

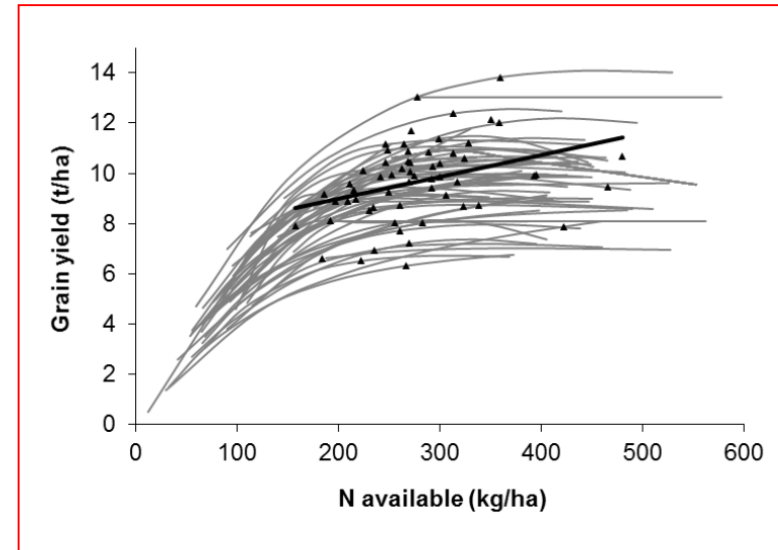
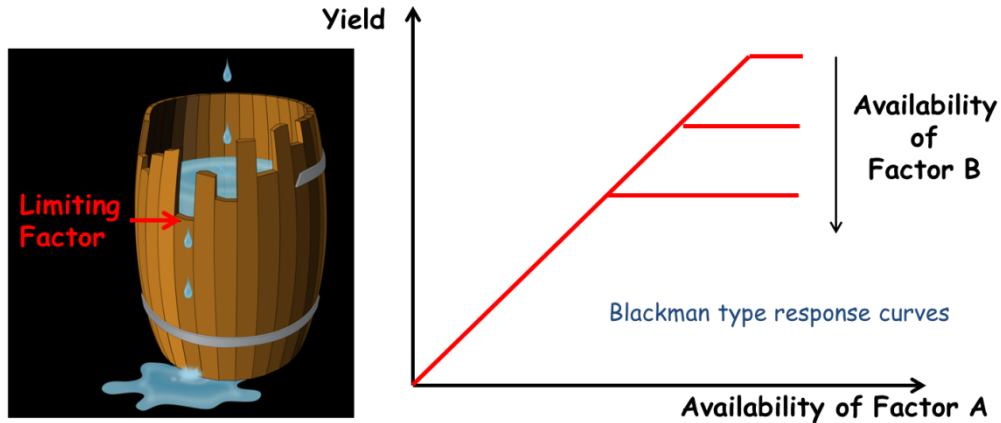
Une nouvelle approche de la nutrition minérale des plantes pour une fertilisation durable des cultures.

Gilles LEMAIRE

Directeur de Recherche Honoraire INRA

Membre de la Section 5

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



Loi de Liebig: analyse séquentielle des différents éléments nutritifs N, P, K... ignorant la co-limitation entre eux.

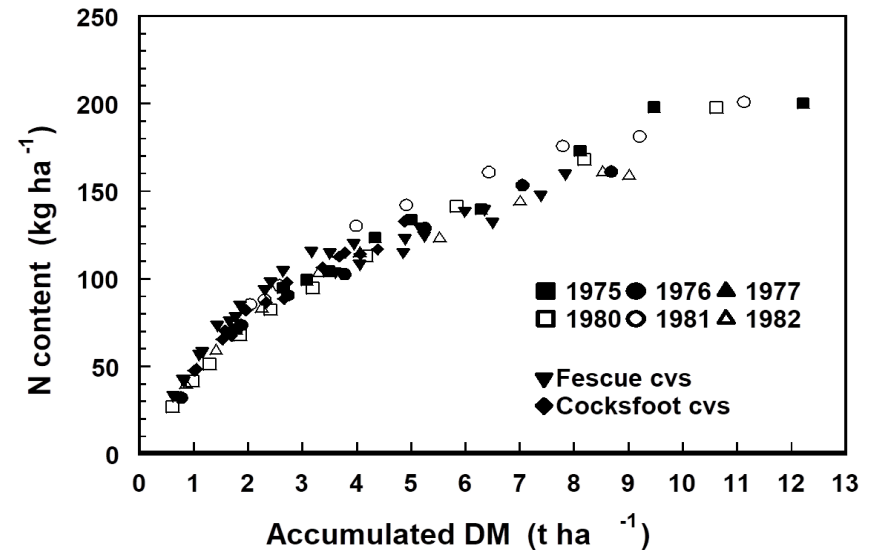
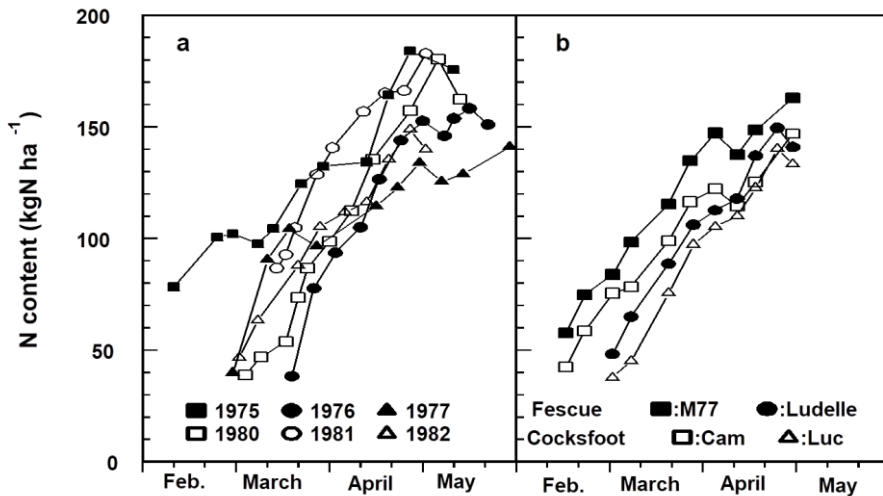
Courbes de réponse: analyse statistique "dose optimum" de type "normative"...aboutissant à apporter **trop** pour être certain d'avoir **assez**

Or 20 kg de N/ha en excès conduit inexorablement à de l'eau > 50mg NO₃-/litre

Liaison entre prélèvement de N et accumulation de biomasse par les couverts végétaux

G. Lemaire et J. Salette 1984

La variation des prélèvements de N entre années ou entre espèces est expliquée par la dynamique d'accumulation de biomasse aérienne



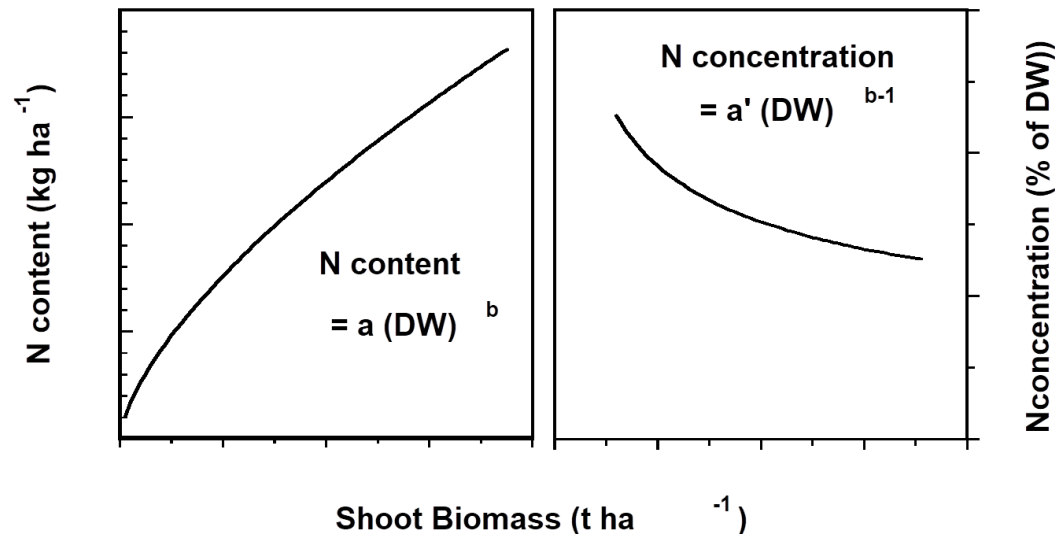
Le concept de dilution de N lors de la croissance d'un couvert végétal

DJ Greenwood, G Lemaire et al. 1990

L'allométrie entre "prélèvement de N" et "biomasse" avec $b < 1$ entraîne une diminution monotone de la teneur en N de la plante durant sa croissance

$$N_{\text{upt}} = aW^b \quad \longrightarrow \quad \%N = a'W^{b-1}$$

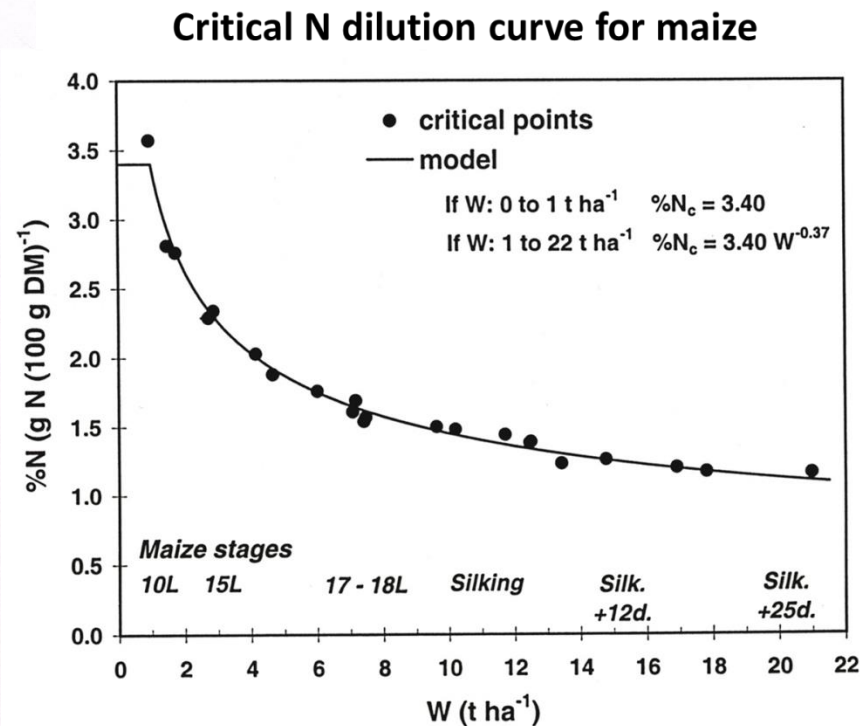
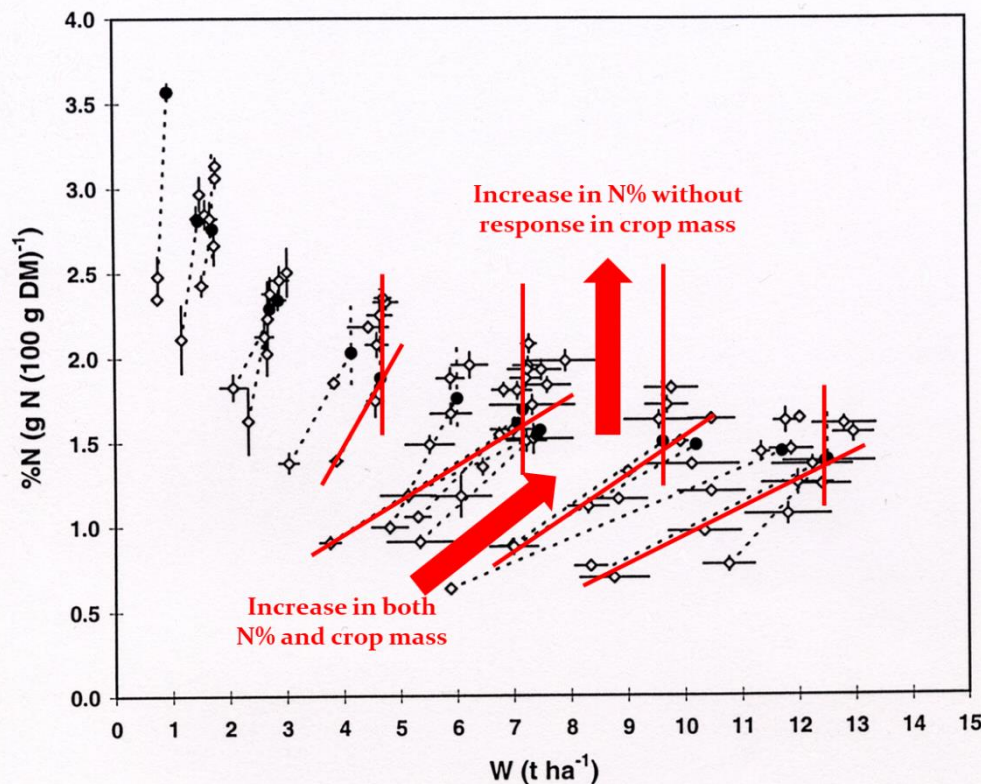
En conséquence: N% ne peut être un indicateur de l'état de nutrition N d'une culture qu'à condition d'être comparé à biomasse équivalente!!!



Courbe de dilution N critique

Teneur critique en N ($\%N_c$): minimum de teneur en N de la plante pour obtenir sa croissance maximale en matière sèche

Une courbe de dilution "critique" de N $\%N_c = aW^{b-1}$ peut être déterminée pour chaque espèce (génotype?).



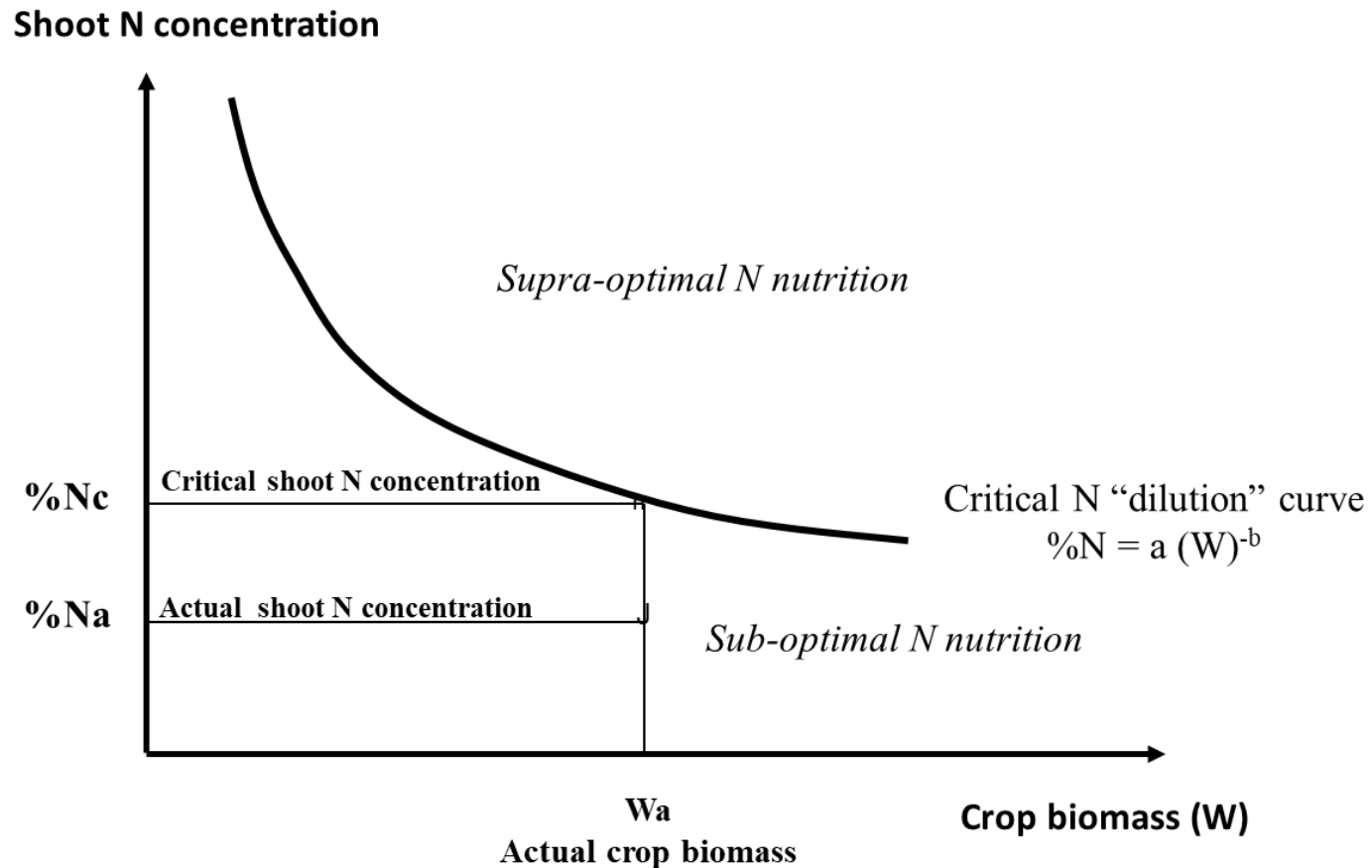
Très peu de différences entre espèces d'un même groupe métabolique C3 ou C4

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

Espèce	a_c (gN/100gMS) Teneur en N pour W=1t/ha	b-1 (sans dimension)
Graminées prairiales	4,8	-0,32
Luzerne	4,8	-0,33
Pois	5,2	-0,32
Blé	5,3	-0,44
Colza	4,5	-0,25
Tomate indust.	4,5	-0,33
Riz	4.8	-0,38
Maïs	3,4	-0,34
Sorgho	3,9	-0,37
Graminées Trop.	3,6	-0,34

Diagnostic en temps réel de l'état de nutrition N d'une culture

Indice de Nutrition N
 $INN = \%Na / \%Nc$



Co-régulation de l'absorption de N par l'offre du sol et la demande de la plante.

L'absorption de N dépend de l'activité photosynthétique (Gastal et Saugier, 1999)

Un signal de satiété N réprime l'absorption racinaire (Tourraine et al. 1994; Lejay et al. 1999)

La demande de la plante est liée à son potentiel de croissance:

$$N_{\text{upt}} = a(W)^b \quad \text{ou:} \quad dN_{\text{upt}}/dt = ab(W)^{b-1} dW/dt$$

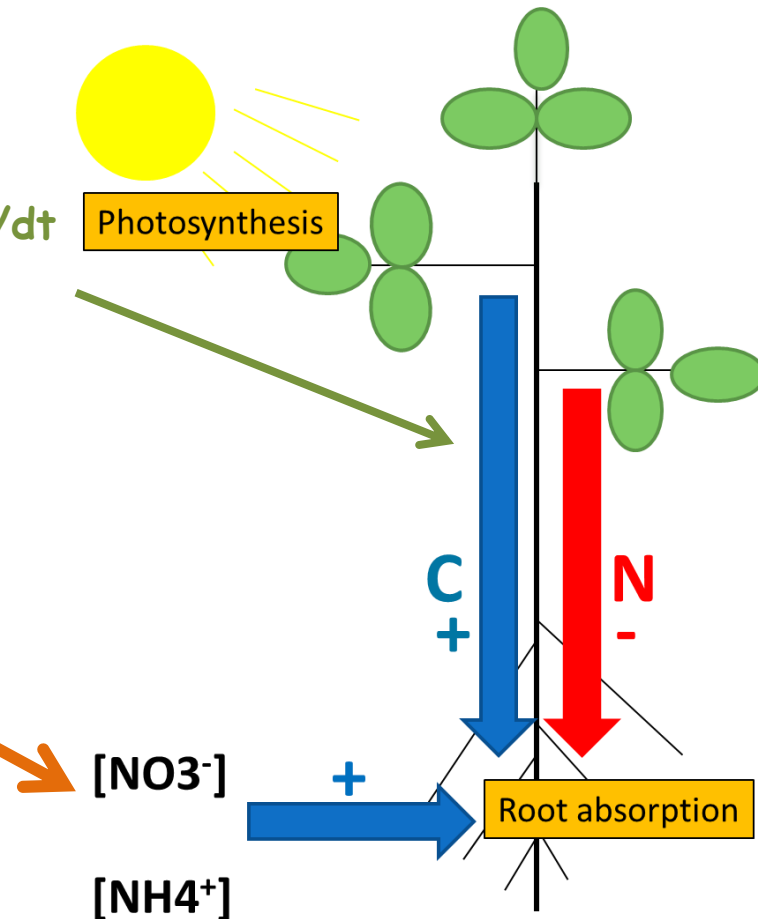
L'offre du sol est liée à la concentration de N minéral a proximité des racines (Michaelis-Menten):

$$dN_{\text{abs}}/dt = V[N]/(K_m + [N])$$

En conséquence:

$$dN_{\text{upt}}/dt = abW^{b-1}dW/dt * V[N]/(K_m + [N])$$

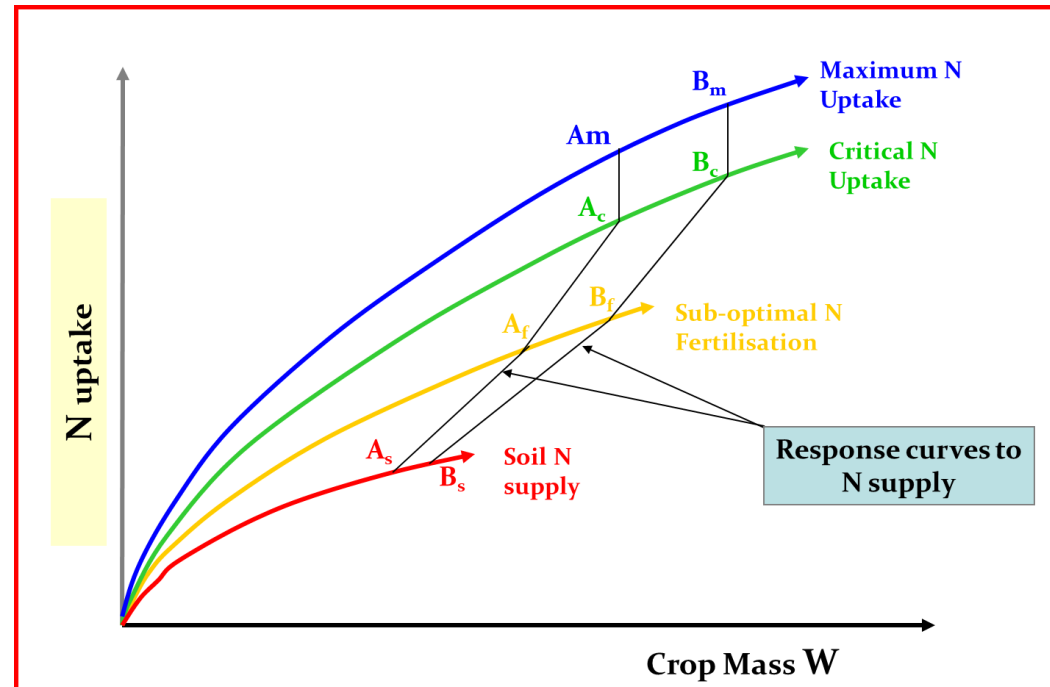
(Devienne-Barret et al. 2000)



Des conséquences fondamentales pour l'analyse de l'efficacité de l'utilisation de N par les cultures

- 1- dW/dN_{upt} (conversion de N en biomasse) s'accroît automatiquement avec W
- 2- dW/dN_{upt} à W identique est très peu différent entre espèces...a fortiori entre génotypes!
- 3- $dN_{\text{upt}}/dN_{\text{fert}}$ (efficacité de prélèvement de N) dépend de W (co-régulation)..

L'Efficacité d'Utilisation de N entre génotypes doit donc se comparer à biomasse identique.



Une interprétation fonctionnelle de la dilution de N dans la plante

Les plantes sont formées de deux types de tissus: $W = W_m + W_s$

Lorsqu'elles augmentent en taille W_m croît moins vite que W : $W_m = kW^\alpha$ avec $\alpha < 1$

Photosynthèse

Architecture

Metabolic	Structural
W_m	W_s
N_m	N_s

$$\%N = \frac{1}{W} (\%N_m W_m + \%N_s W_s)$$


$$\%N = k(\%N_m - \%N_s)W^{\alpha-1} + \%N_s$$

Equivalent à $\%N = aW^{b-1}$ si $\%N_s$ est petit ($\approx 0,6$)...

W_m peut être "dimensionné" à la surface photosynthétique: $W_m = p \text{ LAI}$

$$\text{LAI} = k/pW^\alpha$$

L'allométrie entre prélèvement de N et biomasse (W) et donc la dilution de $\%N$ serait donc la conséquence d'une allométrie plus fondamentale entre « Surface foliaire » (LAI) et Biomasse (W).

Il y a bien parallélisme entre les allométries N-W et LAI-W

Ceci implique donc que la dilution de N est la conséquence d'un investissement de plus en plus grand de la plante dans ses tissus de soutien au fur et à mesure de son augmentation de taille.

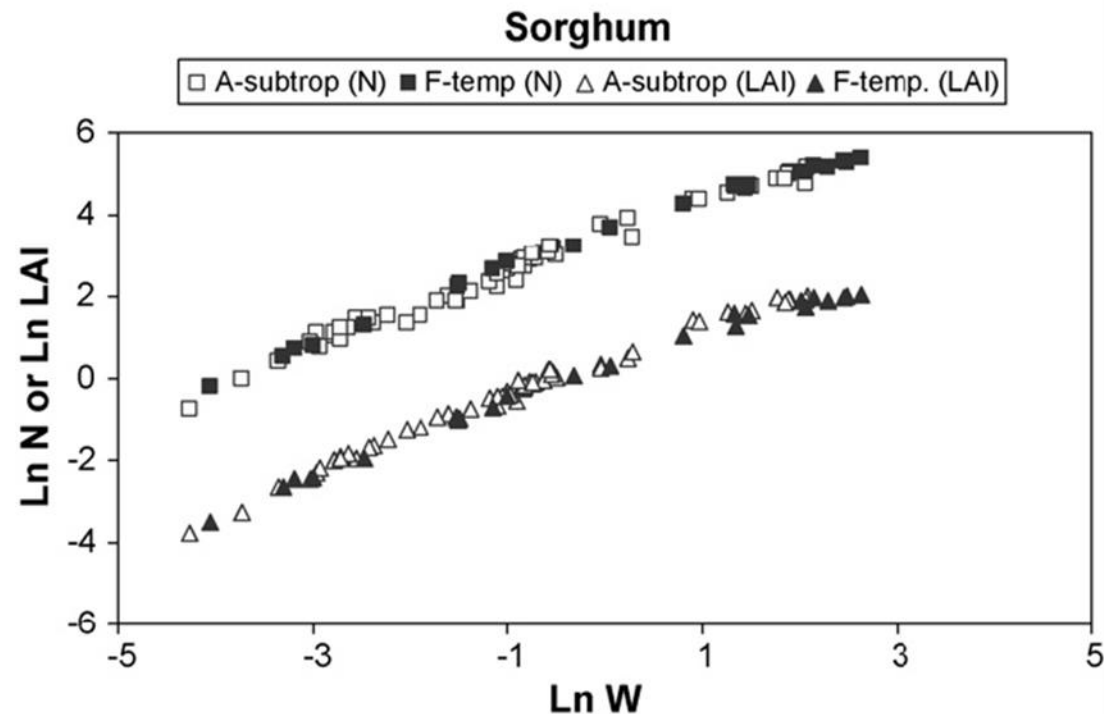
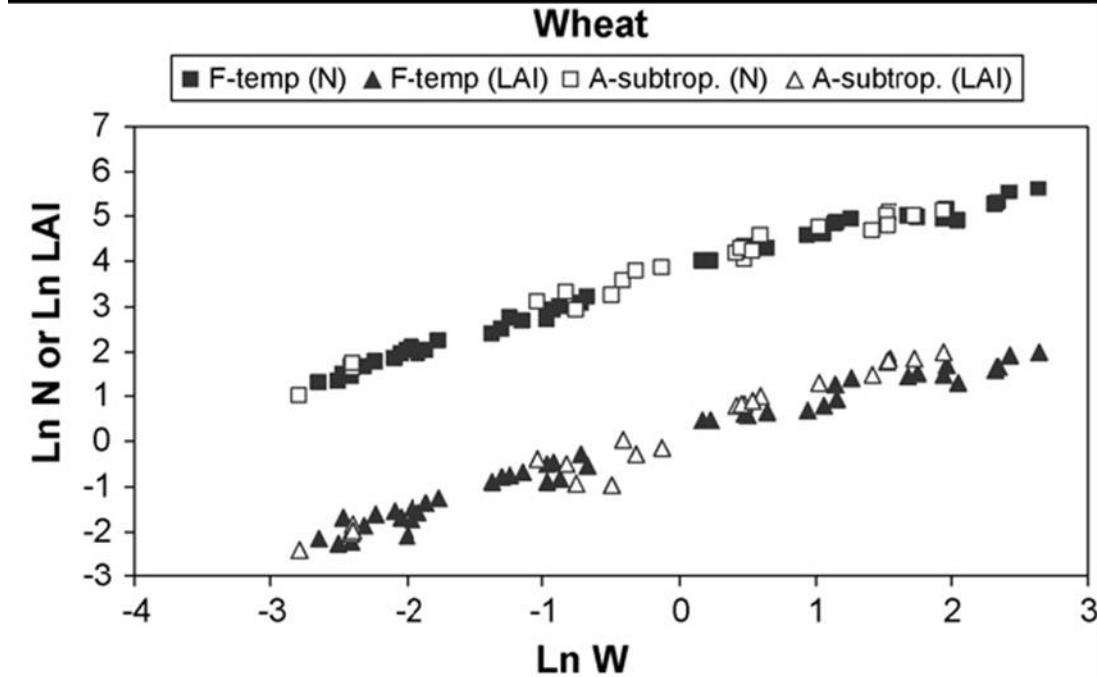
$$\%N = aW^{b-1}$$

est donc directement la conséquence de:

$$LAR = LAI/W = kW^{\alpha-1}.$$

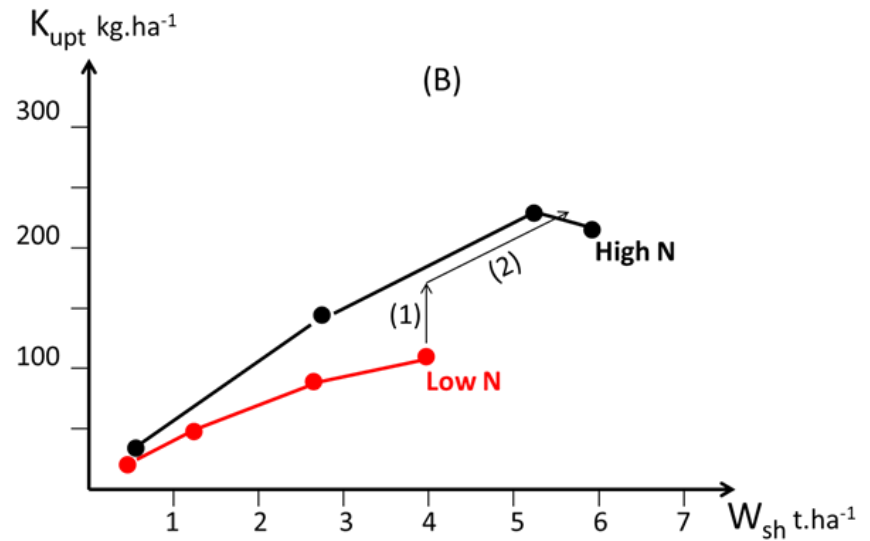
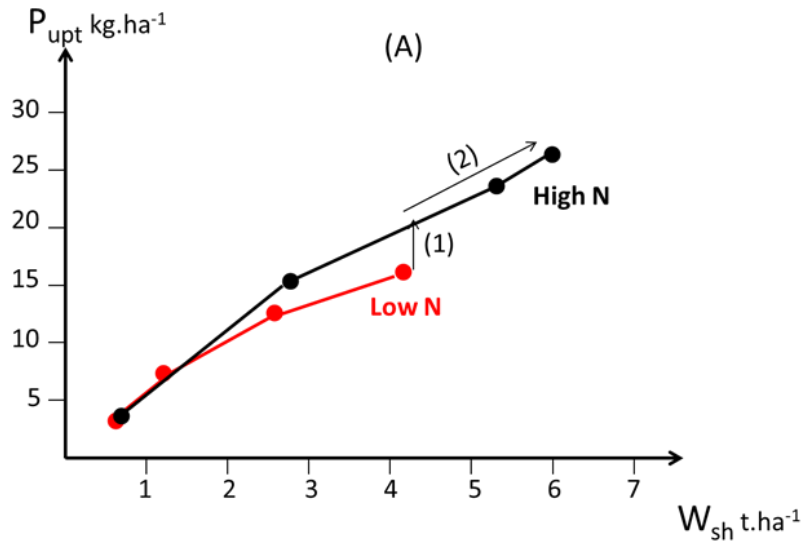
L'hypothèse $b=\alpha$ ayant été vérifiée sur un grand nombre d'espèces

Lemaire et al. 2008, FCR



Extension du concept et de l'approche à la nutrition P-K et S...

Salette et Huché, 1991



- Relations d'allométrie $P = a_p W^b$ et $K = a_k W^b$... (idem pour S)...
- P, K et S semblent donc être liés comme N à la taille du compartiment métabolique.
- Interactions N-P et N-K: (1) Effet direct de N sur P_{upt} et K_{upt} ; (2) Effet indirect lié à l'augmentation de croissance

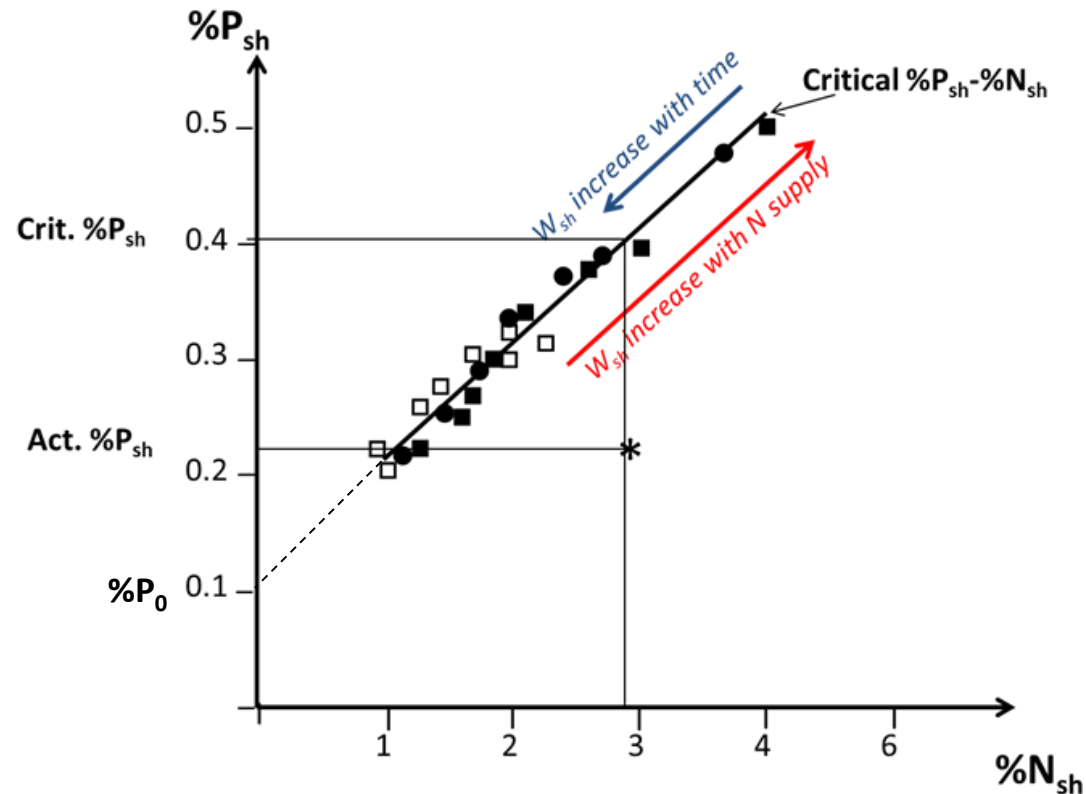
La disponibilité de P et K dépend donc de la nutrition N de la plante

Les relations P:N ou K:N ou S:N permettent d'analyser simultanément les états nutritionnels, N, P, K et S... et leurs interactions .

La relation %P-%N permet de prendre en compte les effets induits par les niveaux de N et d'effacer les effets de "dilution" dues à la biomasse

$\%P_0 > 0$ implique que %P/%N ne soit pas constant et varie avec le niveau de croissance et de nutrition N de la culture...

Des résultats analogues sont obtenus pour K et S...



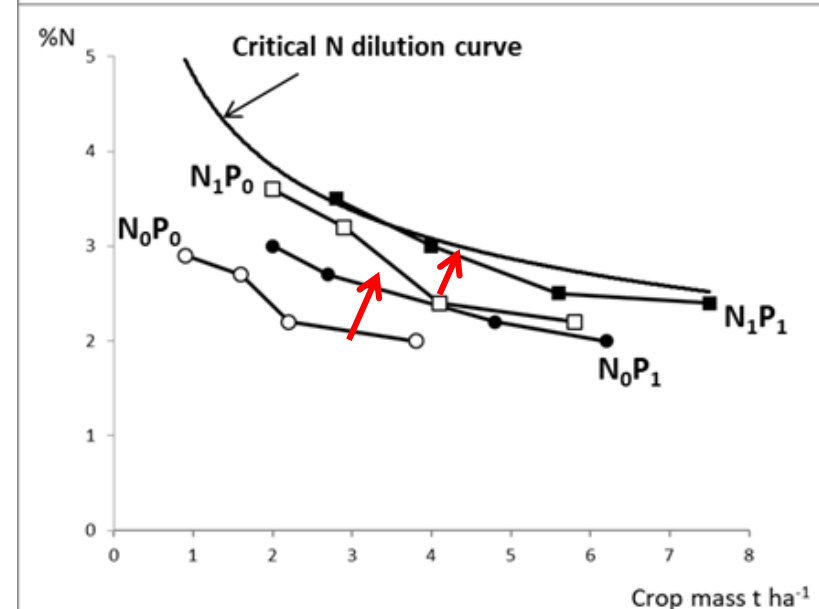
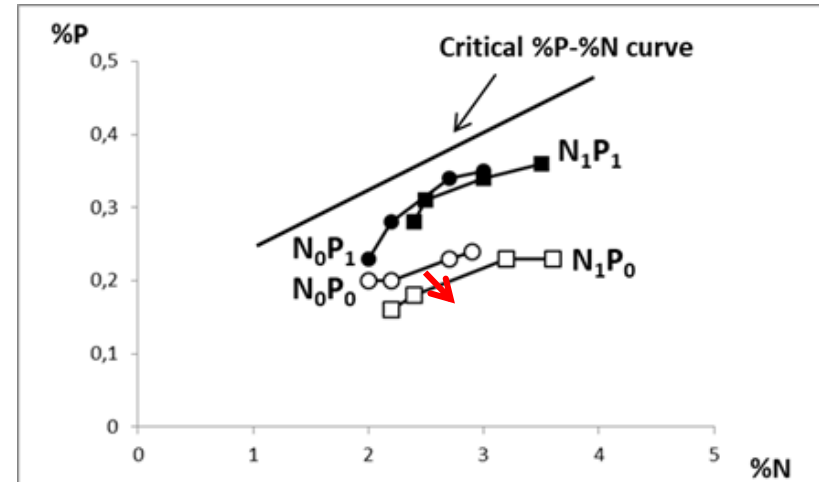
Les courbes de dilution critiques de P et K permettent d'analyser les interactions N-P et P-K de manière beaucoup plus fonctionnelle

Des apports de P peuvent améliorer le niveau de nutrition N des plantes

Mais à contrario...

Des apports de N en conditions limitantes de P peuvent accentuer le degré de déficience en P des plantes...

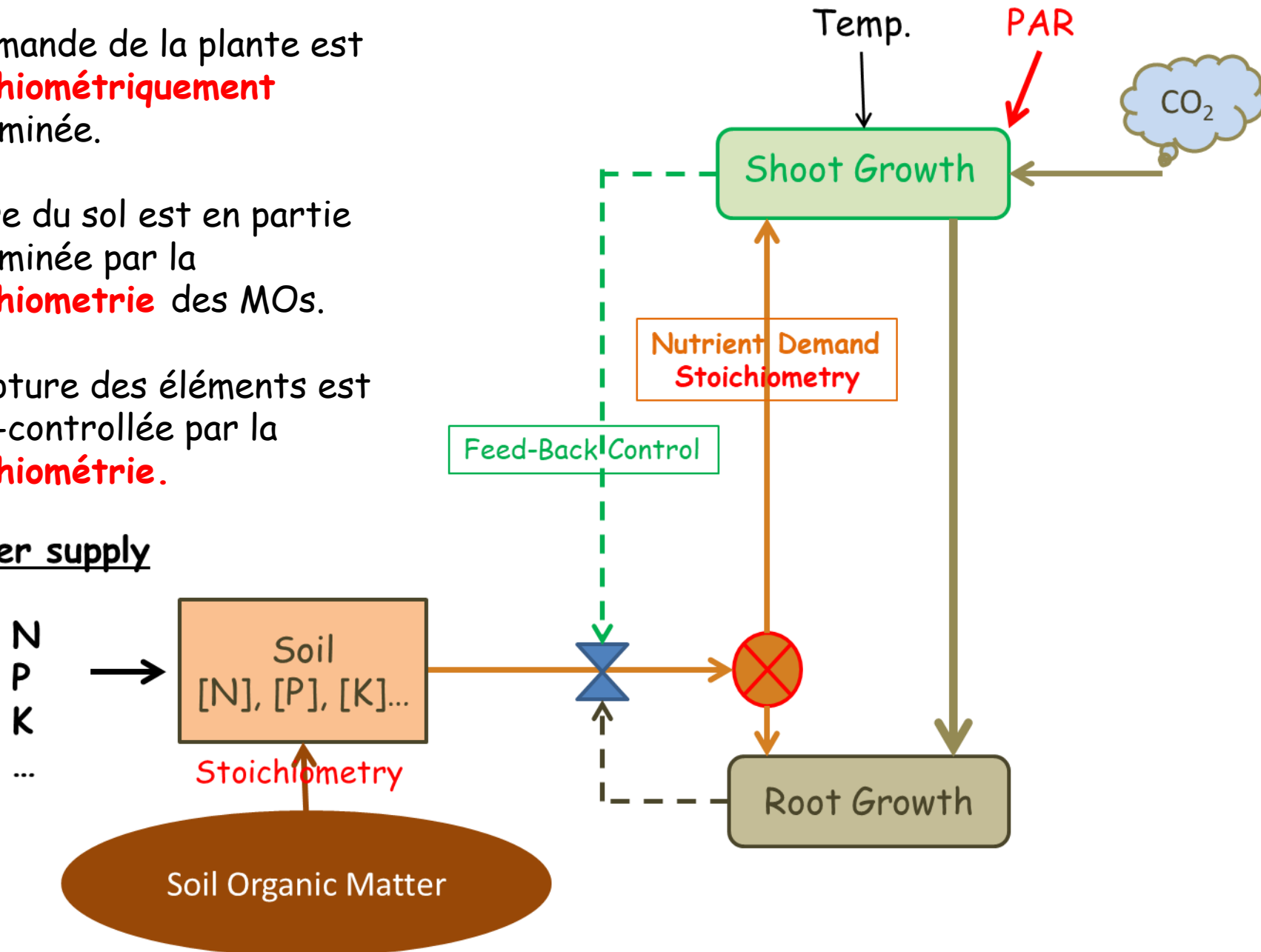
La disponibilité des minéraux pour les plantes dans le sol ne peut donc pas être estimée seulement par des caractéristiques physico-chimiques du sol ni par une approche de stocks.



Représentation intégrée de la nutrition minérale des plantes

- La demande de la plante est **stoechiométriquement** déterminée.
- L'offre du sol est en partie déterminée par la **stoechiométrie** des MOs.
- La capture des éléments est rétro-contrôlée par la **stoechiométrie**.

Fertilizer supply



Vers un diagnostic intégré de la nutrition minérale des cultures?

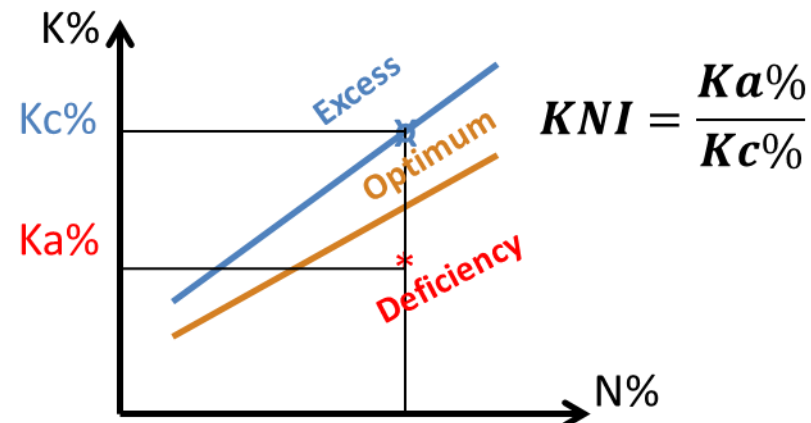
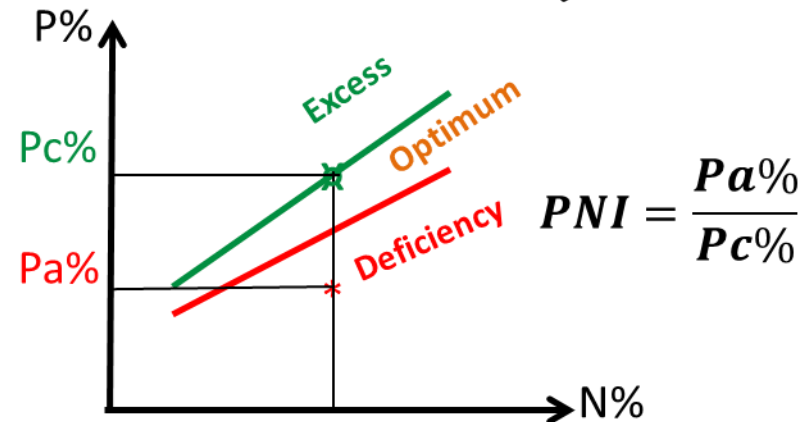
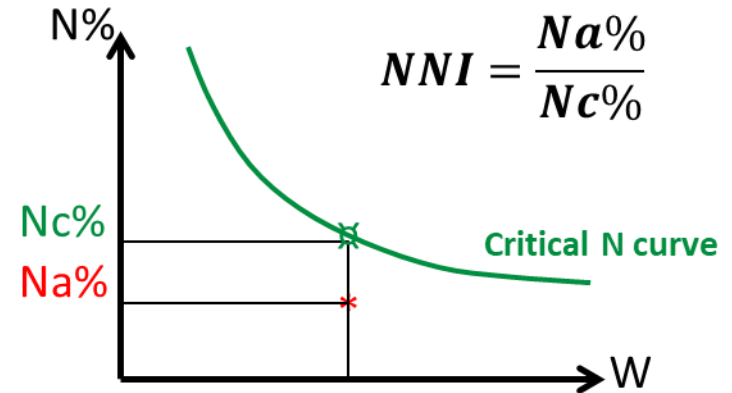
1. $W_{obs} < W_{pot}$ déterminée par Gen. Rad. Temp. Eau ?

2. $NNI < 1$? Azote limitant?

3. $PNI, KNI, SNI < 1$?
Phosphore, Potassium, Soufre limitant?

4. Quid des autres éléments micro...et oligo...

On passe ainsi d'une approche "**pronostic**" dont les incertitudes conduisent à des apports excessifs...
...à une approche "**diagnostic**" permettant d'adapter les apports à la variabilité locale et temporelle de la demande.



Conclusions (1)

Quelles applications agronomiques?

- Le remplacement d'une approche "pronostic" par une approche "diagnostic" permet de réduire les incertitudes "quand,? et combien?" sur les apports d'engrais...
- La prise en compte de la variabilité spatio-temporelle permet de réduire les sur-fertilisations inhérentes aux systèmes de production intensifs (agriculture de précision)
- Le phénotypage des cultures *in situ* permet une analyse plus fonctionnelle des interactions Génotype-Environnement-Itinéraires Techniques.
- Les "indices de nutrition" des cultures deviennent alors des co-variables indispensables pour une interprétation non ambiguë des efficacités d'utilisation de N, P, K et de l'eau...

Conclusions (2)

Quelles questions de recherche?

- Couplage "diagnostic sol" avec "diagnostic culture" ? Et approche stoechiométrique de "l'offre" et de la "demande" en nutriments.
- Généraliser le concept de co-limitation entre facteurs pour une approche plus fonctionnelle des interactions entre éléments nutritifs
- Intégrer le fonctionnement vacuolaire (stockage -destockage) dans une approche intégrée... et dépasser la vision simplifiée des stades "végétatifs" pour aborder les processus de transfert et recyclage vers les organes récoltés et la qualité des récoltes
- Généraliser l'approche compartimentale dans la plante en prenant en compte l'ensemble des éléments, macro-, micro-, et oligo-...