

Les connaissances nouvelles sur le cycle de l'azote: en quoi et comment ont-elles été intégrées (ou pas) dans les OAD pour la fertilisation azotée ?

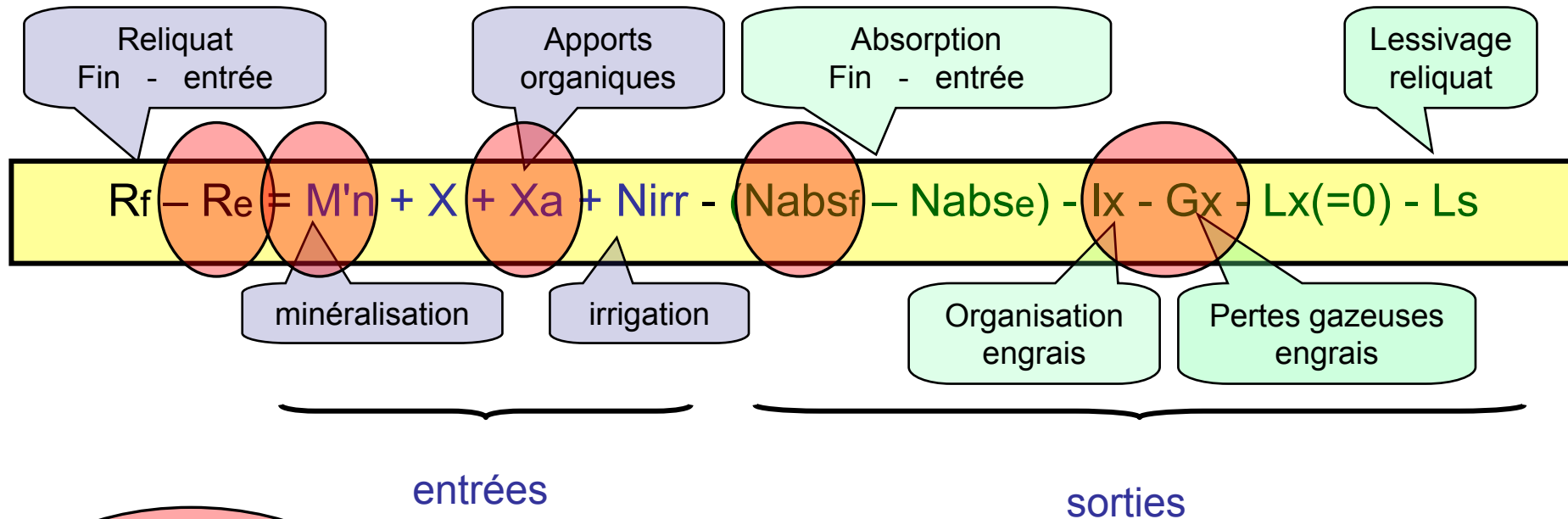
Sylvie Recous, Jean-Marie Machet, Marie-Hélène Jeuffroy

*INRA, UMR FARE (Reims),
INRA US Agro-Impact (Laon-Mons),
INRA UMR Agronomie (Grignon)*



Variabilité des flux N et gestion de la fertilisation N

Bilan de masse de l'azote minéral du sol



Sources majeures de variabilité

Améliorer la connaissance **des déterminants de la variabilité** de l'offre du sol en azote, du besoin en azote du peuplement, de l'utilisation de l'engrais ?

Trois principaux domaines de connaissances

1. La fourniture d'azote par le sol

- Diversité des sources organiques (humus, résidus de récolte, produits organiques) & effets des facteurs climatiques

2. La nutrition azotée des cultures

- Courbe de dilution critique, effets des carences azotées, déterminants de la teneur en protéine

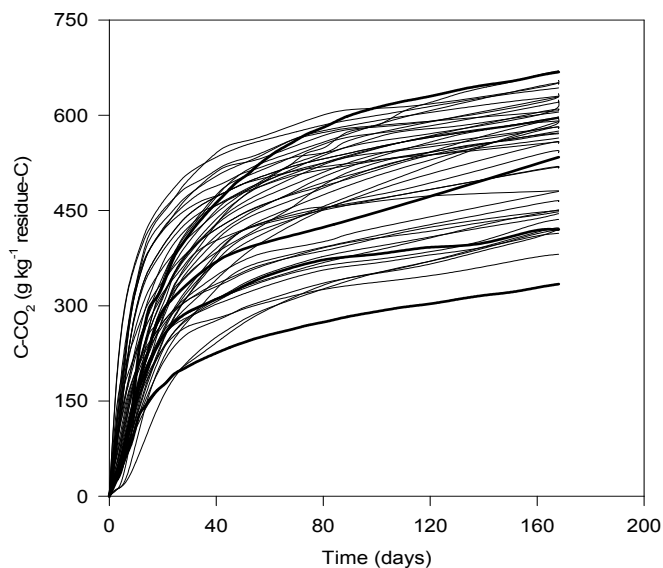
3. Les déterminants de la disponibilité de l'azote pour les cultures, en particulier l'azote de l'engrais

- microflore du sol, pertes gazeuses, compétition pour l'azote entre processus dans le sol

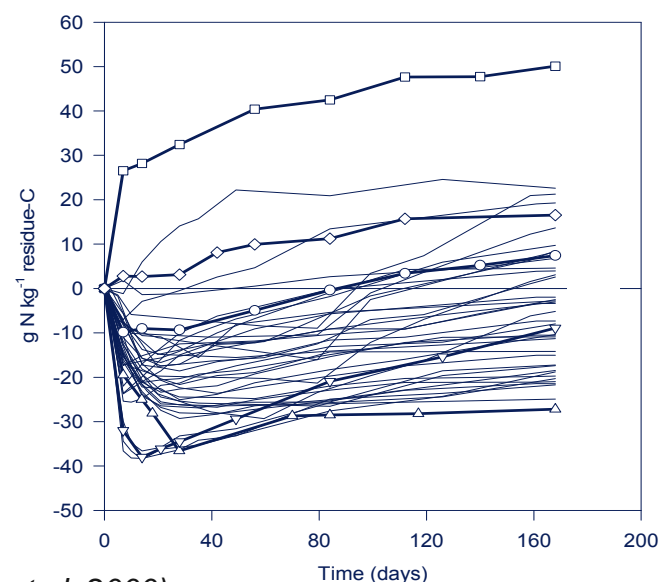
De très nombreuses études sur la « qualité » (composition chimique) **des résidus végétaux** en vue de prédire leur décomposition (minéralisation du carbone) et la minéralisation de l'azote

=> la composition (qualité biochimique et teneur en azote) est un facteur primordial

Minéralisation C



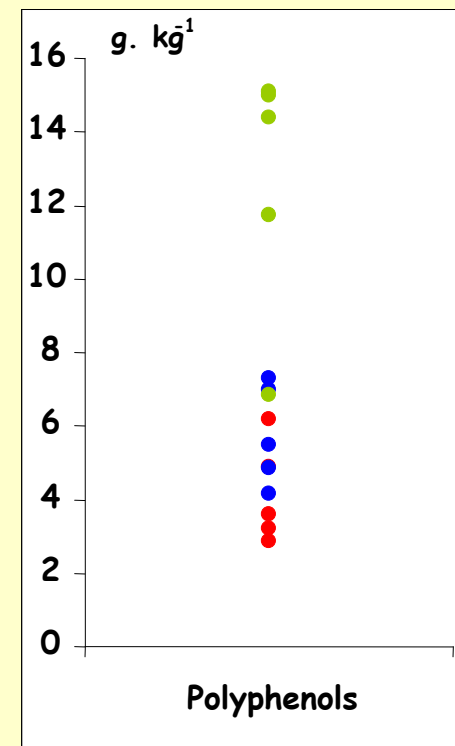
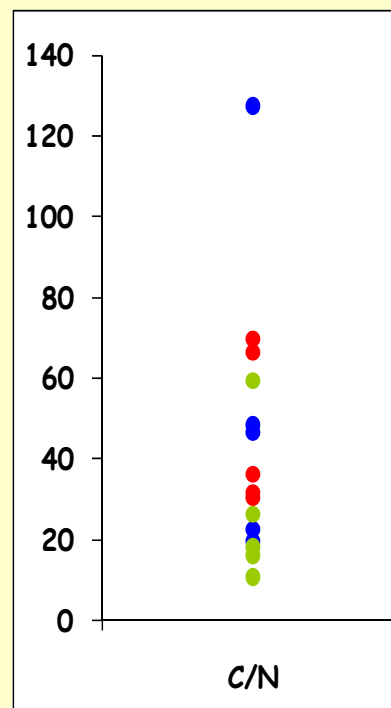
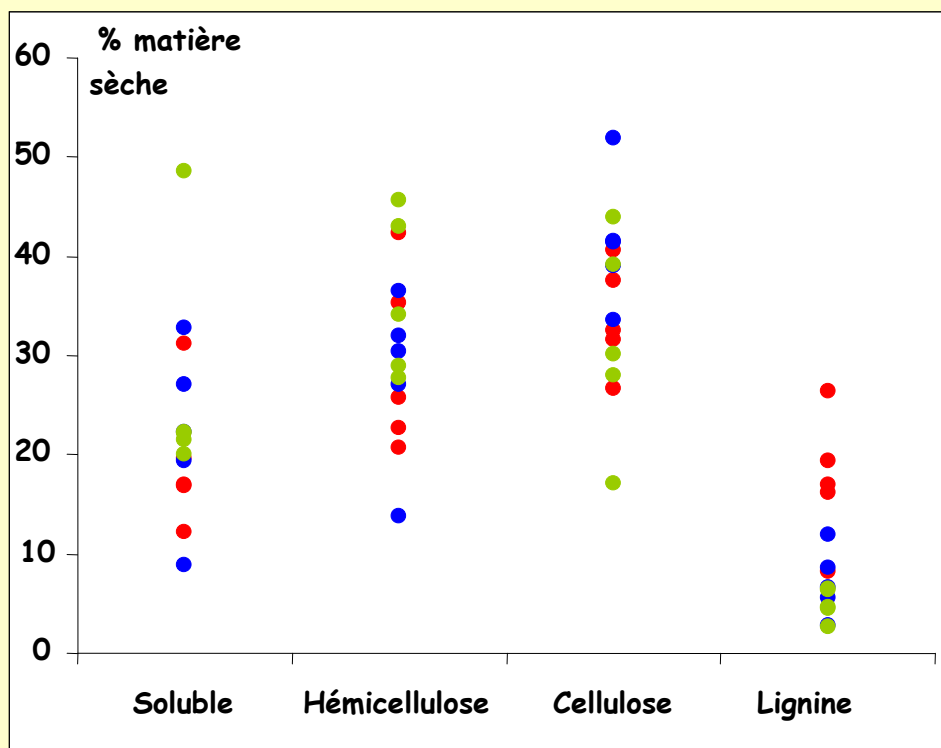
Minéralisation N



(Trinsoutrot et al. 2000)

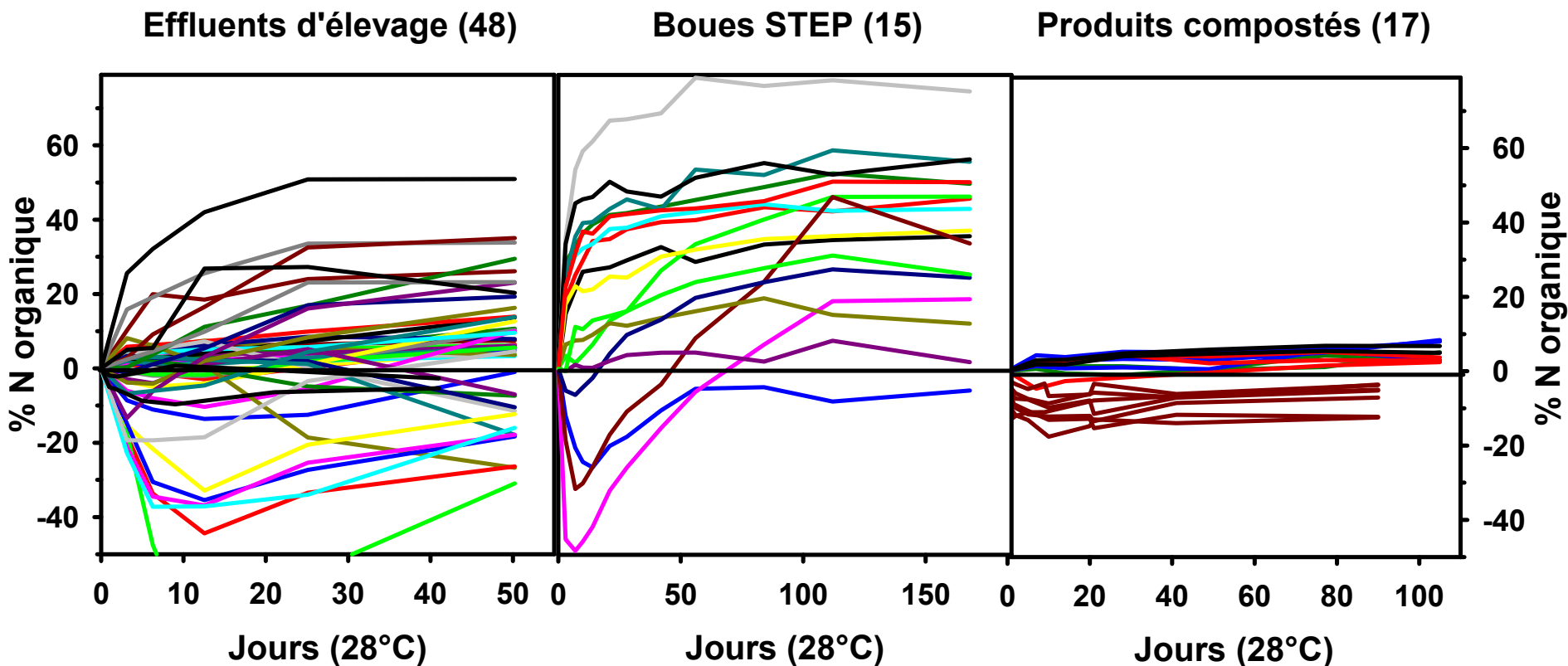
Cultures intermédiaires, nouvelles cultures (ex. cultures à vocation énergétique), systèmes racinaires, autres conditions de décomposition (notamment non labour) , ...

Une forte variabilité des caractéristiques chimiques des résidus végétaux, en fonction de leur nature fonctionnelle, de leur maturité et de leur conditions de croissance (ex. diversité de la composition biochimiques de tiges, feuilles et racines pour 5 plantes, Abiven & Recous, 2005)



- *racines*
- *tiges*
- *feuilles*

Une grande diversité de la composition des matières organiques exogènes et de leur comportement est observée, en fonction de l'origine et des modalités de traitements (Nicolardot et al., 2004)



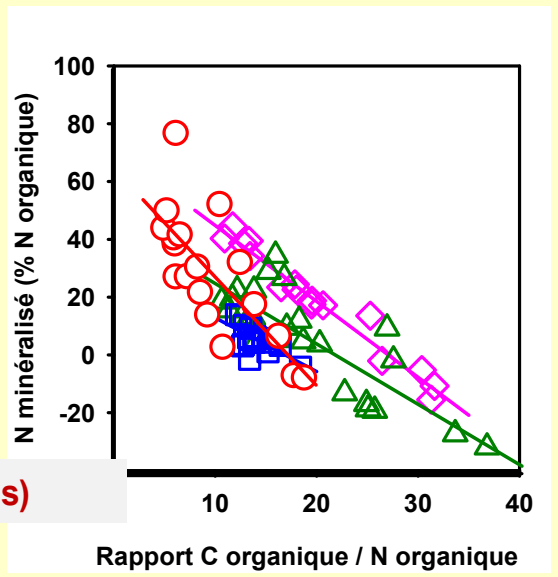
➔ Etablissement de « typologie » des matières organiques exogènes basée sur la composition chimique et biochimique pour prédire le potentiel de minéralisation N (Lashermes et al., 2010)

✓ Bases de données « PRO »

=> Paramétrage de modules simplifiés de minéralisation

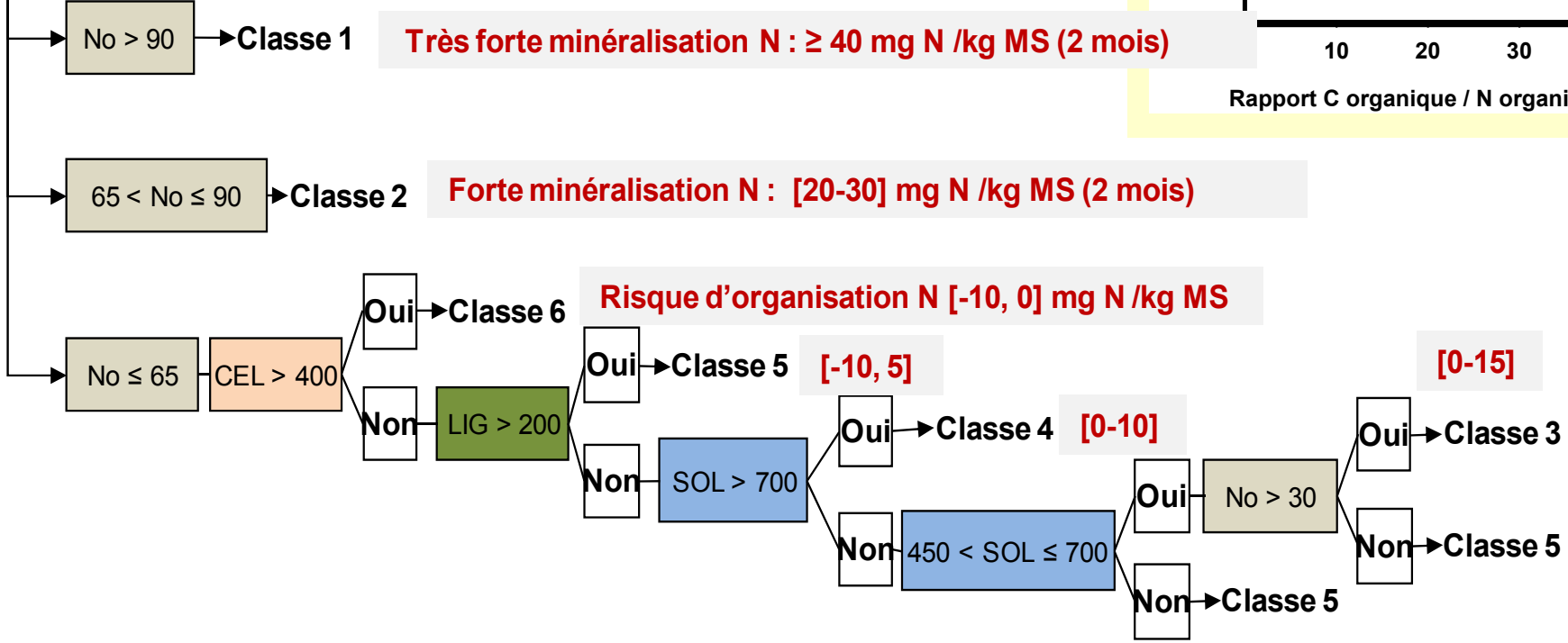
Exemple de relations entre le rapport C/N de la fraction organique et la minéralisation de l'azote pour les matières organiques exogènes (Nicolardot et al., 2004)

- Cultures intermédiaires
- Boues STEP
- Effluents d'élevage
- Produits compostés



Typologie des produits résiduels vis-à-vis de la minéralisation de N (Lashermes et al., 2010)

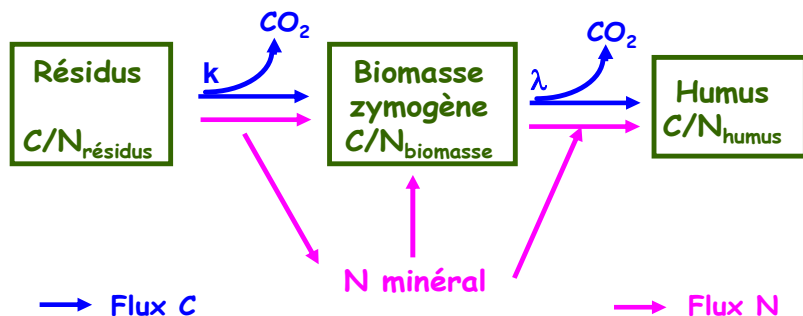
Apport de produit résiduaire organique



Exemples d'intégration de la qualité chimique dans les modules/équations de prédiction de la minéralisation

Schéma du module "résidus" inclus dans le modèle STICS

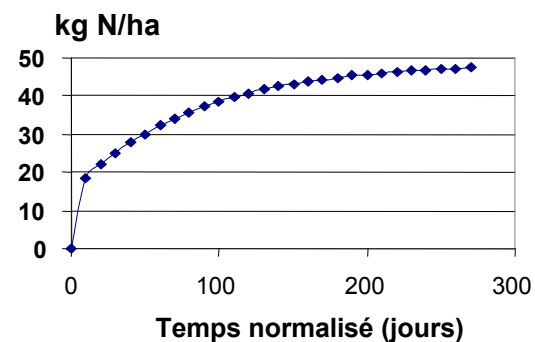
(Nicolardot *et al.*, 2001)



k = taux de décomposition des résidus
 λ = taux de décomposition de la biomasse
 Y = rendement d'assimilation de la biomasse
 h = rendement d'humification

Cinétique de minéralisation N d'une vinasse de sucrerie : intégration dans AzoFert® (Machet *et al.*, 2004)

$$N = 70 * (0.7 - 0.21 * e^{-0.86 * t} - 0.49 * e^{-0.0121 * t})$$

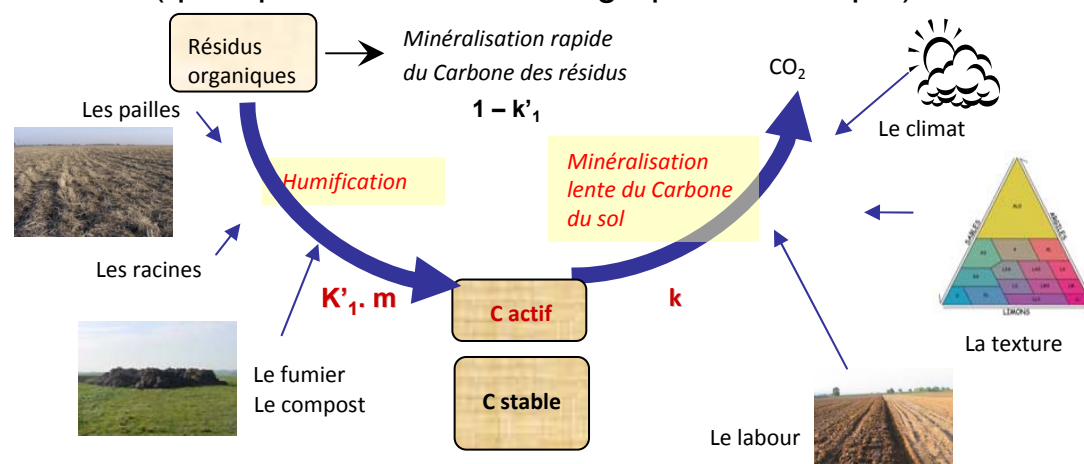


Date d'apport	Contribution en N pour Betterave (kg N/ha)
15 Août	6
15 Septembre	9
15 octobre	13
15 Novembre	17
15 Mars	48

L'étude des déterminants de la minéralisation de l'azote organique humifié dans les sols cultivés : pas d'avancées significatives , plutôt des améliorations

- Paramétrage du K2
- Prise en compte d'un pool actif et d'un pool inerte dans le compartiment N organique, par exemple dans le modèle AMG (Andriulo et al., 1999)
 - partition calée sur celle du carbone
 - fraction active fixée à 1/3 de la fraction totale (quel que soit le contexte agropédoclimatique)

Un modèle simple de calcul de bilan humique à la parcelle : AMG* (Andriulo et al., 1999)



Les principes du calcul: $C_a = 33\% C_{org}$

$k = 0.02$ à 0.06 fonction teneur argile, calcaire, travail du sol

$$dC/dt = k'_1 \cdot m - k \cdot C_a$$

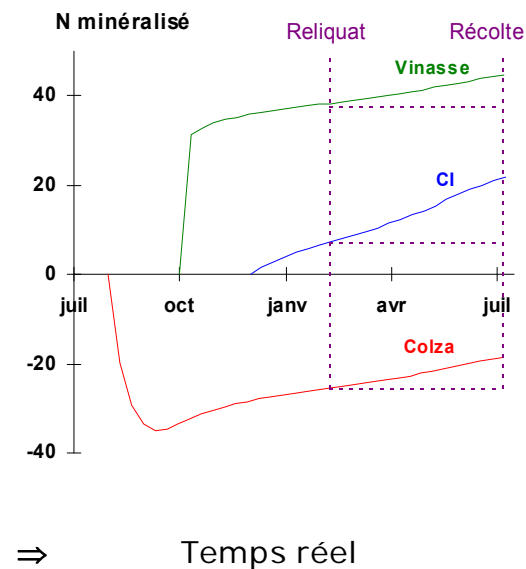
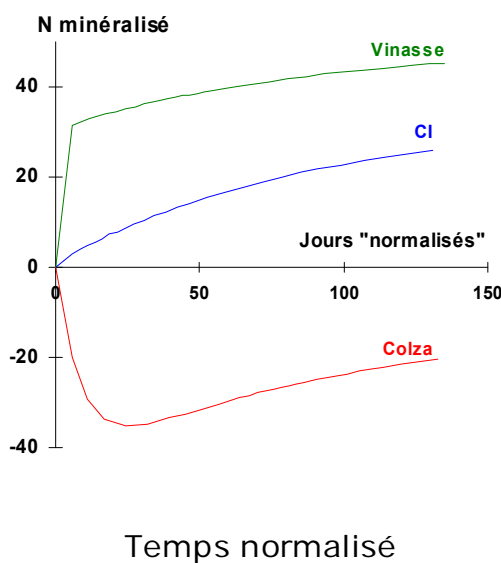
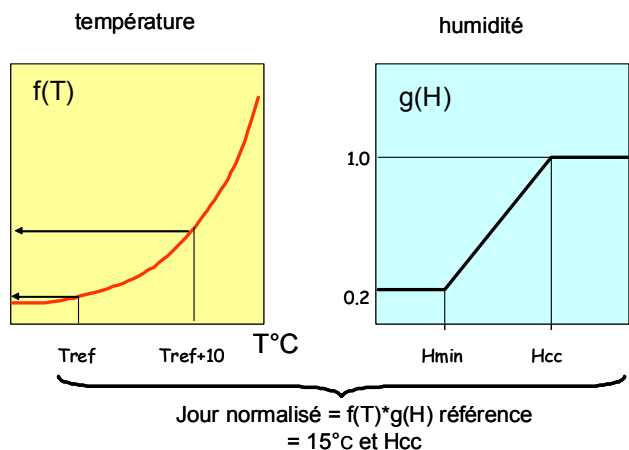
Travaux en cours

- Paramétrage du K2 Valé et al. (2007) :
- Modèle statistique ANN (Artificial Neuronal Network) à 4 variables : Argile et Carbonate de calcium, - pH eau. Fréquence de colza dans la rotation

Approche dynamique de l'évolution des matières organiques du sol : utilisation du concept de temps normalisé (Andren & Paustian, 1987)

- **Objectif** : Prise en compte des variations de température (T) et d'humidité (H) du sol par des fonctions décrivant les effets de la température $f(T)$ et de l'humidité $g(H)$ sur les processus dépendant des activités microbiennes relatifs aux cycles du C et N dans le sol;
- **Intérêts** :
 - Simuler l'effet du climat en utilisant des vitesses potentielles de transformation
 - Standardiser et extrapoler les références, généraliser à des contextes très variés
 - Comparer des vitesses de transformations pour différentes situations pédoclimatiques
 - Comparer les dynamiques mesurées au champ et au laboratoire

Exemple: Azofert (Machet et al., 2004)



Trois principaux domaines de connaissances

1. La fourniture d'azote par le sol

- Diversité des sources organiques (humus, résidus de récolte, produits organiques) & effets des facteurs climatiques

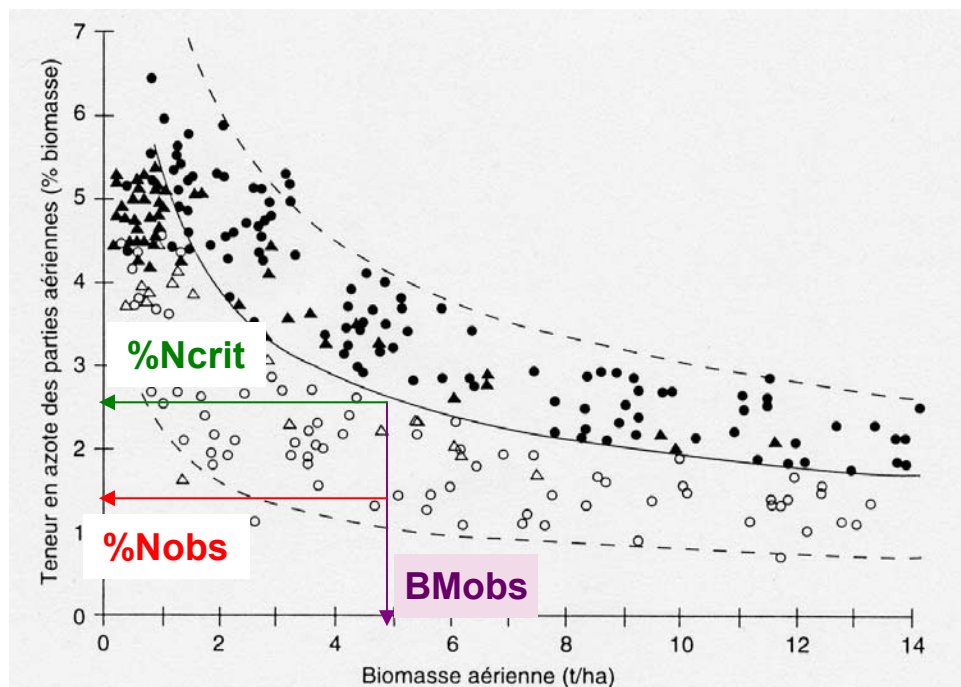
2. La nutrition azotée des cultures

- Courbe de dilution critique, effets des carences azotées, déterminants de la teneur en protéine

3. Les déterminants de la disponibilité de l'azote pour les cultures en particulier l'azote de l'engrais

- microflore du sol, pertes gazeuses, compétition pour l'azote entre processus dans le sol

Une étape déterminante dans les recherches sur la nutrition azotée Caractériser l'état azoté d'une culture par l'INN et la courbe de dilution critique



Courbe critique :

Si $BM < 1.55$ t/ha

alors $\%N_{crit} = 4.4$

Si $BM \geq 1.55$ t/ha

alors $\%N_{crit} = 5.35 MS^{-0.442}$

(Justes et al., 1994)

Indice de nutrition azotée : $INN = \%N_{obs} / \%N_{crit}$

$INN \geq 1 \Rightarrow$ l'azote n'est pas limitant de la croissance du blé

$INN < 1 \Rightarrow$ la culture est en carence azotée

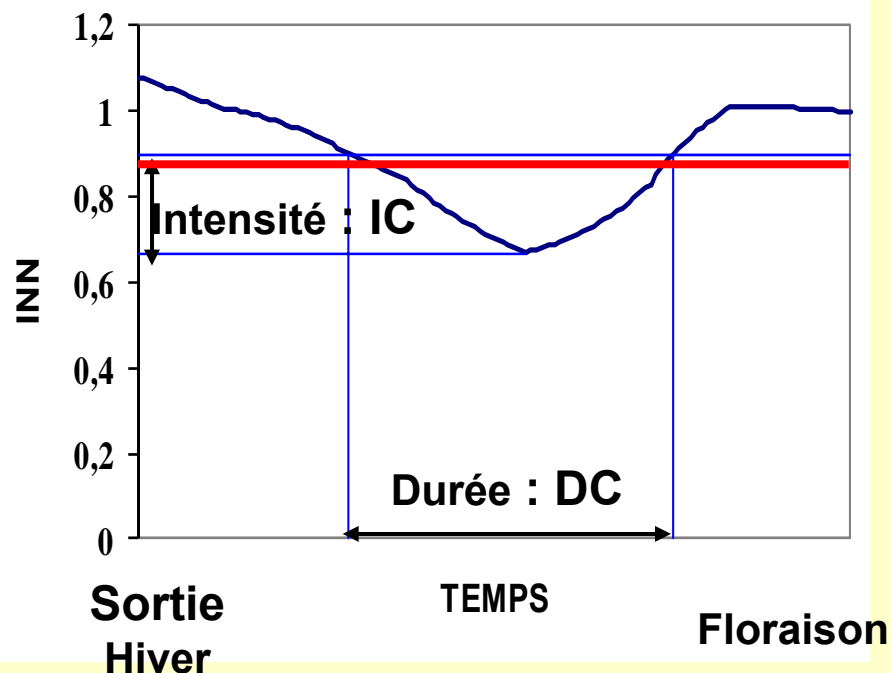
L'intensité de la carence est d'autant plus forte que l'INN est faible

Blé (Justes et al., 1994); **Colza** (Colnenne et al., 1999); **Maïs** (Plénet et Cruz, 1997); **Pois** (Ney et al., 1997); **Pomme de terre** (Duchenne et al., 1997); **Betterave** (Duval et al., 2003); etc.

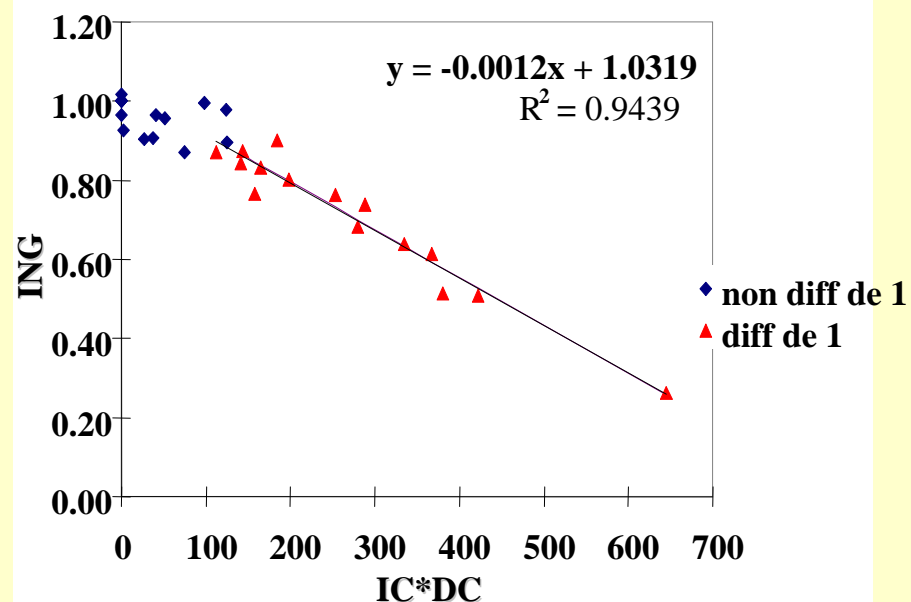
Etudes portant sur les conséquences d'une nutrition azotée suboptimale: caractérisation des carences azotées et effets sur le nombre de grains par m²

(Jeuffroy et Bouchard, 1999)

Caractéristiques d'une carence



Effet de la carence sur le NG/m²

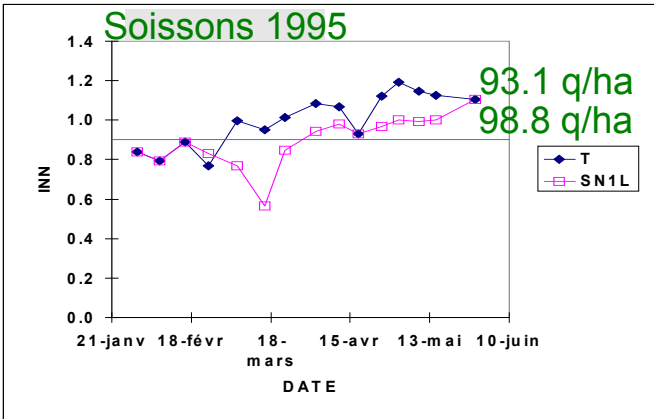


ING = Indice de Nb de grains/m² =

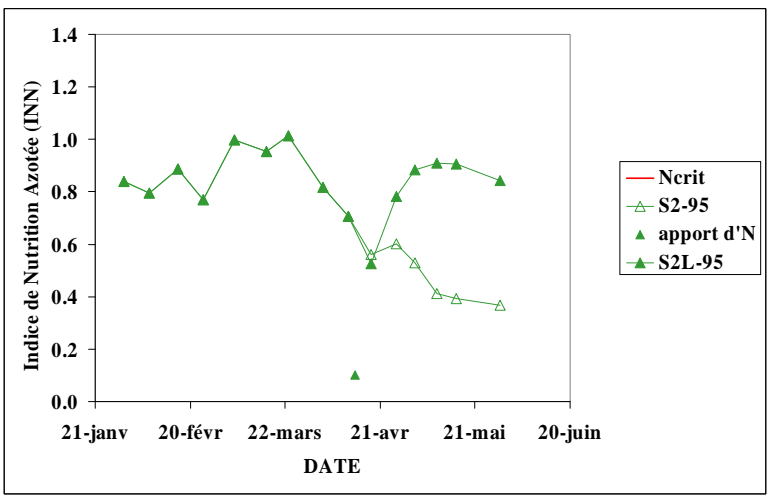
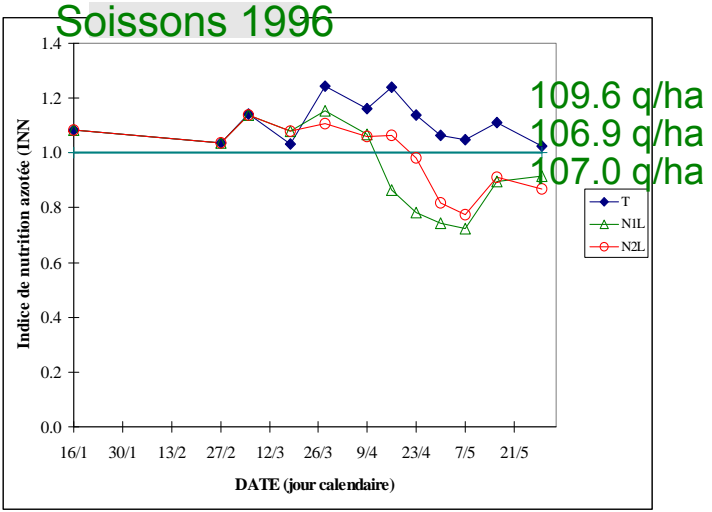
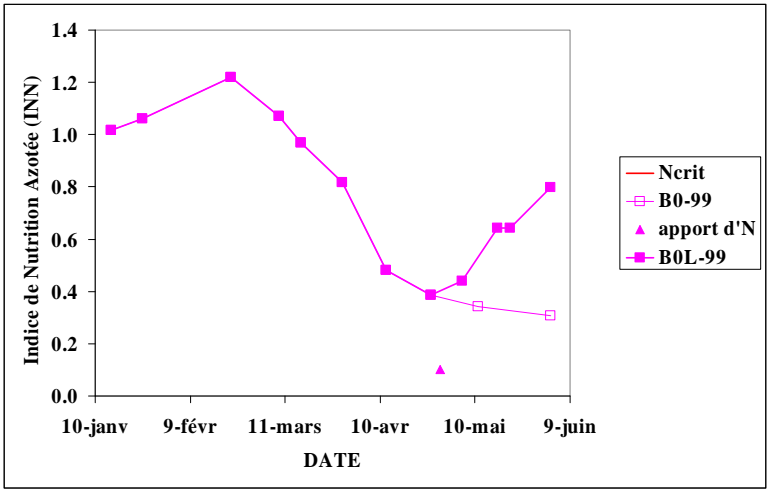
NG/m² d'une culture carencée / NG/m² d'une culture non carencée cultivée dans les mêmes conditions

- La relation entre perte de nombre de grains/m² et caractéristiques de la carence n'est pas différente entre variétés
- Après une carence azotée, un apport d'N permet à la culture de recouvrer une vitesse maximale d'absorption
- On peut tolérer des carences sans effet préjudiciable sur le rendement

Conséquences d'une carence azotée sur le rendement



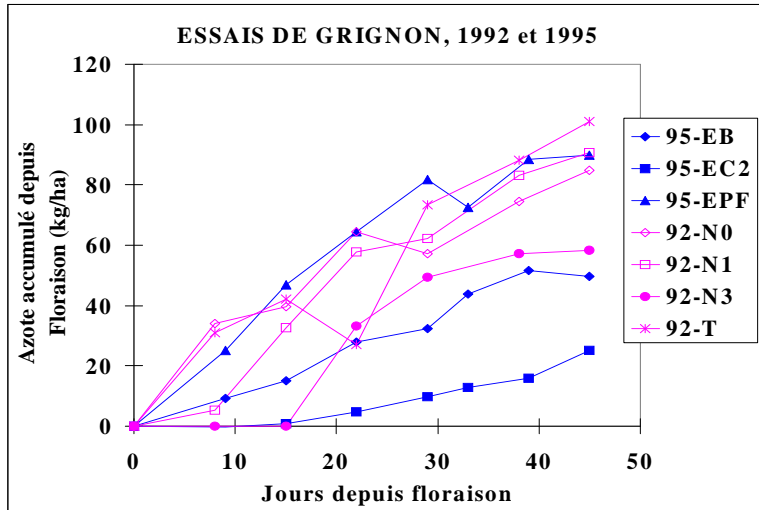
Effet d'un apport d'azote sur l'INN



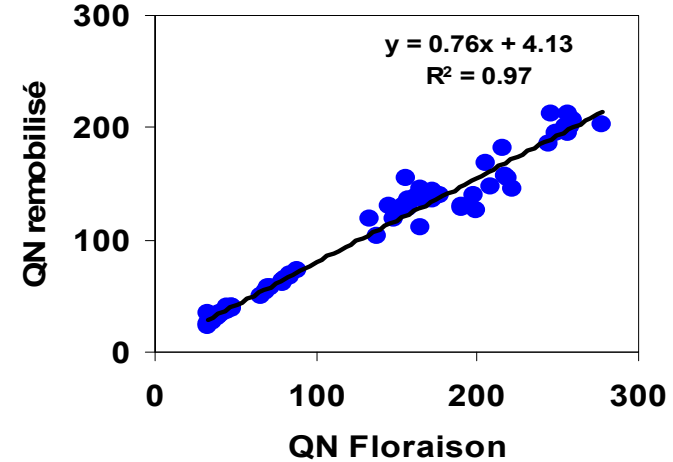
Jeuffroy et Bouchard, 1999

2. La nutrition azotée des cultures

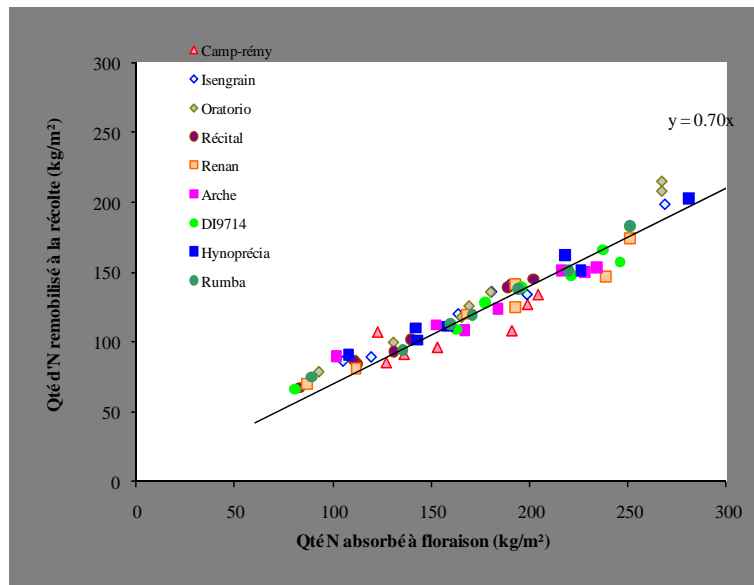
Girard, 1997



Forte capacité d'absorption post-floraison



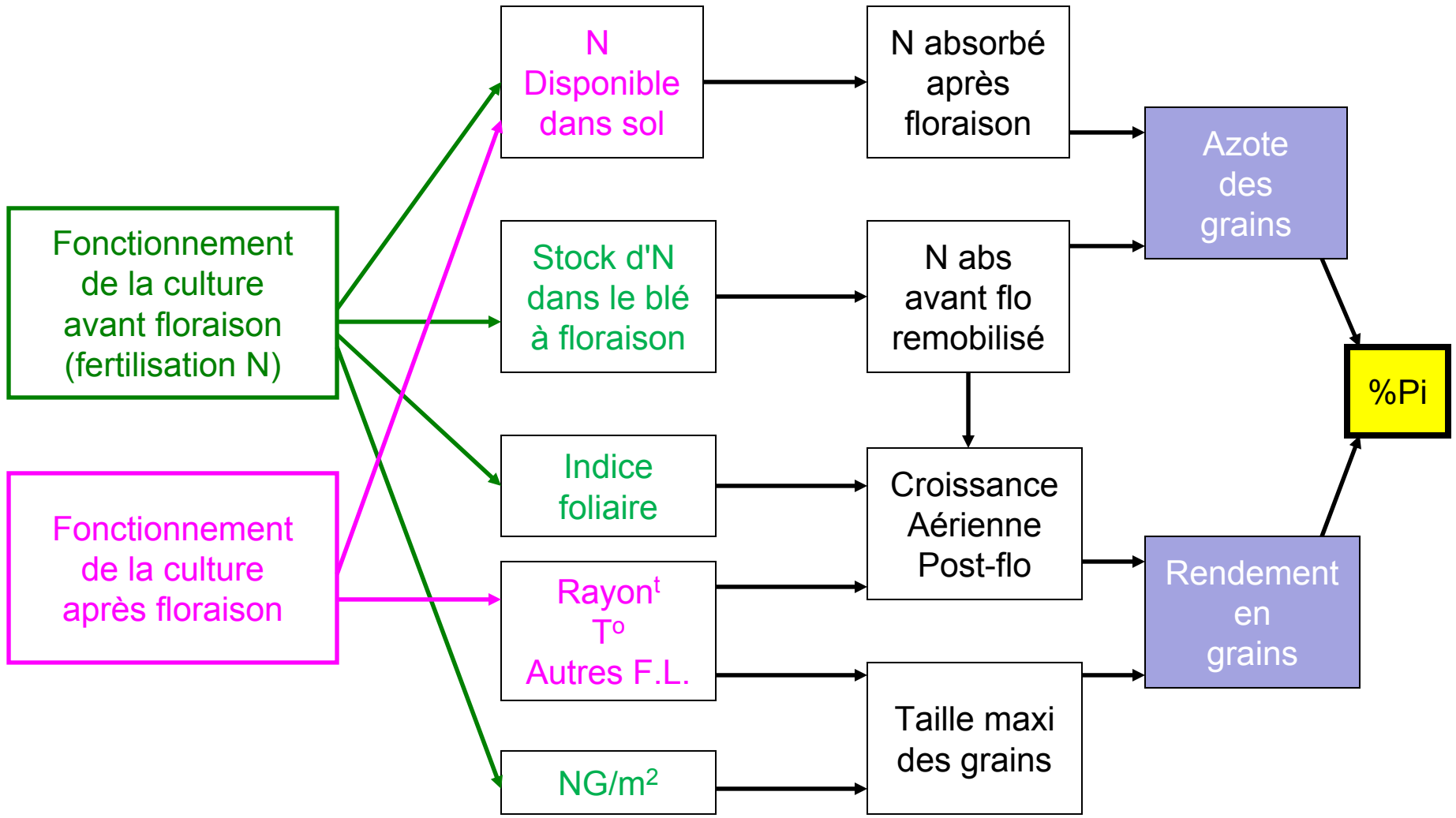
La quantité N remobilisée est déterminée par la quantité N absorbé à la floraison



Le taux de remobilisation ne change pas en fonction de la variété

Barbottin et al., 2005

La teneur en protéines des grains de blé modélisée à partir de l'état du peuplement à la floraison et du fonctionnement post floraison (Jeuffroy et al., 2000)

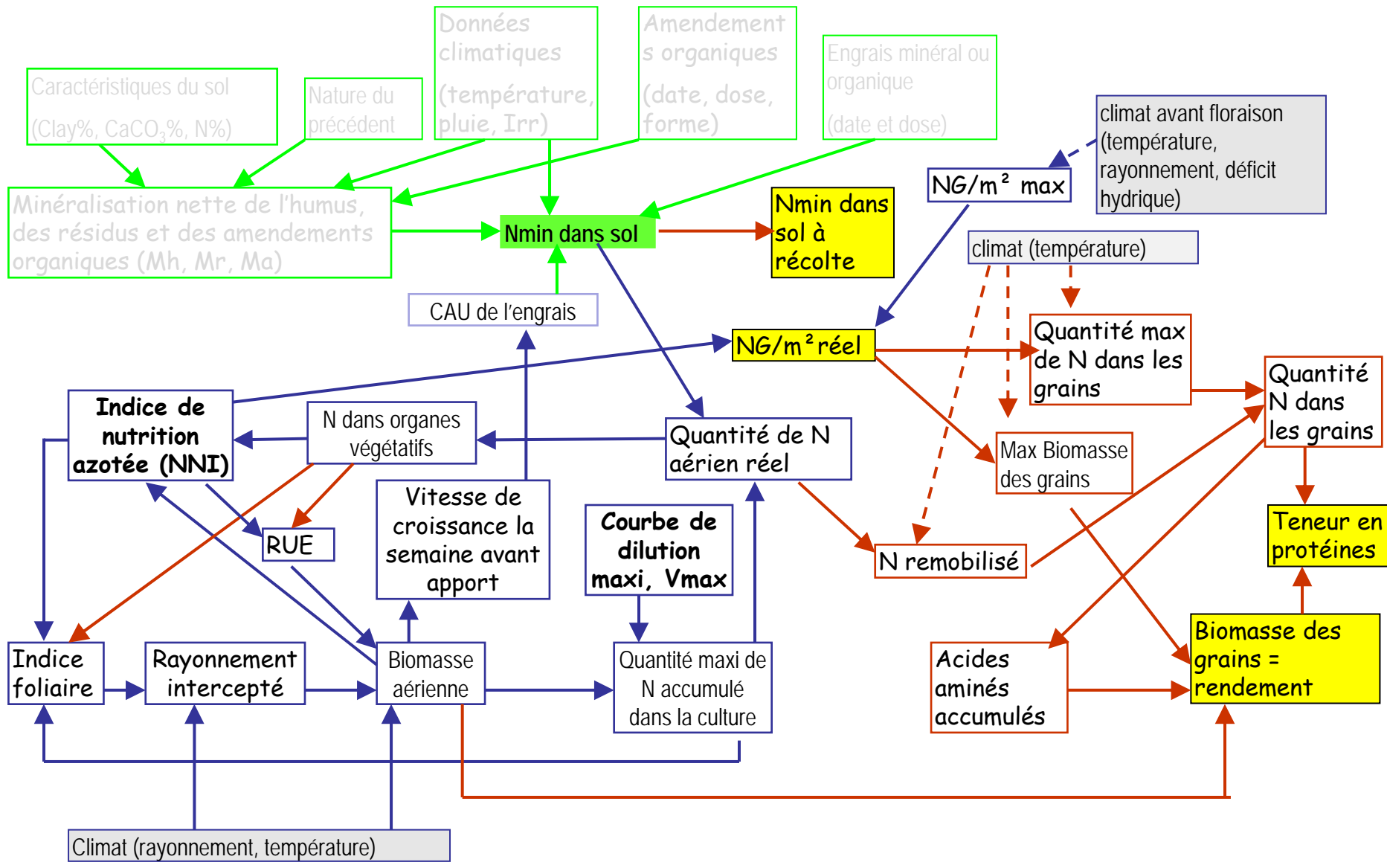


2. La nutrition azotée des cultures

Azodyn-blé
(Jeuffroy et Recous, 1999; Girard, 1997; Jeuffroy et al., 2000)

ENTREES

SORTIES



Trois principaux domaines de connaissances

1. La fourniture d'azote par le sol

- Diversité des sources organiques (humus, résidus de récolte, produits organiques) & effets des facteurs climatiques

2. La nutrition azotée des cultures

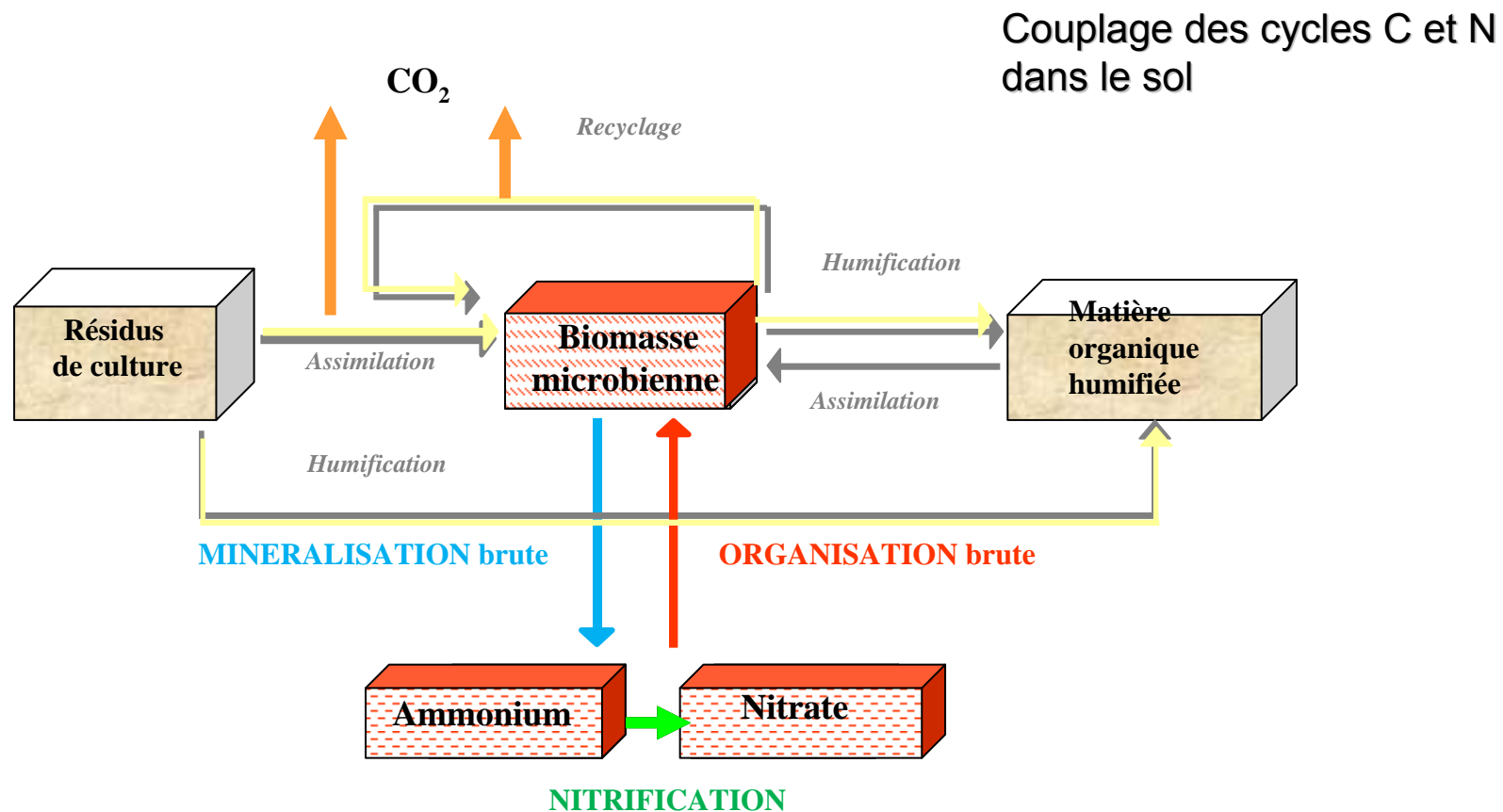
- Courbe de dilution critique, effets des carences azotées, déterminants de la teneur en protéine

3. Les déterminants de la disponibilité de l'azote pour les cultures en particulier l'azote de l'engrais

- microflore du sol, pertes gazeuses, compétition pour l'azote entre processus dans le sol

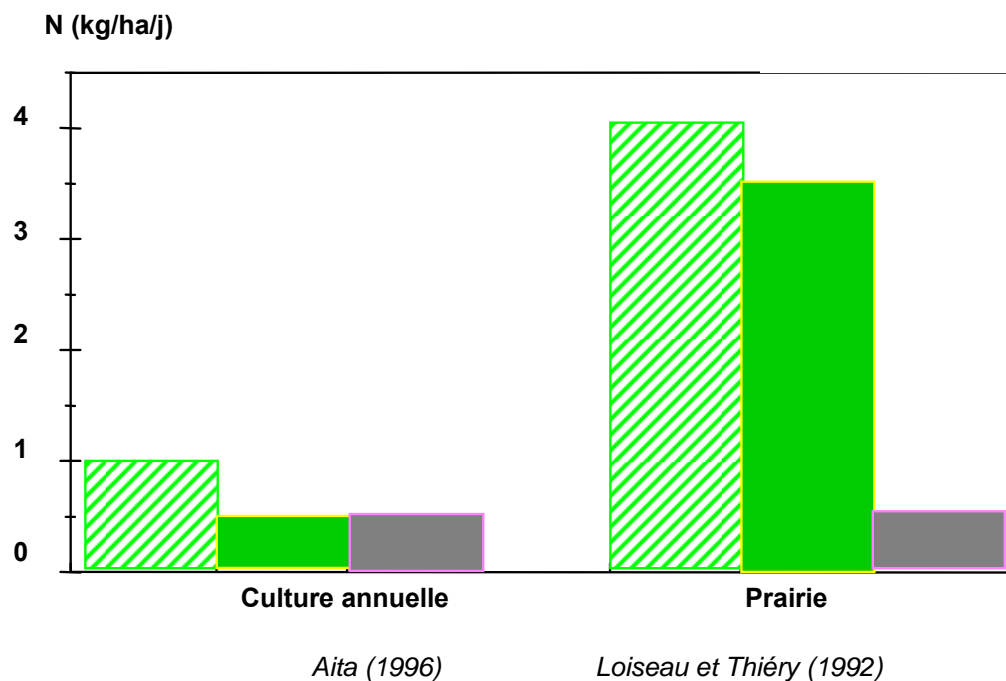
3. Les déterminants de la disponibilité de l'azote pour la plante

Les travaux avec isotope ^{15}N : ont permis de quantifier des flux: organisation microbienne, flux « bruts » d'azote, relations avec la dynamique du carbone, partition à court terme entre plante et microorganismes du sol, pertes gazeuses par défaut de bilan



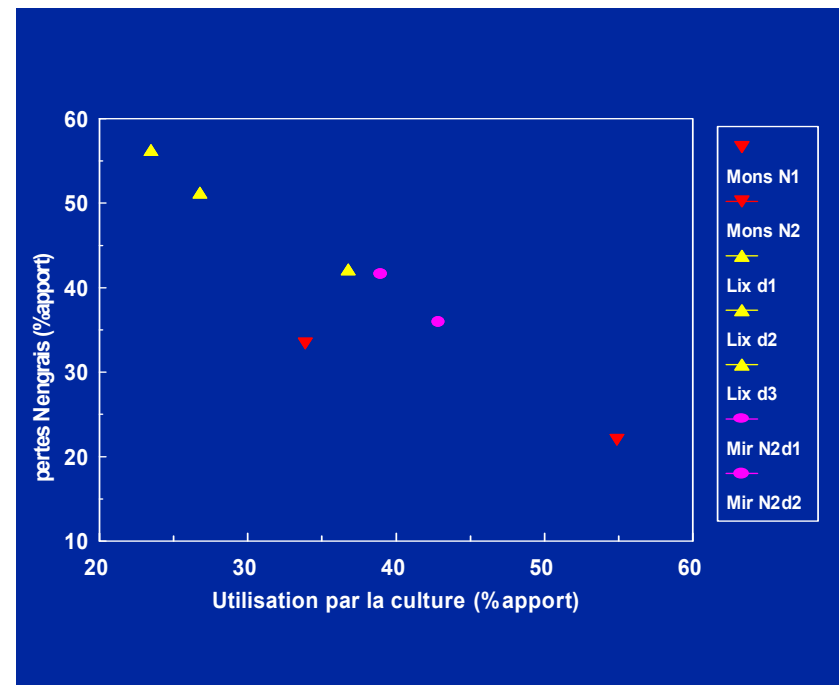
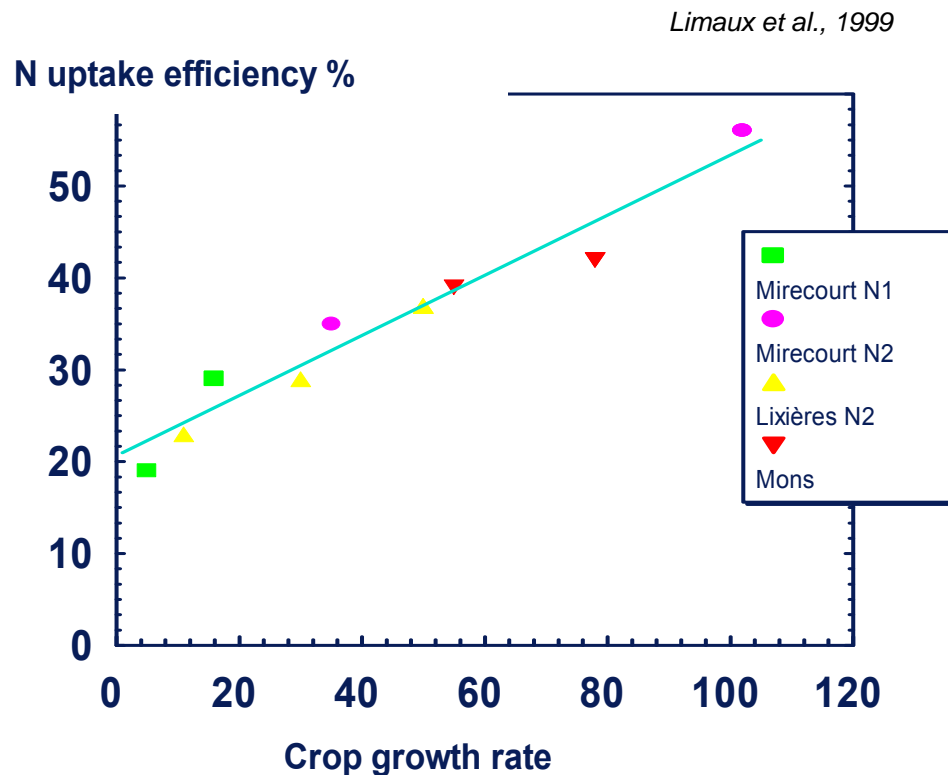
Flux totaux (ou bruts) de l'azote estimés avec la technique 15N

$$\text{Minéralisation brute} - \text{Organisation brute} = \text{Minéralisation nette.}$$



Recous et al, 1997

Les études en dynamique ont démontré une relation étroite entre utilisation de N apporté et vitesse de croissance au moment de l'apport, et entre pertes d'N engrais et utilisation par la plante



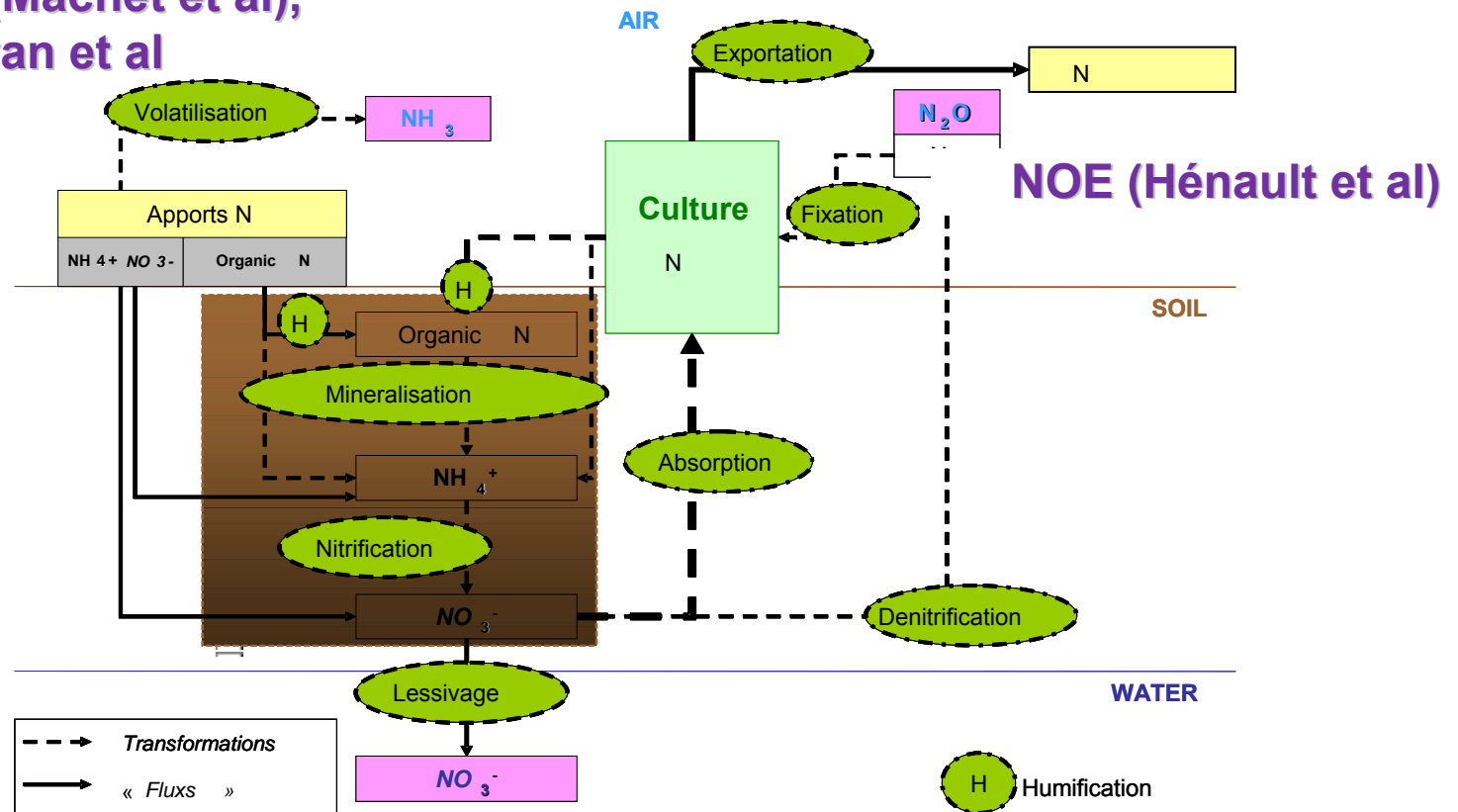
⇒ Importance de l'état du couvert au moment de l'apport d'azote, pour maximiser l'utilisation et minimiser les pertes

⇒ le sol ne constitue pas un « réservoir » pour l'azote de l'engrais

⇒ La plante est « apte » à gagner la compétition pour l'azote avec les autres mécanismes, si la synchronisation entre disponibilité et demande en N du peuplement est bonne .

Plus récemment les études sur les pertes gazeuses, **volatilisation et émissions de N₂O**, conduisent à élaborer des modules simples et à les insérer dans les outils de diagnostic (ex. Syst'N) et OAD pour la fertilisation (ex. Azofert).

Volt'Air (Génermont et al)
AZOFERT (Machet et al),
Morvan et al



Représentation des processus simulés par le calculateur de l'outil Syst'N (Parnaudeau et al., 2009)

Ex: Dans AZOFERT (*Machet et al., 2004*)

■ **Volatilisation d'ammoniac estimée à partir de :**

- * caractéristiques du sol (pH, CEC)
- * la forme de l'engrais (physique et chimique)
- * mode d'apport (en surface, incorporation dans le sol)
- * l'état de végétation de la culture à la date d'apport de l'engrais

Se traduit par une estimation de la perte sous forme d'ammoniac, et des recommandations de formes d'azote à éviter.

Ex: Dans SYST'N (*Parnaudeau et al., 2010*)

Dénitrification : D_a

$$D_a = D_p * F_N * F_W * F_T * F_{pH} \quad (\text{NOE, Henault et al. 2000})$$

Potentiel de dénitrification (D_p)

- mesuré: dans les modèles NOE, Ceres-EGC
- calculé en fonction du C organique des sols : Syst'N
(Heinen, 2006, Farquharson et Baldock, 2008)

N_{20} : $D_a * \text{Coefficient } N_{20}/N_{20}+N_2$ (NOE, => valeur fixé à partir de mesures)

Conclusions et éléments de discussion

- ❑ **Une approche par « compartiments » et « postes du bilan »** du cycle de N dans le système sol-plante, très partagée entre scientifiques et agronomes de terrain: une modélisation implicite ou explicite, qui fait consensus sur les principaux processus à prendre en compte (?)
- ❑ **Pas de révolution sur la minéralisation des sources organiques:** difficulté persistante à définir des lois d'action génériques, simples et robustes pour une large gamme de substrats et de conditions => **nécessaire effort de mutualisation** (en cours). **Rôle important des microorganismes du sol** et nécessité de les prendre en compte pour comprendre le fonctionnement du sol, et des cycles biogéochimiques, mais peu d'utilisation possible dans les OAD pour plusieurs raisons
- ❑ **INN et courbe de dilution critique : une success story !**, outils de diagnostic permettant le pilotage en cours de culture (déclenchement ou non d'un apport N)
 - **Prédiction d'entrée en carence** = teneur en nitrate de jus de base de tige (Justes et al., 1997) permettant de déterminer la nécessité d'un apport N
 - **Evaluation de la biomasse végétale en sortie d'hiver et de l'azote absorbé** par le peuplement: colza, blé, ...) pour ajuster le calcul de la fertilisation
 - **Témoin double densité** (Limaux et al., 2002) permettant d'anticiper l'entrée en carence

Conclusions

- ❑ Des avancées significatives au cours des 15 dernières années, en **modélisation dynamique des processus** (sol et plante) permettant d'envisager des stratégies innovantes de fertilisation azotée, et des outils dynamiques (ex. Azofert® et Reliquat virtuel, azodyn-blé en conditions N sub-optimales).
 - **Une autre success story: les jours normalisés !!**
- ❑ **Certaines connaissances sont encore insuffisamment utilisées pour piloter les apports d'azote,**
 - les relations entre les dates d'apport (vitesse de croissance) et l'utilisation de l'engrais (fractionnement);
 - les connaissances sur les **carences en N** conduisent à des stratégies optimales de fertilisation assez différentes: **pourraient être entrées dans les OAD** mais ne le sont pas (nécessite notamment de calculer une durée de carence tolérable pour le peuplement et pas seulement une date d'entrée en carence)
 - Connaissances sur les **déterminants de la teneur en protéines des grains ne sont pas rentrés dans les OAD**, mais pourraient l'être
- ❑ **Des recherches intensifiées actuellement,** sur les **émissions de gaz** et notamment le N₂O, permettant d'envisager dans l'avenir, une meilleure prise en compte de ces processus dans les OAD. La principale difficulté liée à ces processus restera la variabilité spatiale (verticale et horizontale) et temporelle de ces flux, difficile à prendre en compte dans des outils simples (beaucoup d'incertitudes).