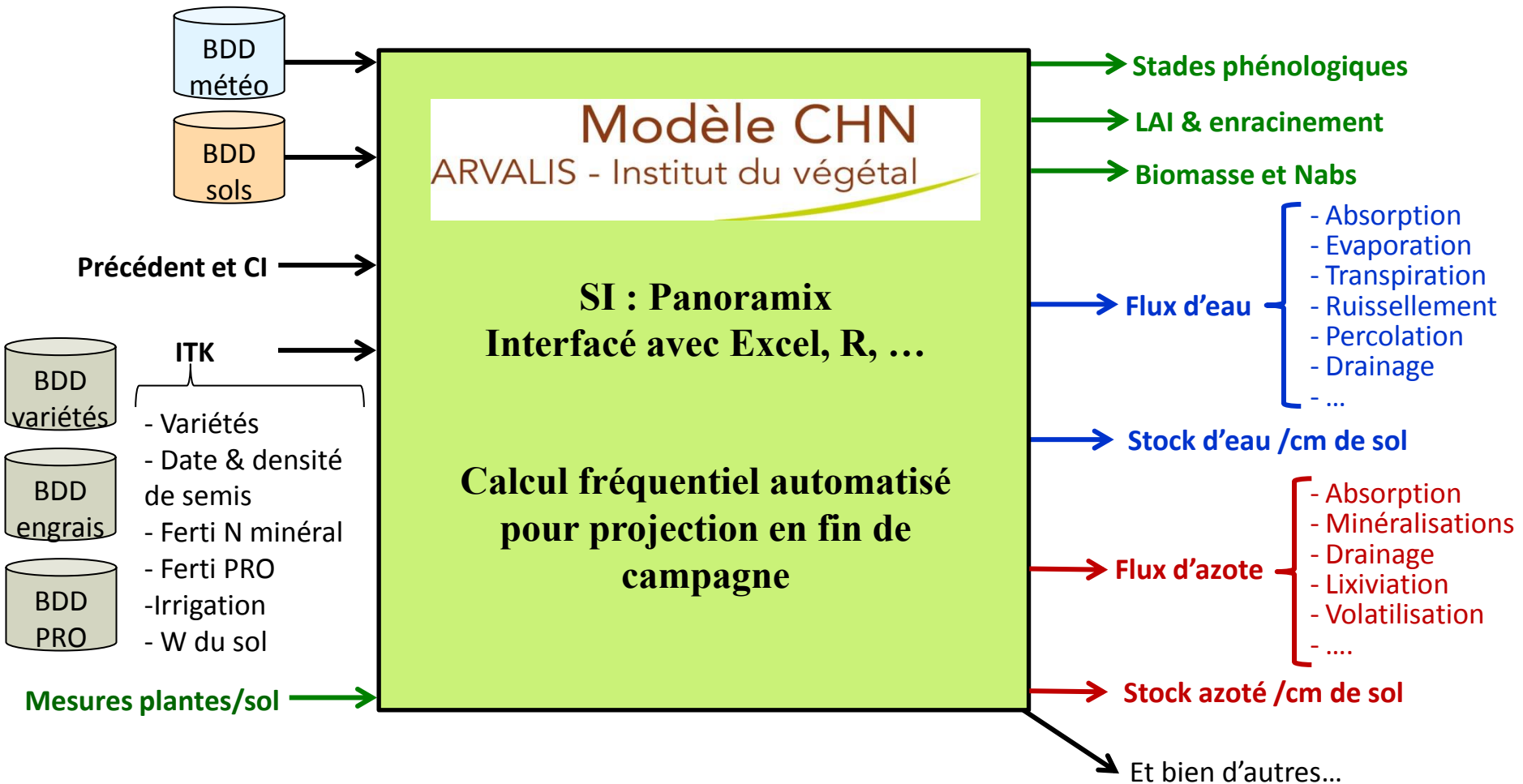
Modèle CHN
ARVALIS - Institut du végétal



Pourquoi un énième modèle de culture ?

- ❖ Il existe **déjà de nombreux modèles de culture** (APSIM, AQUACROP, STICS, PILOTE, CERES, ...), mais la grande majorité d'entre eux sont des modèles prioritairement **dédiés à la recherche**
 - représentent les processus sol et plante de façon très fine, ce qui rend leur paramétrage complexe
- ❖ La « posture » prise dans le développement de « **CHN** » est très différente, en cela qu'il a été conçu dès le départ **pour une utilisation opérationnelle**. En effet il a, entre autres, vocation à être mobilisé par les outils de pilotage et doit donc pouvoir être aisément paramétré et fonctionner en cours de campagne.
 - Pour ce faire « CHN » a été intégré dans le système d'information de l'institut (logiciel Panoramix) afin de pouvoir bénéficier de ses avantages :
 - modèles préexistants (comme les modèles phénologiques par exemple),
 - calcul fréquentiel automatisé pour projection des simulations jusqu'à la fin de la campagne,
 - connexion aux bases de données techniques internes (sols, variétés, engrais, météo),
 - interopérabilité avec Excel, R et facilité de portage sur un site internet.

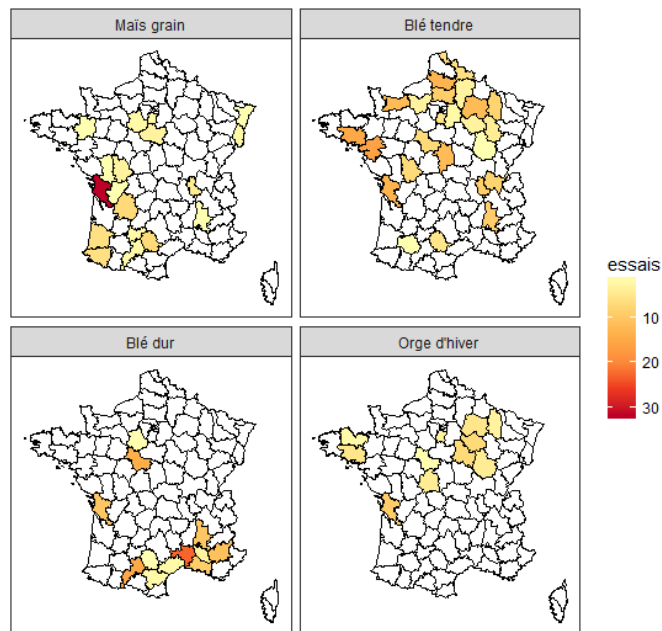
Fonctionnement du modèle



Performance du modèle de culture CHN

Un jeu de données français pour le paramétrage de CHN

Répartition géographique des sites CHN



	Années	Nbre de sites	Nbre de traitements	Nbre de mesures sol	Nbre de mesures plante
Maïs	1988-2016	28	683	11327	11534
BTH	2000-2014	34	585	3463	7614
BDH	1992-2014	33	416	2084	3810
OH	2004-2017	23	120	435	1163

Des performances aux rendez-vous

Modèle CHN
ARVALIS - Institut du végétal

Blé tendre	Biomasse (tMS/ha)	Azote absorbé (kgN/ha)
n	2157	2003
Biais	0.6	4.3
RMSE	1.7	32.8
EF	0.87	0.76

Blé dur	Biomasse (tMS/ha)	Azote absorbé (kgN/ha)
n	1046	742
Biais	0.6	5.3
RMSE	1.8	45.8
EF	0.87	0.68

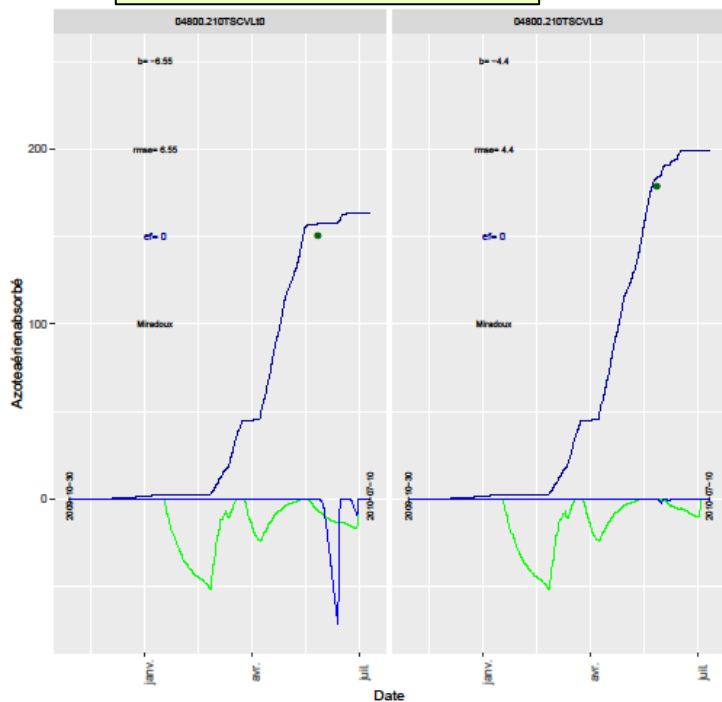
Le modèle est aussi paramétré sur maïs et orge d'hiver et le sera bientôt sur orge de printemps

Performance du modèle de culture CHN

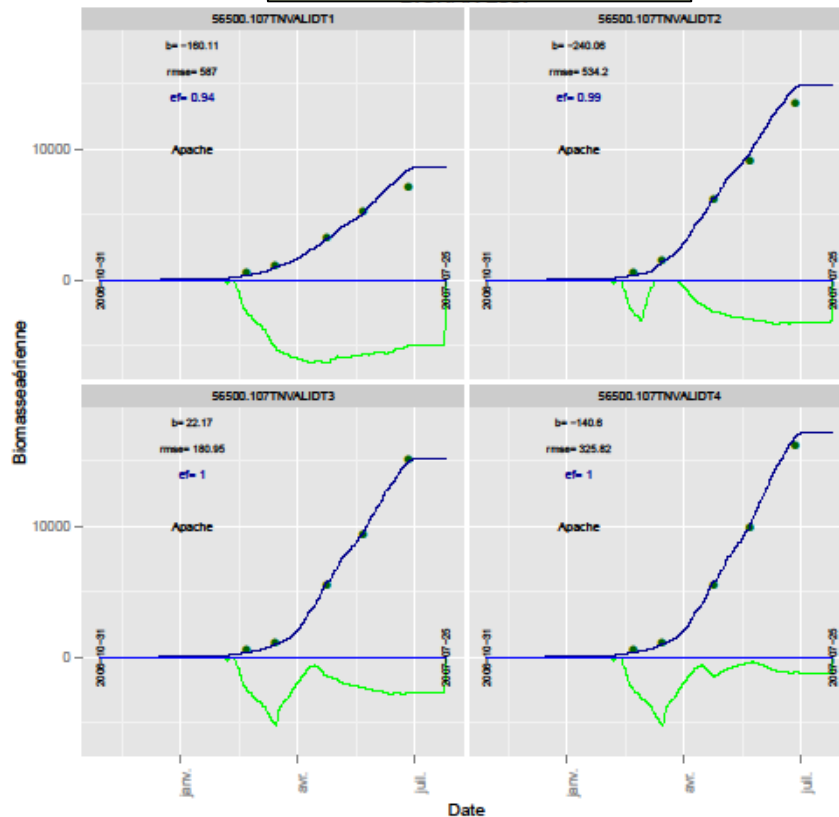
Quelques exemples de simulations CHN sur des essais
ARVALIS BD/BT avec des scenarios climatiques variés

Modèle CHN
ARVALIS - Institut du végétal

Essai Gréoux (04) 2010
Ferti N * Irrigation - BD

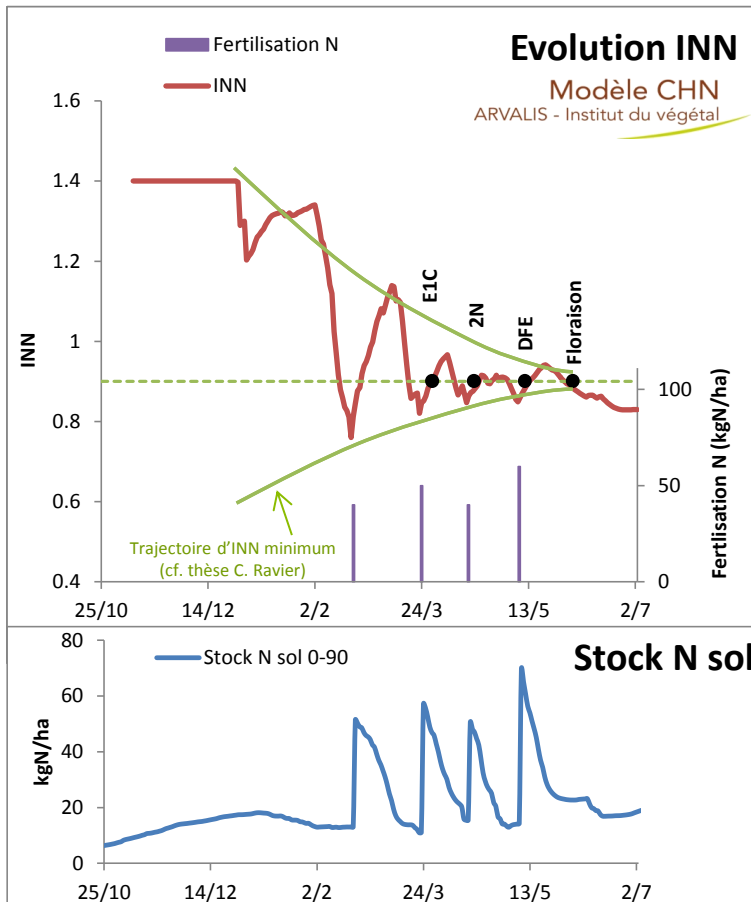


Essai Bignan (56) 2007
Ferti N - BT



Mise au point des règles de décision pour la valorisation de CHN pour le pilotage de la fertilisation azotée

Stratégie travaillée : définir une trajectoire d'INN optimale et déclencher un apport dès que l'on s'en éloigne trop à cause d'un défaut de fourniture du sol (gérer les interactions eau-azote)



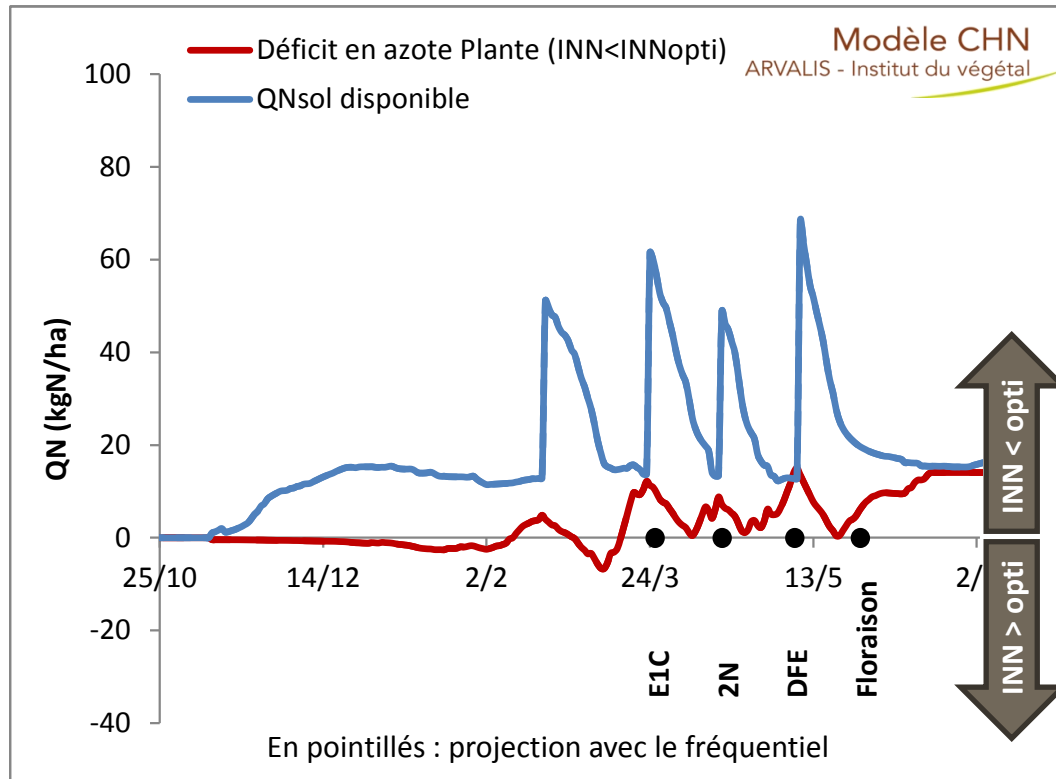
1. Viser un INN floraison de 0.9 (est-ce suffisant dans les contextes à très hauts potentiels ? Quid de l'enjeu protéines?)
2. Se donner des « rendez-vous » réguliers où il faut déclencher un apport pour remonter à l'INN optimal
-> Ces rdv vont conditionner le fractionnement et permettre de ne pas rentrer en carence azotée trop forte au risque de ne plus pouvoir la rattraper et ainsi de limiter la croissance de la plante
3. Suivre en parallèle les fournitures azotées du sol



Mais INN inutilisable pour calculer une dose
-> passer en quantité d'azote (QN)

Mise au point des règles de décision pour le pilotage de la fertilisation azotée à l'aide de CHN

Raisonnement en quantité d'azote (QN) pour pouvoir calculer des doses



Dose à apporter pour atteindre le prochain rdv :

N1 (tallage) : 40 kg N/ha

N2 (E1C) : 50 kg N/ha

N3 (2N) : 40 kg N/ha

N4 (DFE) : 60 kg N/ha



Ne pas négliger pour autant les conditions d'apport (avant une pluie)
-> **fixer des rdv aux périodes maximisant le CAU**

Premiers tests au champ d'un pilotage en temps réel avec CHN

Campagne 2016-2017 :
8 essais en blé dur (dont essais partenaires)
12 essais en blé tendre

Module CRN

Courbe de réponse à l'azote, pour déterminer le rendement optimal, la dose optimale avec un fractionnement « classique » (tillage, E1C, DFE) et la teneur en protéines à cette dose ainsi que le CAU

Module CHN

Pilotage de la fertilisation azotée avec CHN pour :

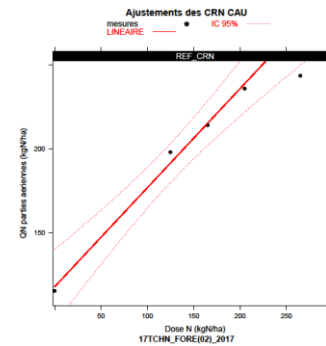
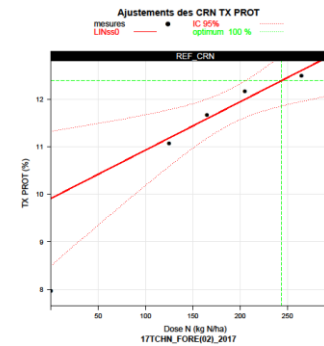
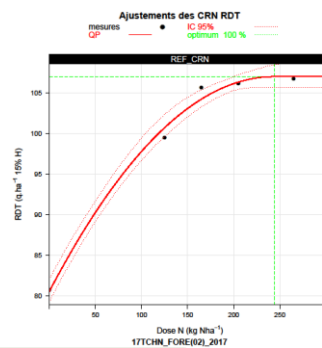
- Un objectif rendement
- Un objectif rendement + protéines (11.5% en BT et 14% en BD)

La date et la dose de chaque apport est défini pour un objectif rendement (INNflo=0.9) ou rendement + protéines (INNflo fonction des « bc » variétaux)

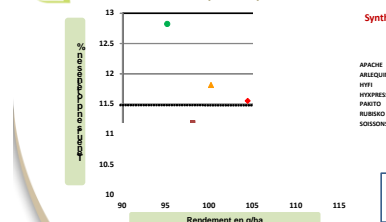
Essais comité technique blé dur Centre (financés par le Cap Filière)



CETA Champagne Berrichonne



Les variétés n'ont pas les mêmes teneurs en protéines à la dose d'azote optimale pour le rendement



$$bc = (11,5\% - \text{protéine}_{\text{ajustée}}) \times \frac{0,85}{5,7} \times a$$

Synthèse de 10 essais 2014-2015 (6 doses N x 17 variétés de blé tendre d'hiver) projet N-BT, soutien financier du FSOV

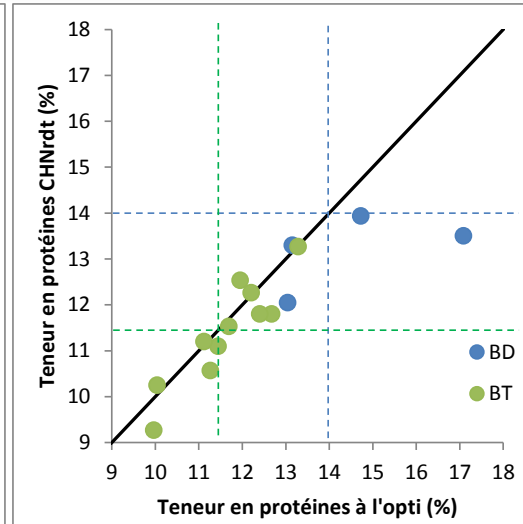
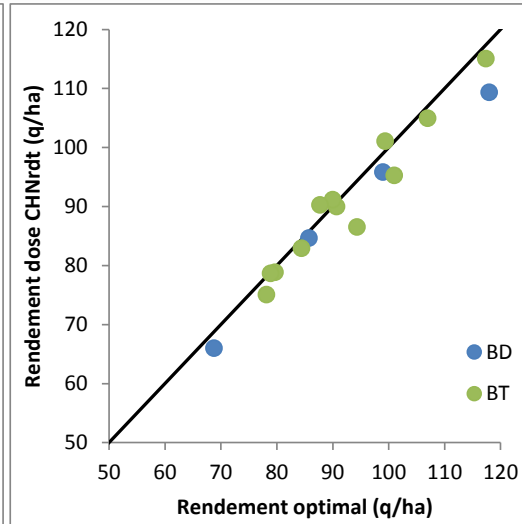
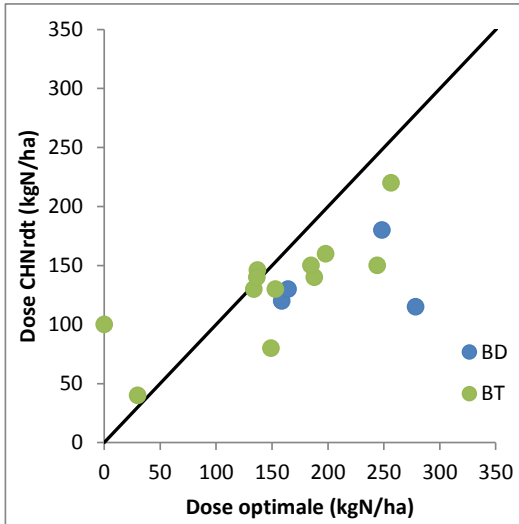
Présentation au groupe N COM4038 - 14/10/2016

Mesures réalisées

- Biomasses et Nabs, reliquats Nminéral en végétation -> comparaison aux simulations CHN pour évaluation du modèle
 - Rendement et composantes, %protéines -> comparaison à la CRN pour évaluation des règles de décision
 - Retour qualitatif sur l'interprétation des règles de décision

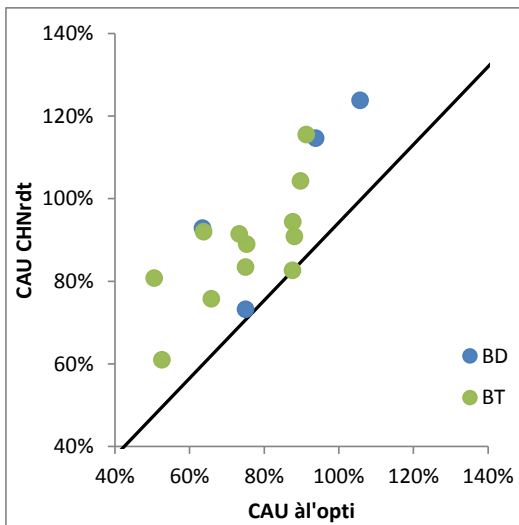
Résultats 2017 : pilotage CHN

« Rendement »



Moyennes %protéines

	BT	BD
Opti CRN	11.4	13.9
CHN rdt	11.5	13.2
CHN rdt+ prot		



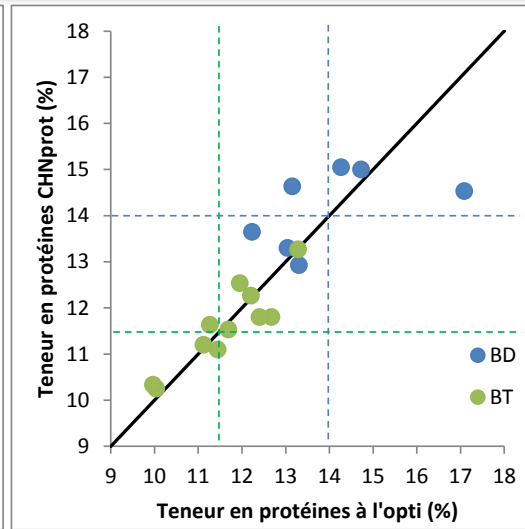
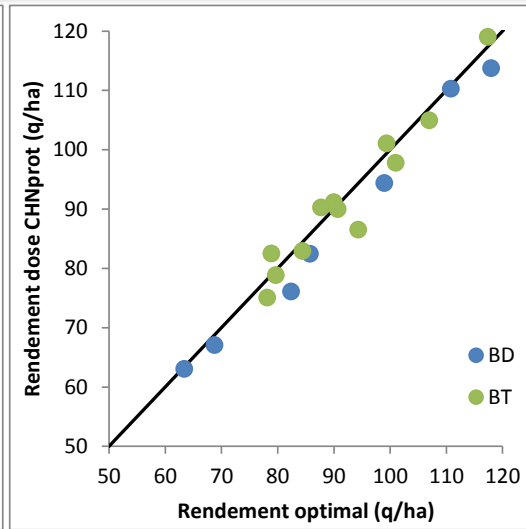
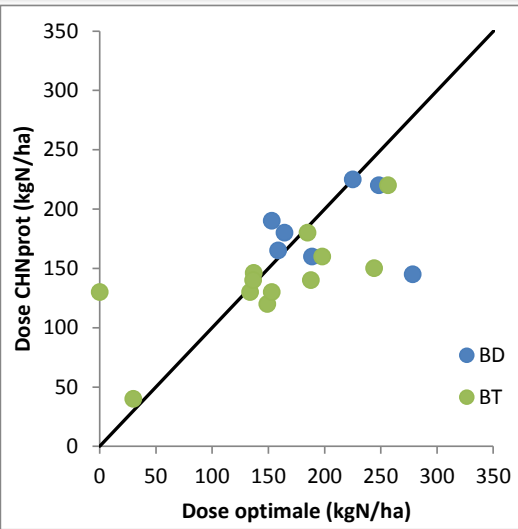
Performance du pilotage CHN, en comparaison à l'optimum CRN

Pilotage CHN	Nbre d'essais	Dose N (kgN/ha)	Rendement (q/ha à 15%H)	Protéines (%)	CAU (%)
Rdt	16	-33**	-2.2**	-0.23 ^{NS}	+14***
Rdt+prot					

Test statistique en comparaison avec l'optimum CRN :
 *** différence significative à 1%; ** à 5%; * à 10% ;NS Différence non significative

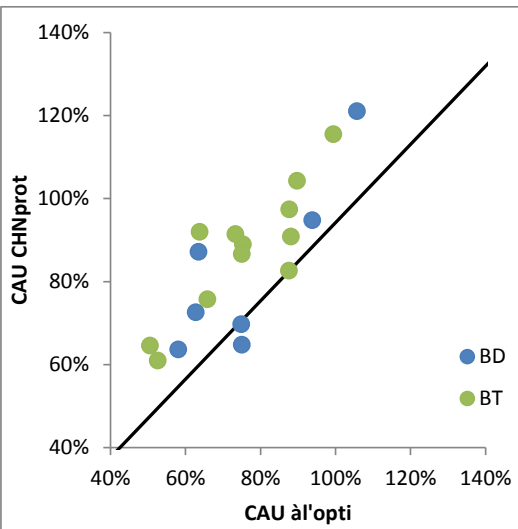
Résultats 2017 : pilotage CHN

« Rendement + Protéines »



Moyennes %protéines

	BT	BD
Opti CRN	11.4	13.9
CHN rdt	11.5	13.2
CHN rdt+prot	11.7	14.2



Performance du pilotage CHN, en comparaison à l'optimum CRN

Pilotage CHN	Nbre d'essais	Dose N (kgN/ha)	Rendement (q/ha à 15%H)	Protéines (%)	CAU (%)
Rdt	16	-33**	-2.2**	-0.23 ^{NS}	+14***
Rdt+prot	19	-13 ^{NS}	-1.6**	0.29 ^{NS}	+10***

Test statistique en comparaison avec l'optimum CRN :
 *** différence significative à 1%; ** à 5%; * à 10% ;NS Différence non significative

Discussion des premiers résultats

RESULTATS ESSAIS 2017

- Le pilotage en temps réel avec le suivi de l'INN via CHN, a conduit **une dose préconisée plus faible** que l'optimum de la CRN, associée à **une meilleure efficacité** des apports d'azote minéral, mais a provoqué **une perte de rendement** de 2.2 q/ha. L'objectif teneur en protéines, lorsqu'il a été suivi a **permis d'atteindre en moyenne les objectifs**.
- Premiers résultats prometteurs, malgré une année particulière (forts reliquats, sécheresse montaison)
- Les simulations CHN sont globalement très satisfaisantes pour la biomasse, mais peuvent être améliorées pour l'azote absorbé

POINTS D'AMELIORATION DE CHN

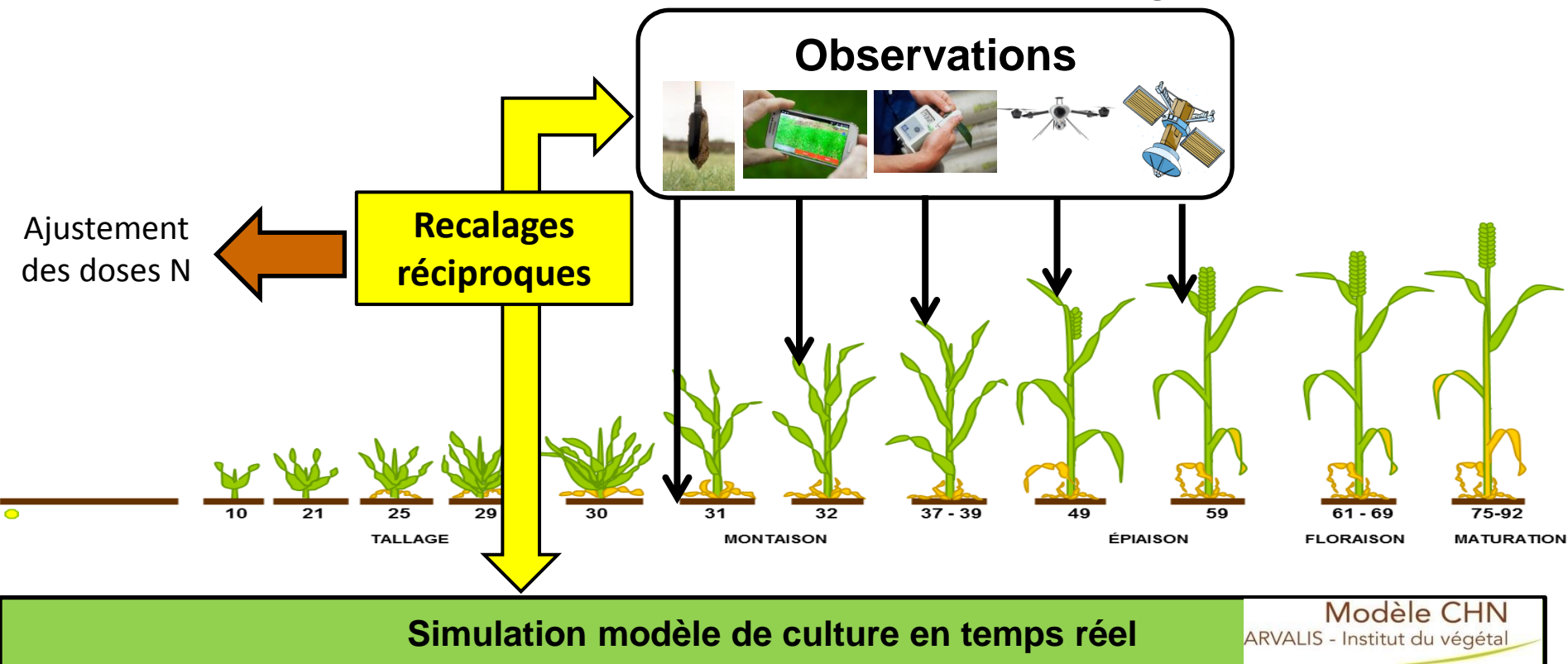
- **Modèle Nabs** : en condition N non limitant, le Nabs est systématiquement surestimé . Retravailler le formalisme du modèle Nabs pour introduire un effet « satiété » (absorption non linéaire)
- **Minéralisation de l'humus** : introduction pour 2018 du nouveau modèle Vp (cf. topo E. Justes), plus performant

POINTS D'AMELIORATION DU PILOATGE

- Introduire un **module d'optimisation des rdv**, pour viser les fenêtres climatiques maximisant les CAU (utilisation d'un modèle CAU en fréquentiel)
- **Retravailler l'INN minimum en début de cycle**, car certains essais ont présenté des pertes de nombre d'épis importantes, provoquant une perte de rendement
- **Etudier l'effet milieu et variété** sur la dynamique d'INN minimum

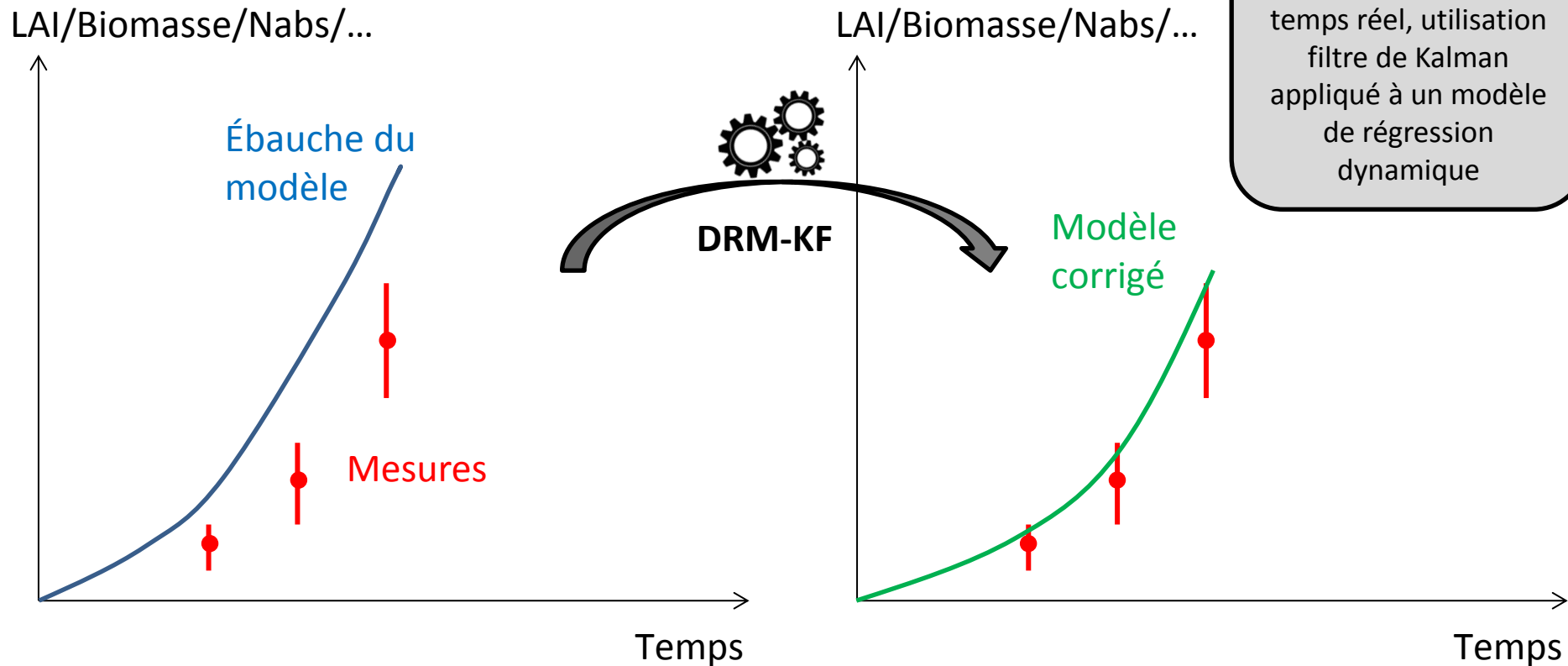
Perspectives : valorisation des données capteurs

Un modèle n'est jamais parfait → possibilité de le coupler à des observations pour améliorer ses performances → OAD de pilotage de l'azote



Utilisation des techniques d'assimilation de données

Principe : Tenir compte de l'ensemble des observations et de leurs incertitudes. A chaque date d'observation, on calcule un coefficient de correction que l'on affecte aux prévisions jusqu'à la prochaine observation.



Exemple d'application sur LAI :

Assimilation du LAI dans CHN maïs et évaluation des performances Biomasse

Assimilation (DRM-KF) dans CHN du LAI pré-floraison (sur 80 traitements maïs) et évaluation du gain de performance sur l'estimation de la biomasse floraison

Modèle CHN
ARVALIS - Institut du végétal

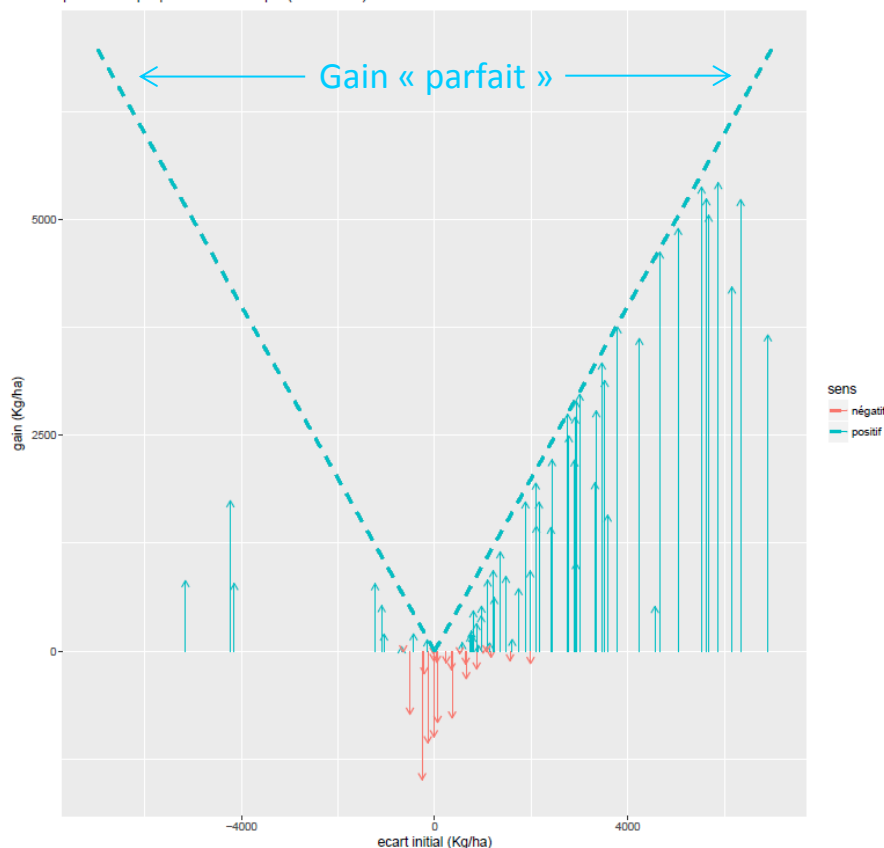
$$\varepsilon = \text{BiomasseFloObs} - \text{BiomasseFloSim}$$

- Comparaison du biais, de la RMSE et de l'EF
- Analyses des gains individuels :

$$\text{Gain} = |\varepsilon| - |\varepsilon_{\text{DRM KF}}|$$

$$\varepsilon_{\text{DRM KF}} = \text{BiomasseFloObs} - \text{BiomasseFloSim}$$

Biomasse à floraison : gain par EKF du LAI ~ écart initial du modèle
 $|\text{obs} - \text{sim}| - |\text{obs} - \text{simEKF}| \sim (\text{obs} - \text{sim})$



→ L'assimilation du LAI dans CHN, permet de corriger efficacement l'estimation de la biomasse

Conclusions

UTILISATION DE CHN POUR LE PILOTAGE DE L'AZOTE EN TEMPS REEL

- Les **performances de CHN** pour estimer la croissance du blé dans des contextes agroclimatiques variés **sont satisfaisantes** et permettent d'envisager d'utiliser ce modèle pour piloter en temps réel la fertilisation azotée.
- Les premiers résultats sont prometteurs et la méthode sera affinée dans les années à venir (notamment avec les travaux engagés dans le projet PEI SOLINAZO), pour être progressivement intégrée dans les outils de l'institut (FertiWeb Dynamic, Taméo, Farmstar)

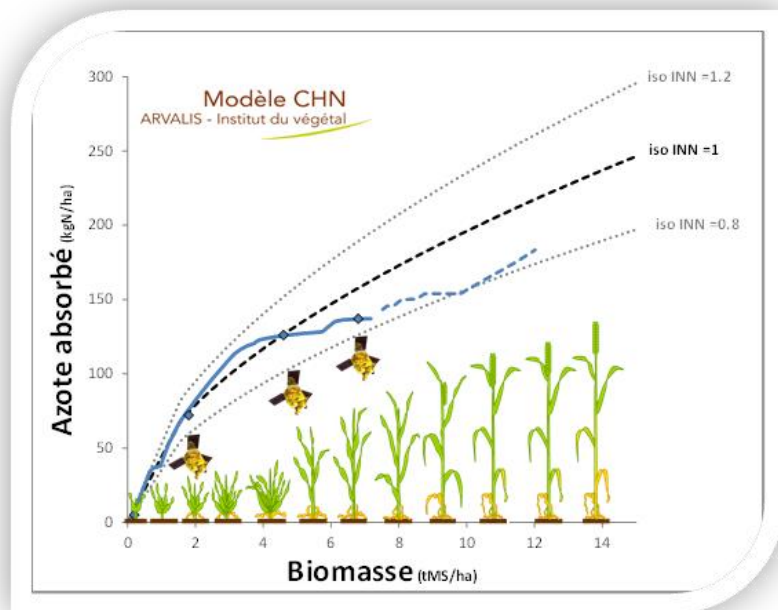
NECESSITE DE VALORISER LES DONNEES CAPTEURS

- Les **premiers résultats sur LAI maïs** sont prometteurs
- L'**assimilation de l'azote plante sera plus complexe** : on ne mesure pas directement le Nabs, mais un proxy (*e.g.* teneur en chlorophylle), qu'il faut convertir en Nabs. Il faut aussi prendre garde à la conservation des masses (*i.e.* impacter les stocks sol des recalage plante)

ET LES AUTRES ESPECES ?

- **Maïs** : essais pilotage en temps réel avec CHN, en cours depuis la campagne 2015
-> objectif : définir la trajectoire d'INN minimum et stabiliser les règles de décision d'interprétation des sorties de CHN pour le pilotage de la fertilisation azotée
- **Orge** : pas encore travaillé, campagne 2018-2019 ?

Merci de votre attention



Des questions ?