



Fertilisation azotée & directive nitrate

Méthode du bilan, outils et références

Avec le soutien de :



De la méthode de raisonnement aux outils d'aide à la décision: *un cadre de raisonnement unifié*

F. Laurent (Arvalis), M. Lambert (Yara),
S. Recous (INRA)



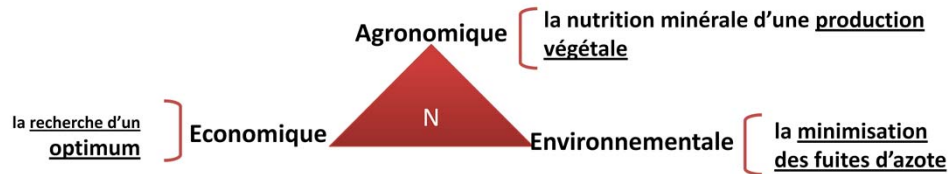
Fertilisation azotée & directive nitrate - Méthode du bilan, outils et références - 15 mars 2012

Cet exposé a été préparé conjointement particulièrement par ces trois auteurs, dans le cadre de la réflexion menée au sein du COMIFER et du RMT F&E.

Quelques diapositives ont été masquées lors de l'exposé du 15 mars, pour tenir dans le temps imparti, mais sont laissées dans cette version du diaporama.

le raisonnement de la fertilisation azotée

- D'abord , une triple démarche de gestion :



Qui s'appuie sur des connaissances agronomiques

Évolutives en fonction des acquis de la recherche et de l'expérimentation

Mise en œuvre sensible à la qualité des informations disponibles pour chaque parcelle.

Qui traite du vivant :

Un peuplement végétal et des processus biologiques

Sous la domination forte des conditions du milieu

Soumis à des aléas parfois forts

Mais qui s'inscrit également dans un cadre réglementaire depuis 1991

Une formalité administrative qui doit concilier pertinence agronomique et facilité de contrôle



Fertilisation azotée & directive nitrates - Méthode du bilan, outils et références - 15 mars 2012

Le challenge :

réussir à concilier une **démarche agronomique**

Évolutive en fonction des avancées scientifiques

Sensible à la précision des informations culturales disponibles

Reposant sur des processus biologiques soumis au climat (passé et à venir). Derrière le mot "vivant": l'aléa, la variabilité sont importants

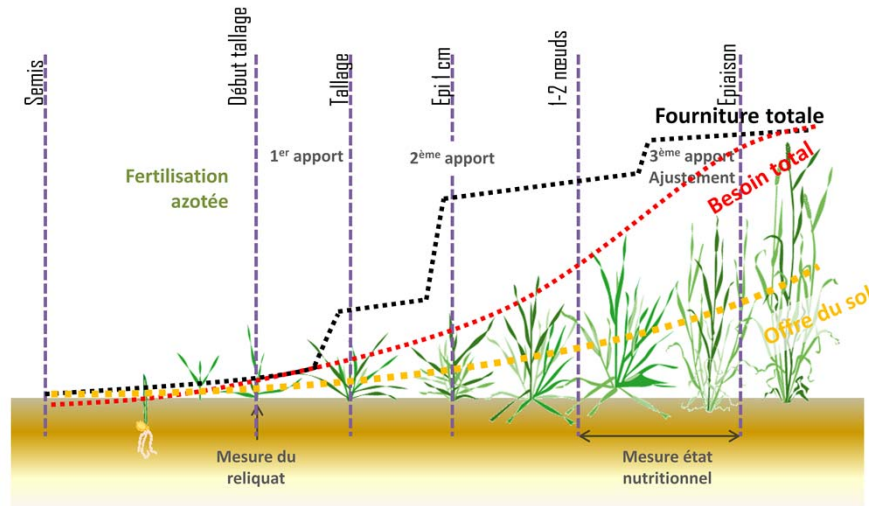
Avec une **obligation réglementaire** dont le contrôle est un corollaire

Avec une **large acceptabilité** par les acteurs , gage d'une bonne mise en œuvre

le raisonnement de la fertilisation azotée

• Les objectifs :

Assurer la nutrition azotée optimale d'une culture :



Permettant ...

c o m i f e r



Fertilisation azotée & directive nitrates - Méthode du bilan, outils et références - 15 mars 2012

• Les 4 B :

La **Bonne Dose**

→ méthode du bilan

Au **Bon Stade** → fractionnement adapté

Au **Bon endroit**

→ variabilité intra-parcellaire et levier de progrès avec

l'agriculture de précision

Avec le **Bon produit**

→ maximiser l'efficacité des engrais azotés minéraux ou

organiques par des techniques appropriées :

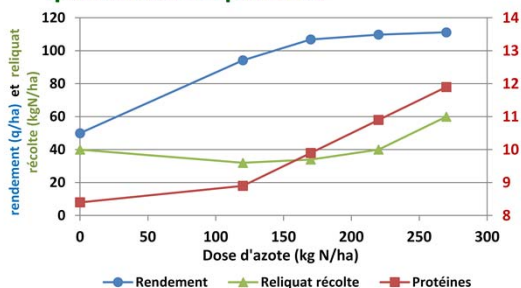
incorporation, localisation et minimiser les pertes

environnementales ainsi que l'empreinte carbone et énergétique.

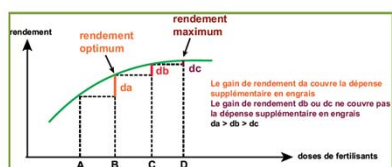
• Une gestion continue : → de la culture et la période d'inter-culture également

Le raisonnement de la fertilisation azotée : 3 enjeux

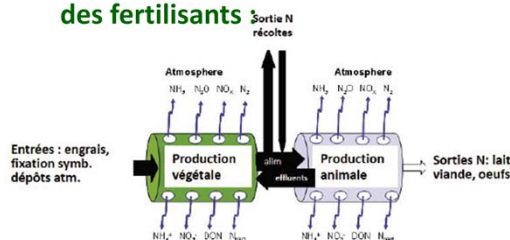
❖ d'atteindre un objectif de production quantitatif et qualitatif



❖ d'atteindre un objectif de rentabilité pour l'agriculteur



❖ d'atteindre un objectif de minimisation des impacts environnementaux liés à l'utilisation des fertilisants



Au final :
un équilibre entre différents objectifs et contraintes

c o m i f e r

Fertilisation & Environnement

Fertilisation azotée & directive nitrate - Méthode du bilan, outils et références - 15 mars 2012

• Objectif de production

du point de vue des nitrates, le reliquat d'azote post-récolte n'augmente qu'au-delà de l'optimum de rendement

sur le graphique 1: on voit sur la courbe bleue qu'une approche avec des doses croissantes d'azote engrais permet de définir une dose « optimale. » du point de vue du rendement. La teneur en protéine (courbe rouge) est dépendante de la fertilisation azotée et le maximum n'est pas atteint à la même dose d'engrais ! C'est un premier niveau de compromis. Enfin on voit que les reliquats d'azote minéral dans le sol à la récolte vont augmenter aussi à partir du moment où les rendements n'augmentent plus. L'optimum de ces différentes contraintes est compliqué à trouver (notamment le contexte économique) et le contexte économique n'est pas pas forcément pris en compte par les outils

• Objectif de rentabilité

les termes de l'équation du bilan d'azote et notamment le besoin des cultures sont établis au voisinage du rendement optimal

Minimiser les impacts

Le système plante-sol fuit par le bas mais aussi par le haut (pertes gazeuses, pertes par lessivage)

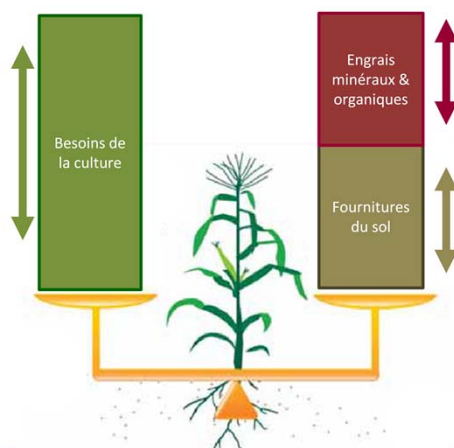
• le mot COMPROMIS est plus adéquat que le mot EQUILIBRE

- une gestion globale du cycle N est nécessaire.
Attention au risque de déplacement d'impact possible

rentabilité et minimisation des impacts sur l'environnement ne sont pas antinomiques dans la limite d'objectifs raisonnables pour le milieu considéré

Le raisonnement de la fertilisation azotée

- Le principe fondateur unique :
 - Le raisonnement de la fertilisation azotée repose sur le principe simple **d'équilibre entre les besoins en azote et la fourniture sol+engrais**
 - La fertilisation minérale et/ou organique complète l'offre du milieu afin de satisfaire les besoins de la culture



Principe: équilibrer les besoins de la culture "au kilo près " avec la fourniture par le sol, la fertilisation azoté minérale et organique. Ces besoins sont espèce-dépendant, mais la notion de potentiel de rendement est très importante. Quand on se met d'accord sur ce principe...

Cette balance figure les 3 axes de progrès pour améliorer le raisonnement de la fertilisation :

Quantifier les besoins des cultures : quelle quantité avec quelle dynamique pour quelle type de production

• **Prévoir les fournitures du sol :** quelles quantités issues de chaque compartiment : résidus , humus ... avec quel dynamique

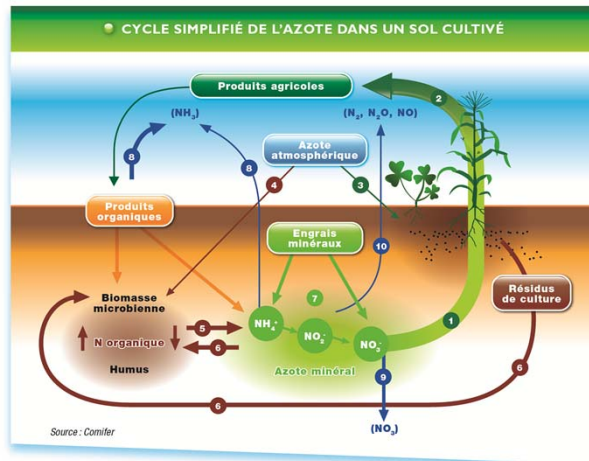
• **Engrais minéraux et organiques :** comment maximiser leur efficacité , réduction des pertes , cinétique de minéralisation des fractions organiques

Un cadre de raisonnement unifié des flux d'azote sol – plante – atmosphère pour gérer la fertilisation

Les caractéristiques du « comportement » de l'azote (N)
dépendent d'un cycle complexe, car:

Soumis simultanément à divers
processus

- Physico-chimiques :
dissolution, volatilisation (8)
lixiviation (9)
- Biologiques : minéralisation (5)
nitrification (7), organisation (6)
dénitrification (10) fixation (3) (4)
- Gouvernés par activité plante :
absorption (1) (2)



On connaît la **complexité du cycle de l'azote** présenté ici !
soumis à des processus divers: physico-chimiques et biologiques (sol et plante),

En fait les quantités d'azote qui passent par ces différents processus sont très importantes (on parle des processus « bruts », produisant ou consommant l'azote minéral dans le sol) dont la résultante ou « flux nets » déterminent la disponibilité de l'azote minéral par la plante (ces quantités nettes peuvent être plus faibles que les quantités « brutes »)

C'est à partir de ces processus, de leur intensité au cours d'un cycle cultural, et de leur dépendance au contexte pédo-climatique et aux pratiques culturales (quantité et formes d'engrais, quantité et nature des restitutions organiques, type de sol, etc...) que l'on va pouvoir établir un « bilan »

Un cadre de raisonnement unifié des flux d'azote sol – plante – atmosphère pour gérer la fertilisation

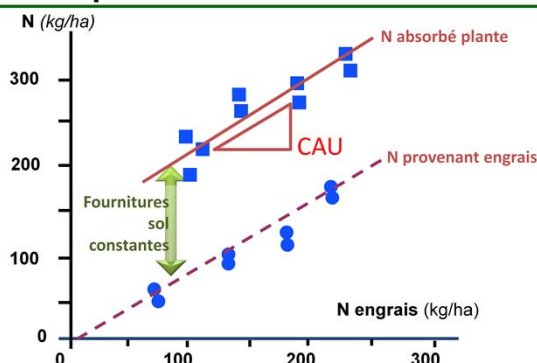
Mais...

- Les flux sont quantifiables à des échelles temps compatibles avec le raisonnement => estimation des « postes » d'un bilan à l'échelle d'un cycle cultural ou de périodes de ce cycle
- Le bilan de masse : principe mobilisé dans un grand nombre de disciplines : $\text{Fin} = \text{début} + \text{entrées} - \text{sorties}$
- Le périmètre du système est explicite :
 - compartiment azote minéral
 - Système plante + sol (zone explorée racines)
 - Cycle cultural

Néanmoins malgré cette complexité évoquée à la diapositive précédente, ces flux **sont quantifiables** à l'échelle d'un bilan sur **un cycle cultural ou partie de cycle**.
- principe **de bilan de masse**: principe mobilisé dans un grand nombre de disciplines en explicitant bien le périmètre auquel il s'applique

Des hypothèses scientifiques validées

- Pas d'interaction
N de l'engrais * minéralisation N sol
→ **calcul ADDITIF**



- Minéralisation du sol : les déterminants sont connus (Humidité; Température, Stock MOS, texture du sol, carbonates) = **PREVISION possible**
- L'utilisation de l'azote de l'engrais est toujours incomplète
= **Coefficient utilisation : inférieur à 1 ; variabilité**
 - Pertes gazeuses
 - Organisation aux dépens engrais

- sur le caractère additif, le graphique montre que la quantité d'azote fournie par le sol, au pas de temps auquel on raisonne la fertilisation annuelle, n'est pas affectée par la dose d'azote apportée. Il est donc justifié d'ajouter ces « postes » du bilan.

- sur la minéralisation du sol: les déterminants sont connus. Il est ainsi possible de faire des prévisions de la minéralisation du sol en fonction d'un type de sol et d'un climat « moyen » par exemple, ou estimer a posteriori la minéralisation de l'azote d'un sol sur un climat connu.

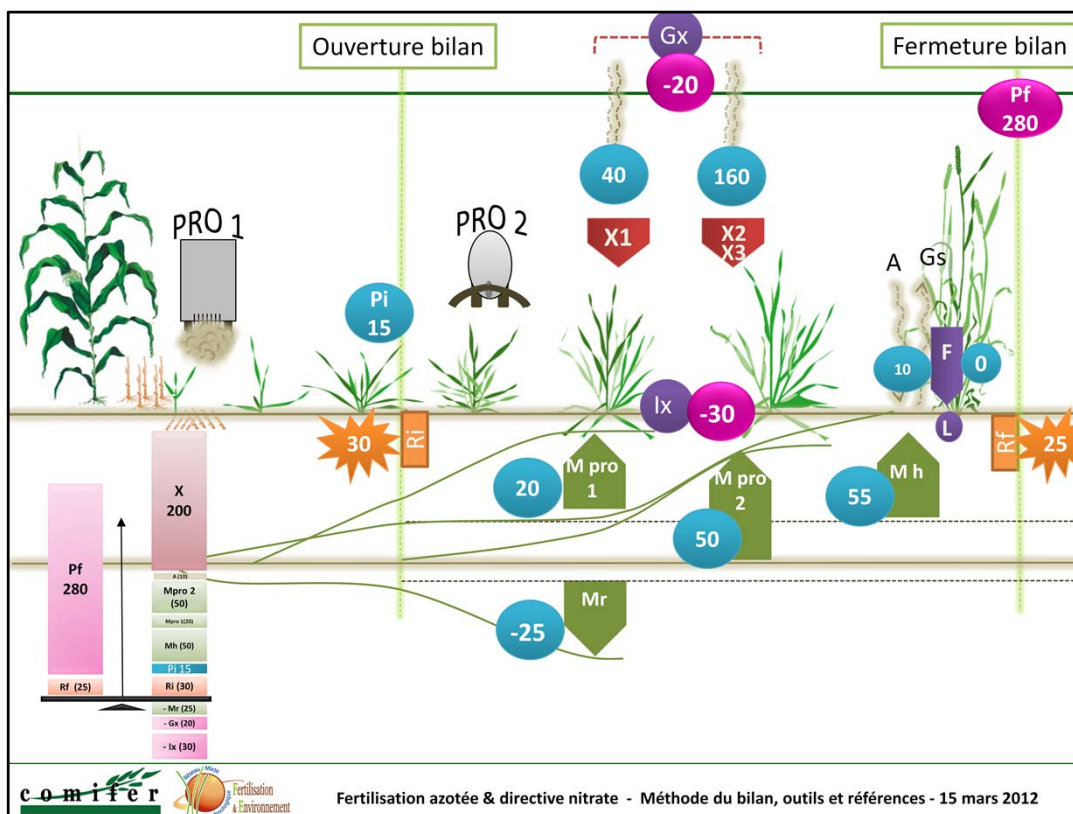
- l'utilisation de l'azote de l'engrais est toujours incomplète, généralement inférieure à 1 et entachée de variabilité, à cause des pertes gazeuses et de l'organisation de l'azote de l'engrais. Ces "pertes" sont des éléments à prendre en compte, différemment selon la manière de calculer la fertilisation azotée

LE BILAN COMPLET



Fertilisation azotée & directive nitrates - Méthode du bilan, outils et références - 15 mars 2012

Ce qui fonde les méthodes de calcul de la fertilisation azotée, c'est le bilan complet



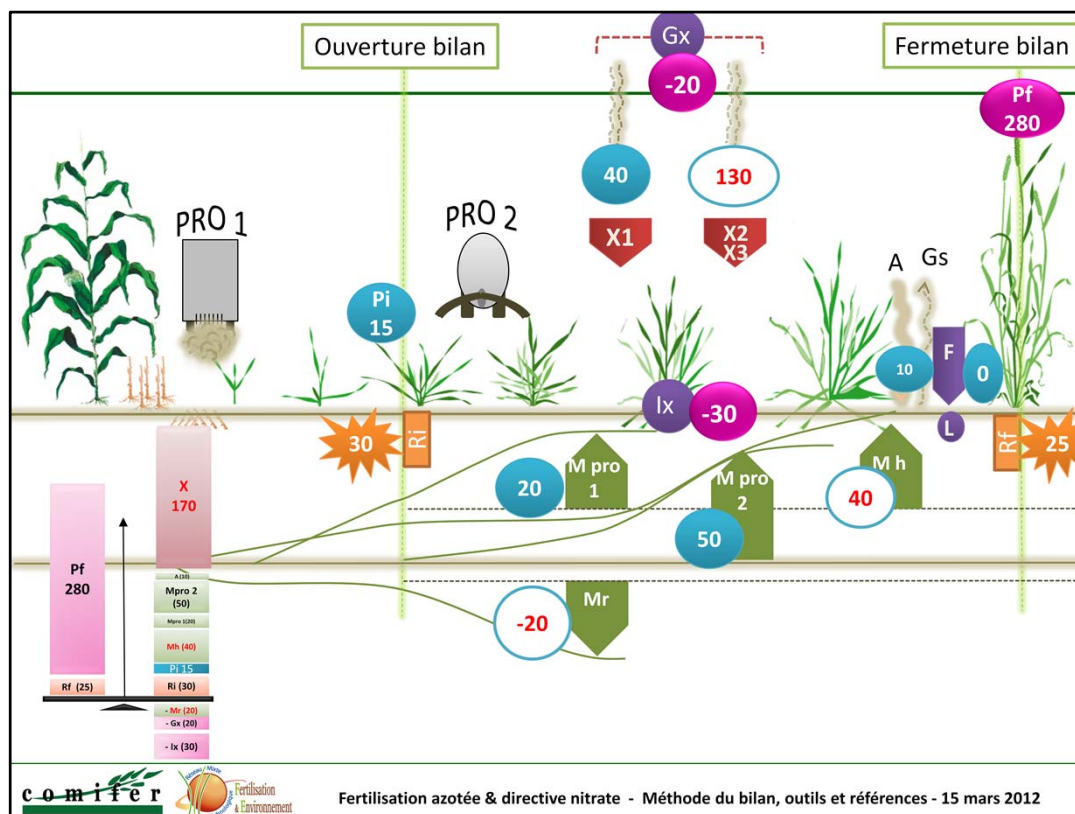
- **Préalables :**
 - le principe du bilan d'azote s'applique aussi bien en agriculture conventionnelle qu'en agriculture biologique
mais adaptation de certains paramètres requis en agriculture biologique (: besoin , objectif de rendement , organisation ...)
 - Les cultures se nourrissent d'azote minéral issu soit directement des engrais minéraux soit indirectement après minéralisation de l'azote des engrais organiques
 - La mise en œuvre de ce raisonnement est assortie de :
 - Une échelle de raisonnement : la parcelle culturale
 - Une période : ouverture du bilan : sortie hiver pour les cultures d'hiver ou semis pour les cultures de printemps
à la fin d'absorption d'azote par la culture (# récolte)
 - Un niveau de précision variable dans le raisonnement lié à la finesse des paramétrages régionaux et de la méthode de calcul déployée
- **Le bilan complet**
Le bilan complet intègre beaucoup de processus qui sont négligés ou supposés s'annuler dans les démarches de bilan simplifiés
Il est donc davantage intégrateur de la réalité agronomique du cycle de l'azote
il prend davantage en compte les paramètres climatiques : température et humidité
Mais
il nécessite des calculs plus complexes très difficiles à mettre en œuvre dans des supports papiers simples et sont réservés
à une utilisation informatique

LE BILAN SIMPLIFIE



Fertilisation azotée & directive nitrate - Méthode du bilan, outils et références - 15 mars 2012

Ce bilan complet peut être simplifié, en n'explicitant pas tous les processus. La disparition de ces postes conduit à modifier plus ou moins les valeurs des autres paramètres de l'équation



Du bilan dynamique complet au bilan statique simplifié

les hypothèses simplificatrices :

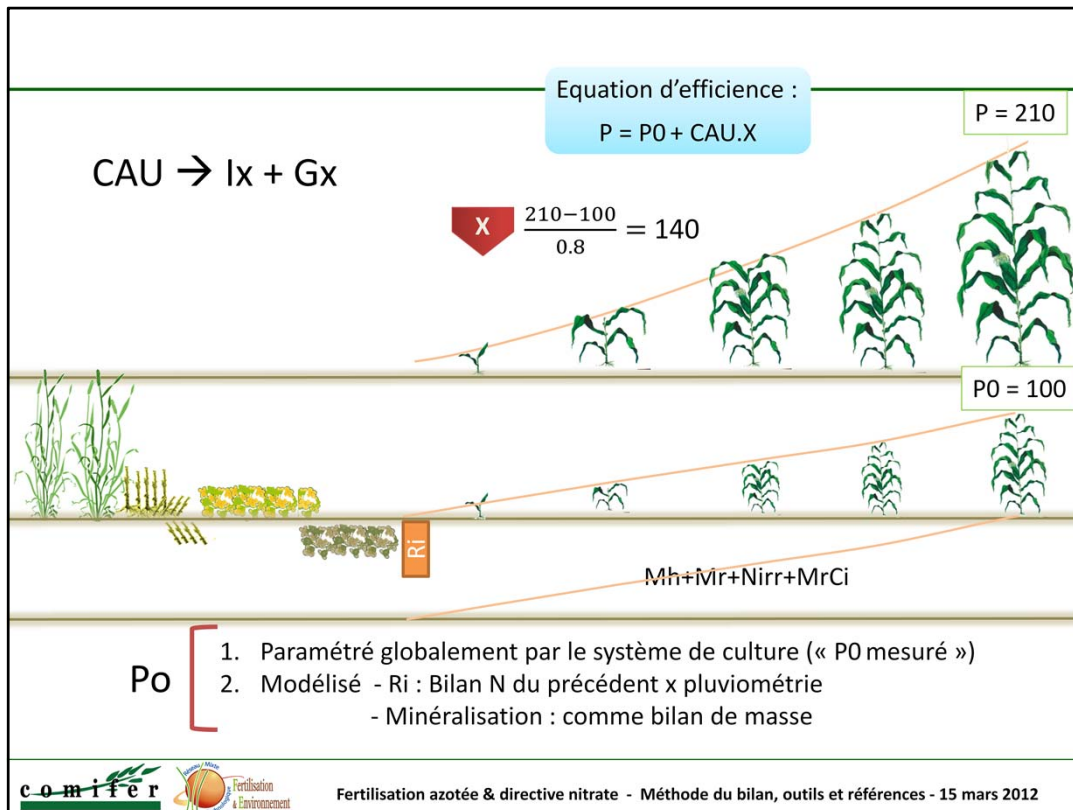
- La déposition atmosphérique et la fixation symbiotique (entrées d'azote) et les pertes gazeuses du sol (sorties) s'annulent et ne sont donc pas estimées
- Le lessivage de nitrate pendant la culture (hors de portée des systèmes racinaires) est supposée nul (notamment fertilisation au printemps)
- Les pertes gazeuses par volatilisation au dépens des engrais ne sont pas prise en considération, la dose d'engrais minéral est supposée apportée avec un engrais peu soumis à ces pertes de type ammonitrate, des règles de majoration de dose peuvent s'appliquer postérieurement au calcul prévisionnel.
- La minéralisation nette du sol (Mh) intègre partiellement en partie l'organisation au dépens de l'engrais apporté, elle est donc plus faible que dans un bilan dynamique
- Les effets précédents sont des effets moyens invariants quels que soient le climat ou la quantité de résidus du précédent.

À l'échelle d'une mise en œuvre la plus large possible du raisonnement de la dose d'azote, pour des raisons de simplifications

Les hypothèses simplificatrices ont été jugées acceptables par la communauté des agronomes depuis plus de 30 ans dans un objectif d'efficacité de vulgarisation.

Aujourd'hui, le bilan simplifié (parfois appelé bilan statique par opposition au bilan complet mis en œuvre le plus souvent de manière dynamique) est l'écriture opérationnelle la plus largement utilisée en France

L'EQUATION D'EFFICIENCE



Une autre approche simplifiée est celle de **l'équation d'efficience**. Elle repose sur **une estimation des fournitures d'azote du sol** (estimée par des témoins non fertilisés ou par calcul/modèle et sur **une valeur du coefficient apparent d'utilisation** (lui même dépendant des pertes gazeuse et de l'organisation microbienne, voir diapo 9 où l'on mentionne que l'utilisation de l'engrais n'est jamais complète).

Les fournitures (mesurées ou calculées) sont alors l'agrégation des différents termes du bilan évoqué précédemment (minéralisation de l'humus, minéralisation des résidus de récolte et des résidus de cultures intermédiaires et apporté par l'irrigation (Mh+Mr+MrCi+Nirr). Le coefficient d'utilisation doit alors s'appliquer aux différents apports d'azote en cours de culture.

Souvent développée et mise au point régionalement dans des milieux « difficiles » où la mesure de reliquat

d'azote était jugées impossibles, **l'approche par l'équation d'efficience nécessite des paramétrages locaux importants** afin de rendre compte de la variabilité (croissante) des systèmes de cultures :

nécessité de réseau de témoins non fertilisés Po par précédent cultural et par type de système de culture (avec ou sans élevage) et pour estimer les fournitures du sol et références régionales pour le coefficient apparent d'utilisation .

Une méthode générique ... à déployer sur d'autres espèces

→ La vigne, l'arboriculture et les cultures légumières principalement

- Des enjeux plus limités en termes de pression azotée (vigne .8Mha) et/ou de surface totale (Fruit légume .45 Mha) mais localement significatifs.
- Les résultats acquis sur ces cultures devront être plus largement diffusés et faire l'objet de « fiches cultures » spécifiques pour compléter la brochure Azote Comifer
- Les écritures opérationnelles du raisonnement N des grandes cultures et de la prairie sont formellement applicables à ces cultures :
 - mieux quantifier les besoins
 - Des adaptations spécifiques pourront être nécessaires (ex rôle de réserve N des racines ou du bois)
 - Prendre en charge la variabilité des modes de production (enherbement ...) et des milieux
- En l'absence de formalisation explicite des postes du raisonnement, des doses pivots moyennes assorties d'adaptations locales (climat , sols , système de culture) devront être mises en place pour satisfaire à la réglementation et à l'exhaustivité du plan de fumure prévisionnel.

Les agronomes se sont historiquement davantage intéressés au raisonnement de la fertilisation azotée des cultures qui répondent fortement à cet intrant et donc plus particulièrement les espèces de grandes cultures à l'exception évidente des légumineuses. Ce sont donc pour ces cultures que les références sont les plus nombreuses et les plus validées.

Mais fondamentalement les processus et méthodes présentés sont formellement applicables aux autres cultures qui ne disposent pas d'un socle comparable de références : vigne et arboriculture , légumes et maraichage de plein champ ou dont les références restent encore insuffisamment diffusées.

Outils de pilotage : complémentaires mais pas substituables

- **Cadre utilisation** : diagnostic en cours de culture, intégratif des conditions de croissance réellement vécues par le couvert
- **Complémentaires du calcul prévisionnel** : ravitaillement si et seulement si nécessaire

INDICATEUR	Caractéristiques de l'indicateur				
	Sensibilité	Spécificité	Fidélité	Acquisition	Spatialisation
Croissance	-	+	+++	+	-
Couleur	+	+	++	++	-
Teneur	++	+++	+	+	-
Transmittance	++	++	+	++	-
Réflectance	++	++	+	(++)	+++
Fluorescence	+	+	++	- à ++	- à ++



Fertilisation azotée & directive nitrate - Méthode du bilan, outils et références - 15 mars 2012

Des **outils de pilotage** existent pour affiner le calcul de la dose et/ou le fractionnement. Les outils ont différentes caractéristiques qui définissent leurs performances. Ces outils n'ont jamais été positionnés en substitution du calcul du bilan, mais sont des outils complémentaires qui permettent d'avoir une approche tactique en cours de culture.

Le pilotage en cours de culture est le moyen de corriger une trajectoire de nutrition azotée en fonction des réalités climatiques et d'affiner la prévision initialement réalisée dans le bilan « prévisionnel »

La plupart des méthodes nécessitent préalablement au pilotage sensu-stricto la réalisation d'un bilan prévisionnel et de minorer la dose apportée avant l'établissement du diagnostic de nutrition. En général, la dose bilan X est minorée de 40 – 50 kg N.

Seules les cultures dont la dynamique d'absorption d'azote permet des interventions tardives peuvent être pilotées :

essentiellement les céréales d'hiver dans une moindre mesure le maïs, l'orge brassicole et la pomme de terre.

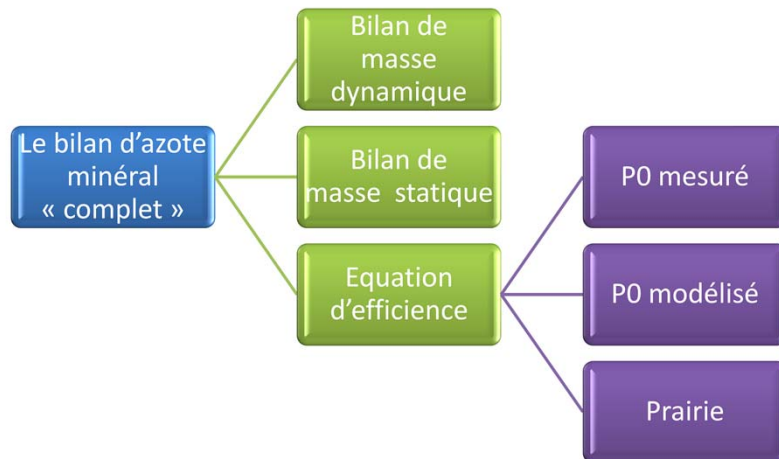
En règle générale, le diagnostic de nutrition est d'autant plus pertinent que la mesure est tardive mais doit demeurer compatible avec une possibilité d'intervention dans la culture.

Il est nécessaire de respecter les conditions de mise en oeuvre des méthodes de pilotage (bilan préalable, dose minorée, pluviométrie minimale , stades ...) pour maximiser le taux de bons pronostics

En guise de transition ...

Une méthode générique basée sur des concepts et modes de représentation des processus unificateurs...

... qui nécessite une mise en œuvre opérationnelle au travers d'outils qui doivent s'adapter à la variété des usages et des milieux



Il n'y a pas en fait pas plusieurs manières de représenter les processus, et le calcul. La base commune est le bilan d'azote minéral « complet ». Mais il y a nécessité d'une mise en œuvre d'outils qui peuvent être divers. Leur diversité dictée par la variété des usages et des milieux.

On repositionne ici ce que les GREN auront à travailler, en partant du bilan d'azote "complet" qui se décline en bilan de masse dynamique ou statique, ou dans certains cas par l'équation d'efficience ou les fournitures du sol peuvent être mesurées ou calculées. La prairie fait aussi l'objet d'une déclinaison du bilan de masse.

Des méthodes aux outils

Dans la pratique et sur le terrain, les méthodes de raisonnement sont déclinées en outils opérationnels :

- Identifier les méthodes utilisées : *Simplicité*
bilan de masse, équation d'efficience
- Comprendre les spécificités des média de diffusion : *Diversité*
 - Grille papier , tableur excel , logiciel PC développé régionalement, logiciel national paramétrés régionalement, service internet ...
 - Certaines méthodes plus sophistiquées agronomiquement sont indissociables d'un logiciel : bilan dynamique
 - Certains outils dont la vocation est une diffusion très large nécessite des simplifications pour être mis en œuvre facilement : grille papier
- Recenser les multiples acteurs : *Diversité*
 - Les entités : Chambres d'agriculture, Distributions, Instituts techniques, Laboratoires d'analyses, agro-fournisseurs , Editeur logiciel , contrôle laitier ...
 - Les intervenants et les modalités : utilisation directe par agriculteur , prestation de service par des techniciens ,

La méthode du bilan se décline sur le terrain en différent outils opérationnels selon divers critères détaillés dans cette diapositive. Ces déterminants sont présentés dans l'exposé suivant.

Merci de votre attention !