

# Présentation et mise en œuvre d'AzoFert® : nouvel outil d'aide à la décision pour le raisonnement de la fertilisation N des cultures

J.M. Machet <sup>1</sup>, P. Dubrulle <sup>1</sup>, N. Damay <sup>2</sup>, R. Duval <sup>3</sup>, S. Recous <sup>1</sup>,  
B. Mary <sup>1</sup> & B. Nicolardot <sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRA - Unité d'agronomie de Laon-Reims-Mons, France

<sup>2</sup> Laboratoire d'Analyse et de Recherche de l'Aisne, France

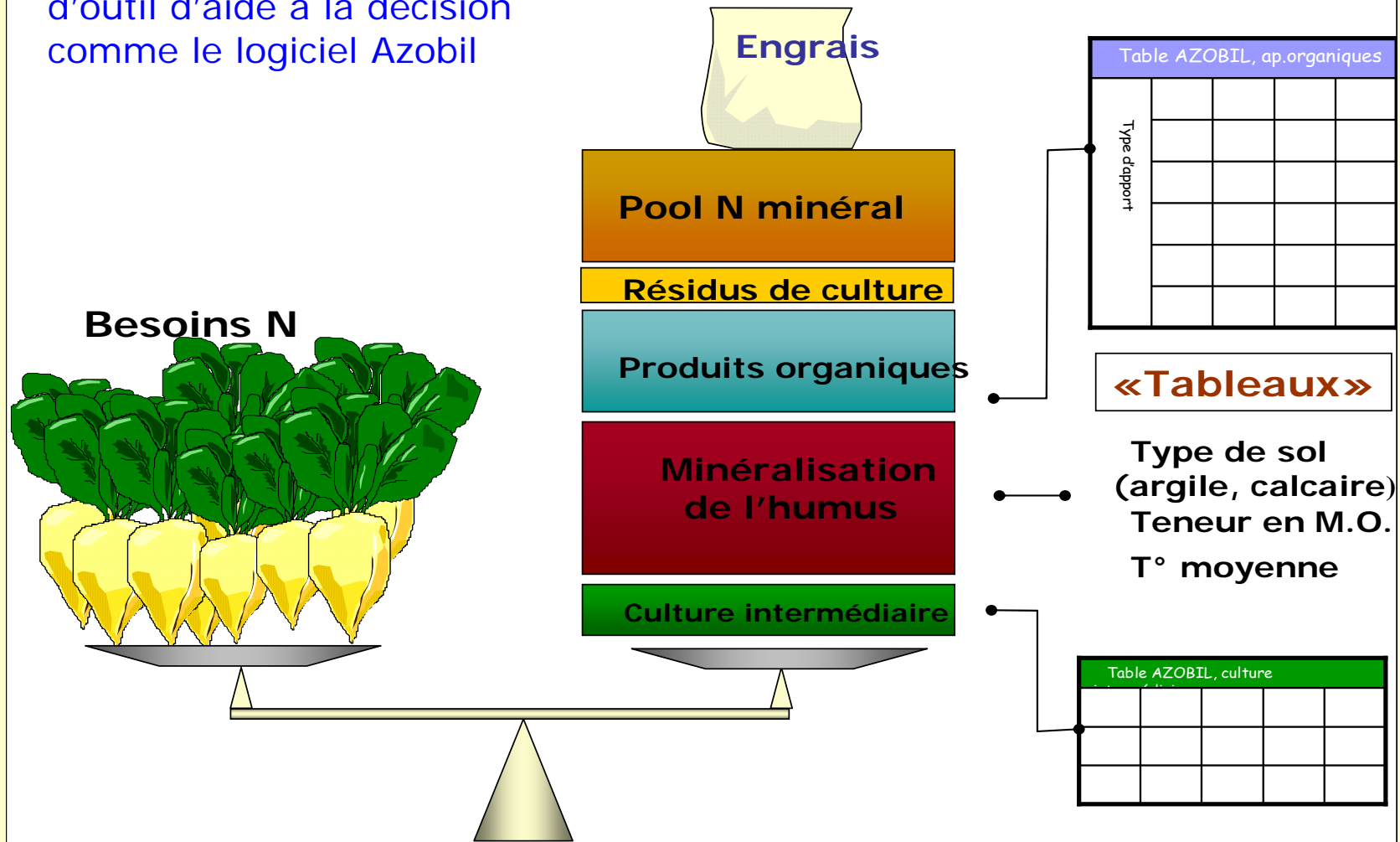
<sup>3</sup> Institut Technique de la Betterave



Laboratoire départemental d'analyses  
et de recherche

# Jusqu'à maintenant : méthode du bilan simplifié statique pour le calcul des doses N apportées aux cultures annuelles

La base de la 1<sup>ère</sup> génération d'outil d'aide à la décision comme le logiciel Azobil



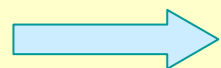
# Evolution des enjeux

- Demande croissante en matière de :
  - \* Productions de qualité (teneur en protéines des céréales, qualité technologique de la betterave à sucre, teneur en nitrate des légumes)
  - \* Protection de l'environnement (réduction de la lixiviation des nitrates et des pertes gazeuses)
- Evolution des pratiques agricoles :
  - \* Augmentation et diversification des apports organiques
  - \* Réduction du travail du sol

Nécessité d'adapter le raisonnement et de mieux gérer la fertilisation N, ainsi que d'en évaluer les impacts environnementaux

# Un nouvel outil pour la fertilisation azotée : pourquoi ?

- Intégration des résultats de recherche des 15 dernières années concernant :
  - \* la dynamique des matières organiques dans les sols
  - \* le devenir de N des engrais (expérimentations  $^{15}\text{N}$ )
- Evolution des méthodes et des outils de production informatique
- Demande de la part du Développement Agricole



Opportunité de concevoir un nouveau logiciel de prescription de la fertilisation N des cultures : AzoFert®

# AzoFert® :

## aspects agronomiques nouveaux

- Basé sur un bilan d'azote minéral complet : tous les postes du bilan relatifs aux entrées et sorties N sont renseignés
- Approche par une dynamique temporelle des fournitures N par le sol et les différentes sources organiques (résidus de culture et cultures intermédiaires, produits organiques): intégration des données climatiques
- Prise en compte du devenir N des engrais avec : une estimation des pertes gazeuses (volatilisation d'ammoniac) et de l'organisation microbienne
- Adapté au plus grand nombre de cultures : pour lesquelles les besoins en N et le cycle de développement sont connus

# AzoFert® : Un bilan prévisionnel complet

$$R_f - R_i = (M'n + X + A_p + F_{ns} + F_s + I_R) - \text{Entrées N} \\ (P_f - P_i + I_x + G_x + L_x + G_s + L_s) \text{ Sorties N}$$

**R<sub>f</sub>** : N minéral sol à la fermeture du bilan

**R<sub>i</sub>** : N minéral sol à l'ouverture du bilan

**M'n** : minéralisation nette de humus (**M<sub>h</sub>**), résidus de culture (**M<sub>r</sub>**), produits organiques (**M<sub>a</sub>**), cultures intermédiaires (**M<sub>ci</sub>**) et résidus prairiaux (**M<sub>p</sub>**),

**X** : quantité d'engrais N,

**A<sub>p</sub>** : apport N par les pluies,

**F<sub>ns</sub>** : fixation non symbiotique,

**F<sub>s</sub>** : fixation symbiotique,

**I<sub>r</sub>** : apport N par l'eau d'irrigation

**P<sub>f</sub>** : besoin N de la culture à la fermeture du bilan,

**P<sub>i</sub>** : N déjà absorbé à l'ouverture du bilan,

**I<sub>x</sub>** : organisation microbienne N engrais,

**G<sub>x</sub>** : pertes gazeuses N engrais,

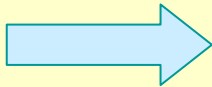
**L<sub>x</sub>** : pertes par lixiviation N engrais,

**G<sub>s</sub>** : pertes gazeuses N minéral sol,

**L<sub>s</sub>** : pertes par lixiviation N minéral sol entre ouverture et fermeture du bilan

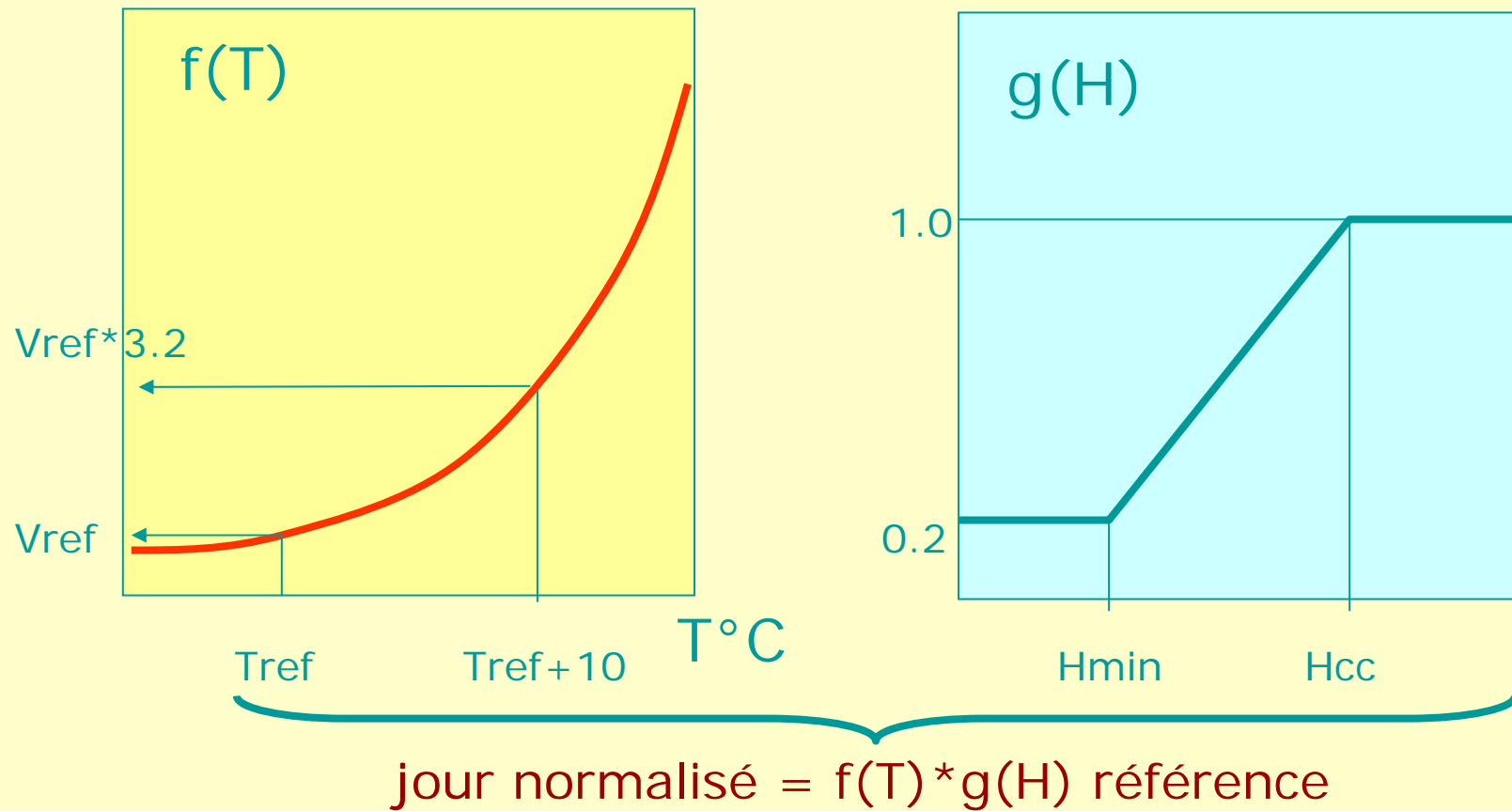
# Approche dynamique des fournitures N du sol

- Simulation au cours du temps de la fourniture d'azote par le sol et les différentes sources organiques :
  - \* résidus de culture
  - \* cultures intermédiaires
  - \* produits organiques



Utilisation du concept de « temps normalisé » pour intégrer par décade les variations de température et d'humidité sur les fournitures en N du sol

# Fonctions température (T) et humidité du sol (H)

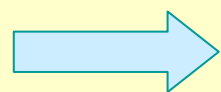




# Données climatiques – Temps normalisé

- Données climatiques décennales : température, pluviométrie et évapotranspiration potentielle
- Temps normalisé :
  - Température de référence = 15 °C
  - Humidité de référence = humidité à la capacité au champ

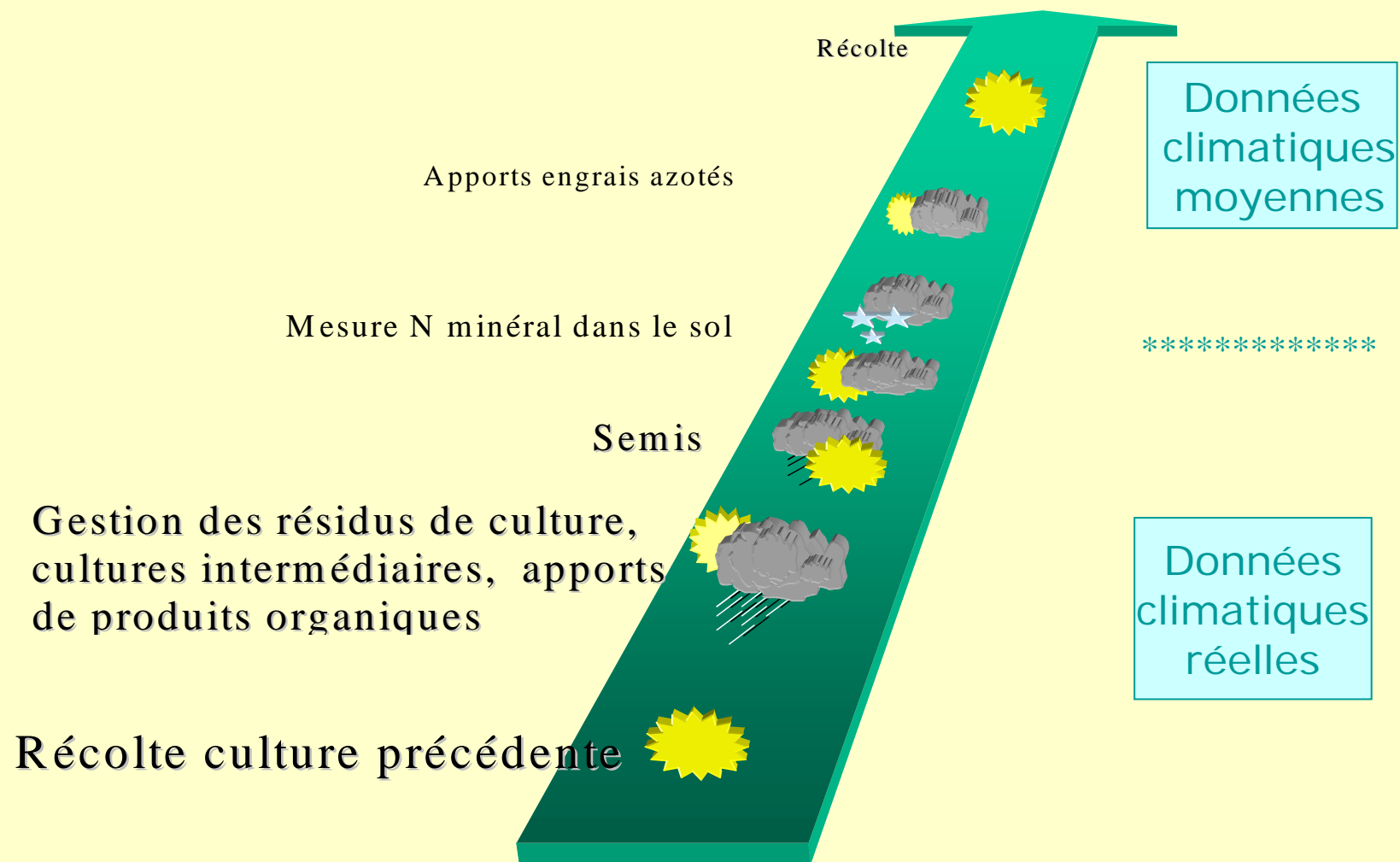
Exemple poste météo Aulnois-sous-Laon (02) :



2<sup>ème</sup> décade de Janvier = 2.1 jours normalisés

1<sup>ère</sup> décade de Juillet = 16 jours normalisés

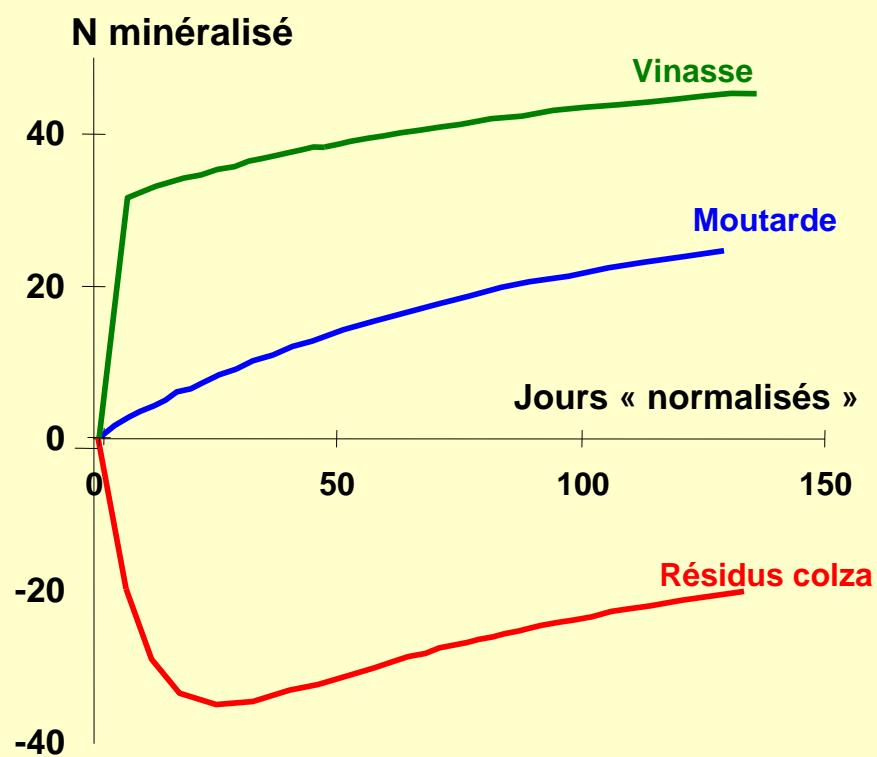
# Approche dynamique de la fourniture N



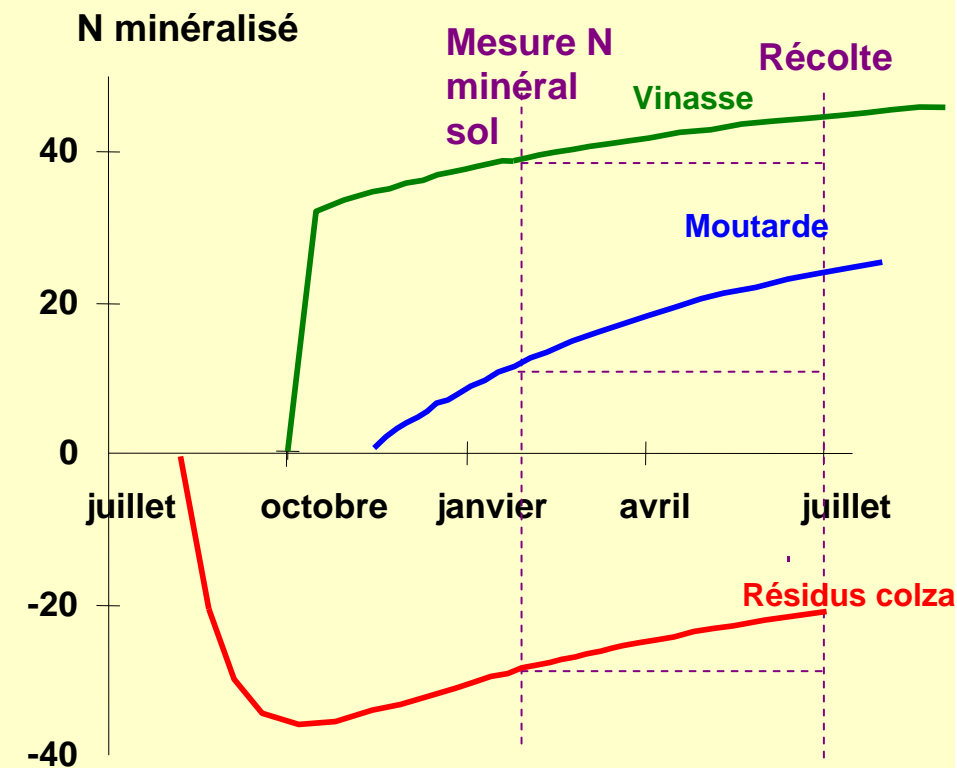
# Minéralisation nette de la matière organique humifiée

- La minéralisation de la matière organique humifiée dépend de :
  - \* pool N organique humifié
  - \* la texture du sol (teneurs en argile et calcaire)
  - \* la température et l'humidité du sol
  - \* la politique de restitutions organiques : gestion des résidus de culture, fréquence des apports de produits organiques et type de produits, implantation de cultures intermédiaires

# Décomposition des différentes sources organiques

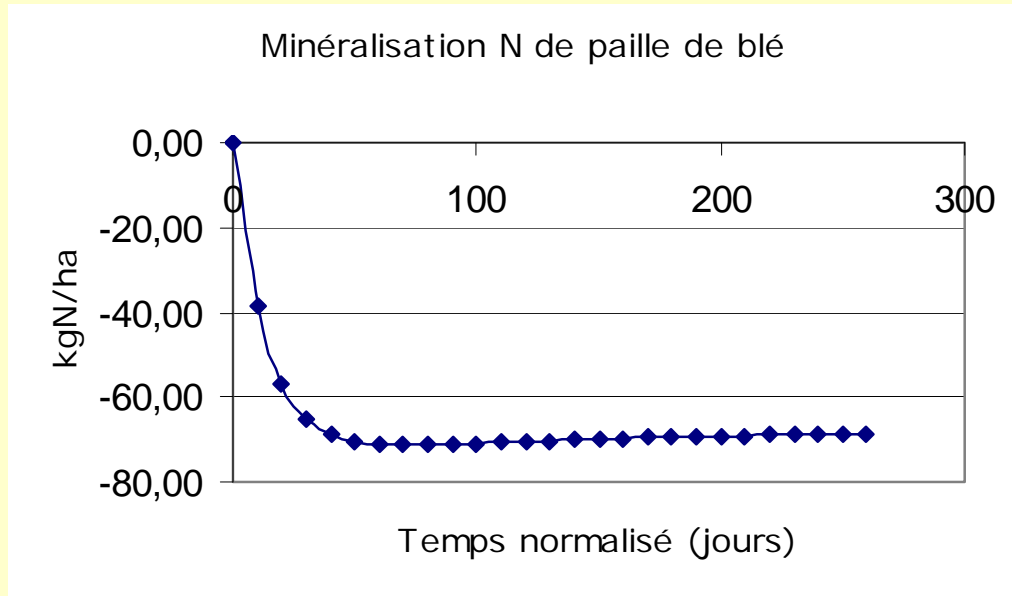


Temps normalisé

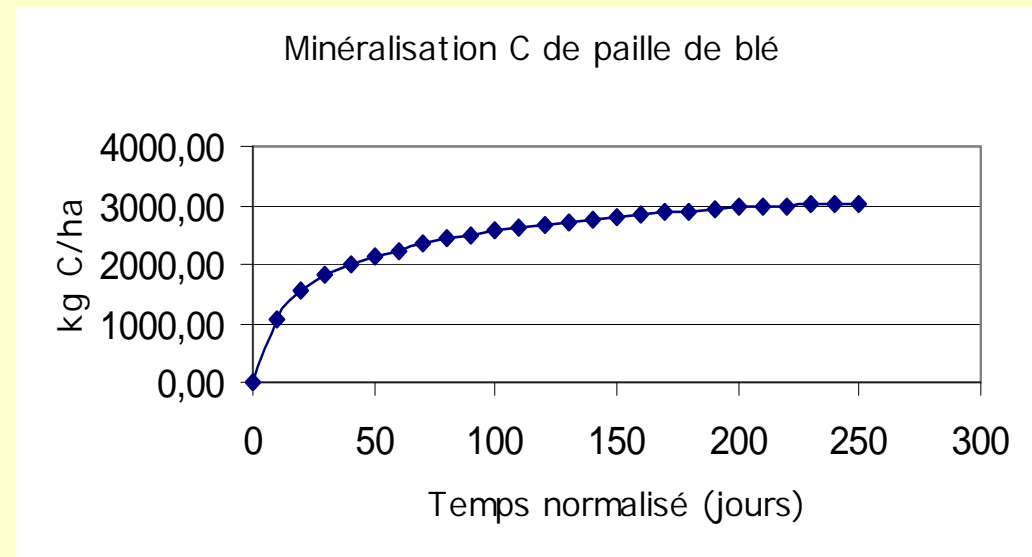


Temps réel

## Cinétique de décomposition relative à l'azote et au carbone d'une paille de blé

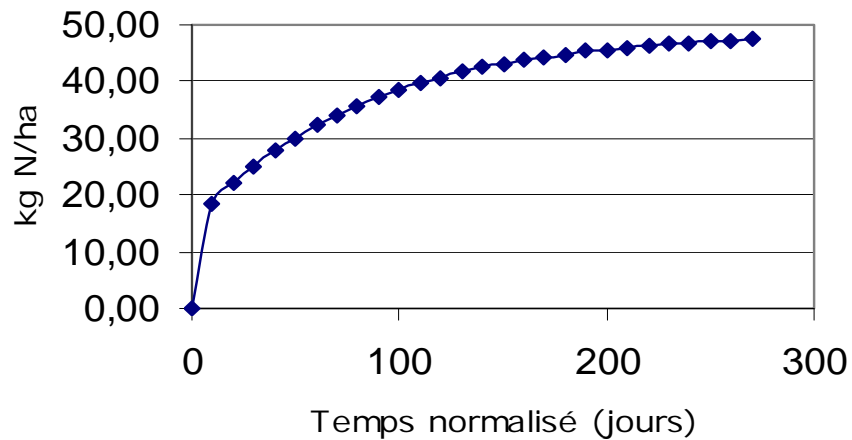


**Paramètres de simulation :**  
**10 t/ha de paille**  
**teneur en N 0.5%**  
**C/N de 85**



## Cinétique de minéralisation de l'azote : exemple d'une vinasse de sucrerie

Minéralisation N d'une vinasse



Caractéristiques de la vinasse :

C : 16.2 %

N : 2.4 %

Nmin : 0.08 %

Dose d'apport : 3 t/ha

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

# Décomposition des matières organiques (C et N)

- **Résidus de culture** : pailles de céréales, de colza, cannes de maïs, fânes de pois, de pommes de terre, verts de betteraves
- **Cultures intermédiaires** : crucifères, graminées, légumineuses
- **Effluents d'élevage** : fumiers (bovins, ovins, porcins, chevaux, volailles...), lisiers (porcins, bovins...), fientes...
- **Effluents agro-industriels** : sucrerie, distillerie, féculerie, amidonnerie, déshydratation de luzerne, laiterie, conserverie, cave viticole...
- **Effluents urbains** : boues de stations d'épuration, composts fraction fermentescible d'ordures ménagères, composts de déchets verts...

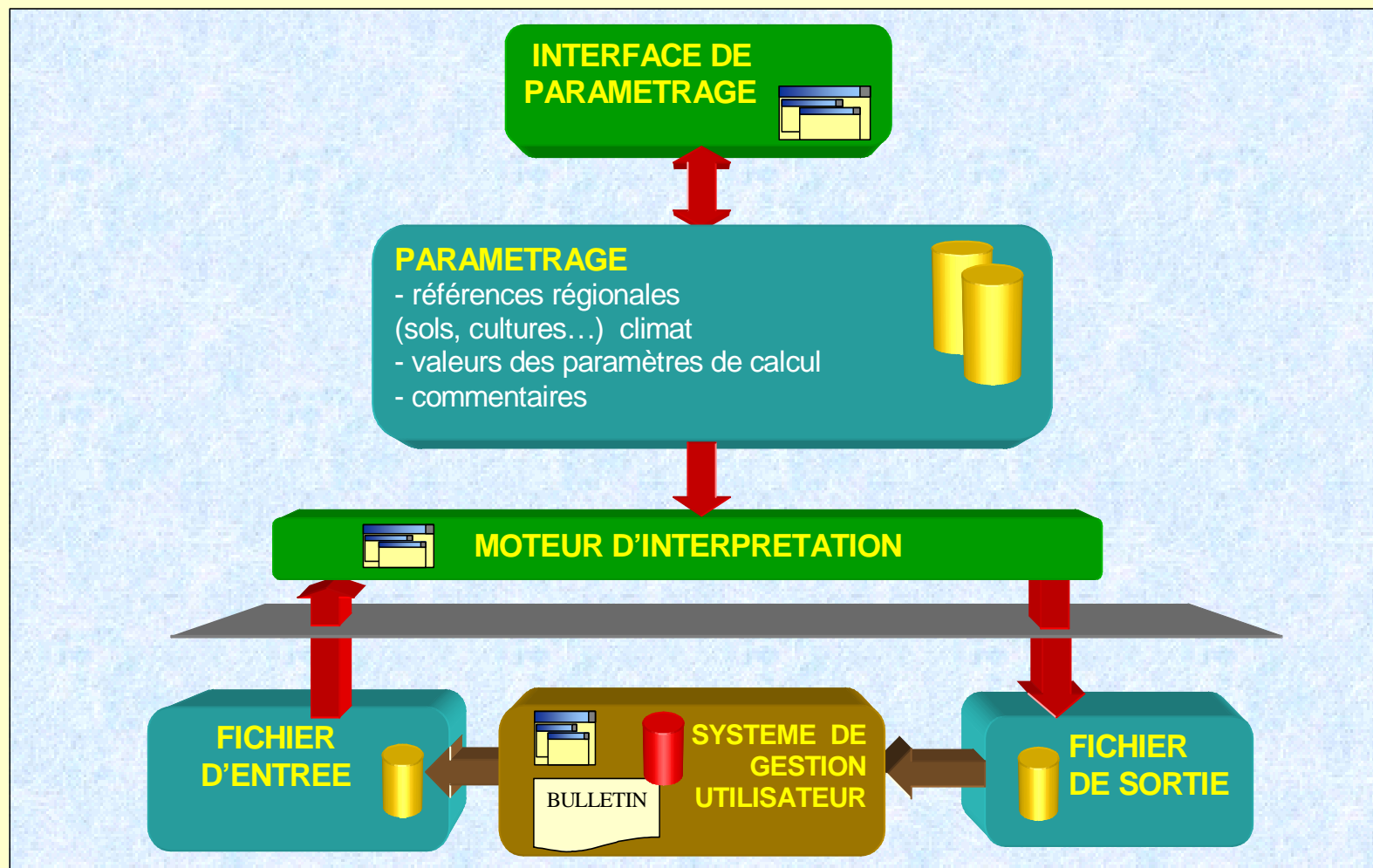
# Prise en compte de différents processus déterminant la disponibilité de N des engrais

- 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
  
- Organisation microbienne calculée à partir de :
  - \* la disponibilité en carbone (issu de la rhizodéposition, des résidus de culture et des produits organiques)
  - \* d'un rapport N organisé / C décomposé fonction de la disponibilité en N du milieu



# Un conseil de fertilisation N pour 40 cultures annuelles

- Céréales d'hiver et de printemps : blé tendre, blé dur, orge, seigle, avoine, maïs...
- Cultures industrielles : betteraves, colza, lin, tournesol
- Pommes de terre : plant, primeur, consommation, fécule
- Cultures légumières : haricots, épinards, carottes, oignons, endive, betteraves rouges, brocolis...



Les utilisateurs peuvent modifier facilement les paramètres pour les adapter à des situations culturales et des contextes pédoclimatiques variés par une interface de paramétrage qui gère des catalogues (sols, cultures, produits organiques, résidus de culture...) et des tableaux. Le logiciel est conçu pour être intégré facilement dans le système de gestion de données d'un laboratoire d'analyses de sols en utilisant des fichiers d'entrées/sorties dont le format est défini par AZOFERT

## 8 catalogues

- Culture
- Sol
- Précédent cultural
- Produit organique
- Culture intermédiaire
- Engrais azoté
- Variété
- Divers

### AZOFERT : Paramètres du Catalogue CULTURES

Code

Libellé

Besoins N (calculés > 0 ; forfaitaires = 0)

Besoins forfaitaires en N de la culture BFNC (entier en kg N / ha)

Rendement calculé (non=0 ; type de calcul >0)

Variété décrite (non=0 ; oui=1)

Besoins unitaires en N de la culture BUNC (décimal xx.x en kg N / q)

Date probable de récolte de la culture par défaut DATPREC (jj/mm) ou décade de récolte (entier sans unité)

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

- 21 paramètres

# De la mesure de N minéral au conseil de fumure N : trois grandes étapes

## ■ Données d'entrée :

### Rapidité et rigueur dans la saisie des données

- ◆ Rapidité grâce à un système de gestion, avec plusieurs postes de saisie des données d'entrée
- ◆ Test de cohérence des données grâce à un système expert, et stockage de celles-ci dans une base de données spécifique

## ■ Interprétation : le bulletin de résultats et l'interprétation

- ◆ Clair, complet, avec commentaires, vérifié (informations sur les données réelles, estimées et manquantes, contrôle du conseil)
- ◆ Opérationnel (avec un plan de fumure conforme à la réglementation)

## ■ Après le conseil :

- ◆ Possibilité de modifier, de compléter et de remplacer facilement les données stockées dans la base de données pour un nouveau conseil

# De la mesure de N minéral au conseil de fumure N

## Plan de fumure

(en conformité avec la réglementation)

**Plan de fumure azoté de la parcelle - Bilan azoté**

Pour que ce plan de fumure soit conforme aux règles de la conditionnalité des aides PAC, il vous suffit de compléter le n° d'ilot PAC, la surface de la parcelle, le tableau prévisionnel des apports et les modalités de gestion de l'interculture.

Nom ou numéro de parcelle : **ARBRE CALIXTE 3**  
 Numéro d'ilot PAC :  
 Surface (ha) :  
 Type de sol :  
 Culture :  
 Précédent :  
 Limon argileux profond  
 Blé tendre d'hiver  
 Féverole

		Objectif de rendement	
		prévisionnel	autre hypothèse
Besoin unitaire en azote, en kg/q (cultures récoltées en graines) :		2.8	
Objectif de rendement (q/ha) :		90	

En kgN/ha

		1	2
I. BESOINS TOTALS	1	Besoins alimentaires de la culture	252
	2	Azote restant dans le sol après la culture	32
		<b>TOTAL (A)</b>	<b>284</b>
II. AZOTE FOURNI PAR LE SOL	3	Azote déjà absorbé pendant l'automne - hiver	10
	4	Reliquat d'azote minéral dans le sol sortie hiver	93
	5	Minéralisation de l'humus	33
	6	Arrière effet prairie	
		<b>SOUS-TOTAL 1</b>	<b>136</b>
III. AUTRES FOURNITURES D'AZOTE	7	Effet culture intermédiaire	
	8	Minéralisation des résidus du précédent	4
	9	Effet direct des amendements organiques	
	10	Apports pluviométriques	8
	11	Apport par l'irrigation	0
	12	Fixation symbiotique	0
		<b>SOUS-TOTAL 2</b>	<b>12</b>
IV. AZOTE NON UTILISABLE	13	Lessivage de l'azote du sol	30
	14	Organisation microbienne de l'azote de l'engrais	3
	15	Volatilisation de l'azote de l'engrais	11
		<b>SOUS-TOTAL 3</b>	<b>44</b>
		<b>TOTAL (B) = 1 + 2 - 3</b>	<b>104</b>
APPORT PREVISIONNEL EN ENGRAIS MINERAL (C) = (A) - (B)			<b>180</b>
COMPLEMENT (selon outil de diagnostic ou cahier des charges justifié techniquement)			
DOSE TOTALE PREVISIONNELLE			

**PREVISIONNEL DES APPORTS**

Numéro de l'effluent ou de l'engrais	Date / période d'apport prévue	Surface éparpillée (ha)	Dose (t ou m <sup>3</sup> /ha)	Teneur en azote total (kg N/t ou m <sup>3</sup> )	N total (kg N/ha)
<b>TOTAL DES APPORTS D'AZOTE TOTAL PREVUS SUR LA CAMPAGNE</b>					

**MODALITES DE GESTION DE L'INTERCULTURE PREVUE**

Devenir prévu des résidus de culture :  enfouis  brûlés  exportés  
 Devenir des repousses de culture en place :  enfouies  détruites  exportées  
 Implantation de cultures intermédiaires après la culture : Nature :  
 Date d'implantation prévue : Date de destruction prévue :

**Impact environnemental de la fertilisation**

La dose indiquée tient compte du lessivage, estimé à partir de données climatiques moyennes. Ne pas en tenir compte en cas d'année sèche.  
 La dose indiquée tient compte de la volatilisation



Laboratoire départemental d'analyses et de recherche

# Les contraintes

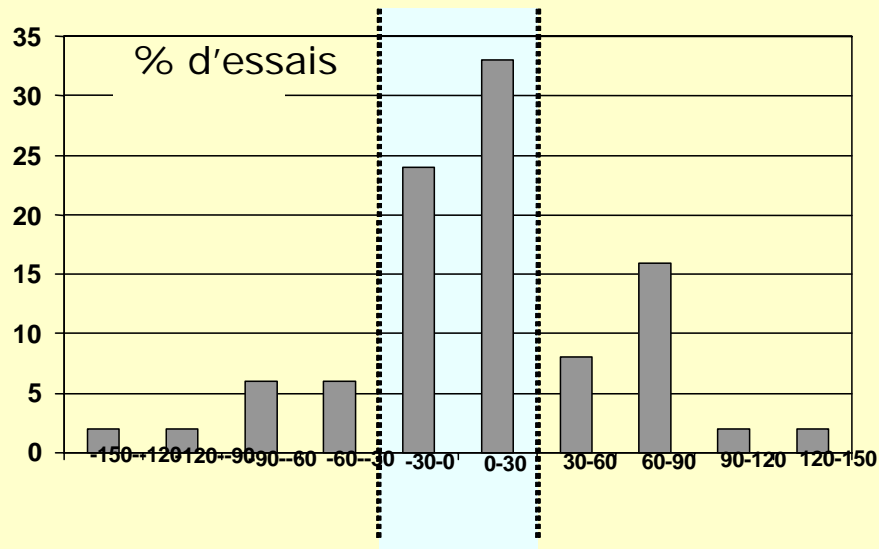
- AzoFert® n'est pas un logiciel presse-bouton : un agronome expérimenté est nécessaire
- Le paramétrage des types de sol
- Le paramétrage des produits organiques
- L'acquisition des données météo
- Le contrôle des données de l'agriculteur
- L'assistance aux utilisateurs

## Validation d'Azofert® pour la betterave à sucre

- Aujourd'hui, plus de 60 % des parcelles de betteraves sont échantillonnées pour mesurer la quantité d'N minéral dans le sol avant le calcul prévisionnel de la dose d'azote
- Les situations avec betteraves sont très variées :
  - \* type de sol (limons, craies, sables, sables argileux...)
  - \* avec ou sans irrigation
  - \* apports de produits organiques (plus de 50 % des parcelles)
  - \* produits organiques divers (vinasses, fumiers, lisiers, boues, composts...)
  - \* modes de gestion différents durant la période d'interculture (implantation de cultures intermédiaires)

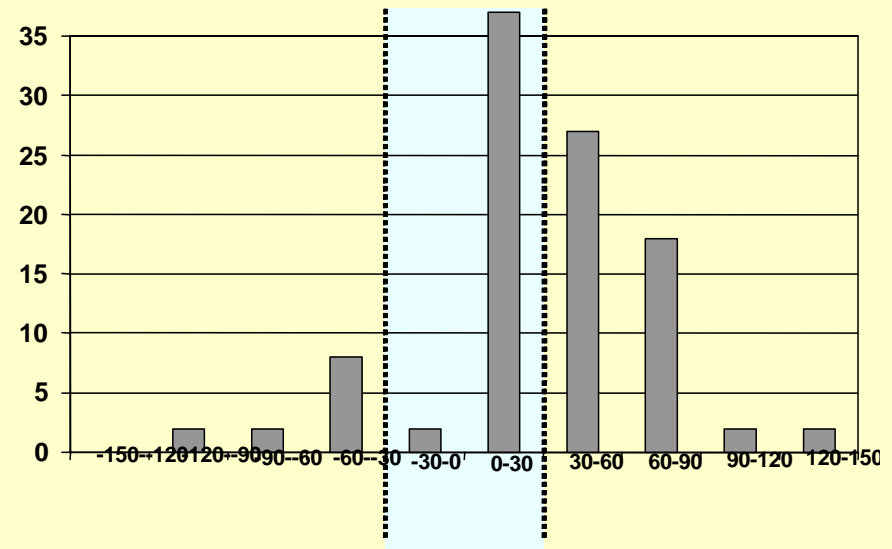
# Répartition des essais pour AzoFert® (bilan complet et dynamique) et Azobil® (bilan simplifié) en Beauce et en Bourgogne (51 essais N)

AzoFert



Différence [dose AzoFert – dose optimale] (kgN/ha)

Azobil



Différence [dose Azobil – dose optimale] (kgN/ha)

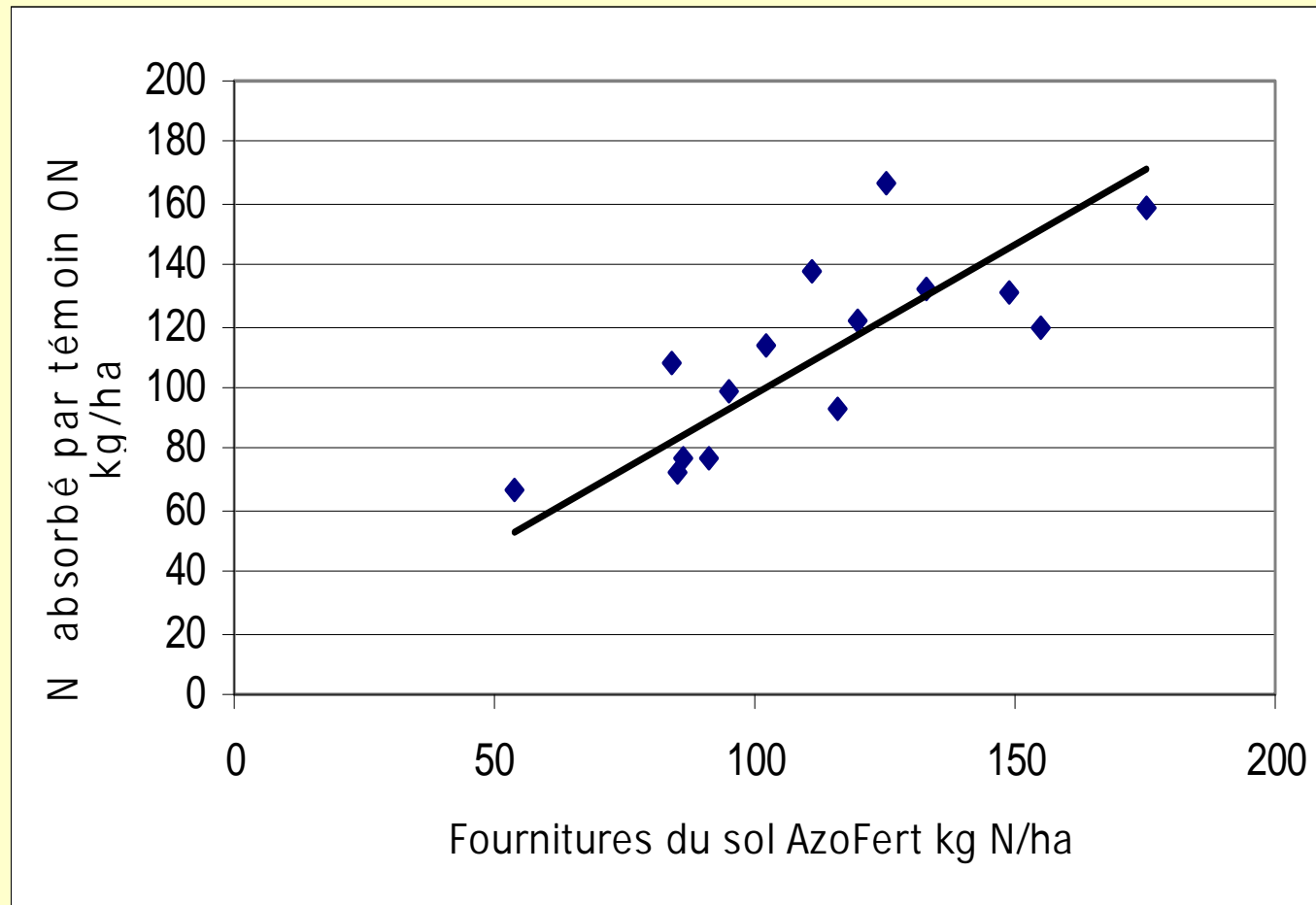


## Résultats d'essais annuels N sur betterave dans une même exploitation agricole (80)

Site expérimental et année	N minéral sol ouverture bilan Kg N /ha	Minéralisation humus Kg N/ha	Dose AzoFert Kg N/ha	Dose optimale Kg N/ha
Fieffes 1992	58	112	87	80
Fieffes 1993	79	131	30	0
Fieffes 1994	37	104	110	120
Fieffes 1995	33	84	165	180
Fieffes 1996	62	70	170	140
Fieffes 1997	99	139	40	0

Sols de limons moyens profonds avec apports fréquents de produits organiques

## Relation entre les fournitures du sol en N estimées par AzoFert® et N absorbé par la culture témoin 0N



Cultures : blé d'hiver, orge de printemps, betterave

## Bilan Azofert

- Projet INRA + LDAR; intégré ensuite au GIS, puis RMT
- Lancement version 1.0 en 2005; version actuelle : 1.3
- Diffusion : So'Néo, diffusant aussi RégiFert®
- En 2007 : 16 licences (2 en Belgique)
- Utilisateurs : laboratoires d'analyses de terre, chambres d'agriculture, instituts techniques



Laboratoire départemental d'analyses  
et de recherche

## Communication

- Communications à des congrès : communication orale, posters
- Documentation accompagnant le logiciel
- Réunions de présentation de l'outil
- Sessions de formation
- Club des utilisateurs

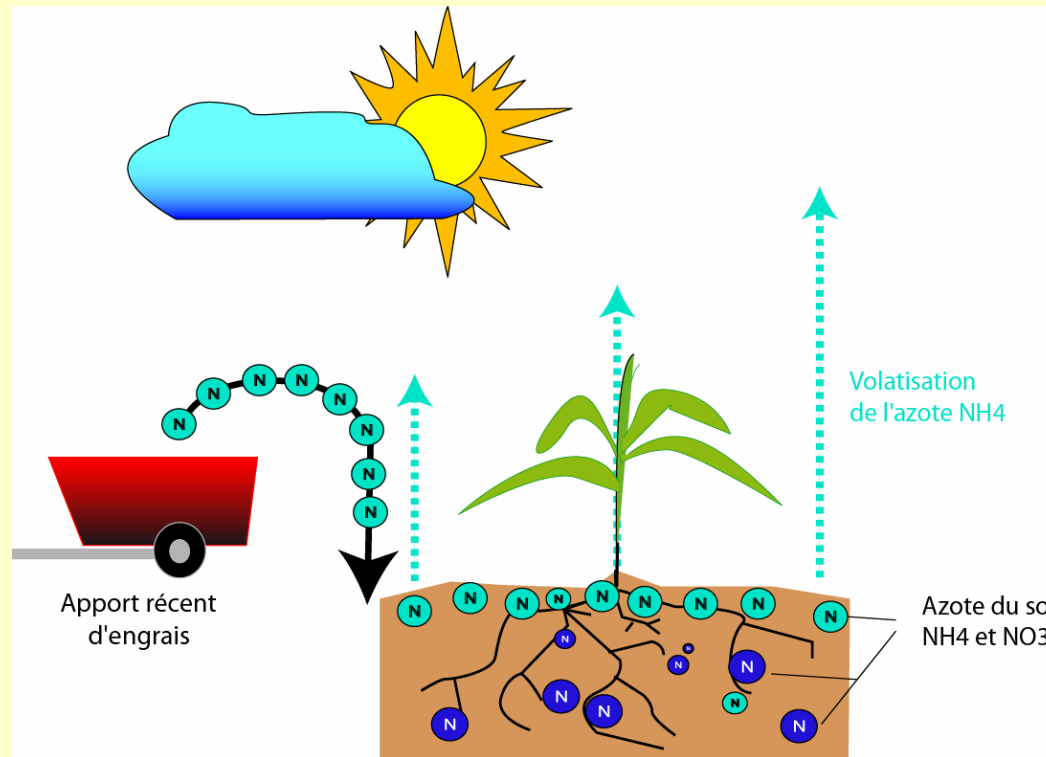
# Conclusions (1)

- AzoFert® constitue un nouvel outil d'aide à la décision pour la prévision de la fertilisation N des cultures annuelles, à la parcelle
- L'introduction de « modèles » dynamiques permet une meilleure estimation des fournitures en N du sol
- La diversité des sources organiques (qualité, dynamique de décomposition), la nature (forme solide ou liquide) et la gestion (apport en surface ou incorporation dans le sol) sont prises en compte
- L'introduction de nouveaux termes (comme les pertes gazeuses) permet d'évaluer les risques environnementaux liés à l'utilisation d'une dose et d'une forme d'engrais dans une situation donnée

## Conclusions (2)

- L'intégration des données réelles caractérisant le climat, le type de sol, les pratiques culturales... liés à une parcelle agricole conduit à une amélioration significative de la précision des conseils N
- L'ensemble des informations de la fiche de renseignements est nécessaire et il est indispensable de disposer d'informations fiables
- L'outil amène l'agriculteur à réfléchir sur ses pratiques
- L'appropriation d'AzoFert® par les utilisateurs, le développement sur le « terrain » demande un effort important de formation et de communication

# AZO FERT®



Merci de votre attention