

Pourquoi et comment améliorer l'efficacité d'utilisation des ressources nutritionnelles du sol par les cultures?

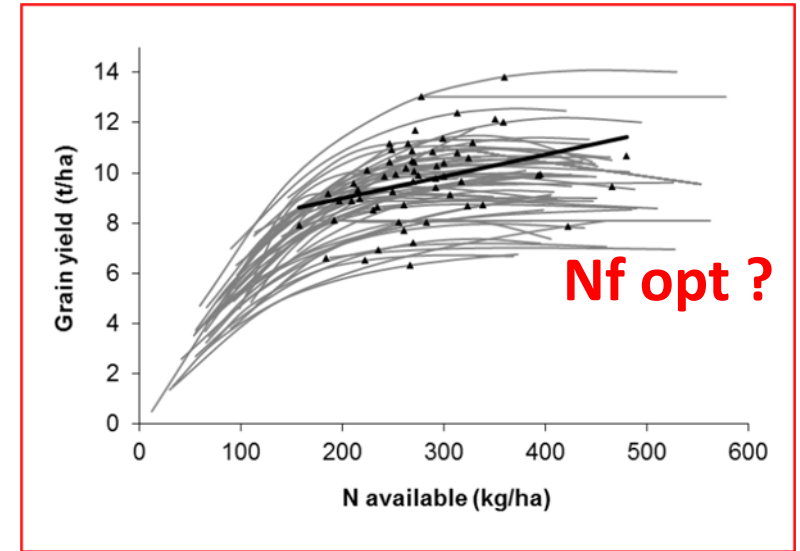
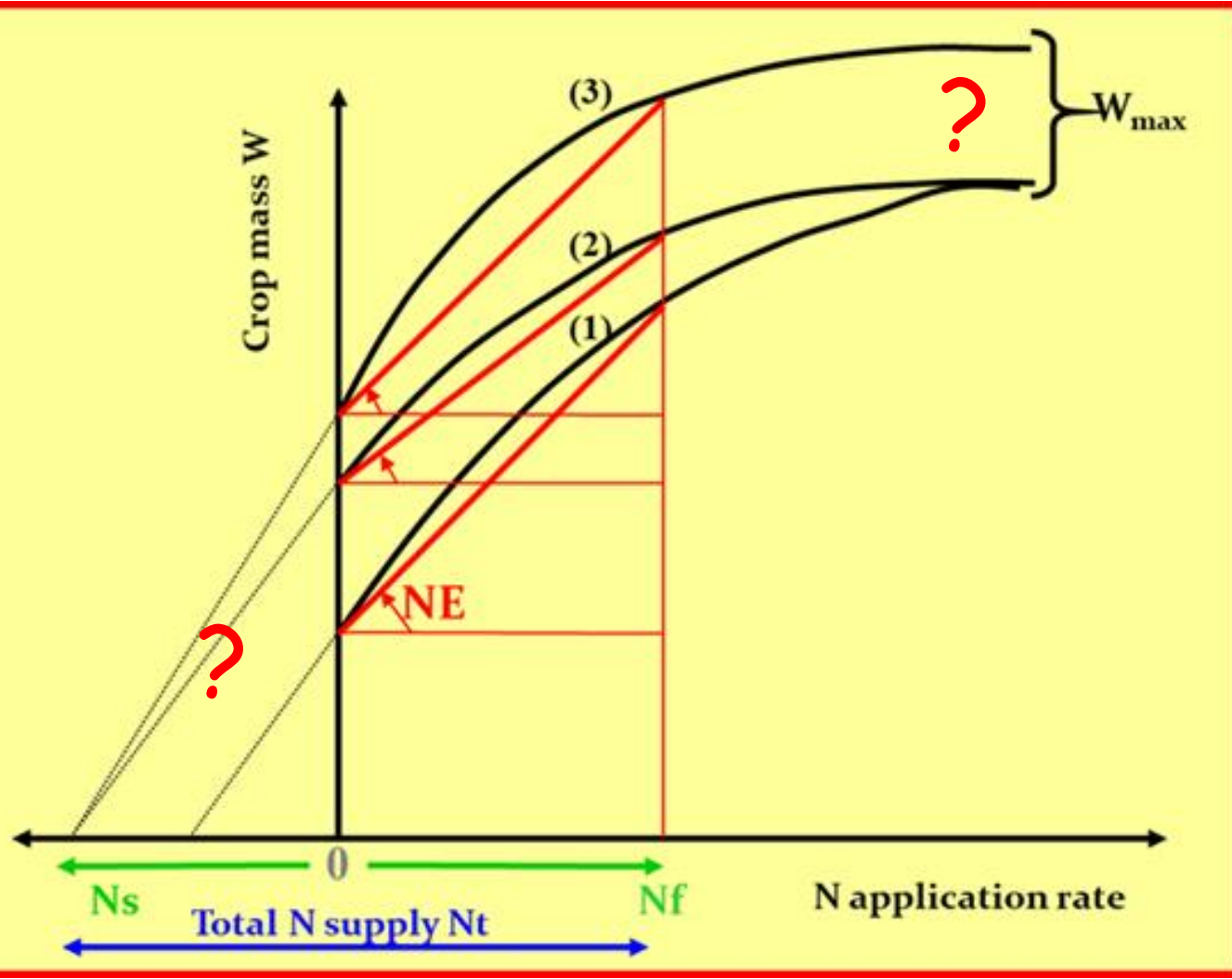
Séance du 18 Janvier 2023

Un débat entre Agronomes-Ecophysiologistes et Généticiens

Une sélection pour le potentiel de production des cultures en milieu « riche »
permet-il aussi d'adapter les cultures en milieu « pauvre »?

L'amélioration génétique du potentiel de production des cultures est-il
inséparable d'une utilisation accrue des engrais?

L'approche classique de la réponse des cultures à la fertilisation



Très forte incertitudes sur: Ns et W_{max}

Tendance à maximiser $Nf\ opt$

Efficiencce de l'azote:

$$\Delta W / \Delta Nf$$

Or 20 kg de N/ha en excès conduit inéxorablement à de l'eau > 50mg NO_3^- /litre

Faut-il continuer à sélectionner pour augmenter $Y_{\max}$?

Ou

Pour diminuer l'usage des engrais à même $Y_{\max}$?

Approche Agro-système

Actions Causes $\rightarrow$ A $\rightarrow$ B $\rightarrow$ C $\rightarrow$ Effets

Sols sans plantes



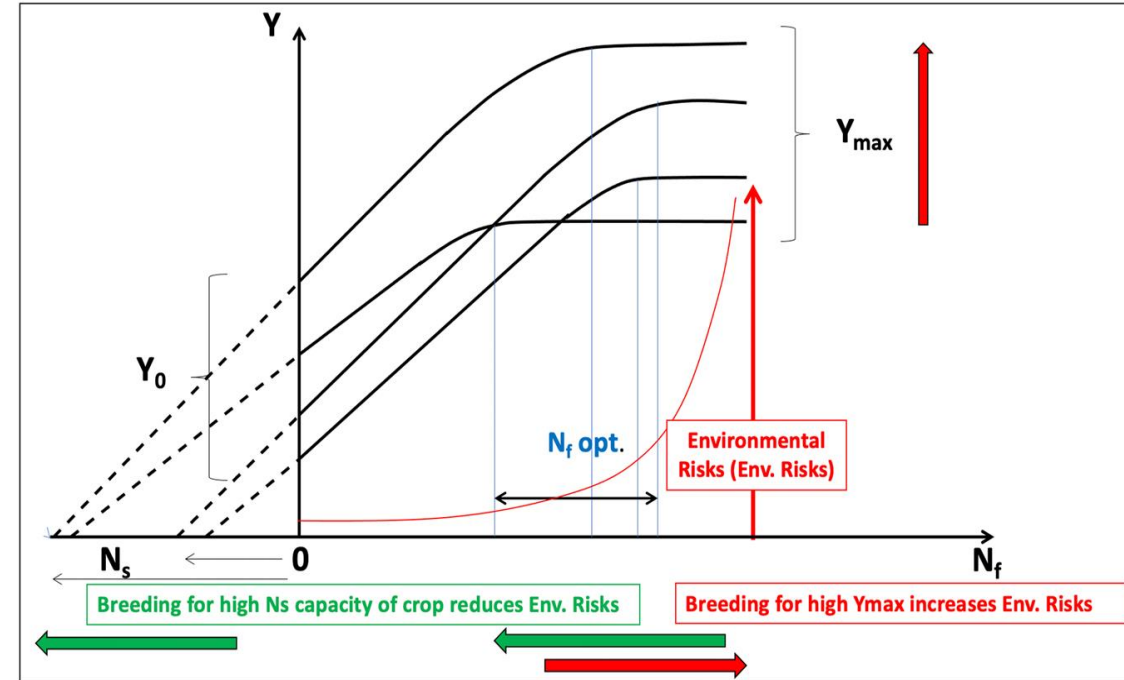
Plantes sans sol



???

Approche Agro-Eco-Système

Actions Causes $\rightarrow$ A $\rightarrow$ B $\rightarrow$ C $\rightarrow$ Effets



Biologie
Intégrative

1- D'une approche de l'efficience de la réponse des cultures aux apports d'engrais... à une approche de la capacité des cultures à produire avec le moins d'engrais possible.

Gilles LEMAIRE et Ignacio CIAMPITTI

2- Adaptation de l'architecture racinaire aux contraintes nutritionnelles du sol: identification des mécanismes et exploitation de la variabilité génétique

Alain GOJON

3- Efficacité d'utilisation de l'azote par le blé tendre: variabilité et progrès génétique

Jacques LE GOUIS

4- Conclusions et perspectives

Jean-François BRIAT

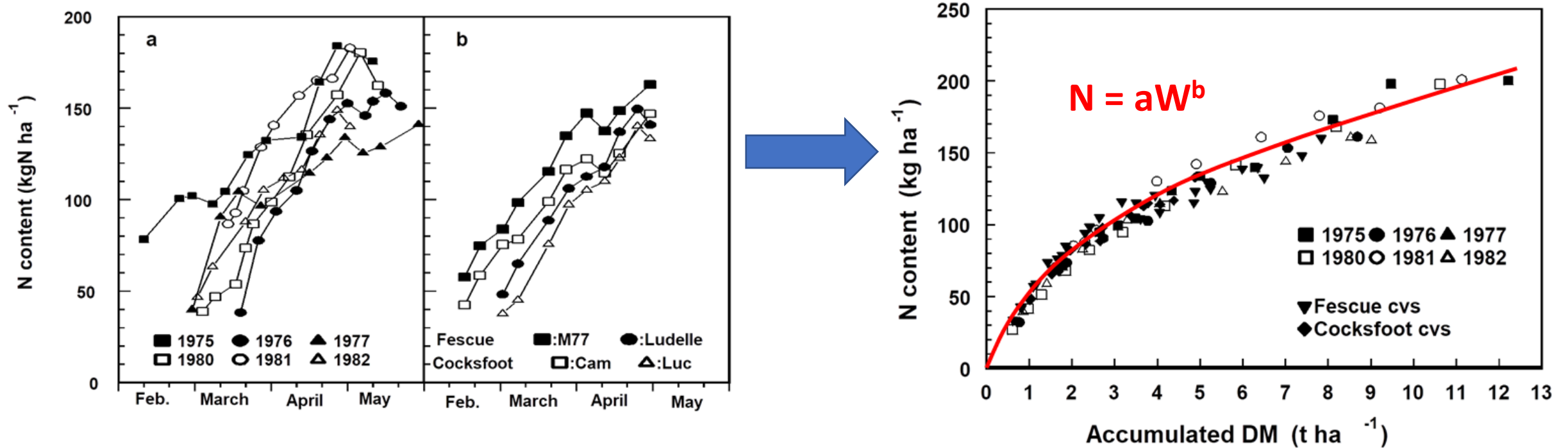
D'une approche de l'efficience de la réponse des cultures aux apports d'engrais...

à une approche de la capacité des cultures à produire avec le moins d'engrais possible ?

Gilles LEMAIRE: Membre de l'Académie d'Agriculture de France

Ignacio CIAMPITTI: Prof. Department of Agronomy, Kansas University (USA)

Le prélèvement de N est rétro-régulé par la dynamique de croissance



- Des variations de croissance (Génotype-Environnement) entraînent des variations correspondantes de prélèvements de N;
- Les besoins en N des cultures $dN/dW = abW^{b-1}$ diminuent lorsque la biomasse de la culture (W) augmente;
- Le prélèvement de N ne reflète donc plus la seule disponibilité de N dans le sol [NO₃⁻; NH₄⁺] puisqu'il dépend aussi de la capacité de croissance de la plante (dW/dt)

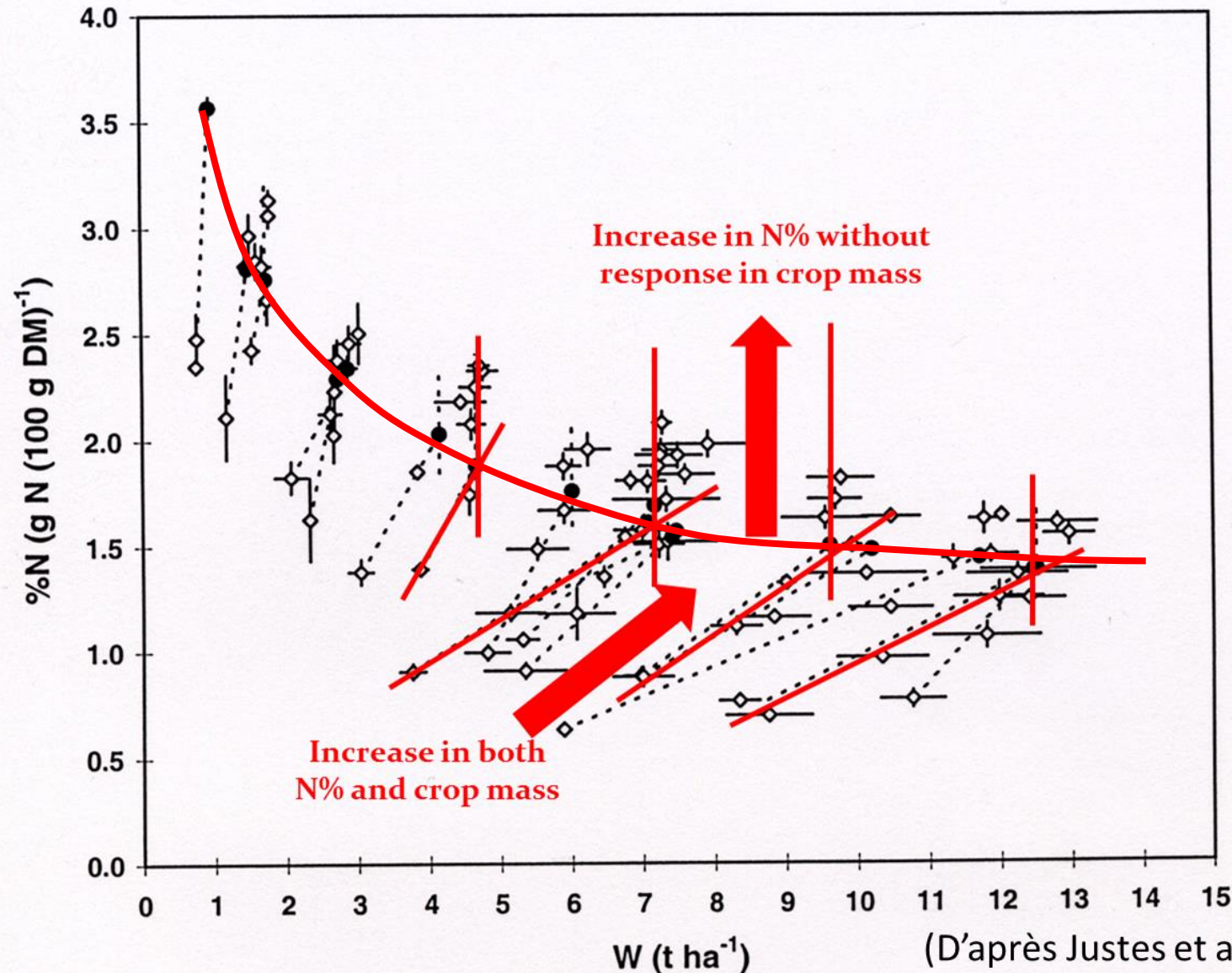
Il est possible de déterminer une "courbe de dilution critique"
correspondant au minimum de N% pour atteindre le maximum
de biomasse

Courbe critique de
prélèvement de N

$$N = aW^b$$

Courbe de dilution
N critique

$$\%N = \frac{a}{10W^b}$$



(D'après Justes et al. 1994)

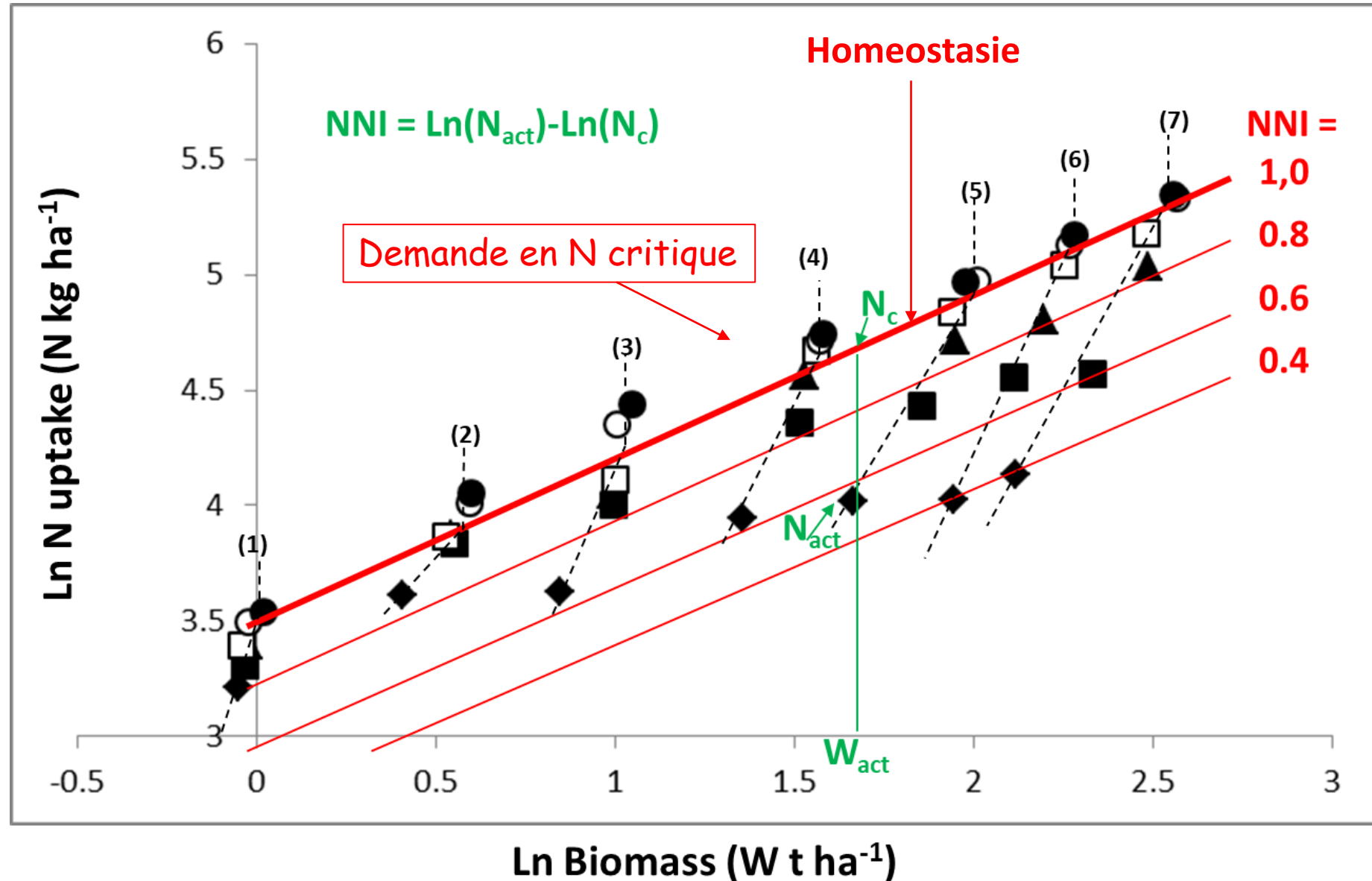
Indice de Nutrition Azoté d'une culture

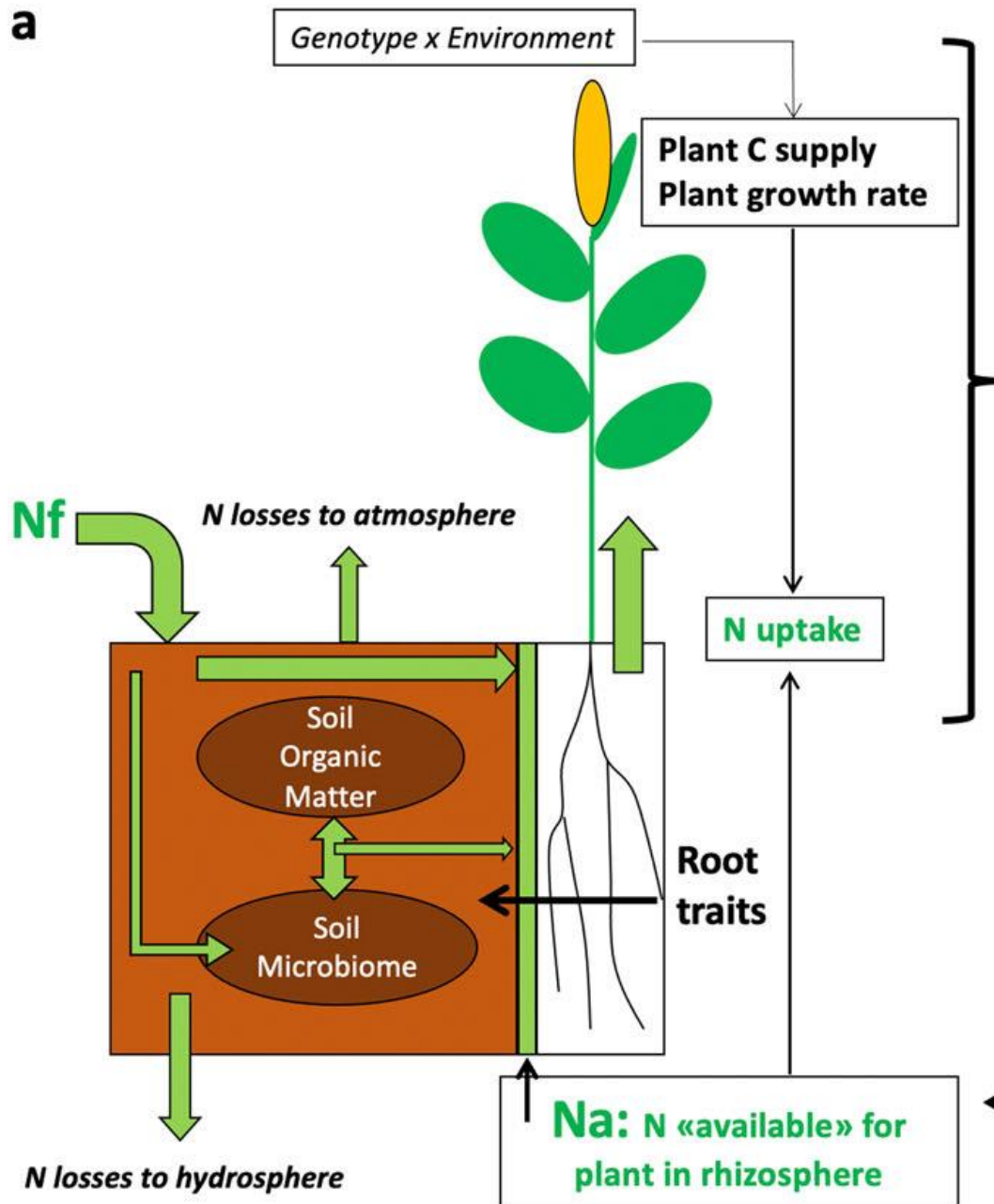
$$NNI = N_{act}/N_c$$

NNI mesure donc le degré de satisfaction de la demande en N de la culture

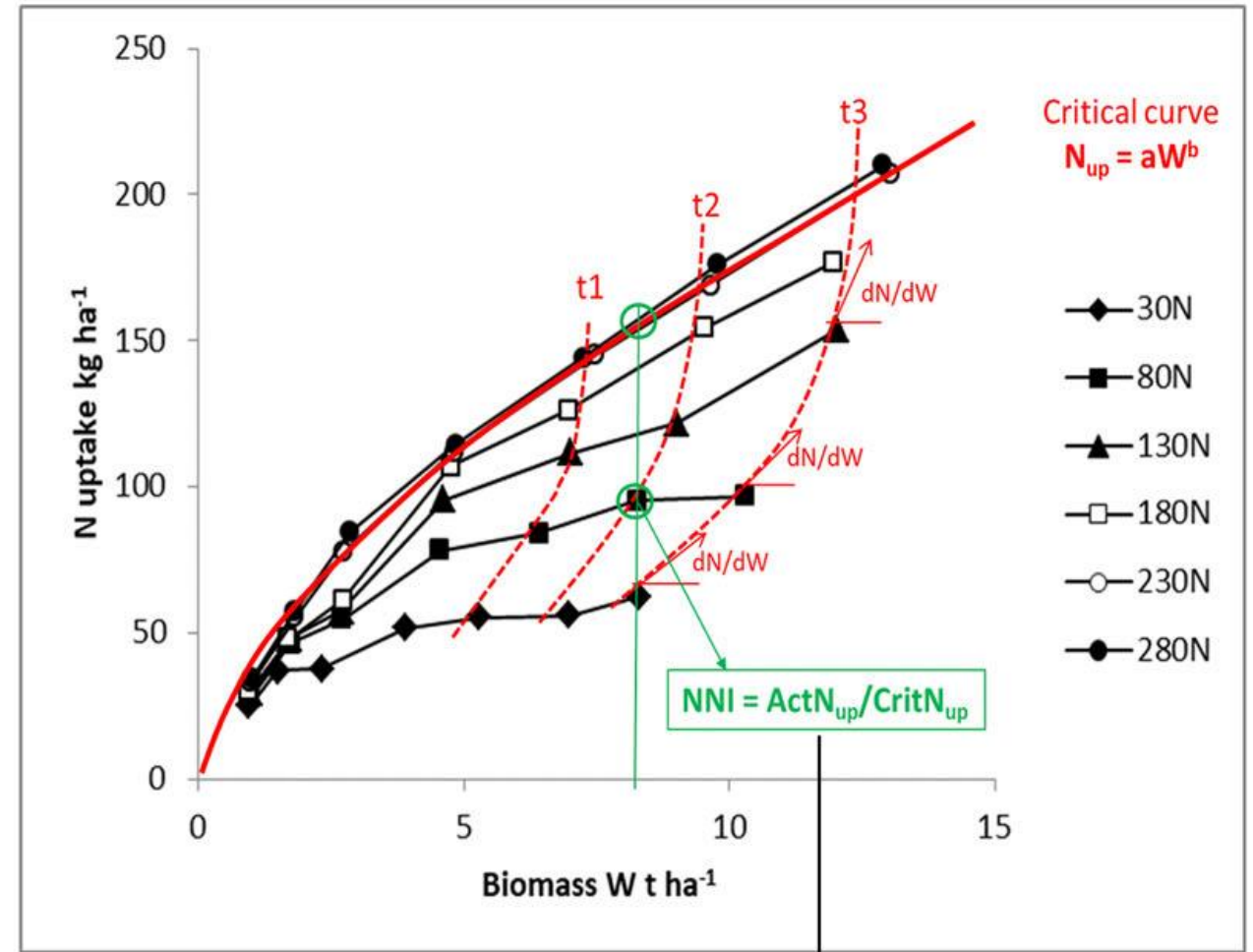
NNI < 1 N limitant
NNI > 1 N non-limitant

NNI est donc aussi une estimation relative de l'offre en N du sol...



a**b**

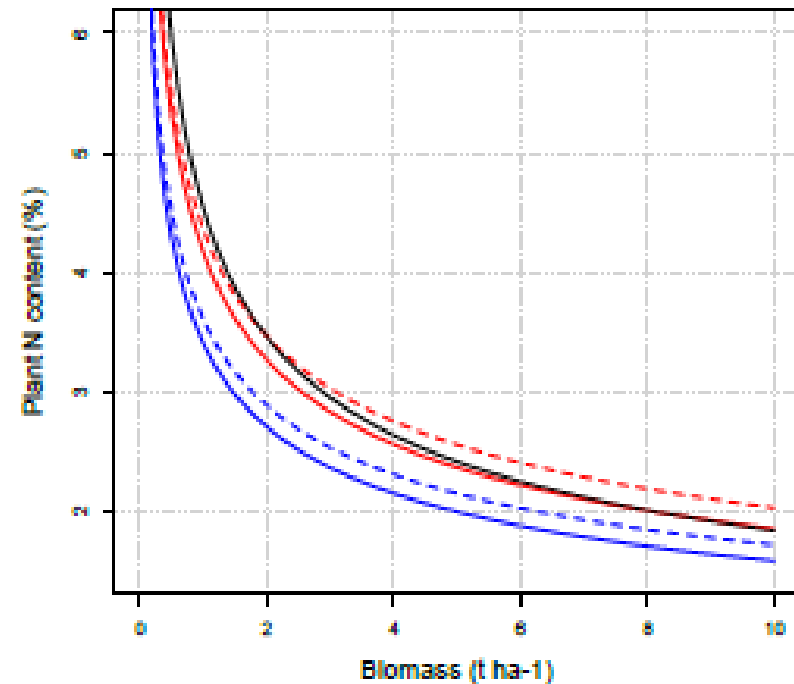
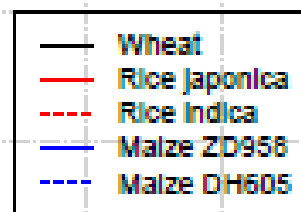
Allometry between N uptake and crop mass



NNI is an *a posteriori* estimation of Na in relative term: Na/Na_{opt}

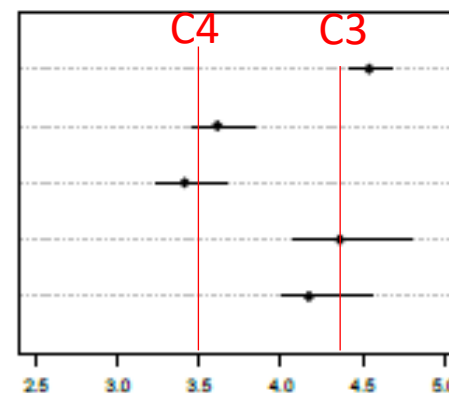
Une approche Bayésienne pour évaluer l'incertitude sur les courbes de dilution critiques

Makowski et al. 2022

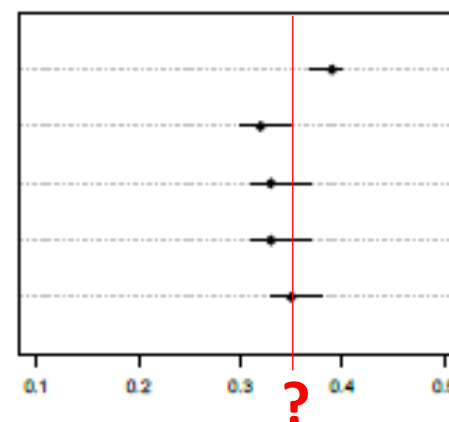


Wheat
Maize DH605
Maize ZD958
Rice indica
Rice japonica

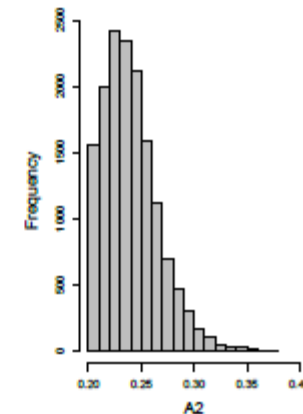
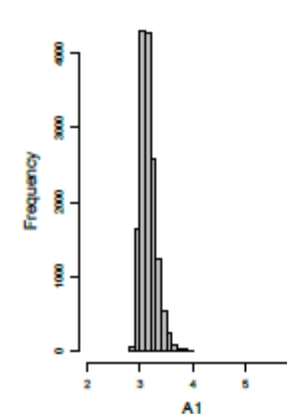
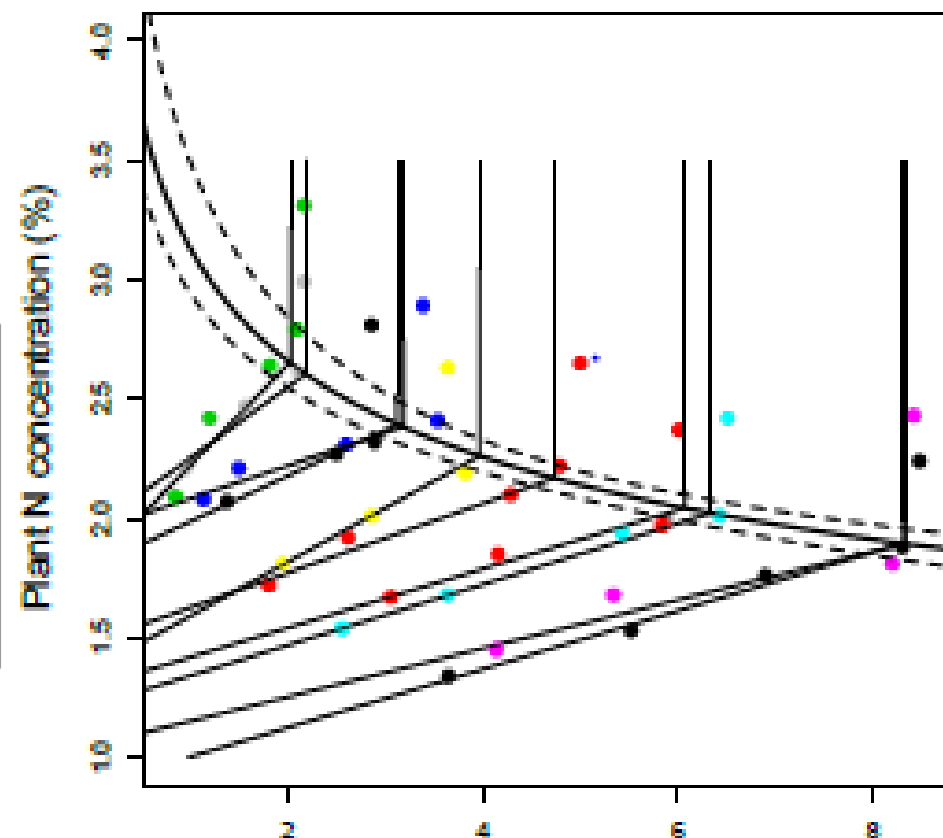
b. Parameter A1 and Prior 2



d. Parameter A2 and Prior 2



Wheat
Maize DH605
Maize ZD958
Rice indica
Rice japonica



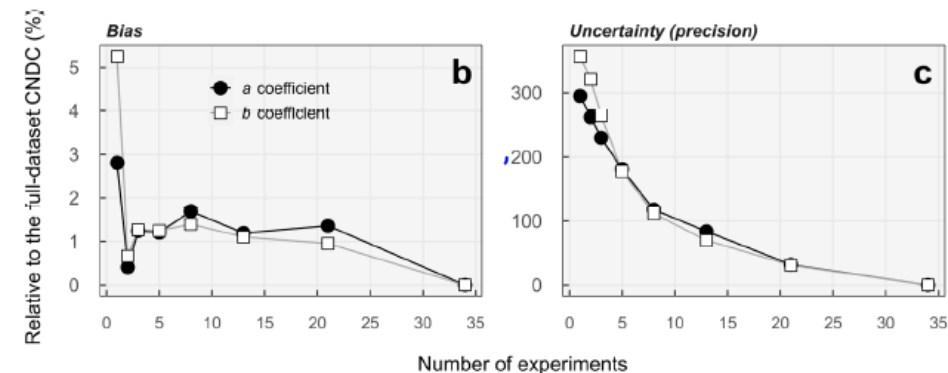
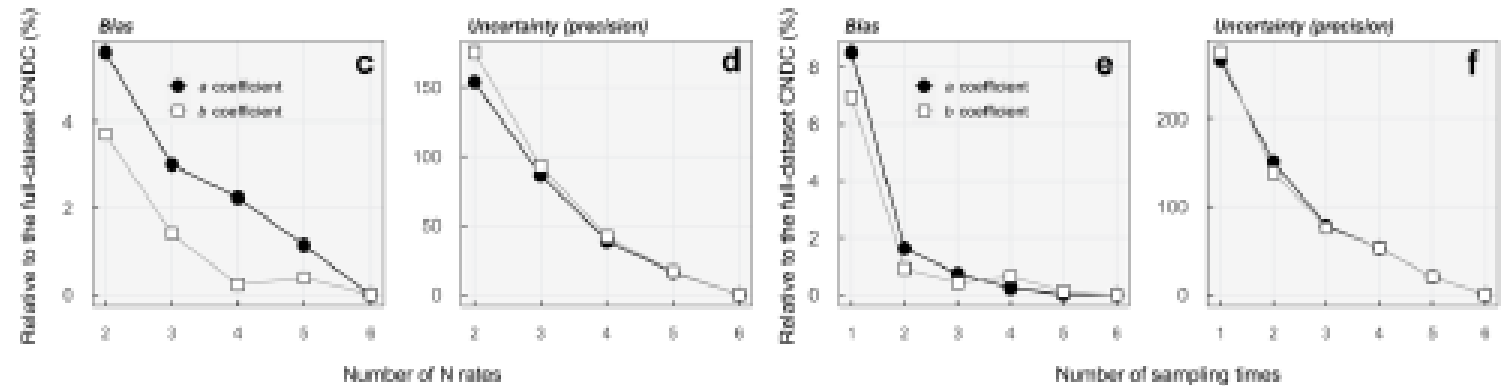
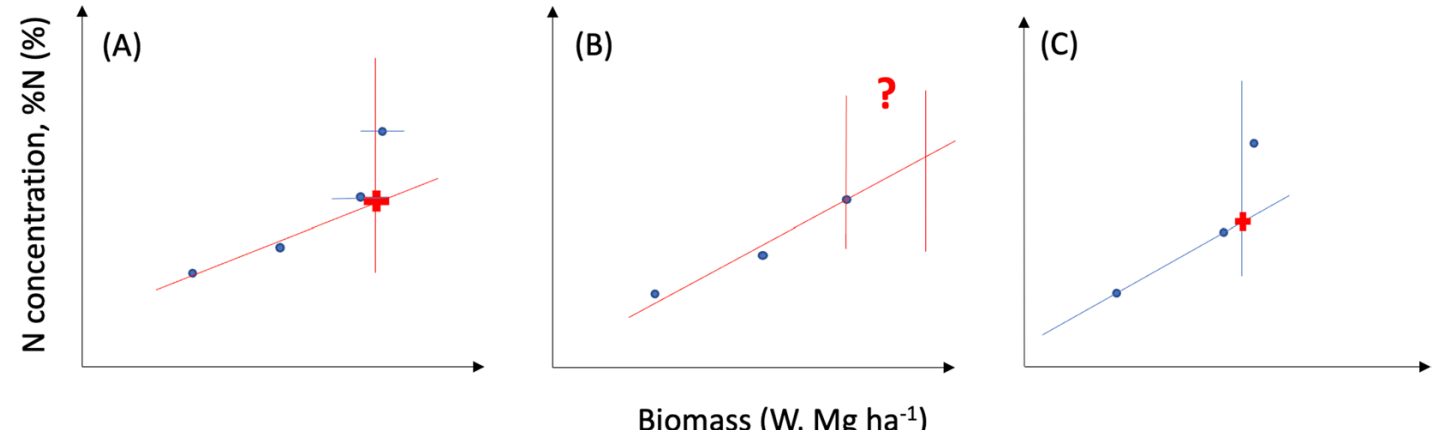
Qualités de la base de donnée pour ajuster les courbes de dilution N critiques

1- Être certain
d'avoir atteint $W_{\max}$

2- Avoir un
nombre de
traitement N > 3

3- Avoir un nombre
de date de mesure > 3

4- Avoir un nombre
suffisants
d'expérimentations
lieux-années > 5



(Fernandez...Makowski... Lemaire.... Ciampitti, 2022)

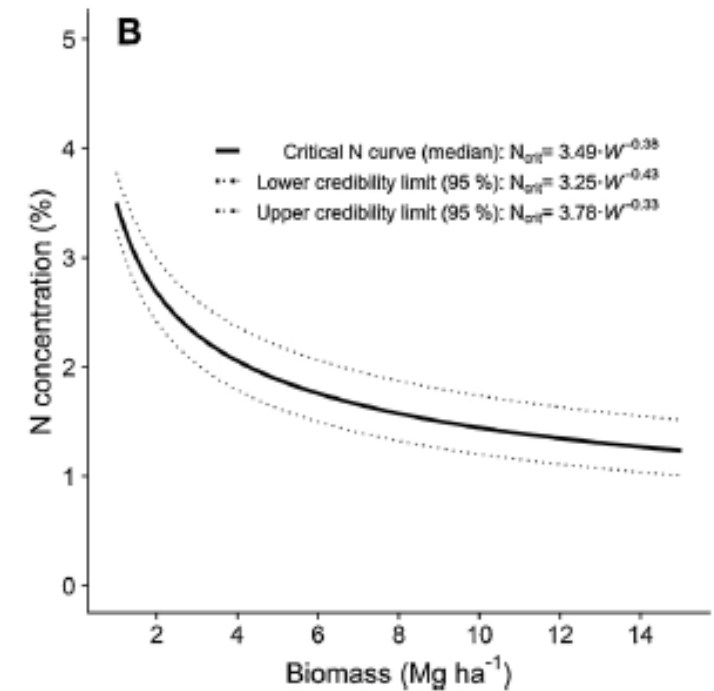
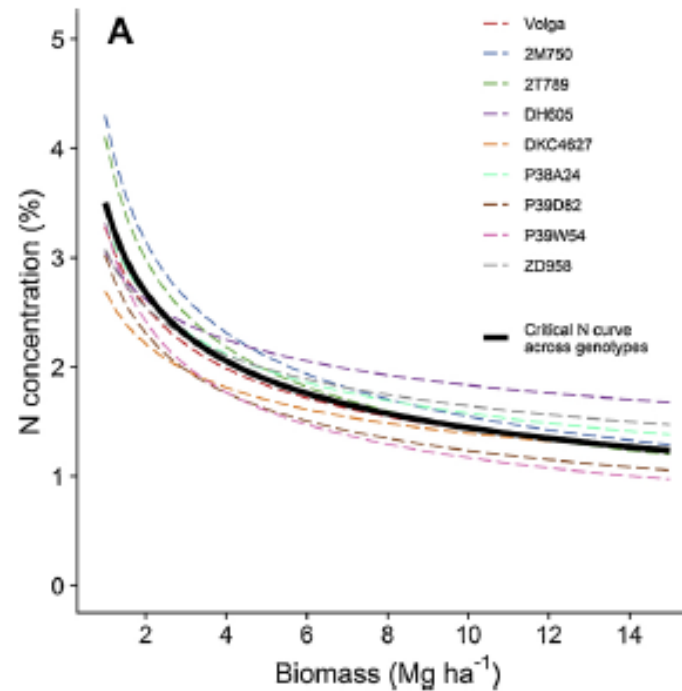
Variabilité génétique

$$\%N_c = a_c W^{b-1}$$

Maïs

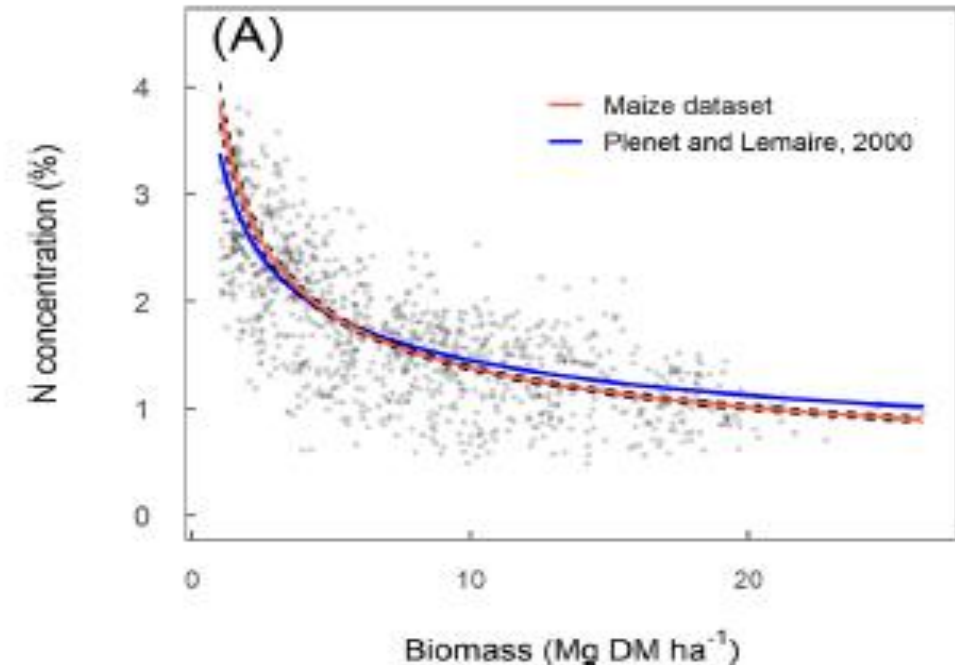
Difficulté à détecter des différences entre génotypes

(Ciampitti... Lemaire et al. 2020)



Maïs et Sorgho ont des courbes N critique très proches!!!

On peut donc conclure à une variabilité intraspécifique très faible



Variabilité génétique

$$\%N_c = a_c W^{b-1}$$

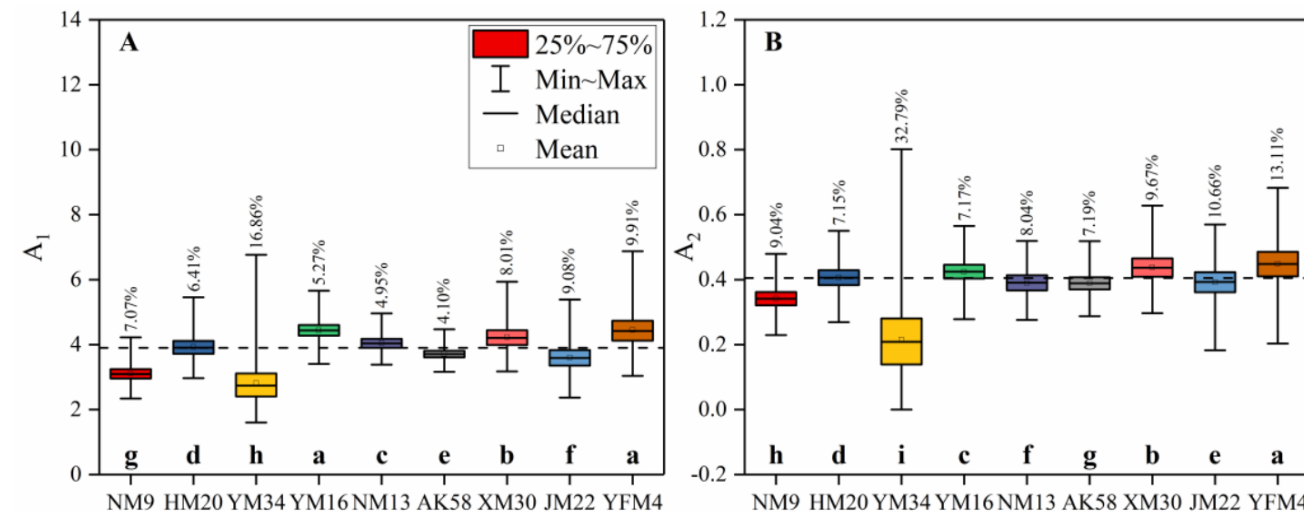
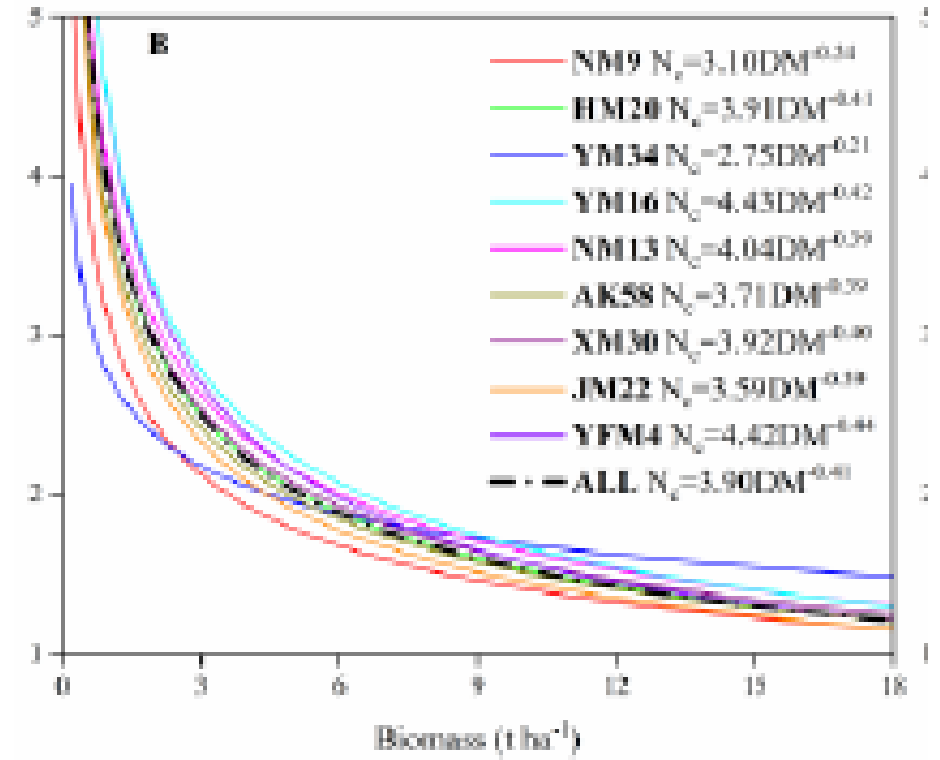
Blé

Les différences entre génotypes restent très faibles

Attention aux biais liés au nombre de traitement N trop faibles ou ne permettant pas d'atteindre $W_{\max}$

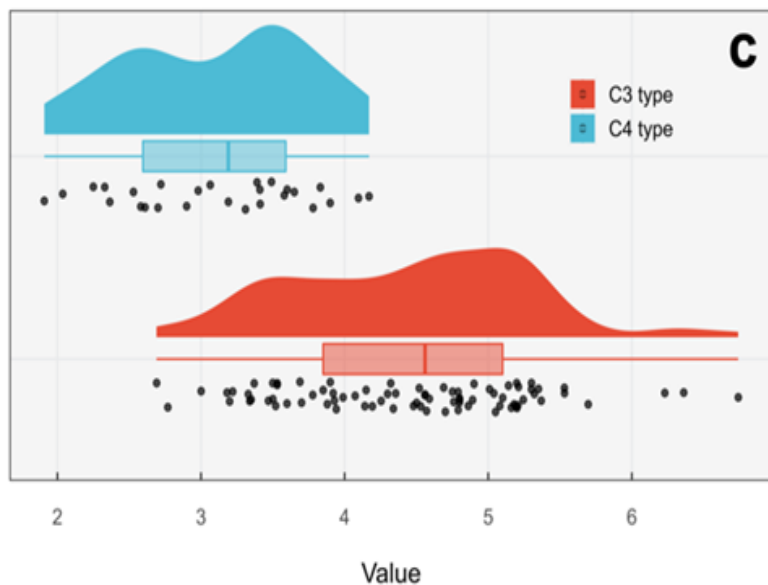
La courbe N critique du blé est très proche de celle de l'ensemble des espèces de graminées fourragères

L'hypothèse d'une variabilité intraspécifique reste très improbable

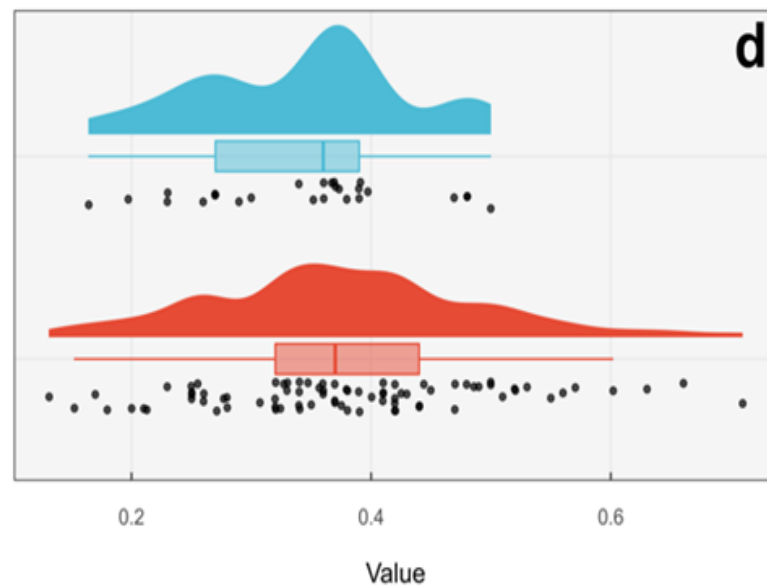


(Bo-Yao... Lemaire... Makowski... Tang et al. 2021)

a coefficient



b coefficient

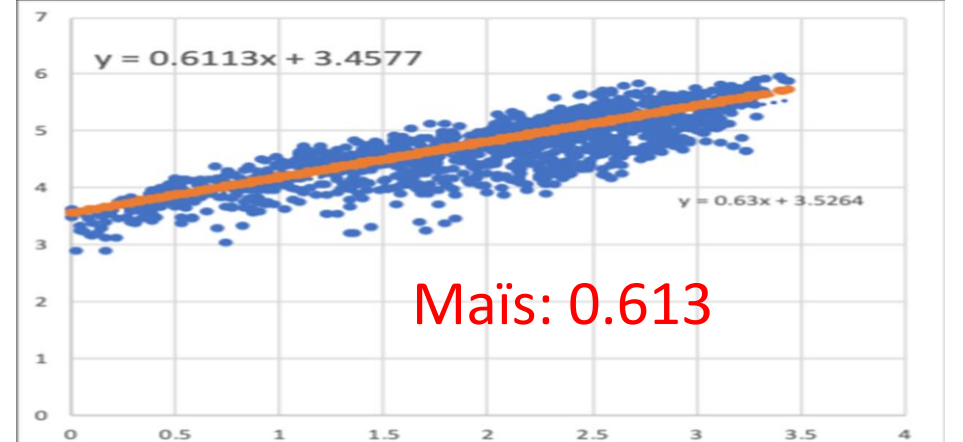


Il y a une forte suspicion d'avoir une allométrie similaire pour toutes les espèces

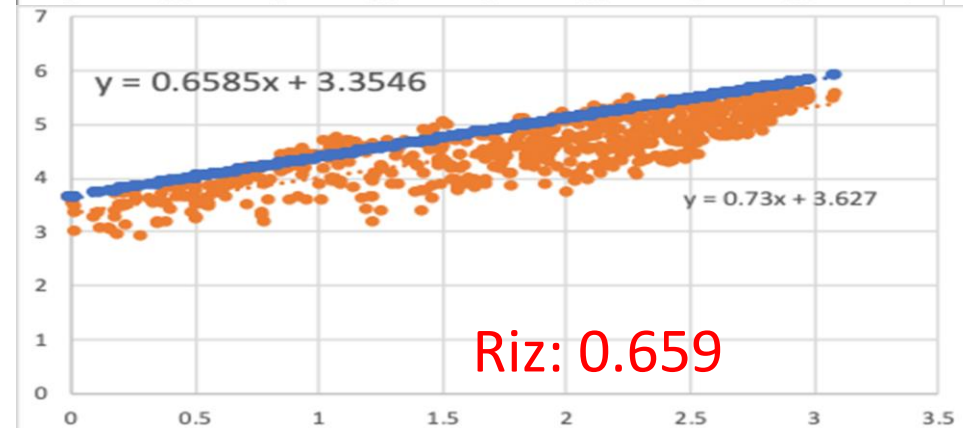
$$(dN/N)/(dW/W) = 2/3$$

L'accroissement relatif de N étant proportionnel à la surface de la culture (LAI) alors que l'accroissement relatif de W serait proportionnel à son volume....
Quelque soit l'espèce végétal !!!

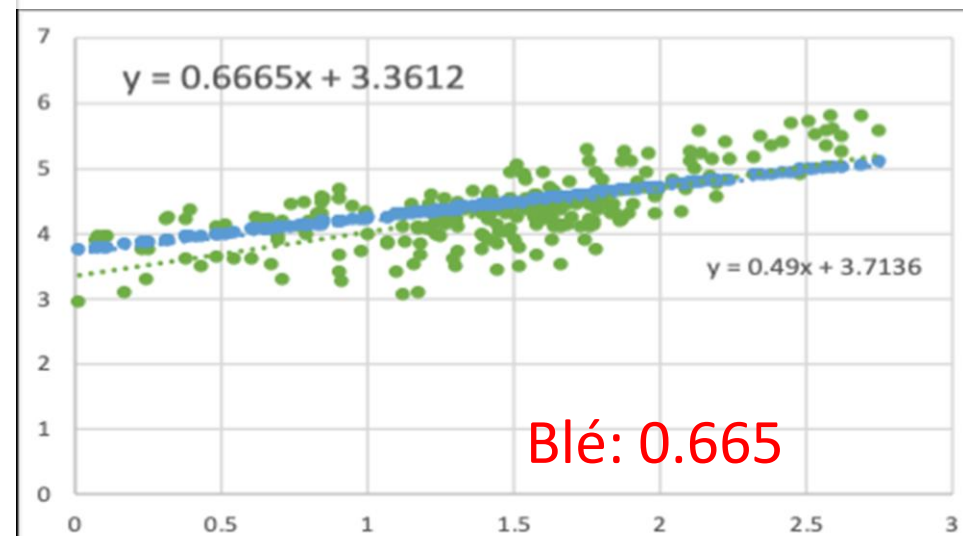
(Travaux en cours, Ciampitti et Lemaire)



Maïs: 0.613

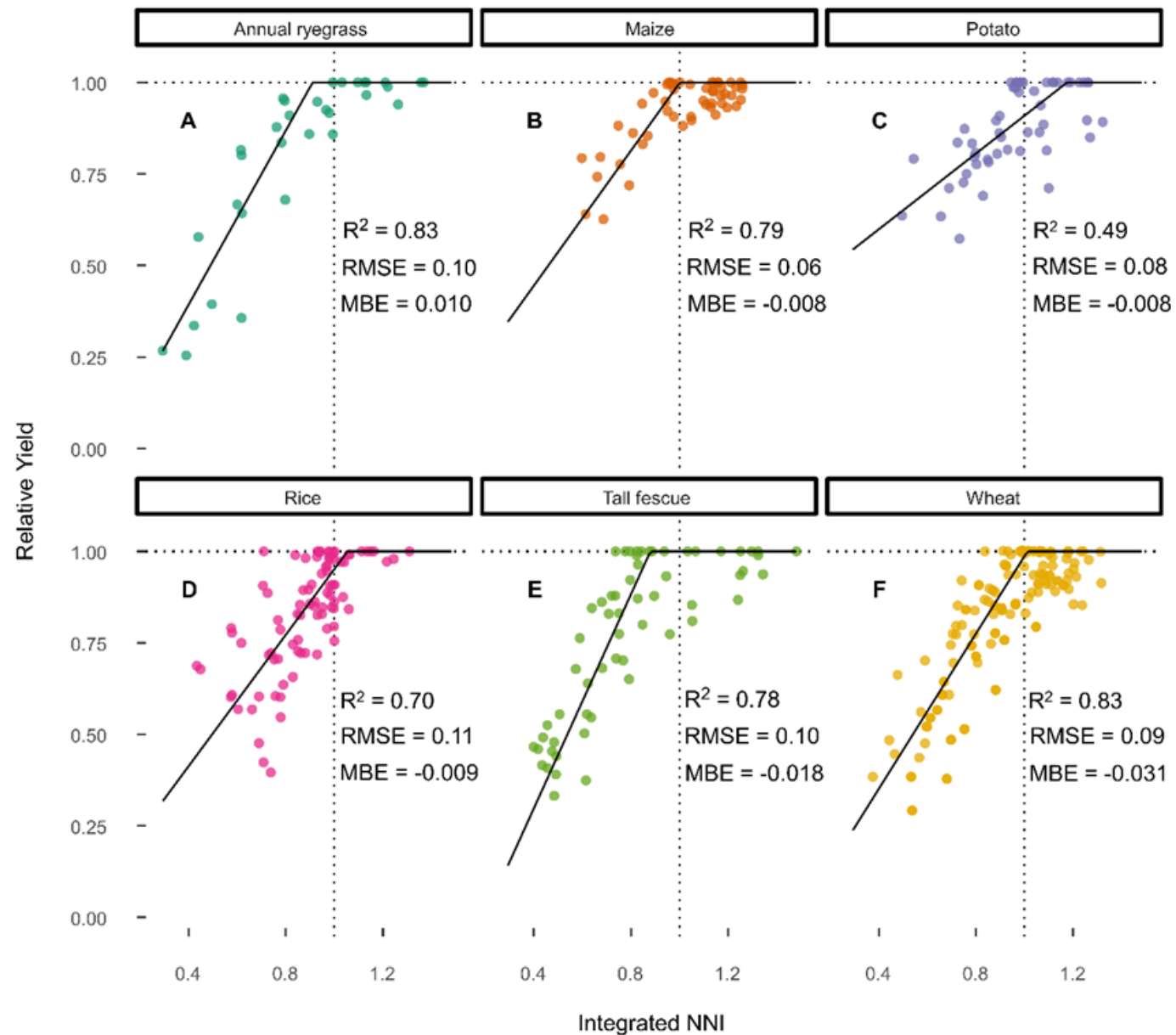
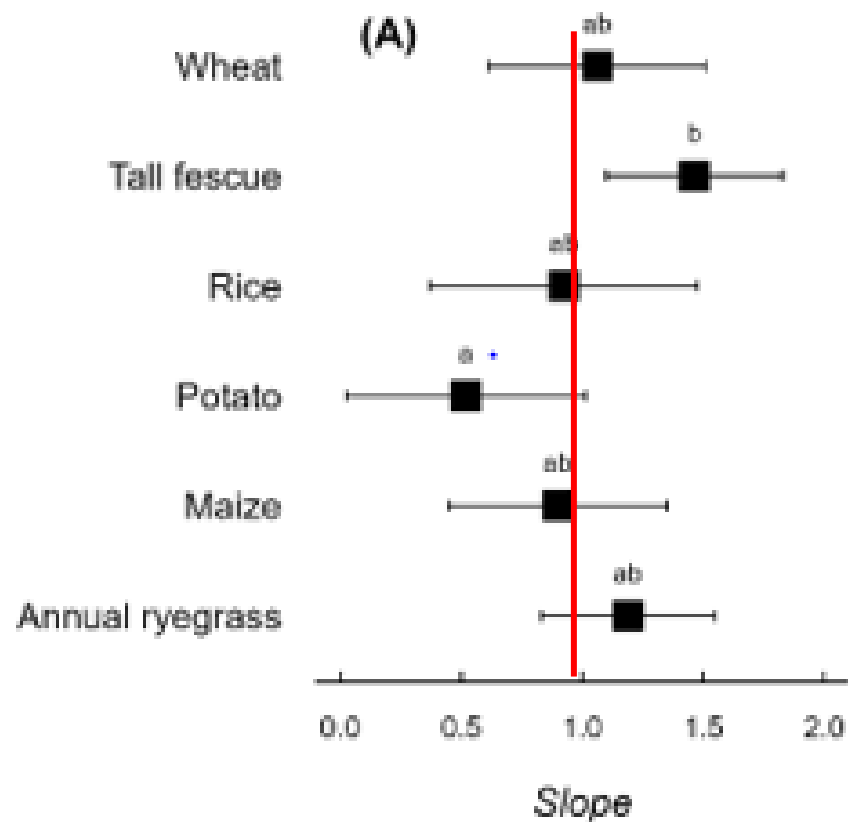


Riz: 0.659



Blé: 0.665

$$Y/Y_{\max} = f(\text{NNI}_{\text{int}})$$



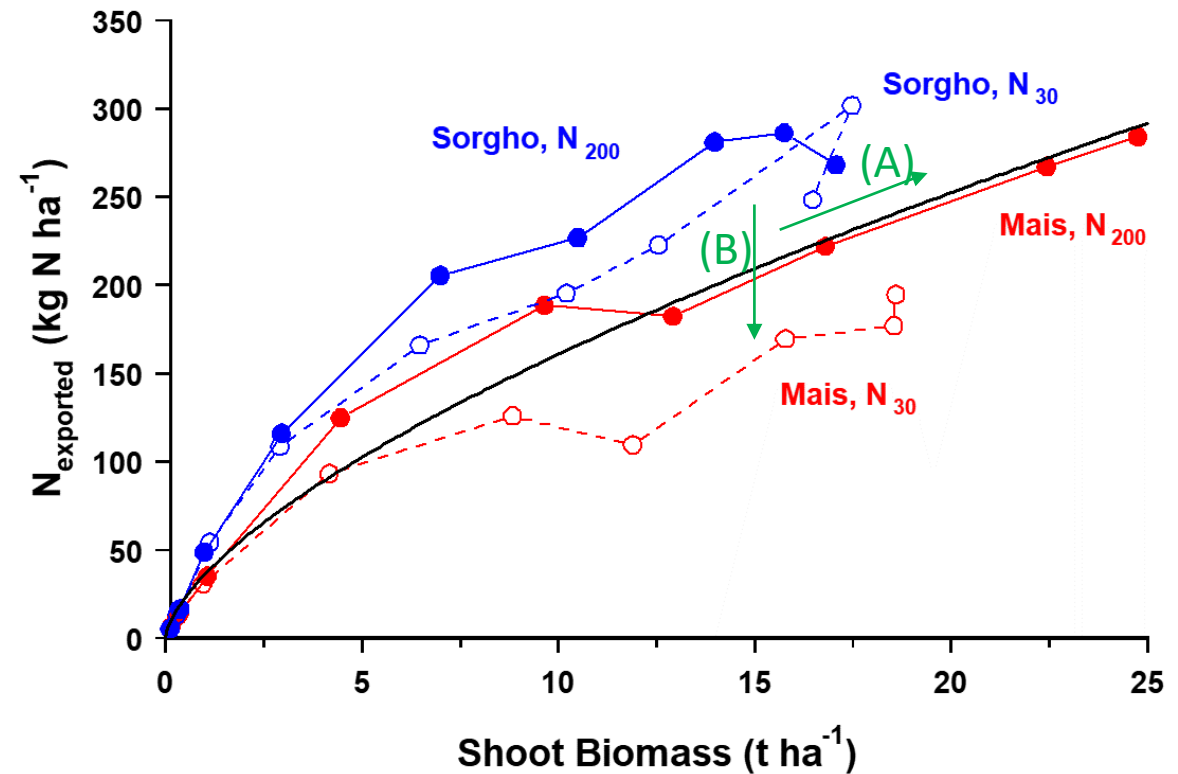
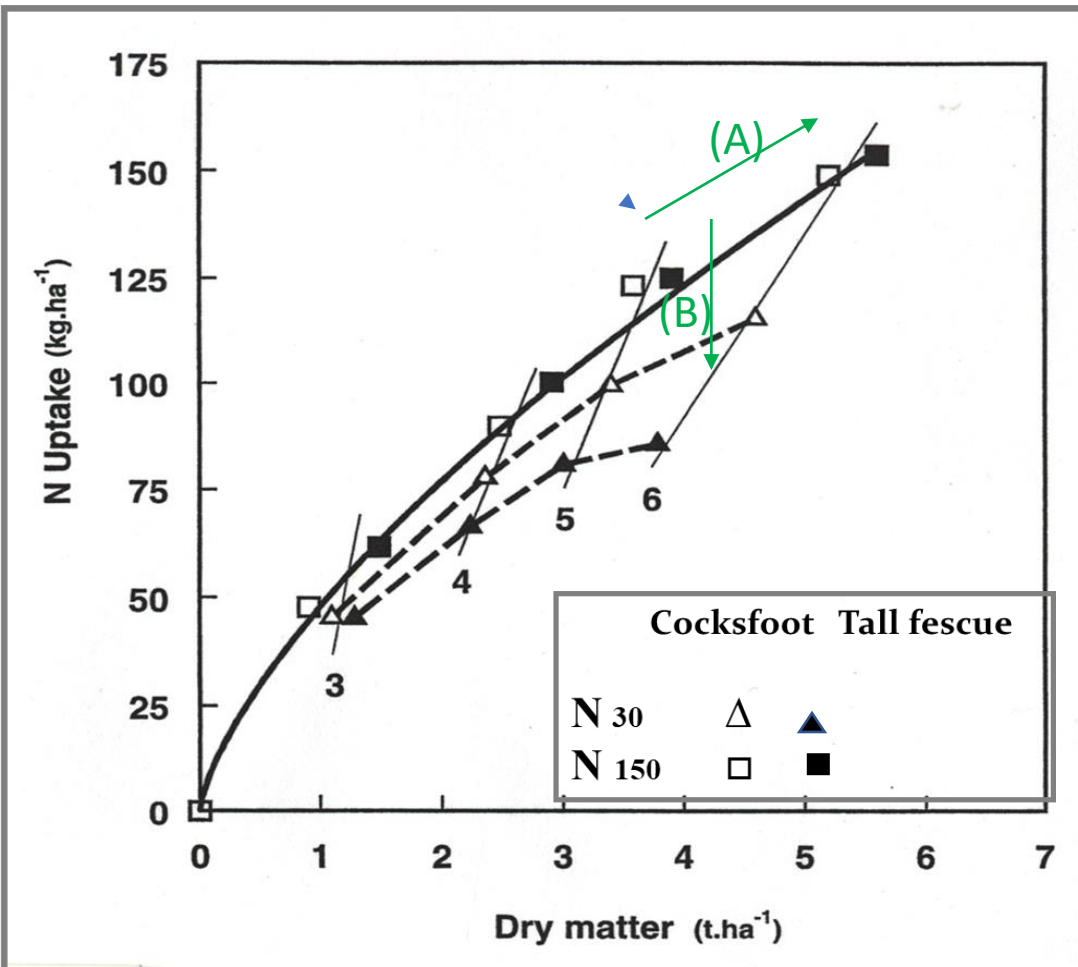
Ciampitti, Lemaire et al. travaux en cours

Il existe une forte variabilité interspécifique dans la capacité des cultures dans leur **capacité intrinsèque à prélever N**

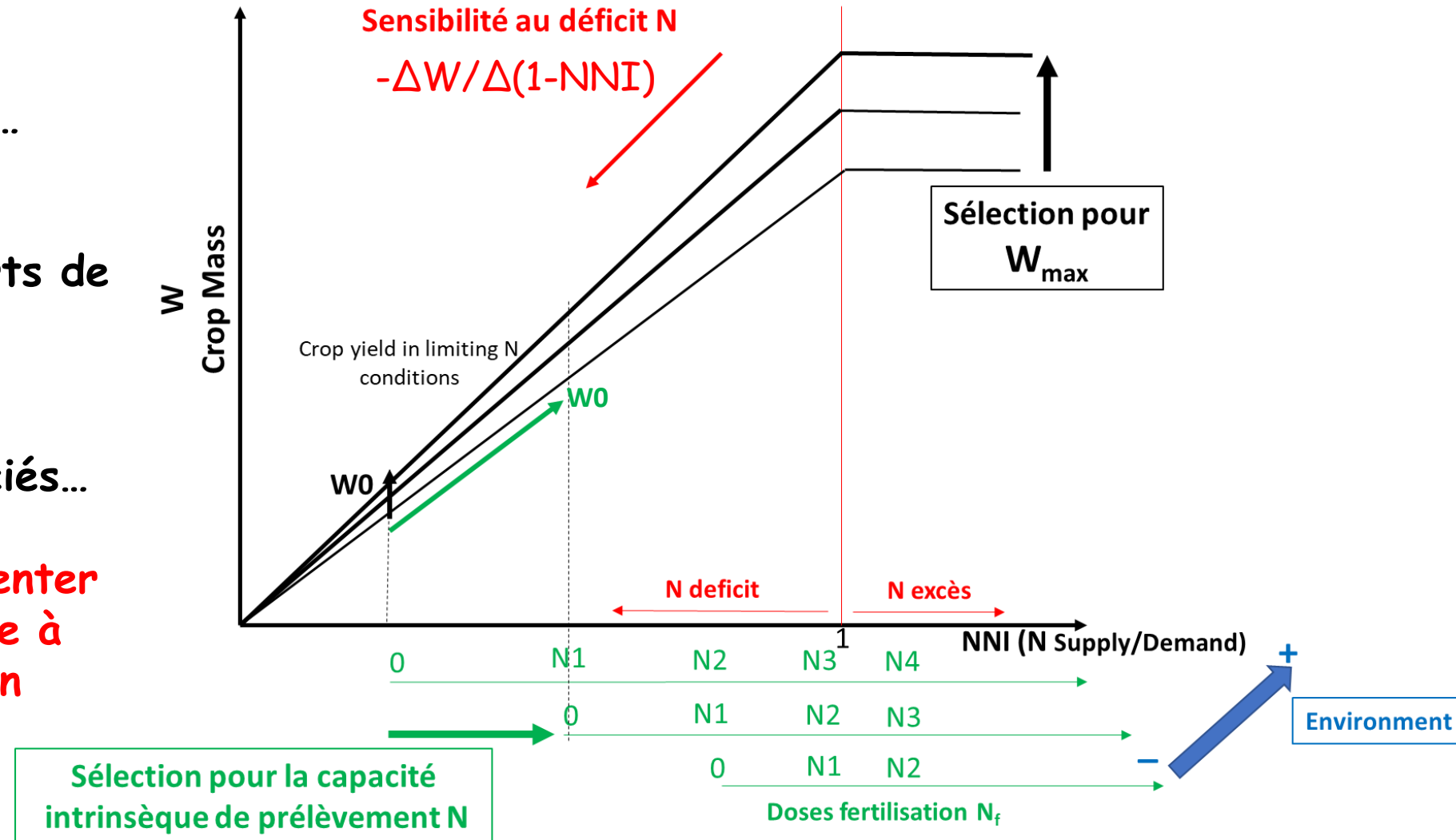
Variabilité intra spécifique?

(A): Variation de N_{upt} liée à W

(B): Capacité intrinsèque de N_{upt}



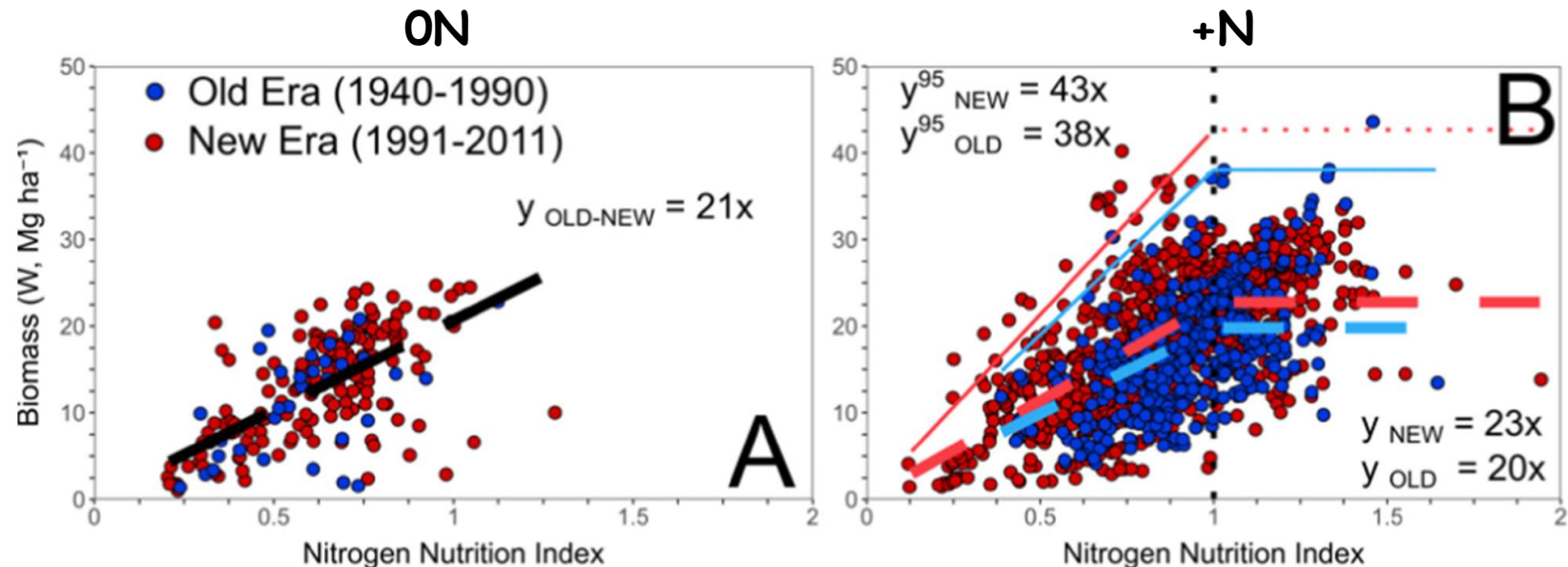
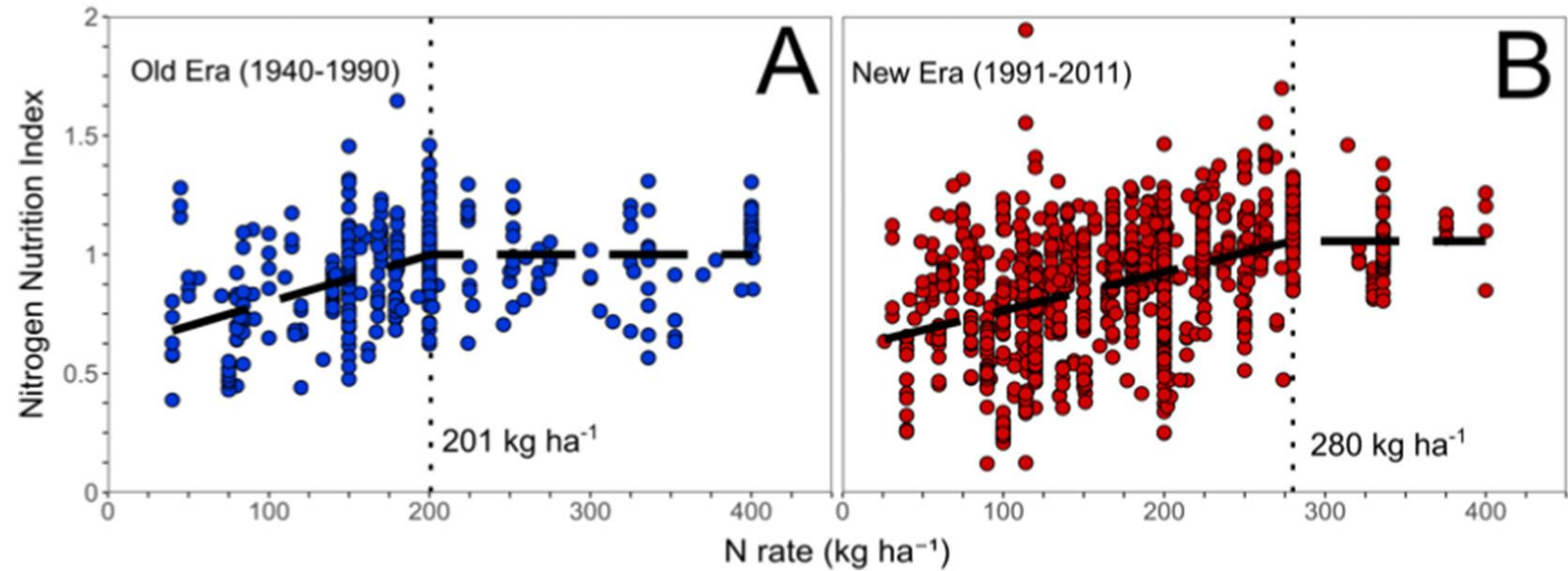
- Une sélection pour $W_{\max}$, entraîne donc aussi un accroissement de W_0 ...
- Mais entraîne aussi un accroissement de la sensibilité au déficit N...
- Ce qui entraîne une augmentation des apports de fertilisation...
- Et donc des risques environnementaux associés...
- Il importe donc d'augmenter la capacité de la culture à obtenir un INN élevé en absence d'apport de fertilisation.



Progrès génétique sur maïs en Amérique du Nord

Ciampiti & Lemaire, Sc.Tot.Env. 2022

- La biomasse maximum n'a été que faiblement augmentée 20-23 (/ha
- La réponse de W sans apport N (W0) n'a pas changée ($dW/dNNI=21$)
- Par contre il faut 80 kgN/ha de fertilisation N pour atteindre le maximum de biomasse

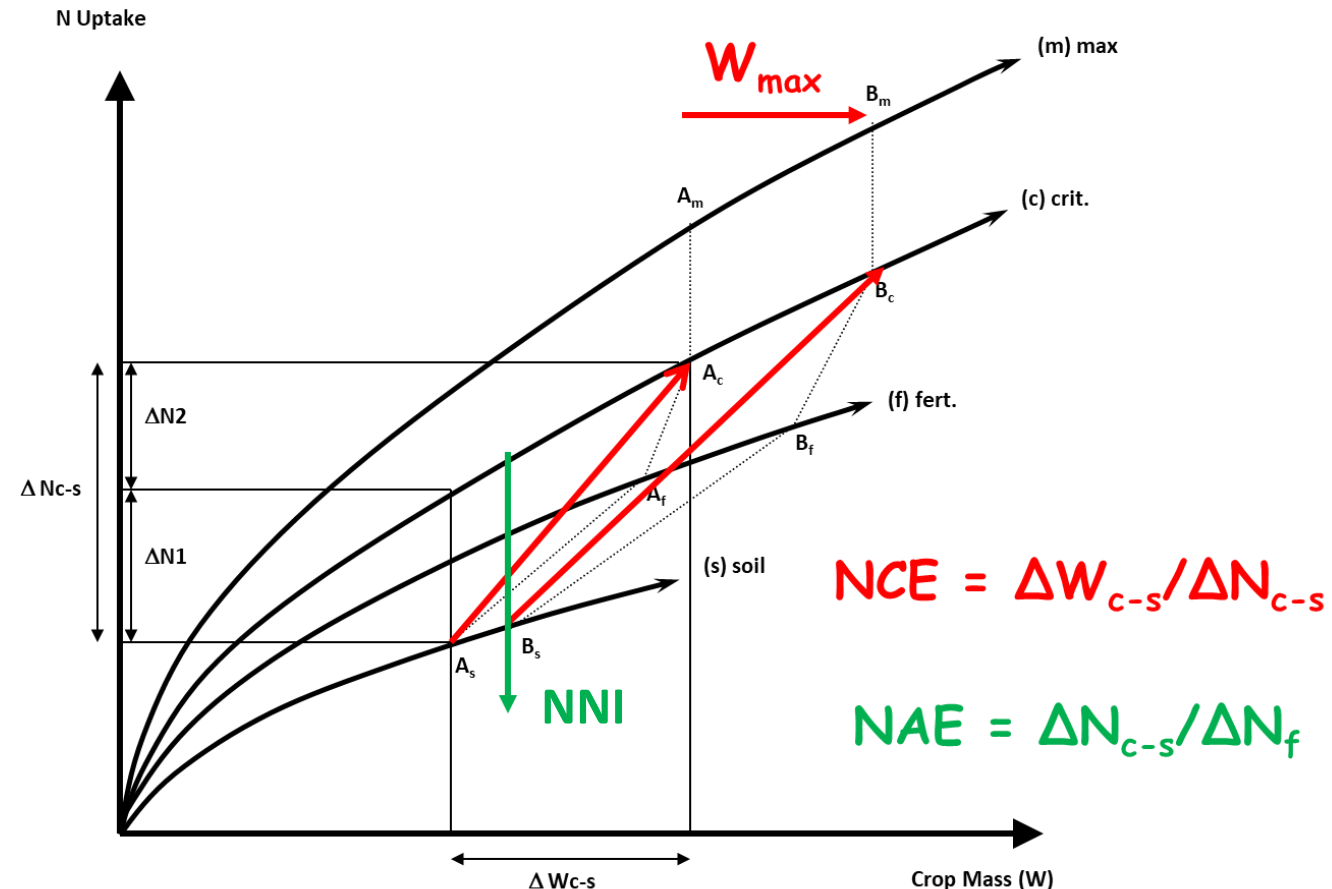


L'efficacité de l'azote est une métrique pour la réponse à la fertilisation
 Mais elle est **inopérante** pour rendre les cultures moins dépendantes des engrais

$$NUE = dN_{upt}/dN_t \cdot dY/dN_{upt}$$

$$NUE = NAE \cdot NCE$$

- NCE augmente avec W_{max} , donc une sélection pour W_{max} aboutit à un accroissement de NCE
- NCE diminue lorsque NNI augmente... donc tout progrès génétique doit se mesurer à NNI identique
- NAE augmente avec W_{max} ... (A) (B)
- NAE dépend donc de W_{max} , mais aussi de la capacité de la culture à réaliser un NNI élevé... avec $N_f=0$
- Mais alors une culture ayant un NAE élevé... aura un NCE d'autant plus faible que son NNI à $N_f=0$ sera élevé!!!
- Améliorer NCE et NAE est donc **contradictoire!!!**



Le rendement en grain et la qualité des récoltes

La croissance des grains est aussi l'objet d'une dilution de N

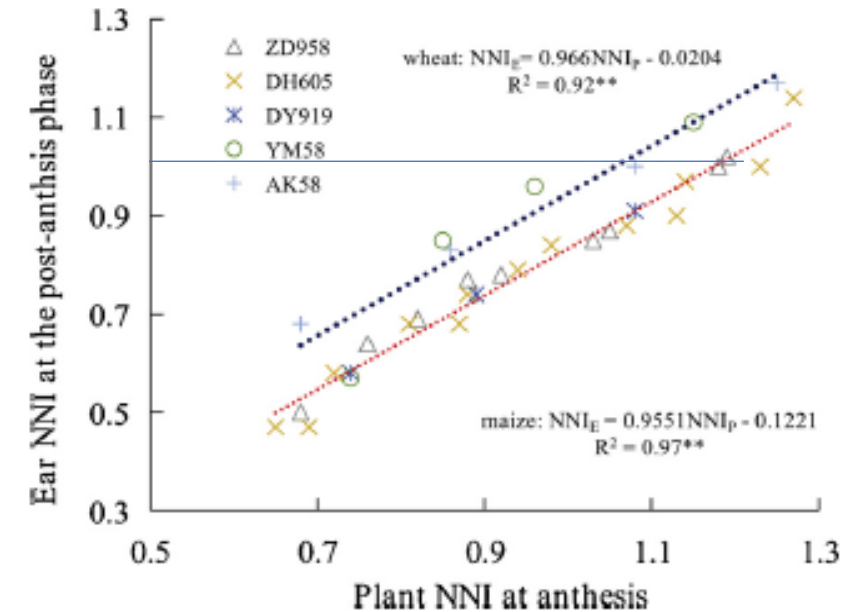
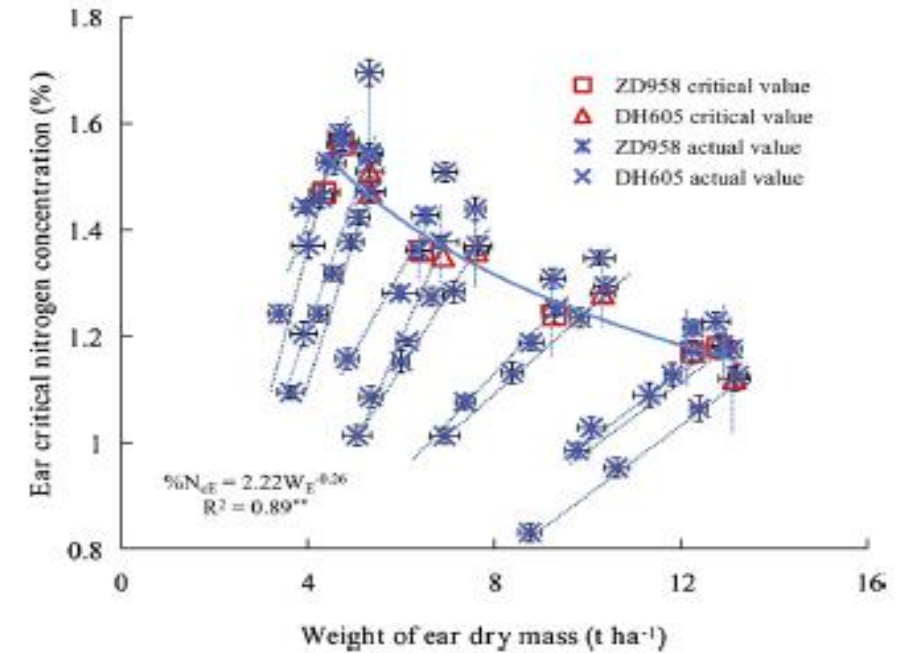
Antagonisme Rendement-Qualité

La baisse de qualité est une conséquence d'une bonne efficacité de N!!!

Diagnostic de nutrition N de la partie « grain » de la plante: « NNI-épi »

Le NNI-épi est fortement déterminé par le NNI à floraison...

Le Maïs nécessite un NNI-floraison > 1 plus important pour avoir un NNI-épis = 1 du fait d'une capacité d'absorption N post floraison limitée...

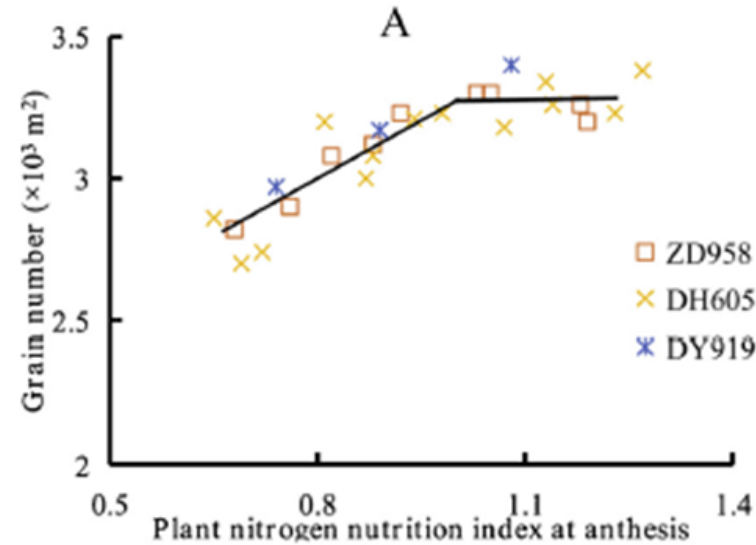


(Ben Zhao, Ata-Ul-Karim,Lemaire. EJA, 2020)

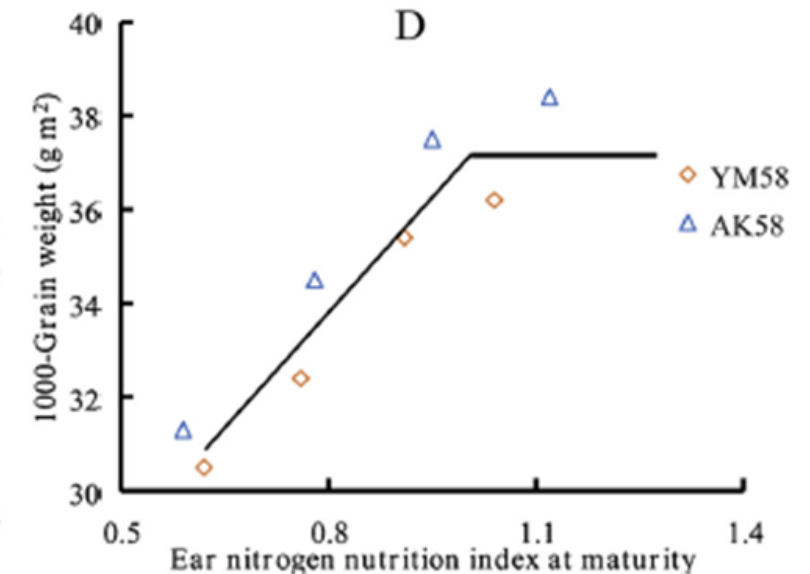
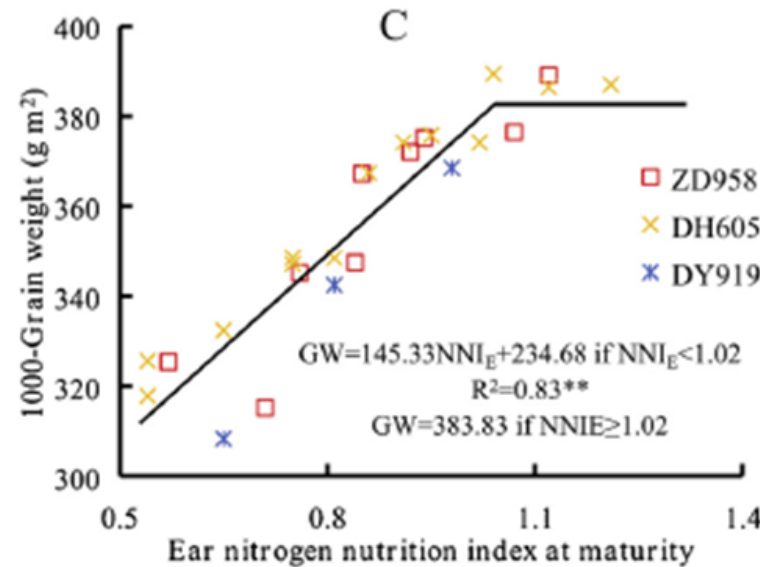
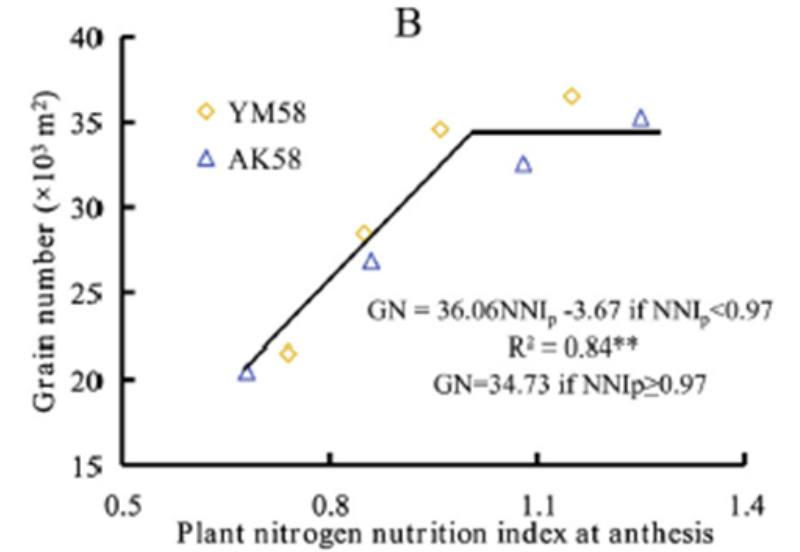
NNI-floraison permet d'optimiser la
Biomasse ($W_{\max}$) et le Nombre de
grain

NNI-grain permet d'optimiser le
Poids de 1000 grains et la Qualité.

Maïs



Blé



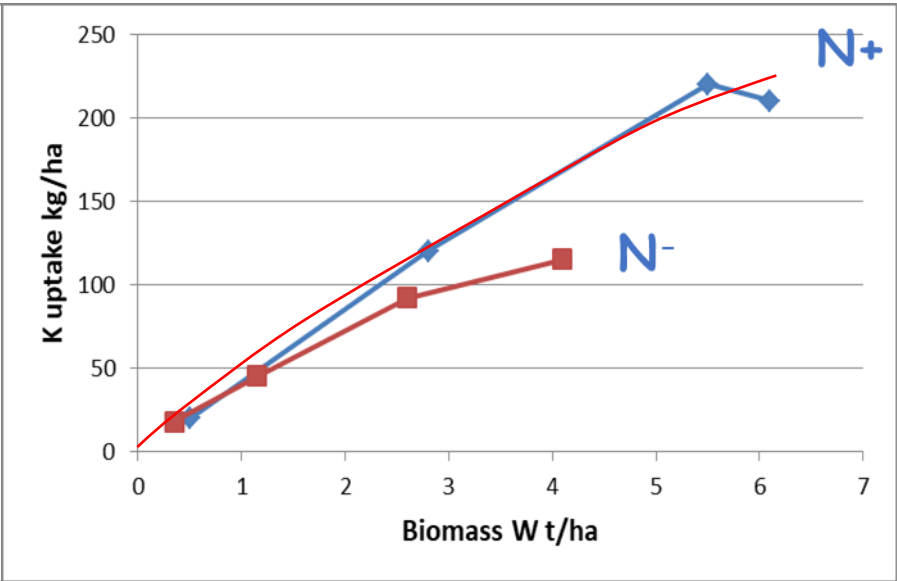
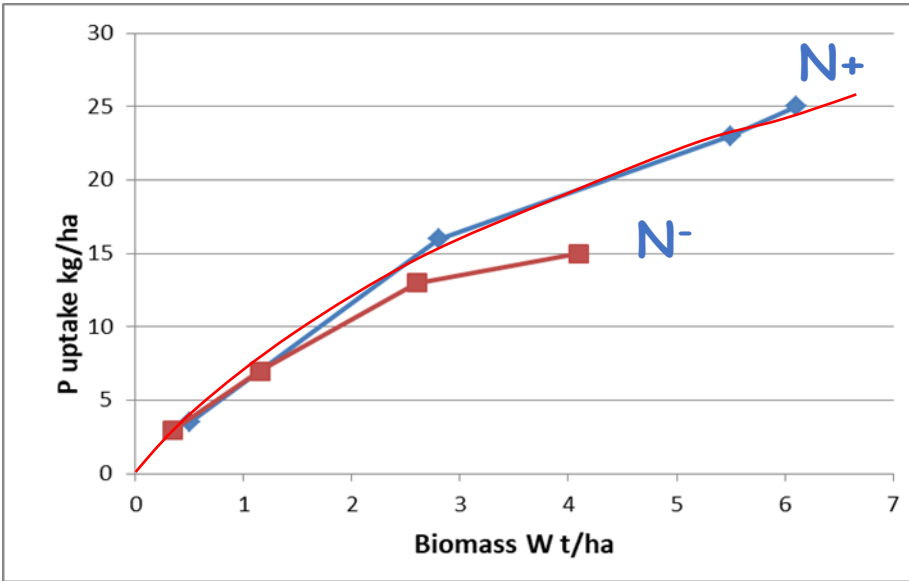
- Si on veut réduire la dépendance des cultures vis-à-vis de la fertilisation N, il faut améliorer leur capacité intrinsèque de prélèvement des ressources N du sol.
- Ceci passe par une sélection pour les génotypes ayant la capacité (1) d'avoir un Y max satisfaisant... (2) mais aussi d'avoir un NNI le plus élevé possible en absence d'apports de fertilisants
- Mais faire (1) sans (2) c'est au contraire accroître la dépendance des cultures à la fertilisation N

Qu'en est-il pour les autres éléments nutritifs?
P, K...

Comme pour N, l'absorption de P, K... est régulé par la croissance W:

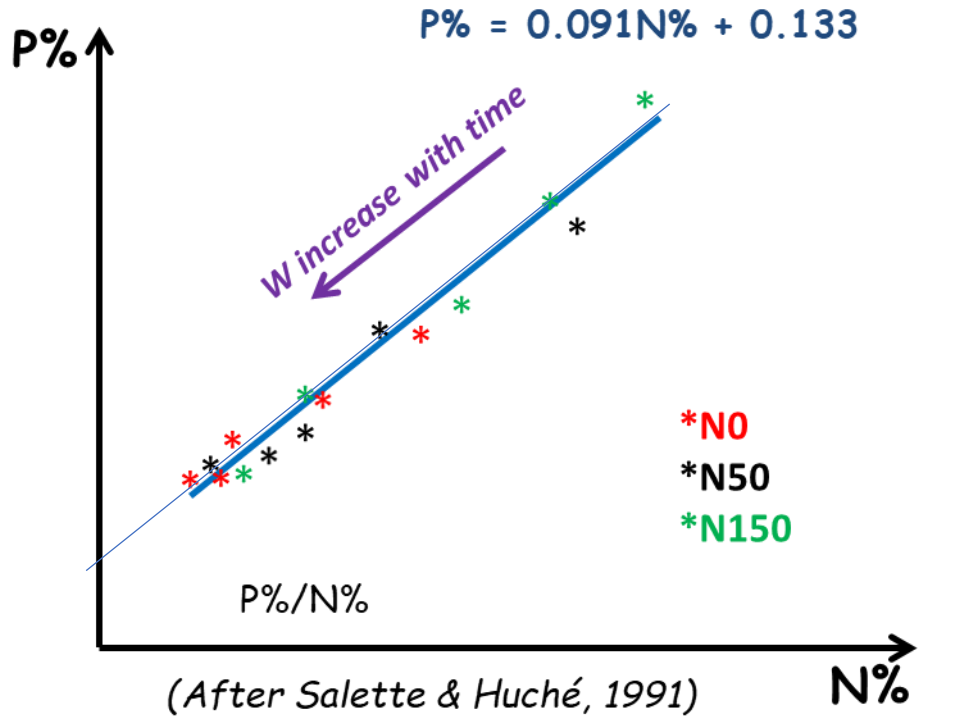
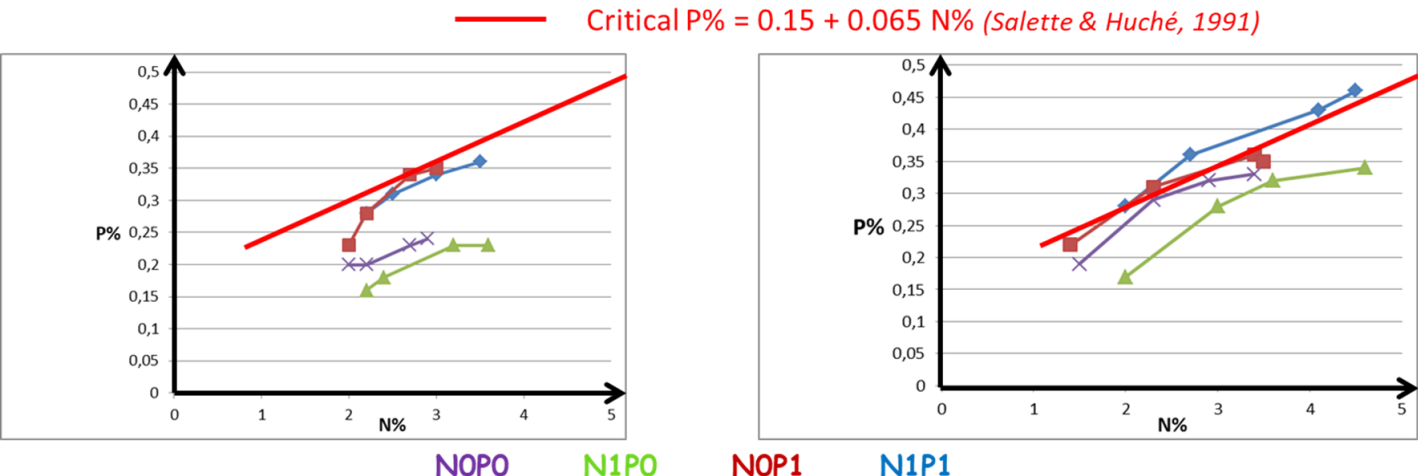
$$P = \alpha W^\beta$$

$$K = \gamma W^\delta$$



Mais il y a interaction avec N

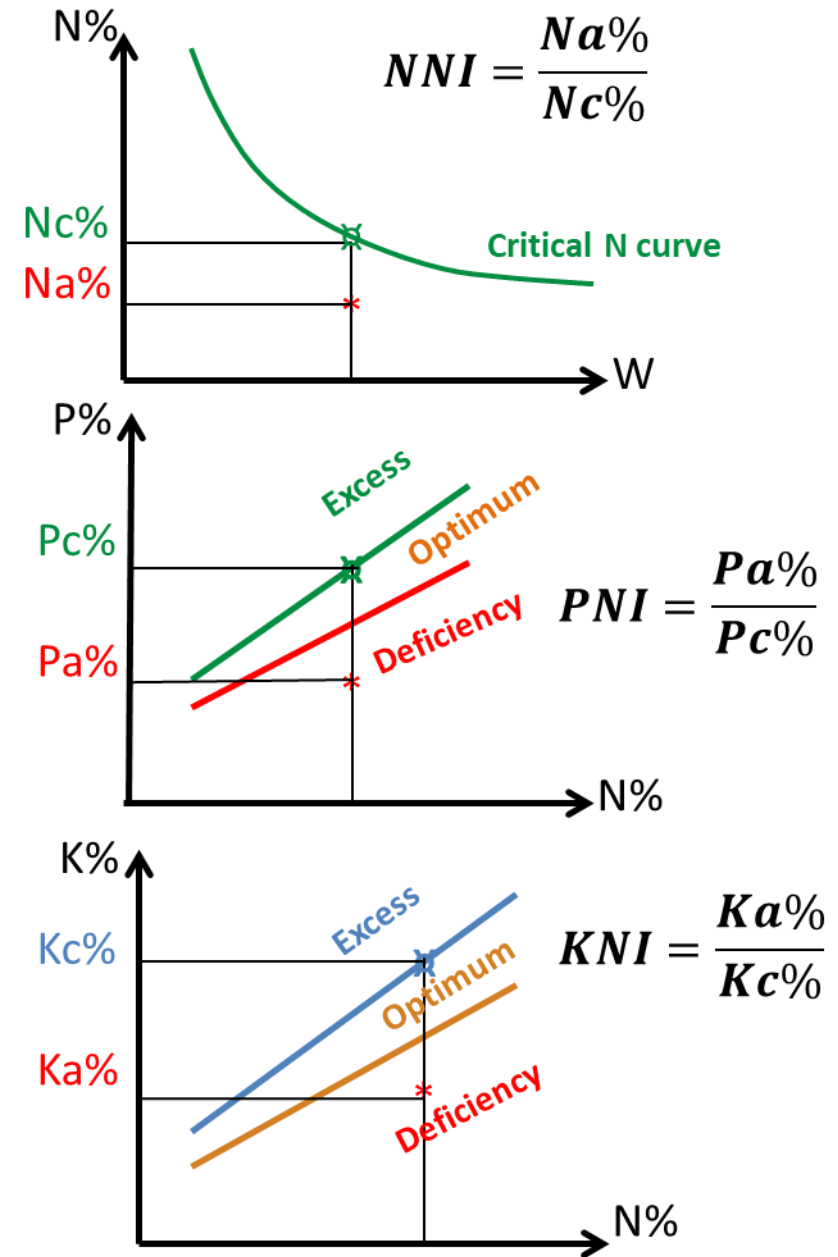
Lorsqu'on accroît la disponibilité de N en sol déficient en P on accroît le déficit P de la culture



Vers une approche globale et intégrée
de la nutrition minérale et de la
fertilisation des cultures

D'une approche « pronostic » à une
approche « diagnostic »

Pourquoi demander au sol ce qu'il pourrait
fournir à la plante (analyses de sol)....
Alors qu'il suffit de demander à la culture
ce que le sol lui a permis de prélever en
fonction de sa propre demande ?



La sécheresse diminue la disponibilité des éléments minéraux du sol pour les plantes

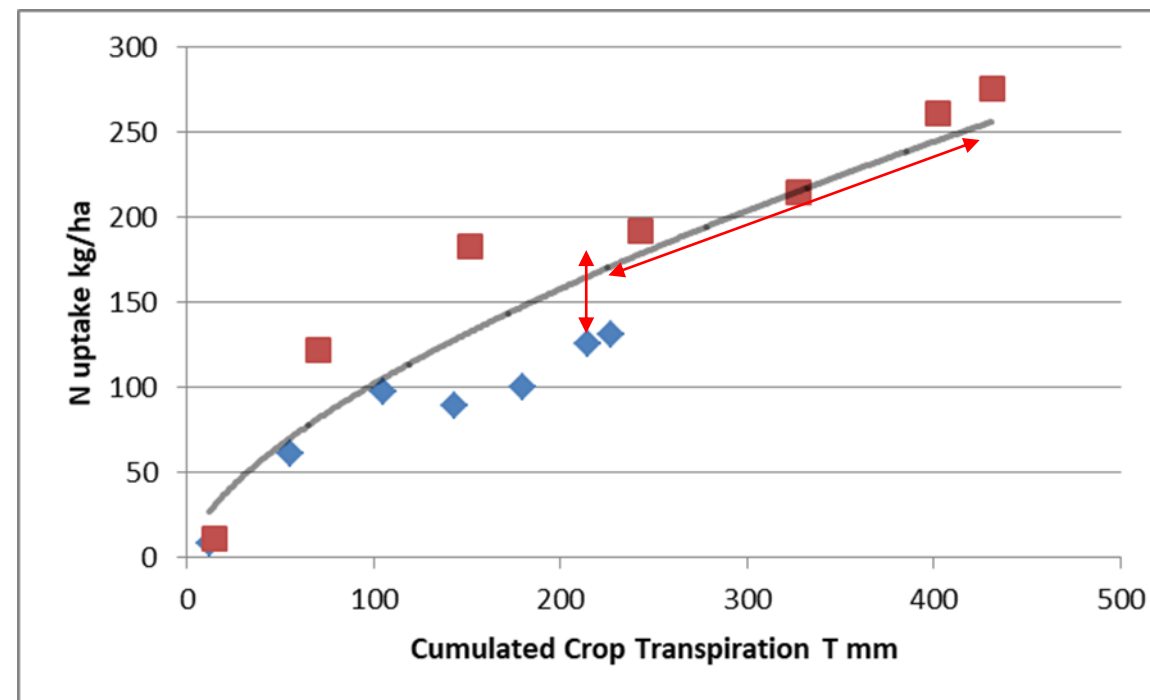
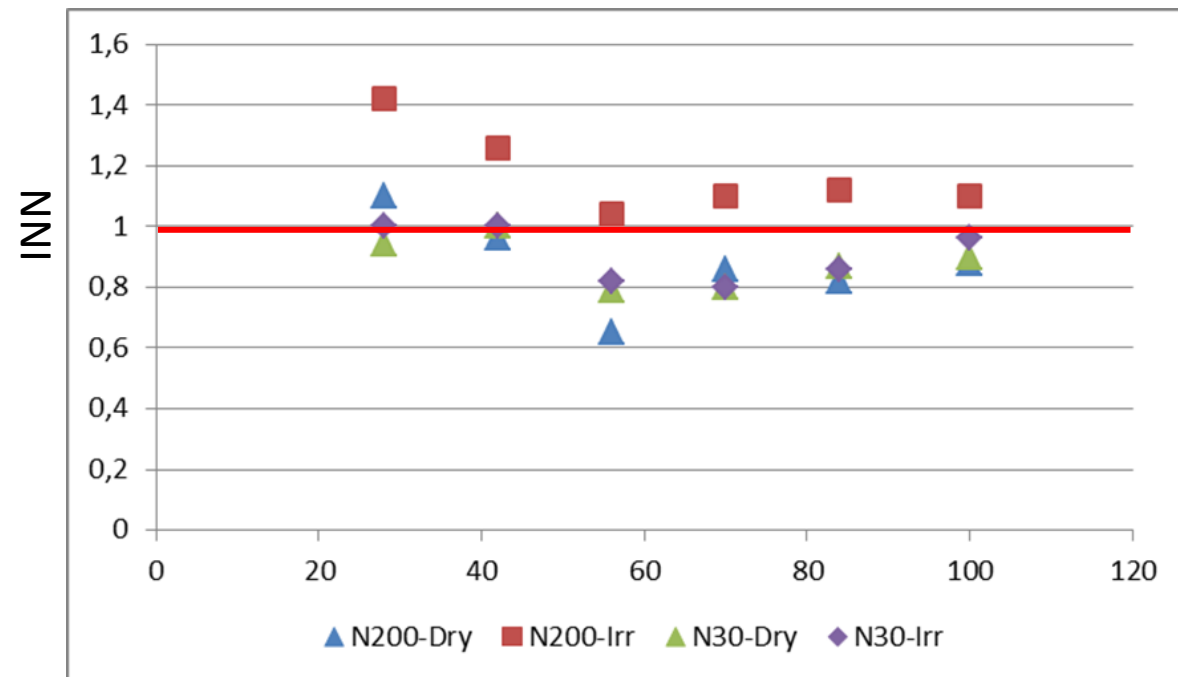
La disponibilité des éléments minéraux du sol pour les plantes est liée à leur alimentation en eau.

Le rapport N/Eau Transpiré du sorgho > maïs lui donne une meilleure adaptation en sol sec...

En situation de sécheresse le maïs souffre d'abord du manque de N avant que du manque d'eau!!!

Qu'en est-il de la nutrition P?

L'analyse de l'Efficiencia de l'Eau ne peut donc pas être réalisée sans étude des effets sécheresse sur la nutrition minérale des plantes



Conclusions (1)

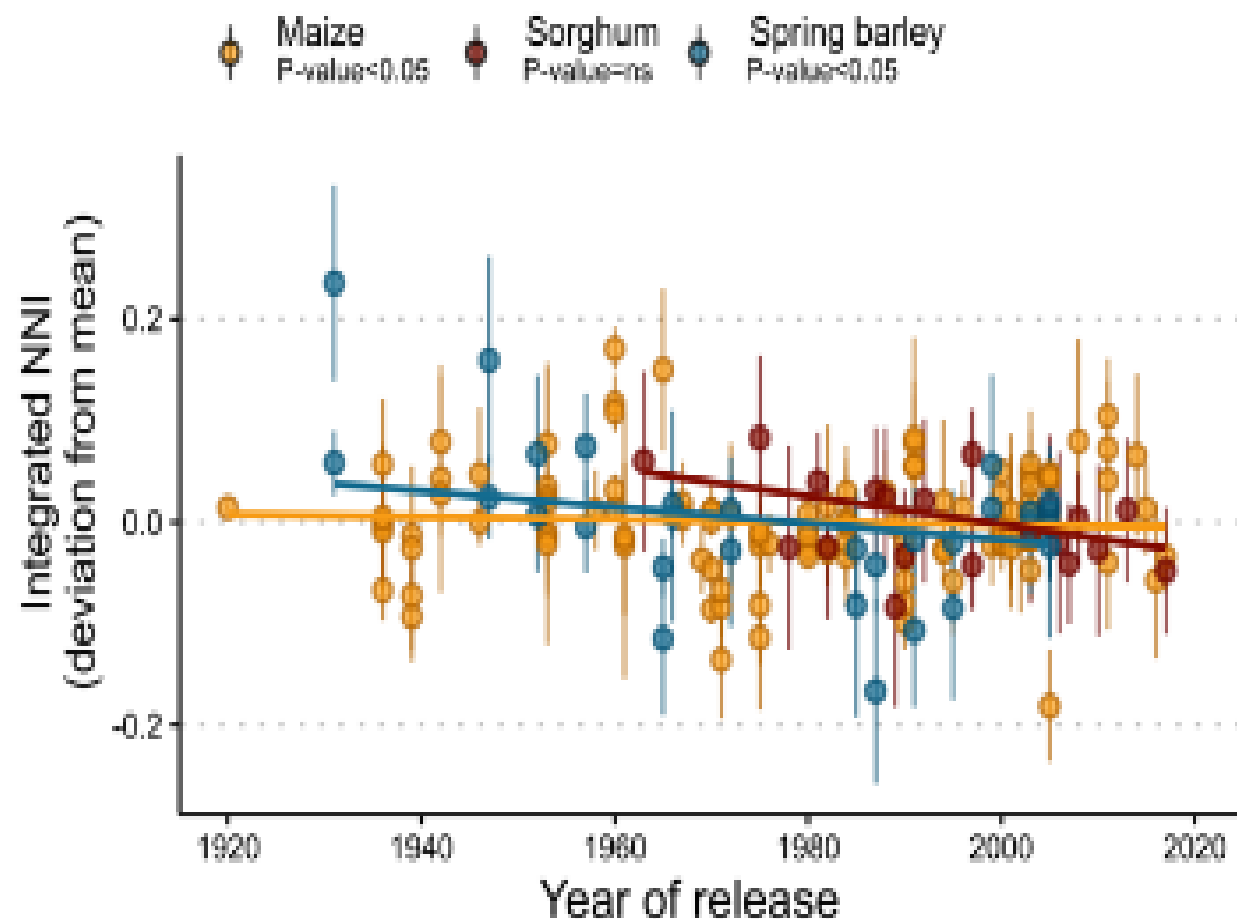
- La **disponibilité** des nutriments minéraux n'est pas un **facteur externe** à la plante, mais une **propriété émergente** du système sol-microbiome-plante. (voir Briat et al. EJA, 2020)
- Les analyses de types **apports-réponses** ou **stocks-bilans** ne sont donc pas suffisantes
- **NCE est peu variable entre géotypes** (excepté C3 vs C4) et son augmentation est un sous produit **trivial** de l'augmentation de la biomasse des cultures (**allométrie N-W**)
- **NAE dépend aussi de la biomasse...** Mais, à même biomasse, NAE dépend de la capacité d'un géotype **à maintenir un NNI élevé** dans un milieu pauvre en N.
- Les autres éléments P et K obéissent aux mêmes lois d'allométrie que N. **Une approche multi-éléments est indispensable.**
- Il est important d'identifier **les traits racinaires** impliqués dans la capacité des plantes à maintenir **des NNI, PNI ou KNI élevés** en absence d'apports d'engrais...
- Ces **trait racinaires** doivent être étudiés aussi vis-à-vis **du prélèvement de l'eau** en conditions de **sécheresse**...

Conclusions (2)

- Il est important d'identifier les **traits racinaires** impliqués dans la **capacité des plantes à prospecter** le sol et y prélever les ressources minérales afin maintenir des **NNI, PNI ou KNI** élevés en absence d'apports d'engrais...
- Ces **traits racinaires** doivent être étudiés aussi vis-à-vis du prélèvement de l'eau en conditions de sécheresse...
- Ces traits racinaires sont liés à:
 - développement, **morphologie et architecture** du système racinaire
 - effets des plantes sur le **turn-over microbien N-P-K** dans le sol
 - efficacité des **transporteurs membranaires** des racines
 - **interactions plantes-microbiome** du sol (mycorhizes...)

Je vous remercie pour votre attention

A



B

