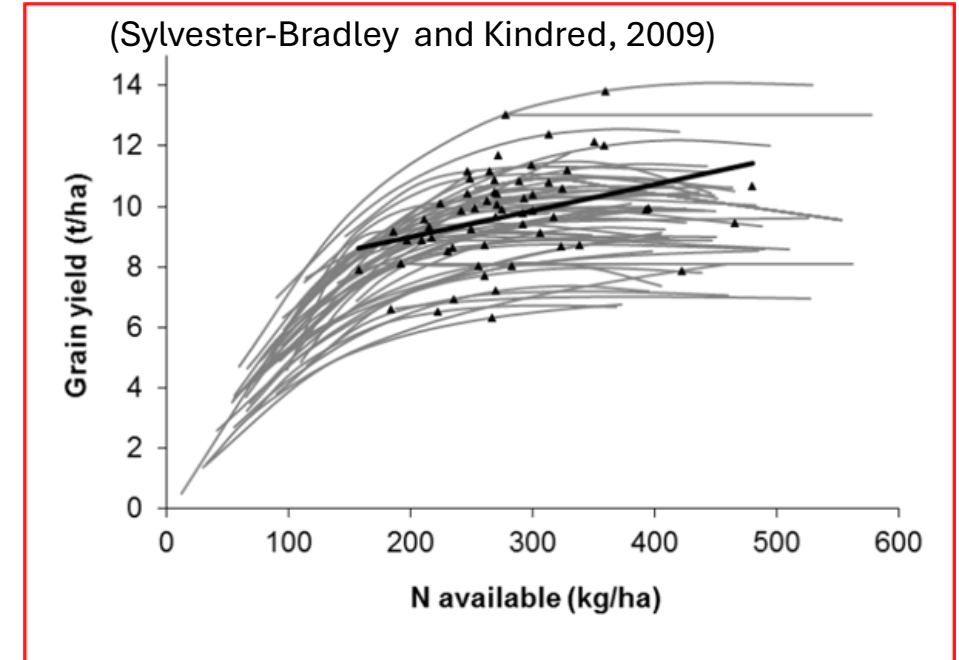
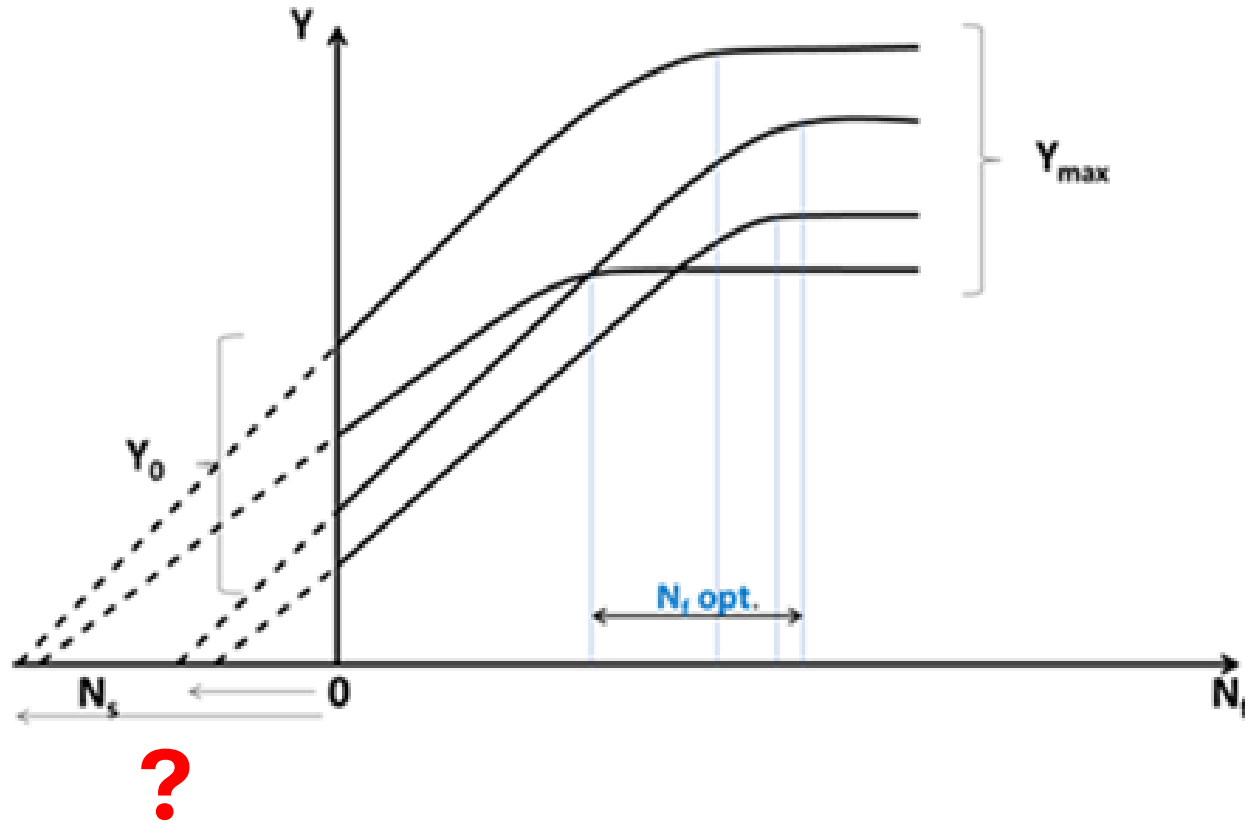


L'état des connaissances actuelles. Un nouveau paradigme pour l'analyse de la nutrition azotée des cultures.

Gilles LEMAIRE, Sylvie RECOUS, Alain GOJON

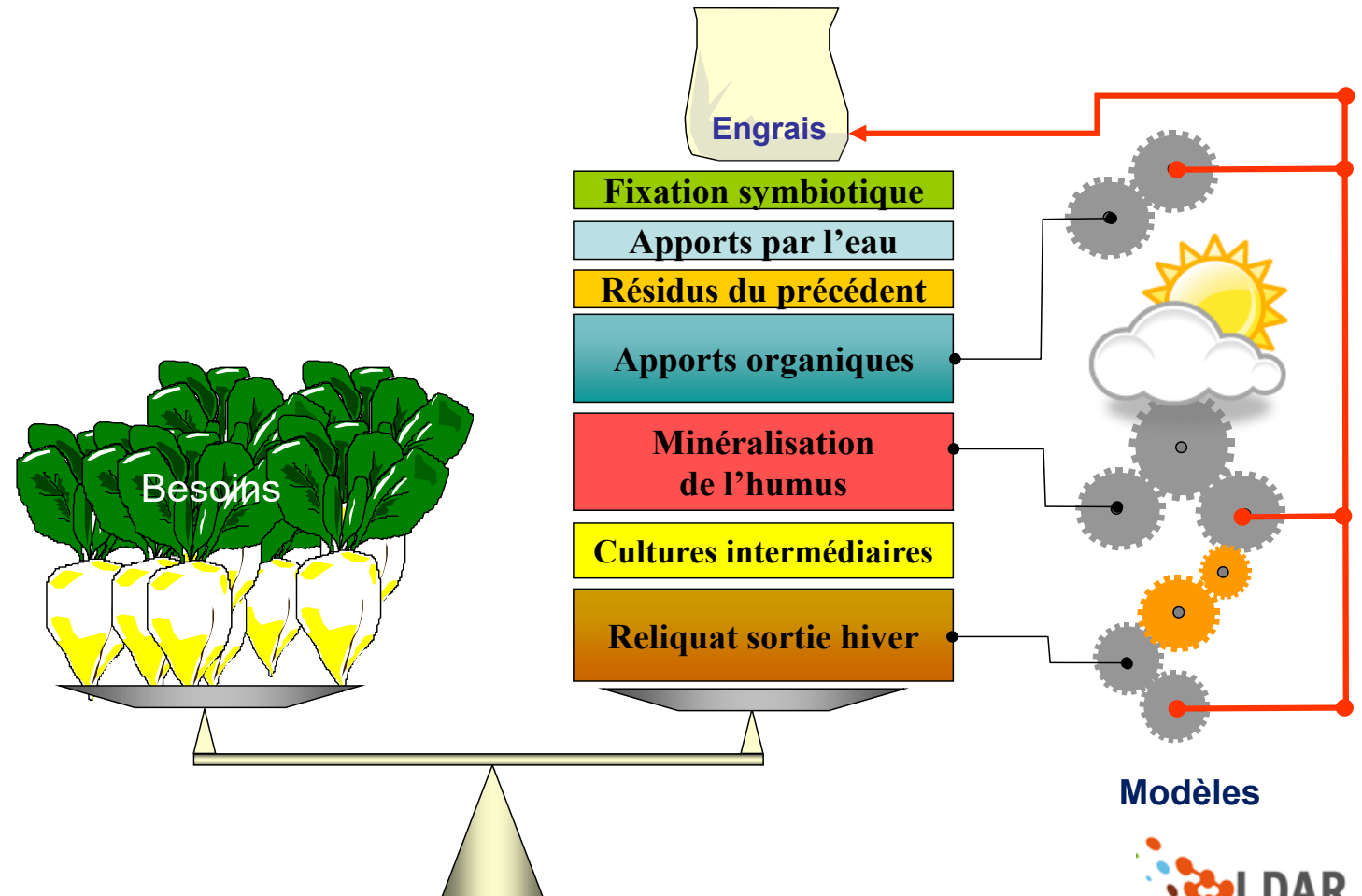
L'approche classique: réponse du rendement à des doses croissantes d'engrais



- La plante ne répond pas à N_f mais à $(N_s + N_f)$
- $(N_{f, opt.})$ varie donc avec Y_{max} et avec N_s (Y_0)
- D'où une grande incertitude sur $(N_{f, opt.})$
- Et une tendance à apporter « *un peu trop pour être certain d'avoir assez* »

La méthode du bilan N minéral a permis de réduire une partie de l'incertitude sur la détermination de la dose optimale

- En formalisant les sources d'azote du sol, mises en regard des besoins en azote des cultures (Méthode du bilan, COMIFER)
- En adaptant les références aux contextes locaux (notamment sols et climat) et en les élargissant (ex. Azobil, 1990)
- En rendant ces bilans dynamiques au cours du cycle cultural (Azofert 2003, Machet et al., 2017)



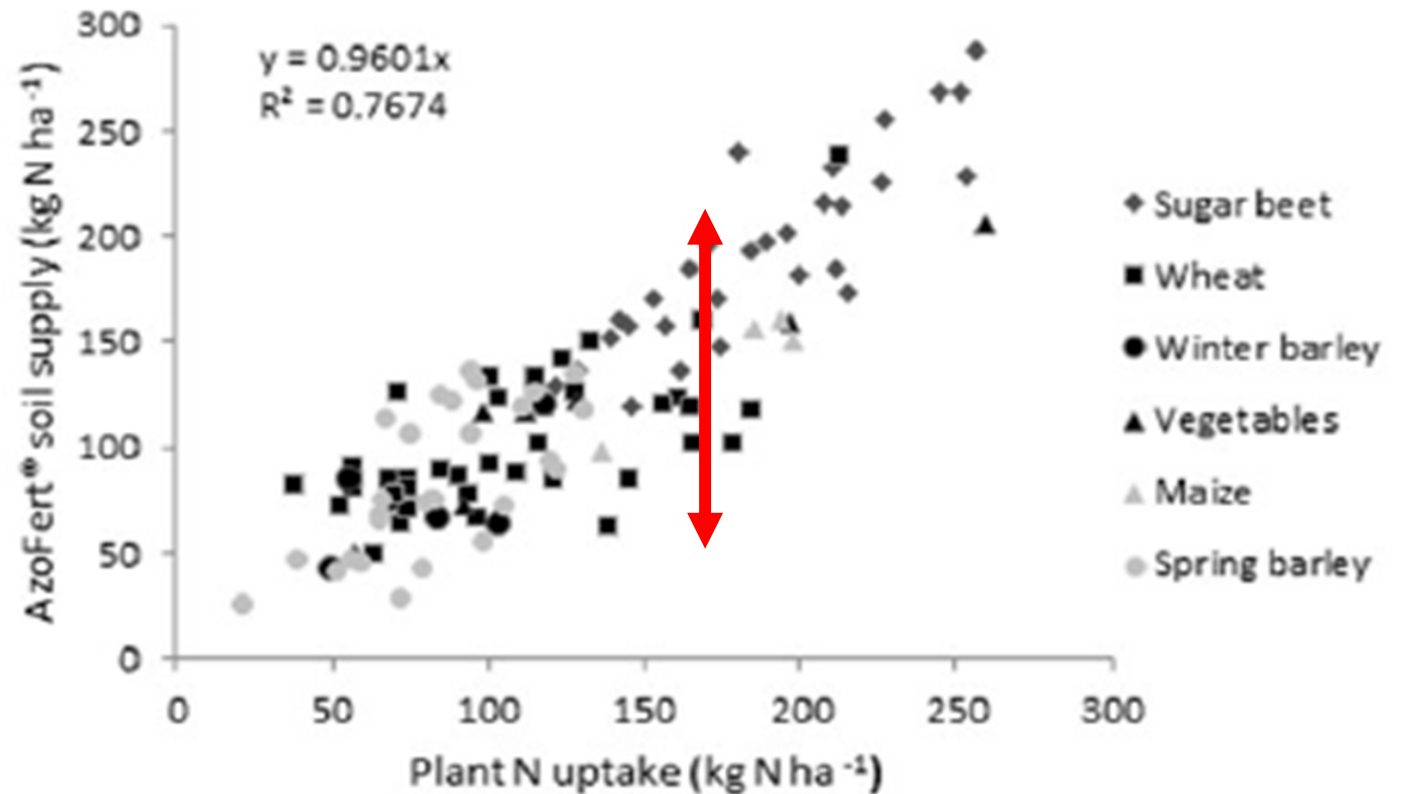
Dose engrais : Besoins - Fournitures

Modèles

Mais l'incertitude des modèles permettant de calculer la dose N optimale reste encore trop large

- La modélisation de la fourniture du sol est trop incertaine
- Une erreur de 20 kg N /ha en excès correspond à une concentration des eaux de drainage d'environ 50 mg NO₃⁻/ litre !!!
- De plus comme Y_{max} est tout aussi variable et imprévisible, il s'ensuit **une sur-fertilisation des cultures**, du fait de l'aversion des agriculteurs au risque de non-atteinte du rendement objectif.

Voir Ravier et al. 2016

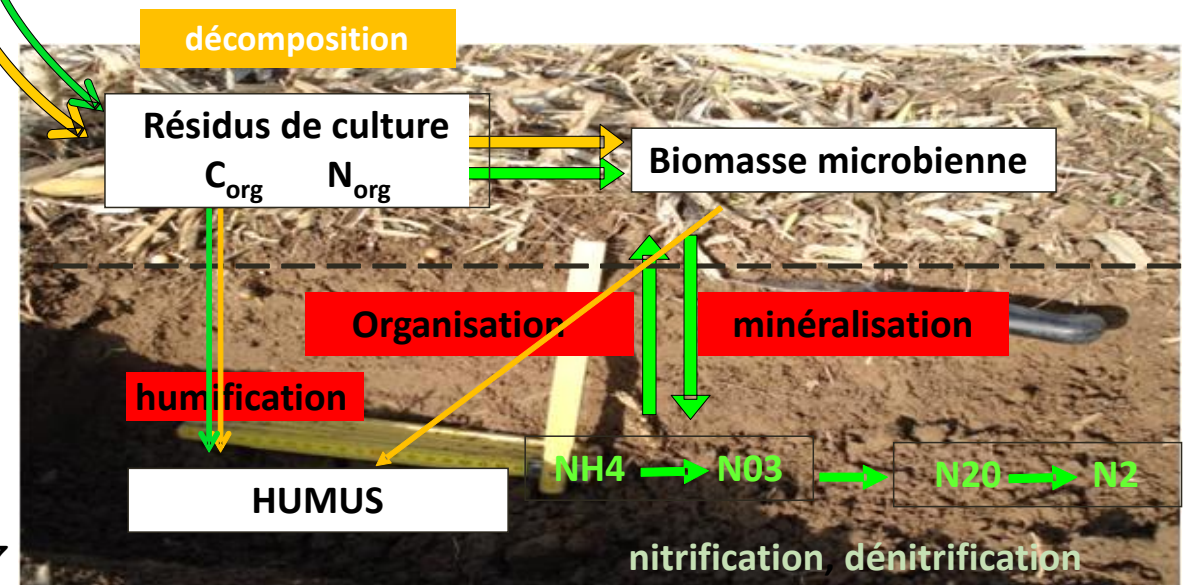


D'après Machet et al. 2017

Couplage des cycles du carbone et de l'azote dans les sols par les activités microbiennes hétérotrophes

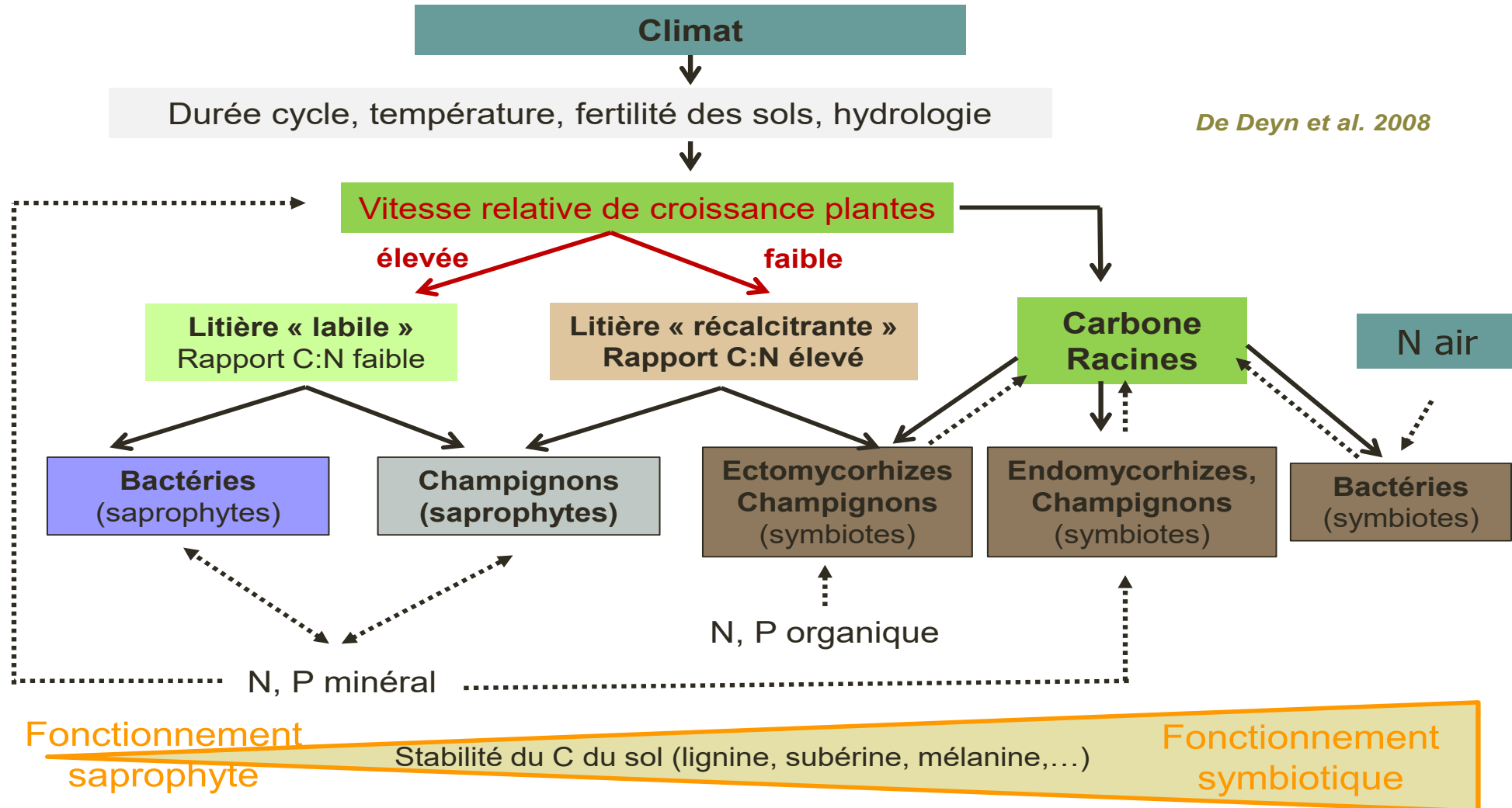
- Les flux « élémentaires » d'azote ou **minéralisation et organisation brutes**, sont beaucoup plus importants que leur résultante, la minéralisation nette
- L'intensité de ces flux dépend de la nature et la quantité des entrées de **substrats carbonés** dans les sols, notamment litières végétales aériennes et racinaires
- Les approches isotopiques (^{13}C et ^{15}N) ont permis de **quantifier** l'effet des pratiques culturales (type de couverts végétaux, de sols, travail du sol, fertilisation etc.) et les facteurs environnementaux sur **ces flux**

Recyclage
des litières
végétales



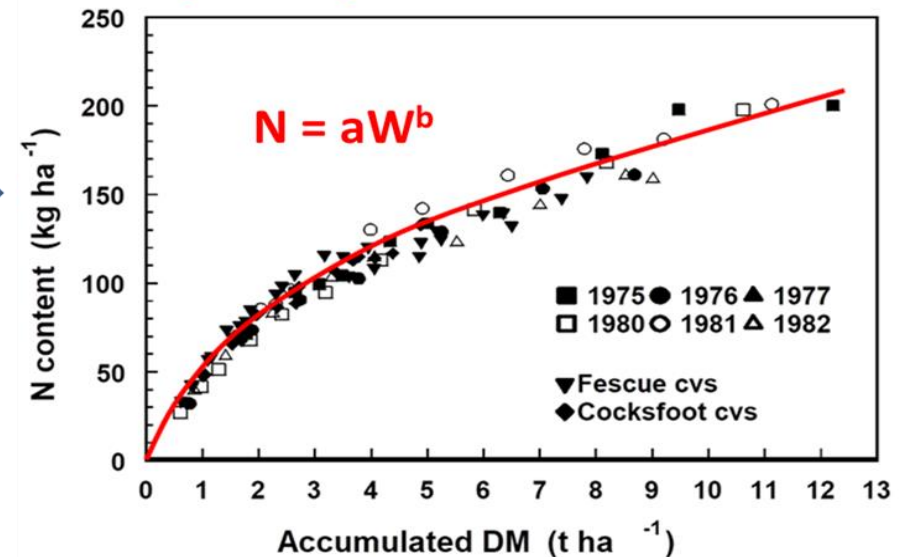
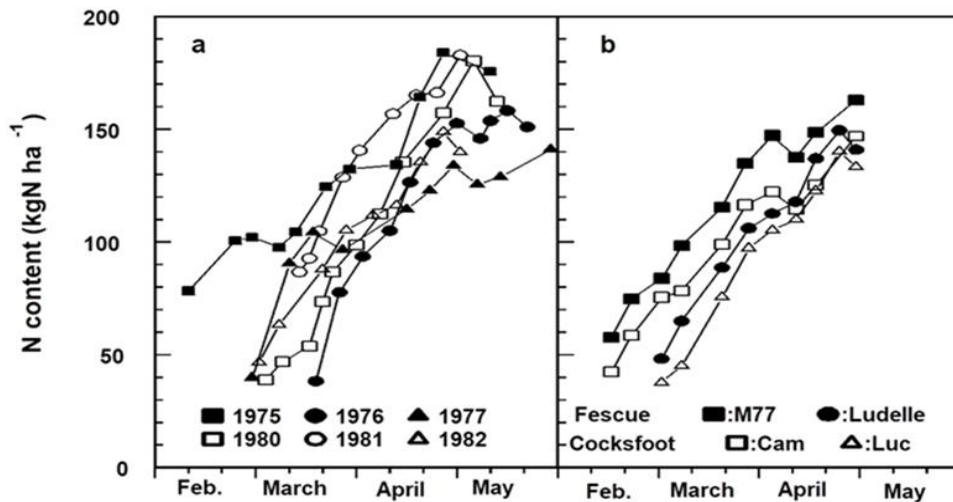
Adapté de Recous et al., 2017

Relations directes & indirectes entre types de cultures, communautés du sol, carbone et nutriments dans les agroécosystèmes



La co-régulation de l'absorption de N par l'offre en N minéral du sol et par la croissance de la plante.

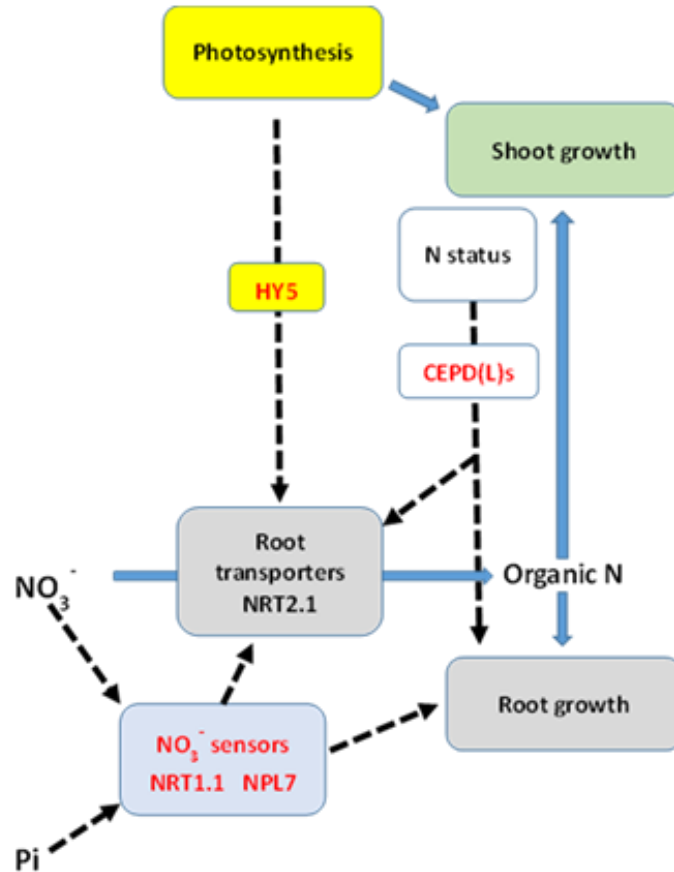
Le prélèvement de N est rétro-régulé par la dynamique de croissance



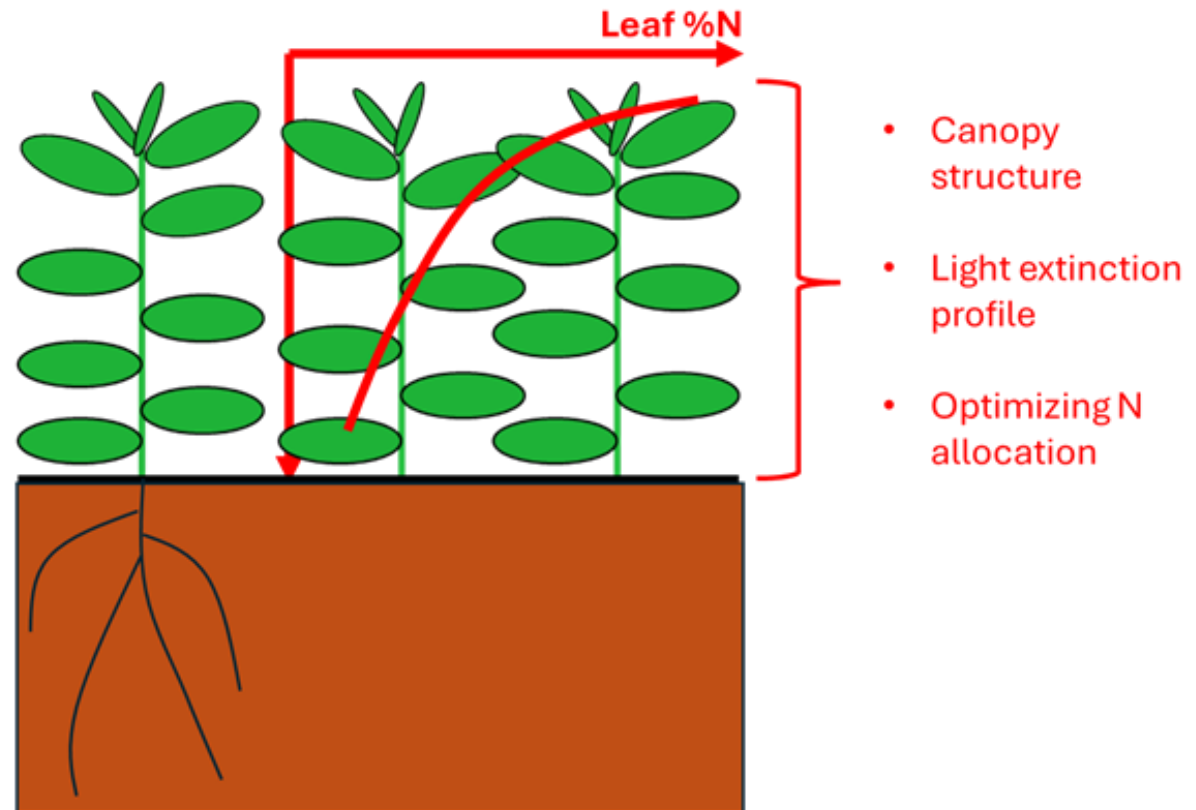
- Des **variations de croissance** (Génotype-Environnement) entraînent des variations correspondantes de prélèvements de N;
- Les besoins en N des cultures $dN/dW = abW^{b-1}$ diminuent lorsque la biomasse de la culture (W) augmente;
- Le **prélèvement de N** ne reflète donc plus la seule disponibilité de N dans le sol [NO_3^- : NH_4^+] puisqu'il **dépend** aussi de la **capacité de croissance de la plante** (dW/dt)

Rétro-contrôle de l'absorption racinaire de N par la croissance à l'échelle de la plante et de la culture

A- Molecular regulation of N absorption at whole plant level



B- N allocation within canopy



Un exemple de mécanisme régulateur intégrant la disponibilité externe du nitrate et le statut N de la plante:

Le module CEPs/CEPRs/CEPD(L)s

CEPs: C-terminally Encoded Peptides

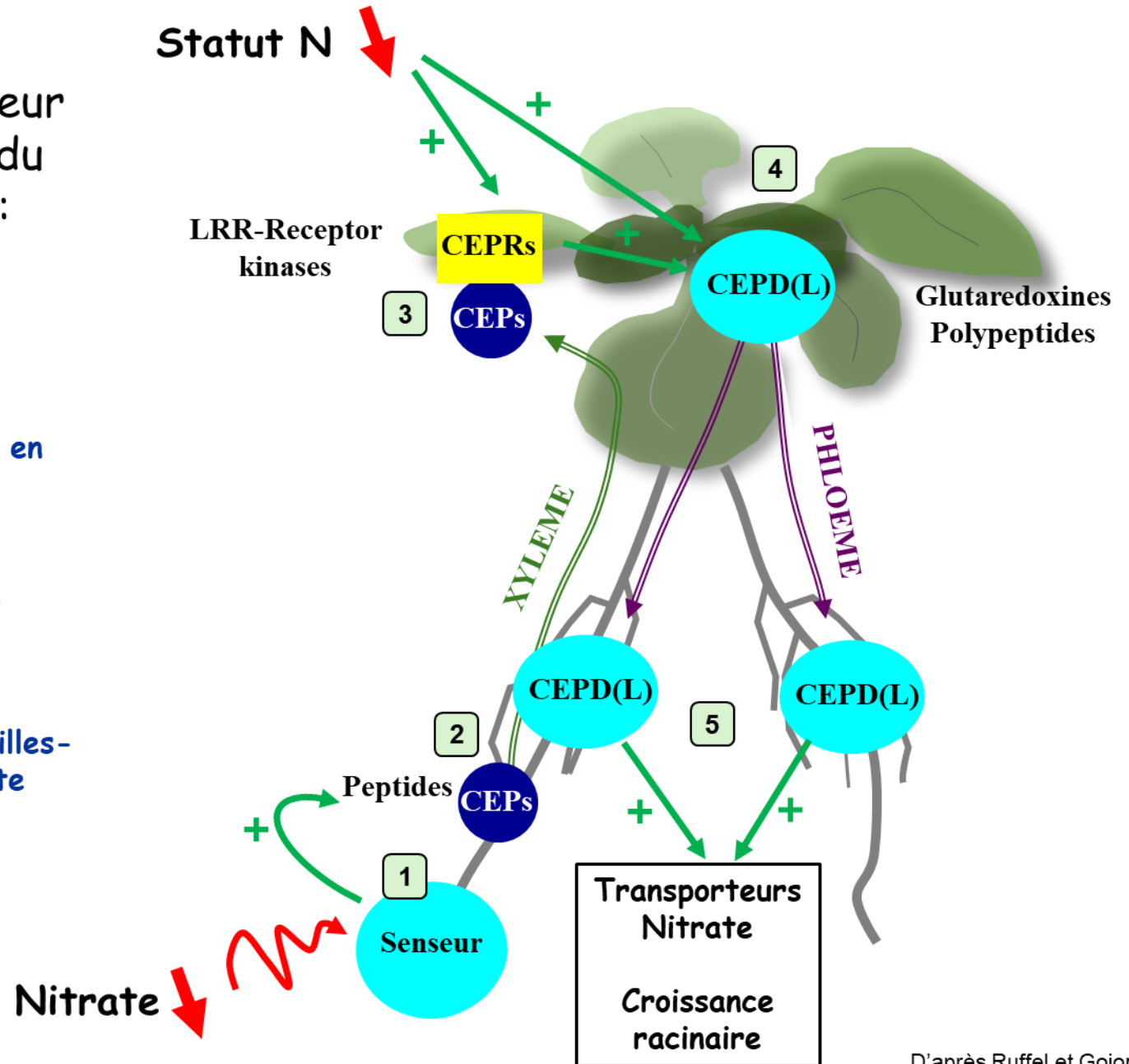
Signaux racines-feuilles de faible disponibilité en nitrate

CEPR1 et 2: CEP Receptors

Récepteurs foliaires des CEPs. Inducteurs des CEPDs

CEPD(L): CEP Downstreams (like)

Protéines de type glutaredoxines. Signaux feuilles-racines de stimulation de l'absorption de nitrate



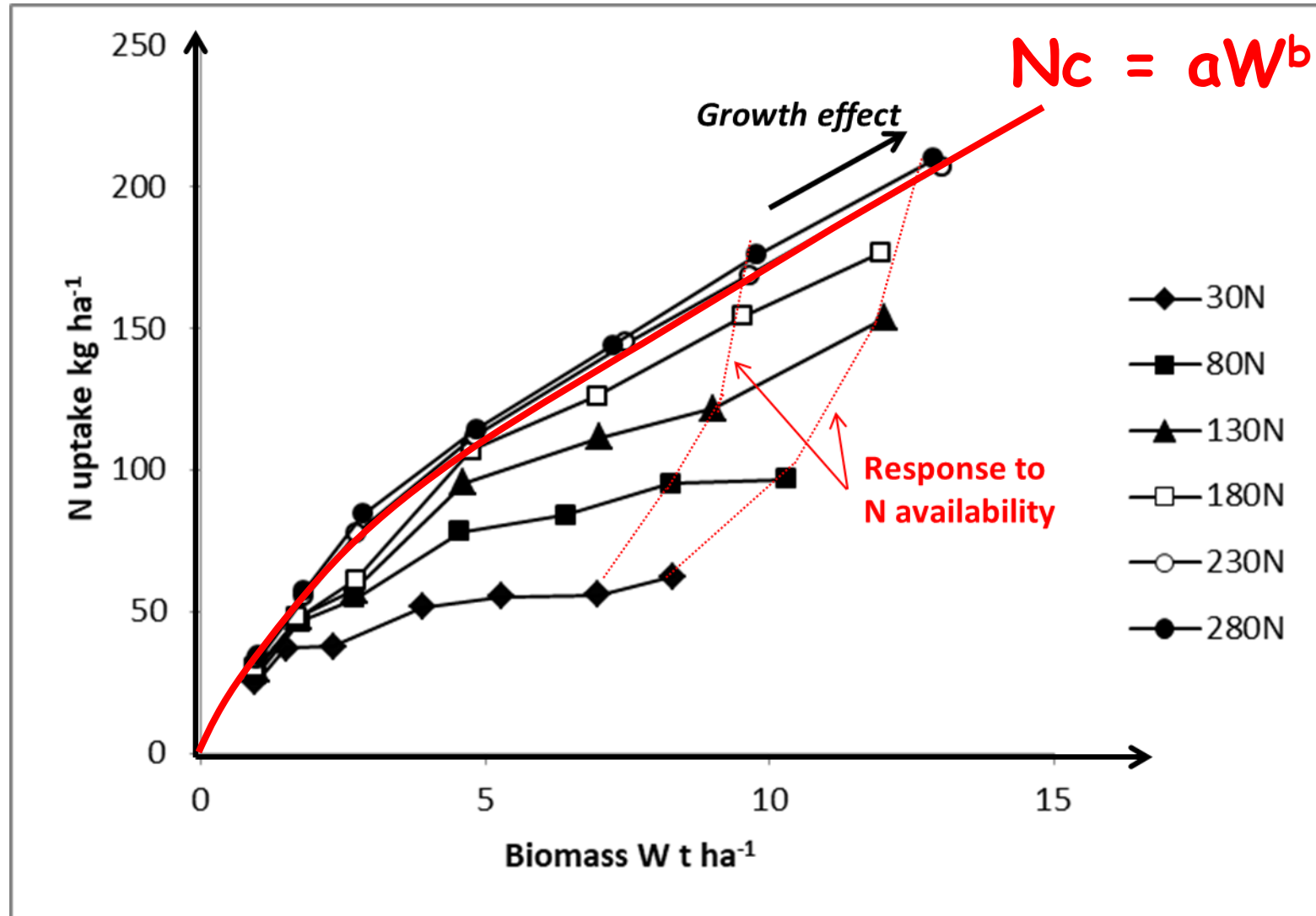
Allométrie entre prélèvement N et croissance en biomasse de la culture

N_c est le prélèvement N minimum pour obtenir la biomasse maximum.

La demande en N dN_c/dW diminue donc avec la biomasse de la culture

Ceci conduit donc à une dilution de N lors de la croissance de la culture

$$\%N_c = aW^{b-1}$$

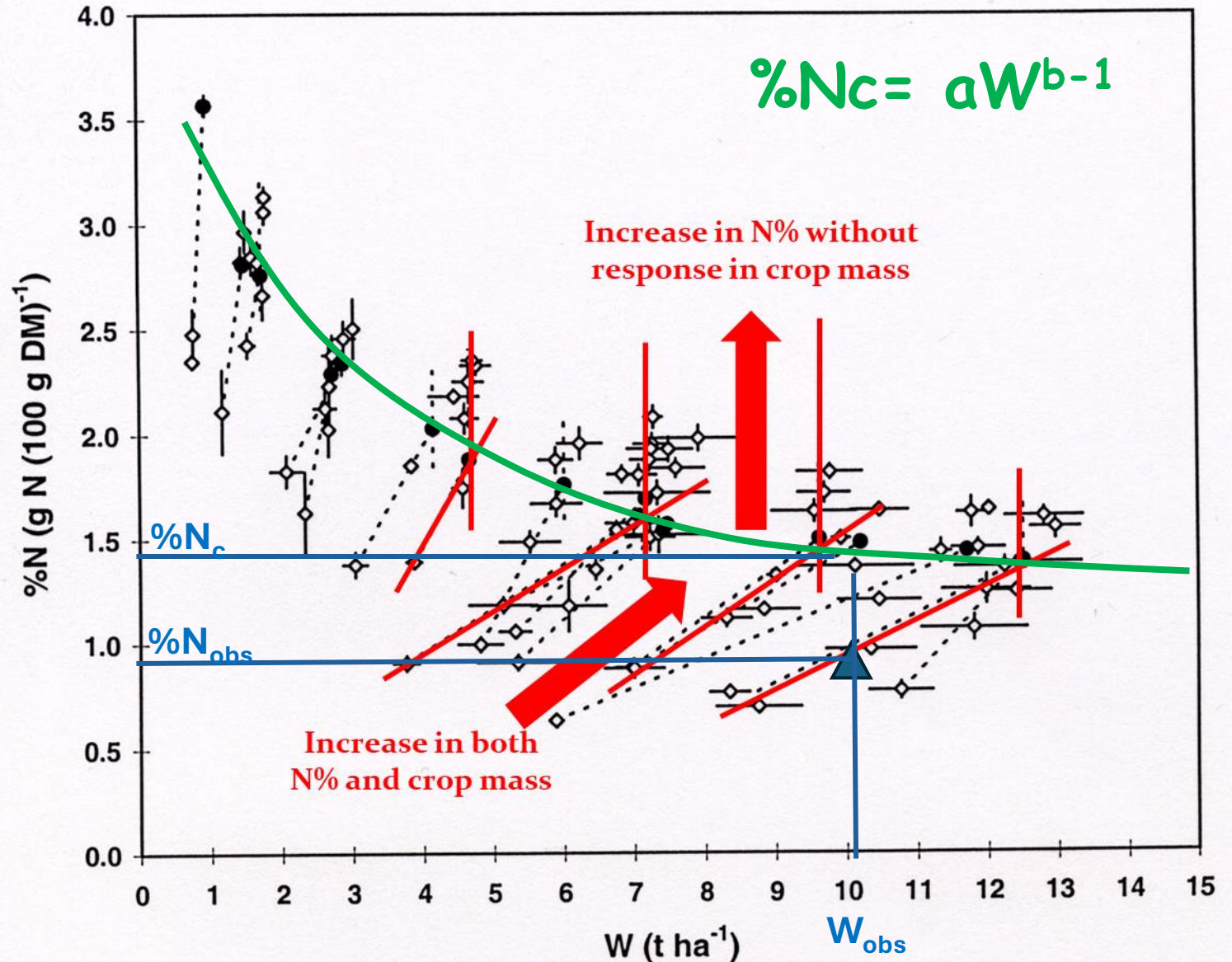


Courbe de dilution N critique

La détermination de la courbe critique de dilution permet de déterminer pour une culture donnée, à un stade déterminé de sa croissance (W_{obs}) son état de nutrition N.

Indice de Nutrition en N

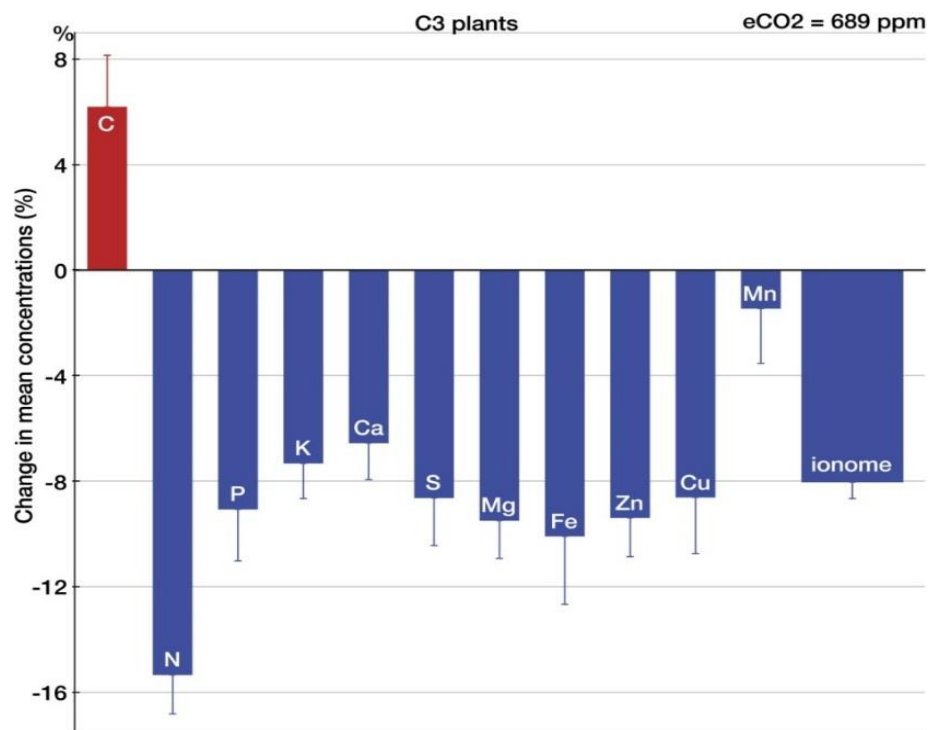
$$INN = \%N_{obs} / \%N_c$$





Effets du changement climatique sur la nutrition N des plantes ?

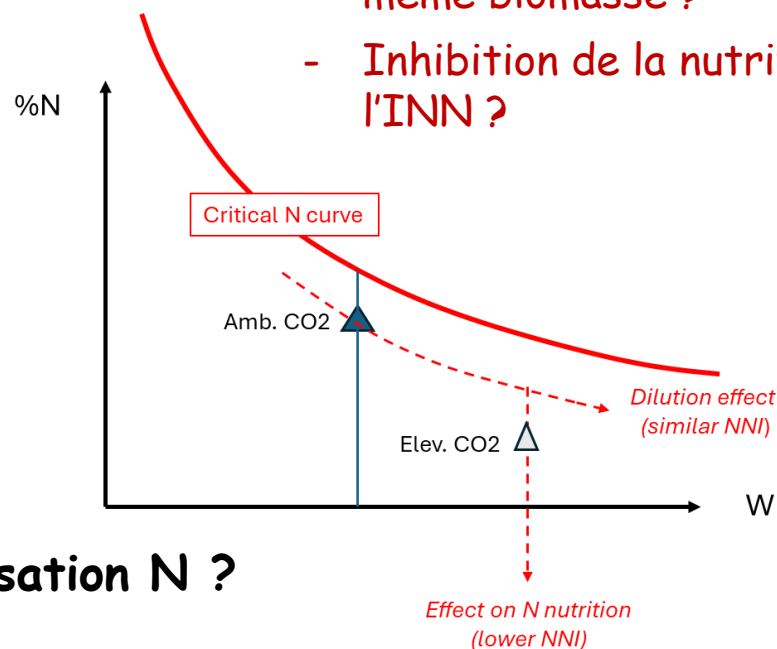
L'élévation du CO_2 atmosphérique stimule la photosynthèse chez les C_3 , mais diminue leur teneur en minéraux, particulièrement en N



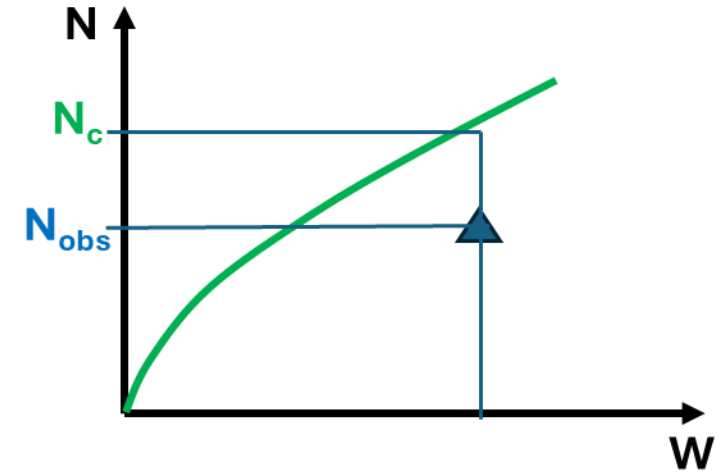
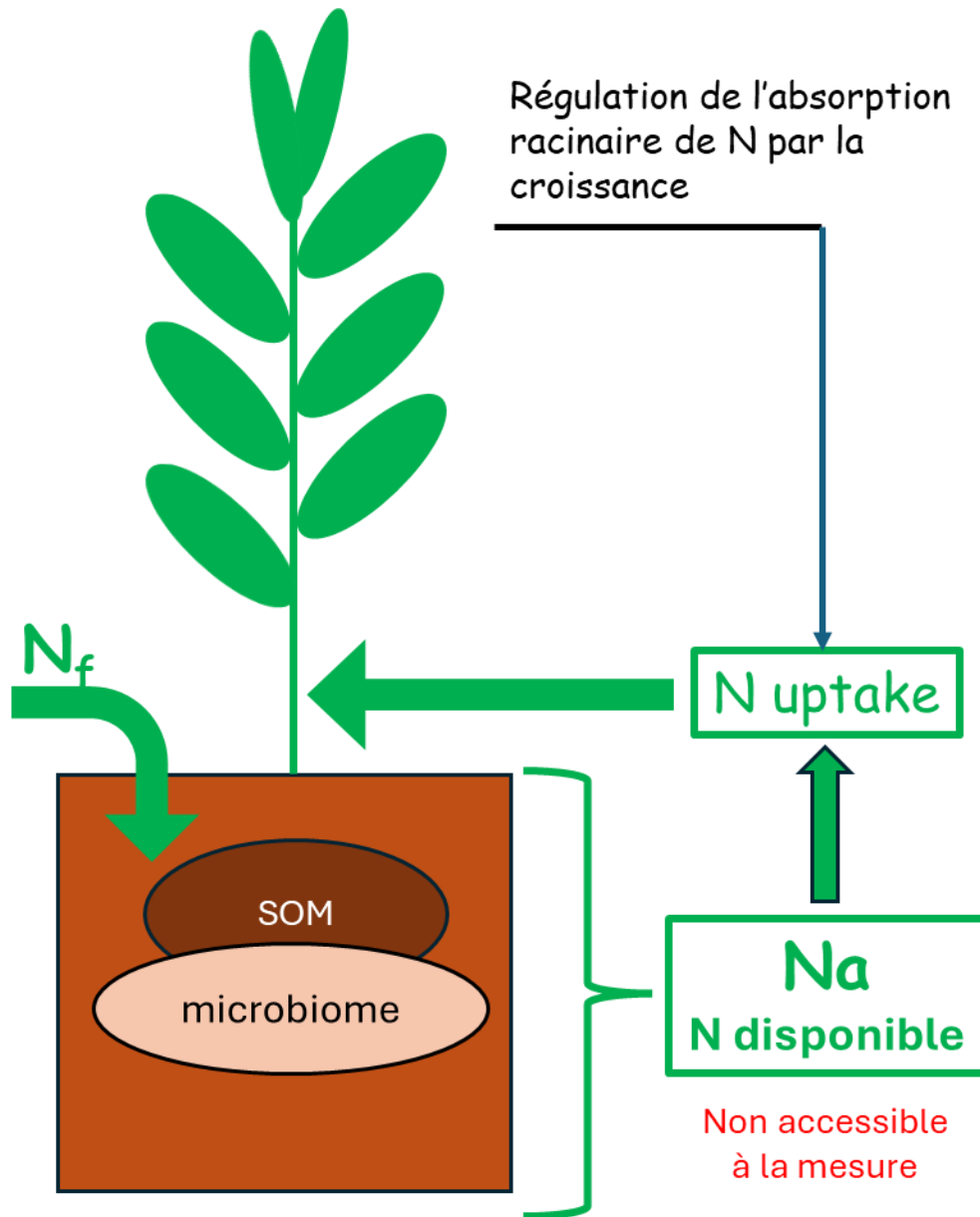
Loladze 2014 eLife

Plusieurs causes possibles:

- Compétition accrue avec les microorganismes du sol ?
- Simple effet de dilution ?
- Décalage vers le bas des courbes de dilution critiques: les plantes ont besoin de moins de N pour produire la même biomasse ?
- Inhibition de la nutrition N des plantes: diminution de l'INN ?



Quel impact sur le pilotage de la fertilisation N ?



- INN est une mesure du degré de satisfaction de la demande en N de la culture: $INN = N_{obs} / N_c$
- INN est donc aussi une estimation a posteriori de N disponible en terme relatif: $INN \approx Na / Na_{opt}$
- INN permet donc d'estimer la capacité d'une culture (espèce, génotype) à **satisfaire sa demande en N** dans un sol donné...
- ...et d'estimer la capacité d'un sol, soumis à un système de culture donné, à **satisfaire les besoins en N d'une culture**.

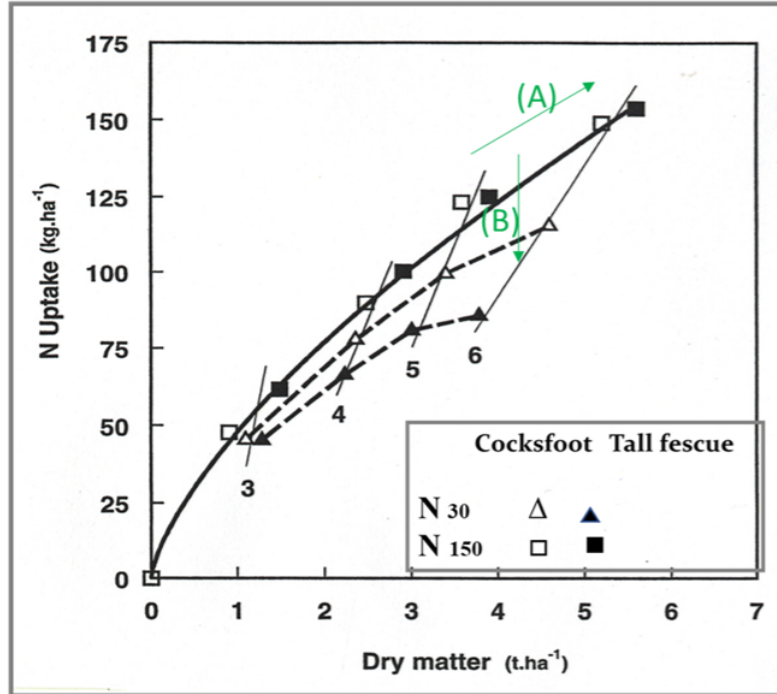
Variabilité intra spécifique des courbes de dilution N critiques ?

- Une méthode Bayésienne pour évaluer les coefficients « a » et « b » des courbes critiques
- Des bases de données encore trop partielles pour pouvoir mettre en évidence des différences génotypiques
- Les premières études sur blé, maïs, et Fétuque élevée montrent peu de différences entre génotypes
- Peu ou pas de différences entre espèces voisines: Maïs et Sorgho, entre les espèces de graminées fourragères....
- Nécessité de construire des bases de données plus larges

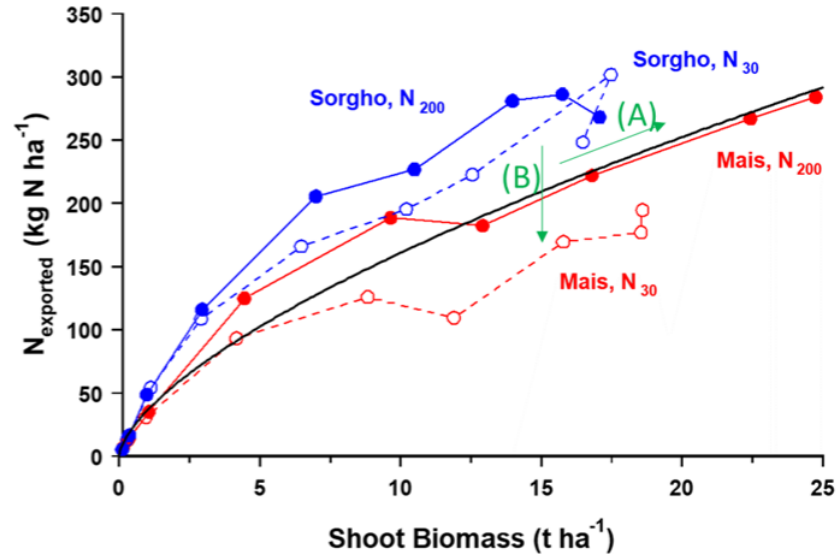
L'adoption d'une courbe critique unique par espèce apparaît en l'état une solution acceptable

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}



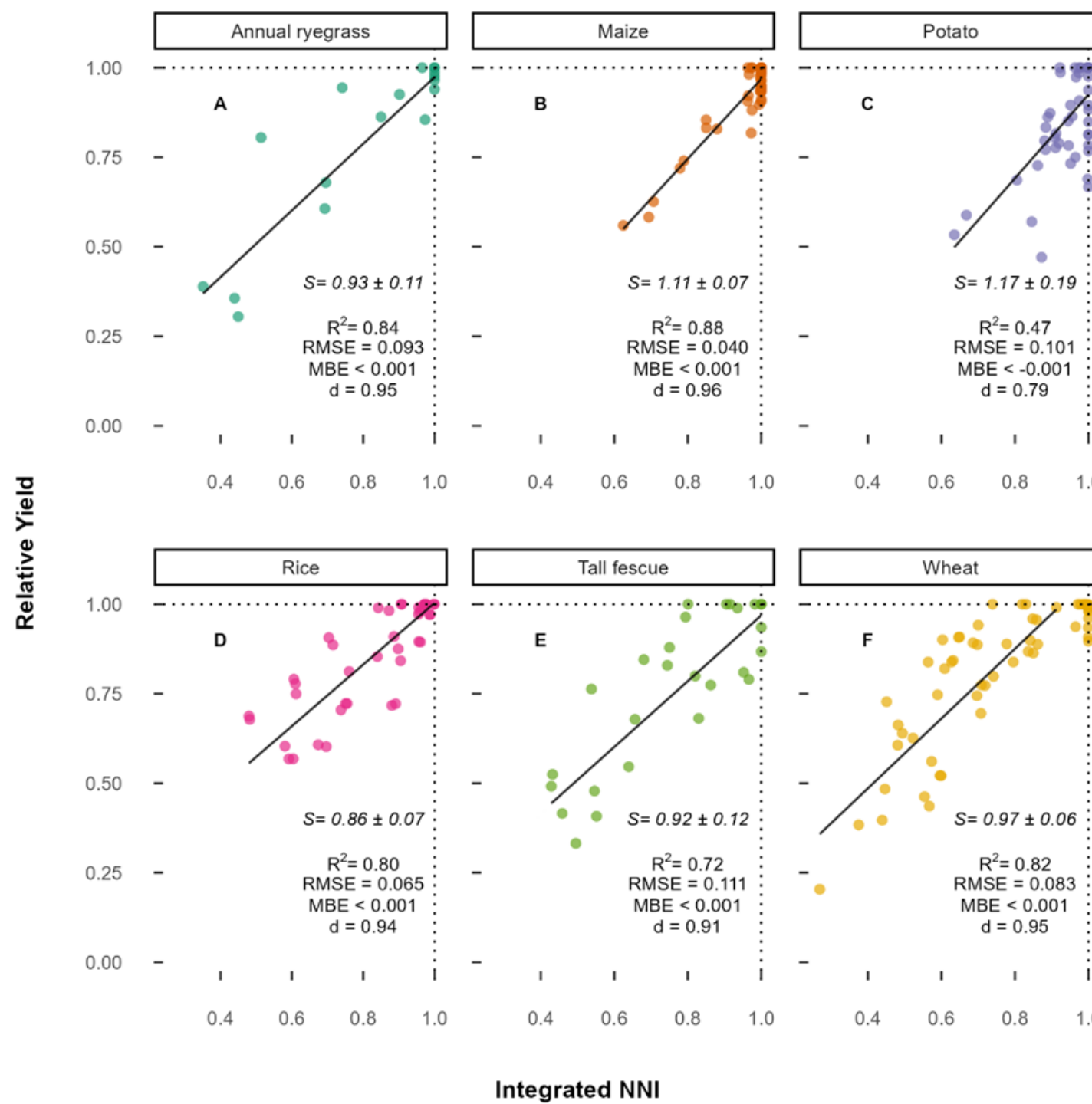
L'INN qu'une culture est capable d'atteindre dans un sol donné est une estimation de la capacité intrinsèque à prélever N dans le milieu, c'est-à-dire indépendamment de son propre potentiel de croissance.

Réponse des cultures à un déficit de nutrition N

Pour la plupart des espèces cultivées, le rendement relatif $Y_{\text{obs}}/Y_{\text{max}}$ est proportionnel à l'INN intégré pendant la période végétative

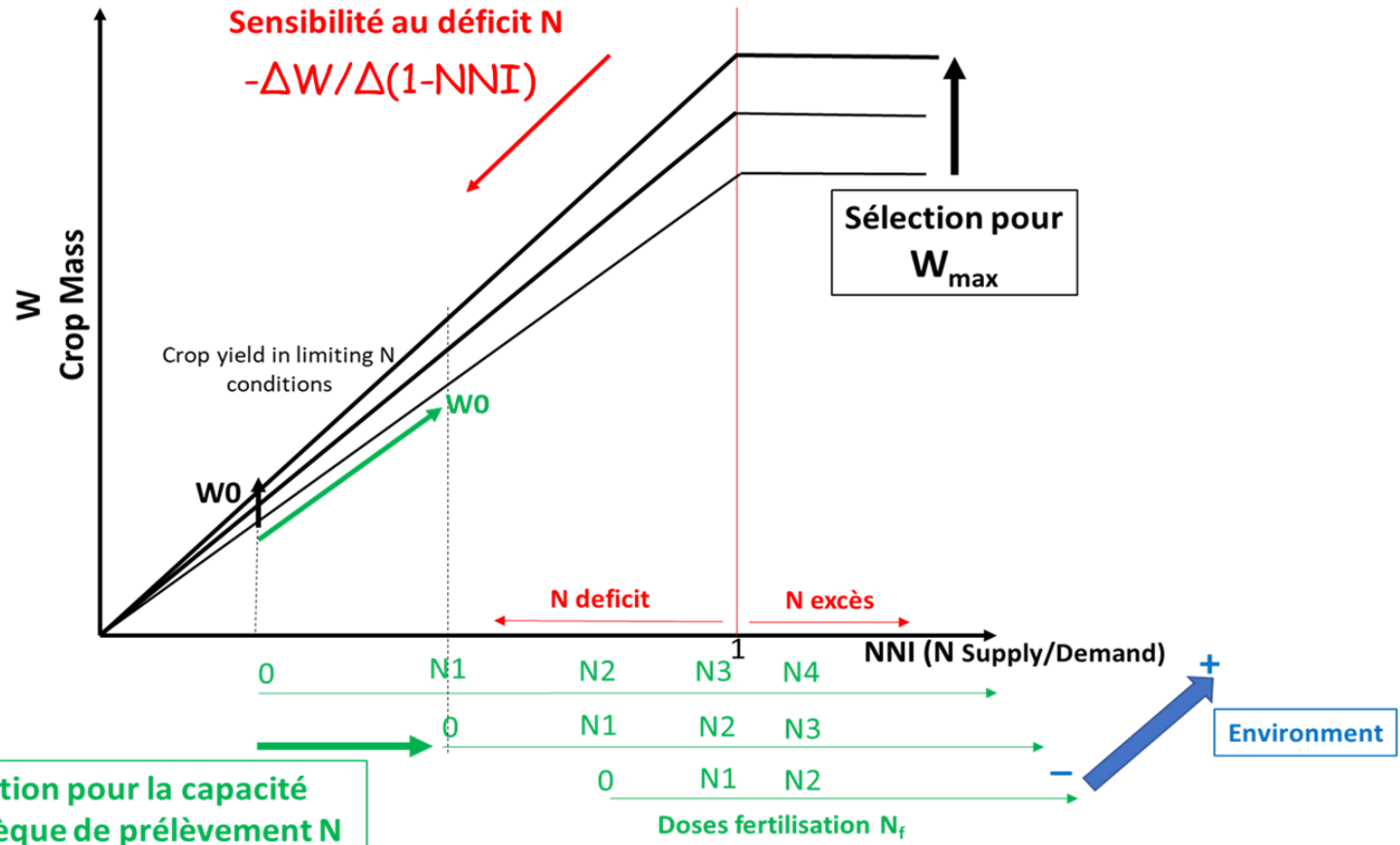
Pour les céréales (maïs, blé, riz)....
L'INN à la floraison détermine le **nombre de grains**....

Le **poids de 1000 grains** et la **teneur en N des grains** dépendent de l'état de nutrition N de la plante après floraison...



Réponse des plantes à leur état de nutrition N et Capacité des plantes prélever N

- 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.



Conclusions et perspectives

- L'INN est une **nouvelle métrique** permettant d'évaluer l'état de nutrition N d'une culture donnée (espèce -génotype) dans une situation donnée (sol-climat, stade phénologique...)
- Cette métrique intègre à la fois (i) la **capacité de la culture** à explorer son milieu (sol) et à satisfaire sa demande en N; et (ii) **la capacité du sol**, soumis à un système de culture donné, à fournir du N.
- L'INN pourrait être utilisé dans des OADs pour optimiser la fertilisation N des cultures?
- L'INN comme outil de phénotypage des cultures (sélection), et d'interprétation des interactions Génotype x Environnement x Management ?
- L'INN comme outil d'estimation de la qualité des sols et des effets « systèmes de culture » ?

Ce passage de l'outil conceptuel pour la recherche à l'outil utilisable dans la pratique implique en lui-même un effort de recherche