



HAL
open science

Facteurs de variation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais : conséquences pour la conduite de la fertilisation azotée du blé d'hiver en Lorraine

François Limaux

► To cite this version:

François Limaux. Facteurs de variation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais : conséquences pour la conduite de la fertilisation azotée du blé d'hiver en Lorraine. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1994. Français. NNT : 1994INPL014N . tel-01776570

HAL Id: tel-01776570

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01776570v1>

Submitted on 24 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

94 INPL 014N

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires

[M] 1994 LIMAUX, F.

Mémoire présenté par François LIMAUX

en vue de l'obtention du
DIPLOME DE THESE
de

l'Institut National Polytechnique de Lorraine

BIU NANCY
Service Commun de Documentation
INPL
2, avenue de la Forêt de Haye - B.P. 3
54501 VANDOEUVRE Cédex FRANCE

Sujet

Facteurs de variation du Coefficient Apparent d'Utilisation
de l'azote de l'engrais

conséquences pour la conduite de la fertilisation azotée
du blé d'hiver et du maïs en Lorraine

soutenu le 4 Février 1994,
devant la commission d'examen composée de :

A. GUCKERT	Professeur ENSAIA	Président
J.M. MEYNARD	D.R. INRA Agronomie	Rapporteur
P. GIRARD	D.R. INRA Agronomie	Examineur
F. LAUREN	D 136 028615 2 C.F.	Examineur
S. RECOUS	C.R. INRA Agronomie	Examineur

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent tout d'abord au professeur GUCKERT, qui a permis mon inscription à l'I.N.P.L. et qui, malgré ses nombreuses charges d'enseignement et de recherche, a accepté de diriger ce travail. Je souhaite que cette collaboration puisse se poursuivre dans l'avenir.

Je voudrais ensuite citer Jean-Marc MEYNARD, pour son aide précieuse dans l'interprétation et l'analyse des résultats expérimentaux. Les agronomes du développement savent combien il est disponible, chaque fois qu'il s'agit d'aider à la valorisation des travaux de la recherche pour mettre au point des outils d'aide à la décision utiles aux agriculteurs. La collaboration que nous avons eu à l'occasion de ce travail, dont il a accepté d'être le rapporteur, n'en est qu'un exemple de plus.

Merci également à Sylvie RECOUS et Jean-Marie MACHET. Il m'ont accueilli à la station agronomique de LAON et c'est avec beaucoup de simplicité et de gentillesse qu'ils m'ont fait profiter de leur compétence de chercheur, notamment, sur tous les aspects concernant l'azote 15.

Mes remerciements s'adressent également à Philippe GIRARDIN, François LAURENT et Sylvie RECOUS qui ont accepté de faire partie du jury.

Ce travail a également nécessité des collaborations au niveau régional.

Je remercie en particulier :

– Le professeur JACQUIN, Louis FLORENTIN, Bernard COLIN et David PALMA-LOPEZ pour l'excellente collaboration sur les essais Maïs.

– Corinne REVEST et Maurice SIMONIN de la Chambre d'Agriculture de Meurthe et Moselle pour leur aide dans le choix des sites expérimentaux.

- Françoise JUNCKER et Philippe DESVIGNES de l'A.G.P.M., pour le financement des analyses d'azote sur maïs.
- Yves MESSMER, de l'I.T.C.F, pour la mise à disposition de résultats expérimentaux complémentaires.
- La mission Agriculture de la Région Lorraine, pour le financement des analyses sur blé.
- La Coopérative Agricole Lorraine pour la mise à disposition gracieuse de l'infralyseur.
- Les agriculteurs chez qui les expérimentations ont été conduites.

Je n'oublierai pas Maurice GENIN et Olivier LIMAUX pour la remise à jour des connaissances mathématiques nécessaires pour mener à bien ce travail, et Marc BENOIT pour les aspects linguistiques.

Enfin, merci à Pascal GIRARD, Emmanuel HANCE et Catherine ROUSSEL pour la mise en forme du texte et des graphiques.

"Tel est le sort de l'homme que jamais sa main ne peut exécuter avec la rigueur ultime ce que son esprit crée dans l'idéal. Impossible perfection. Mais telles sont les ressources de l'homme, qu'il peut déterminer de combien sa création diffère de la perfection".

LAVOISIER

RESUME

Une écriture simplifiée du bilan azoté pour la culture du blé d'hiver et du maïs a été proposée en région Lorraine. Deux années d'expérimentation avec l'isotope ^{15}N ont permis de justifier certains termes de ce bilan simplifié en confirmant, en particulier, l'indépendance des fournitures en azote du sol, par rapport à la dose apportée. Les conditions de variation du coefficient apparent d'utilisation (CAU) de l'azote de l'engrais ont été étudiées, notamment en fonction du temps de présence de l'engrais dans le sol. Par ailleurs, les résultats acquis suggèrent que le CAU est dépendant de la biomasse élaborée au moment des apports d'azote, donc des capacités d'absorption du peuplement. On propose en conclusion de tester une méthodologie opérationnelle des apports d'azote qui prenne en compte, non seulement le stade phénologique, mais également l'état de croissance du peuplement.

MOTS CLES : CAU , CRU , azote absorbé , vitesse d'absorption de l'azote,
temps de présence de l'engrais dans le sol.

SOMMAIRE

Chapitre I : Introduction	P. 4
Chapitre II : Problématique	P. 9
Chapitre III : Synthèse bibliographique	P. 16
1- Le poste Ns	P. 17
2- Le poste CAU	P. 20
3- Les facteurs de variation du CAU	P. 21
Chapitre IV : Matériels et méthodes	P. 25
1- Détermination du CAU à l'optimum de la courbe de réponse	P. 26
2- Etude des fournitures réelles du sol. Utilisation de l'isotope ¹⁵ N	P. 31
3- Etude de l'incidence du temps de présence de l'engrais dans le sol sur la variabilité du CAU	P. 33
Chapitre V : Résultats et discussions	P. 34
1- Utilisation de l'azote de l'engrais et fournitures réelles du sol	P. 35
2- Cinétique d'absorption de l'azote, CAU et temps de présence de l'engrais dans le sol	P. 49
3- Variation du CAU en fonction de la dose	P. 72
4- Variation du CAU en fonction de la date d'apport	P. 80
5- Facteurs de variation du CAU à l'optimum de la courbe de réponse	P. 82
Chapitre VI : Perspectives	P. 94
1- Choix d'un dispositif pour la suite du travail sur le blé	P. 95
2- Proposition d'un modèle de prévision de la date des apports d'azote	P. 97
3 - Poursuite des travaux sur maïs	P. 105
Chapitre VII : Conclusion générale	P. 106

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I – INTRODUCTION :

Pendant les 20 dernières années, les conseils prodigués aux agriculteurs en matière de fertilisation azotée ont eu pour conséquence une progression spectaculaire des quantités d'engrais apportées par hectare, associée à une augmentation régulière de la production. Toutefois, on peut dire que ces performances moyennes résultent de situations culturales diverses et variées qui ne sont que rarement prises en compte dans le calcul de la dose à apporter sur chacune des parcelles de l'exploitation : la dose la plus élevée apparaît comme sécurisante et on l'applique quels que soient les types de sols et les systèmes de culture.

Deux exemples peuvent illustrer cette tendance au niveau régional :

– S'agissant du blé d'hiver, l'utilisation de plus en plus systématique de régulateurs de croissance et de fongicides très performants, notamment contre les rouilles et l'oïdium, a conduit à des pratiques de fertilisation azotée très souvent excessives, eu égard aux possibilités de valorisation de cet azote par les différents milieux pédoclimatiques rencontrés en Lorraine.

Ainsi il n'était pas rare de constater, il y a seulement quelques années, des quantités d'azote apportées supérieures à 200 kg.ha^{-1} dans des sols de faible potentialité (moins de 70 Q.ha^{-1}), alors que des expériences conduites sur l'adaptation des itinéraires techniques (LIMAUX 1989,1991) montraient que, compte tenu des systèmes de cultures pratiqués, la dose optimum se situait entre 130 et 150 Kg . ha^{-1} .

Bien sûr, il n'est pas question de faire ici le procès des agriculteurs, puisque dans bon nombre de cas, ils n'ont fait que suivre les conseils de leurs différents techniciens, souvent munis de références "importées" de régions à forte potentialité et transposées sans le plus élémentaire souci de validation et d'adaptation.

– Le maïs fourrage, quant à lui, couvre près de 100 000 ha en région Lorraine et les pratiques de fertilisation azotée qui ont pu être recensées montrent que, jusqu'en 1990, les doses apportées se situaient fréquemment à 150 kg.ha^{-1} . Là encore, les expérimentations mises en place, ont permis de montrer que dans tous les cas, compte tenu des systèmes de cultures pratiqués (fumier fréquent et en quantités importantes), les fournitures en azote du sol permettaient de ne pas

dépasser 100 kg.ha^{-1} , sans aucun risque de perte de production. On a même pu montrer que, dans bon nombre de situations, un raisonnement plus précis conduisait à des doses comprises entre 50 et 70 kg.ha^{-1} .

Une des conséquences majeures de ces pratiques de surfertilisation se traduit par l'augmentation de la teneur en nitrate des eaux destinées à la consommation humaine.

Bien que la Lorraine soit moins concernée que d'autres régions françaises par ce phénomène, on dénombre toutefois quelques situations où la norme de 50 mg.l^{-1} est constamment dépassée. Il devient dès lors indispensable de proposer aux agriculteurs des modes de raisonnement de la fertilisation azotée qui se traduisent par des pratiques, dont on espère qu'elles permettront à moyen terme (quelques années) de stabiliser, voire de réduire la teneur en nitrate des aquifères concernés. C'est l'objectif fixé aux différentes opérations de conseil qui revendiquent le label FERTI-MIEUX.

En dehors de ces zones, généralement assez restreintes (quelques milliers d'hectares), bien délimitées au plan géographique et hydrogéologique, il existe des surfaces beaucoup plus vastes, au sein desquelles la teneur en nitrate des eaux souterraines est souvent comprise entre 25 et 50 mg.l^{-1} et qui font actuellement l'objet d'un zonage dans le cadre de la délimitation des "zones vulnérables". Il est prévu, à l'intérieur de ces zones l'obligation de la mise en oeuvre d'un "code de bonnes pratiques agricoles", qui, même si on n'en connaît pas encore totalement les adaptations régionales et locales, se traduira à coup sûr pour les agriculteurs par l'obligation de respecter des pratiques de fertilisation azotée très raisonnées.

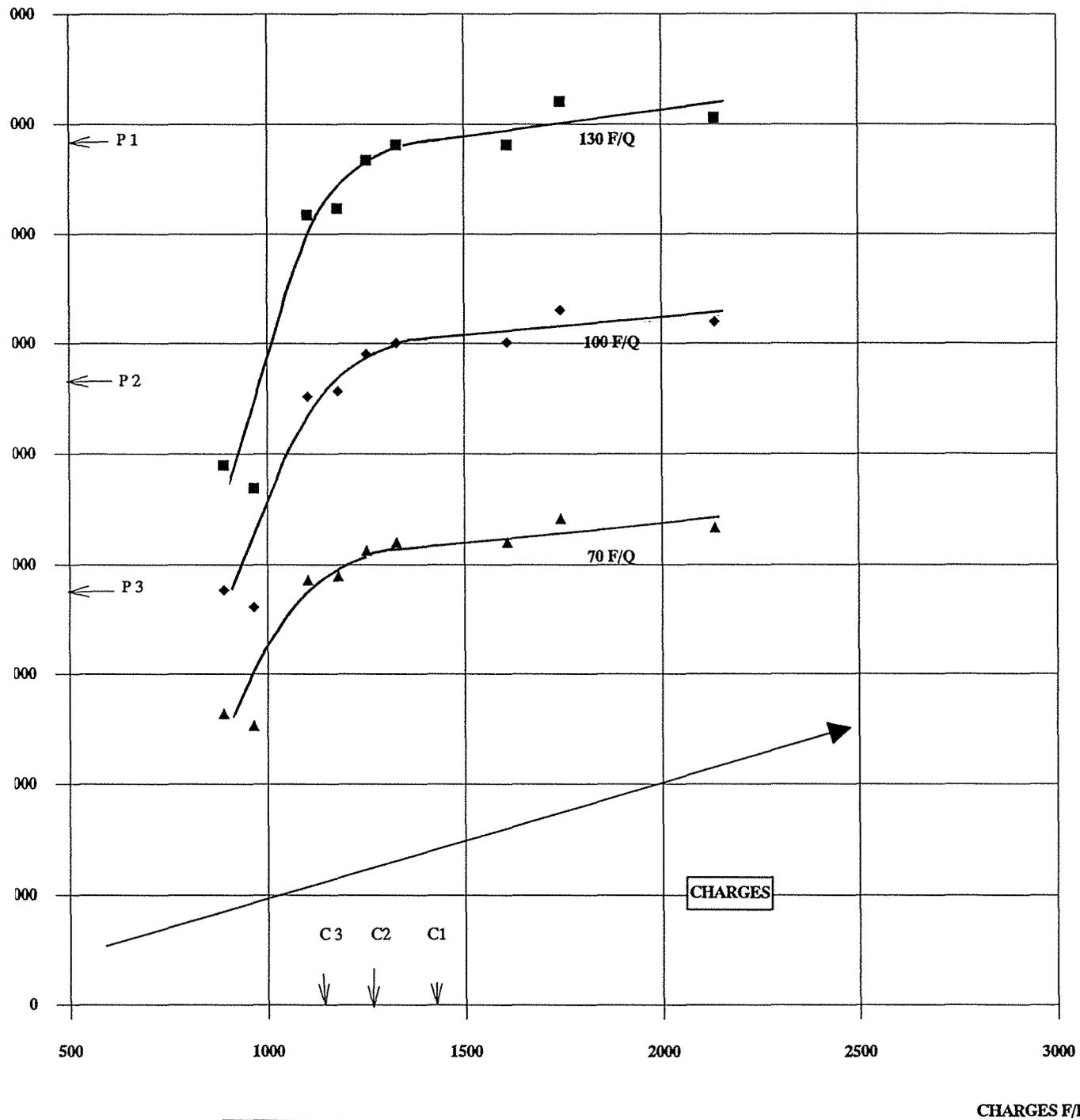
Par ailleurs, l'accord cadre passé en MARS 1992 entre le Ministère de l'Agriculture et celui de l'Environnement, prévoit après le lancement de la mise aux normes de la plupart des bâtiments d'élevage, l'extension du principe "Pollueur - Payeur" aux grandes cultures à partir de 1995. Même si sous la pression de la profession agricole, la mise en oeuvre de cet accord peut être retardée, même si certaines subtilités de langage laissent penser qu'on pourrait mettre en oeuvre un principe plutôt du type "non pollueur, non payeur", même si les éléments qui serviront de base au calcul d'éventuelles taxes, ne sont pas encore connus, on peut penser que dans un proche avenir, toute pratique de fertilisation azotée dépassant largement les besoins des cultures, sera l'objet de pénalisation financière pour l'agriculteur. Autrement dit, ce n'est plus seulement le prix du kilogramme d'azote qu'il faudra prendre en compte dans le raisonnement de la dose à apporter, mais également les conséquences financières, en terme de taxes, induites par une fertilisation excessive.

Un autre aspect à prendre en considération concerne les conditions économiques de la production. La récente réforme de la Politique Agricole Commune, se traduit en particulier par une baisse des prix unitaires. S'il est vrai que ces baisses sont partiellement comblées par des primes, il n'en reste pas moins que les niveaux de production qui permettent l'obtention de la meilleure marge brute à la parcelle, vont devoir être revus à la baisse. Des résultats acquis sur les réseaux itinéraires techniques suivis pendant 4 ans en région Lorraine montrent que l'optimum de production baisse de 5 qx.ha⁻¹ lorsque le prix du blé chute de 130 F / Quintal à 70 F / Quintal, la conséquence étant une diminution des charges opérationnelles (graphique n°1). On peut également ajouter que, dans l'hypothèse de suppression de la jachère et de l'instauration de quotas sur les céréales, la majorité des exploitations céréalières se verraient contraintes de produire moins sur la même surface, donc d'extensifier.

Dans ces conditions, à l'inverse de l'exemple cité au début où l'utilisation intensive de produits fongicides par exemple permettait une valorisation de doses d'azote élevées, la nécessaire diminution des charges opérationnelles dans des conduites de type extensif devra s'accompagner d'un raisonnement beaucoup plus précis de la dose d'azote (accepter de réduire le poste fongicide en diminuant les nombres de traitements ou en utilisant des produits moins performants impose parallèlement une mise en oeuvre de techniques permettant de diminuer les risques de développement des maladies).

Il apparaît donc clairement que, quelque soit la nature de l'incitation (de type réglementaire ou résultant d'un calcul économique) les agriculteurs seront confrontés, à brève échéance, à la nécessité de mettre en oeuvre des conduites culturales moins exigeantes en intrants et qui privilégient un raisonnement beaucoup plus précis de la fertilisation azotée.

F / HA



à P1 : (7 891 F de produit) correspond la meilleure marge brute pour un niveau de charges de 1 450 F et un rendement de 60,7 qx/ha

à P2 : (5 850 F de produit) correspond la meilleure marge brute pour un niveau de charges de 1 300 F et un rendement de 58,5 qx/ha

à P3 : (3 899 F de produit) correspond la meilleure marge brute pour un niveau de charges de 1 150 F et un rendement de 55,7 qx/ha

GRAPHIQUE N° 1

CHAPITRE II
PROBLEMATIQUE

II – PROBLEMATIQUE :

L'idée de raisonner au plus juste la quantité d'azote à apporter sur les cultures n'est pas nouvelle. Dès 1969, **HEBERT** propose d'équilibrer les besoins en azote du blé par les fournitures du sol et l'apport d'engrais.

Le principe du bilan prévisionnel est né :

$$\begin{aligned} & \text{Besoins en azote} \\ & = \\ & \text{Azote minéral du sol disponible pendant le cycle végétatif du blé} \\ & + \\ & \text{Azote de l'engrais} \end{aligned}$$

En détaillant chacun des termes de cette équation, **HEBERT** et **REMY** en 1977 proposent l'écriture suivante :

$$\mathbf{bY + Rf + Pi + (Pv + Pd) = Ri + Mh + Mr + Ma + (Ap + Af) + X}$$

bY = besoins du Peuplement

Rf = azote minéral à la fermeture du bilan (à la récolte)

Pi = perte par lixiviation

(Pv + Pd) = pertes par voie gazeuse (volatilisation et dénitrification)

Ri = azote minéral à l'ouverture du bilan

Mh = minéralisation nette de l'humus

Mr = contribution nette des résidus de récolte

Ma = contribution des amendements organiques

(Ap + Af) = apports incontrôlés (pluies, fixation non symbiotique)

X = fumure minérale

Dans sa forme vulgarisée, on a admis que les pertes par lixiviation étaient nulles et les pertes par voies gazeuses étaient compensées par les apports incontrôlés soit :

$$bY + R_f = R_i + M_h + M_r + M_a + X$$

Dans cette écriture, l'offre potentielle en azote du sol est représentée par la somme des termes $R_i + M_h + M_r + M_a$, soit F_s (fournitures du sol), le terme R_f représentant le fait qu'une fraction de F_s et de X n'est pas utilisée par la plante et se retrouve dans le sol après la récolte.

Depuis, un nombre considérable de travaux ont été entrepris par différentes équipes, en particulier l'INRA de LAON (**REMY et HEBERT, 1978**), l'INAPG (**SEBILLOTTE et al, 1978; BOIFFIN et al, 1982**), l'ITCF (**VIAUX, 1980**), pour paramétrer les différents termes de cette écriture. Parallèlement, sa vulgarisation auprès des agriculteurs était engagée sur l'ensemble du territoire français. A cette époque, dans les années 80, les chambres d'Agriculture, en relation avec les coopératives, les négociants et l'ITCF y ont largement contribué, notamment dans le cadre des opérations "Blé Conseil", soutenues financièrement en particulier par l'ONIC.

On ne peut pas dire pour autant que ces campagnes de communication furent un succès. En effet, les agriculteurs trouvaient en général la méthode trop compliquée, (**MEYNARD et CERF, 1988**), habitués qu'ils étaient de pratiquer à peu près la même fertilisation sur l'ensemble de leurs parcelles. On se souvient en particulier de la difficulté à leur expliquer que l'azote non utilisé par la plante (R_f) devait être comptabilisé dans les besoins.

En 1983, **REMY et VIAUX**, proposent une simplification de l'écriture : ils introduisent un coefficient K affecté à l'azote du sol et de l'engrais qui traduit le fait que la proportion d'azote valorisé est inférieure à 100 % ($K < 1$) et ce pour 2 raisons principales :

– Les conditions d'implantation du système racinaire peuvent rendre compte de variations importantes dans les quantités d'azote absorbé pour un même niveau de production (**MEYNARD et al, 1981**).

– La disponibilité en azote, notamment du sol, ne coïncide pas exactement avec les besoins de la plante.

L'introduction de ce coefficient rendait donc inutile le terme R_f et l'équation devient :

$$bY = K (F_s + X)$$

A propos de l'utilisation de cette écriture, plusieurs problèmes méritent d'être soulevés :

– on affecte le même coefficient à l'azote du sol et à celui de l'engrais alors que leur disponibilité dans le temps et dans l'espace est différente (MACHET, 1987).

– Les valeurs de K , calculées à posteriori sur des essais de réponse à l'azote varient dans une large gamme (0,5 à 0,9), la difficulté majeure résidant dans la prévision correcte de F_s .

En région Lorraine, cette écriture a été peu vulgarisée, car elle ne semblait pas apporter aux agriculteurs plus de facilité d'utilisation. En effet, comme dans l'écriture originale, on est toujours confronté à la détermination de R_i (sa prévision ayant été tentée sans grand succès) par prélèvement de terre et analyses. De plus l'accès aux valeurs proposées pour M_h , M_r et M_a , nécessitent l'utilisation de différentes tables, qui à l'époque ne semblaient pas très pratiques aux agriculteurs. Cet aspect est d'ailleurs confirmé au plan national au travers des résultats d'une enquête effectuée dans plusieurs départements français et dont les résultats furent exposés au 3ème FORUM du COMIFER à NANCY en 1988.

A partir de 1986, à l'initiative de la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, un réseau de 100 essais, répartis sur les 4 départements, se met en place. Son objectif est de tester les conclusions d'une étude régionale sur les potentialités pédoclimatiques pour le blé d'hiver (LIMAUX, 1985). Ces essais comprenaient entre autres des témoins non fertilisés en azote. L'analyse des parties aériennes à la récolte permet alors de cerner la grande diversité des situations observées : les quantités d'azote exportées par ces témoins variaient de $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ à $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, en fonction des types de sol et des systèmes de culture. Il fut alors décidé de

reconduire ces réseaux de témoins non fertilisés afin de constituer une banque de résultats qui permettait à terme de proposer une grille prédictive des fournitures en azote du sol. Parallèlement, la même démarche se mettait en place sur Maïs Fourrage avec la collaboration de l'AGPM.

Il faut remarquer qu'à l'époque, on ne s'était pas posé la question de savoir comment cette valeur pouvait être utilisée dans l'écriture du bilan azoté.

En effet, on peut imaginer qu'elle représente l'offre potentielle du sol, affectée d'un coefficient d'interception racinaire. Autrement dit par rapport à l'écriture proposée par **REMY et VIAUX en 1982**, $b_y = K (F_s + X) = K.F_s + K.X$, l'azote absorbé par un témoin non fertilisé représente la valeur $K.F_s$.

Si on appelle cette valeur N_s (comme azote absorbé provenant apparemment du sol), l'écriture devient :

$$b_y = N_s + K.X$$

Si à l'optimum de la courbe de réponse à l'azote, les besoins du peuplement sont strictement satisfaits, on peut alors écrire :

$$bY = N_{PE} = N_s + K.X$$

avec N_{PE} = azote absorbé par la culture (plante entière)

$$\text{et } K = \frac{N_{PE} - N_s}{X} = \text{Coefficient d'utilisation de l'azote de l'engrais}$$

Dans la mesure où N_s est défini comme l'azote provenant apparemment du sol (on verra plus loin que les quantités d'azote provenant réellement du sol peuvent être différentes de cette valeur), le coefficient K sera défini comme un coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais, soit CAU, l'écriture finale étant :

$$b_y = N_s + CAU . X$$

Cette écriture a été officiellement vulgarisée en Lorraine en Mars 1992, à l'occasion de la journée interrégionale Agronomie Alsace - Lorraine.

En effet, le dépouillement et la mise en forme des nombreux résultats de témoins non fertilisés en azote suivis de 1986 à 1991, a permis à l'époque de proposer une grille prédictive des valeurs de Ns pour le blé et le Maïs fourrage basée sur la connaissance des types de sol et des systèmes de culture (annexes n° 1 et 2).

Il restait toutefois à donner une valeur au CAU pour que l'écriture puisse être utilisée. Concernant le blé d'hiver, à partir des résultats de 5 expérimentations sur les modulations d'itinéraires techniques dans les terres à cailloux suivis en 1988 et 1989, sur lesquelles l'azote absorbé avait été mesuré sur l'ensemble des traitements, la valeur de 80 % semblait se dégager pour les traitements proches de l'optimum de réponse à l'azote.

Par ailleurs, des résultats provenant d'autres régions à partir d'expérimentations situées sur d'autres types de sols et dans d'autres systèmes de culture (CHENET, 1985) montraient que dans presque tous les cas, la valeur de 80 % était atteinte ou dépassée.

Nous avons donc proposé, en terme de vulgarisation de la méthode, que la valeur résultant de la différence entre les besoins et fournitures du sol prévues par la grille, soit multipliée par 1,25 pour trouver la valeur de la dose à apporter (annexe n° 3), ce qui revient à adopter la valeur de 0,8 pour le CAU.

Pour le maïs fourrage, les résultats étaient plus fragmentaires.

Ainsi, l'année 1992 a été le début d'une politique de communication intensive de cette écriture simplifiée du bilan azoté, à destination des agriculteurs.

Dans la mesure où la prise en compte des fournitures du sol dans le bilan azoté, constituait un réel progrès, on pouvait, en terme de stratégie de développement, s'accommoder de quelques imprécisions sur la valeur du CAU, ce qui n'excluait pas, en terme de recherche de références, de poursuivre le travail engagé, pour affiner la méthode.

Aussi, dès le printemps 1992, un dispositif expérimental était mis en place, qui visait à répondre aux questions suivantes :

– Faut-il moduler la valeur du CAU en fonction des types de sols et des niveaux de rendements potentiels ?

- La valeur de 80 % pour le maïs fourrage est-elle adaptée aux conditions de fertilisation des éleveurs lorrains ?

- Un fractionnement judicieux permet-il d'améliorer le CAU ?

L'objectif de ce mémoire est de présenter les résultats, les synthèses et les conclusions des deux dernières années au cours desquelles des dispositifs expérimentaux ont été mis en place pour répondre à ces questions.

CHAPITRE III
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

III – SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE :

La proposition de vulgariser une écriture simplifiée pour calculer le bilan azoté, a fait l'objet de nombreuses discussions, voire de polémiques.

En effet, renseigner des termes ne rendant compte que d'utilisation ou d'absorption apparente dans une équation qui devait permettre de calculer une dose réelle pouvait paraître choquant.

Il est donc important de bien restituer la signification des postes Ns et CAU par rapport aux travaux conduits sur les fournitures réelles en azote du sol et sur le coefficient d'utilisation de l'azote de l'engrais.

1 – Le poste Ns :

Un certain nombre de travaux ont montré que la contribution du sol à la fourniture en azote pouvait être différente selon qu'on est en situation fertilisée ou non (STEELE et al, , MACHET et al, 1987). L'hypothèse d'une surminéralisation de la part du sol consécutive à l'apport d'engrais azoté, a même été avancée, mais ce phénomène n'a jamais pu être prouvé en tant que mécanisme biologique (RECOUS, 1988).

On parle plutôt maintenant d'interaction entre l'azote natif et l'azote apporté (JENKINSON et al, 1985 – HART et al, 1986). Ce phénomène est désigné sous le sigle A.N.I. (Added Nitrogen Interaction) et toujours selon JENKINSON et al, 1985, les situations à A N I réel sont relativement rares, les différences observées relevant plutôt de réactions de "Substitution de Pool".

Dans les faits, les quantités d'azote absorbé en provenance du sol en situation fertilisée, Ndfs (Nitrogen derived from soil), qui ne peuvent être mesurées qu'à partir de l'utilisation du traceur ^{15}N , sont généralement supérieures aux valeurs de Ns (graphique n° 2). C'est la raison pour laquelle, le poste Ns est défini comme l'azote provenant apparemment du sol, la conséquence étant une incertitude sur la quantité d'azote provenant réellement de l'engrais Ndff (Nitrogen derived from fertilizer). Par convention, on appellera Nf, l'azote provenant apparemment de l'engrais.

En résumé, on peut proposer les deux écritures suivantes :

$$1) N_{PE} = N_s + N_f = N_s + K_1 X$$

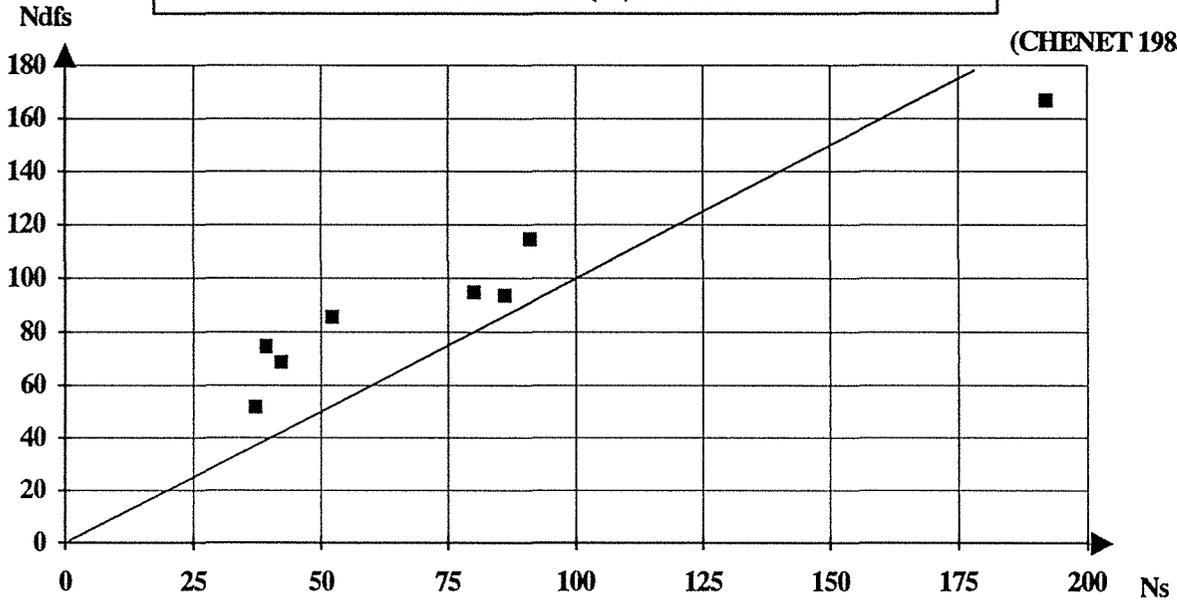
Dans ce cas, on mesure N_{PE} et N_s et on en déduit les valeurs des N_f et de K_1

$$2) N_{PE} = N_{dfs} + N_{dff} = N_{dfs} + K_2 X$$

Dans ce cas, on mesure N_{PE} et N_{dff} (à partir du traceur ^{15}N) et on en déduit les valeurs de N_{dfs} et de K_2 .

COMPARAISON DES FOURNITURES EN AZOTE REELLES (N_{df}) ET APPARENTES (N_s) DU SOL

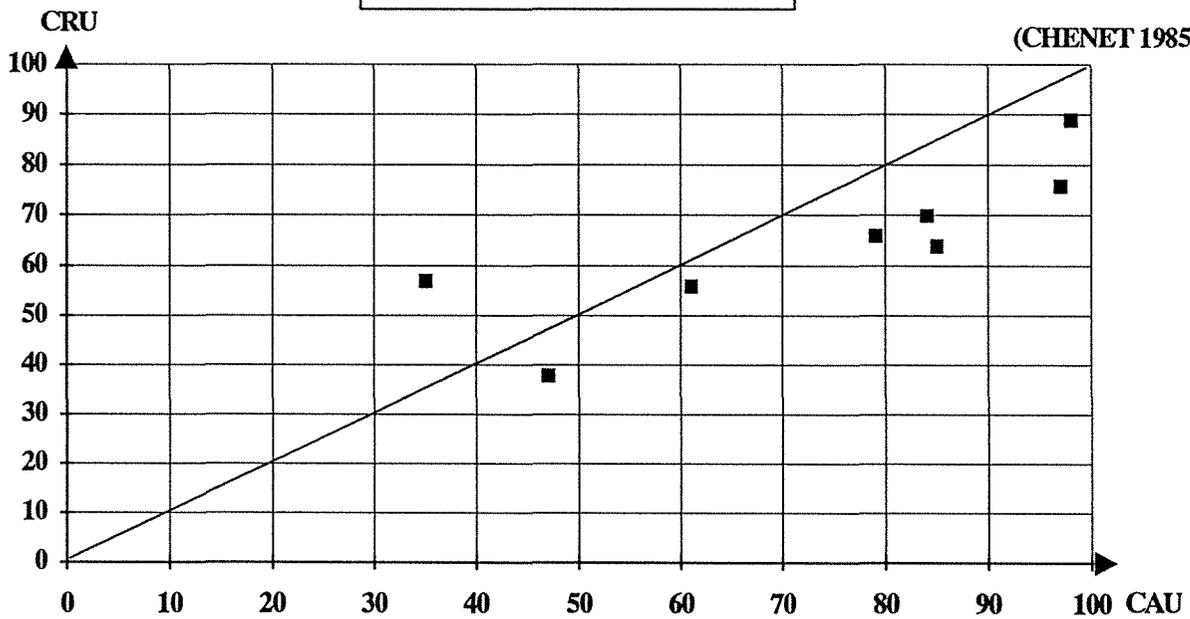
(CHENET 1985)



GRAPHIQUE N° 2

COMPARAISON DES CRU ET CAU

(CHENET 1985)



GRAPHIQUE N° 3

2- Le poste CAU :

Dans les 2 écritures précédentes, les valeurs de K_1 et K_2 sont strictement celles du CAU (Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote de l'engrais) et du CRU (Coefficient Réel d'Utilisation de l'azote de l'engrais)

$$K_1 = \frac{N_{PE} - N_s}{X} = \frac{N_f}{X} = CAU$$

$$K_2 = \frac{N_{PE} - N_{dfs}}{X} = \frac{N_{dff}}{X} = CRU$$

Dès lors qu'on admet des différences possibles entre les valeurs de N_s et N_{dfs} , on est conduit à admettre leur répercussion sur les valeurs du CAU et du CRU correspondantes et, dans le cas général où $N_{dfs} > N_s$ (graphique n°2) cela implique que $CAU > CRU$ (graphique 3).

Il n'est donc pas question de poser comme hypothèse préalable que la contribution du sol à la fourniture en azote est identique en situation fertilisée et non fertilisée (CARLOTTI, 1992), pour utiliser valablement les références de quantité d'azote absorbé par des témoins non fertilisés, dans l'écriture du bilan.

En revanche, comme le suggère MEYNARD (Communication personnelle, Octobre 1991), l'utilisation des valeurs de N_s conduit obligatoirement à introduire le CAU dans l'écriture du bilan, la formulation finale étant :

$$bY = N_s + CAU \cdot X$$

3 – Les facteurs de variation du CAU :

Au cours des 15 dernières années, la majorité des travaux entrepris pour étudier les conditions d'absorption de l'azote par les végétaux (quantités absorbées, vitesse d'absorption, vitesse de minéralisation, facteurs influant sur l'organisation, etc.) ont été réalisés à partir de l'utilisation de l'isotope stable ^{15}N de l'azote ^{14}N . Le développement des méthodes analytiques, notamment la spectrométrie de masse, a permis de quantifier de façon précise la proportion d'isotope ^{15}N retrouvé dans la plante, par rapport à ce qui avait été apporté au sol au moyen d'un engrais artificiellement enrichi en ce même isotope.

Les techniques d'analyses et de calcul ont été décrites par de nombreux auteurs en France, en particulier **GUIRAUD et FARDEAU 1977, VONG 1987, RECOUS 1988**.

La conséquence de ces multiples travaux se traduit par la publication de beaucoup de résultats sur les valeurs observées et les conditions de variation du coefficient réel d'utilisation de l'azote (CRU). En revanche, les travaux sur le CAU sont relativement peu nombreux.

Toutefois, même si comme cela a déjà été dit, ces deux coefficients sont très souvent différents, plusieurs travaux (**REMY 1984, CHENET 1985, MACHET 1987**) montrent qu'ils varient généralement dans le même sens. Aussi, nous nous autoriserons à retenir les mêmes facteurs pour expliquer les variations du CAU que ceux retenus pour le CRU.

La synthèse sur cette question réalisée par **MACHET et al** en 1987 à l'occasion du colloque "connaissances nouvelles pour une fertilisation azotée raisonnée", ainsi que l'abondante bibliographie effectuée par **PLAS** dans le cadre de sa thèse soutenue en Octobre 1992 permettent de cerner les principaux facteurs de variations du CRU et du CAU, cités par les différentes équipes ayant travaillé sur ce thème.

3.1 – La dose totale apportée :

Dans la plupart des expérimentations répertoriées, on n'observe pas de variation importante du CRU ou du CAU lorsque les doses étudiées restent dans la gamme 50 kg.ha^{-1} à 250 kg.ha^{-1} . Au delà, compte tenu de l'incapacité de la plante à s'enrichir indéfiniment en azote, le coefficient d'utilisation baisse lorsque la dose augmente (**BROADBENT et CARLTON, 1978**).

De même certains auteurs signalent des baisses du CRU pour de faibles doses (CHABALIER et al, 1975). Il n'est pas impossible que cet effet soit dû à une part plus importante du 1er apport dans la dose totale, (PLAS, 1992).

Nous verrons plus loin que cet aspect concernant la relative constance du CRU, quelle que soit la dose, est important pour justifier du choix d'une valeur de CRU ou CAU unique à l'optimum de la courbe de réponse.

3.2- La date d'apport :

Là encore, les résultats des très nombreuses expérimentations menées sur ce thème, convergent vers la même conclusion : le coefficient d'utilisation de l'engrais augmente avec la date d'apport. Les deux explications généralement avancées sont :

- une augmentation de la capacité d'absorption de la plante
- une augmentation des besoins instantanés

Ces résultats ont conduit à confirmer les préconisations concernant le fractionnement :

- réalisation d'un premier apport correspondant à une dose faible (besoins instantanés et capacité d'absorption limitée) 1/3 de la dose totale ou moins selon l'état de croissance recherchée au 2ème apport (MEYNARD, 1985)

- deuxième apport plus important correspondant à la période de besoins maximum.

- troisième apport éventuel, tardif pour enrichir la céréale en protéine.

3.3- la forme de l'engrais azoté :

Les travaux les plus récents concernant l'étude de l'assimilation de différentes formes d'engrais ont été conduits par RECOUS (1988) qui constate :

- une augmentation systématique du CRU de la forme nitrate par rapport à la forme ammonium ou urée (surtout entre le 2ème apport et la floraison).

- une préférence marquée par les micro-organismes du sol pour organiser prioritairement la forme ammonium.

– une indépendance de la forme, en terme de quantités absorbées à la récolte, ce qui compte tenu des remarques précédentes, traduirait des contributions réelles du sol différentes (Ndfs) en fonction des formes et permettrait donc de conclure à des valeurs de CAU indépendantes de la forme.

3.4– Les facteurs limitant la croissance et la capacité d'assimilation de la plante :

Les principales causes de variation du coefficient d'utilisation de l'azote qui peuvent être recensées dans ce chapitre relèvent des interactions de l'azote avec d'autres éléments minéraux :

– Les interactions azote x potassium (dans les sols très pauvres en cet élément) ont fait l'objet de nombreuses études (dossiers techniques SCPA) et très généralement, lorsqu'il y a réponse aux apports de potassium, la valorisation de l'azote est meilleure.

– De même les interactions azote x phosphore (BOYD, 1976) peuvent expliquer un effet sur l'accroissement de la biomasse et l'utilisation de l'azote. En 1991, des essais conduits par PLAS montrent une augmentation de l'ordre de 5 % du CAU de l'azote lorsqu'il y a réponse à l'apport de phosphore.

3.5– Les dates et densités des semis :

Pour une même date de semis, la biomasse des parties aériennes au Stade Epi 1 cm (BA₁) est fonction du peuplement.

Pour un même peuplement, la BA₁ est fonction de la date de semis (MEYNARD, LIMAUX, 1987).

Si, comme on peut le penser, la capacité d'absorption du peuplement est directement reliée à son état de croissance (besoins instantanés plus importants), alors les variations de date de semis et de densité de peuplement vont se répercuter sur la valeur du CAU.

Nous verrons plus loin quelques résultats allant dans ce sens. Cet effet est d'ailleurs confirmé par PLAS 1992, qui signale des valeurs de CAU plus faibles en 1986, à la suite de dates de semis tardives à l'automne 1985.

3.6 - Le temps de présence dans le sol :

La compétition dans le sol se situe principalement entre l'absorption racinaire et l'organisation microbienne. Lorsque les apports d'azote sont réalisés à une époque ne correspondant pas à une utilisation importante par la plante, la compétition tourne à l'avantage de la microflore du sol (REMY, 1984) et ainsi, l'engrais azoté reste plus longtemps dans le sol avant d'être utilisé. Toujours selon REMY, 1984, il semble que plus le temps de séjour dans le sol est long, plus forte est la probabilité de réorganisation de l'azote dans le sol, et donc plus le coefficient d'utilisation risque de diminuer.

On rejoint là les problèmes, déjà évoqués de fractionnement et de capacité d'absorption par la plante.

Cet aspect est important et nous verrons comment la quantification de la relation CAU en fonction du temps de présence de l'engrais dans le sol, peut nous aider à interpréter des valeurs du CAU beaucoup plus faibles que celles attendues.

CHAPITRE IV
MATERIELS ET METHODES

IV – MATERIELS ET METHODES :

1 – Détermination du CAU à l'optimum de la courbe de réponse :

1.1 – Définition de l'optimum de la courbe de réponse

En l'absence d'un consensus clair sur les types d'ajustement à utiliser pour les courbes de réponse à l'azote, et donc sur l'optimum correspondant, nous avons retenu une méthode inspirée de celle proposée par LAURENT (I.T.C.F.) en 1987, à savoir :

" On se situe à l'optimum sur la plus faible dose au delà de laquelle il n'y a pas de gain de rendement supérieur à 2 quintaux pour cinquante unités d'azote supplémentaires. Cette règle économique est obtenue pour un prix du quintal de blé à 80 F et une unité d'azote à 3 francs. Elle correspond aussi à la différence limite que l'on peut mettre en évidence sur ce type d'essais ". Compte tenu des conditions économiques du moment (baisse du prix de l'azote et de l'évolution prévue du prix des céréales à court terme, nous avons retenu 2,50 F pour l'unité d'azote et 75 F pour le quintal de blé, ce qui correspond à 2 quintaux pour 60 unités supplémentaires.

Pour tenter d'être un peu plus précis, nous avons également considéré un autre aspect :

S'agissant de réponse à l'azote, il semble plus judicieux de retenir comme unité de production des nombres de grains plutôt que des quintaux (MEYNARD, 1985).

Pour chaque variété, nous avons donc pris en compte le poids de mille grains correspondant au nombre de grains maximum atteint sur chaque essai afin de calculer la valeur moyenne de nombre de grains correspondant à 2 quintaux.

Cette méthode se révèle particulièrement intéressante dans le cas d'essais où les fortes doses d'azote ont engendré des chutes de poids de 1 000 grains, consécutives à des maladies mal contrôlées ou à de la verse tardive. En effet dans ce cas de figure, les rendements correspondant aux doses les plus élevées, stagnent ou diminuent, alors que le nombre de grains continue à augmenter.

Après calcul, les valeurs retenues sont les suivantes :

VARIETES	P M G retenu en g	NG/m ² correspondant à 2 q
THESEE	52	385
FORBY	42	475
PEPITAL	38	525
BAROUDEUR	42	475
RITMO	45	445

Cas particulier du maïs fourrage :

Les bases de calcul restent 2 quintaux pour 60 unités d'azote. A partir de la relation établie sur le réseau O P A L (Observatoire des Potentialités Agro-climatiques en Lorraine) entre le rendement en grain (Rg) et le rendement en fourrage (Rf), on retient la valeur de 0,32 Tonne de matière sèche pour 60 unités.

$$R_g = 6,26 R_f - 11,72 \quad r^2 = 0,92 \quad (8 \text{ mesures})$$

Domaine de validité : $13,5 < R_f < 20,4$

1.2 - Dispositif expérimental :

* Les sols :

Pour chacune des deux espèces, 4 types de sols ont été retenus pour les 2 années d'expérimentation.

- Blé : Limon profond - Argile lourde - Argilo calcaire superficiel - Argileux moyennement profond sur calcaire

- Maïs : Limon profond - Argile lourde - Argile calcaire superficiel - Sable profond d'alluvions

Les caractéristiques physico-chimiques sont présentées en annexe n° 4.

*** Les traitements azotés :**

- Doses appliquées :

- Blé :

*** année 1992**

0 , $(x - 60)/2$, $x - 60$, $x - 30$, x , $x + 30$, $x + 60$;

*** année 1993**

0 , 50 , 75 , 100 , 130 , 160 , 190 , 220

- Maïs :

*** année 1992**

0 , $x - 60$, $x - 40$, $x - 20$, x , $x + 20$, $x + 40$, $x + 60$

*** année 1993**

0 , 20 , 40 , 60 , 80 , 100 , 120 , 140 pour 3 essais

0 , 30 , 60 , 90 , 120 , 150 , 180 , 210 pour 1 essai

L'ensemble des essais a été conduit avec 3 ou 4 répétitions

- Mode d'épandage de l'azote :

- Blé :

*** année 1992 :** ammonitrate épandu manuellement sur des parcelles élémentaires de 3 m x 5 m.

*** année 1993 :** ammonitrate dissous épandu avec un pulvérisateur à pression préalable équipé d'une rampe de 1 m munie de 4 buses trifilets, sur des parcelles élémentaires de 3 m x 3 m (cette technique a été adoptée en 1993 pour pallier aux problèmes d'hétérogénéité d'épandage rencontrés sur les parcelles recevant de très petites doses). Au total, 4 passages croisés permettent une répartition correcte et dans tous les cas indépendante de la dose à apporter, puisque la quantité de liquide est constante (2 litres).

- Maïs :

*** année 92 et 93 :** ammonitrate épandu manuellement sur des parcelles élémentaires de 5,6 m x 10 m (la faible densité de peuplement, de l'ordre

de 10 pieds/m² n'autorise pas, si on veut que les prélèvements à la récolte soient représentatifs, à travailler sur des parcelles plus petites).

1.3 - Analyses et mesures

* Blé :

La biomasse et l'azote absorbé par les parties aériennes ont été mesurés avant le 2ème apport sur le témoin 0 azote et les parcelles fertilisées, pour les essais de 1992 et 1993.

En outre, cette détermination a été effectuée avant le 1er apport sur les essais de 1993.

A la récolte, l'azote absorbé est mesuré sur chaque traitement, dans les grains et dans les pailles.

- Pour les pailles, l'analyse est effectuée par le laboratoire de la S.A.D.E.F. ou de l'I.N.R.A. de Laon. Selon les cas, les méthodes **KJELDAHL** ou de combustion types "**DUMAS**" ont été utilisées.

- Pour les grains, nous avons utilisé, par souci d'économie, l'infralyseur mis gracieusement à notre disposition par la **Coopérative Agricole Lorraine**, après avoir réalisé un calage à partir d'échantillons analysés par la méthode de référence à l'**I.F.B.M.** (Institut Français pour la Brasserie et la Malterie).

De plus, en 1993, nous avons vérifié les résultats obtenus par infralyseur, après correction, avec ceux résultant de la méthode à combustion utilisée à la station I.N.R.A. de LAON.

L'ensemble de ces résultats, présentés en annexe n° 5 montrent que, sous réserve de quelques contrôles effectués sur des échantillons choisis de telle manière qu'ils représentent une gamme de variation assez large de la teneur en azote (1,3 % à 2,7 %), l'infralyseur constitue un outil suffisamment fiable et rapide.

La récolte est effectuée en épis sur des placettes correspondant à 5 mètres linéaires par parcelle élémentaire. Les épis sont comptés, battus, le poids de 1 000 grains mesuré, le nombre de grains par m² calculé. Le rendement est exprimé à 15 % d'humidité, après passage d'un échantillon à l'humidimètre.

Le calcul du rendement en paille est réalisé à partir du rendement en grain et du rapport Grain/Paille mesuré sur un échantillon d'une cinquantaine de plantes entières.

*** Maïs :**

A la récolte, la teneur en azote total est déterminée séparément dans les épis et dans les tiges. Les analyses sont effectuées au laboratoire de l'A.G.P.M. par la méthode **KJELDAHL**. La récolte est effectuée sur 5 placettes de 2 m par parcelle élémentaire. Ces placettes sont repérées au stade 5 à 6 feuilles et sont situées de telle façon que, à l'intérieur d'un même essai, le peuplement soit identique pour toutes les placettes. Les épis et les tiges sont pesés séparément et 5 plantes entières prélevées au hasard sur chaque parcelle élémentaire servent à la détermination de la teneur en matière sèche des tiges et des épis, ainsi qu'à l'analyse d'azote.

2 - Etudes des fournitures réelles du sol - Utilisation de l'isotope ^{15}N

2.1 - Dispositif expérimental :

* Blé :

La méthodologie utilisée est celle proposée par l'I.N.R.A. de LAON : à l'intérieur des parcelles élémentaires fertilisées en ^{14}N , on ménage des placettes de 1,5 m x 1,5 m sur lesquelles la solution enrichie en ^{15}N est appliquée au moyen d'un pulvérisateur portatif à pression préalable.

Pour des raisons évidentes de coût, nous n'avons pu utiliser l'azote 15 sur tous les traitements.

- en 1992, les doses x-30, x et x+30 ont fait l'objet du traitement ^{15}N sur 2 des 4 répétitions.

- en 1993, afin de vérifier l'incidence de la dose d'engrais sur les fournitures réelles du sol, nous avons retenu une gamme de doses plus large, soit 50, 100, 160 et 220 unités ha^{-1} sur deux des 3 répétitions.

Les solutions ont été préparées à l'I.N.R.A. de LAON et leur application a été réalisée après dilution dans 1 litre d'eau.

* Maïs :

La même méthodologie a été utilisée. Les placettes ^{15}N mesurent 2,4 m (3 rangs de maïs à 0,80 m d'écartement) x 2,5 m.

- en 1992, les doses x-20, x et x+20 ont fait l'objet du traitement ^{15}N sur 2 des 4 répétitions.

- en 1993, nous avons retenu les traitements 20, 80 et 140 unités ha^{-1} pour 3 des essais et 30, 120 et 210 unités ha^{-1} pour le 4ème essai.

Les solutions ont été préparées par le service science du sol de l'E.N.S.A.I.A. et appliquées après dilution dans 2 litres d'eau. En outre sur ces essais, la dose intermédiaire a fait l'objet d'une application au stade 8 feuilles.

2.2 – Analyses et mesures :

– Pour le blé, 50 cm ont été prélevés sur les 3 lignes centrales de la placette pour détermination de la teneur en azote total et de l'excès isotopique dans les grains et dans les pailles. Le contrôle de l'excès isotopique de l'engrais (prévu à 0,3 %) a également été effectué.

L'ensemble de ces déterminations a été réalisé par l'**I.N.R.A. de LAON**, par spectrométrie de masse.

– Pour le maïs, 50 cm ont été prélevés sur le rang central de chaque placette pour détermination de la teneur en azote total et de l'excès isotopique dans les épis et dans les tiges.

On a également procédé au contrôle de l'excès isotopique de l'engrais (prévu à 0,3 %). Les analyses ont été effectuées par **Le Laboratoire Central d'Analyses du C.N.R.S.** à LYON, par spectrométrie de masse.

3 – Etude de l'incidence du temps de présence de l'engrais dans le sol sur la variabilité du C A U. :

3.1 – Dispositif expérimental :

L'objectif de ce dispositif était de disposer d'une gamme la plus large possible de quantités d'azote à disposition de la plante. Nous avons donc fait varier les doses et les dates d'apport.

– Les doses :

- * un témoin non fertilisé en azote
- * une dose faible inférieure aux besoins soit 100 unités ha⁻¹
fractionnée en 20 + 80
- * une dose normale censée couvrir les besoins soit 170 unités ha⁻¹
fractionnée en 40 + 130
- * une dose excédentaire par rapport aux besoins soit 220 unités ha⁻¹
fractionnée en 80 + 140

Nous avons apporté chacune de ces 3 doses à 3 dates d'apport

- * une date trop précoce par rapport aux besoins :
1er apport le 2 février. Stade 4 feuilles à 1 talle
2ème apport le 16 mars. Stade 1 à 2 talles
- * une date correspondant à la pratique conseillée :
1er apport le 1er mars. Stade 1 talle.
2ème apport le 1er avril. Stade épi 1 cm
- * une date présumée tardive :
1er apport le 16 mars.
2ème apport le 26 avril.

Chaque combinaison dose x date faisait l'objet d'une parcelle de 3 m de large x 27 m de long composée de 9 sous parcelles de 3 m x 3 m, permettant de réaliser 9 prélèvements (biomasse et analyse d'azote) entre le semis du blé et sa récolte.

3.2 – Analyses et mesures :

A chaque prélèvement, nous avons déterminé la biomasse des parties aériennes et la teneur en azote total. Le stade de développement a également été relevé. Les analyses ont été réalisées à la SADEF.

CHAPITRE V
RESULTATS – DISCUSSIONS

V – RESULTATS – DISCUSSIONS :

1 – Utilisation de l'azote de l'engrais par la culture et fournitures réelles du sol

1.1 – Quelques rappels sur les méthodes de calcul :

– le CRU est obtenu par la formule suivante :

$$\text{CRU} = \frac{(N_g \cdot E_g) + (N_p \cdot E_p)}{X \cdot E_x} \cdot 100 \cdot 1,25 \quad \text{blé}$$

$$\text{CRU} = \frac{(N_g \cdot E_g) + (N_p \cdot E_p)}{X \cdot E_x} \cdot 100 \cdot 1,11 \quad \text{maïs}$$

N_g = azote absorbé par le grain

E_g = excès isotopique du grain

N_p = azote absorbé par la paille ou les tiges de maïs

E_p = excès isotopique de la paille ou des tiges de maïs

X = azote apporté

E_x = excès isotopique de l'engrais

– Pour le blé, on utilise le coefficient 1,25 pour prendre en compte l'azote contenu dans le système racinaire. Des mesures effectuées par l'I.N.R.A. de LAON montrent que la proportion d'azote dans les racines est variable, mais dans la majorité des cas, elle se situe entre 20 et 25% de l'azote total. Nous avons retenu le chiffre de 20% pour deux raisons :

* c'est la valeur retenue pour le calcul des fournitures apparentes du sol

* cette valeur est cohérente avec celle proposée par COÏC en 1956 pour l'expression des besoins du blé : 2,4 Kg d'azote par quintal pour les parties aériennes et 0,6 Kg pour les racines.

– Pour le maïs, nous avons retenu le coefficient 1,11 qui correspond à 10 % de l'azote total dans les racines (c'est la valeur retenue par l'AGPM).

– L'azote absorbé provenant de l'engrais : N_{dff}

$$N_{dff} = \frac{\text{CRU} \cdot X}{100}$$

– L'azote absorbé provenant du sol : N_{dfs}

$$N_{dfs} = N_{PE} - N_{dff}$$

N_{PE} = azote absorbé par la plante entière

$$N_{PE} = 1,25 N_{pa} \text{ et } N_{pa} = N_g + N_p$$

1.2 – Variation de Ndfs :

1.2.1 – Effets du type de sol :

– Pour le blé, les valeurs moyennes observées (tableau n° 2) sur les 2 années sont relativement variables en fonction des situations (de 46 Kg ha⁻¹ à **SEICH Haut** en 1993 à 143 Kg ha⁻¹ à **MAN Bas** en 1993) compte tenu des systèmes de cultures pratiqués, à peu de chose près équivalents dans tous les essais, on peut considérer que le facteur le plus important pour expliquer la variation de ce poste est le type de sol. Les essais **LET**, **SEICH** et **MAN** illustrent bien ce phénomène puisqu'à chaque fois deux essais sont implantés dans la même parcelle (haut et bas) sur des types de sol choisis volontairement différents, alors que les systèmes de cultures et les conditions climatiques sont rigoureusement identiques.

– Pour le maïs, on observe le même phénomène (tableau n°4)(de 85 kg.ha⁻¹ à **NOV 93** à environ 180 kg.ha⁻¹ à **LOIS 92** et **DOM 92**). Là encore, l'importance du type de sol est illustrée par les résultats de **BOUZ haut 92** et **BOUZ bas 92** issus de la même parcelle.

1.2.2– Effet de la dose apportée :

– Pour le blé, à l'exception des essais **SEICH Bas** et **LET Haut**, pour lesquels nous ne disposons que de 2 mesures fiables, on peut remarquer que le poste Ndfs est pratiquement indépendant de la dose et ce pour une large gamme de doses apportées (50 à 220 kg.ha⁻¹ sur les essais de 1993) (graphiques n° 4 et 5, tableau n° 1).

– Pour le maïs, les résultats sont identiques surtout en 1993, année pour laquelle la gamme de variation des doses apportées varie de 20 à 210 kg.ha⁻¹. On note toutefois plus d'irrégularité sur les essais de 1992, sans qu'une tendance se dégage (augmentation ou diminution) en fonction de la dose.) (graphiques n° 8 et 9, tableau n° 3).

1.3 – Variation de Ndff :

A l'exception de l'essai blé **CREZ 93** et de l'essai maïs **BOUZ bas 92** pour lesquels les valeurs de Ndff plafonnent respectivement à la dose 160 et 65, il existe une bonne relation entre Ndff et la dose apportée.

Pour les essais de 1993, qu'il s'agisse du blé ou du maïs, la large gamme de situations testées, ainsi que la valeur de l'ordonnée à l'origine proche de 0, (b dans les tableaux n° 2 et n° 4) permet de bien confirmer cette tendance et autorise à extrapoler la relation jusqu'à la dose 0 (graphiques n° 7 et n° 11).

Pour les essais maïs de 1992, on peut faire le même constat, même si la gamme de variation des doses testées reste faible (40 kg.ha^{-1}), car les doses les plus faibles sont assez proches de 0 (45 à 70 kg.ha^{-1}) (tableau n° 4 et graphique n°10).

En revanche, pour les essais blé de 1992, la faible gamme de variation (60 Kg ha^{-1}), le nombre restreint de mesures (2 ou 3 selon les essais) et le manque de mesures entre 0 et la dose la plus faible (120 à 175 Kg ha^{-1} selon les essais) ne permettent pas cette extrapolation (tableau n° 2 et graphique n° 6).

1.4 – Discussions :

1.4.1 – A propos des fournitures en azote du sol Ndfs :

Les résultats acquis sont tout à fait cohérents avec ceux obtenus par l'I.N.R.A. et l'I.T.C.F. (RECOUS 1983, MACHET et al, 1987), à savoir que la contribution du sol à la fourniture en azote est constante quelle que soit la dose apportée. Cet aspect est important pour deux raisons :

– si, dans une situation donnée, on envisage pour des raisons diverses de moduler la dose à apporter (doses faibles en conduite extensive ou doses supra-optimales dans le cas où on recherche de fortes teneurs en protéines par exemple), le seul poste de l'écriture du bilan sur lequel on devra jouer est le poste **bY**.

– les valeurs de Ndfs et de Ns sont, on l'a déjà signalé, souvent différentes. Nos essais confirment ce fait (tableaux n° 2 et n° 4). L'écart entre ces 2 valeurs pour une situation donnée, est donc constant puisque Ns est une valeur unique et Ndfs n'est pas contingent de la dose apportée. Cela justifie donc que la valeur Ns puisse être utilisée dans l'écriture simplifiée du bilan que nous proposons, quelle que soit la dose à apporter.

1.4.2 – A propos de l'azote absorbé provenant de l'engrais Ndff :

De même que pour les fournitures du sol, nos résultats confirment ceux déjà acquis, à savoir que l'absorption de l'azote de l'engrais est la plupart du temps proportionnelle à la dose apportée et reliée à celle-ci de façon linéaire.

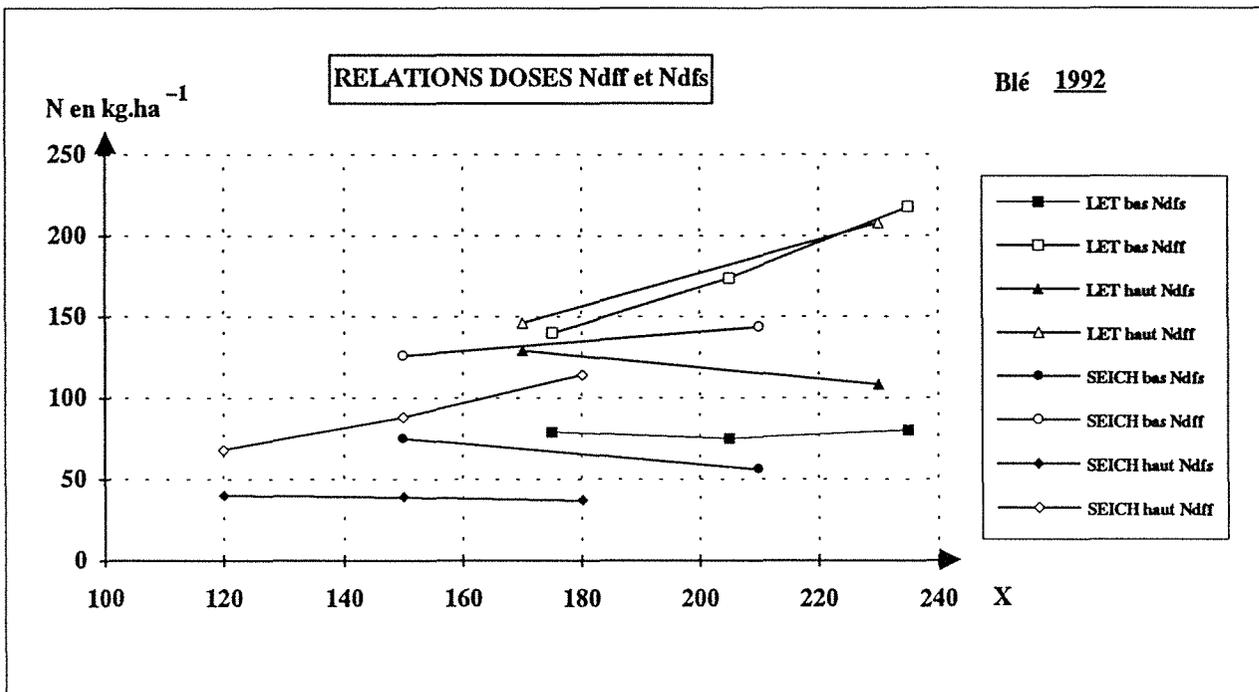
Conséquence de ce constat :

le coefficient réel d'utilisation (CRU) de l'azote de l'engrais, $\frac{N_{dff}}{X}$, est constant quelque soit la dose.

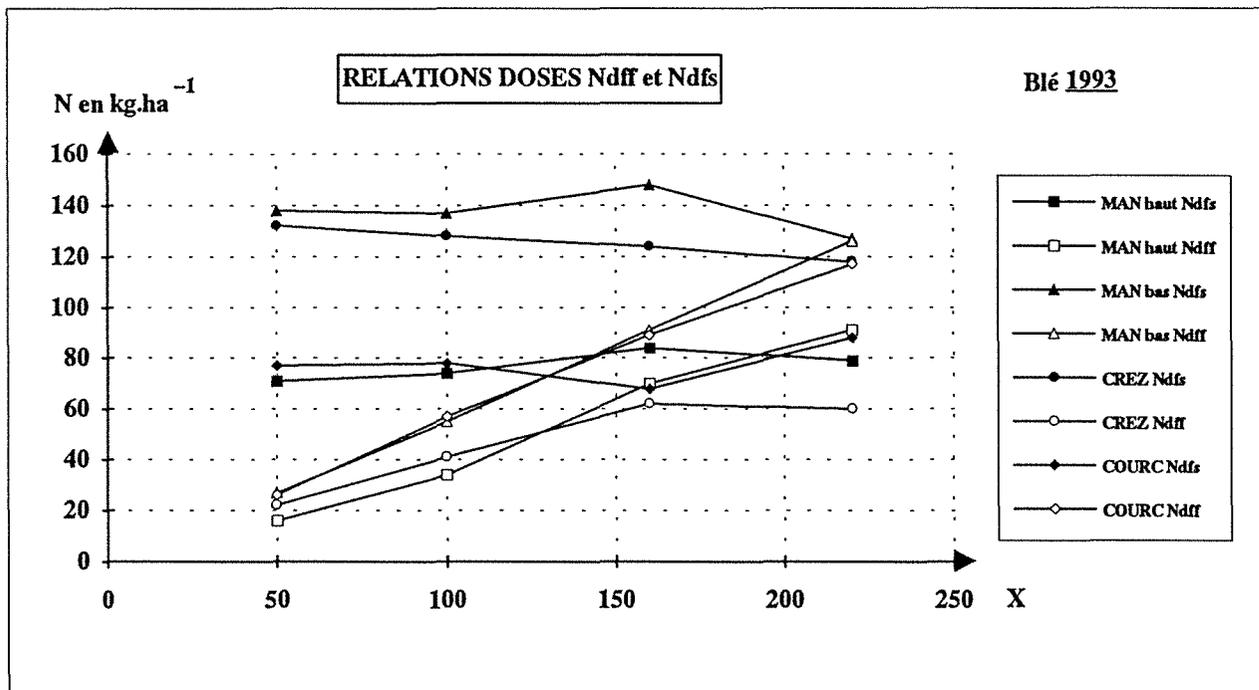
Les quantités totales d'azote absorbées par la plante $N_{pe} = N_{dff} + N_{dfs}$ sont également reliées à la dose de façon linéaire (graphiques n° 6, n° 7, n° 10 et n° 11) et, puisque la valeur N_s est constante, le rapport $\frac{N_{PE} - N_s}{X} = \frac{N_f}{X}$ est également constant.

1.5 – Conclusions partielles :

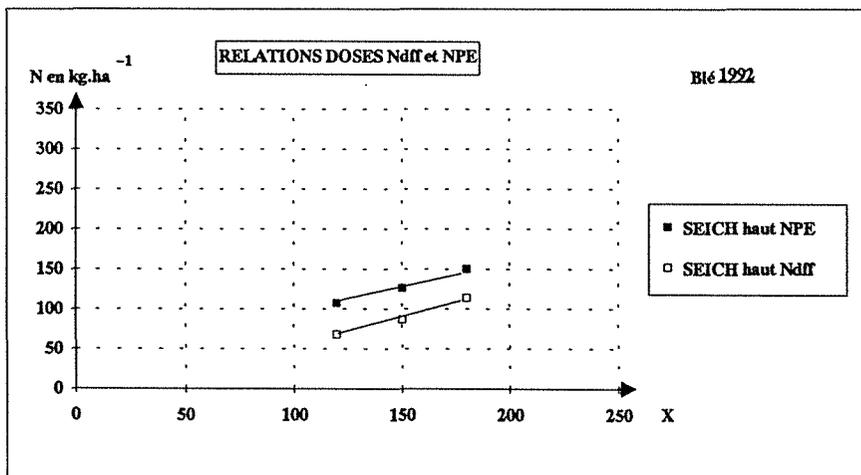
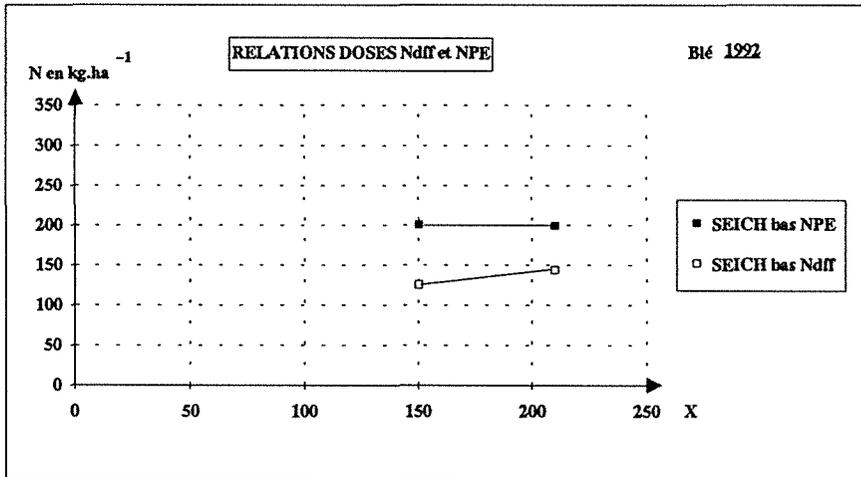
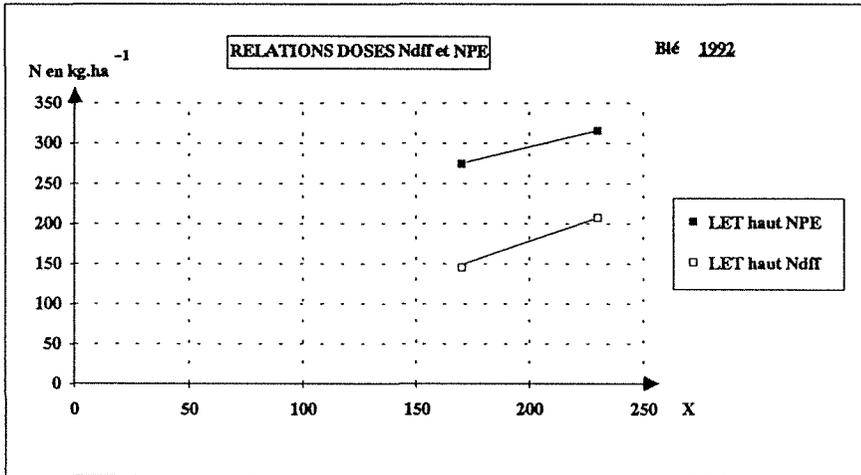
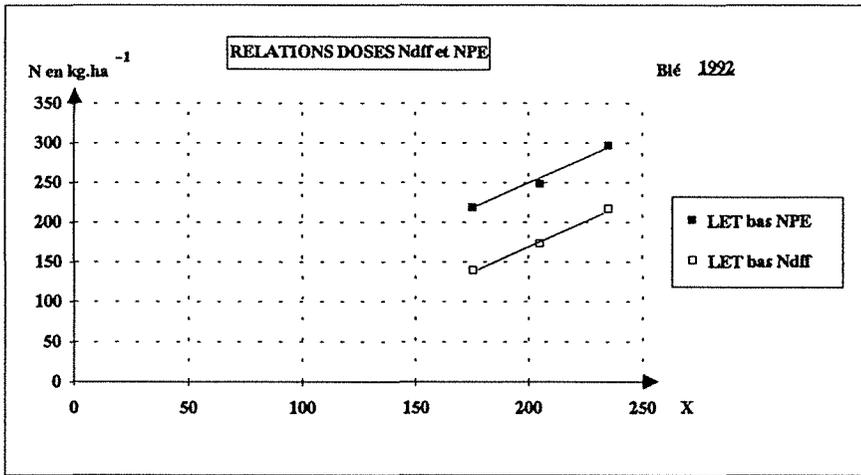
Les études conduites au champ avec l'azote 15, ont permis de mettre en évidence des niveaux de CRU et de fournitures réelles du sol très différentes selon les situations. Il faudrait pour tenter d'expliquer ces différences disposer de mesures plus fines telles que la biomasse microbienne du sol, les quantités d'azote organisé, des mesures sur les pertes par lixiviation et volatilisation. Ce n'était pas le but de ces essais. Toutefois les résultats, en confirmant ceux déjà acquis dans ce domaine, permettent de justifier l'écriture du bilan simplifié telle que nous la proposons, en particulier par l'utilisation de la valeur N_s et d'une valeur du CAU indépendante de la dose. Il reste maintenant à étudier les conditions de variations de ce CAU.

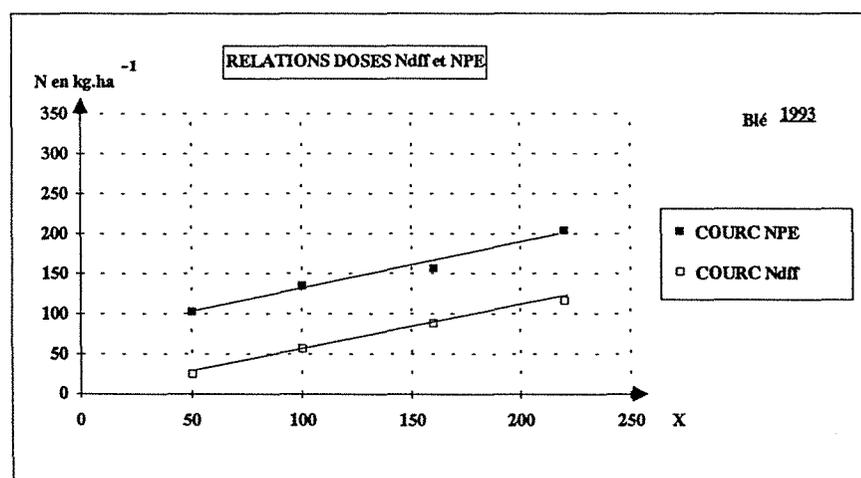
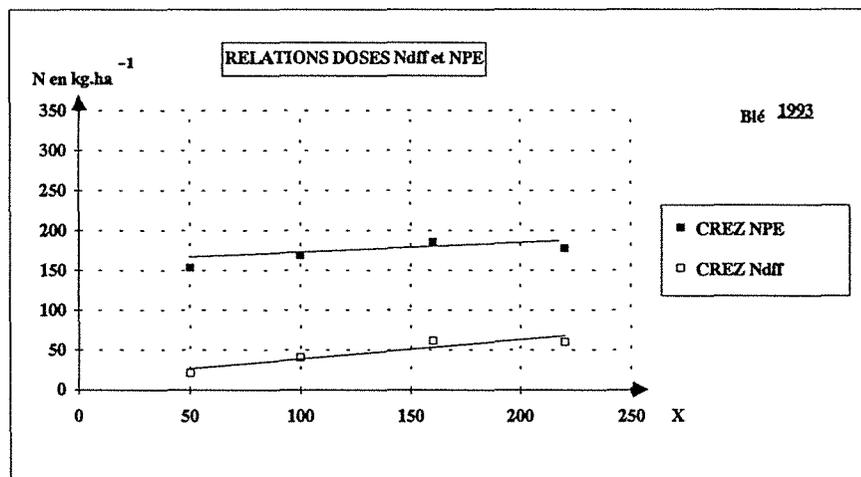
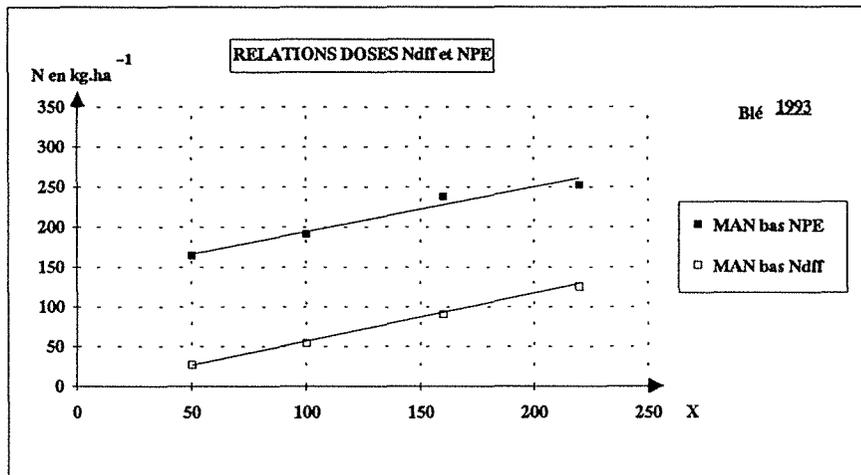
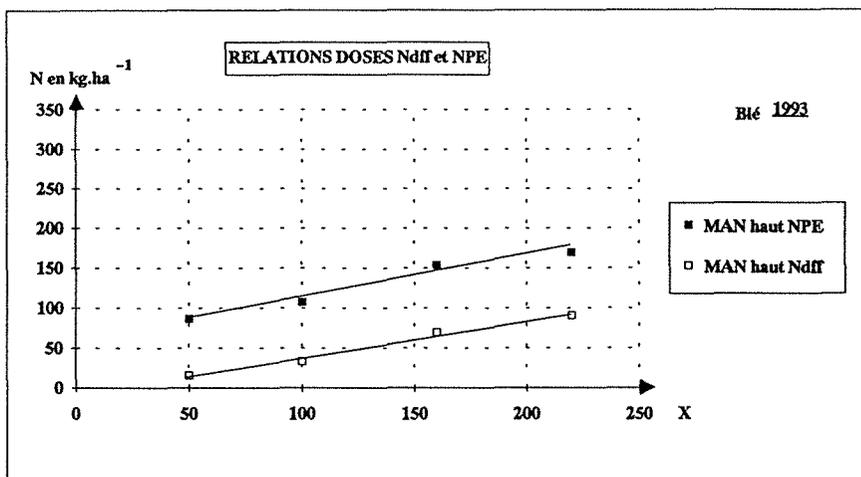


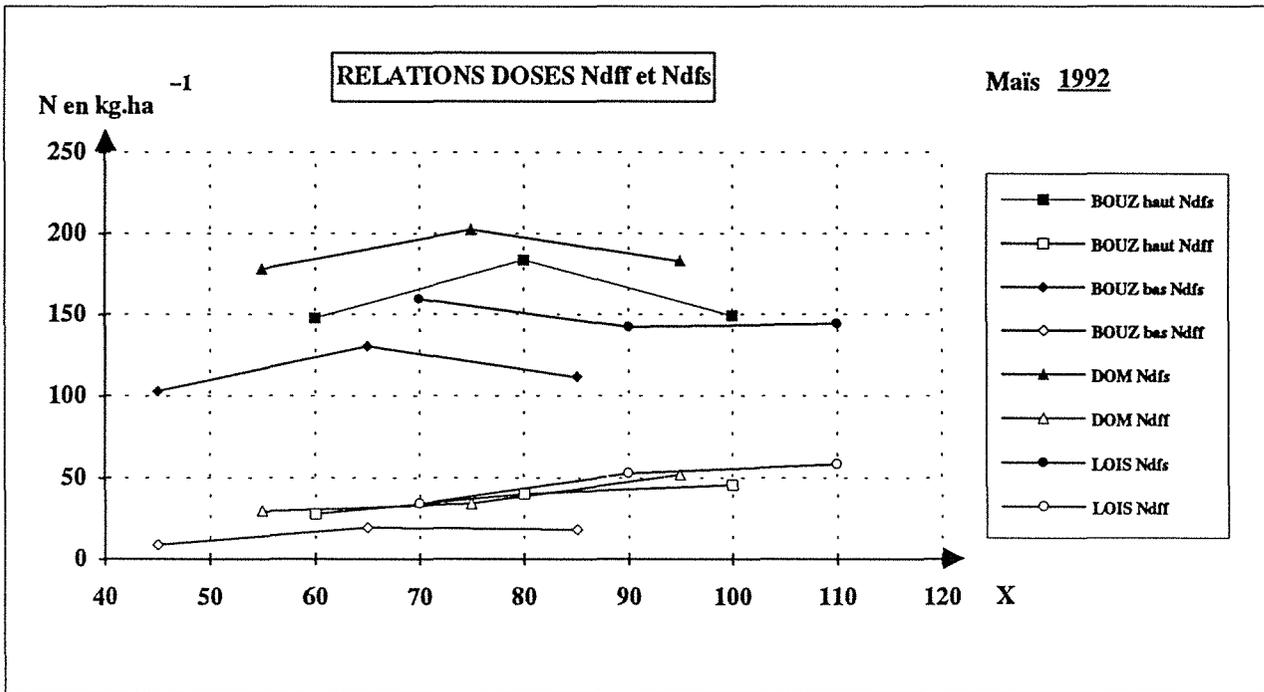
GRAPHIQUE N° 4



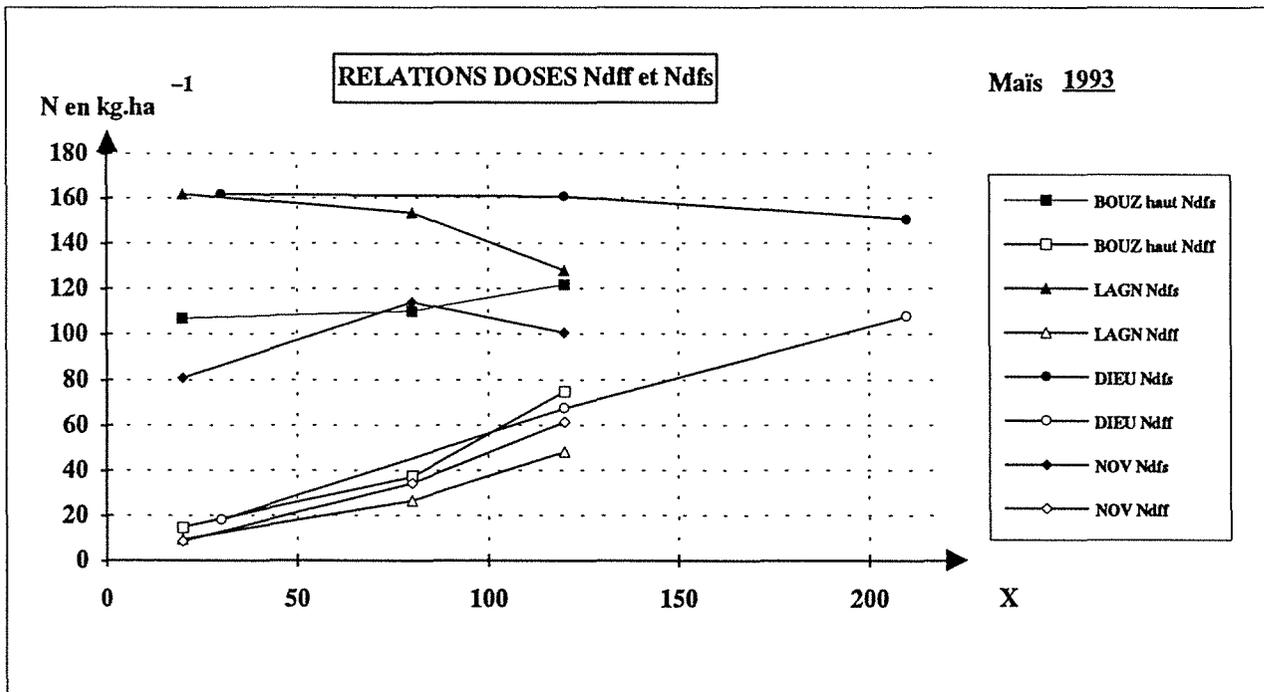
GRAPHIQUE N° 5



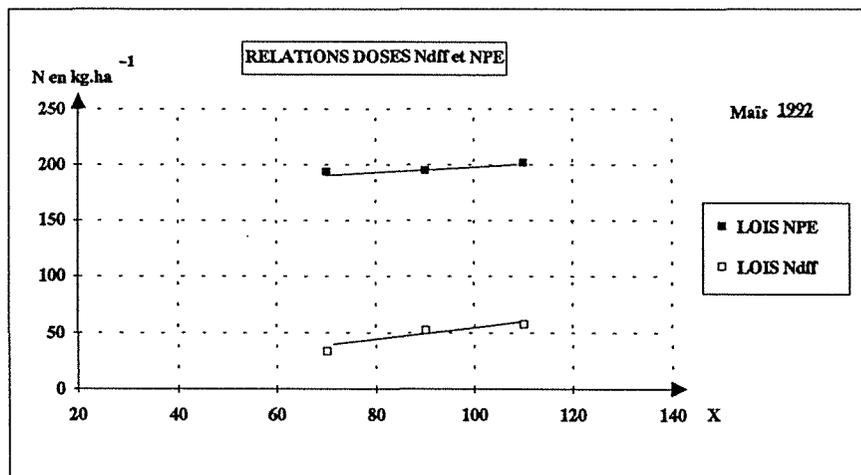
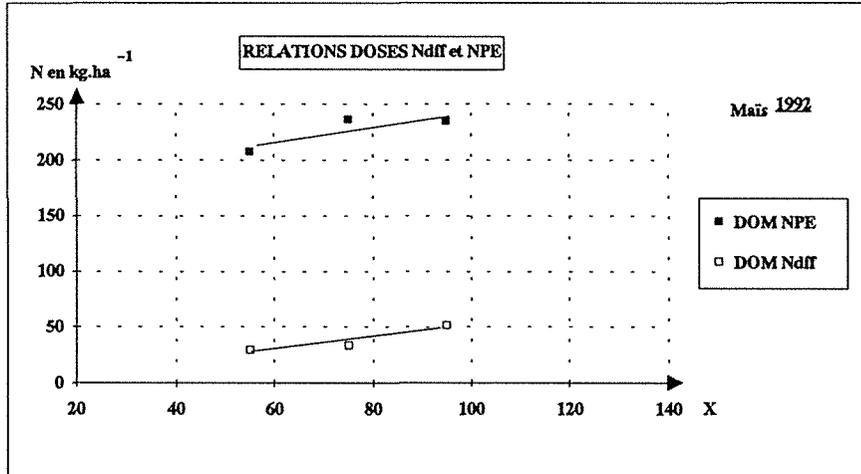
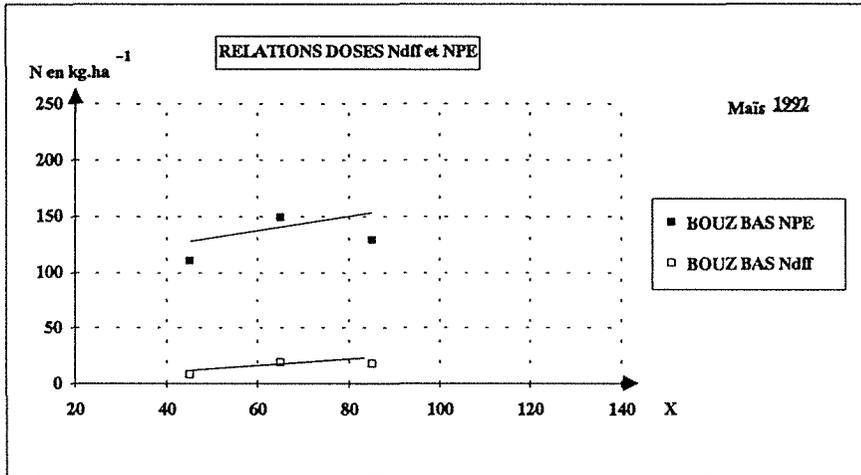
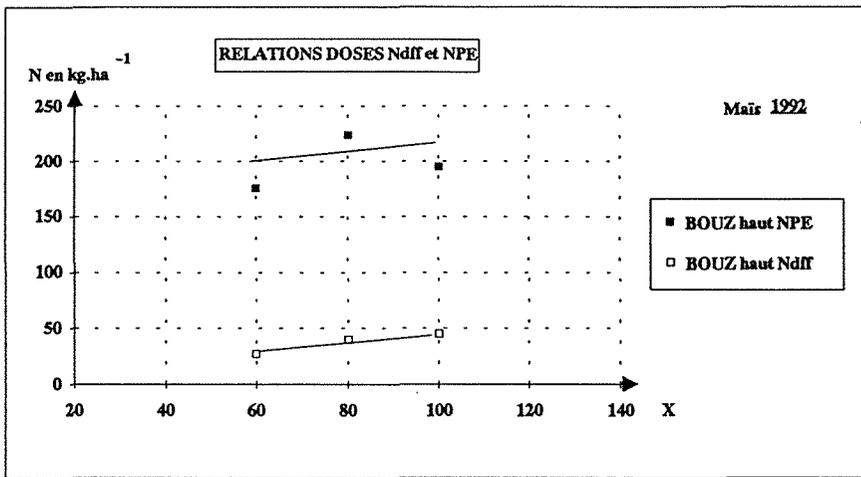




GRAPHIQUE N° 8



GRAPHIQUE N° 9



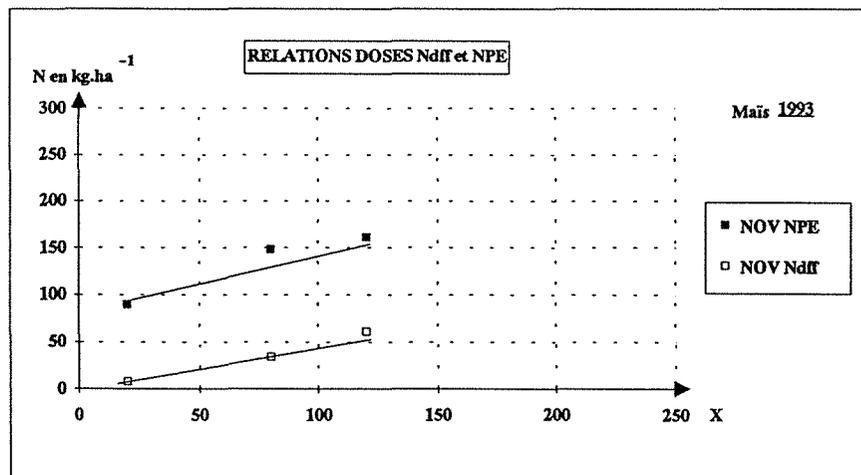
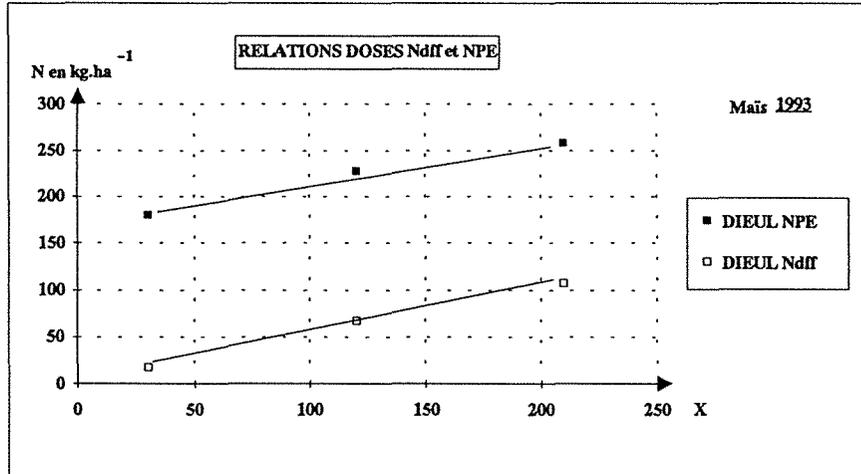
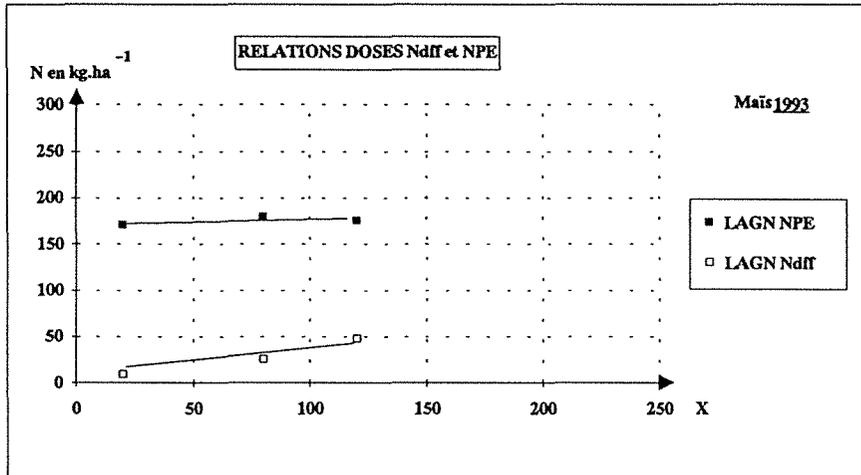
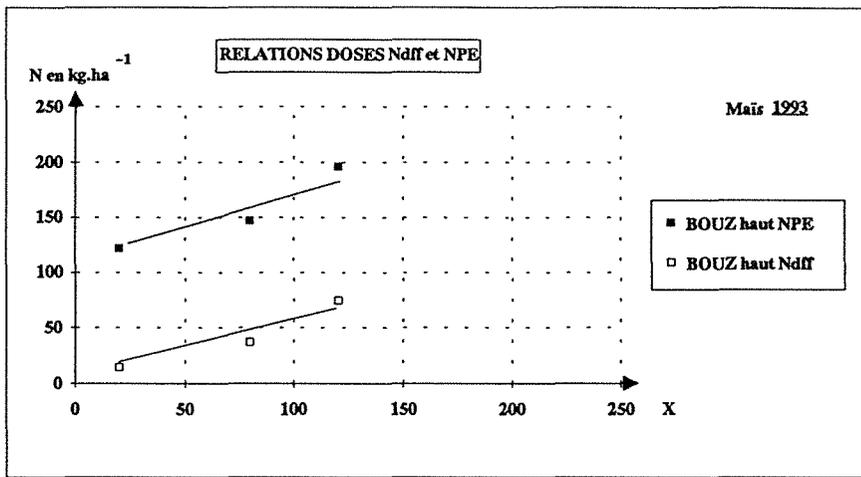


TABLEAU N°1 :

**Récapitulatif des valeurs de Ndff, Ndfs, C R U, CAU
et Npe mesurées sur les essais Blé**

ESSAI	ANNEE	TYPE DE SOL	Ndff	Ndfs	N _{PE}	CRU	CAU	DOSE
LET Bas	1992	Argile	140	79	219	80	66	175
			174	75	249	85	71	205
			218	80	298	93	83	235
LET Haut	1992	Limon	146	129	275	86	89	170
			208	108	316	90	90	230
SEICH bas	1992	Argile / Calcaire	126	75	201	84	87	150
			144	56	200	69	59	210
SEICH Haut	1992	Argilo Calcaire	68	40	108	57	44	120
			88	39	127	59	47	150
			114	37	151	63	53	180
MAN Haut	1993	Argilo Calcaire	16	71	87	32	64	50
			34	74	108	34	52	100
			70	84	154	44	61	160
			91	79	170	41	52	220
MAN Bas	1993	Argile / Calcaire	27	138	164	54	95	50
			55	137	192	56	75	100
			91	148	239	57	77	160
			126	127	253	57	62	220
CREZ	1993	Argile	22	132	154	44	13	50
			41	128	169	41	21	100
			62	124	186	41	24	160
			60	118	178	27	14	220
COURC	1993	Limon	26	77	103	52	52	50
			57	78	135	57	58	100
			89	68	157	56	50	160
			117	88	205	53	58	220

TABLEAU N° 2 :

Valeur des coefficients a et b pour les régressions calculées entre Npe et N apporté, Ndff et N apporté (relation de la forme $y = ax + b$). Valeur calculée de Ndffs et valeur Ns observée . Résultats sur blé.

Essais	Nb de mesures	Y	a	b	r ²	Ndffs	Ns
LET Bas 1992	3	Npe	1,31	- 14,6	0,98	74,6	102,9
		Ndff	1,30	- 89,2	0,99		
LET Haut 1992	2	Npe	0,68	159,6		130,5	123,3
		Ndff	1,03	- 29,1			
SEICH Haut 1992	3	Npe	0,716	21,2	0,99	46,2	55,4
		Ndff	0,766	- 25	0,99		
SEICH Bas 1992	2	Npe	0	200		119	70
		Ndff	0,03	81			
MAN Haut 1993	4	Npe	0,502	63,9	0,96	71,9	55,1
		Ndff	0,458	- 8	0,99		
MAN Bas 1993	4	Npe	0,542	140,6	0,96	142,8	116,6
		Ndff	0,582	- 2,2	0,99		
CREZ 1993	4	Npe	0,159	151,5	0,60	136,1	147,6
		Ndff	0,240	15,4	0,79		
COURC 1993	4	Npe	0,575	73,7	0,98	72,2	77,2
		Ndff	0,533	1,5	0,99		

TABLEAU N° 3 :

**Récapitulatif des valeurs de Ndff, Ndfs, C R U, CAU
et Npe mesurées sur les essais Maïs**

ESSAIS	ANNEE	TYPE DE SOL	Ndff	Ndfs	Npe	CRU	CAU	DOSE
BOUZ Haut	1992	Limon sur Argile	27,60	147,9	175,5	46,0	104,0	60
			40,00	183,9	223,9	50,0	138,0	80
			45,60	149,3	194,9	45,6	81,8	100
BOUZ Bas	1992	Argile lourde	8,6	102,8	111,4	19,1	/	45
			19,5	130,3	149,8	30,0		65
			18,2	111,5	129,7	21,4		85
DOMM	1992	Sable profond d'alluvions	29,4	178,2	207,6	53,4	/	55
			33,9	202,5	236,4	45,2		75
			52,0	183,2	235,2	54,7		95
LOIS	1992	Argilo calcaire superficiel	34,1	159,6	193,7	48,7	98,4	70
			52,7	142,3	195,0	58,5	78,0	90
			58,3	144,1	202,4	53,0	70,5	110
BOUZ Haut	1993	Limon sur Argile	14,7	107,1	121,8	73,3	141,5	20
			37,2	110,1	147,3	46,5	67,3	80
			74,7	121,7	196,4	53,4	73,5	140
LAGN	1993	Argile sur Marnes	9,5	161,8	171,3	47,3	69,5	20
			26,4	153,4	179,8	32,9	27,9	80
			48,2	128,0	176,2	34,4	15,7	140
DIEUL	1993	Sable profond d'alluvions	18,1	161,8	179,9	60,3	92,7	30
			67,3	160,7	228,0	56,2	64,6	120
			107,7	150,5	258,2	53,3	51,3	210
NOV	1993	Argilo calcaire superficiel	8,6	80,7	89,3	42,8	23,7	20
			34,3	114,2	148,5	42,9	80,0	80
			61,2	100,6	161,8	43,7	55,3	140

TABLEAU N° 4 :

Valeur des coefficients a et b pour les régressions calculées entre Npe et N apporté, Ndff et N apporté (relation de la forme $y = ax + b$). Valeurs calculées de Ndfs et valeur Ns observée : Résultats sur maïs fourrage.

Essais	Nb de mesures	Y	a	b	r ²	Ndfs	Ns
BOUZ Haut 92	3	Npe	0,485	159,3	0,158		
		Ndff	0,450	1,73	0,954	157,6	113,1
BOUZ Bas 92	3	Npe	0,457	100,6	0,226		
		Ndff	0,240	-0,17	0,650	100,8	102,5
DOMM 92	3	Npe	0,690	174,6	0,717		
		Ndff	0,565	-3,94	0,892	178,5	183,7
LOIS 92	3	Npe	0,217	177,5	0,859		
		Ndff	0,605	-6,08	0,912	183,6	124,8
BOUZ Haut 93	3	Npe	0,622	105,4	0,967		
		Ndff	0,500	2,17	0,979	103,2	93,5
LAGN 93	3	Npe	0,041	172,29	0,379		
		Ndff	0,322	2,19	0,990	170,1	157,4
DIEUL 93	3	Npe	0,435	169,81	0,982		
		Ndff	0,497	4,64	0,996	165,2	150,5
NOV 93	3	Npe	0,605	84,8	0,882		
		Ndff	0,439	-0,41	0,999	85,2	84,5

2 – Cinétique d'absorption de l'azote, CAU et temps de présence de l'engrais dans le sol :

Cet aspect a été étudié à partir des résultats de l'essai dose x date implanté à Rosière en Haye. Les 9 prélèvements effectués entre le semis et la récolte, sur les 10 traitements (témoin 0 azote et 3 doses x 3 dates) ont permis de représenter les cinétiques d'absorption de l'azote en fonction du temps (il s'agit des quantités d'azote absorbées par la plante entière, N_{pe}, calculées à partir de l'azote absorbé par les parties aériennes N_{pa} x 1,25).

2.1 – Modèle d'ajustement retenu :

La cinétique d'absorption de l'azote ou d'accumulation de la matière sèche est généralement bien représentée (WHITMORE et ADDISCOTT, 1987) par des fonctions de type sigmoïde : une première partie de la courbe est de forme exponentielle, elle correspond à une augmentation constante de la vitesse d'absorption (s'il s'agit d'azote absorbé) ou d'accumulation de la matière sèche, la deuxième partie de la courbe correspondant à une diminution de cette vitesse, le point d'inflexion de cette courbe correspondant à la vitesse maximale, ou encore le moment où l'accélération devient nulle.

Parmi les 3 modèles proposés par STATITCF en régression non linéaire pour rendre compte de ces phénomènes, nous avons retenu le modèle logistique :

$$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$$

$$y = N_{PE} \text{ ou } Ms$$

x = temps exprimé en somme de température en base 0 pour le blé

a = asymptote de la courbe ou valeur maximale de N_{pe} ou Ms

b = constante

c = vitesse de croissance ou d'absorption

Les différents calculs réalisés à partir de cette fonction (primitive, dérivée première, dérivée seconde) sont présentés en annexe n° 6, les valeurs des coefficients a, b et c faisant l'objet de l'annexe n° 7.

2.2 – Les quantités d'azote absorbé :

2.2.1 – Présentation graphique des résultats

Pour chacun des traitements, nous avons représenté l'évolution de l'azote absorbé en fonction du temps par rapport au témoin non fertilisé. On peut ainsi juger de l'effet de la dose pour une même date d'apport en regardant les graphiques dans le sens des colonnes, ou de l'effet de la date d'apport pour une même dose en regardant les graphiques dans le sens des lignes.

Plan de lecture des graphiques

Date 1 Dose 1	Date 2 Dose 1	Date 3 Dose 1
Date 1 Dose 2	Date 2 Dose 2	Date 3 Dose 2
Date 1 Dose 3	Date 2 Dose 3	Date 3 Dose 3

2.2.2 – Commentaires :

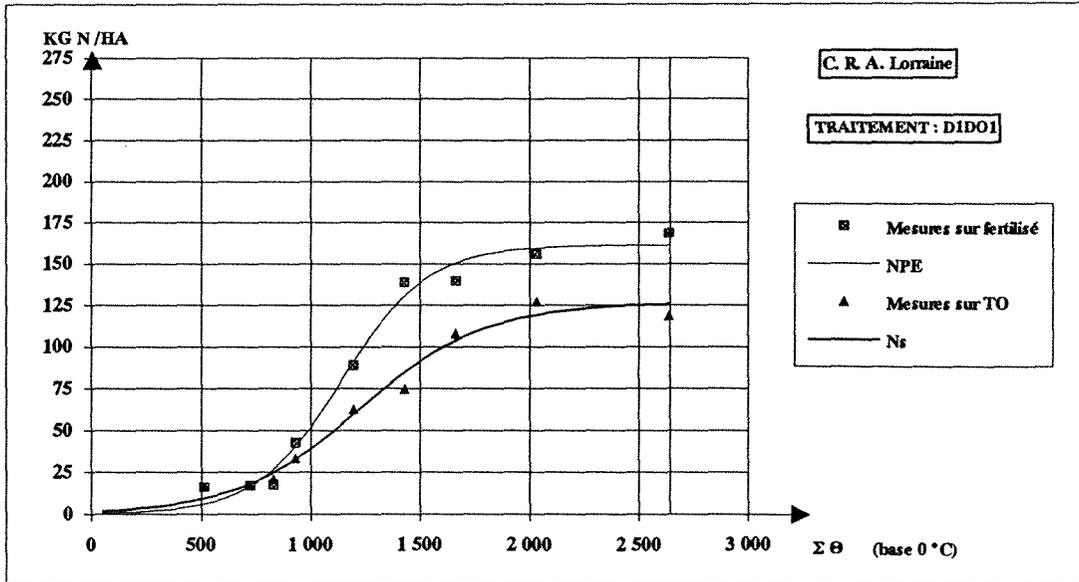
L'examen des graphiques n° 12 à 20 nous montre que :

– pour une même date d'apport, les quantités maximales absorbées augmentent avec la dose apportée ainsi que les quantités provenant apparemment de l'engrais (différence entre les 2 asymptotes).

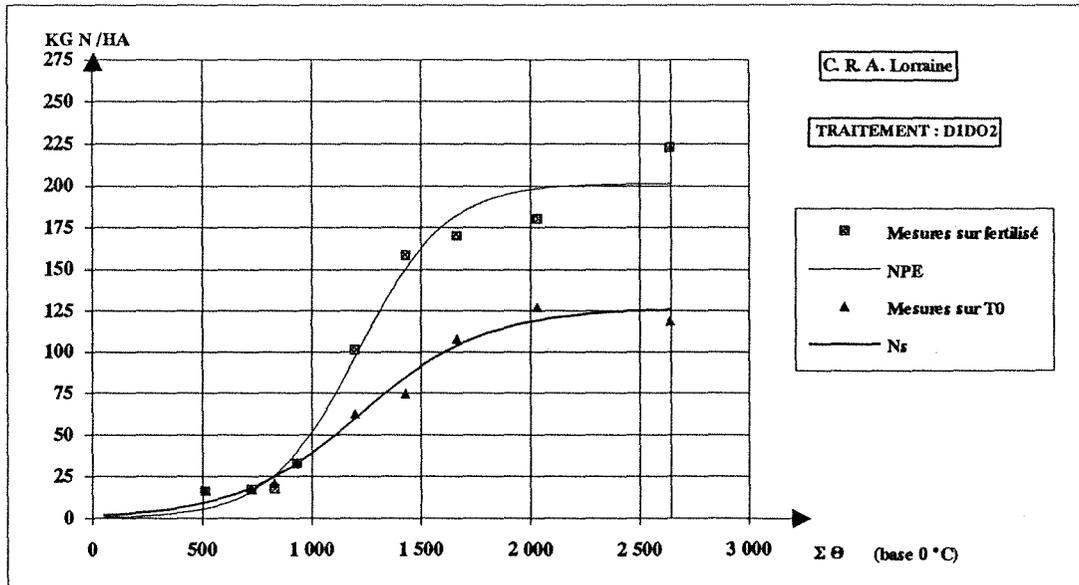
– pour une même dose apportée, les quantités maximales absorbées augmentent quand la date d'apport est plus tardive, de même que les quantités provenant apparemment de l'engrais.

Les résultats chiffrés de ces valeurs sont consignés dans le tableau n° 5

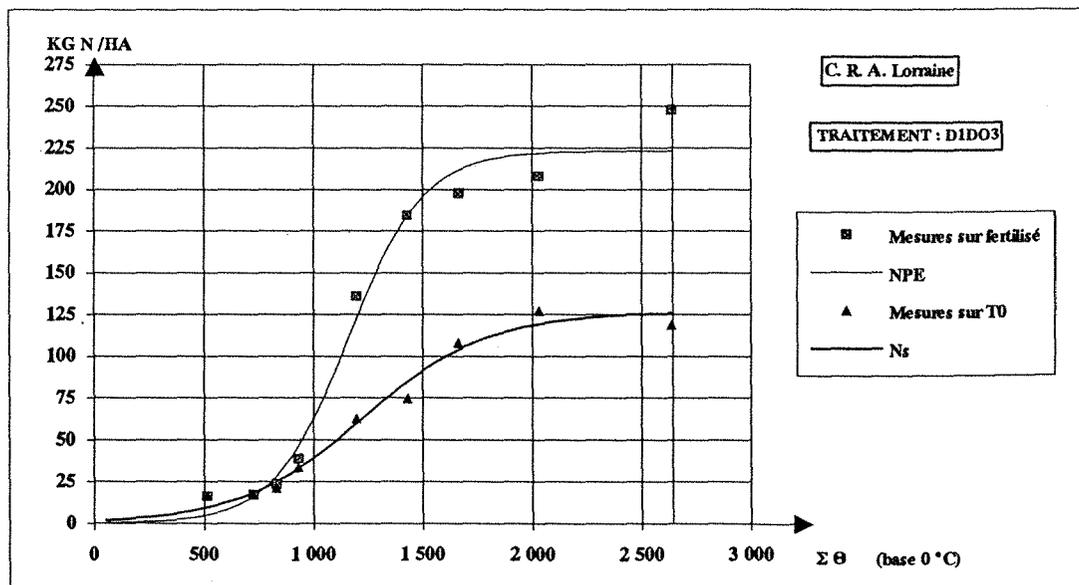
EVOLUTION DES QUANTITES D'AZOTE DANS LA PLANTE FERTILISEE (NPE)
ET NON FERTILISEE (Ns) EN FONCTION DES SOMMES DE TEMPERATURES



GRAPHIQUE N° 12

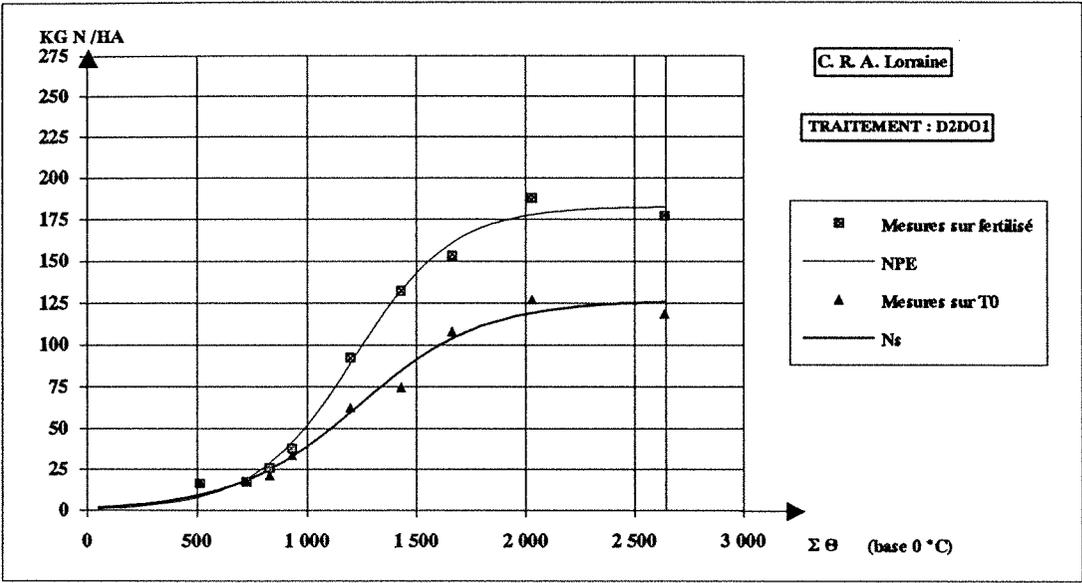


GRAPHIQUE N° 13

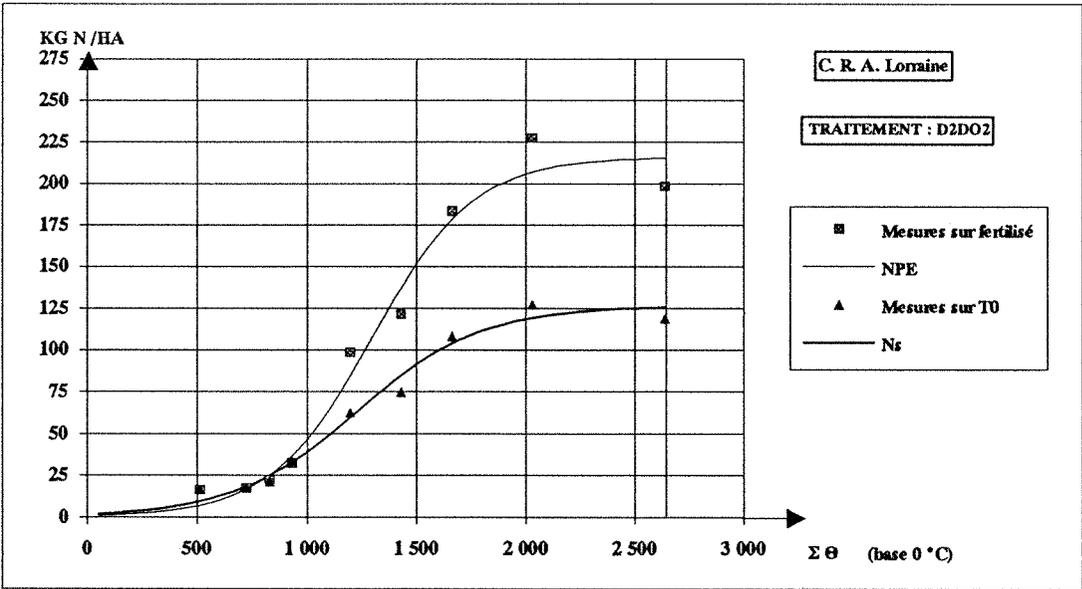


GRAPHIQUE N° 14

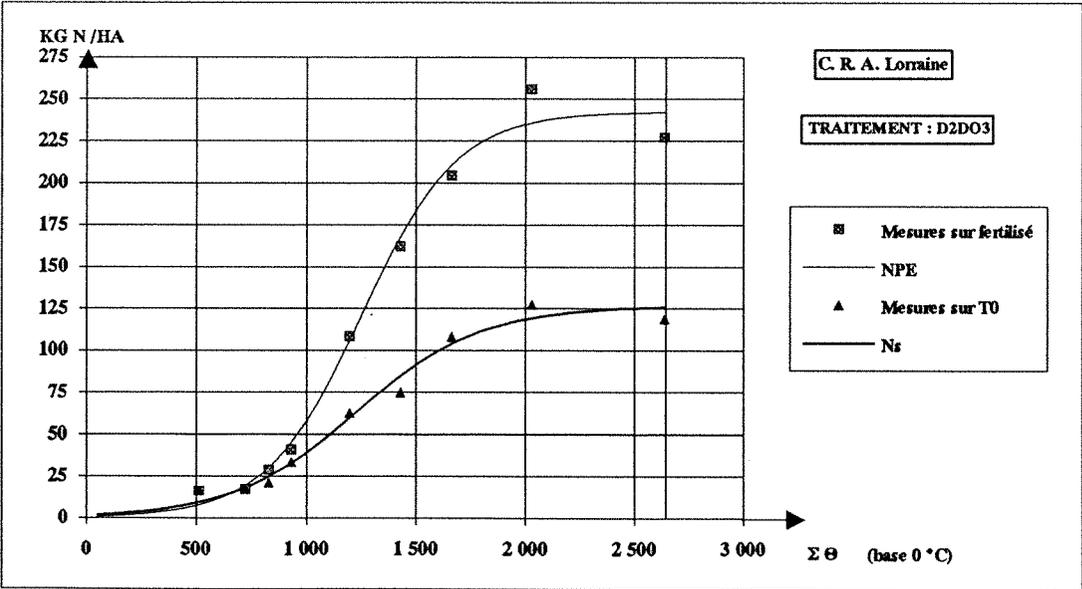
**EVOLUTION DES QUANTITES D'AZOTE DANS LA PLANTE FERTILISEE (NPE)
ET NON FERTILISEE (Ns) EN FONCTION DES SOMMES DE TEMPERATURES**



GRAPHIQUE N° 15

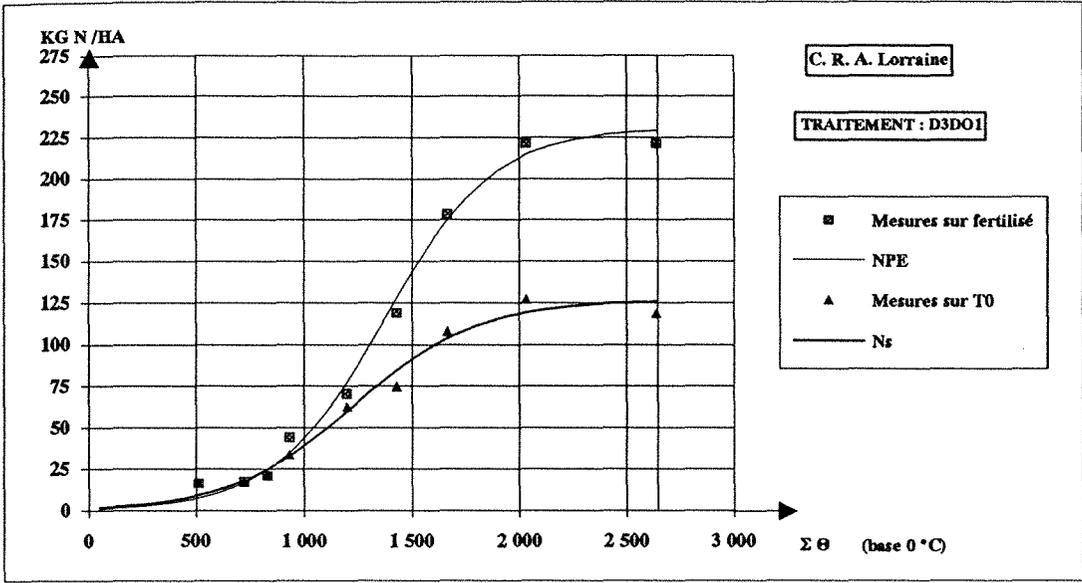


GRAPHIQUE N° 16

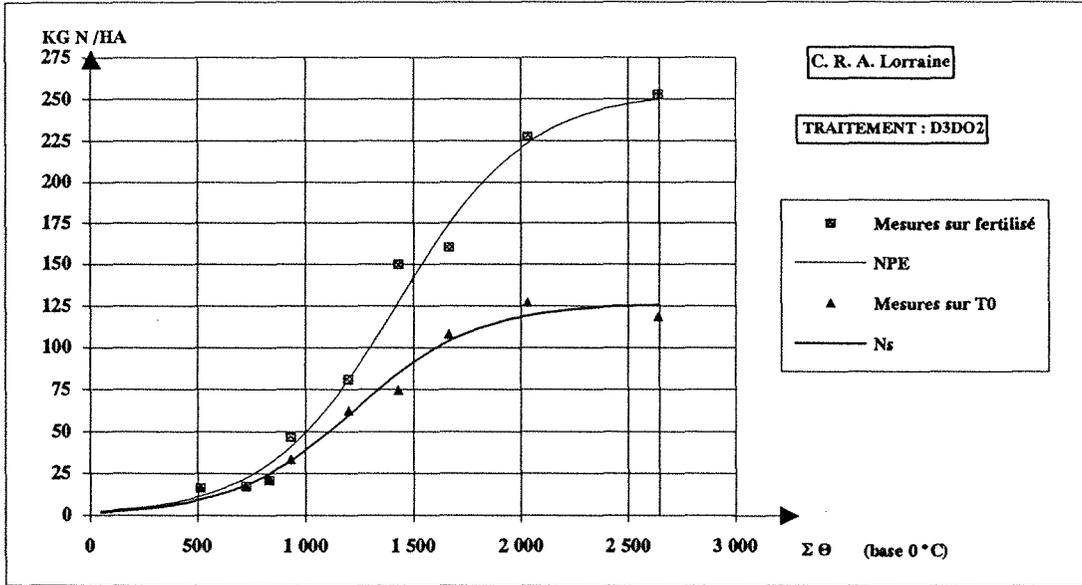


GRAPHIQUE N° 17

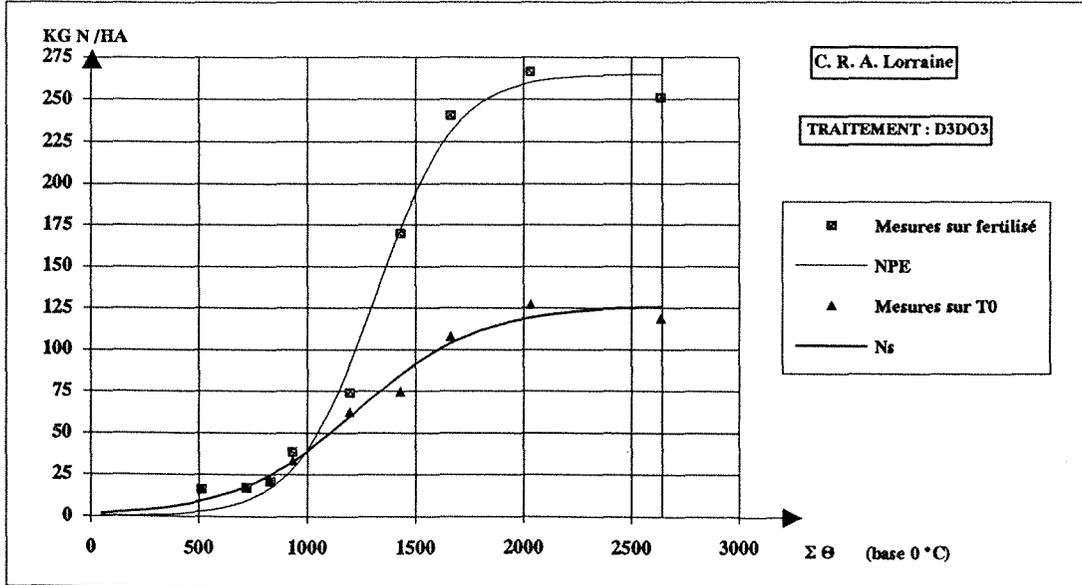
**EVOLUTION DES QUANTITES D'AZOTE DANS LA PLANTE FERTILISEE (NPE)
ET NON FERTILISEE (Ns) EN FONCTION DES SOMMES DE TEMPERATURES**



GRAPHIQUE N° 18



GRAPHIQUE N° 19

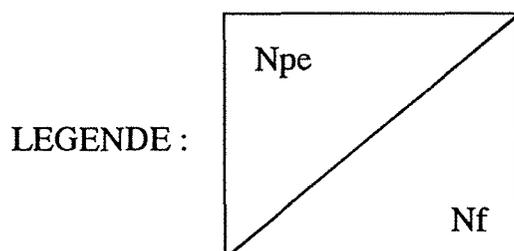


GRAPHIQUE N° 20

TABLEAU N° 5

Quantité totale d'azote absorbé (N_{PE}) et quantité provenant apparemment de l'engrais (N_f), à la récolte pour 9 traitements ($Kg\ ha^{-1}$)

DOSES	Dose 1 20 + 80	Dose 2 40 + 130	Dose 3 80 + 140
DATE 1			
N_1 le 2 février	161	202	233
N_2 le 16 Mars	42	78	105
DATE 2			
N_1 le 1er mars	183	216	242
N_2 le 1er avril	58	90	116
DATE 3			
N_1 le 16 mars	231	256	265
N_2 le 26 avril	102	127	141



2.3 – Valeur des CAU observés en fonction des différents traitements

2.3.1 – Présentation graphique des résultats :

Nous avons représenté l'évolution simultanée dans le temps des postes N_f (azote absorbé par la plante provenant apparemment de l'engrais et X (quantités d'azote apportées)).

– la disponibilité en azote de l'engrais (courbe Nd) est représentée par une fonction de la forme $y = b$ avec une discontinuité consécutive au 2ème apport d'azote – le 1er tronçon représente la valeur du 1er apport pendant la durée qui sépare le 1er du 2ème apport, le second tronçon représentant la valeur de la dose totale pendant la durée qui sépare le 2ème apport de la récolte.

– la valeur Nf (courbe Nf) est représentée par l'ajustement à un modèle logistique de l'évolution des différences entre N_{PE} et N_s soit Nf en fonction du temps, l'origine du temps prise en compte étant la date du 1er apport (les valeurs des coefficients a, b et c pour les différents traitements sont présentées en annexe n° 7).

De plus, on peut faire apparaître sur ces graphiques la valeur Nf à la récolte, la valeur X (dose totale apportée), le CAU à la récolte étant représenté par le rapport de ces 2 valeurs, soit : $\frac{Nf}{X}$

(Exemple de représentation : graphique n° 21)

Les résultats pour les 9 traitements sont représentés sur les graphiques n° 22 à 30 (même plan de lecture que pour les graphiques précédents).

2.3.2 – Commentaires :

Les CAU observés sur les 9 traitements varient considérablement (42% à 102%). L'examen des différentes modalités permet de mettre en évidence un effet de la date d'apport.

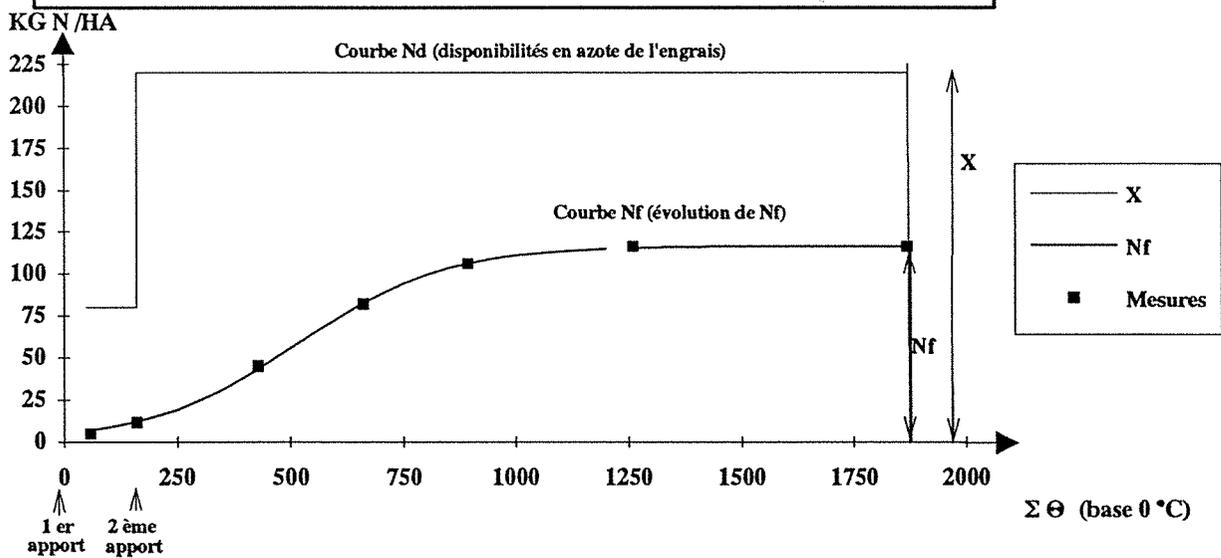
Le tableau n° 6 montre l'évolution des CAU en fonction de la date : en moyenne (toutes doses confondues), de 45% pour la 1ère date, on passe à 55% pour la 2ème date et à 80% pour la 3ème date.

Toutefois ces moyennes par date cachent des différences entre doses :

– le CAU de la dose faible est le plus faible pour la 1ère date mais le plus élevé pour la 3ème date.

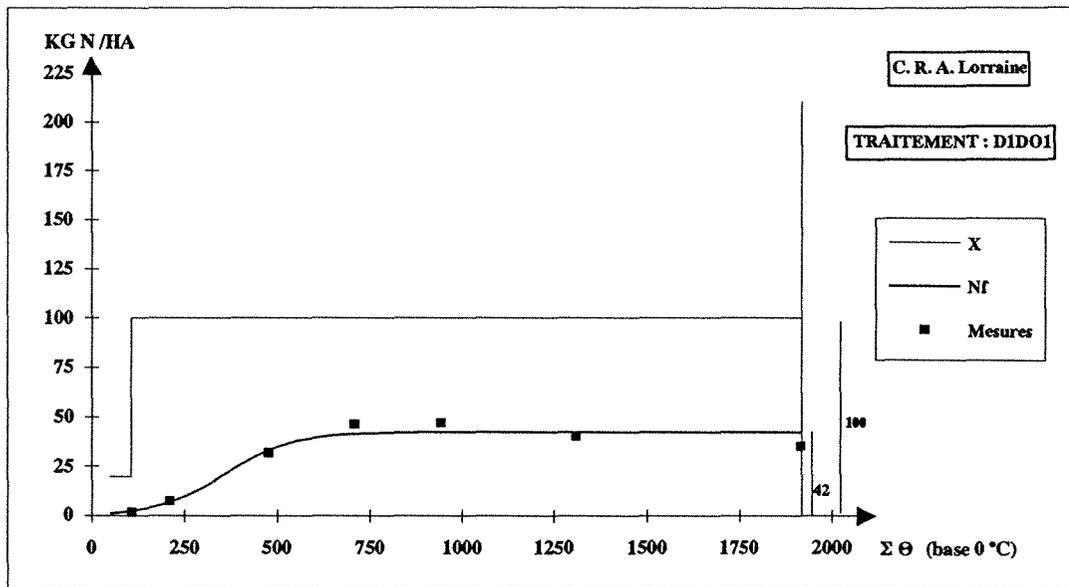
– inversement le CAU de la dose forte est le plus fort pour la 1ère date et le plus faible pour la 3ème date.

EXEMPLE D'EVOLUTION DES QUANTITES D'AZOTE DANS LA PLANTE PROVENANT
 APPAREMMENT DE L'ENGRAIS (Nf) ET DES DISPONIBILITES EN ENGRAIS (Nd) EN FONCTION DES
 SOMMES DE TEMPERATURES

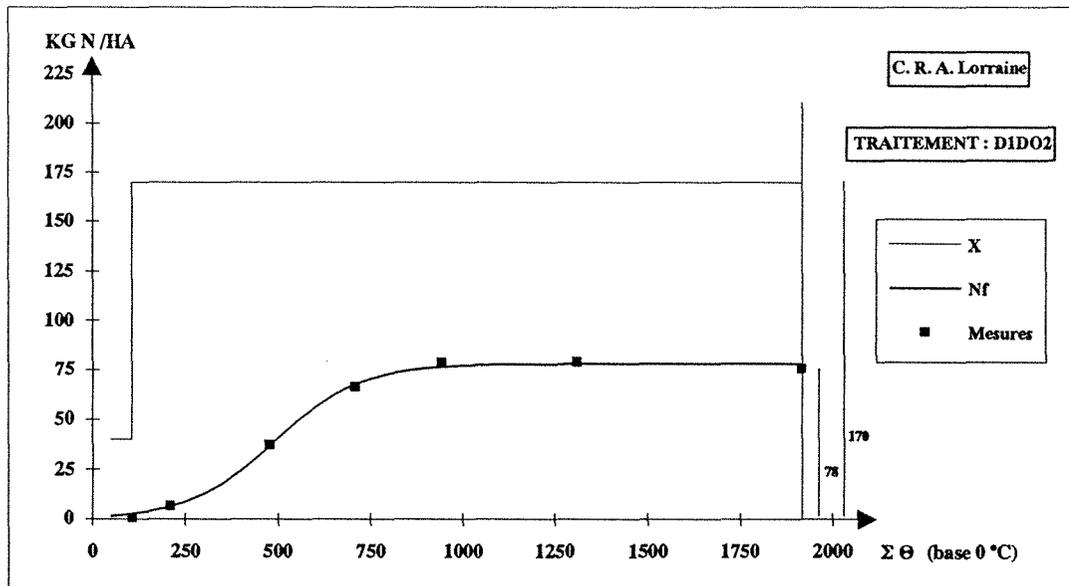


GRAPHIQUE N° 21

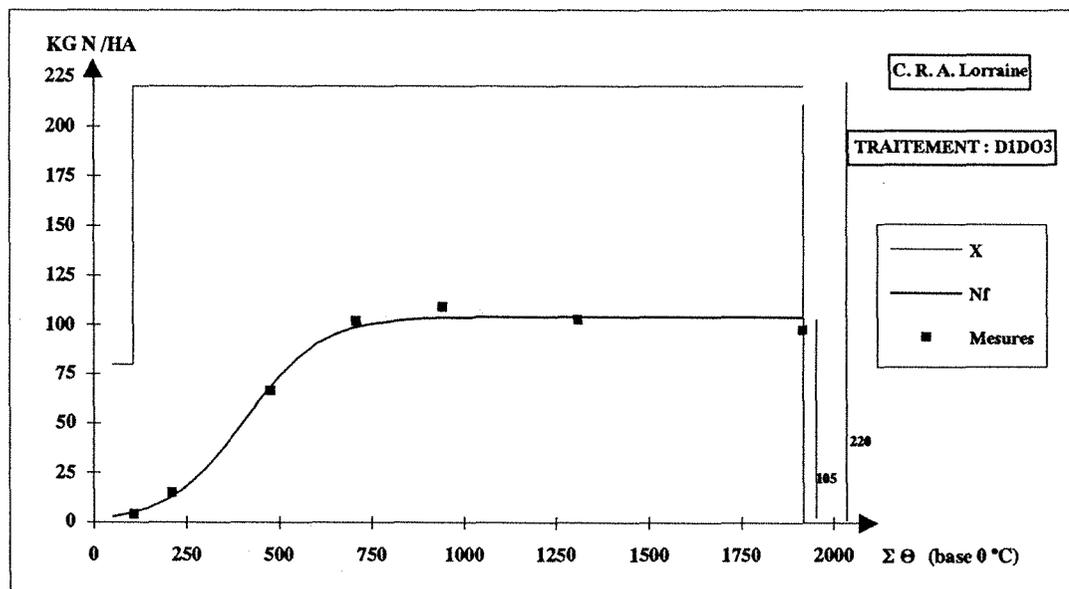
**EVOLUTION DES QUANTITES D'AZOTE DANS LA PLANTE PROVENANT APPAREMMENT DE L'ENGRAIS (Nf)
ET DES DISPONIBILITES EN ENGRAIS (X) EN FONCTION DES SOMMES DE TEMPERATURES**



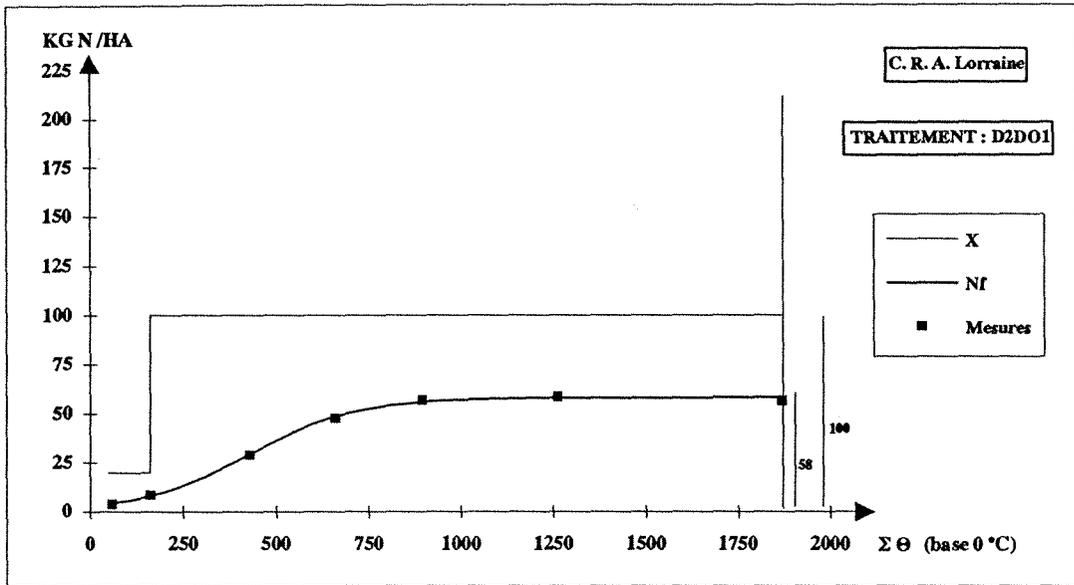
GRAPHIQUE N° 22



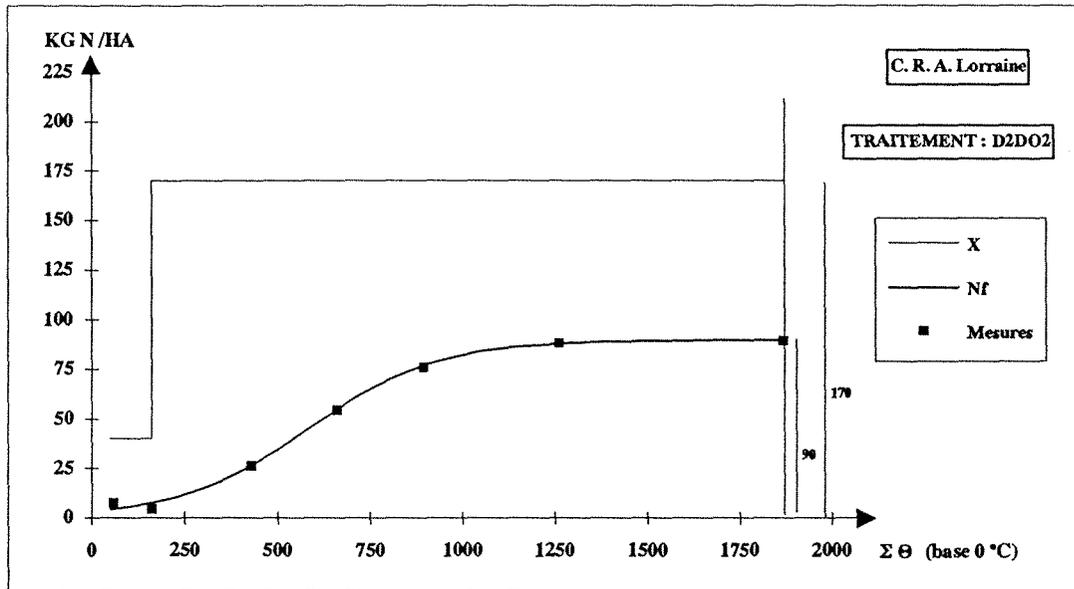
GRAPHIQUE N° 23



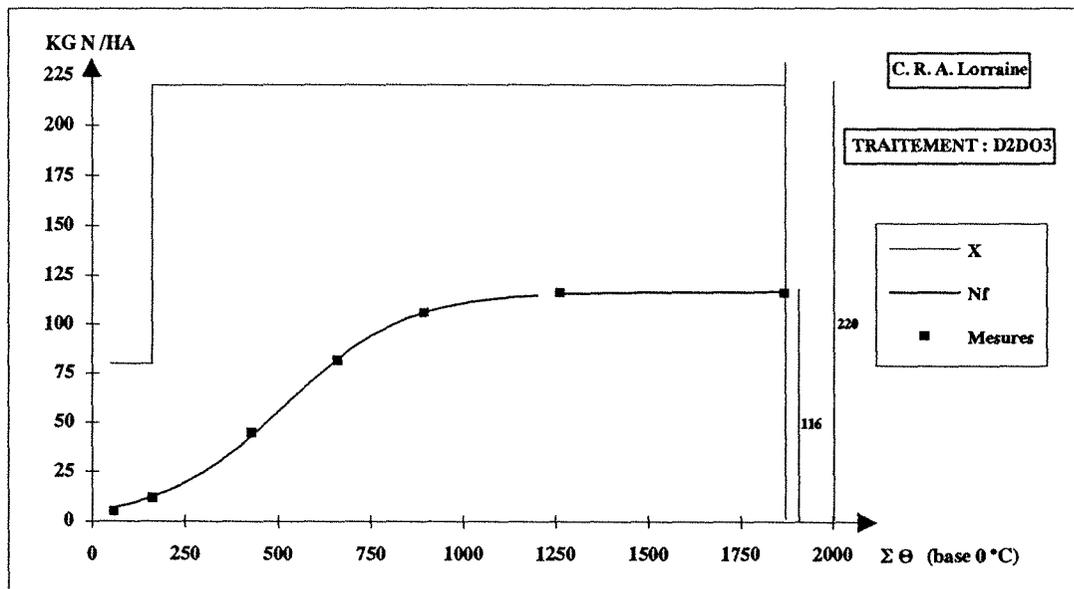
GRAPHIQUE N° 24



GRAPHIQUE N° 25

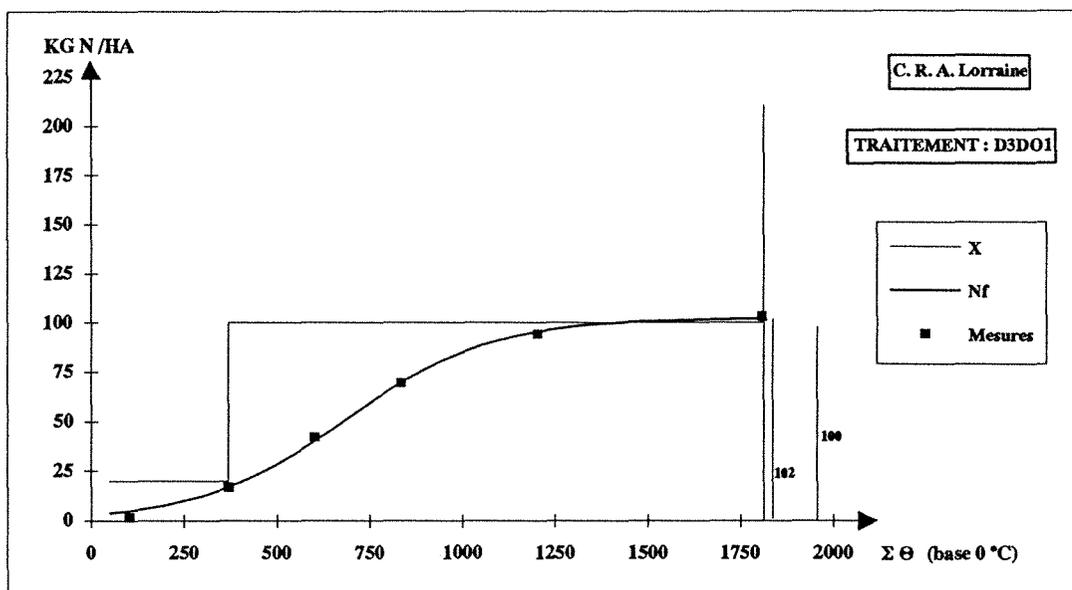


GRAPHIQUE N° 26

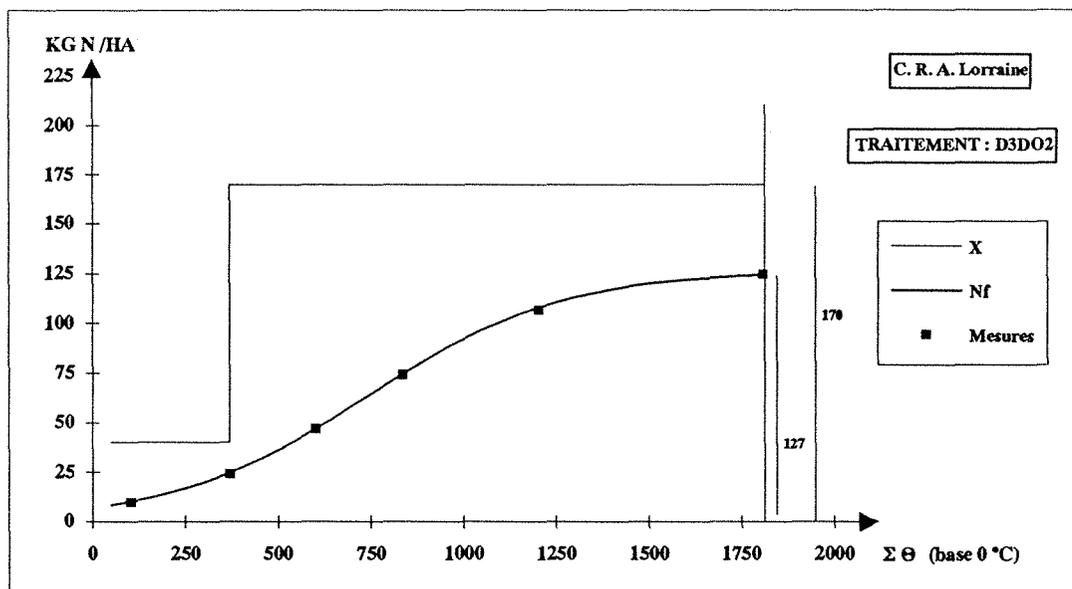


GRAPHIQUE N° 27

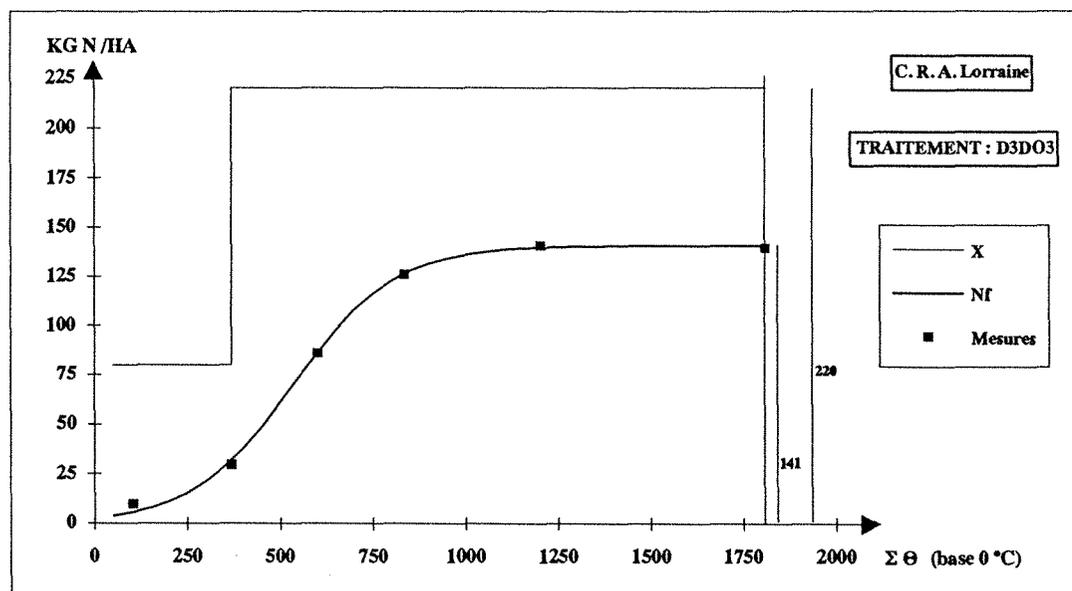
EVOLUTION DES QUANTITES D'AZOTE DANS LA PLANTE PROVENANT APPAREMMENT DE L'ENGRAIS (Nf)
 ET DES DISPONIBILITES EN ENGRAIS (X) EN FONCTION DES SOMMES DE TEMPERATURES



GRAPHIQUE N° 28



GRAPHIQUE N° 29



GRAPHIQUE N° 30

TABLEAU N° 6

Evolution du CAU en fonction des doses et des dates d'apport

DOSE \ DATE	Dose 1	Dose 2	Dose 3	Moyenne toute dose
Date 1	42	46	48	45
Date 2	58	53	53	55
Date 3	102	74	64	80

2.4 – Méthode de détermination du temps moyen de présence de l'engrais dans le sol (la méthode retenue est directement inspirée de celle proposée par PLAS en 1992)

2.4.1 – Somme des disponibilités en azote dans le sol :

Cette valeur est le résultat de la différence entre la somme des disponibilités dans le milieu Sol + Plante, et la somme des quantités présentes dans la plante.

- la somme des disponibilités dans le milieu Sol + Plante s'obtient par intégration de la fonction Nd par rapport au temps,

$$\text{Soit } I_{Nd} = \int_{N1}^R Nd . dt$$

- la somme des quantités présentes dans la plante s'obtient par intégration de la fonction Nf par rapport au temps,

$$\text{Soit } I_{Nf} = \int_{N1}^R Nf . dt$$

- la somme des disponibilités en azote dans le sol est donc égale à $I_{Nd} - I_{Nf}$.
Les valeurs I_{Nd} , I_{Nf} et $I_{Nd} - I_{Nf}$ sont exprimées en Kg x degrés jour,

N_1 représentant la date du 1^{er} apport et R la date de la récolte, les deux dates étant séparées d'un intervalle de temps t exprimé en degrés jours.

2.4.2 – Temps moyen de présence de l'engrais dans le sol :

Telle qu'elle est calculée, la valeur I_{Nd} représente une surface, qui est en fait la somme de deux rectangles, résultant du fractionnement (2 dates et 2 doses d'apport). On peut représenter cette surface par un rectangle unique, qui aurait pour cotés, le temps séparant la récolte du 1er apport soit t, et la dose moyenne pondérée en fonction des dates et des doses. Soit X_p cette dose moyenne pondérée :

$$X_p = \frac{I_{Nd}}{t} \quad (\text{le 1er apport étant toujours inférieur à la dose totale, } X_p < X)$$

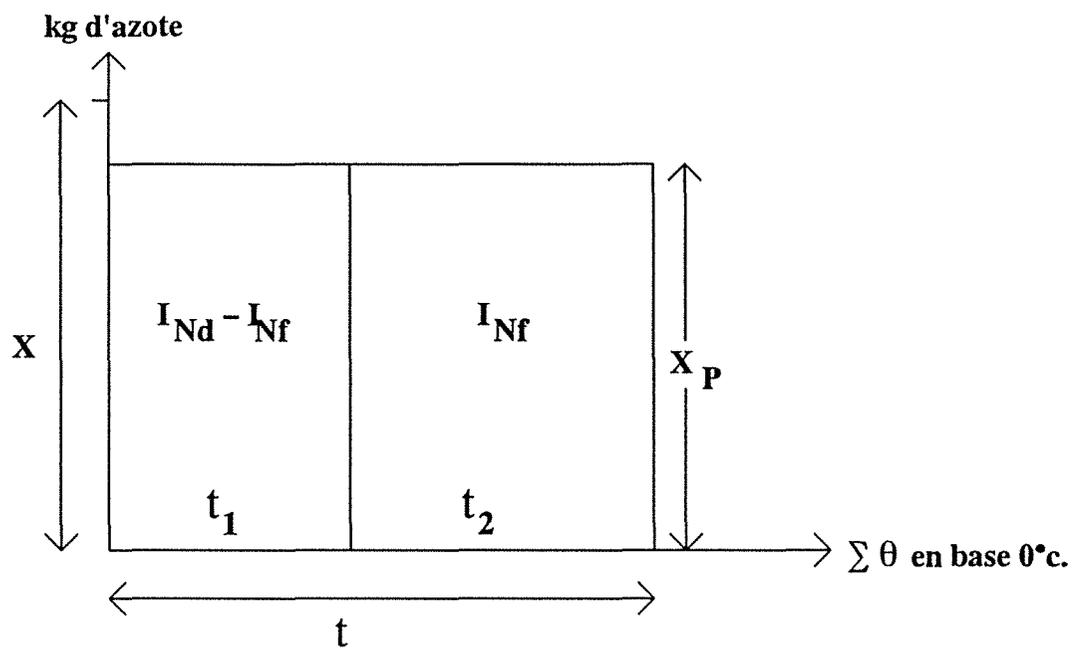
Si on appelle t_1 le temps moyen passé par la dose X_p dans le sol et t_2 le temps moyen passé par la dose X_p dans la plante (avec $t_1 + t_2 = t$), on a alors :

$$X_p \cdot t_1 = I_{Nd} - I_{Nf} \quad \text{et} \quad X_p \cdot t_2 = I_{Nf}$$

$$\text{soit} \quad t_1 = \frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_p} \quad \text{et} \quad t_2 = \frac{I_{Nf}}{X_p}$$

L'unité de ce temps moyen de présence s'exprime donc en $\frac{\text{kg} \cdot \text{degrés} \cdot \text{jours}}{\text{kg}} = \text{degrés} \cdot \text{jours}$.

Le schéma n°1 montre une représentation simple de ces temps de présence.



SCHEMA N° 1 :

**Représentation simplifiée des disponibilités en azote dans le sol,
dans la plante et des temps de présence correspondant.**

2.5 – Variation du CAU en fonction du temps de présence de l'engrais dans le sol. :

Le graphique n° 31 montre la relation existant entre le temps de présence de l'engrais dans le sol et le CAU. L'ensemble des valeurs est consigné dans le tableau n° 7. Pour le temps le plus court (432 degrés jours), le CAU atteint et dépasse même 100%, pour le temps le plus long (1 232 degrés.jours) les CAU étant de l'ordre de 45%. La relation obtenue est la suivante :

$$\text{CAU} = -7,11 \cdot 10^{-2} \frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_p} + 131$$

$$r^2 = 0,98$$

Domaine de validité : $\frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X}$ 432 à 1 232 degrés jours

L'ajustement retenu pour ce modèle est linéaire. En l'absence de valeurs de C A U correspondantes à des temps de présence de l'engrais dans le sol compris entre 400 et 600 degrés jours, il est difficile de conclure sur le meilleur ajustement de cette relation.

2.5.1– Discussion :

Un certain nombre de questions peuvent se poser par rapport aux résultats précédents :

– En premier lieu, il convient d'examiner les relations entre les différentes variables utilisées dans ce modèle.

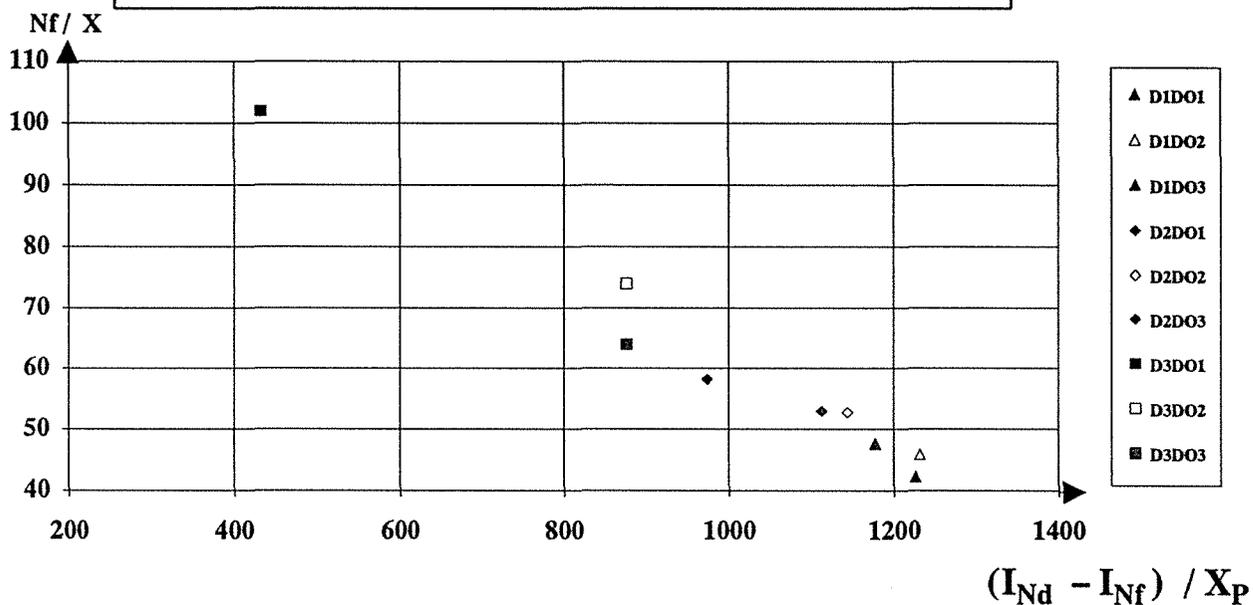
Le temps moyen de présence de l'engrais dans le sol résulte de l'utilisation de 3 variables : I_{Nd} , I_{Nf} et X .

Le C A U de l'engrais se calcule à partir de 2 variables : Nf et X
Ainsi, lorsqu'on écrit le modèle :

$$\text{CAU} = \frac{Nf}{X} = f\left(\frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X}\right)$$

on doit vérifier si on veut affirmer que ce modèle est fonctionnel, que Nf n'est pas corrélé à $I_{Nd} - I_{Nf}$, car dans le cas contraire, le modèle serait le résultat d'un artefact.

RELATION CAU TEMPS MOYEN DE PRESENCE DE L'ENGRAIS DANS LE SOL EN DEGRE JOUR



GRAPHIQUE N° 31

N_f : azote absorbé provenant apparemment de l'engrais

I_{Nd} : somme des disponibilités en kg degré jour dans le milieu sol plante

I_{Nf} : somme des quantités d'azote présentes dans le sol kg degré jour

$(I_{Nd} - I_{Nf})$: somme des quantités d'azote présentes en kg degré jour dans la plante

N_f / X : CAU

$\frac{(I_{Nd} - I_{Nf})}{X_p}$: temps moyen de présence de l'engrais dans le sol en degré jour

TABLEAU N° 7

Valeurs de I_{Nd} , I_{Nf} , $I_{Nd} - I_{Nf}$, Nf et CAU
pour les différents traitements de l'essai de Rozières

Paramètre	X	X _P	I _{Nd}	I _{Nf}	I _{Nd} - I _{Nf}	$\frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_P}$	Nf	CAU
Traitements								
Doses								
D ₁ Do ₁	100	95,53	183 040	659 29	117 211	1 227	42	42
D ₁ Do ₂	170	162,74	311 810	111 261	200 549	1 232	78	46
D ₁ Do ₃	220	212,18	406 540	156 574	249 966	1 178	104	48
D ₂ Do ₁	100	93,1	173 920	83 483	90 637	974	58	58
D ₂ Do ₂	170	158,79	296 630	114 916	181 714	1 144	90	53
D ₂ Do ₃	220	207,93	388 420	156 942	231 478	1 113	117	53
D ₃ Do ₁	100	83,68	151 380	114 369	36 991	443	102	102
D ₃ Do ₂	170	143,48	259 560	133 932	125 628	876	127	74
D ₃ Do ₃	220	191,44	346 320	178 545	167 775	876	141	64

* I_{Nd} , I_{Nf} , $I_{Nd} - I_{Nf}$ sont exprimés en Kg x degrés jours

* Nf est exprimé en Kg

* $\frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_P}$ est exprimé en degrés jours

* CAU en %

* D₁, D₂, D₃ = Date 1, Date 2, Date 3

* Do₁, Do₂, Do₃ = Dose 1, Dose 2, Dose 3

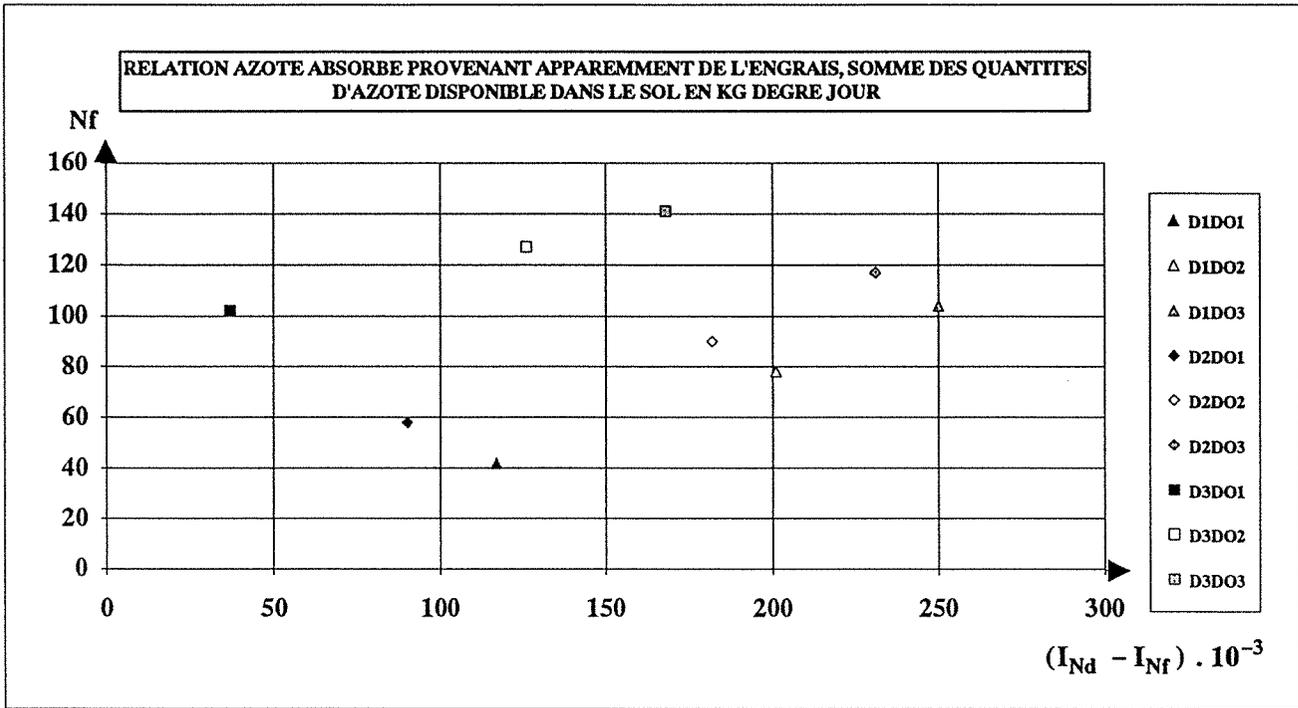
Le graphique n° 32 montre la relation entre ces deux variables. La valeur Nf est corrélée négativement à $I_{Nd} - I_{Nf}$, mais avec un très net effet de la dose. Pour une valeur équivalente de Nf, la valeur de $I_{Nd} - I_{Nf}$ passe de 36 991 à 249 966.

On peut également vérifier (graphique n° 33) le même phénomène pour la relation $Nf = f(I_{Nd})$.

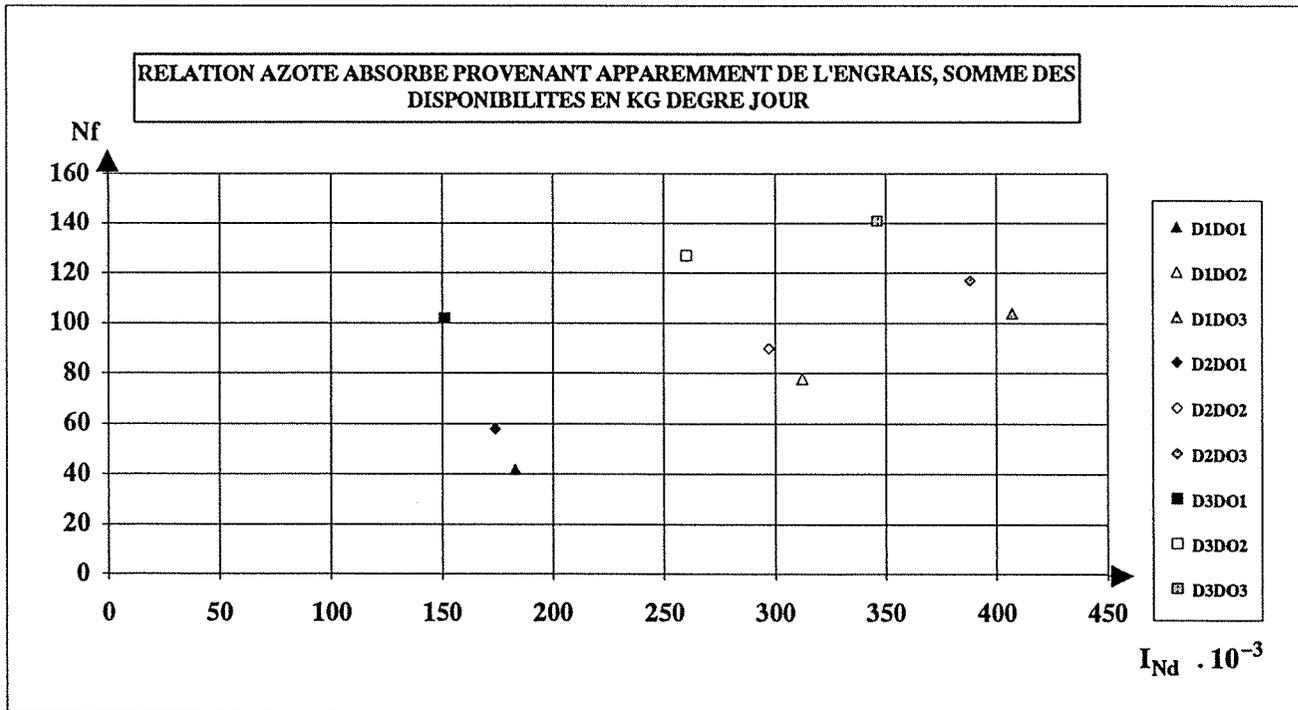
TABLEAU N° 8

Valeurs de I_{Nd} , I_{Nf} , $I_{Nd} - I_{Nf}$, $\frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_P}$ et CAU
pour les différents traitements de l'essai MAN haut

Paramètres Traitements Doses	X_P	I_{Nd}	I_{Nf}	$I_{Nd} - I_{Nf}$	$\frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_P}$	CAU
40 +127 sec	153,75	271220	171 639	99 581	648	88
40 +154 sec	177,93	313880	163 684	150 196	844	75
40 +127 +27 sec	175,01	308723	167 724	140 999	806	82
40+127 +27 irr	175,01	308 723	209 741	98 752	564	85
40 +177 sec	198,53	350 220	182 409	167 811	845	69
40 + 127 +50 sec	193,12	340670	199 538	141 132	731	73
40 +127 +50 irr	193,12	340 670	210 258	130 412	675	83
40 +154 +23 sec	196,04	345 827	183 425	162 402	828	69
40 +154 +23 irr	196,04	345 827	212 721	133 106	679	86
40 +127+27+23 irr	196,04	332 689	206 439	126 250	644	85



GRAPHIQUE N° 32



GRAPHIQUE N° 33

De plus, la variation de $\frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_p}$ n'est pas seulement due à la variation de X_p , puisque la gamme de variation de $I_{Nd} - I_{Nf}$ (de 1 à 2,84) est supérieure à celle de X_p (de 1 à 2,2).

– En second lieu, il faut remarquer que ce modèle est le résultat de données provenant d'une seule expérimentation correspondant à un type de sol bien précis et un système de culture (sol argilo-limoneux en surface, enrichi en argile à partir de 40 cm et reposant sur calcaire à 110 cm).

Sur une autre expérimentation, (MAN haut), implantée sur un sol argilo-calcaire superficiel, et pour laquelle on disposait des mesures d'azote absorbé entre le 1er apport d'azote et la récolte pour différentes modalités d'apport d'azote, nous avons pu effectuer un 1er test du modèle proposé.

Les différents traitements concernaient des doses, des fractionnements avec ou sans irrigation.

Les résultats obtenus (graphique n° 34) sont tout à fait cohérents avec le modèle issu de l'essai de Rosières, même si la gamme des temps moyens de présence de l'engrais dans le sol (564 à 845 degrés jours, tableau n° 9) ne permet de le valider que sur la partie pour laquelle on manquait le plus de valeurs.

La relation établie sur l'ensemble des valeurs ne modifie pas sensiblement le modèle puisque la pente et l'ordonnée à l'origine restent à peu près stables :

La pente passe de $-7,11 \cdot 10^{-2}$ à $-6,94 \cdot 10^{-2}$ et l'ordonnée à l'origine de 131 à 129,9.

2.6 – Conclusion partielle :

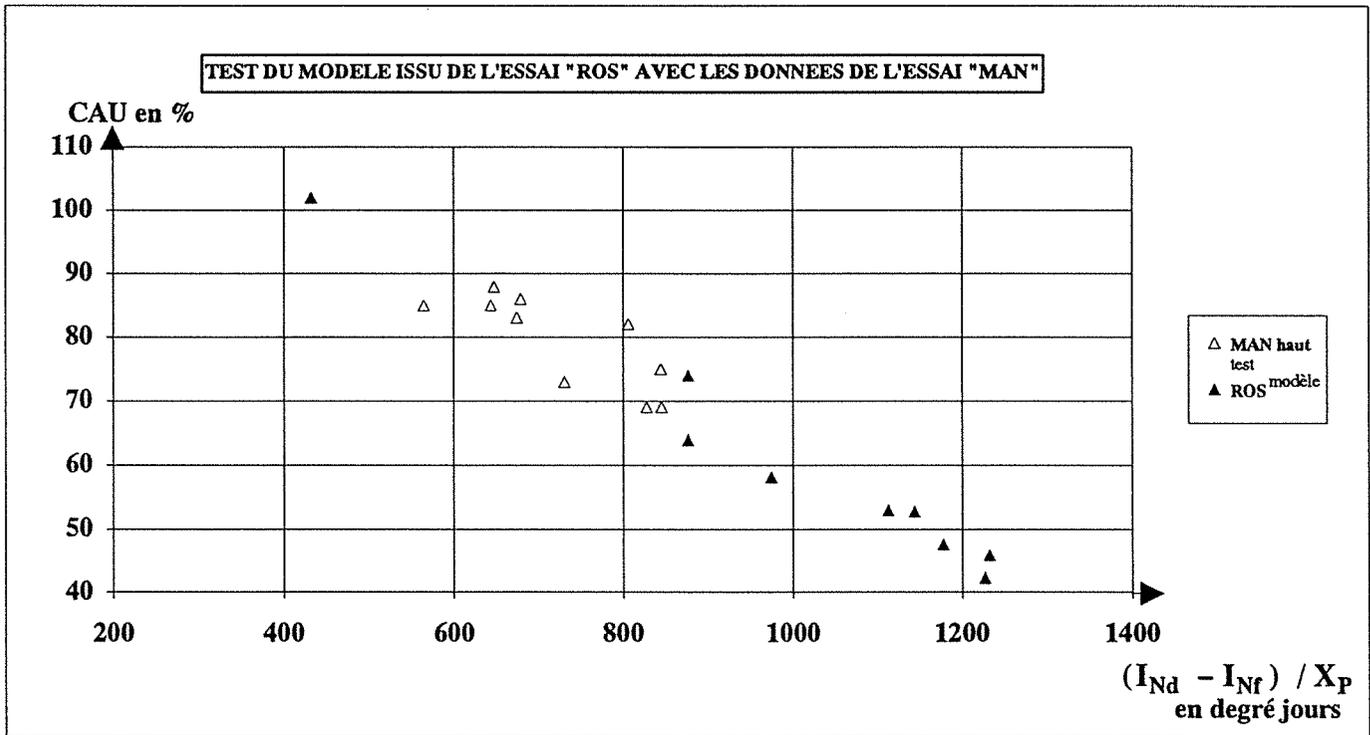
Cette étude réalisée sur la cinétique d'absorption de l'azote a permis :

– D'une part de vérifier un certain nombre de résultats déjà établis à savoir :

* l'incidence positive de la date d'apport sur les quantités d'azote absorbées et sur le CAU .

* l'incidence positive de la dose sur les quantités absorbées.

– D'autre part de quantifier, pour un type de sol l'incidence du temps moyen de présence de l'engrais dans le sol sur la variation du CAU. Il existerait pour une



GRAPHIQUE N° 34

Sur l'ensemble des valeurs :

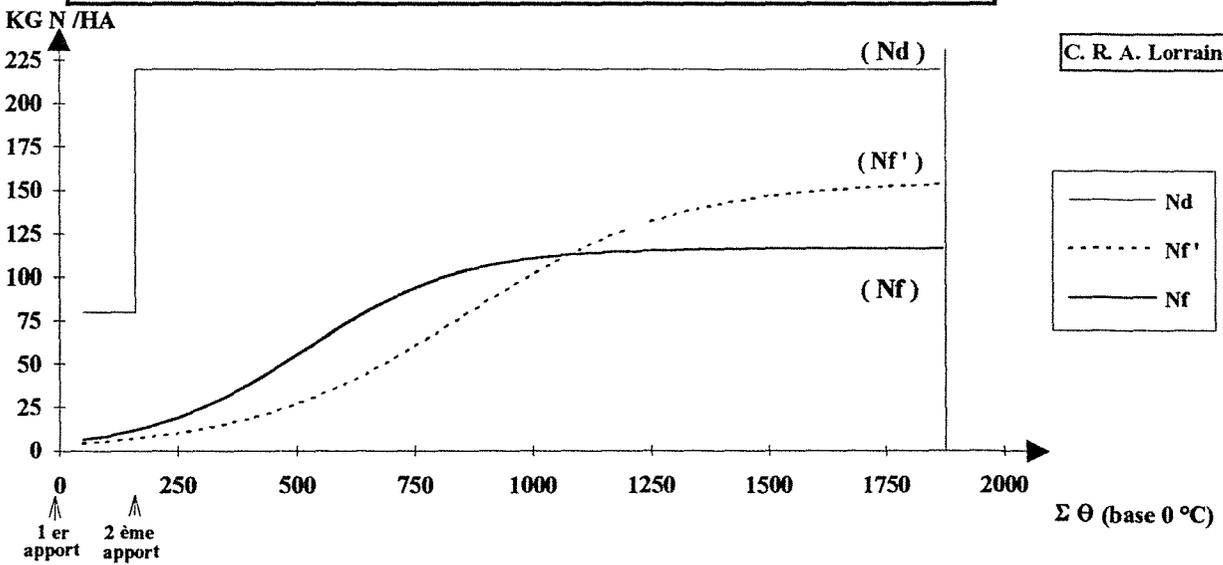
$$\frac{N_f}{X} = -6,94 \cdot 10^{-2} \frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_P} + 129,9 \quad r^2 = 0,945$$

valeur du temps de présence de l'engrais dans le sol donné, une seule valeur correspondante du CAU, ce qui signifierait que tout retard d'absorption de l'azote à une époque où la vitesse d'absorption de l'azote augmente, serait irréversible et ne pourrait donc être compensé par une absorption tardive. Le graphique n° 35 illustre ce phénomène : pour une même dose apportée avec le même fractionnement (même valeur de I_{Nd}), il serait impossible d'observer une courbe de type N_f' (N_f' est telle que $I_{Nf} = I_{Nf}'$) et donc des CAU différents pour une même valeur de :

$$\frac{I_{Nd} - I_{Nf}}{X_p}$$

– Enfin, les résultats de l'essai MAN haut suggèrent qu'il n'y a pas de différences en fonction des types de sol. Si on admet l'hypothèse, qu'en l'absence de lessivage, les quantités d'azote non absorbées sont préférentiellement organisées, cela voudrait dire que la vitesse d'organisation est équivalente dans les 2 types de sols, ce qui paraît conforme aux résultats obtenus par RECOUS en 1988.

EXEMPLE D'EVOLUTIONS DES QUANTITES D'AZOTE DANS LA PLANTE PROVENANT APPAREMMENT DE L'ENGRAIS (Nf) ET DES DISPONIBILITES EN ENGRAIS (Nd) EN FONCTION DES SOMMES DE TEMPERATURES



GRAPHIQUE N° 35

3 – Variations du CAU en fonction de la dose apportée :

3.1 – Constats :

3.1.1 – Blé :

Les valeurs de CAU observées sur l'ensemble des essais, à l'optimum de la courbe de réponse, sont relativement différentes (cet aspect sera étudié plus loin). D'autre part, les doses optimales sont très variables (40 Kg.ha^{-1} à 235 Kg.ha^{-1}). Afin d'étudier l'effet de la dose entre les différents essais, nous avons choisi de représenter le CAU en % du CAU optimum et la dose en % de la dose optimale. Ainsi sur chaque graphique, la matérialisation du point de coordonnées ($y = 100$ et $x = 100$) permet de visualiser l'effet des doses suboptimales et supraoptimales sur le CAU.

On observe deux grands cas de figure :

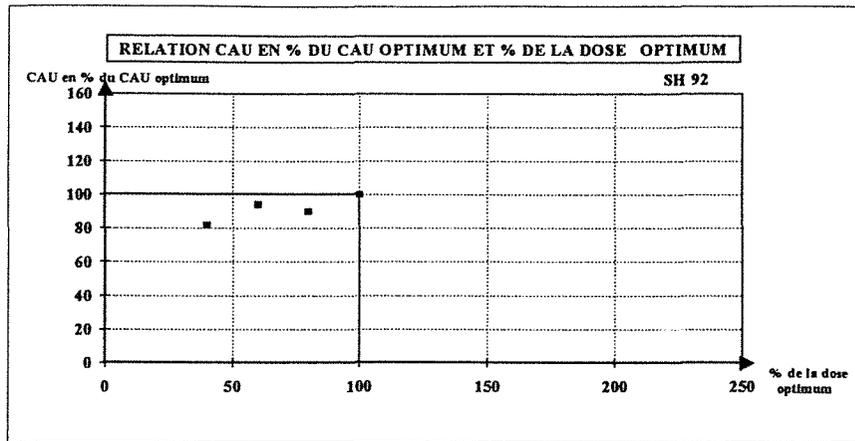
– les CAU en doses suboptimales sont relativement stables, particulièrement entre 50 et 100 % de la dose optimale. C'est le cas des essais SH 92, LET haut 92, MAN haut 93, COURC 93, LET bas 92 (graphiques 36 à 40). De plus, dans tous les cas la dose optimale étant relativement élevée, il n'existe qu'une dose supraoptimale, ce qui ne permet pas de conclure sur l'allure de la courbe au-delà de l'optimum. Notons que l'essai SH 93 (graphique n° 41), malgré une dose optimale élevée (200 Kg ha^{-1}), ne répond pas à ce schéma puisque le CAU augmente quand les doses suboptimales diminuent.

– les doses optimales sont faibles et la gamme de variations des doses supraoptimales est importante. C'est le cas des essais SEICH haut 92, SEICH bas 92 et MAN bas 93 (graphiques n° 42 à 44). Sur ces essais on constate une baisse progressive du CAU au fur et à mesure que la dose supraoptimale augmente : au delà de 220 % de la dose optimale, le CAU chute de plus de 50 % (graphique n°45).

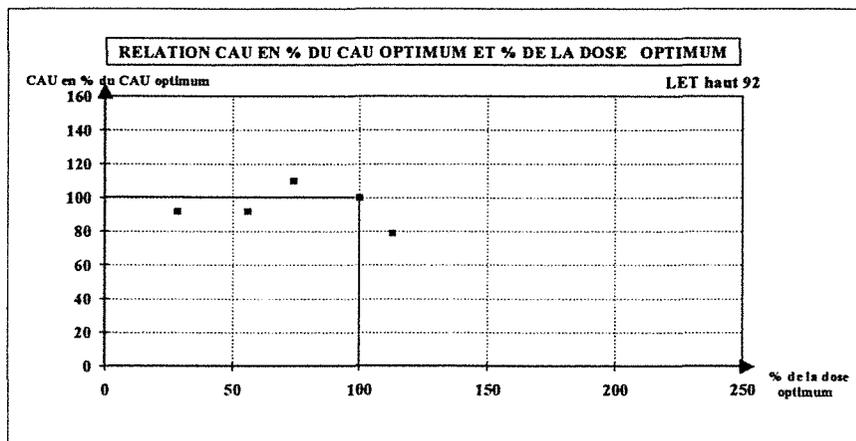
3.1.2 – Mais :

Il convient de préciser en préalable que 2 essais (DOM 92 et BOUZ bas 92) ne présentent aucune réponse à l'apport d'azote. Il est donc impossible de les exploiter par rapport à la variation du CAU.

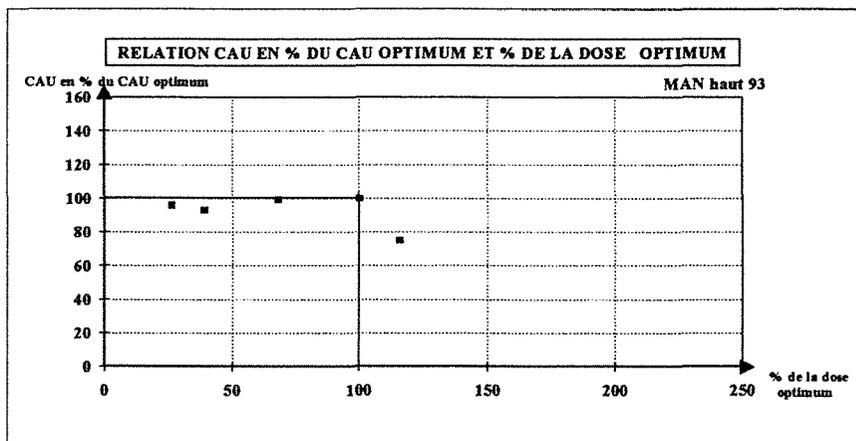
Sur les 6 essais restant, à l'exception de l'essai BOUZ 93, les doses optimales sont généralement encadrées par suffisamment de valeurs pour étudier



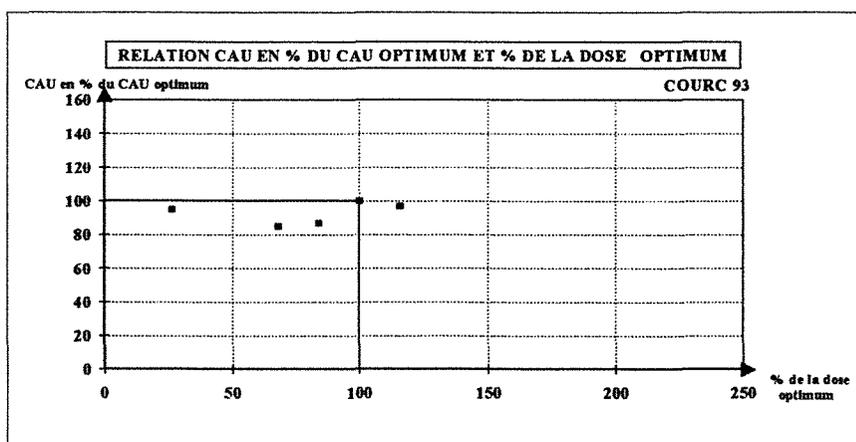
GRAPHIQUE N° 36



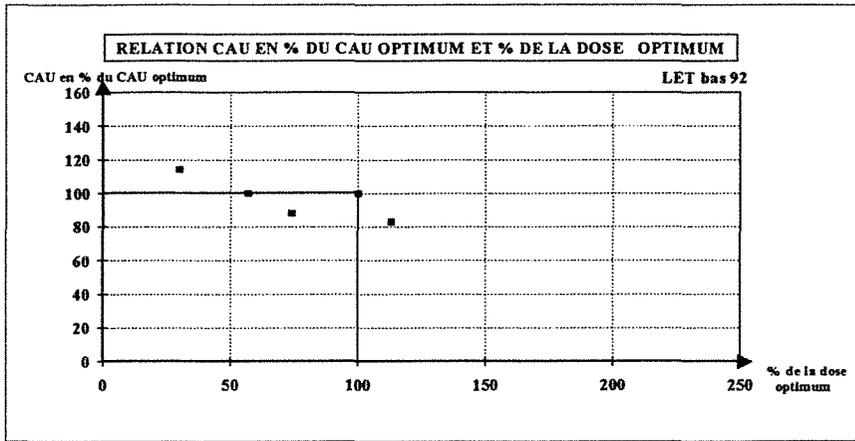
GRAPHIQUE N° 37



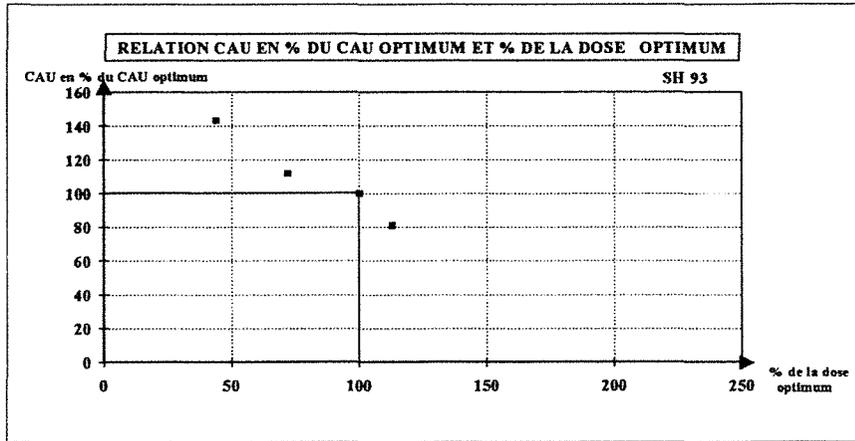
GRAPHIQUE N° 38



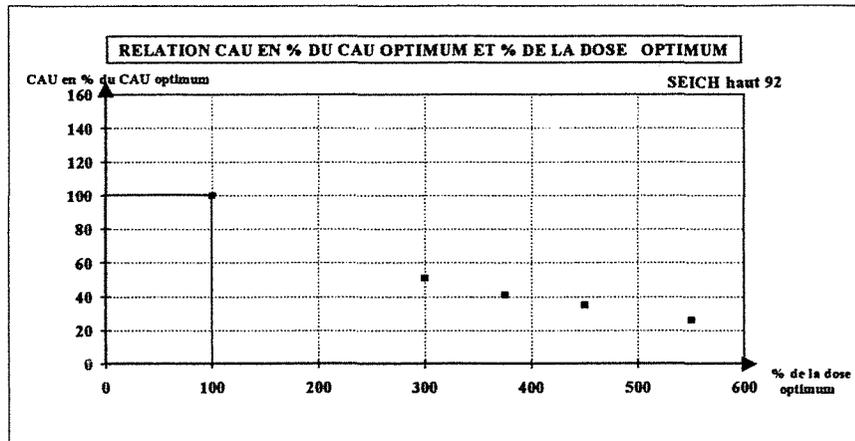
GRAPHIQUE N° 39



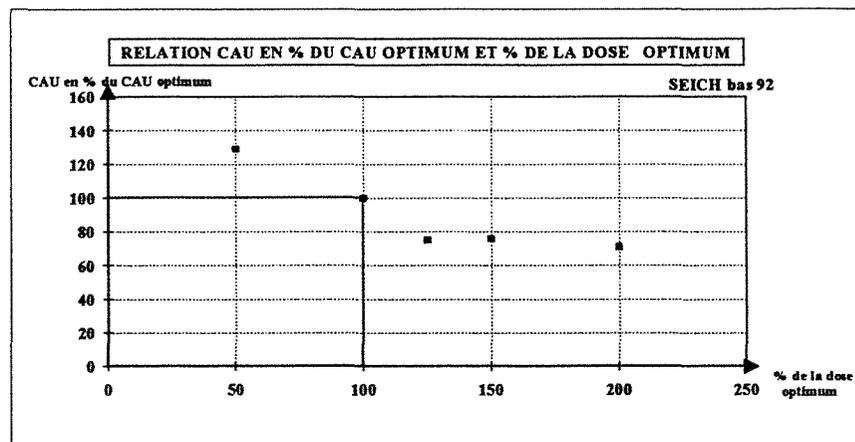
GRAPHIQUE N° 40



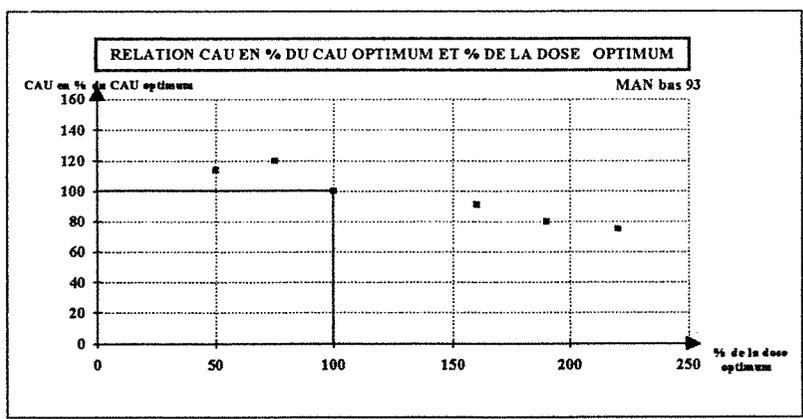
GRAPHIQUE N° 41



GRAPHIQUE N° 42



GRAPHIQUE N° 43



GRAPHIQUE N° 44

l'allure de la variation en doses suboptimales et supraoptimales sur chaque essai (graphique n° 46).

– En doses suboptimales, on peut observer 2 grands cas de figure :

* Les CAU baissent jusqu'à l'optimum (c'est le cas des essais NOV 93, BOUZ 93 et LAGN 93).

* Les CAU augmentent jusqu'à l'optimum (c'est le cas des essais DIEUL 93, BOUZ 92 et LOIS 92).

– En doses supraoptimales, comme pour le blé le CAU baisse globalement quand le pourcentage de la dose optimale augmente.

3.2 – Discussion :

Pour le blé, les résultats observés sur la 1ère série d'essais semblent cohérents avec ceux issus des traitements à l'azote 15, à savoir une relative indépendance du CAU en fonction de la dose. En fait, dans la plupart des situations, les traitements ^{15}N se situent en dose suboptimales et dépassent rarement 150 % de la dose optimale.

Cette stabilité du CAU a été observée par PLAS en Poitou–Charentes, principalement lorsque la part relative du 2ème apport dans la dose totale est constante. Dans le cas où cette part augmente avec la dose, comme c'est le cas dans la plupart de nos essais, il constate alors une augmentation du CAU jusqu'à l'optimum. Nos résultats issus de doses suboptimales trop peu nombreuses, ne nous permettent pas de confirmer ce phénomène.

Pour le maïs, nous n'avons pas trouvé d'éléments d'explication à cette grande variation des CAU en dose suboptimales. On peut toutefois émettre l'hypothèse suivante :

Le maximum de dispersion correspond à des doses inférieures à 75 % de la dose optimale (il s'agit pour la plupart de doses ne dépassant pas $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Une légère erreur sur les rendements correspondant à ces faibles doses se répercute de façon importante sur les CAU.

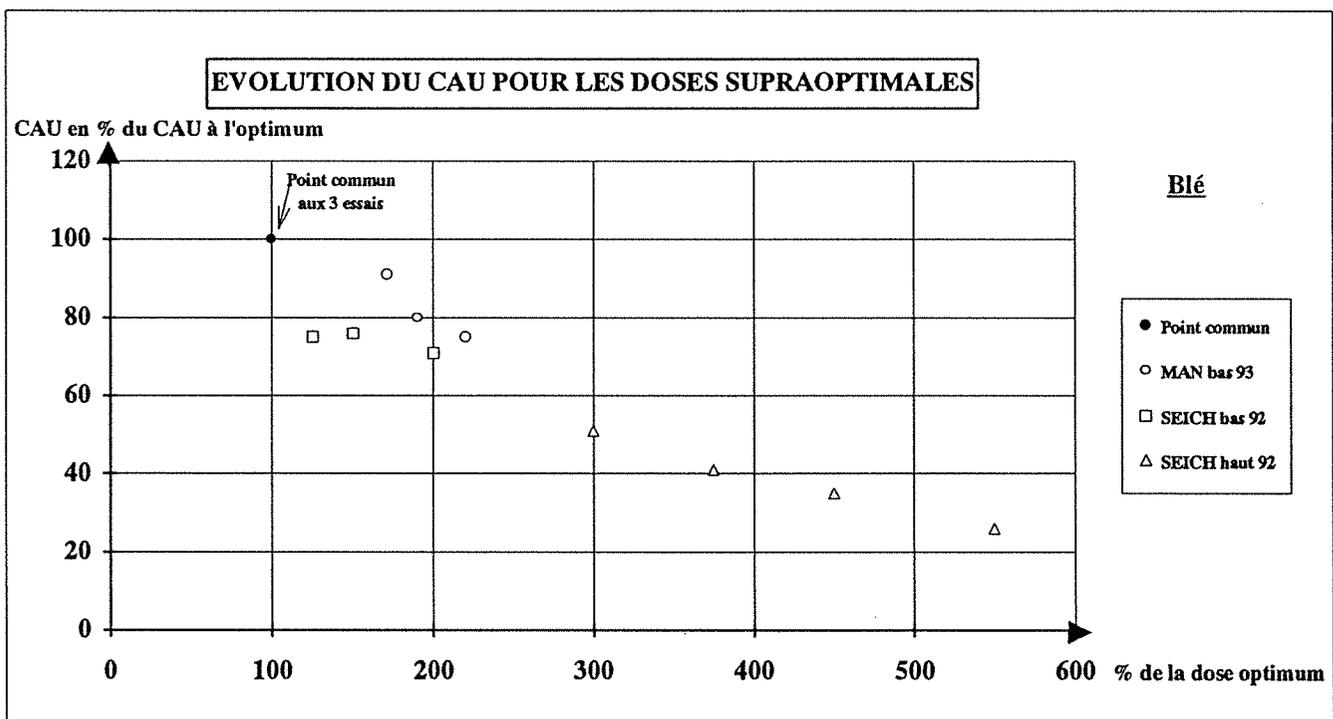
A partir de 75 % de la dose optimum, les CAU restent dans une fourchette de 80 à 110 % du CAU optimum (à l'exception de l'essai NOV 93).

En revanche pour ce qui concerne les doses supraoptimales, qu'il s'agisse du blé (graphique n° 45) ou du maïs (graphique n° 46), les résultats, en particulier des essais MAN bas 93, LOIS 92 et SEICH haut 92, montrent nettement

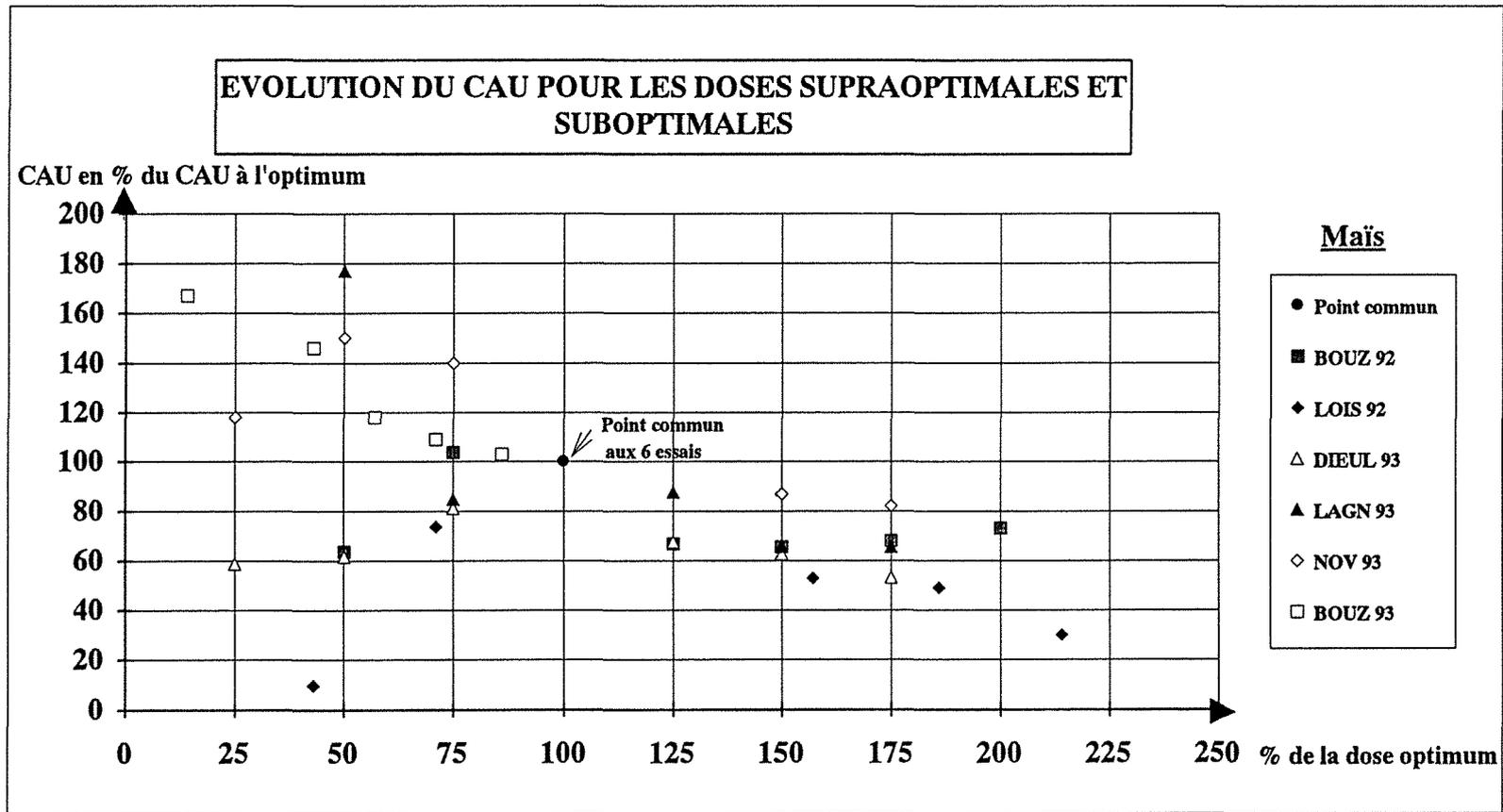
que lorsque la capacité de contention maximale de la plante est atteinte (à partir de 150 % de la dose optimale), le CAU chute très rapidement. **BROADBENT** et **CARLTON, 1978** avaient observés le même phénomène concernant le CRU et pour des doses très élevées (300 à 500 Kg .ha⁻¹).

3.3 – Conclusion partielle :

L'étude de la variation du CAU en fonction de la dose et en particulier dans la partie suboptimale de la courbe de réponse nécessite de travailler avec des doses plus nombreuses et avec des différences entre doses ne dépassant pas 20 à 30 Kg.ha⁻¹. D'autre part, la comparaison du CAU dans ces conditions requiert un niveau de précision (répétitions dans les analyses d'azote absorbé) dont nous ne disposons pas sur nos essais. Nous admettrons donc, faute de mieux, et au vu des résultats apparemment cohérents à ceux déjà existants, une indépendance du CAU vis-à-vis de la dose dans la partie ascendante de la courbe de réponse à l'azote.



GRAPHIQUE N° 45



GRAPHIQUE N° 46

4 – Variation du CAU en fonction de la date d'apport :

Cet aspect a été étudié uniquement sur blé. Il faut rappeler que les dispositifs expérimentaux mis en place dans le cadre de cette étude avait pour objectif de mieux cerner la valeur du CAU à l'optimum de la courbe de réponse et de tenter d'en expliciter les conditions de variations. C'est pourquoi nous ne disposons que de peu de résultats sur les valeurs des CAU₁ et CAU₂. Sur quelques essais, des placettes avec apport unique (soit au 1er, soit au 2ème apport selon les cas) ont été rajoutées au dispositif. Par ailleurs, lorsque nous disposons de suffisamment de données fiables avant l'optimum de la courbe de réponse, et que le niveau du 1er apport est constant, on peut calculer le CAU₂ qui est le rapport de la différence de l'azote absorbé pour deux doses consécutives, à la différence de l'azote apporté pour ces mêmes doses :

- * soit X₁ une dose totale comprenant un 1er apport x₁
- * soit X₂ une dose totale, plus élevée que X₁ comprenant un premier apport x₁
- * soit N_{pe} X₁, l'azote absorbé par la plante à la dose X₁
- * soit N_{pe} X₂, l'azote absorbé par la plante à la dose X₂

L'expression de CAU₂ est alors donné par :

$$CAU_2 = \frac{N_{pe} \cdot X_2 - N_{pe} \cdot X_1}{X_2 - X_1} \cdot 100$$

A partir de cette valeur du CAU₂ et de la valeur du CAU mesurée à l'optimum de la courbe de réponse, on peut alors calculer la valeur du CAU₁ en utilisant l'expression générale du CAU :

$$CAU = \frac{CAU_1 \cdot x_1 + CAU_2 \cdot x_2}{X}$$

x₁ = niveau du 1^{er} apport

x₂ = niveau du 2^{ème} apport

X = x₁ + x₂ = dose totale

$$\text{On a alors : } CAU_1 = \frac{CAU \cdot X - CAU_2 \cdot x_2}{x_1}$$

4.1 – Valeurs observées pour CAU₁ et CAU₂ :

Le tableau n° 9 résume les valeurs calculées ou observées. Pour des CAU globaux atteignant 81 % les valeurs des CAU₁ se situent en moyenne à 60 % et celle des CAU₂ légèrement supérieures à 90 %.

TABLEAU N° 9 :

**Valeurs observées et calculées des CAU₁
et CAU₂ sur différents essais**

CAU ESSAI	CAU _{opt}	CAU1		CAU2	
		calculé	observé	calculé	observé
MAN haut 93	69	60	64	72	
LET bas 92	75				99
SH 92	88	47		99	
LET haut 92	92	58		102	85
Moyenne	81	55	64	91	92
		59,5		91,5	

4.2 – Discussions – conclusions partielles :

Le faible nombre de données n'autorise pas à commenter les variations des valeurs observées entre essais. On peut simplement constater que pour chaque essai, les valeurs du CAU global se situe entre la valeur du CAU₁ et du CAU₂ et que les valeurs moyennes observées ou calculées sont cohérentes avec celles relevées par différents auteurs, en particulier par PLAS en Poitou-Charentes.

5 – Facteurs de variations du CAU à l'optimum de la courbe de réponse :

5.1 – Résultats sur blé :

L'examen des CAU observés à l'optimum de la courbe de réponse (tableau n° 10) montre des différences importantes :

– Des CAU élevés (> 90 %) peuvent être obtenus pour des doses très variables (40 à 235 Kg.ha⁻¹).

– Les CAU les plus faibles (< 90 %) sont également obtenus pour des doses très différentes (100 à 200 Kg.ha⁻¹).

– Les types de sol n'apparaissent pas discriminants ; par exemple les CAU dans les sols argileux s'échelonnent de 38 % à 94 % et de 64 % à 130 % dans les sols argilo-calcaires.

– Il apparaît assez nettement un effet année, les CAU des essais 1992 étant supérieurs à ceux des essais 1993.

Ce constat suggère de tenter d'expliquer les différences de CAU observées plutôt à partir de données sujettes à des variations annuelles importantes, comme par exemple les conditions climatiques.

Le tableau n° 11 indique les sommes de température observées entre 1er octobre et le 31 mars pour les 2 campagnes.

Globalement, les valeurs sont équivalentes. Toutefois, les cumuls mensuels peuvent être sensiblement différents, en particulier en février et mars (ces deux mois correspondent, sous le climat lorrain et compte tenu des dates de semis pratiquées, à la période de tallage la plus intense), on constate un fort déficit en 1993 (192 degrés jours contre 326 en 1992).

TABLEAU N° 10**Valeurs des C A U optimum, des doses correspondantes et indication des types de sols pour les différents essais**

ESSAIS	Dose d'azote à l'optimum en kg.ha ⁻¹	CAU à l'optimum en %	Type de sol
SEICH haut 92	40	124	A C superficiel
LET haut 92	230	92	Limon
SEICH bas 92	120	103	Argile / calcaire
LET bas 92	235	94	Argile
SH 92	200	88	Limon
CREZ 93	130	38	Argile
MAN bas 93	100	81	Argile / calcaire
SH 93	180	69	Arg. limoneuse
COURC 93	190	60	Limon
MAN haut 93	190	69	Argile / calcaire

TABLEAU N°11

Sommes de températures en base 0°C observées du 1er octobre
(date moyenne de semis) au 1er avril (date moyenne du stade épi 1 cm)
pour les 2 années d'essais
(poste météo : METZ FRESCATY)

Année de récolte / Mois	1992	1993
Octobre	300	257
Novembre	150	231
Décembre	85	98
Janvier	77	132
Février	109	6
Mars	217	186
Total	938	910

5.1 – Conséquences sur la biomasse produite :

On verra dans le chapitre suivant comment on a pu quantifier la relation qui relie la vitesse de croissance à la biomasse.

Si on fait l'hypothèse d'une biomasse au 1er février équivalente pour les 2 années (ce qui est plausible compte tenu des sommes de températures cumulées jusqu'à cette date), on peut simuler les états de croissance atteints au 1er avril pour chaque campagne, compte tenu des sommes de températures réellement observées en février et mars.

– **Hypothèse 1** : 30 g m⁻² au 1er février

le modèle donne : 79 g m⁻² au 1er avril en 1993
 153 g.m⁻² au 1er avril en 1992

– **Hypothèse 2** : 50 g m⁻² au 1er février

le modèle donne : 124 g m⁻² au 1er avril en 1993
 235 g m⁻² au 1er avril en 1992

Les mesures effectuées au stade épi 1 cm (date proche du 1er avril pour les 2 années) sur la plupart des essais confirment les résultats de cette simulation (tableau n° 12).

TABLEAU N° 12 :

Valeur des biomasses des parties aériennes mesurées au stade épi 1cm pour les deux années d'essai.

Année de récolte	Essai	Biomasse en g.m ⁻²
1992	SEICH haut	116
	SEICH bas	149
	LET haut	185
	LET bas	275
1993	MAN haut	106
	MAN bas	122
	COURC	60
	CREZ	57
	ROS	61

Les biomasses des essais 93 sont en moyenne plus faibles que celles des essais 92. Il faut toutefois noter que les biomasses des essais COURC et CREZ, relèvent également d'un peuplement plus clair.

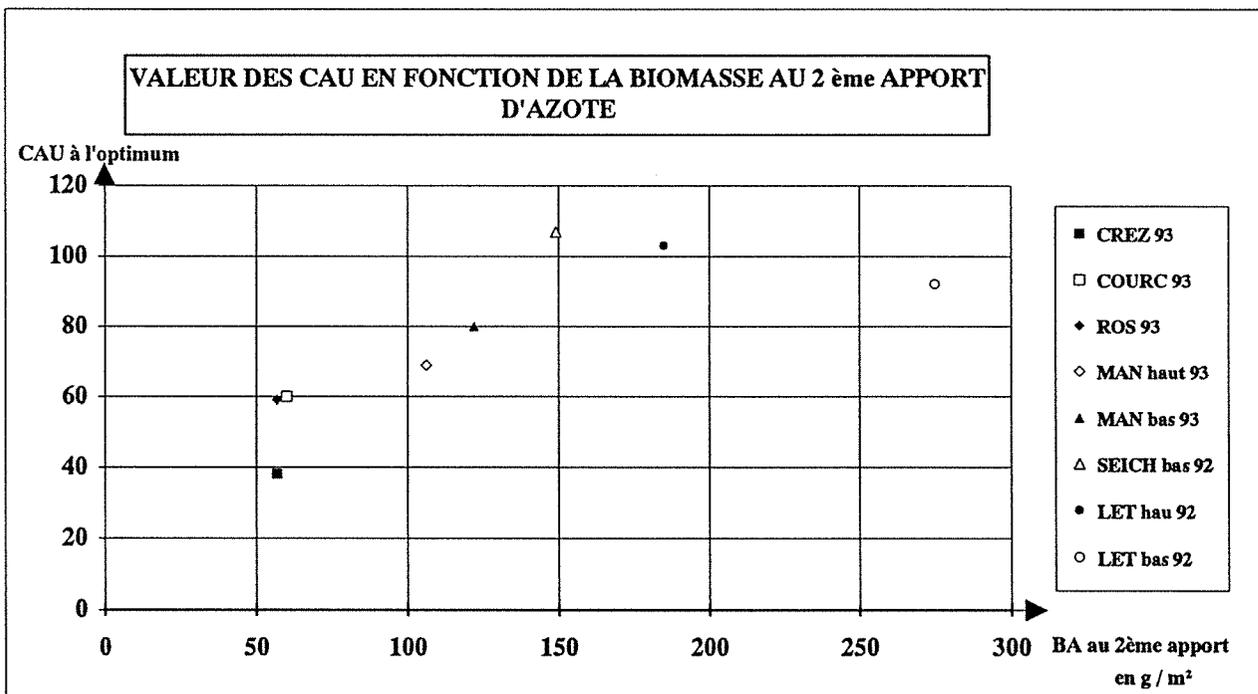
L'examen de ces résultats suggère qu'à des biomasses élevées au 2ème apport, sont associés des CAU à l'optimum élevés et inversement. Le graphique n° 47 montre bien ce phénomène.

Les CAU maximum passent de 60 % pour 60 g.m⁻² de biomasse à plus de 100 % pour de biomasses de 150 g.m⁻², puis il semble s'établir un plateau. Bien sûr, ces résultats sont trop peu nombreux pour conclure sur une liaison entre CAU et biomasse. Aussi, nous avons recherché d'autres résultats expérimentaux provenant de la région Lorraine pour lesquels on disposait des renseignements suivants :

- la valeur du CAU à la dose optimale ou supposée proche de cette dose
- la biomasse mesurée au moment du 2ème apport

Nous avons aussi pu valoriser :

- 2 résultats provenant du réseau itinéraire technique sur terre à cailloux des années 1988 et 1990.



GRAPHIQUE N° 47

– L'essai cinétique d'absorption de l'azote installé à Rosières en Haye en 93 (3 résultats).

– 2 essais densité de semis x dose d'azote suivi par l'I.T.C.F. en 1993.

L'ensemble des résultats est présenté sur le graphique n° 48. On constate que, globalement, les résultats complémentaires enrichissent la relation, surtout dans la gamme 40 à 150 g.m⁻² de biomasse.

Les résultats des essais ROS et SH date 1 et SH date 2 sont particulièrement intéressants à examiner :

– dans l'essai ROS, les 3 valeurs mesurées du CAU correspondent à 3 dates d'apport pour une même densité de semis. L'augmentation des CAU avec la biomasse et celle de la biomasse avec la date est très nette :

Date du 2 ^{ème} apport	Biomasse en g.m ⁻²	CAU en %
16 mars	38	45
1er Avril	59	57
26 Avril	220	103

– sur les essais SH date de semis 1 et SH date de semis 2, on dispose de 3 valeurs résultants de 3 densités différentes, le 2^{ème} apport ayant été réalisé à la même date, (stade épi 1 cm), quelle que soit la densité :

Date de semis	Densité de semis en grains.m ⁻²	Biomasse en g.m ⁻²	CAU en %
1	80	51	61
	250	82	66
	400	96	75
2	80	41	52
	250	110	68
	400	128	73

Là encore, les CAU augmentent comme la biomasse, elle-même augmentant en fonction de la densité, l'effet de la date d'apport étant nul.

Sur l'ensemble des valeurs, l'enveloppe des différents points expérimentaux indique que le CAU de 100 % serait atteint pour une biomasse de l'ordre de 120 g.m^{-2} .

Nous avons ensuite tenté de valoriser des résultats provenant d'autres régions françaises, publiés par JUSTES (1993) et PLAS (1992).

On peut vérifier sur le graphique n° 49 qu'ils sont cohérents avec l'enveloppe proposée, en l'enrichissant dans la gamme 125 à 260 g.m^{-2} de biomasse.

5.1.2 – Discussion :

Considérons les conditions d'absorption de l'azote par le peuplement végétal, dans la gamme de biomasse 0 à 150 g m^{-2} . Pour un peuplement correctement alimenté, on considère que la teneur en azote des parties aériennes est stable, de l'ordre de $4,4 \%$ (MEYNARD, 1985, JUSTES, 1993). Les quantités d'azote absorbé sont donc strictement proportionnelles à la biomasse élaborée. Comme par ailleurs, l'évolution de la biomasse est une fonction exponentielle du temps, les quantités d'azote absorbé varient également de façon exponentielle avec le temps. Ainsi, pour une augmentation de biomasse donnée, les quantités d'azote absorbé seront fonction de la biomasse de départ.

Prenons un exemple pour illustrer ce propos :

Pour passer de 100 à 150 g ms.m^{-2} , le modèle reliant la matière sèche au somme de température nous indique une durée égale à 88 degrés jours. Les quantités d'azote absorbé dans la plante entière sont respectivement de :

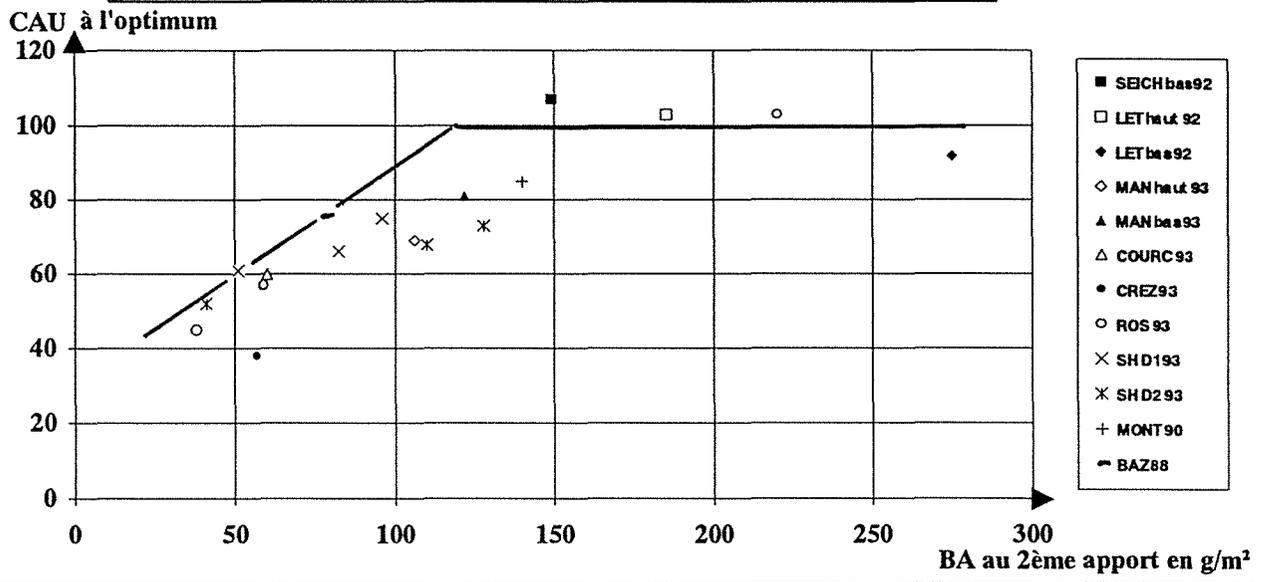
$$\frac{150 \times 4,4 \times 1,25 \times 10}{100} = 82,5 \text{ kg d'azote ha}^{-1}$$

$$\frac{100 \times 4,4 \times 1,25 \times 10}{100} = 55,0 \text{ kg d'azote ha}^{-1}$$

soit une absorption entre les 2 dates de $27,5 \text{ Kg ha}^{-1}$

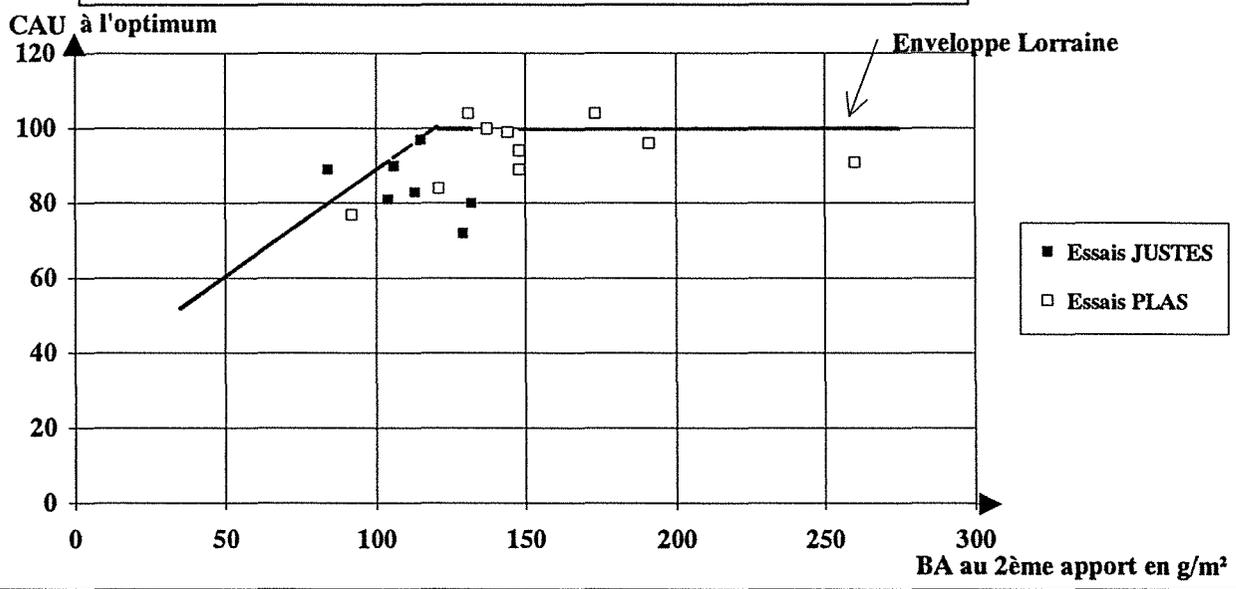
Supposons maintenant, une biomasse au départ de 50 g m^{-2} , le modèle d'évolution de la matière sèche en fonction des sommes de température nous donne pour une

RELATION CAU A L'OPTIMUM BIOMASSE AERIENNE AU DEUXIEME APPOINT



GRAPHIQUE N° 48

RELATION CAU A L'OPTIMUM BIOMASSE AERIENNE AU DEUXIEME APPOINT



GRAPHIQUE N° 49

durée de 88 degrés jours, une biomasse de 76 g ms m^{-2} , soit une augmentation de 26 g correspondant à des besoins en azote de $14,3 \text{ Kg ha}^{-1}$.

Au total, pour une même durée, mais pour des biomasses de départ différentes, les besoins en azote du peuplement varient du simple au double et c'est probablement un élément d'explication de la liaison CAU optimum et biomasse au 2ème apport. En effet, on conçoit aisément qu'à des biomasses plus faibles correspondent des capacités d'absorption réduites (voir exemple ci-dessus), l'azote non absorbé voyant son temps de présence dans le sol augmenté, la conséquence étant si on admet comme valides les résultats de l'essai cinétique (Chapitre IV – 2) une diminution du CAU.

Cette hypothèse est cohérente avec celle formulée par REMY en 1984 qui précise qu'en cas de faibles capacités d'absorption, la compétition pour l'azote tourne à l'avantage de la microflore du sol au détriment de l'absorption racinaire, les quantités d'azote ainsi organisées ne redevenant éventuellement disponibles qu'après la période d'absorption de la céréale.

Par ailleurs, on peut également tenter de préciser les raisons qui expliquent les faibles niveaux d'absorption en azote lorsque les biomasses sont réduites :

- la réduction des nitrates dans la plante est le résultat de l'activité d'un enzyme, la nitrate réductase, dont l'action est une fonction linéaire de la concentration, avec saturation, une fois un certain seuil atteint .

- cette activité de la nitrate réductase est donc liée à la présence de nitrate, mais également aux possibilités de les transformer en azote protéique, l'énergie nécessaire à cette transformation étant fourni par la photosynthèse et selon LOROT et al, 1982, cités par RECOUS, 1983, à chaque stade de développement de la plante, un équilibre synthèse protéique – photosynthèse doit être respecté. Il est donc clair que la capacité d'absorption des nitrates par le système racinaire est fonction de l'état de croissance de la plante et en particulier les organes qui assurent la photosynthèse, c'est-à-dire les parties aériennes.

5.2 – Résultats sur Maïs :

5.2.1 – L'ensemble des résultats présentés dans le tableau n° 13, indique des CAU assez variables. Il n'apparaît pas d'effet dose, ni d'effet année. En revanche, il semble se dégager un effet du type de sol :

- Les CAU des sols argilo-calcaires sont les plus faibles (60 % et 62,5 %)
- Les CAU des sols argileux et limoneux se situent de façon intermédiaire (67 %, 69,8 % et 75,6 %).
- Le CAU du sol sableux est le plus élevé (85 %).

TABLEAU N° 13

**Valeurs des CAU à l'optimum, doses correspondantes
et types de sol.**

ESSAIS	ANNEE	CAU Opti.	DOSES	TYPES DE SOL
LOIS	92	62,5	70	Argilo calcaire superficiel
BOUZ	92	75,6	80	Limon / Argile
NOV	93	60,0	80	Argilo calcaire superficiel
BOUZ	93	67,0	140	Limon / Argile
LAGN	93	69,8	80	Argile / Marnes
DIEUL	93	85	120	Sable profond d'alluvions
MOYENNE		70		

5.2.2 - Discussion :

Les résultats acquis sont bien sûr trop peu nombreux pour tenter d'établir une relation quantifiable entre CAU et type de sol. Aussi, nous nous limiterons à formuler quelques hypothèses.

Nous avons sur l'ensemble des essais (à l'exception des sols argilo-calcaires caillouteux) effectué des profils à la pelle mécanique et décrit les enracinements en profondeur et en densité (la notation se faisant en présence ou absence de racines au travers d'un cadre constitué de mailles de 5 cm de côté).

- Pour les sols argilo-calcaires reposant sur un substrat dur à partir de 40 cm peu fissuré, les nombreux profils réalisés sur blé et colza nous avaient montré que les enracinements sont pratiquement toujours limités à une quarantaine de centimètres.

- Les sols de limons (BOUZ 92, BOUZ 93) et argileux (LAGN 93) présentent des enracinements moyennement denses jusqu'à 60 cm et peu denses jusqu'à 80 cm.

– Les sols sableux quant à eux présentent des profondeurs d'enracinement équivalentes aux précédentes, mais dont la densité est plus importante jusqu'à 60 cm.

On peut dans ces conditions imaginer, que les quantités d'azote soustraites à l'absorption racinaire, par lessivage ou par organisation sont diminuées dans le cas d'enracinements denses et profonds.

5.3 – Conclusions partielles :

– Pour le blé, la prise en compte de l'état de croissance de la céréale au moment du 2ème apport d'azote permet d'expliquer un certain nombre d'échecs, quant à la valeur du CAU de 80 %, attendue à l'optimum de la courbe de réponse. Il faudra bien sûr valider ces résultats, sur des années présentant des conditions climatiques différentes de celles rencontrées en 1992 et 1993. Par ailleurs, un test sur des semis tardifs permettrait de conforter ces premières conclusions.

A propos de la date d'apport, nos résultats montrent que si le fait de différer l'apport d'azote conduit à intervenir sur une biomasse plus importante (ce qui est généralement le cas compte tenu des conditions de températures au moment du 2ème apport), alors le CAU augmente.

C'est le cas de l'essai ROS. Ce constat est cohérent avec les nombreux résultats obtenus sur des essais date d'apport.

En revanche, les résultats des essais SH Date 1 et SH Date 2 montrent que la date d'apport est sans effet sur le CAU, si pour les différentes dates, les biomasses sur lesquelles on intervient sont équivalentes.

Ceci suggère que, l'effet date sur le coefficient d'utilisation tel qu'il est généralement présenté serait plutôt un effet de la modification de l'état de croissance consécutif à l'effet date.

Si on admet cette hypothèse et qu'on recherche à valoriser l'azote au maximum (recherche de CAU élevé) on est alors conduit à abandonner l'idée de caler la date du 2ème apport sur le seul stade épi 1 cm, puisqu'il est pratiquement indépendant de la densité.

La démarche logique consisterait plutôt à rechercher un état de croissance tel que l'azote puisse être valorisé rapidement. Ceci va dans le sens de ce qui était proposé par RECOUS en 1983 :

"il faut donc retenir que plus l'azote est apporté tard et plus il est absorbé efficacement et moins il a de chances d'être perdu. Des stades d'apport minimum tallage et épi 1 cm ont été définis. Il peut être intéressant de *définir les stades les plus tardifs* auxquels l'azote peut être apporté sans qu'une carence provoque une chute de rendement".

La mise en relation des CAU avec les biomasses au 2ème apport (pour les valeurs inférieures à 150 g m^{-2} , puisqu'au-delà il semble s'établir un plateau) nous donne la relation :

$$\text{CAU} = 0,4 \text{ BA } 2^{\text{ème}} \text{ app} + 32,40 \quad r^2 = 0,75$$

15 valeurs (4 années, 11 sites expérimentaux)

Domaine de validité $38 < \text{BA } 2^{\text{ème}} \text{ app} < 150$

On peut à partir de cette relation vérifier que la valeur de la biomasse correspondant à un CAU de 80 % est de 119 g m^{-2} .

On pourrait donc admettre, à titre d'hypothèse de travail de réaliser le 2ème apport d'azote sur un état de croissance correspondant à 120 g m^{-2} plutôt qu'au stade épi 1 cm.

Nous étudierons, dans le chapitre suivant, le type de dispositif à mettre en place pour tester cette hypothèse. On pourrait par ailleurs proposer un modèle opérationnel de mesure et de prévision de la biomasse, suffisamment simple pour être utilisé en routine par les agriculteurs.

– Pour le maïs, les CAU observés sont relativement cohérents avec les résultats obtenus en Alsace sur maïs grains. Il resterait toutefois à vérifier l'hypothèse selon laquelle les types de sols, au travers des systèmes d'enracinement qu'ils permettent (profondeur et densité), ont une incidence sur la valeur du CAU à l'optimum de la courbe de réponse.

CHAPITRE VI
PERSPECTIVES

VI – PERSPECTIVES :

1 – Choix d'un dispositif pour la poursuite du travail sur le blé :

Si on veut vérifier l'hypothèse selon laquelle, la valorisation rapide de l'azote de l'engrais au 2ème apport est le résultat d'un état de croissance suffisant au moment de l'apport, il faut sur un site expérimental, créer des états de croissance très différents au moment du stade épi 1 cm. Les essais de type densité de semis x date de semis peuvent répondre à cet objectif, à condition de les compléter avec une modalité de différentes dates du 2ème apport d'azote. Par exemple, une biomasse équivalente peut être obtenue avec un semis précoce en densité faible ou un semis tardif en densité forte (MEYNARD, LIMAUX, 1987).

Le tableau n° 14 montre comment, en combinant les trois facteurs, on peut disposer d'une gamme de biomasses très différentes au moment du deuxième apport d'azote.

TABLEAU N° 14 :

Proposition de combinaison des facteurs densité, date de semis et date du 2ème apport pour tester l'hypothèse selon laquelle le C A U est indépendant de la date d'apport, mais dépendant de la biomasse au moment de l'apport.

Date de semis	Densité de semis	Date du deuxième apport d'azote		
		Epi 1 cm	Epi 1 cm + $\sum \theta_1$	Epi 1 cm + $\sum \theta_2$
Précoce	forte	BA _{III}	BA _{IV}	BA _V
	faible	BA _{II}	BA _{III}	BA _{IV}
Tardive	forte	BA _{II}	BA _{III}	BA _{IV}
	faible	BA _I	BA _{II}	BA _{III}

Le test de notre hypothèse consisterait alors à vérifier qu'à chaque niveau croissant de biomasse (de BA_I à BA_V), niveaux résultants d'une combinaison différentes des 3 facteurs, correspondent des CAU équivalents, et que les CAU s'ordonnent de telle façon que :

$$CAU_{BA_I} < CAU_{BA_{II}} < CAU_{BA_{III}} < CAU_{BA_{IV}} < CAU_{BA_V}$$

2 – Proposition d'un modèle de prévision de la date des apports d'azote :

2.1 – La date du 1er apport :

Nous avons jusqu'à présent discuté seulement de la date du 2ème apport. On peut se poser la question de savoir si le même raisonnement peut être tenu pour la 1ère date d'apport : Existe-t'il un niveau de biomasse minimum en deçà duquel le 1er apport risque d'être totalement inefficace ?

Comme cela a déjà été précisé, nous ne disposons que de peu de valeurs du CAU₁. Cependant, un certain nombre de mesures de biomasse et d'azote absorbé avant le 1er apport (donc en l'absence de fertilisation) ainsi que des mesures au moment du 2ème apport sur des parcelles soit fertilisées au 1er apport, soit non fertilisées, peuvent nous fournir des éléments de réponse intéressants.

Sur le graphique n° 50, on a représenté l'évolution des quantités d'azote absorbé par la plante entière en fonction de la biomasse des parties aériennes et ce pour trois types de traitements :

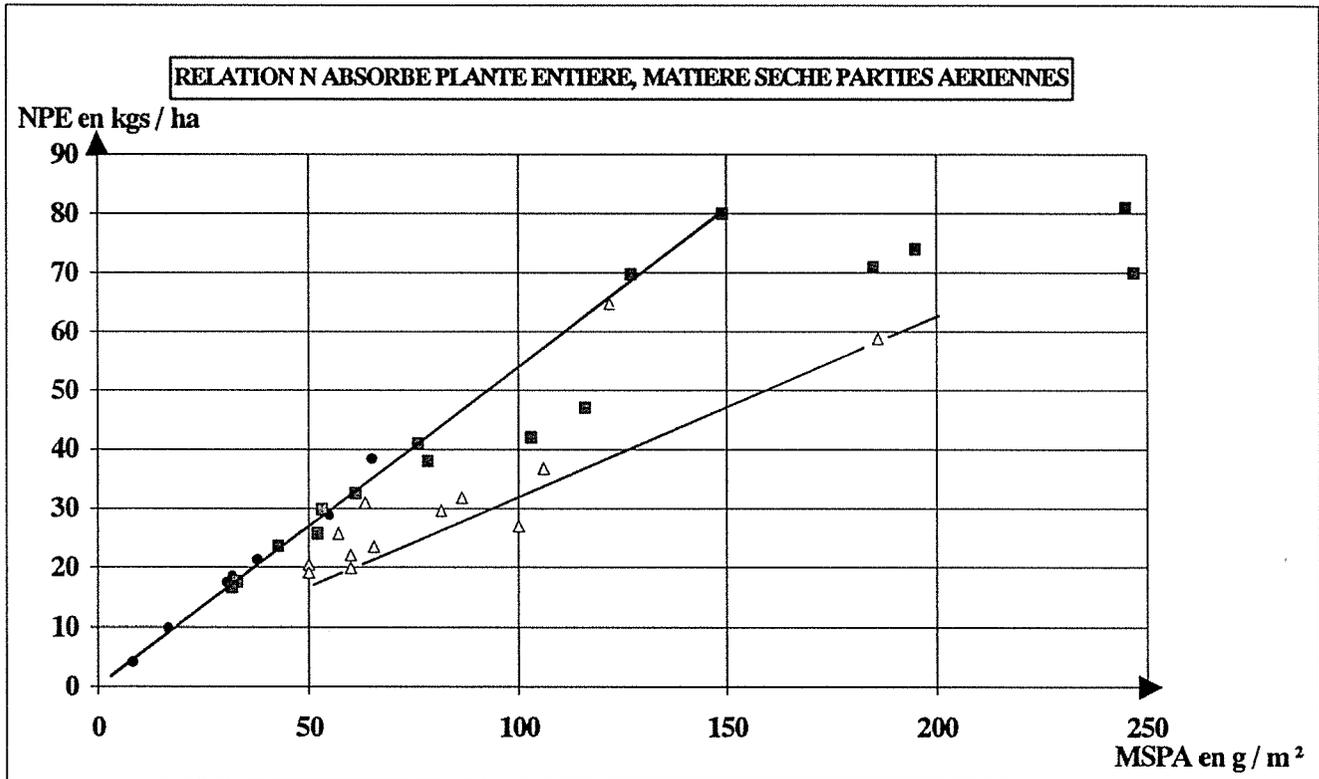
- Les ronds correspondent à des prélèvements réalisés avant le 1er apport d'azote sur les essais dose d'azote, et l'essai cinétique d'absorption suivis en 1993.

- Les carrés représentent des prélèvements réalisés avant le 2ème apport sur des parcelles ayant reçu un 1er apport.

- Les triangles correspondent à des prélèvements effectués avant le 2ème apport sur des parcelles n'ayant pas reçu d'engrais.

Que constate-t'on sur ce graphique ?

- Si on considère l'enveloppe haute du nuage de point, jusqu'à 150 g.m^{-2} de biomasse, on constate qu'elle est strictement linéaire. Si on calcule sa pente à partir des coordonnées des 2 points extrêmes (dans la gamme de biomasse 0 à 150 g), et après avoir réduit les valeurs de N_{pe} de 20 % pour obtenir des valeurs de N_{pa} (azote absorbé par les parties aériennes), on trouve une teneur en azote de 4,31 %, valeur très proche de celle proposée par JUSTES (4,4 %) qui considère que cette teneur est stable pour un blé bien alimenté, jusqu'à 155 g.m^{-2} de biomasse. On peut donc considérer que l'enveloppe représente bien les besoins maximum du blé.



- Mesures au 1^{er} apport
- ▣ Mesures au 2^{ème} apport sur parcelles fertilisées au 1^{er} apport
- △ Mesures au 2^{ème} apport sur parcelles non fertilisées

GRAPHIQUE N° 50

- Entre 0 et 40 g.m⁻² de biomasse, on n'observe pas de différence entre les parcelles fertilisées et les témoins 0 azote. On serait donc tenté de conclure que, tant que le peuplement n'a pas atteint cette valeur de 40 g m⁻² de biomasse, il est inutile de lui apporter de l'azote, puisque ses besoins maximum sont satisfaits (l'ensemble des points est sur l'enveloppe).

- L'enveloppe basse du nuage de points représente les quantités d'azote minimales absorbées, pour une biomasse donnée, en provenance du sol, puisqu'elle est constituée exclusivement de témoins non fertilisés.

Pour la valeur BA = 120 g.m⁻², la différence entre les deux enveloppes est de 65 - 37,5 = 27,5 , soit la quantité maximale d'azote absorbée en provenance de l'engrais, dans un blé alimenté à l'optimum. Si on prend en compte une valeur de 60% pour le CAU₁ (cf .V 3.3), cela représente un 1er apport de 46 Kg ha⁻¹.

2.2 – Modèle à tester :

- Mesure de la biomasse des parties aériennes et intervention avec 45 Kg d'azote ha⁻¹ , si les conditions de températures sont réunies (températures moyennes journalières supérieures à 0°C) à partir du moment où cette biomasse atteint la valeur de 40 g.m⁻² .

- Mesure de la biomasse au stade épi 1 cm : si BA ≥ 120 g.m⁻², on réalise le 2ème apport sinon, on attend que cette valeur soit atteinte pour le réaliser.

2.3 – Retour au développement :

Pour que le modèle proposé devienne opérationnel, sous condition qu'il soit validé, il est nécessaire de réfléchir à la façon dont il peut être mis en oeuvre chez les agriculteurs. Mesurer une biomasse des parties aériennes est une opération assez simple et peu coûteuse : après prélèvement sur le terrain, on coupe les racines au niveau du plateau de tallage et on sèche l'échantillon à l'étuve pendant 36 heures (en ne dépassant pas la température de 75°C, si on réalise ultérieurement une analyse d'azote total).

Dans ce cas de figure, 2 déterminations de biomasse au minimum, et en règle générale 3 déterminations seraient nécessaires pour positionner correctement les 2 apports d'azote.

C'est pourquoi nous avons réfléchi à la mise au point d'un modèle qui permette, à partir d'une mesure de biomasse, de prévoir l'évolution de celle-ci en fonction des sommes de températures. Pour ce faire, nous avons utilisé les résultats de l'essai ROS, sur lequel les déterminations des biomasses ont été effectuées sur 9 traitements.

Afin de disposer de valeurs de biomasses dans la gamme qui nous intéresse (0 à 140 g), nous avons procédé de la manière suivante :

– établissement pour chacun des traitements (on rappelle que chaque traitement représente 1 dose et 1 date d'apport d'azote) de la relation qui relie la biomasse aux sommes de températures, à partir du même modèle que celui retenu pour l'azote absorbé (modèle logistique, les valeurs des coefficients a, b et c pour les différents traitements sont présentées en annexe n° 8).

– calcul, à partir de l'équation de régression des valeurs de biomasses et des vitesses de croissance correspondantes à 600, 800, 900, 1000 et 1100°C.

– mise en relation des vitesses de croissance avec les biomasses correspondantes.

Le graphique n° 51 montre que pour un niveau de biomasse donné, la vitesse de croissance est équivalente quelque soit le traitement (pour des raisons de simplicité, l'ajustement linéaire a été retenu. En toute rigueur la relation qui relie Y' à Y, c'est-à-dire la vitesse de croissance à la biomasse, dans le modèle logistique, est quadratique. Dans notre gamme de travail (0 à 1 100°C) qui correspond à la partie exponentielle de la croissance en fonction du temps, on peut assimiler la partie croissante de la fonction parabole à une droite).

La vitesse de croissance est donnée par la relation :

$$Y' = 4,394.10^{-3} X + 0,019 \quad r^2 = 0,98$$

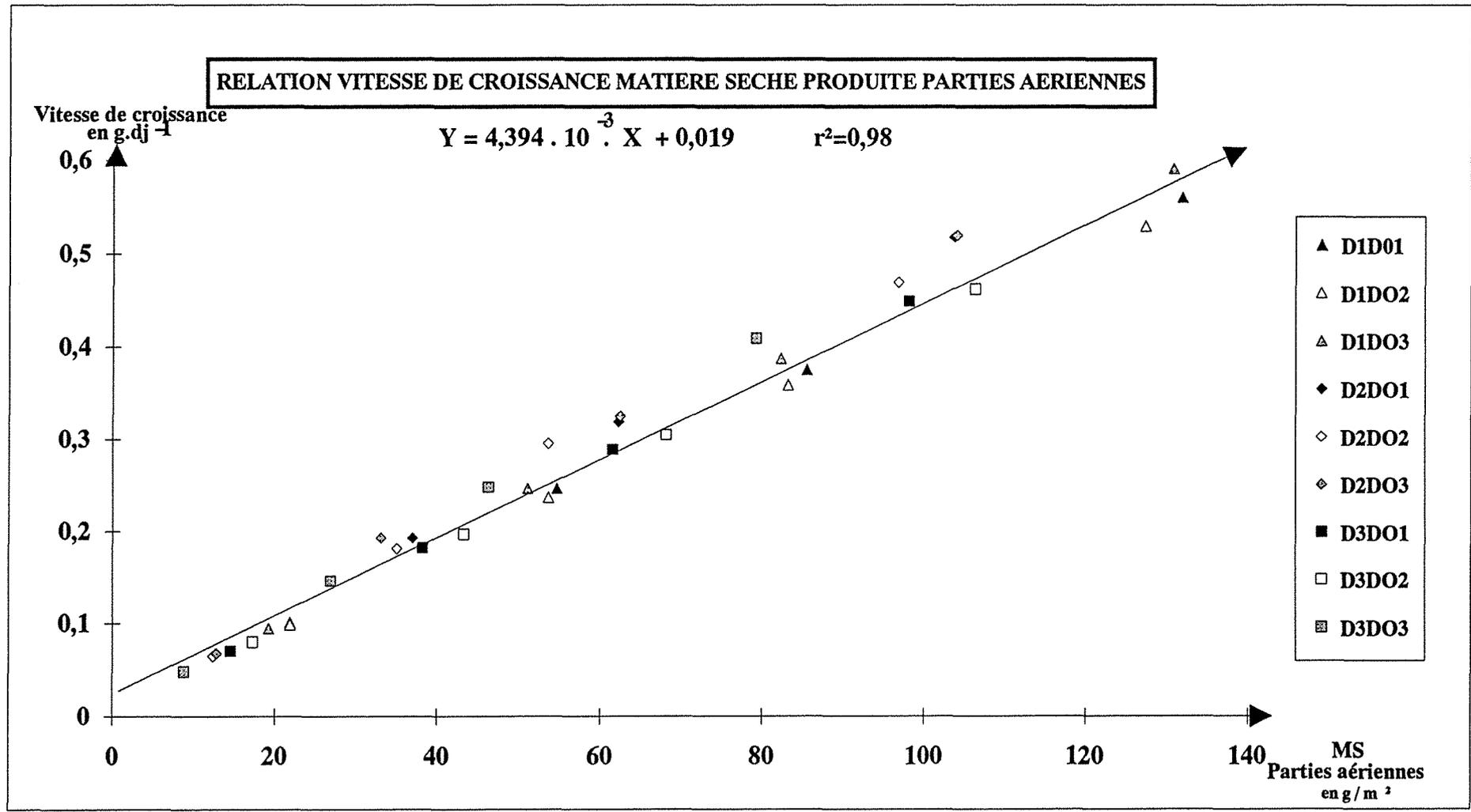
9 traitements, 36 valeurs

Domaine de validité $0 < X < 140$

Y' = vitesse de croissance en $g m^{-2} dj^{-1}$ au temps T₁

X = biomasse en $g m^{-2}$ au temps T₁

Nous disposons donc d'une expression qui relie de façon quantitative, la vitesse de croissance à la biomasse des parties aériennes.



GRAPHIQUE N° 51

Lorsqu'on ne dispose pas de relation continue entre la croissance et le temps, mais seulement de deux valeurs de biomasses (MS_1 et MS_2) mesurées au temps T_1 et T_2 **GREENWOOD (1965)** propose l'expression suivante de la vitesse de croissance :

$$Y' = \frac{(\text{Log } MS_2 - \text{Log } MS_1) \cdot MS_1}{T_2 - T_1}$$

En égalant ces deux expressions, on trouve :

$$4,394 \cdot 10^{-3} MS_1 + 0,019 = \frac{(\text{Log } MS_2 - \text{Log } MS_1) \cdot MS_1}{T_2 - T_1}$$

$$\text{ou } T_2 - T_1 = \Delta \Sigma \mathcal{O} = \frac{(\text{Log } MS_2 - \text{Log } MS_1) \cdot MS_1}{4,394 \cdot 10^{-3} MS_1 + 0,019}$$

$\Delta \Sigma \mathcal{O}$ = Temps séparant T_2 de T_1 en somme de températures.

On peut donc, à partir d'une valeur mesurée de MS_1 calculer les sommes de températures nécessaires pour atteindre une biomasse ayant pour valeur MS_2 .

Nous avons pu tester ce modèle sur 6 essais pour lesquels nous disposons de 2 mesures de biomasses et des sommes de température séparant les deux prélèvements (graphique n° 52). La comparaison des sommes de températures calculées et mesurées, indique que pour 3 sites, la prévision est très bonne pour les 3 autres cas, le modèle sous estime la durée.

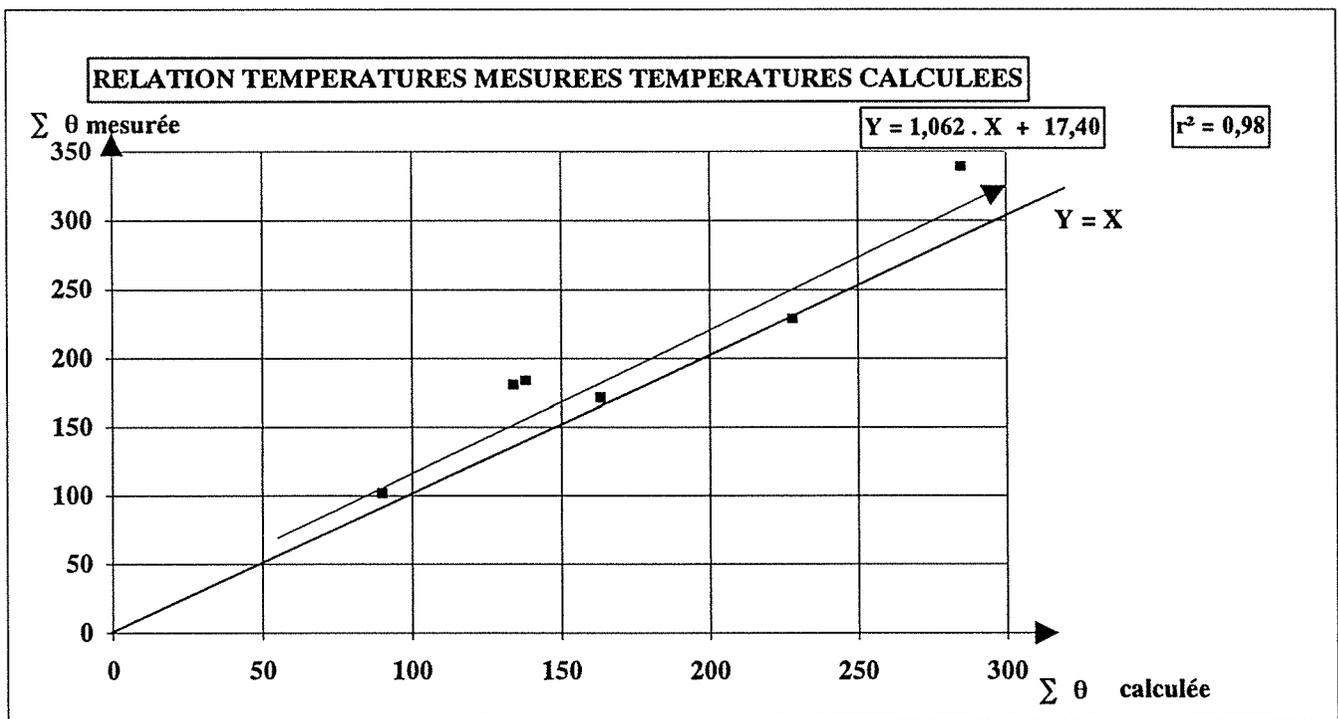
On peut mettre en cause la représentativité des postes météorologiques qui ont servis pour le calcul des sommes des températures. Il faudra, de toute façon tester ce modèle sur beaucoup plus de situations.

Si on admet provisoirement sa validité, on peut calculer la durée nécessaire pour passer de 40 g.m^{-2} à 120 g.m^{-2} de biomasse : on trouve 225 degrés jours.

On peut alors, à partir d'une mesure de biomasse assez précoce sous réserve d'avoir accès aux températures en temps réel prévoir la date correspondant au 1er apport, le 2ème apport intervenant 225 d.j après.

2-4 Discussion ,conclusion partielle :

La mesure de la biomasse des parties aériennes a été proposée par **MEYNARD en 1985** comme outil de prévision du nombre d'épis potentiel et par conséquent du nombre de grains et des besoins en azote du peuplement.



GRAPHIQUE N° 52

Toutefois, la difficulté d'intervenir pour le prélèvement précisément au stade épi 1 cm, même si des formules de correction ont été proposées en fonction de la hauteur de l'apex, (MEYNARD 1985, JACQUET 1988) a pu décourager les techniciens du développement d'utiliser ce test.

Si un modèle opérationnel de prévision de la biomasse à partir des sommes de températures était validé, on pourrait envisager, partant d'une mesure réalisée entre le premier apport et le stade épi 1cm par exemple et l'examen de ce stade :

- De prévoir la biomasse à ce stade et de revoir éventuellement les besoins en azote (à condition que les modèles qui relient le nombre d'épis à la biomasse soient mis à jour pour les variétés actuelles).

- De décider ou non de la réalisation immédiate du 2ème apport et dans le cas d'un report, d'en prévoir la date à partir du suivi des températures, l'objectif étant alors de valoriser au mieux par la recherche d'un CAU élevé, la dose calculée.

3 – Poursuite des travaux sur maïs:

Les résultats acquis montrent que les CAU moyens observés sur maïs sont inférieurs à ceux observés sur blé. Ces résultats ne sont pas surprenants dans la mesure où les apports d'azote ont été réalisés au semis, c'est à dire à une époque où les besoins instantanés sont nuls. On peut imaginer que, comme pour le blé, un minimum de biomasse soit indispensable pour valoriser rapidement l'azote apporté.

Quelques résultats d'azote absorbé entre le semis et la floraison femelle obtenus en 1993 sur l'essai de Dieulouard, permettent d'étayer cette hypothèse. Le tableau n° 15 montre que jusqu'au stade 7 feuilles les quantités d'azote provenant apparemment de l'engrais (Nf) sont pratiquement nulles, les biomasses étant de l'ordre de 30 g.m⁻². Il serait donc intéressant de tester l'hypothèse suivante :

Un apport d'azote réalisé au stade 7 feuilles ne modifie pas les quantités d'azote absorbées et les biomasses élaborées, par rapport à un apport réalisé au semis ; de plus il permet l'obtention d'un CAU plus élevé, dans la mesure où la biomasse présente au moment de l'apport atteint une certaine valeur.

Les recommandations actuelles de l'AGPM vont dans ce sens puisqu'elle retient un CAU de 60 % au semis et de 80 % au stade 8 feuilles.

Il reste à réfléchir à l'élaboration d'un protocole expérimental pour tester cette hypothèse.

TABLEAU N° 15

Evolution des teneurs en azote, des biomasses et des quantités d'azote exportées sur un traitement fertilisé et un témoin sans azote.

Stades	D1Do3 = 210 U au semis			T0			Nf
	% N	MS	N _{PE}	% N	MS	N _{PE}	
3 f	4,95	2,71	1,49	4,67	2,38	1,24	0,25
7 f	4,14	31,49	14,48	3,85	30,08	12,86	1,62
10 f	3,62	149,62	60,18	3,07	135,30	46,15	14,03
Flo. Fe.	1,77	933,00	183,50	1,11	790,00	97,40	86,1

MS en g.m⁻²

N_{PE} et Nf en kg.ha⁻¹

CHAPITRE VII
CONCLUSION GENERALE

VII – CONCLUSION GENERALE :

Rappel des objectifs :

Il faut d'abord rappeler que la démarche expérimentale et les résultats des travaux présentés dans ce mémoire sont justifiés par la nécessité qu'il y a de proposer au développement agricole une méthode de raisonnement de la dose d'azote qui soit simple et suffisamment fiable pour être utilisée avec succès. C'est dans cet esprit, qu'une écriture simplifiée du bilan azoté a été proposée en région Lorraine.

Dans celle ci les besoins du blé sont équilibrés par l'azote provenant du sol (estimé à partir des quantités d'azote absorbées par un témoin non fertilisé) et par l'azote provenant de l'engrais (quantité apportée, affectée d'un coefficient apparent d'utilisation) soit :

$$bY = N_s + CAU \cdot X$$

De nombreux travaux ont été engagés pour paramétrer les différents termes de cette équation :

- la valeur N_s est actuellement accessible à partir de grilles prédictives
- la valeur Y se raisonne à partir de la mesure des potentialités agricoles, réalisée sur différents dispositifs, en particulier le réseau O P A L (Observatoire des Potentialités Agroclimatiques en Lorraine).
- la valeur de b (besoin par unité de production) ou de β lorsqu'on utilise le nombre de grains comme indicateur des besoins en azote, relativement plus indépendante des pédoclimats est généralement issue des résultats d'expérimentations conduites au niveau national (I.N.R.A., I.T.C.F. et A.G.P.M.).
- pour ce qui concerne le CAU, à l'exception de l'importante valorisation des essais doses d'azote réalisée par PLAS en POITOU CHARENTES, peu de références existaient en FRANCE et les quelques résultats disponibles en Lorraine méritaient d'être abondés. De plus il restait à cerner les conditions de variations de ce coefficient et à tenter de les expliciter, pour proposer une valeur susceptible d'être régulièrement atteinte.

Un dispositif expérimental a été mis en place pendant les campagnes 1992 et 1993 pour répondre à ces questions.

Les résultats acquis :

Parallèlement à la recherche des causes de variation du CAU, nous avons pu, grâce à la collaboration avec l'I.N.R.A. de LAON, et le service Sciences du Sol de l'E.N.S.A.I.A. en utilisant l'isotope ^{15}N , confirmer un certain nombre de résultats acquis.

– **Le niveau des fournitures réelles du sol en azote est indépendant de la dose apportée**, et même s'il est souvent différent de celui des fournitures apparentes, cela justifie qu'une valeur unique de N_s soit utilisée, quelle que soit la dose.

Cet aspect est important, car c'est la première fois, à notre connaissance, que des résultats obtenus à partir de l'azote ^{15}N servent à justifier le bien fondé de l'utilisation des témoins 0 azote en tant que prédiction des fournitures du sol. Par voie de conséquence, l'utilisation d'un CAU se trouve également justifiée.

– **L'incidence du temps de présence de l'engrais dans le sol sur la variation du CAU**, a été quantifiée. Pour le blé nous confirmons l'hypothèse de REMY en 1984 selon laquelle, plus l'engrais est longtemps dans le sol plus il a de chance d'être soustrait à l'absorption racinaire, au profit de l'organisation microbienne.

Toutefois, le modèle établi n'a pas de caractère opérationnel. Il ne fait que de nous renforcer dans l'idée que, si on souhaite atteindre des niveaux de CAU élevés (80% et plus) l'engrais doit séjourner dans le sol le moins longtemps possible, et donc être apporté à une époque où le peuplement a des capacités d'absorption suffisamment importantes, pour être utilisé rapidement.

– Nous avons par ailleurs mis en évidence pour le blé **l'importance de la biomasse présente au moment des apports d'azote**, sur le coefficient d'utilisation. Les résultats sur plusieurs années climatiques sont certes encore trop peu nombreux, mais ils vont tous dans le même sens, à savoir que des CAU maximum ne seraient observés que si les biomasses existantes au moment de l'apport présentent une valeur minimale, de l'ordre de 40 g.m^{-2} pour le 1er apport et 120 g.m^{-2} pour le 2ème apport, correspondant à des capacités d'absorption suffisamment importantes.

Un dispositif expérimental est d'ores et déjà en place pour tester la validité de ces résultats.

– Nous confirmons enfin, pour le maïs, que dans la mesure où l'azote est apporté au semis, le **CAU de 80 % n'est presque jamais atteint**, la majorité des valeurs observées se situant entre 60 et 70 %. Même si ces résultats sont peu nombreux, ils confortent les préconisations faites par l'AGPM. Il restera pour cette espèce à tester de façon précise les conséquences d'apports effectués à des stades plus tardifs (entre 4 et 8 feuilles), par exemple, sur le niveau du CAU obtenu.

– En conclusion, nous proposons de **tester pour le blé un modèle opérationnel** qui permette à partir du suivi des sommes de température de prévoir la date de réalisation de ces valeurs de biomasses et donc des apports correspondants. Outre le fait que ce type de démarche risque de bouleverser quelque peu les habitudes (affirmer que dans certains cas, le stade épi 1 cm n'a pas grande signification par rapport aux besoins en azote et qu'il vaut mieux se caler sur un état de croissance, risque de surprendre, voire de dérouter les agriculteurs), il est clair qu'il faudra en tester les conséquences sur l'organisation du travail dans les exploitations. Par exemple, retarder le 2ème apport risque de concurrencer d'autres travaux, telle que la préparation des terres à maïs.

En outre, il faudra réfléchir à tester ces modèles sur d'autres espèces en particulier, l'orge de printemps, l'orge d'hiver et le colza.

BIBLIOGRAPHIE

AZAM F., SIMMONS F.W., MULVANEY R.L., 1993

Immobilization of ammonium and nitrate and their interaction with native N in three Illinois Mollisols.

Bio Fertil Soils, 15, 50-54

BOIFFIN J., CANEILL J., MEYNARD J.M., SEBILLOTTE M., 1981

Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse.

I - Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional.

Agronomie, 1(7), 549 - 558

BOIFFIN J., CANEILL J., MEYNARD J.M., SEBILLOTTE M., 1982

Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse.

III - Influence des variations pédologiques; conséquences pour la conduite des cultures.

Agronomie, 2(5), 417 - 428

BOYD D.A., NEEDHAM P., 1976

Factors governing the effective use of nitrogen.

Span, 19(2), 68 - 70

BROADBENT F.E., CARLTON A.B., 1978

Field trials with isotopically labeled nitrogen fertilizer.

In "Nitrogen in the Environment", Vol 1 (Nielsen and Mc Donald Eds) Academic Press, 1- 41

CARLOTTI B., 1992

Recueil des bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures.

Document CORPEN - 120 p. + annexes

CERF M., MEYNARD J.M., 1988

Enquête sur la mise en oeuvre des méthodes de fertilisation raisonnée.

3ème Forum national du COMIFER, recueil des communications, 5 - 12

CHABALLER P.F., GUIRAUD G., PICHOT J., REMY J.C., 1975

Evolution de l'azote des engrais dans les sols cultivés. Utilisation de l'azote 15.

Compte rendu de fin d'étude (I.R.A.T.C.U., I.N.R.A., C.E.A.) 47 p.

CHENET T. 1985

Dynamique de la biomasse microbienne du sol en relation avec la minéralisation de l'azote.

D.A.A., E.N.S.A.R.

GREENWOOD E.A.N., GOODALL D.W., TITMANIS Z.V., 1965

The measurement of nitrogen deficiency in grass swards.

Plant Soil, 23, 97 – 116

GUIRAUD G., FARDEAU J.C., 1977

Organisation et minéralisation de l'azote dans le sol. Etude au moyen de l'azote 15.

Ann. Agron., 28(4), 361 – 378

HART P.B.S., RAYNER J.H., JENKINSON D.S., 1986

Influence of pool substitution of the interpretation of fertilizers experiments with 15 N

J. Soil Sci. 37, 389 – 403

HERBERT J., 1969

La fumure azotée du blé tendre d'hiver.

Bull. Tech. d'Info. 244, 755 – 766

JACQUET E., 1988

Test d'un itinéraire technique économique adapté à des situations à faible potentialités, pour le blé d'hiver.

D.A.A. I.N.A.P.G. 96 p. + annexes

JENKINSON D.S., FOX R.L., RAYNER J.H., 1985

Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen – the so-called priming effect.

J. Soil Sci 36, 425 – 444

JUSTES E., 1993

Diagnostic de la nutrition azotée du blé, à partir de la teneur en nitrate de la base de la tige. Application au raisonnement de la fertilisation.

Thèse I.N.A.P.G., 227 p.

LAURENT F., 1987

L'optimum technique ou économique : Quelques réflexions sur une notion difficile à apprécier, difficile à utiliser.

Perspectives agricoles 115, 74 – 75

LIMAUX F., 1985

Les facteurs de variation du rendement du blé en Lorraine. Influence des différentes composantes et du milieu sol – climat.

Mémoire de Relance Agronomique, 64 p. + annexes

LIMAUX F., 1988

Potentialités parcellaires.

COMIFER – 3ème Forum national de la fertilisation raisonnée, 27 – 31

LIMAUX F., 1989

Mise au point d'itinéraires techniques pour les petites terres en Lorraine.

Colloque "Ecophysiologie du blé" Versailles Mars 1989, 10 p. A paraître dans les "Colloques de l'INRA".

LIMAUX F., 1989

Intérêt du zonage agroclimatique pour l'établissement d'itinéraires techniques – Exemple des petites terres en Lorraine.

Commission d'agrométéorologie de l'INRA – Séminaire du Mars 1989, 195 – 202

LIMAUX F., 1991

Adaptation de la fertilisation azotée à des systèmes céréaliers moins intensifs.

COMIFER – 1er Forum européen de la fertilisation raisonnée, 168 – 178

LIMAUX F., MEYNARD J.M., 1992

Céréaliculture : la désintensification d'ores et déjà rentable.

Aménagement et Nature, 105 , 16 – 19

LIMAUX F., AUBRY C., BOURZEIX A., CONSTANT J.B., 1993

Fertilisation azotée du blé en Lorraine : constat et proposition pour de nouvelles pratiques.

Perspectives agricoles – Avril 93, 179, 58 – 66

LOROT B., LINDEMANN Y., GUIRAUD G., FOURBET J.F., CHRISTMANN J., 1982

Utilisation en plein champ de l'isotope ¹⁵N sur betteraves sucrières. Beauce 1980.

Revue du département des sols n° 10 – I.N.A.P.G. – 149 p.

MACHET J.M., PIERRE D., RECOUS S., REMY J.C., 1987

Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures.

C.R. Acad. Agric. Fr., 73 (3), 39 – 55

MEYNARD J.M., BOIFFIN J., CANEILL J., SEBILLOTTE M., 1981

Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en champagne crayeuse.

II – Type de réponse à la fumure azotée et application à la méthode du bilan prévisionnel.

Agronomie, 1(9), 795 – 806

MEYNARD J.M., 1985

Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver.

Thèse I.N.A.P.G., 244 p. + annexes

MEYNARD J.M., LIMAUX F., 1987

Prévision des rendements et conduite de la fertilisation azotée. Cas du blé d'hiver.

C.R. Acad. Agric. Fr., 73, 117 – 132

PLAS D., 1992

Adaptation régionale du raisonnement de la fertilisation azotée : cas du blé tendre en AUNIS.

Thèse U.T.C., 174 p.

RECOUS S., 1988

Dynamique de l'azote en sol cultivé : organisation microbienne des formes ammoniacale et nitrique, conséquences sur l'utilisation de l'azote de l'engrais par une culture de blé

Thèse université Claude Bernard – Lyon I – 170 p. + annexes

RECOUS S., 1983

Utilisation réelle de l'engrais azoté par une culture de blé; 4 années d'expérimentation avec 15 N.

Doc. multigraphié, I.N.R.A. – I.T.C.F., 57 p.

REMY J.C., HEBERT J., 1977

Le devenir des engrais azotés dans le sol.

C.R. Acad. Agric. Fr, 63 (11), 700 – 710

REMY J.C., VIAUX Ph., 1983

La fertilisation azotée du blé tendre en système intensif en France.
Perspectives agricoles 67, 26 – 34

REMY J.C., 1984

Contribution à l'approche du coefficient d'utilisation de l'azote par la plante.
Signification de la valeur A pour l'azote.
Meeting GRONINGEN – Doc dactylographié

SEBILLOTTE M., 1978

Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique.
C.R. Acad. Agric. Fr. 64(11), 906 – 914

STEELE K.W., SAUNDERS W.M.H., WILSON A.T., 1980

Transformation of ammonium and nitrate fertilizers in two soils of low et high
nitrification activity.
J. of Agric. Res., 23, 305 – 312

TOMASSONE R., DERVIN C., 1993

Comment interpréter les résultats d'une régression non linéaire ?
Collection STAT-ITCF, 109 p.

VIAUX P., 1980

Fumure azotée des céréales d'hiver.
Perspectives Agricoles 43, 10 – 26

VONG P.C., 1987

Contribution à l'étude cinétique des différents compartiments azotés contenus dans des
sols cultivés après apport de fertilisants minéraux et organiques.
Thèse I.N.P.L., 217 p. + annexes

WHITMORE A.P., ADDISCOTT T.M., 1987

A function for describing nitrogen uptake, dry matter production and rooting by wheat
crops.
Plant and Soil 101, 51 – 60.

Fumure azotée du blé

Tenez compte des fournitures du sol

VOUS POUVEZ PREVOIR LEURS VALEURS A PARTIR		DU SYSTEME DE CULTURE		
DU TYPE DE SOL		Système céréales	Système élevage	
		Pas de précédent prairie depuis au moins 6 ans et/ou pas d'apport de fumier ou fréquence d'apport > à 4 ans	prairie retournée depuis moins de 6 ans et/ou fréquence d'apport de fumier inférieur à 4 ans	
Classe de texture	Profondeur du sol en cm (Tarière)	précédent : colza – pois tournesol – pommes de terre	précédent maïs fourrage	
Sols à cailloux				
A	< 50	60	60	50
LS	50 – 75	75	75	{60}
SL	> 75	85	{90}	{70}
LS – SL	60 – 80	75	{80}	{75}
A – AL	60 – 80	95	{100}	{80}
SL	> 80	85	{95}	
A – AL – LA – L	80 – 100	100	110	85
LS	100 – 120	105	{120}	{100}
L	> 100		{120}	125
A – AL – LA – L	100 – 120	125	135	{130}
L – LS		125	160	{120}
L	> 120		160	{130}
S			{120}	100
A – AL – LA		150	160	150

Si les précédents sont différents de ceux figurant dans ce tableau modifiez les valeurs des fournitures

PRECEDENT	Luzerne	Céréales pailles enlevées	Maïs grain et céréales pailles enfouies	Maïs fourrage
SYSTEME				
CEREALES	20	-20	-40	-20
ELEVAGE	20	-20	-40	

Attention : quels que soient les systèmes ou les précédents, les fournitures ne sont jamais inférieures à 50 kg d'azote.

{ } valeurs estimées

Fumure azotée du maïs ensilage

Tenez compte des fournitures du sol

**VOUS POUVEZ PREVOIR
LEURS VALEURS (kg/ha)
A PARTIR**

DU SYSTEME DE CULTURE

DU TYPE DE SOL

		Prairie retournée depuis						Fréquence des apports de fumier	
		- de 3 ans		3 à 5 ans		+ de 5 ans ou pas de prairie			
Matériau dominant	Profondeur du sol en cm (Tarière)	1 à 3 ans	> 3 ans	1 à 3 ans	> 3 ans	1 à 3 ans	> 3 ans		
ARGILE > 25 % argile	< 80 + hydromorphie					65			
	80 – 100	175	120	{135}	{110}	100	100		
	> 100					145	100		
LIMON > 40 % limon < 25 % argile	80 – 100	200	145	135	110	120	90		
	> 100					175	145		
SABLE < 25 % argile < 40 % limon	< 80			90		90			
	80 – 100	140		90		90			
	100 – 120	155		145		145			
	> 120			165		165			
ARGILO-CALCAIRE > 25 % argile + cailloux > 5 % calcaire total		Fumier tous les 3 à 4 ans							
		Pour la culture			sur le précédent ou l'antéprécédent				
		90			55				
			140			100			

{ } valeurs estimées

- pour les valeurs non indiquées (peu ou pas d'observations) on peut les évaluer par comparaison aux données connues.
- s'il n'y a jamais d'apport de fumier, prendre en compte les valeurs des fournitures indiquées en gris en les diminuant de 40 unités
- dans tous les cas, les valeurs minimales des fournitures ne sont jamais inférieures à 50 unités / ha

Annexe n°3

TYPES DE SOL : DEFINITION DES CLASSES DE TEXTURE

<p>A = Argiles > 40% argile</p> <p>AL = Argiles > 25% argile Limoneuses > 40 % limons</p>	<p>LA = Limons > 40% limons Argileux 15 à 25% argile</p> <p>L = Limons > 65% limons < 15% argile</p> <p>LS = Limons 45 à 65% limons Sableux < 15% argile</p>	<p>SL = Sables 20 à 50% limons Limoneux < 25% argile</p> <p>S = Sables < 25% limons < 15% argile</p>
--	--	---

A PARTIR DE CETTE GRILLE, CALCULEZ LA DOSE D'AZOTE A APPORTER

1 EXEMPLES 2

1 Choisir un objectif de rendement (références de rendements parcellaires observés – Fiches potentialités)	95 qx/ha	60 qx/ha
2 Multipliez par 3 kg d'azote par quintal pour connaître les besoins totaux de la culture	$95 \times 3 = 285$	$60 \times 3 = 180$
3 Consultez la grille (voir au verso) pour estimer les fournitures du sol	Système élevage précédent maïs fourrage limons profondeur 110 cm 125	Système céréales précédent colza argileux + cailloux profondeur < 50 cm 60
4 Déduire les fournitures des besoins totaux 2 - 3	$285 - 125 = 160$	$180 - 60 = 120$
5 Multipliez ce résultat par 1,25 pour tenir compte de l'azote non utilisé et vous trouverez la <u>dose à apporter</u>	$160 \times 1,25 = 200$	$120 \times 1,25 = 150$

Attention : la valorisation de cette dose totale est liée au respect du fractionnement et des dates d'application :

- 1er apport : attendre fin février avec 60 unités au maximum
- 2ème apport : un peu avant épi 1 cm.

Annexe n°4

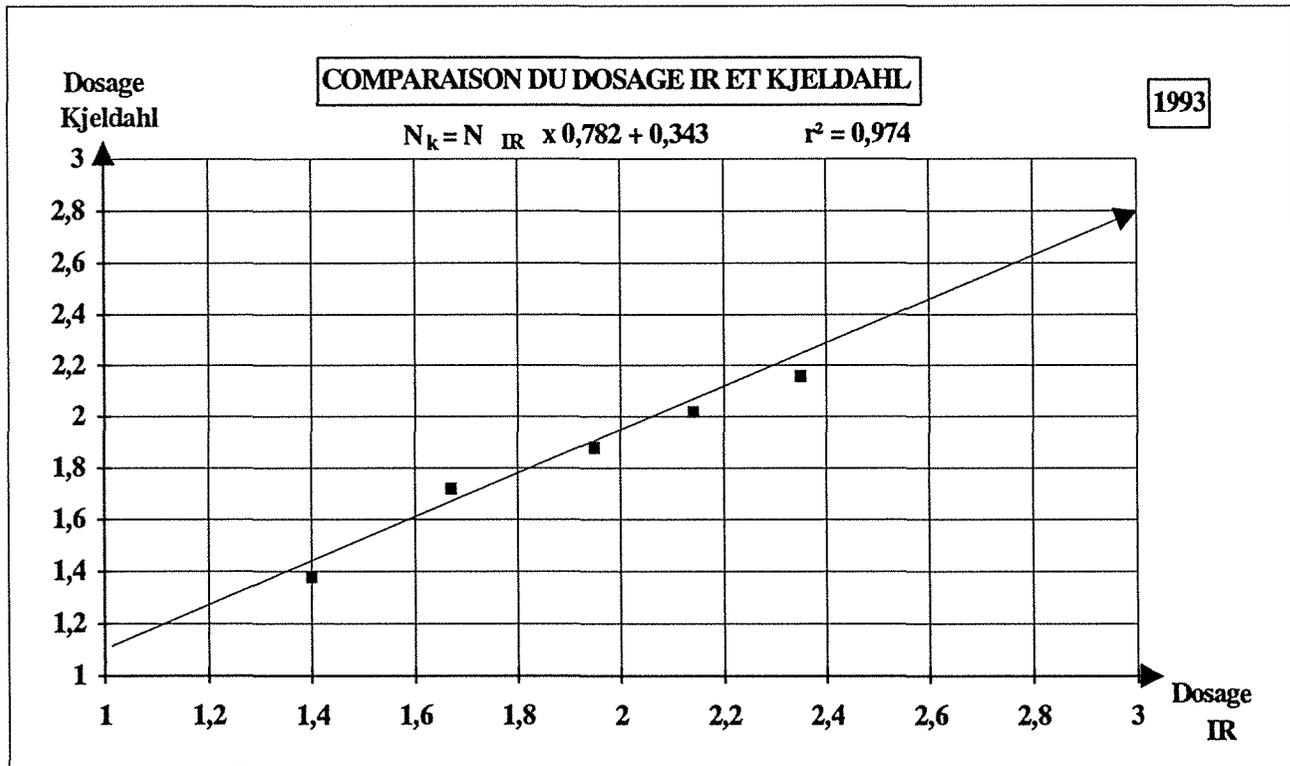
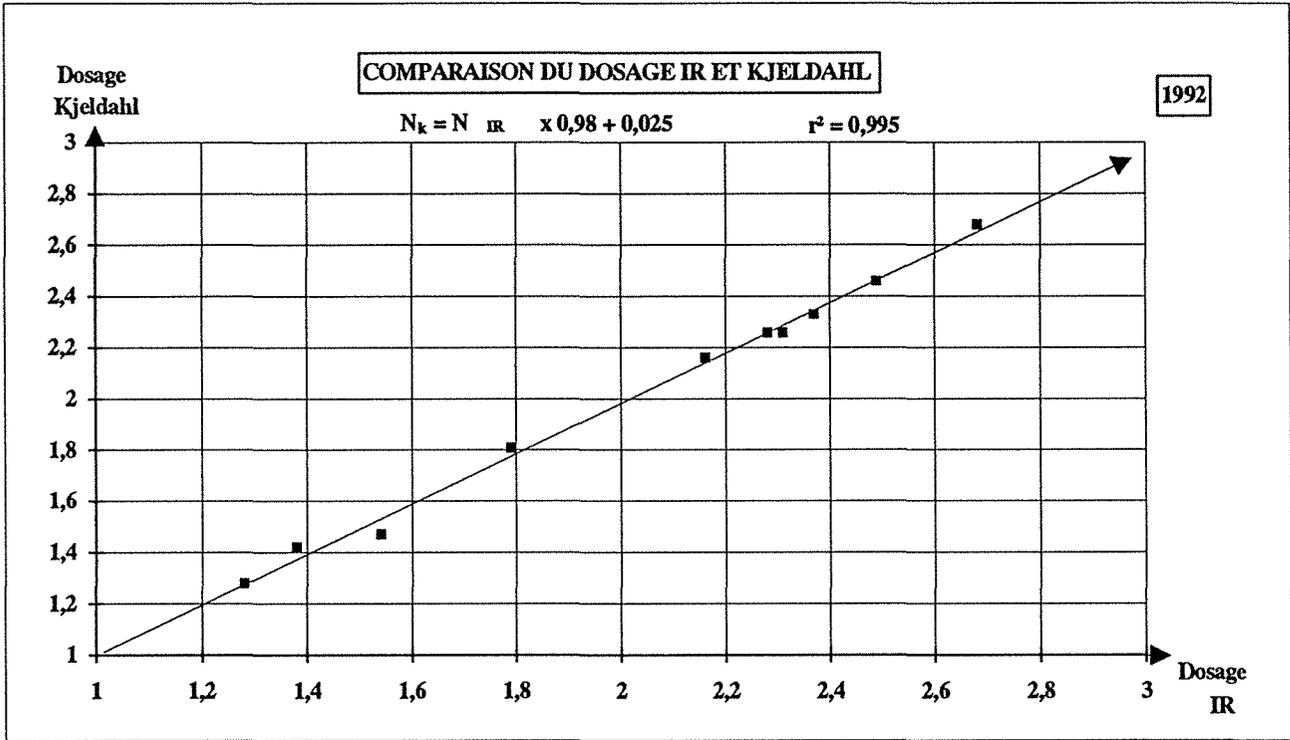
Caractéristiques physico-chimiques des sols

retenus pour les expérimentations

Année	Site	Arg en %	L.F. en %	L.G. en %	S.F. en %	S.G. en %	pH	CaCo3 en ‰	C en ‰	P2O5 en ‰	K2O en ‰
1992	SEICH haut	32,6	21,4	12,8	4,8	23,7	7,8	307	26,6	0,316	0,618
	SEICH bas	43,4	27,8	19,3	2,6	3,6	7,8	36	19,8	0,218	0,612
	LET haut	23,9	19,0	14,8	32,4	7,6	5,8	2	13,1	0,135 D	0,313
	LET bas	39,5	23,5	9,9	19,0	5,3	6,4	2	16,5	0,169 D	0,373
	BOUZ bas	54,2	30,5	10,0	3,2	2,1	7,0	0	25,0	0,233	0,365
	BOUZ haut	26,0	36,2	16,8	5,7	16,2	6,6	0	15,0	0,145 D	0,341
	LOIS	29,1	17,9	11,8	22,4	18,8	7,9	260	22,6	0,270	0,385
	DOM	21,0	15,0	15,2	36,1	12,7	6,8	0	13,3	0,240 D	0,122
1993	MAN haut	38,1	19,5	11,0	8,8	18,5	8,0	301	24,4	0,490	0,874
	MAN bas	48,2	21,4	12,2	6,8	7,7	8,0	92	21,8	0,269	0,767
	COURC	21,4	25,1	22,4	11,1	17,8	6,8	0	12,9	0,52 D	0,480
	CREZ	51,7	24,0	8,6	5,6	4,8	8,0	174	30,7	0,042	0,335
	NOV	42,9	21,6	11,5	3,6	16,3	8,0	216	25,0	0,094	0,666
	DIEUL	22,6	18,3	13,2	30,4	11,8	7,1	0	20,7	0,114	0,140
	LAGN	41,0	29,8	17,0	5,3	3,5	8,0	52	20,8	0,166	0,487

P2O5 : JORET HEBERT sauf D (DYER)

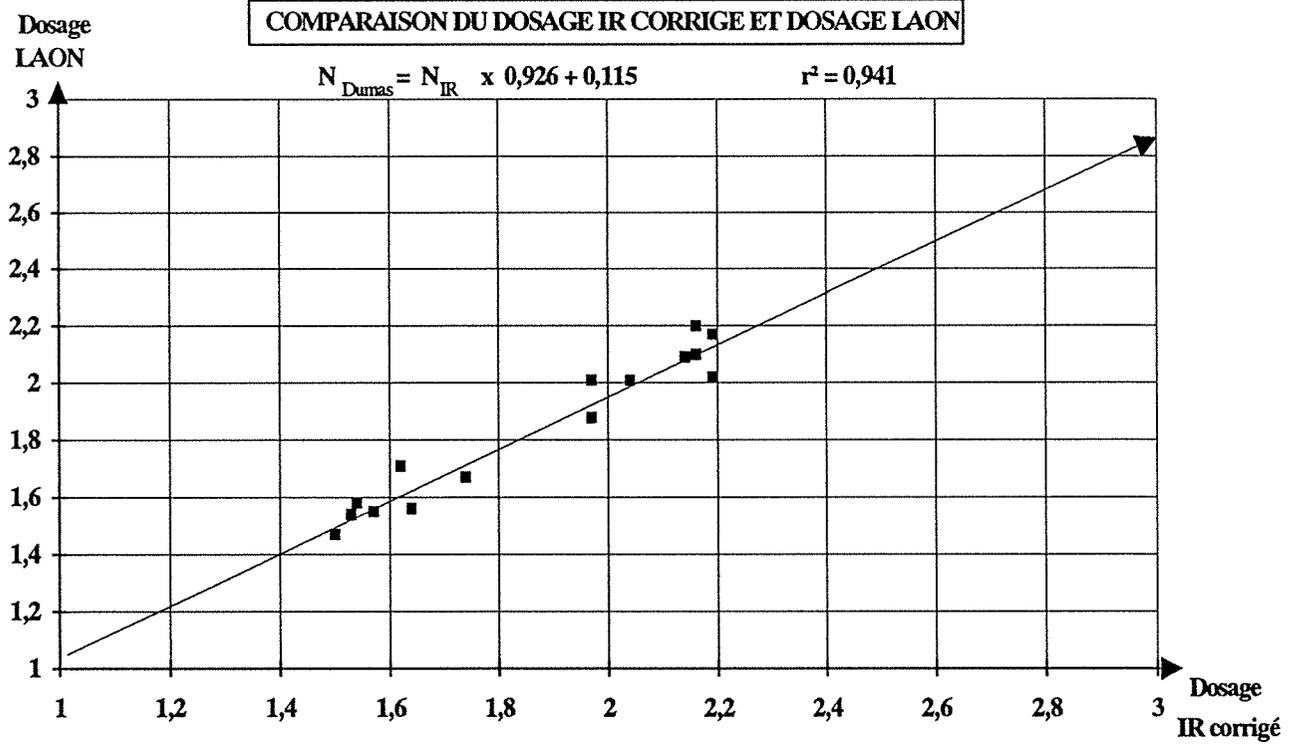
Annexe n° 5



Annexe n° 5

COMPARAISON DU DOSAGE IR CORRIGE ET DOSAGE LAON

$N_{Dumas} = N_{IR} \times 0,926 + 0,115$ $r^2 = 0,941$



Annexe n° 6

1) - La fonction logistique :

$$y = \frac{a}{1 + b e^{-cx}}$$

2) - Calcul de la primitive :

$$\begin{aligned} y &= \frac{a}{1 + b e^{-cx}} = a \frac{e^{cx}}{e^{cx} + b} = a \frac{\frac{1}{c} c e^{cx}}{e^{cx} + b} \\ &= \frac{a}{c} \frac{c e^{cx}}{e^{cx} + b} \end{aligned}$$

Si on pose $e^{cx} + b = u$, on a $y = \frac{a}{c} \frac{u'}{u}$ et

$$\int \frac{a}{c} \frac{u'}{u} du = \frac{a}{c} \text{Log } u + \text{cte}$$

une primitive est donc : $\frac{a}{c} \text{Log } (e^{cx} + b)$

3) - La dérivée première :

$$y' = abc \frac{e^{-cx}}{(1 + b e^{-cx})^2}$$

Pour une valeur de x donnée elle permet de calculer la vitesse d'absorption ou de croissance.

3) - La dérivée seconde :

$$y'' = abc \frac{c e^{-cx} (1 + b e^{-cx}) (-1 - b e^{-cx} + 2 b e^{-cx})}{(1 + b e^{-cx})^4}$$

La valeur de x qui annule le numérateur, donc pour laquelle $y'' = 0$ est :

$$x = \frac{\text{Log } b}{c}$$

Elle correspond à l'abscisse du point d'inflexion (plus grande vitesse de croissance ou d'absorption).

Annexe n° 7 :

Valeurs des coefficients a, b, c, du coefficient de détermination r^2 , et des domaines de validité de $\sum \Phi$, pour les équations de régression reliant N_{PE} à $\sum \Phi$ et N_f à $\sum \Phi$.

1 – N_{PE} à $\sum \Phi$:

Coefficient Traitements	a	b	c	r^2	Domaine de validité de $\sum \Phi$
T0	126,63	73,97	0,0035	0,99	513 à 2 638
D1DO1	161,28	344,41	0,0051	0,99	"
D1DO2	201,63	432,74	0,0050	0,99	"
D1DO3	233,27	852,42	0,0058	0,99	"
D2DO1	182,69	204,33	0,0044	0,99	"
D2DO2	215,91	268,17	0,0043	0,99	"
D2DO3	242,41	317,79	0,0046	0,99	"
D3DO1	230,87	211,25	0,0039	0,99	"
D3DO2	254,55	111,98	0,0033	0,99	"
D3DO3	265,14	1392,59	0,0055	0,99	"

2 – N_f à $\sum \Phi$:

Coefficient Traitements	a	b	c	r^2	Domaine de validité de $\sum \Phi$
D1DO1	42,34	53,98	0,0111	0,99	0 à 1 916
D1DO2	78,18	68,22	0,0086	0,99	
D1DO3	104,09	55,15	0,0098	0,99	
D2DO1	58,18	18,65	0,0069	0,99	0 à 1 868
D2DO2	89,73	27,42	0,0057	0,99	
D2DO3	116,61	23,18	0,0061	0,99	
D3DO1	102,44	33,30	0,0051	0,99	0 à 1 809
D3DO2	126,54	16,63	0,0038	0,99	
D3DO3	140,68	50,45	0,0073	0,99	

Annexe n° 8 :

Valeurs des coefficients a, b, c, du coefficient de détermination r^2 , et des domaines de validité de $\sum \theta$, pour les équations de régression reliant MS à $\sum \theta$.

Coefficients Traitements	a	b	c	r^2	Domaine de validité de $\sum \theta$
	D1DO1	1398	1055	0,0047	0,99
D1DO2	1419	1009	0,0046	0,99	"
D1DO3	1433	1477	0,0050	0,99	"
D2DO1	1476	2929	0,0054	0,99	"
D2DO2	1446	2792	0,0053	0,99	"
D2DO3	1470	2906	0,0054	0,99	"
D3DO1	1660	2137	0,0049	0,99	"
D3DO2	1620	1565	0,0047	0,99	"
D3DO3	1551	5024	0,0056	0,99	"

LISTE ET SIGNIFICATION DES ABREVIATIONS UTILISEES

- Af : Apport par fixation non symbiotique
- Ap : Apport les pluies
- ANI : Added Nitrogen Interaction
- BA : Biomasse des parties aériennes
- BA1 : Biomasse des parties aériennes au stade épi 1 cm
- bY : Besoins en azote du peuplement
- CAU : Coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais
- CRU : Coefficient réel d'utilisation de l'azote de l'engrais
- Eg : Excès isotopique dans les grains
- Ep : Excès isotopique dans les pailles
- Ex : Excès isotopique dans l'azote apporté
- I_{Nd} : Intégrale des disponibilités en azote de l'engrais
- I_{Nf} : Intégrale de l'azote absorbé, provenant apparemment de l'engrais
- IR : Infra-rouge
- K : Coefficient d'efficacité de l'azote disponible
- Ma : Minéralisation nette des amendements organiques
- Mh : Minéralisation nette de l'humus
- Mr : Minéralisation nette des résidus de récolte
- MS : Matière sèche
- N_{PE} : Azote absorbé par la plante entière
- N_{PA} : Azote absorbé par les parties aériennes
- N_P : Azote absorbé par la paille
- Nf : Azote absorbé provenant apparemment de l'engrais
- Ns : Azote absorbé provenant apparemment du sol
- Ndff: Nitrogen derived from fertilizer = azote absorbé provenant réellement de l'engrais
- Ndfs: Nitrogen derived from soil = azote absorbé provenant réellement du sol

- Nd : Disponibilité en azote de l'engrais
- Ng : Nombre de grains
- Pd : Pertes par dénitrification
- Pi : Pertes par lixiviation
- Pv : Pertes par voie gazeuse
- PMG : Poids de mille grains
- Rf : Azote minéral à la fermeture du bilan
- Ri : Azote minéral à l'ouverture du bilan
- $\sum \vartheta$: Somme de températures
- T0 : Témoin non fertilisé en azote
- X : Dose totale d'engrais
- Xp : Dose totale d'engrais pondérée par les dates et les doses d'apport

- OPAL : Observatoire des Potentialités Agro-climatiques en Lorraine

LISTE DES ORGANISMES CITES

- AGPM : Association Générale des Producteurs de Maïs
- CNRS : Centre National de Recherche Scientifique
- CRAL : Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine
- IFBM : Institut Français pour la Brasserie et la Malterie
- INAPG : Institut National Agronomique Paris Grignon
- INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
- ITCF : Institut Technique des Céréales et des Fourrages
- ONIC : Office National Interprofessionnel des Céréales
- SADEF : Société Alsacienne pour le Développement et l'Etude de la
Fertilité

BIU NANCY
Service Commun de Documentation
INPL
2, avenue de la Forêt de Haye - B.P. 3
54501 VANDOEUVRE Cédex FRANCE

**AUTORISATION SOUTENANCE DU DIPLOME DE THESE DE
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**
-oOoOo-



Vu le rapport établi par :

**Monsieur GUCKERT Armand, Professeur, ENSAIA/INPL,
Monsieur MEYNARD Jean-Marc, Directeur de Recherche, INRA Thiverval
Grignon.**

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDŒUVRE CEDEX

Le Président de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
autorise :

Monsieur LIMAUX François

à soutenir devant l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
un Diplome de Thèse intitulée :

**"Les facteurs de variation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote de
l'engrais. Conséquences pour la conduite de la fertilisation azotée du blé d'hiver en
Lorraine"**

en vue de l'obtention du **DIPLOME DE THÈSE DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**

Spécialité : **"SCIENCES AGRONOMIQUES"**

Vandoeuvre, le 4 Février 1994
Le Président de l'I.N.P.L.,

M. LUCIUS

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. Lucius', is written over a circular stamp. The stamp is the logo of the Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) with the text 'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE' and 'NANCY' visible. The signature is written across the center of the stamp.

