



Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais : application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine

François Limaux

► To cite this version:

François Limaux. Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais : application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1999. Français. NNT : 1999INPL028N . tel-01749917

HAL Id: tel-01749917

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749917>

Submitted on 29 Mar 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>

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de

DOCTEUR

de l'Institut National Polytechnique de Lorraine
Spécialité "Sciences Agronomiques"

par

François LIMAUX

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du
sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au
raisonnement de la fertilisation en Lorraine

Soutenue le 2 mars 1999
devant la commission d'examen composée de :

A. GUCKERT	Professeur à l'INPL-ENSAIA,	Président
M. SEBILLOTTE	Professeur, Directeur Scientifique INRA,	Rapporteur
E. FRANÇOIS	Chef de Département au CRA de Gembloux,	Rapporteur
J.M. MEY	erche, INRA,	Examineur
J.M. MA	erche, INRA,	Examineur
J. MASSI	techniques de production, ITCF,	Examineur
J. SALMON	Agriculteur, président du Comité de Pilotage National Ferti-Mieux, ANDA,	Examineur



Remerciements

Les travaux qui sont présentés dans ce mémoire se sont engagés en 1992. Ils ont conduit en 1994 à la soutenance d'un Diplôme de thèse INPL, puis avec une équivalence DEA, à mon inscription en thèse en 1995.

***Armand GUCKERT**, Professeur à l'ENSAIA et responsable du laboratoire Agronomie Environnement a accepté de diriger ce travail et a tout mis en oeuvre pour que cette inscription soit possible. Malgré ses nombreuses occupations, il a toujours pris le temps de régler les problèmes administratifs liés au cursus d'un étudiant "non conventionnel". Je l'en remercie très sincèrement.*

***Michel SEBILLOTTE** et **Eugène FRANÇOIS** m'ont fait l'honneur d'accepter de rapporter ce travail. Le premier, initiateur de la formation "Relance de l'agronomie" est certainement pour une bonne partie à l'origine de mon goût assez prononcé pour cette discipline. Le second, même si les contacts sont plus récents, a manifesté beaucoup d'intérêt pour le travail conduit. Qu'ils soient assurés, tous les deux de l'expression de toute ma reconnaissance.*

Merci également aux autres membres qui ont accepté de faire partie du jury :

- ***Jean-Marc MEYNARD** et **Jean-Marie MACHET** de l'INRA*
- ***Jack MASSE** de l'ITCF*
- ***Jean SALMON**, Agriculteur. Ce n'est pas si courant dans un jury de thèse, mais sa fonction de Président du Comité de pilotage des opérations Ferti-Mieux en font un observateur privilégié de l'intérêt du travail par rapport aux besoins du développement agricole. Je le remercie d'avoir accepté très spontanément cette fonction.*

*Les travaux qui font l'objet de ce mémoire, ont été suivis par un Comité de pilotage qui a défini le cadre des études, accompagné la méthodologie, aidé à l'interprétation des résultats. **Armand GUCKERT**, **François LAURENT** (ITCF), **Jean-Marc MEYNARD** et **Sylvie RECOUS** (INRA) ont assuré cette mission au cours de rencontres très studieuses, prolongées de séances non moins sérieuses mais présentant un caractère plus détendu au cours desquelles la fertilisation laissait la place à la dégustation (raisonnée, cela va sans dire !).*

Le travail entrepris a nécessité la mise en place de nombreuses expérimentations et je voudrais, sans pouvoir les citer toutes, remercier les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce programme :

- *Emmanuel HANCE* pour le suivi du réseau OPAL et des expérimentations azote
- *Louis FLORENTIN*, pour la collaboration sur la mise au point de la codification des sols et les mesures de laboratoire préalables aux incubations
- *Plusieurs Collègues des Chambres Départementales d'Agriculture et des Coopératives* nous ont aidé pour le choix des sites expérimentaux ou ont assuré le suivi d'essais. *Merci à tous.*
- *La station INRA de Mirecourt* nous a toujours ouvert ses portes. *Merci à Marc BENOIT et Claude BAZARD.*
- *Merci à la CAL (Coopérative Agricole Lorraine)* qui a toujours mis l'infralyseur gracieusement à notre disposition pour réaliser les analyses d'azote.
- *Nous avons pu valoriser des résultats expérimentaux provenant d'autres régions : Une partie importante des résultats sur les besoins en azote proviennent d'un réseau national d'essais suivis par l'ITCF. Merci à François LAURENT pour la mise à disposition des données.*
Merci également à Didier PLAS pour les résultats provenant de Poitou-Charentes.
- *Les essais bilan ^{15}N ont nécessité une attention particulière. Stéphanie BOURRIGAULT, stagiaire IUT à l'époque les a suivis avec beaucoup de rigueur. Olivier DELFOSSE (INRA Laon) a assuré toute la partie analytique. Merci à tous les deux.*
- *Les incubations de sol ont été réalisées au laboratoire agronomie et environnement de l'ENSAIA. Merci à J. VONG d'avoir mis ses compétences à notre disposition pour que les expériences soient conduites avec la rigueur nécessaire.*
- *Merci à Sylvie RECOUS qui a réalisé à la station INRA Laon les tests des modèles Azobil et Azodyn. Sa disponibilité et son accueil chaleureux ont permis une collaboration très fructueuse. C'est aussi grâce à son expérience et à ses précieux conseils que les expérimentations (bilans ^{15}N) ont été menées à bien.*
- *Frédérique ANGEVIN (Agrotransfert Poitou-Charentes) et Annie Le GALL (CA de l'Indre) ont participé au test du modèle PC Azote à partir de nos données. Merci à toutes les deux.*
- *Merci aux nombreux agriculteurs qui ont été sollicités pour la mise en place des essais. C'est grâce à leur collaboration que tout ce travail a été possible, qu'il s'agisse des expérimentations azote ou du réseau OPAL.*

*Lorsque les références techniques sont acquises, commence le travail le plus difficile : la rédaction. Je pense très sincèrement que celle-ci n'aurait pas été menée correctement sans l'aide précieuse de **Jean-Marc MEYNARD** et **Sylvie RECOUS**.*

Ils ont passé tous les deux de nombreuses heures pour m'aider à clarifier des idées quelquefois préconçues, à réfléchir sur les résultats, à organiser le plan du mémoire et surtout à m'inculquer la rigueur nécessaire dans le difficile exercice que sont les discussions.

Je les remercie très sincèrement tous les deux et j'espère que la collaboration qui s'est engagée à l'occasion de ce travail se poursuivra.

L'ensemble des résultats présentés dans ce mémoire sont issus des travaux menés dans le cadre du programme Agronomie de la Chambre d'Agriculture de Lorraine et à ce titre ont fait l'objet de financements de la part d'un certain nombre de partenaires que nous tenons à remercier ici :

- La Région Lorraine*
- L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse*
- Le Ministère de l'Environnement*
- Le Ministère de l'Agriculture*

*Pour terminer, merci à **Françoise**, mon Epouse, et à mes enfants **Catherine** et **Olivier** qui n'ont pas hésité à "mettre la main à la pâte" dans la dernière ligne droite pour que les délais soient respectés, ainsi qu'à **Monique BRACONOT**, qui a fait preuve d'une grande disponibilité pour assurer la réalisation des graphiques et la frappe de ce mémoire.*

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 - BIBLIOGRAPHIE ET PROBLEMATIQUE.....	5
2.1. INTRODUCTION	6
2.2. CHOIX D'UNE METHODE DE RAISONNEMENT ET DE CALCUL DE LA DOSE D'ENGRAIS	6
2.2.1. Présentation des différentes méthodes utilisées en Europe de l'Ouest	6
2.2.1.1. Fixed Rates Method.....	6
2.2.1.2. ADAS Nitrogen Index Method	6
2.2.1.3. Nmin Method	7
2.2.1.4. Méthode du bilan prévisionnel.....	7
2.2.1.5. Méthode développée par la Faculté des Sciences Agronomiques de GEMBLoux en BELGIQUE.....	8
2.2.1.6. L'équation d'efficacité d'utilisation de l'engrais	9
2.2.2. Analyse critique des méthodes de calcul de la dose d'engrais	10
2.2.3. Choix de la méthode de calcul de la dose d'azote retenue en Lorraine.....	13
2.3. ESTIMATION DES TERMES DE L'EQUATION D'EFFICACITE	14
2.3.1. Les besoins en azote du peuplement.....	14
2.3.1.1. Gammes de variations observées.....	14
2.3.1.2. Le modèle bY	15
2.3.1.3. Le modèle β .NG	20
2.3.1.3.2. Intérêt du coefficient β par rapport à b	20
2.3.1.4. Les modèles mécanistes	22
2.3.1.5. Questions ouvertes	23
2.3.2. La valeur de P_o	24
2.3.2.1. Constat de la variabilité	24
2.3.2.2. Facteurs de variation et modélisation.....	24
2.3.2.3. Questions ouvertes	26
2.3.3. Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais (CAU)	27
2.3.3.1. Variabilité.....	27
2.3.3.2. Signification des coefficients d'utilisation de l'engrais (CAU et CRU)	28
2.3.3.3. Facteurs de variation	29

2.3.3.3.1. CAU et courbe de réponse à l'azote	29
2.3.3.3.2. CAU et dates d'apport	30
2.3.3.3.3. CAU et conditions de milieu	31
2.3.3.4. Questions ouvertes	31
2.4. ORGANISATION DU MEMOIRE.....	32
2.4.1. Besoins en azote du peuplement	32
2.4.2. Capacité de minéralisation des sols pour la prévision de la valeur de Po.....	32
2.4.3. Coefficient apparent d'utilisation de l'azote.....	33
CHAPITRE 3 - ESTIMATION DES BESOINS EN AZOTE.....	34
3.1. INTRODUCTION	35
3.2. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	35
3.2.1. Estimation du rendement potentiel	35
3.2.1.1. Le réseau expérimental OPAL (Observatoire des Potentialités Agroclimatiques en Lorraine).....	35
3.2.1.2. Calcul des indicateurs climatiques.....	36
3.2.2. Estimation des besoins en azote à partir de la matière sèche des parties aériennes (MSPA)	36
3.2.2.1. Le réseau expérimental de l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF).....	36
3.2.2.2. Détermination de la matière sèche des parties aériennes et de l'azote absorbé	37
3.2.2.3. Détermination de l'optimum de réponse à l'azote.....	38
3.3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	39
3.3.1. Estimation du rendement potentiel	39
3.3.1.1. Types de sol et rendements.....	40
3.3.1.2. Rendement et déficit climatique.....	45
3.3.1.2.1. Méthode d'interprétation des résultats.....	45
3.3.1.2.2. Résultats pour les rendzines sur calcaire dur	46
3.3.1.2.3. Résultats pour les sols non ou peu caillouteux développés sur calcaire	47
3.3.1.2.4. Résultats pour les sols profonds, développés sur argile.....	47
3.3.1.2.5. Résultats pour les sols profonds développés sur limons	48
3.3.1.2.6. Résultats pour les sols profonds développés sur marnes.....	48

3.3.1.3. Effet de l'excès d'eau	48
3.3.1.4. Discussion partielle.....	50
3.3.1.4.1. Cas des rendzines sur calcaire dur.....	50
3.3.1.4.2. Cas des sols argileux et limoneux	51
3.3.1.4.3. Comparaison des pentes des enveloppes obtenues pour chaque type de sol	52
3.3.2. Comparaison de l'estimation des besoins en azote sur la base du rendement et de la matière sèche des parties aériennes (MSPA)	54
3.3.2.1. Définition du ratio "B"	54
3.3.2.2. Variation des ratios b et B	54
3.3.2.2.1. Effet de l'année et de la variété.....	55
3.3.2.2.2. Relations avec l'indice de récolte	57
3.3.2.3. Etude des relations entre l'azote absorbé, le rendement et la MSPA	59
3.3.2.4. Test des trois modèles d'estimation des besoins.....	61
3.3.2.4.1. Modèles testés.....	61
3.3.2.4.2. Données disponibles	61
3.3.2.4.3. Méthode de comparaison des modèles	61
3.3.2.4.4. Résultats des tests	62
3.3.2.5. Discussion partielle.....	64
3.4. DISCUSSION GÉNÉRALE	66
CHAPITRE 4 - PREVISION DES FOURNITURES EN AZOTE DU SOL	71
4.1. INTRODUCTION	72
4.2. MATERIELS ET METHODES.....	72
4.2.1. Etudes au champ	72
4.2.1.1. Dispositifs.....	73
4.2.1.2. Mesures.....	73
4.2.2. Présentation des modèles utilisés pour l'estimation de la fourniture du sol.....	74
4.2.2.1. Organisation générale de chaque modèle	74
4.2.3. Incubations	79
4.2.3.1. Dispositif	79
4.2.3.2. Mesures.....	80
4.2.3.3. Transposition des résultats au champ.....	81
4.2.4. Etablissement des bilans	81
4.3. RÉSULTATS.....	83
4.3.1. Prévision de NSH	83

4.3.2. Evaluation des modèles de prévision de la fourniture en azote du sol	84
4.3.2.1. Prévision à partir d'Azobil	84
4.3.2.2. Prévision à partir d'Azodyn.....	85
4.3.2.3. Evaluation de la prévision à partir de PC azote	85
4.3.2.4. Evaluation à partir des grilles de fournitures de la CRA Lorraine	85
4.3.3. Discussion partielle sur les erreurs de prévision de la fourniture en azote du sol par les différents modèles	86
4.3.3.1. Variabilité des résultats	86
4.3.3.2. Etude analytique des résultats d'Azobil et Azodyn	87
4.3.3.3. Etude analytique des résultats de PC azote	89
4.3.3.4. Etude des résultats des grilles prédictives lorraines	91
4.3.4. Etude et modelisation de la mineralisation	92
4.3.4.1. Evaluation des modèles de minéralisation	93
4.3.4.2. Résultats des incubations.....	95
4.3.4.2.1. Caractéristiques hydriques des sols soumis à incubation	95
4.3.4.2.2. Les quantités d'azote minéralisé	98
4.3.4.2.3. Confrontation des résultats avec le bilan au champ.....	99
4.3.5. Discussion partielle	101
4.3.5.1. Azobil et Azodyn	101
4.3.5.2. SUNDIAL et PC Azote.....	103
4.3.5.3. Résultats des incubations.....	106
4.3.5.4. L'importance des paramètres physico-chimiques.....	107
4.4. DISCUSSION GENERALE	108
4.4.1. Comparaison de la valeur prédictive des différents modèles.....	108
4.4.2. Identification des sources de progrès possibles pour la prévision de Po.....	110
4.4.2.1. Modèles de prévision utilisant Azobil et Azodyn	110
4.4.2.2. PC Azote et les grilles prévisionnelles lorraines	114
4.4.2.3. En conclusion.....	115
CHAPITRE 5 - MODELISATION DU COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DE L'AZOTE DE L'ENGRAIS	116
5.1. INTRODUCTION	117
5.2. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	117
5.2.1. Essais doses croissantes d'azote	117
5.2.1.1. Les expérimentations.....	117

5.2.1.2. Les mesures.....	120
5.2.1.3. Le calcul du CAU	120
5.2.1.4. Le calcul de la vitesse de croissance.....	120
5.2.2. Essais bilan ^{15}N	121
5.2.2.1. Les dispositifs expérimentaux	121
5.2.2.2. Les mesures.....	123
5.2.2.3. Les analyses : détermination de N et ^{15}N minéral, N et ^{15}N organique dans le sol et dans la plante	125
5.3. RÉSULTATS	126
5.3.1. Analyse des variations du CAU.....	126
5.3.1.1. Variation du CAU le long de la courbe de réponse à l'azote	126
5.3.1.2. Variation du CAU à l'optimum de la courbe de réponse à l'azote.....	130
5.3.1.2.1. Effet variété, sol et année	130
5.3.1.2.2. Effet de la biomasse du peuplement au moment des apports d'azote sur la variation du CAU	132
5.3.1.2.3. La vitesse de croissance du peuplement, prédicteur du CAU	134
5.3.1.2.4. Comparaison des modèles.....	136
5.3.1.3. Discussion.....	135
5.3.2. Utilisation de l'engrais, état de croissance et vitesse de croissance du peuplement	139
5.3.2.1. Conditions climatiques après les applications d'engrais	139
5.3.2.2. Biomasse, vitesse de croissance et utilisation de l'azote.....	141
5.3.2.3. Le devenir de l'azote de l'engrais dans le sol	142
5.3.2.4. Le recouvrement total de l'engrais.....	143
5.3.2.5. Discussion.....	143
5.3.2.5.1. Vitesse de croissance et utilisation de l'engrais	143
5.3.2.5.2. Immobilisation de l'azote de l'engrais.....	145
5.3.2.5.3. Utilisation de l'azote par la plante et pertes gazeuses.....	146
CHAPITRE 6 - DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS	147
6.1. Les acquis sur les sources de variation de la réponse à l'engrais	148
6.2. Amélioration des références régionales pour le calcul des doses d'engrais.....	150
BIBLIOGRAPHIE	154
ANNEXES	168

Liste des abréviations

b	Besoins en azote pour un quintal matière sèche grain
bY	Besoins du peuplement en kg N.ha ⁻¹
β	Besoins en azote rapportés au nombre de grains
CAU	Coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais
CRU	Coefficient réel d'utilisation de l'azote de l'engrais
CV	Coefficient de variation
CS	Cailloux en surface
CRF	Coefficient résidus de récolte / fréquence d'apports organiques
COS	Coefficient d'occupation du sol
C/N	Rapport carbone / azote
dJ	degré jour
DC	Déficit climatique
ddl	degré de liberté
ETP	Evapotranspiration potentielle
ETR	Evapotranspiration réelle
ETM	Evapotranspiration maximale
Eig	Excès isotopique dans les grains
Eip	Excès isotopique dans les pailles
Eix	Excès isotopique dans l'engrais
FC	Facteur climatique
Gx	Perte de l'engrais par voies gazeuses
HI	Harvest Index pour indice de récolte
HCC	Humidité à la capacité au champ
Ix	Perte de l'engrais par immobilisation
K2	Coefficient de minéralisation de la matière organique
LAI	Leaf Area Index pour indice foliaire
Lx	Pertes de l'engrais par lixiviation
MSPA	Matière sèche des parties aériennes
MSG	Matière sèche des grains
MSE	Mean Squared Error pour erreur moyenne carrée
MS	Matière sèche
Mpa	Millipascal
NSH	Azote absorbé par le peuplement à la sortie de l'hiver
¹⁵ N	Isotope stable de l'azote
Ndfs	Nitrogen derived from soil pour azote absorbé par la plante, provenant du sol
OPAL	observatoire des Potentialités Agroclimatiques en Lorraine
OB	ouverture du bilan
Po	Azote prélevé par le peuplement en l'absence de fertilisation minérale
P	Pluviométrie
PL	Profondeur de labour

PVC	Poly vinyl chlorid pour chlorure de polyvinyle
QNR	Azote absorbé à la récolte en k.ha^{-1}
RAR	Reliquat après récolte
RSH	Reliquat sortie hiver
RU	Réserve utile
SAU	Surface agricole utile
Sdj	Somme de degrés jour
TF	Terre fine
TS	Terre sèche
VH	Volume d'eau en litre contenu dans les 100 g de terre humide
X	Dose d'engrais
Xopt	Dose d'engrais à l'optimum de la courbe de réponse

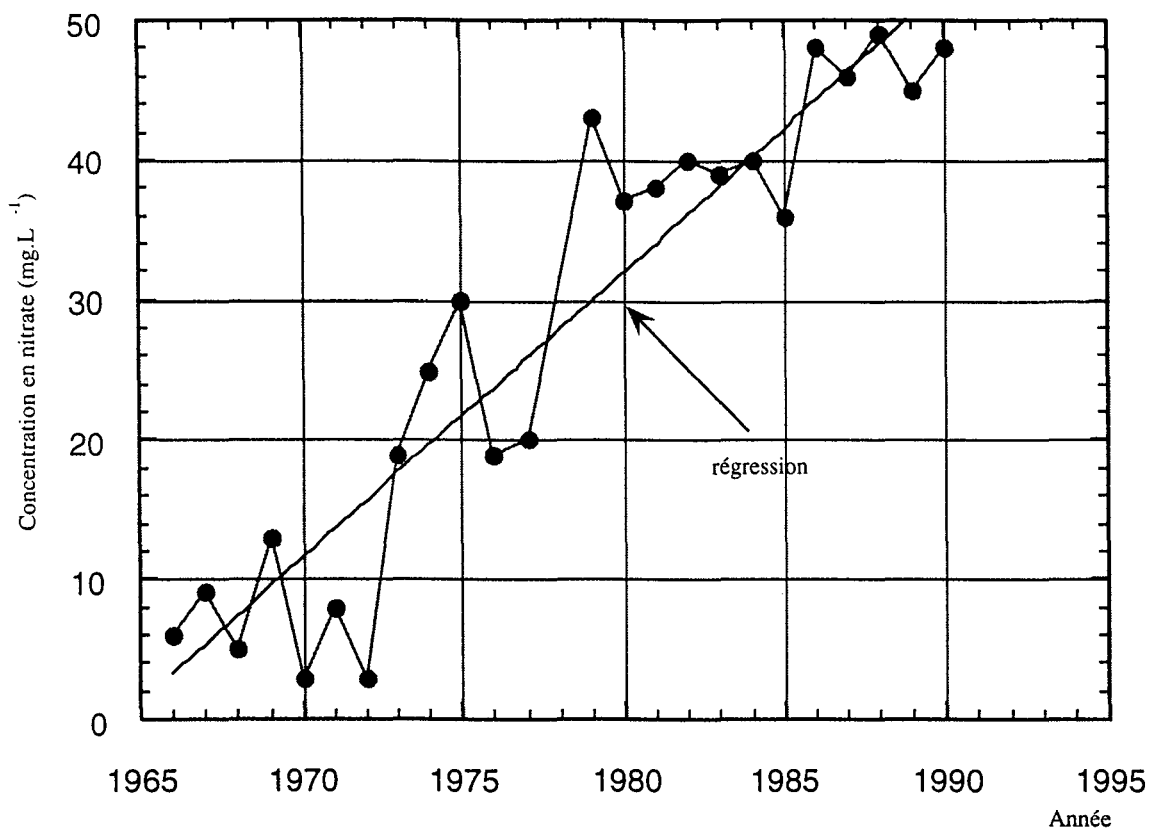
Signification des relations statistiques

*	Relation significative au seuil de 10 %
**	Relation significative au seuil de 5 %
***	Relation significative au seuil de 2 %
****	Relation significative au seuil de 1 %
*****	Relation significative au seuil de 1 ‰

Organismes

CRAL	Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine
DRASS	Direction Régionale de l'Action Sanitaire et Sociale
ITCF	Institut Technique des Céréales et des Fourrages
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
ENSAIA	Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires

CHAPITRE 1
INTRODUCTION



Graphique n° 1 - Evolution de la teneur en nitrate à la source de Bouillon (57) de 1966 à 1990

Equation de la droite de régression :

$$[\text{NO}_3^-] = 2,05 \text{ millésime} - 132,1 \quad r^2 = 87,22 \%$$

Millésime = année, représentée par ses deux derniers chiffres

Depuis une trentaine d'années on observe une croissance régulière du nombre d'unités de distribution d'eau potable, dont la teneur en ion nitrate (NO_3^-) dépasse la norme de 50 mg par litre (Norme Organisation Mondiale de la Santé). A titre indicatif, en 1990 en Région Lorraine, 25 unités de distribution (sur un total de 1175) pour une population de 7880 habitants (sur un total de 2 320 000), étaient concernées. En 1996, sur le Bassin Rhin-Meuse, on en recensait 161 pour 242 000 habitants (source : DRASS Lorraine et Agence de l'Eau Rhin-Meuse).

Généralement, le dépassement de la norme est le résultat d'une progression lente et plus ou moins régulière de la concentration en nitrates. Le graphique n° 1 montre cette évolution sur une source située en milieu karstique où on a constaté une augmentation moyenne de 2 mg par litre et par année depuis les années 60.

Cette augmentation est le résultat d'une évolution importante de l'agriculture depuis la dernière guerre mondiale. La mission dévolue à celle-ci consistait alors à produire plus pour assurer l'autosuffisance alimentaire.

Actuellement, l'agriculture européenne est fortement exportatrice et l'instauration de mécanismes de régulation de la production (quota, gel des terres), montre que cette mission a été complètement remplie. Pour parvenir à ces résultats, il a fallu bouleverser de façon importante les systèmes de production :

- Les assolements ont ainsi évolué de façon importante : l'apparition des quotas laitiers a généré un retournement important de prairies permanentes, favorisant ainsi la minéralisation de l'azote organique des sols. De 130 000 ha de blé et 25 000 ha de colza en région Lorraine en 1960, on est passé respectivement à 220 000 ha et 130 000 ha en 1997.
- Sur ces cultures, l'apparition des régulateurs de croissance et des fongicides a eu pour effet de supprimer la sanction directe d'un excès d'engrais azoté (verse physiologique et augmentation de la pression des maladies cryptogamiques). Dans ces conditions et compte tenu du rapport entre le prix de l'engrais azoté et celui des céréales ou des oléagineux, il est clair que l'agriculteur a tendance à choisir la dose la plus forte car la perte financière est plus faible pour lui en cas d'excès d'engrais azoté qu'en cas de déficit. Ces excès d'azote sont encore accrus par la mauvaise prise en compte de la valeur réelle azotée des effluents d'élevage qui ont longtemps été considérés comme un simple sous-produit.
- Le caractère imprévisible du climat se traduit par des niveaux de réponse à l'azote très différents. Dans les mêmes conditions de sol et de système de culture, MARTIN et

MEYNARD (1997) citent sur des réseaux expérimentaux suivis dans la Marne, des optimums de réponse à l'azote qui peuvent varier de 100 à 170 kg.N.ha⁻¹.

Un autre aspect, rarement évoqué quand on traite de la fertilisation azotée minérale, concerne les problèmes de pollution de l'atmosphère par pertes gazeuses. Dans certaines conditions favorables à la dénitrification (anaérobiose par exemple) des quantités non négligeables d'azote minéral peuvent être perdues par voie gazeuse (N₂ ou N₂O). On voit donc que du seul point de vue de la protection de l'environnement (pollution des eaux et de l'atmosphère), les pratiques qui ont eu cours pendant les trente dernières années doivent être remises en cause.

Cependant, face à ces contraintes, l'agriculteur doit continuer à produire et on ne peut imaginer qu'il accepte des diminutions de rendement par suite d'apport d'engrais en quantité insuffisante. Il doit rester compétitif et de plus, on lui demande de produire des blés de qualité à haute teneur en protéine, élément essentiel pour les marchés du blé panifiable. Il sera donc désormais difficile de concilier protection de l'environnement, maintien du revenu et production de blé de qualité.

On peut citer deux exemples pour illustrer cette difficulté :

- Dans l'agrosystème, pour une production de blé de 85 q.ha⁻¹, on considère qu'un peu plus de 300 kg N.ha⁻¹ sont mis en jeu, dont environ 255 kg sont absorbés par la culture. Les pertes mesurées dans ces conditions dépassent rarement 30 kg.N.ha⁻¹ soit environ 11,5 % des quantités absorbées.
Peu de systèmes techniques fonctionnent avec si peu de pertes (MARIOTTI, 1996), mais ces faibles pertes peuvent être suffisantes pour amener les eaux souterraines à une concentration supérieure à 50 mg par litre (1 kg d'azote.ha⁻¹ correspond à 1,26 mg de NO₃⁻ par litre sous l'hypothèse d'une lame d'eau drainante de 350 mm, valeur médiane en Lorraine au poste de Nancy-Essey).
- JEUFFROY et MEYNARD (1998) montrent qu'entre un blé à 12 % de protéines, valeur considérée comme optimale pour la panification et un blé à 10 % de protéines (valeur d'usage médiocre) les différences de quantités d'azote mises en jeu sont inférieures à 30 kg.ha⁻¹.

L'enjeu pour l'avenir, pour concilier environnement, qualité et revenu, consiste donc à savoir gérer le bilan azoté d'une culture de blé à moins de 10 % près.

Le travail de l'agronome se complique, car face à des habitudes qui consistaient à apporter la même dose d'engrais sans tenir compte de la diversité des milieux et des systèmes de culture, il se voit contraint d'élaborer des outils pour aider à la modification des pratiques, outils dont la

mise en oeuvre doit être aussi simple que possible, même si dans ce domaine il n'est pas souvent facile de faire cohabiter précision et simplicité.

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire a pour ambition, tout en respectant les nécessaires démarches scientifiques indispensables pour assurer la validité des résultats, d'être utile au développement pour améliorer les pratiques de fertilisation azotée.

Nous avons choisi le blé parce que c'est la culture assolée la plus importante en Lorraine (20 % de la SAU, 55 % des céréales à paille), mais également parce que cette culture est pilote pour le raisonnement de la fertilisation azotée et ce depuis COÏC (1956) et HEBERT (1969).

De plus, les connaissances acquises peuvent probablement être transposées et adaptées à peu de frais, à d'autres céréales à paille.

Après avoir fait le choix d'une méthode de calcul pour la dose d'engrais, nous analyserons et nous tenterons de mieux comprendre les causes de variations des différents termes qui rentrent dans l'équation de calcul, de façon à améliorer la prévision des doses d'engrais azoté.

CHAPITRE 2

BIBLIOGRAPHIE ET PROBLEMATIQUE

2.1. INTRODUCTION

Les méthodes mises à disposition des agriculteurs pour calculer la dose d'engrais azoté à apporter au blé d'hiver sont multiples et reposent sur des concepts qui peuvent être fort différents.

- Dans la première partie de ce chapitre, nous procéderons à une analyse de différentes méthodes de fertilisation azotée en montrant l'intérêt et les limites de chacune d'elles, puis nous justifierons le choix de l'équation d'efficacité d'utilisation de l'engrais (méthode CAU).
- La deuxième partie sera consacrée à la définition des différents termes utilisés pour la mise en oeuvre de cette équation et à l'examen de leur gamme de variation.
- Dans la troisième partie, nous préciserons le niveau des connaissances déjà acquises pour la prévision de ces différents termes.

2.2. CHOIX D'UNE METHODE DE RAISONNEMENT ET DE CALCUL DE LA DOSE D'ENGRAIS

2.2.1. PRESENTATION DES DIFFERENTES METHODES UTILISEES EN EUROPE DE L'OUEST

2.2.1.1. Fixed Rates Method

Cette méthode, très simple à mettre en oeuvre, consiste à recommander une dose unique pour une espèce donnée, quels que soient les situations pédoclimatiques et les systèmes de culture dans lesquels elle est cultivée. Outre son extrême simplicité, cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter aucune analyse de sol ou de plante. Malgré les améliorations proposées (cf chapitre 2212 et 2213), cette méthode est toujours employée. Aux Pays-Bas, par exemple, on préconise 30 kg.ha⁻¹ pour les pois, 50 pour les haricots et 150 pour les fraises (NEETESON, 1995).

2.2.1.2. ADAS Nitrogen Index Method

Cette méthode directement dérivée de la précédente, a été proposée au Royaume-Uni (Anonymous, 1985) : elle consiste à affecter aux différentes situations culturales un "index azote". Les sols qui contiennent peu d'azote minéral et pour lesquels la vitesse de minéralisation de la matière organique est lente sont affectés de l'index 0. A l'inverse, les sols riches en azote minéral, associés à une vitesse de minéralisation élevée sont affectés de l'index 2, alors que les situations intermédiaires sont affectées de l'index 1. En combinant les types de sol et les "index

azote", on aboutit à des recommandations qui par exemple pour l'orge d'hiver peuvent s'échelonner de 0 kg.ha⁻¹ (cas des sols tourbeux avec un "index azote" de 2) à 160 kg.ha⁻¹ (cas des sols sableux avec un "index azote" de 0).

2.2.1.3. N_{min} Method

Il a souvent été observé qu'après un hiver sec, la quantité d'azote minéral présente dans le sol était bien plus importante qu'après un hiver pluvieux (RUSSEL, 1914 ; BOYD *et al.*, 1957 ; VAN der PAAUW, 1962 ; cités par NEETESON, 1995). Ces constatations débouchent, aux Pays-Bas, sur une modulation des quantités habituelles de fertilisant azoté pour les céréales : augmentation de 10 à 30 kg.ha⁻¹ après un hiver pluvieux et diminution des mêmes quantités après un hiver sec (VAN der PAAUW, 1966 ; cité par NEETESON, 1995), ainsi que dans d'autres pays (Allemagne : WEHRMANN et SCHARPF, 1979 ; Belgique : BOON, 1981 ; Danemark : OSTERGAARD, 1982 ; Suède : LINDEN, 1985).

La confrontation, sur de nombreux essais conduits sur pomme de terre, de la dose optimale d'azote avec les quantités d'azote minéral mesurées à la sortie de l'hiver dans les 30 premiers centimètres, permet d'obtenir une relation de régression linéaire entre ces deux paramètres (NEETESON *et al.*, 1984). Cette méthode fut alors transposée dans différents pays d'Europe, notamment en Allemagne, Belgique, Danemark et Suède et sur différentes espèces. Ensuite, la méthode fut petit à petit améliorée en prenant en compte par exemple l'azote fourni par les déjections animales sur la base d'un coefficient d'utilisation de 60 %. Il a également été mis en évidence que la relation dose optimale-reliquat d'azote minéral était variable selon les types de sol : pour une même valeur du reliquat d'azote minéral les doses d'azote optimales sont plus élevées dans les sols sableux que dans les sols argileux (NEETESON, 1989).

2.2.1.4. Méthode du bilan prévisionnel

Introduite en France (HEBERT, 1969) sur betteraves sucrières et céréales, cette méthode fut ensuite développée aux Etats-Unis sur betteraves sucrières (CARTER *et al.*, 1974 ; CARTER *et al.*, 1976) puis plus récemment en Belgique et aux Pays-Bas. Son originalité réside dans le fait que le calcul de la dose d'engrais est réalisé à partir d'un bilan, même s'il est très simplifié, de l'azote minéral disponible du sol. De ce point de vue, elle constitue une rupture fondamentale par rapport aux méthodes précédemment décrites. Plusieurs notions nouvelles sont introduites :

- la possibilité de moduler l'objectif de production (Y).
- la prise en compte d'un besoin en azote par unité de production (b).
- la prise en compte des quantités d'azote minéralisées par les matières organiques du sol (jeunes ou stables), ainsi que les résidus de récolte et les arrières effets prairiaux.

Aussi, le calcul de la dose d'azote s'effectue à partir de l'équation suivante :

$$bY = (R_i - R_f) + M_h + M_r + M_a + A_p + X$$

où :

b	=	besoins en azote par unité de production	en kg N.q ⁻¹
Y	=	objectif prévisionnel de production	en q.ha ⁻¹
R _i	=	Nminéral présent dans le sol à l'ouverture du bilan (sortie hiver)	en kg N.ha ⁻¹
R _f	=	Nminéral présent dans le sol à la fermeture du bilan (après récolte)	
M _h	=	minéralisation nette de l'humus	
M _r	=	contribution nette des résidus de récolte	
M _a	=	contribution des amendements organiques et engrais verts	
A _p	=	arrière-effet prairies	
X	=	dose totale d'azote à apporter	

L'utilisation de cette équation suppose que :

- les différentes sources d'azote sont affectées du même coefficient d'utilisation.
- il n'y a pas d'interaction entre les différents postes du bilan : c'est un modèle additif.
- les apports d'azote par voie météorique et par la fixation non symbiotique compensent les pertes par voies gazeuses.
- le bilan d'azote minéral du sol est réalisé sur la profondeur d'exploitation racinaire de la culture.

Cette méthode a été largement vulgarisée en France en particulier par les tables publiées par l'ITCF (1978, 1981, 1987) et plus récemment grâce à la mise au point du logiciel AZOBIL (MACHET *et al.*, 1990). Son utilisation dans la pratique courante ne nécessite que la mesure du terme R_i.

Les valeurs de b, Y, R_f, M_r, M_a et A_p sont données par des tables.

La valeur de M_h est calculée à partir d'un modèle qui prévoit la valeur de K₂ (coefficient de minéralisation de la matière organique) dépendant de la teneur en argile et en CaCO₃, de la teneur en azote du sol, de la masse de sol, d'un coefficient d'occupation du sol et d'un facteur climatique.

2.2.1.5. Méthode développée par la Faculté des Sciences Agronomiques de GEMBLOUX en BELGIQUE

Cette méthode est basée au départ sur l'utilisation du bilan. Les besoins globaux sont estimés sur la base d'un rendement élevé (90 kg.ha⁻¹) de façon à ne pas réduire, dès le départ, le potentiel de production, en utilisant les valeurs de :

- 3 kg.N.q⁻¹ pour les besoins unitaires,
- 15 kg.N.ha⁻¹ pour les reliquats à la récolte.
- 60 kg.N.ha⁻¹ pour les reliquats sortie hiver. 80 kg.N.ha⁻¹ pour la minéralisation.

Pour le blé d'hiver, ce calcul conduit à une dose de 145 kg.N.ha⁻¹. Ce résultat a été vérifié sur de nombreux essais de fumure qui montrent que dans le cas d'une rotation triennale avec un précédent betteraves sucrières (feuilles enfouies), en sol limoneux, recevant des apports de matière organique modérés mais réguliers, l'optimum économique de production est très souvent atteint pour des doses de l'ordre de 150 kg.N.ha⁻¹. Cette dose peut donc constituer une dose de référence qui pourra être modulée selon la capacité propre de minéralisation de chaque parcelle. Les principaux critères qui sont retenus pour effectuer cette modulation sont les suivants :

1. le contexte pédoclimatique en particulier les conditions de drainage et de structure du sol.
2. les régimes organiques passés et présents :
lorsqu'on apporte beaucoup de fumier et souvent, on peut réduire la dose de référence de 20 à 40 kg.N.ha⁻¹ alors qu'on l'augmentera des mêmes quantités si le régime des restitutions organiques est faible depuis longtemps.

3. Le précédent cultural :

La dose de référence a été calée à partir d'un précédent betteraves feuilles enfouies. Lorsque le précédent est différent, les modulations suivantes sont proposées :

Betteraves feuilles enlevées	+ 15
Pommes de terre	0 ou - 10
Lin	- 20
Pois, féveroles, haricots	- 40
Maïs pâteux	+ 10
Chaumes de céréales	+ 10 à + 15
Colza	- 10

4. Les conditions climatiques pendant la période de croissance :

Lorsque les conditions de printemps sont défavorables (pluviométrie élevée avec températures basses) la dose de référence est revue à la hausse et inversement dans le cas contraire.

2.2.1.6. L'équation d'efficience d'utilisation de l'engrais

Cette équation, souvent présentée comme une alternative à la méthode du bilan prévisionnel, s'est développée principalement en France à partir de 1990 à la suite d'un certain nombre de travaux et réflexions initiés par MEYNARD. Dans cette équation, l'expression des besoins est identique à celle utilisée dans l'équation du bilan, soit bY (cf 2.2.1.4.). En revanche, la

prévision de la contribution du sol est réalisée globalement sur la base des quantités d'azote absorbées par le peuplement en l'absence de fertilisation minérale.

$$bY = Po + CAU.X$$

bY = besoins de la culture en kg.N.ha^{-1} .

Po = azote total absorbé en l'absence de fertilisation en kg.N.ha^{-1} .

CAU = coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais.

Dans la mesure où un certain nombre de travaux ont été entrepris pour modéliser Po et CAU , cette écriture est actuellement opérationnelle pour le calcul de la dose d'engrais dans quelques régions françaises :

- **En Lorraine**, la méthode a été vulgarisée en 1992. Le terme Po est prévu à partir de grilles issues de nombreux résultats de témoins non fertilisés. Les variables d'entrée de ces grilles sont le type de sol (profondeur, texture de surface) et les systèmes de culture. La valeur affectée au CAU est de 80 % sous l'hypothèse d'un CAU de 60 % pour le premier apport (1/3 de la dose) et de 90 % pour le deuxième apport (2/3 de la dose).
- **En Poitou-Charentes**, le terme Po est calculé à partir de deux modèles :
 - un premier modèle prévoit la valeur de Ri à partir d'une estimation des reliquats du précédent, de l'antéprécédent et d'un modèle de lessivage adapté du modèle de BURNS (1976).
 - un deuxième modèle inspiré de AZOBIL prévoit les quantités d'azote minéralisées par le sol (quantité fixe modulée par la réserve utile) et les résidus de récolte (valeurs fixes par espèce). Pour ce qui concerne le CAU , les valeurs adoptées sont un peu plus élevées qu'en Lorraine : 85 % pour le premier apport (1/3 de la dose) et 95 % pour le deuxième apport (2/3 de la dose), soit un CAU moyen légèrement supérieur à 90 %.

Afin de faciliter les calculs, en particulier pour le terme Po , la méthode a fait l'objet de l'écriture d'un logiciel (PC Azote) déjà largement vulgarisé dans la région et en cours de paramétrage en Champagne Berrichone (LE GALL, 1997).

2.2.2. ANALYSE CRITIQUE DES MÉTHODES DE CALCUL DE LA DOSE D'ENGRAIS

On peut classer les méthodes de calcul de la dose d'engrais, précédemment décrites, en deux grands groupes :

• **Un premier groupe** (Fixed Rates, ADAS Nitrogen Index Method et Nmin method) présente la caractéristique de ne pas réaliser une évaluation séparée des besoins en azote du peuplement, de la contribution du sol :

- Aucune de ces méthodes ne prend en compte les caractéristiques du sol pour moduler l'objectif de production et donc les besoins en azote.
- La variabilité de la fourniture en azote du sol est peu ou mal prise en compte. Par rapport à la méthode Fixed Rates, ADAS Nitrogen Index Method présente l'avantage d'intégrer l'effet des types de sol ou des systèmes de culture sur la contribution du sol à l'alimentation azotée du peuplement, mais néglige complètement la variabilité des quantités d'azote minéral présentes à la sortie de l'hiver. En revanche, dans Nmin Method le fait que le calcul de la dose totale soit réalisé à partir d'une mesure de Ri sur 0-30 cm à partir d'une relation établie par espèce, permet de mieux prendre en compte les effets du climat hivernal. Un autre avantage réside dans le fait que la relation qui permet une prévision de cette dose totale, a pu être établie sur plusieurs espèces de grandes cultures et de légumes. Toutefois, la faiblesse de cette relation ($r^2 = 0,24$ sur 49 essais aux Pays-Bas sur pomme de terre, NEETESON, 1984) conduit à une grande variabilité des doses proposées pour un même niveau de reliquats sortie hiver. Cependant, la variabilité des systèmes de culture n'est pas prise en compte.

Ces trois méthodes présentent deux points communs :

- La simplicité de mise en oeuvre car elles ne nécessitent pas ou peu de mesures.
- L'empirisme : dans la plupart des cas elles sont ajustées sur la valeur des optimums de courbe de réponse à l'azote. Dans ces conditions la prise en compte d'un nombre très limité de facteurs nuit à leur précision, limite leur domaine de validité et interdit leur extrapolation à des situations différentes de celles dans lesquelles elles ont été établies. De plus, l'adaptation des doses à de nouvelles variétés exige de recommencer toute l'expérimentation (SEBILLOTTE, 1978).

• **Le deuxième groupe** concerne les méthodes pour lesquelles on évalue séparément les besoins des fournitures en azote du sol (Azobil , Méthode GEMBLoux et équation d'efficience). Les besoins sont dans tous les cas calculés à partir d'un objectif de production, variable ou non (Méthode Gembloux) selon les caractéristiques pédoclimatiques locales, et en utilisant une valeur de besoins unitaires commune ($3 \text{ kg N} \cdot \text{q}^{-1}$ pour le blé), mais également définies pour de nombreuses autres espèces. Pour ce qui relève de la fourniture en azote du sol, les variables d'entrée sont différentes selon les méthodes, ce qui conduit à des avantages ou inconvénients différents pour chacune d'elles.

* *La méthode du bilan*

- Le reliquat sortie hiver est une variable mesurée et de ce fait, intègre pour partie, les effets du système de culture et le climat hivernal.
- La minéralisation nette de l'humus, est calculée à partir du modèle HENIN-DUPUIS (1945), dans lequel le coefficient "k2" intègre la teneur en argile et en carbonate de calcium, ainsi que la température moyenne du site. De plus, la prise en compte de la gestion des résidus de récolte et de la fréquence des apports organiques, permet une véritable adaptation au cas par cas. Cet aspect est important, en particulier dans les exploitations pour lesquelles il existe une grande variabilité des sols et de la politique de restitution organique.
- Un modèle de lessivage, adapté des travaux de BURNS (1976) permet de prévoir les quantités d'azote lixiviées au-dessous du système racinaire et qui ne sont plus utilisables par la plante.
- L'ensemble des modèles et sous modèles permettant la prévision des différents termes qui constituent l'équation du bilan dans sa version informatique (AZOBIL), ont fait l'objet d'un paramétrage national, mais peuvent être adaptés pour prendre en compte les références agronomiques acquises régionalement.

Toutefois, un certain nombre de problèmes subsistent, qui limitent l'utilisation de la méthode :

- Il n'existe pas actuellement de modèles opérationnels de la prévision du reliquat sortie hiver. Or, dans un certain nombre de situations, sa mesure se révèle impossible. Le cas le plus fréquent est celui des sols développés sur calcaire dur dans lesquels la possibilité de prospection est souvent limitée à 20 ou 30 cm alors que l'examen de profils d'enracinement montre souvent une prospection racinaire pouvant atteindre 70 cm à 1 m.
- On considère que l'engrais, à part une fraction minime pouvant se retrouver dans le reliquat après récolte, est utilisé à 100 % et de ce fait, les quantités d'azote perdues par voies gazeuses (volatilisation et/ou dénitrification) qui sont souvent bien supérieures aux apports par voie météorique, ne sont pas prises en compte, de même que les suppléments d'organisation liés à l'apport d'engrais.

* *La méthode "GEMBLOUX"*

Le calcul des fournitures en azote du sol est réalisé de façon simple, puisqu'il ne nécessite pas la connaissance des paramètres physico-chimiques du sol. De ce point de vue, la méthode est bien adaptée à des milieux où la minéralisation est peu variable entre parcelles. En revanche, son adaptation à d'autres types de sol et systèmes de culture nécessiterait vraisemblablement un calage différent pour les valeurs de la minéralisation de printemps et du reliquat sortie hiver.

* *L'équation d'efficience de l'engrais*

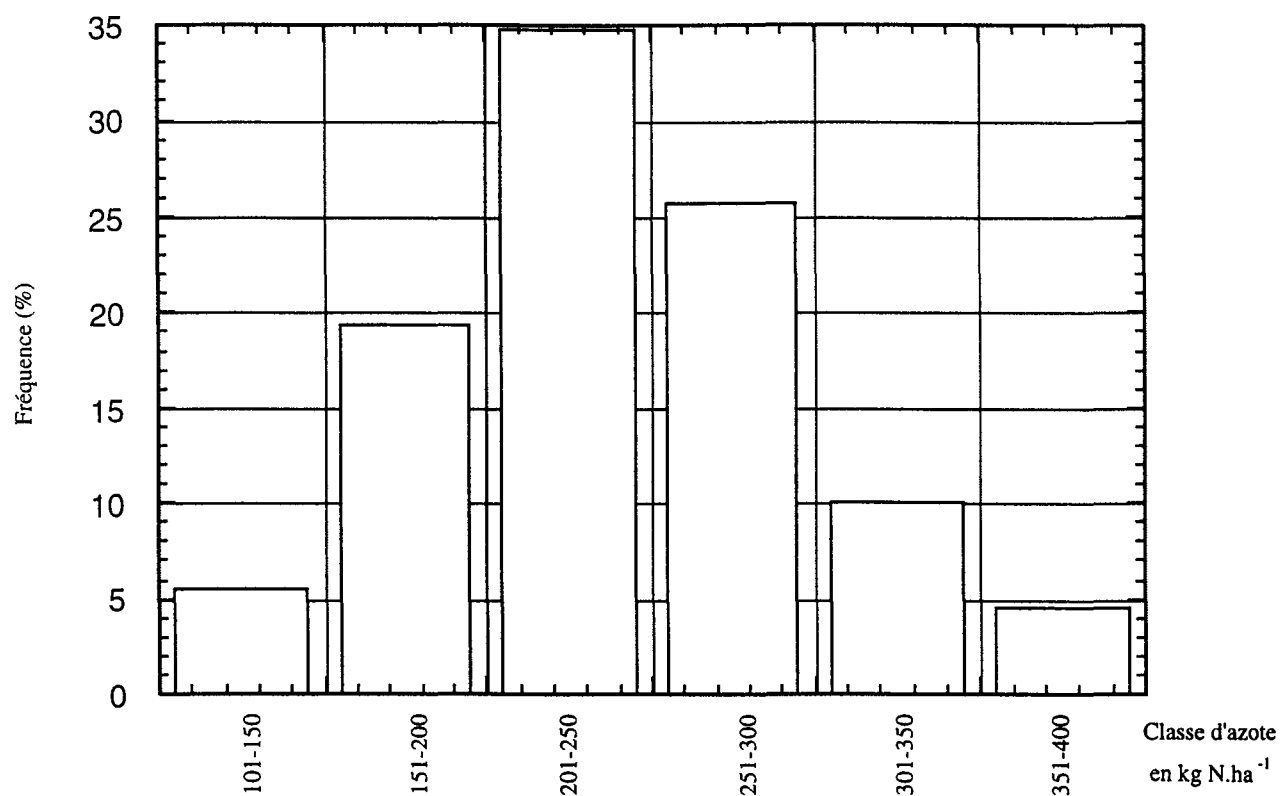
Elle ne nécessite pas la mesure du reliquat sortie hiver puisque la contribution du sol à la fourniture en azote minéral se fait globalement à partir des quantités absorbées par un témoin non fertilisé. Ceci représente un avantage considérable dans les situations ci-dessus évoquées, où cette mesure s'avère impossible. De plus, tous les termes de l'équation sont vérifiables *a posteriori* car accessibles à la mesure sur des expérimentations. On peut alors en particulier pour CAU et Po valider des modèles de prévisions déjà établis par ailleurs ou proposer de nouveaux paramétrages en fonction des conditions de milieu ou de systèmes de culture (MEYNARD *et al.*, 1996).

2.2.3. CHOIX DE LA METHODE DE CALCUL DE LA DOSE D'AZOTE RETENUE EN LORRAINE

L'examen des nombreuses méthodes pour déterminer la dose de fertilisant azoté sur blé d'hiver nous conduit à privilégier celles qui permettent de s'adapter facilement et à peu de frais, à la diversité des situations. La variété de la géologie en Lorraine a conduit à la formation de types de sols nombreux générant des systèmes de culture et d'exploitation divers. De ce point de vue, le bilan de masse et l'équation d'efficience de l'engrais, même si ce sont des modèles simples, présentent l'avantage d'être évolutifs et de s'adapter à cette diversité.

Outre le fait qu'elles ont déjà fait l'objet de nombreux paramétrages et adaptations dans plusieurs régions françaises, les efforts entrepris pour les vulgariser, en particulier dans le cadre des opérations Ferti Mieux, font qu'elles sont maintenant assez bien connues des agriculteurs.

Cependant, si on examine l'évolution probable d'une part du contexte économique (baisse des prix payés à la production), d'autre part des conditions de travail dans les exploitations céréalières de plus en plus grandes (augmentation de la surface par unité de travailleur) et ce ajouté à un certain nombre de contraintes environnementales, on peut imaginer de voir se développer de plus en plus de cultures extensives, c'est-à-dire pour lesquelles l'objectif de production est volontairement situé au-dessous du niveau des potentialités agricoles. Or, les paramètres actuels du bilan prévisionnel ne sont valables qu'au voisinage de l'optimum de la courbe de réponse à l'azote (MEYNARD *et al.*, 1996). On sait, en particulier, que l'organisation augmente avec les disponibilités en azote minéral, engendrant une diminution de la minéralisation nette (RECOUS *et al.*, 1996). De même, les pertes gazeuses augmentent avec la dose d'engrais. L'équation d'efficience prend en compte ces variations de manière simple, par le biais du coefficient apparent d'utilisation de l'engrais, constant dans la gamme de fertilisation suboptimale (MEYNARD *et al.*, 1996). Cette méthode se prête donc bien au calcul des doses d'engrais en agriculture extensive.



Graphique n° 2 - Histogramme des valeurs d'azote absorbé à l'optimum de la courbe de réponse à l'azote

109 résultats dont :

72 valeurs Lorraine (1992 - 1996)

15 valeurs Poitou-Charentes (1993 et 1994)

27 valeurs essais ITCF multilocaux (1995 et 1996)

Si on ajoute à ceci, comme cela a déjà été précisé, l'intérêt qu'il y a de pouvoir vérifier *a posteriori* chacun des termes de l'écriture, de façon à pouvoir améliorer les référentiels régionaux, ainsi que l'existence de nombreux travaux en Lorraine sur ce thème, on voit que beaucoup d'arguments militent en faveur de son utilisation.

Après le constat de la grande variabilité pour chacun des termes de cette écriture, nous poserons donc un certain nombre d'hypothèses pour mieux comprendre cette variabilité et pour améliorer la prévision de leur valeur.

2.3. ESTIMATION DES TERMES DE L'EQUATION D'EFFICIENCE

2.3.1. LES BESOINS EN AZOTE DU PEUPLEMENT

Dans le produit bY , b représente la valeur des quantités d'azote absorbées, exprimées en kg d'azote, par la plante entière à l'optimum de la courbe de réponse (cf chap. 4.2.2.3.) par quintal de grain à 15 % d'humidité. Pour l'établissement des références sur les valeurs de b , l'azote absorbé par les parties aériennes est mesuré.

Pour prendre en compte les quantités d'azote absorbées par les racines, on considère que celles-ci contiennent 20 % de l'azote total. Cette valeur (COÏC, 1956) est proche des valeurs mesurées par RECOUS en 1988 : 22,7 %, moyenne de 3 essais avec chacun 2 formes d'azote.

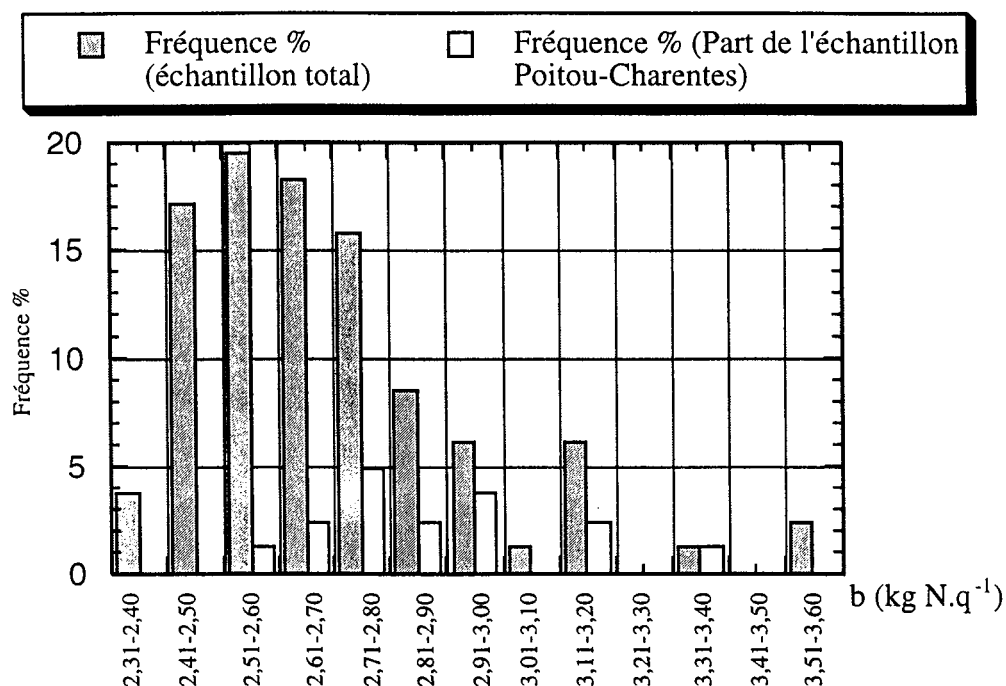
Dans le produit bY , Y représente la production de grain à 15 % d'humidité, exprimée en $q \cdot ha^{-1}$.

Au total $bY = kg \ N \cdot q^{-1} \cdot q \cdot ha^{-1}$ s'exprime en kg d'azote par hectare ($kg \ N \cdot ha^{-1}$).

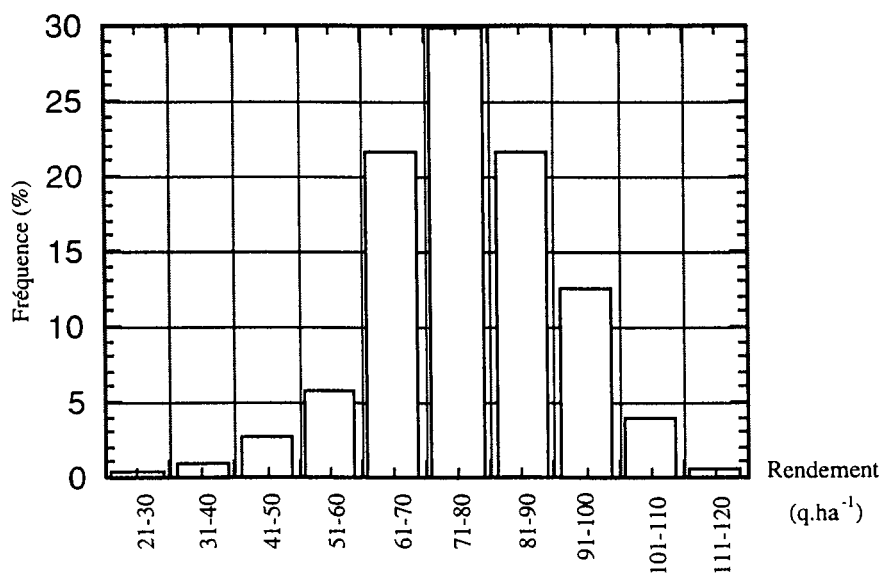
2.3.1.1. Gammes de variations observées

- **La valeur de l'azote absorbé**, à l'optimum de la courbe de réponse à l'azote, a été mesurée sur 109 expérimentations. Le graphique n° 2 montre que cette quantité est très variable. On peut en particulier noter qu'il est possible d'observer des valeurs supérieures à $300 \ kg \cdot N \cdot ha^{-1}$ (14,7 % des situations) alors qu'on a longtemps considéré qu'on pouvait plafonner le niveau des besoins à cette valeur, la grande majorité se situant entre 150 et $300 \ kg \cdot N \cdot ha^{-1}$ (79,8 %).

- **Pour b** , la valeur de $3 \ kg \ N \cdot q^{-1}$ a été proposée par COÏC en 1956 pour les rendements obtenus avec les variétés de l'époque et pour une teneur en protéines de l'ordre de 12 %. Cette valeur est confirmée par De WIT en 1979. Toutefois, son utilisation pour le calcul des besoins



Graphique n° 3 - Histogramme des valeurs de b à l'optimum de réponse à l'azote
 82 valeurs dont :
 67 valeurs Lorraine (1992-1996)
 15 valeurs Poitou-Charentes (1993 et 1994)



Graphique n° 4 - Histogramme des rendements du blé obtenus sur les réseaux de parcelles suivies par la CRA Lorraine de 1992 à 1997 (effectif : 328)

prévisionnels peut conduire dans bon nombre de cas à un échec : les doses optimales calculées ne sont pas celles prévues et il faut plus de 3 kg d'azote par quintal de grain car l'azote apporté est mal utilisé par la plante en raison notamment d'un mauvais transfert du sol aux racines (SEBILLOTTE, 1985). Un autre aspect concerne l'évolution du matériel génétique qui a conduit à l'obtention de variétés dont la productivité en grain s'est améliorée par rapport à la matière sèche totale produite (DOUSSINAUT, 1989), la conséquence étant, pour une même quantité d'azote absorbée, une diminution de la valeur du ratio b . De plus, on a montré que cette valeur varie tout au long de la courbe de réponse à l'azote. Sa valeur diminue lorsque les doses d'azote sont inférieures à celles qui procurent le maximum de rendement (BOIFFIN *et al.*, 1981 ; MEYNARD, 1983). De même, une étude conduite par l'ITCF en 1997 (ITCF, Doc. interne) met en évidence un "effet variété" important et une gamme s'échelonnant de 2,8 pour la variété BOURBON à 3,86 pour la variété QUALITAL. De plus, pour chaque variété, il existe une forte variabilité autour de la moyenne. Aussi, lorsqu'on examine la valeur de ce ratio au sein d'études régionales ou nationales sur des essais qui regroupent plusieurs variétés et systèmes de culture, on observe une variabilité importante. Sur 82 expérimentations suivies en Lorraine et Poitou-Charentes où ce ratio a été mesuré à l'optimum de la courbe de réponse, les valeurs s'échelonnent de 2,3 à 3,4 kg N.q⁻¹, avec un maximum des valeurs comprises (70,7 %) entre 2,4 et 2,8 (graphique n° 3).

- **Pour la valeur de Y** , l'examen des rendements observés dans de multiples conditions pédoclimatiques et de systèmes de cultures (328 résultats lorrains sur 6 années) montre une très grande variabilité (graphique n° 4), moins de 30 q.ha⁻¹ à plus de 110 q.ha⁻¹ avec une grande majorité des résultats compris entre 60 et 100 q.ha⁻¹ (85,6 %).

2.3.1.2. Le modèle bY

• Prévion de la valeur de b

On a vu que, dans la majorité des cas, même si on constate une variabilité non négligeable pour la valeur de b , c'est la valeur de 3 kg N.q⁻¹ qui est retenue. Une des améliorations possibles consiste à établir une typologie variétale. Ce travail est en cours à l'ITCF. A partir de résultats acquis sur 7 années (de 1990 à 1996) comprenant 35 sites expérimentaux, 3 grands types de sol, 38 variétés et au total 188 courbes de réponse à l'azote, une première synthèse permet de proposer 3 valeurs pour b selon les groupes variétaux (ITCF, document interne) :

$b = 2,8$ kg N.q⁻¹ pour les variétés AMI, TREMIE, THESEE

$b = 3,2$ kg N.q⁻¹ pour les variétés CAMP REMY, FORBY, SOISSONS

$b = 3,5$ kg N.q⁻¹ pour les variétés QUALITAL, MONOPOLE

Une approche semblable est utilisée dans le cadre du logiciel PC Azote mis au point en région Poitou-Charentes. Ainsi, la valeur de $2,65 \text{ kg N.q}^{-1}$ est retenue pour les blés panifiables courants (BPC) et 2,85 pour les blés panifiables supérieurs (BPS).

• **Prévision de la valeur de Y**

Nous examinerons dans ce chapitre les différentes possibilités actuelles de réaliser une prévision de l'objectif de rendement, qu'elles soient basées sur de simples observations ou qu'elles résultent de la mise en oeuvre de modèles plus ou moins complexes.

** Enregistrement des rendements parcellaires*

Une des méthodes les plus simples pour fixer un objectif de rendement prévisionnel sur une parcelle donnée, consiste à prendre comme base de calcul, les rendements déjà observés sur la même parcelle. Cette méthode malgré sa simplicité apparente n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes :

- En dehors d'équipements qui permettent la mesure du rendement au moment de la récolte, les agriculteurs céréaliers qui vendent la totalité de leur production, ne connaissent souvent que le rendement moyen de l'exploitation sans pouvoir apprécier avec suffisamment de précision la variabilité interparcellaire.
- Dans les exploitations mixtes où les céréales constituent la base de l'alimentation du bétail, la méconnaissance des rendements réalisés à la parcelle est encore plus flagrante.
- Lorsqu'on utilise en référence des rendements observés il y a plusieurs années, on peut être conduit à retenir des objectifs inférieurs au potentiel des variétés actuelles.
- Les rendements retenus ont pu être affectés par différentes causes relatives au système de culture (date et densité de semis par exemple) à l'itinéraire technique (contrôle des adventices et de maladies) ou à des événements climatiques exceptionnels (sécheresse).

Dans ces conditions, si ces causes ne sont pas correctement identifiées et leurs conséquences quantifiées, on a toutes les chances de sous estimer l'objectif de rendement.

A l'inverse, la tentation est grande de ne retenir que les rendements des années exceptionnelles (type 1984 ou 1996) et dans ce cas, la surestimation de l'objectif de rendement devient quasi systématique.

** Le logiciel AZOBIL*

Dans ce logiciel, l'objectif de rendement maximum est borné à 120 q.ha^{-1} . L'utilisateur peut introduire deux chiffres correspondant à une hypothèse de rendement minimale et maximale. De

plus, une troisième possibilité consiste à calculer un rendement en fonction de renseignements relatifs au sol et à la culture. A partir d'un rendement de référence, égal à 95 q.ha^{-1} pour le blé d'hiver, le calcul s'effectue en prenant en compte huit facteurs qui sont affectés chacun de coefficients variant en moyenne de 0,7 à 1,15.

Les facteurs pris en compte sont les suivants :

Facteur 1 : Effet précédent.....	0,939 à 1,050
Facteur 2 : Profondeur potentielle d'enracinement.....	0,817 à 0,991
Facteur 3 : Teneur en argile.....	0,865 à 0,999
Facteur 4 : Teneur en sable	0,777 à 0,999
Facteur 5 : Teneur en matière organique	0,777 à 1,000
Facteur 6 : Densité de peuplement	0,85 à 1,000
Facteur 7 : Variété	0,900 à 1,150
Facteur 8 : Date de semis (en fonction du type variétal).....	0,700 à 1,000

Le rendement objectif est alors obtenu en multipliant le rendement de référence par le produit des huit facteurs.

Plusieurs remarques peuvent être formulées par rapport à cette approche de prévision de l'objectif de rendement.

- Les domaines d'établissement ou de validation ne sont pas précisés.
- Les effets de certains facteurs, comme la teneur en sable ou en argile agrègent de nombreux processus agronomiques, dont les conséquences ne sont pas les mêmes selon le climat. Par exemple, l'effet du sable devrait être en interaction avec le bilan hydrique ou avec la précocité variétale.
- Les facteurs date et densité de semis ne peuvent avoir une signification que s'ils sont mis en relation avec les températures hivernales, assez variables d'une région à l'autre.

Plus généralement, l'incidence des variables climatiques sur le rendement n'est pas prise en compte, ce qui laisse supposer que le modèle a été mis au point pour une zone géographique restreinte.

** Le logiciel PC Azote*

Dans sa forme actuelle, le logiciel calcule un objectif de rendement à partir du niveau connu de la réserve utile du sol (en mm d'eau). Le rendement minimum se situe à 63 q.ha^{-1} pour une réserve utile de 40 mm et le maximum à 95 q.ha^{-1} pour une réserve utile de 200 mm. Ces rendements correspondent à la valeur du quatrième quintile de résultats observés en région

Poitou-Charentes de 1986 à 1993, pour des précédents colza, pois ou tournesol. Dans le cas où la réserve utile n'est pas connue, elle peut être estimée par le logiciel en prenant en compte certaines caractéristiques physico-chimiques du sol.

La principale remarque pouvant être formulée quant aux variables d'entrée de ce modèle est qu'on fait l'hypothèse que le stress hydrique est le facteur essentiel de différenciation des rendements, hypothèse tout à fait acceptable pour la région de l'AUNIS dans laquelle il a été établi (PLAS, 1992), qui inclut une majorité de sols insensibles à l'excès d'eau hivernal et présentant des bilans hydriques très variables selon la profondeur. En revanche, cette hypothèse est plus discutable si on inclut l'ensemble des sols, dont certains hydromorphes, de la région Poitou-Charentes.

** Les potentialités agroclimatiques*

Les études sur les potentialités de production du blé d'hiver ont été initiées en France dans les années 80. Le constat, en particulier pendant le suivi des opérations "Blé conseil", de la grande variabilité des rendements mesurés à la parcelle, fut à cette époque un des éléments qui déclencha la prise de conscience chez les agriculteurs et leurs conseillers, qu'il n'était pas possible de réaliser 100 q.ha^{-1} dans toutes situations, même si une communication bien orchestrée autour de ce chiffre magique pouvait le leur laisser croire.

Dès la mise en place des programmes de relance de l'agronomie en 1984, de nombreux travaux furent engagés sur ce thème (LIMAUX, 1985 ; DELPHIN, 1986 ; PIERSON, 1986 ; THEVENET, 1986 ; CATTIN, 1989 ; RIAMON, 1990 ; FLORENTIN, 1991, BOURZEIX, 1994 ; HOUBEN, 1995).

En général, les mesures étaient réalisées sur des réseaux de parcelles qui croisaient les types de sol et les systèmes de culture les plus fréquemment rencontrés dans la région considérée. De plus, on veillait à ce que les moyens techniques à disposition de l'agriculteur (fertilisation minérale, lutte contre les maladies et ravageurs en particulier) soient mis en oeuvre de façon optimale. Dans ces conditions, on peut donc considérer que les rendements mesurés sur ces parcelles sont proches des potentialités agricoles telles que définies par BOIFFIN et SEBILLOTTE (1982).

Ainsi, à travers toutes ces études, une démarche s'est progressivement créée en France, tant sur le plan des méthodologies expérimentales mises en oeuvre (réseaux de parcelles pluriannuels, meilleure caractérisation des sites expérimentaux, que sur la façon de traiter les données. On peut en particulier relever tous les efforts mis en oeuvre pour mieux cerner les relations entre les composantes du rendement par type variétal (FLEURY et LIMAUX, 1987), et construire des courbes enveloppes pour aider à la prévision des différents niveaux potentiels pouvant être

atteints pour chaque composante en fonction de l'état de la culture (Journée CARYOPSE, ITCF, 1989 ; n° spécial Chambre d'Agriculture, 1996 ; HOUBEN, 1995).

Les connaissances acquises ont ainsi permis de réels progrès quant au choix des objectifs de rendement grâce à une meilleure adéquation de ceux-ci avec les aptitudes réelles des sols à produire.

On peut toutefois situer un certain nombre de limites à l'utilisation de ces résultats :

- Si les systèmes de culture sont en général faciles à décrire et à classer dans une région considérée, il n'en va pas de même pour les sols. En dehors d'études pédologiques ponctuelles, il n'existait pas à l'époque de typologies à finalité agronomique. De ce fait, il n'a pas toujours été facile de transposer, avec succès chez les agriculteurs, les résultats des études précitées, même si la caractérisation de chaque site était réalisée.
- Les résultats de ces études sont souvent contingents du climat de l'année et même si on a pu identifier les éléments responsables des variations de rendement (pour un même sol et système de culture), les études fréquentielles permettant de prévoir la probabilité d'apparition de tel ou tel événement climatique (déficit en eau par exemple) sont rarement réalisées.

** L'équation d'efficience de l'eau vis-à-vis de la production de matière sèche*

La relation de base, qui relie la production de matière sèche, à la satisfaction des besoins en eau de la plante, a été établie par ROBELIN (1958) cité par SEBILLOTTE (1996) :

$$MS = \frac{ETR}{ETM} + b$$

où :

ETR = Evapotranspiration réelle fonction d'ETM et de l'eau disponible dans le sol (en mm d'eau)

ETM = K.ETP, K étant un coefficient cultural variable avec la culture et le stade de développement et ETP représentant la valeur de l'évapotranspiration potentielle calculée à partir de paramètres climatiques variables selon les formules utilisées.

L'intérêt de cette approche réside dans le fait qu'elle permet une modélisation empirique de la production de matière sèche dès lors qu'on dispose d'une large gamme des valeurs d'ETR, ce qui est possible lorsque la gamme de valeur de la réserve en eau utile du sol (RU) est elle-même suffisamment grande.

Ce type de modélisation a été tenté en Lorraine sur blé d'hiver et colza d'hiver (FLORENTIN, 1991). Les résultats acquis n'ont toutefois pas permis de déboucher sur une relation prédictive convenable, la difficulté consistant à estimer correctement la réserve utile et ceci pour deux raisons principales :

- Dans le cas des sols caillouteux superficiels développés sur calcaire, on sait mal prendre en compte l'efficacité des quelques racines qui, au gré de la fissuration de la roche mère, peuvent se développer profondément (1 m ou plus).
- Sur les sols argileux, l'observation des profils d'enracinement nous a montré que des discontinuités texturales en fonction de la profondeur sont fréquentes et qu'elles génèrent presque toujours une diminution assez nette de la densité d'enracinement sans toujours affecter la profondeur.

Pour pallier ces difficultés, on pourrait envisager d'évaluer la disponibilité de l'eau sur les différents types de sol au moyen d'une mesure dans chaque horizon des caractéristiques hydrodynamiques, de l'enracinement de la culture et d'un modèle mécaniste de circulation de l'eau dans le continuum "sol-plante-atmosphère". Mais cette approche nécessiterait trop de paramètres inaccessibles techniquement sur des parcelles d'agriculteur. Dans ces conditions, nous proposerons d'utiliser une approche empirique par type de sol.

2.3.1.3. Le modèle $\beta.NG$

Ce modèle proposé par MEYNARD en 1985, relie les quantités d'azote absorbé à la récolte, non plus au rendement en grains, mais au nombre de grains produits par unité de surface.

$$\text{Il s'écrit : } Q.NR = \beta.NG.10^{-2}$$

où $Q.NR$ = azote absorbé à la récolte en kg.ha^{-1}

β = coefficient variétal

NG = nombre de grains. m^{-2}

2.4.1.3.2. Intérêt du coefficient β par rapport à b

L'examen de la cinétique d'absorption de l'azote par un peuplement de blé, montre qu'à la floraison, environ 80 % est déjà absorbée (BOIFFIN *et al.*, 1981). A cette époque, le nombre de grains est déterminé et les conditions de leur remplissage sont beaucoup plus fonction des conditions climatiques qui vont suivre et ce jusqu'à la fin du palier hydrique, que de l'alimentation azotée de la plante.

En revanche, les facteurs et conditions de croissance et en particulier l'alimentation azotée, qui précèdent la floraison vont conditionner la réalisation de ce nombre de grains. Il semble donc logique que la valeur de $NG.\text{m}^2$ rende mieux compte de QNR que le rendement exprimé en q.ha^{-1} .

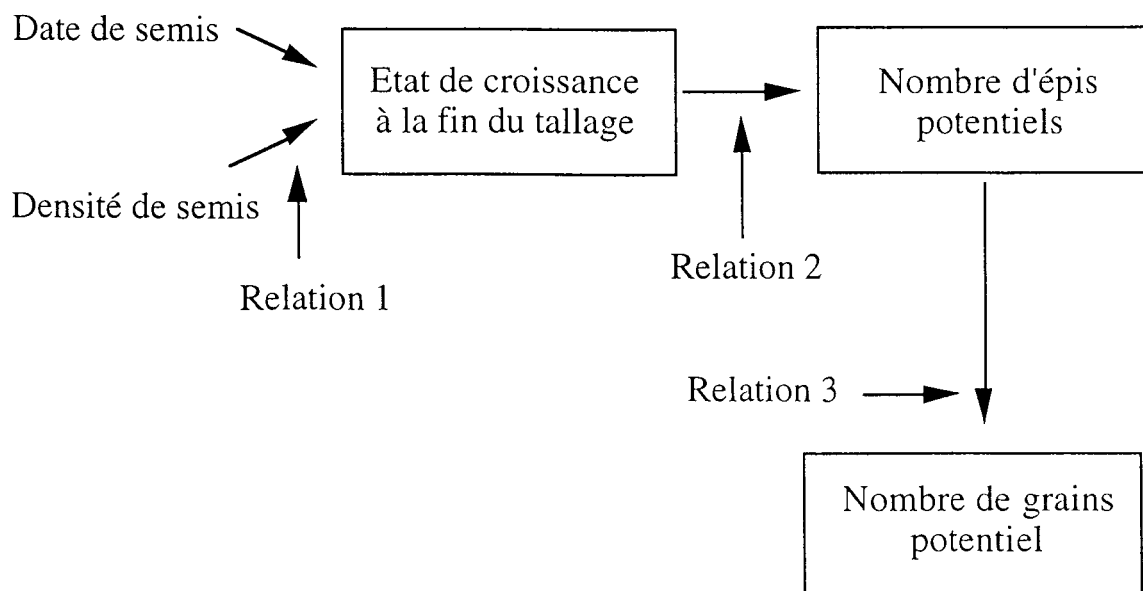
Ceci fut vérifié sur plusieurs essais conduits en 1981 et 1982 par MEYNARD qui montre que, pour les 3 variétés FIDEL (15 essais), LUTIN (16 essais) et ARMINDA (4 essais) et pour des doses d'azote considérées comme proche de l'optimum, la valeur de β est beaucoup plus stable que celle de b (tableau n° 1).

	β		b	
	Valeur moyenne	CV en %	Valeur moyenne	CV en %
FIDEL	1,257	5,0	2,96	13,4
LUTIN	1,302	9,8	3,15	14,5
ARMINDA	0,922	4,2	2,99	11,6

Tableau n° 1 - Valeurs et coefficients de variation des ratios β et b pour 3 variétés (MEYNARD, 1985)

Cependant, l'utilisation de ce modèle pour la prévision des besoins en azote nécessite d'une part une prévision du nombre de grains et d'autre part, de disposer d'un référentiel permettant de prévoir la valeur de β par variété.

Or, la prévision du nombre de grains n'est possible que si on dispose de modèles d'élaboration du rendement. Différents modèles ont été mis au point dans ce but. On citera en particulier les relations proposées par MEYNARD en 1985 pour estimer le nombre de grains potentiels :



Leur mise en oeuvre nécessite toutefois le paramétrage par variété des relations 1, 2 et 3 ainsi que l'étude des différents facteurs du milieu (état structural, déficit en eau, gel hivernal...) qui peuvent modifier de façon significative les prévisions issues de ces modèles (MEYNARD, 1985 ; MEYNARD et LIMAUX 1987 ; FLEURY et LIMAUX, 1987)

moyen terme, quand le recueil des variables d'entrée pourra plus aisément être automatisé, et qu'une validation poussée aura été réalisée, de tels modèles seront certainement très utiles au raisonnement de la fertilisation.

2.3.1.5. Questions ouvertes

Nous avons vu que, dans la plupart des situations, l'estimation des besoins en azote ne nécessite que la prévision du rendement, dans la mesure où le besoin par unité de production (b) est considéré comme constant et égal à 3 kg N.q^{-1} .

Cette simplification pose un premier problème : toute erreur sur l'appréciation de l'objectif de rendement se répercute complètement sur le calcul de la dose d'azote, et, dans le cas général où, par peur de perdre les "derniers quintaux", on a tendance à surestimer les potentialités parcellaires, le calcul conduit inévitablement à une dose excessive par rapport aux besoins réels de la culture.

Dans ces conditions, peut-on améliorer la prévision de l'objectif de rendement en prenant mieux en compte les caractéristiques du milieu, en particulier par la description d'un certain nombre de caractéristiques permanentes du sol (pierrosité, discontinuité texturale et leurs répercussions sur l'enracinement), ainsi que les caractéristiques climatiques (déficit en eau pour les sols superficiels ou excès d'eau hivernal pour les sols plus profonds) ? Une analyse fréquentielle du climat pour mieux cerner les variations interannuelles mais aussi intra-annuelles en fonction des microclimats régionaux, peut-elle permettre de mieux quantifier les chances d'atteindre un objectif de rendement prévisionnel ?

Un deuxième problème concerne l'utilisation d'une valeur moyenne pour b. Même si sa variabilité se révèle moins importante que celle de Y, elle n'en reste pas moins importante ($2,3$ à $3,4 \text{ kg N.q}^{-1}$). Dans ces conditions, l'utilisation d'une valeur moyenne peut conduire à calculer des besoins en azote assez éloignés de la réalité. On a vu que la prise en compte du ratio β pouvait permettre d'améliorer sensiblement cette prévision, mais aussi que le manque d'actualisation des références rendait son utilisation délicate. Pour tenter d'apporter une solution à ce problème, nous proposons de tester l'intérêt de prendre en compte, non plus le rendement en grain, mais le rendement en matières sèches des parties aériennes (MSPA) comme prédicteur des besoins en azote.

Il a en effet été montré (DOUSSINAULT, 1989) qu'une des principales causes d'augmentation de la productivité des variétés réside beaucoup plus dans l'augmentation de l'indice de récolte que dans l'augmentation de production de la biomasse totale. Si on admet que l'azote absorbé sert avant tout à fabriquer de la biomasse (le remplissage du grain étant peu affecté par

Fumure azotée du blé

PREVISION DES FOURNITURES EN AZOTE DU SOL

VOUS POUVEZ PREVOIR
LEURS VALEURS

A PARTIR → DU SYSTEME DE CULTURE

DU TYPE DE SOL

		Système céréale	Système élevage	
		Pas de précédent prairie depuis au moins 6 ans et/ou pas d'apport de fumier ou fréquence d'apport > 4 ans	prairie retournée depuis au moins 6 ans et/ou pas 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
> 25 % argile	< 50	60	60	50
	50 - 75	75	75	{60}
	> 75	85	{90}	{70}
LS - SL A - AL	60 - 80	75	{80}	{75}
	60 - 80	95	{100}	{80}
SL A - AL - LA - L	> 80	85	{95}	85
	80 - 100	100	{110}	
LS L A - AL - LA - L	100 - 120	105	{120}	{100}
	> 100		{120}	125
	100 - 120	125	135	{130}
L - LS L S A - AL - LA	> 120	125	160	{120}
			160	{130}
			{120}	100
		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				
Céréales	20	-20	-40	-20
Elevages	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

l'alimentation azotée), dans ces conditions le ratio $\frac{N_{\text{absorbé}}}{MSPA}$, que nous appellerons B, présente-t-il plus de stabilité que b ?

2.3.2. LA VALEUR DE PO

2.3.2.1. Constat de la variabilité

Cette valeur représente les quantités d'azote absorbé à la récolte par une culture n'ayant pas reçu de fertilisation azotée minérale. Les hypothèses pour le calcul sont les mêmes qu'en situation fertilisée, à savoir 20 % de l'azote total absorbé dans le système racinaire.

Un suivi de témoins non fertilisés, réalisé entre 1991 et 1997 par la CRA Lorraine sur 204 situations lorraines, révèle la très grande variabilité des valeurs de Po (de 28 à 225 kg.N.ha⁻¹). Près des 3/4 de ces valeurs sont comprises entre 50 et 125 kg N.ha⁻¹ (73,1 %). Le graphique n° 5 montre que la répartition est proche d'une distribution normale avec toutefois une légère sur-représentation pour les faibles valeurs.

Cette grande dispersion des résultats n'est pas propre à la région Lorraine. En Poitou-Charentes, les valeurs observées sur plusieurs années sur 85 résultats s'échelonnent de 30 à 196 kg N.ha⁻¹ (ANGEVIN, communication personnelle).

2.3.2.2. Facteurs de variation et modélisation

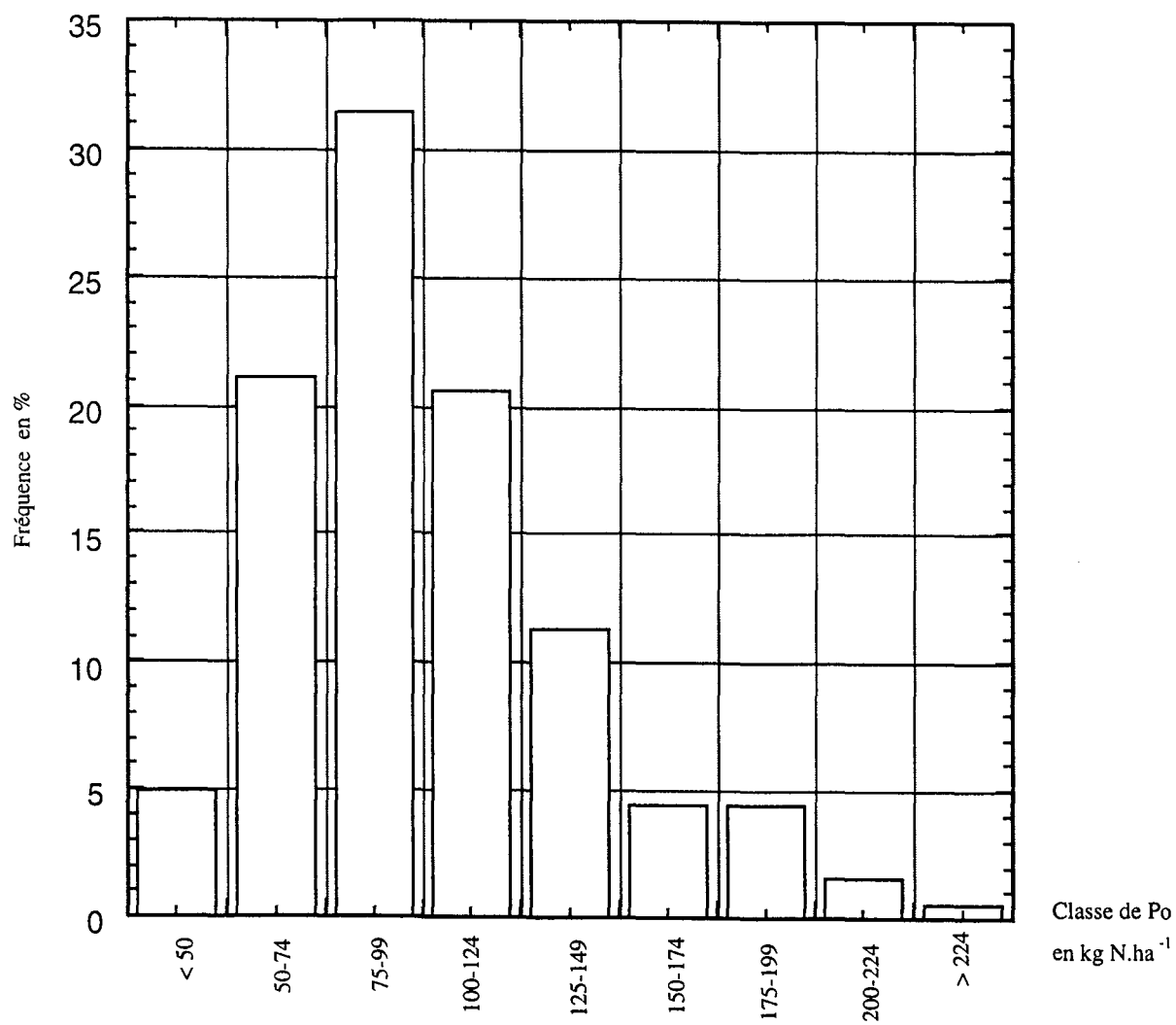
Il existe actuellement peu de travaux conduits en France sur la modélisation des valeurs de Po sur blé d'hiver. L'écriture avec CAU étant principalement utilisée en région Lorraine et Poitou-Charentes, nous développerons ici les méthodes mises en oeuvre dans ces deux régions.

• Les grilles de prévision basées sur les types de sol et les systèmes de culture

Publiées en Lorraine en 1992, elles ont été établies à partir de 200 résultats de placettes non fertilisées en azote, suivies pendant les années 1986 à 1991. Les variables d'entrée sont :

- Le système de culture, renseigné à partir du passé prairial, de la fréquence des apports organiques et du précédent cultural (nature et devenir des résidus de récolte).
- Le type de sol, renseigné par sa texture de surface et sa profondeur estimée par la possibilité de prospection à la tarière.

Au croisement de ces deux variables, les grilles indiquent une valeur moyenne du terme Po (Tableau n° 2)



Graphique n° 5 - Histogramme des valeurs de Po obtenues sur les réseaux de parcelles suivis par la CRA Lorraine de 1992 à 1997 (effectif : 204).

Dans cette méthode qui présente l'avantage de la simplicité, on suppose que la valeur de P_o peut être prévue à partir d'un petit nombre de critères faciles d'accès; Ceci est vrai, particulièrement lorsqu'il s'agit de systèmes de cultures simples du type colza, blé, orge d'hiver avec résidus de récolte systématiquement enfouis et jamais de fumier. La simplicité de ces systèmes présente indéniablement un atout. Ceci a permis que ces grilles soient adoptées rapidement par les agriculteurs. Toutefois, quelques problèmes restent posés :

- La variabilité interannuelle des reliquats sortie hiver n'est pas prise en compte, ce qui pose un problème surtout pour les sols profonds à fort niveau de fourniture.
- La teneur en azote organique des sols est très variable et l'entrée par type de sols et systèmes de culture n'est pas suffisamment précise pour bien rendre compte de cette variabilité.

Ceci conduit, par exemple dans le cas de situations sensibles au lessivage et après des hivers très pluvieux, à une surestimation de la valeur de P_o . A l'inverse, on peut sous-estimer cette valeur dans les sols riches en azote organique ayant minéralisé des quantités importantes d'azote à l'automne, et derrière un hiver sec.

• Le logiciel PC Azote

Dans ce logiciel, le terme P_o est prévu à partir de deux modèles :

- Le premier simule la valeur du reliquat sortie hiver qui est calculé à partir du bilan azoté du précédent

$B_p = RSH_{n-1} + E - N_{abs} \text{ préc} + Mm \text{ humus précédent} + \text{effet antéprécédent} + N \text{ irrigation précédent, où}$

RSH_{n-1} = Reliquat sortie hiver à l'ouverture du bilan du précédent

E = Quantité d'azote apportée par l'engrais sur le précédent

$N_{abs} \text{ préc.}$ = Quantité d'azote absorbé par le précédent

$Mm \text{ humus précédent}$ = Quantité d'azote minéralisé sur le cycle du précédent

Effet antéprécédent = Quantité d'azote issue de l'antéprécédent, non lessivée l'hiver précédent et non absorbée par le précédent.

$N_{min} \text{ irrigation}$ = Quantité d'azote apporté par l'eau d'irrigation sur le précédent.

Cette valeur de B_p , diminuée des quantités d'azote absorbé pendant l'hiver par le peuplement (valeur dénommée MOÏSE, pour Azote Sauvage des Eaux) est soumise au lessivage selon un modèle adapté de celui proposé par BURNS en 1976. La valeur de RSH est donc égale à B_p diminué des quantités lessivées.

Le deuxième modèle prévoit les quantités d'azote minéralisé au printemps. Il a été paramétré dans des situations où le bilan du précédent était nul et où les proportions lixiviées pendant l'hiver, sont proches de 100 %. Initialement, la valeur était de 30 kg.N.ha^{-1} (PLAS, 1992). Une adaptation aux sols profonds a été proposée par LEGALL (1997), la valeur de 30 kg étant alors modulée en fonction de la réserve utile. Au total la valeur de P_o est égale à la somme de RSH simulé, Moïse et N_{min} printemps.

Une des originalités de ce modèle consiste à prévoir le calcul du reliquat sortie hiver lorsque celui-ci n'est pas mesurable. Il est bien adapté aux sols à cailloux peu profonds de la région Poitou-Charentes. Cependant, sa généralisation à d'autres situations nécessite un certain nombre d'adaptations. LE GALL, dans l'Indre (1997) a notamment proposé une amélioration du bilan azoté du précédent derrière colza. De façon plus générale, il semble que le calcul de la minéralisation ne soit pas très bien adapté aux sols profonds. Les paramètres empiriques de minéralisation ont été établis sur terre de groies et leur généralisation à d'autres situations, pour lesquelles les quantités d'azote minéralisé et les rythmes de minéralisation sont différents, nécessitera sans doute des adaptations. Un dernier point faible réside dans l'imprécision du bilan du précédent. Même si les rendements peuvent être correctement appréciés, les teneurs en azote restent approximatives.

2.3.2.3. Questions ouvertes

Dans les situations où la mesure de l'azote minéral du sol est possible, on peut décomposer la valeur de P_o de la façon suivante :

$$P_o = N_{SH} + M_n + R_i - R_f$$

avec :

P_o = azote absorbé à la récolte par le peuplement non fertilisé en kg N.ha^{-1}

N_{SH} = azote absorbé par le peuplement à l'ouverture du bilan en kg N.ha^{-1}

M_n = Minéralisation nette entre l'ouverture du bilan et la récolte en kg N.ha^{-1}

R_i = Azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan en kg N.ha^{-1}

R_f = Azote minéral dans le sol à la récolte en kg N.ha^{-1}

Or, il est possible d'accéder à la valeur de ces différents termes, soit par des mesures, soit en la simulant à partir de modèles :

- N_{SH} : Dans la mesure où les valeurs de biomasses à l'ouverture du bilan sont toujours inférieures à 150 g MS.m^{-2} , on doit pouvoir prévoir la valeur de N_{SH} à partir d'une simple pesée de biomasse, en faisant l'hypothèse que la teneur en azote des parties aériennes est stable et de l'ordre de 4,4 %, teneur correspondant au palier de la courbe de

teneur en azote critique proposé par JUSTES (1993). Cette amélioration de la prévision de P_o , opérationnelle sur colza (REAU *et al.*, 1994) n'a cependant jamais été testée sur blé.

- Mn : Cette valeur n'est pas mesurable, mais on peut la prévoir à partir de modèles de minéralisation :

AZOBIL (MACHET *et al.*, 1990)

SUNDIAL (BRADBURY *et al.*, 1993)

AZODYN (JEUFFROY, RECOUS, 1998)

Ces modèles ont en général été paramétrés pour prévoir la minéralisation en situation fertilisée. Néanmoins, il serait intéressant d'étudier leur performance en l'absence de fertilisation.

- R_i est une valeur la plupart du temps mesurable, mais qui peut également être simulée (PC azote)
- R_f n'est pas mesurable au moment où on calcule la dose d'engrais, il doit donc être estimé.

Il existe donc un certain nombre d'acquis pour tenter de réaliser une modélisation prédictive de la valeur de P_o . *A priori*, on peut penser qu'en utilisant ces acquis, on pourra mettre au point une procédure de prévision des fournitures en azote du sol plus précise que les grilles actuellement utilisées en Lorraine.

2.3.3. LE COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DE L'AZOTE DE L'ENGRAIS = CAU

Le CAU est défini comme étant la différence d'azote absorbé entre un peuplement fertilisé et un peuplement non fertilisé, rapporté à la quantité d'azote apporté :

$$CAU = \frac{P_x - P_o}{X} \times 100$$

où :

P_x = azote absorbé par le peuplement à la dose X en kg N.ha^{-1}

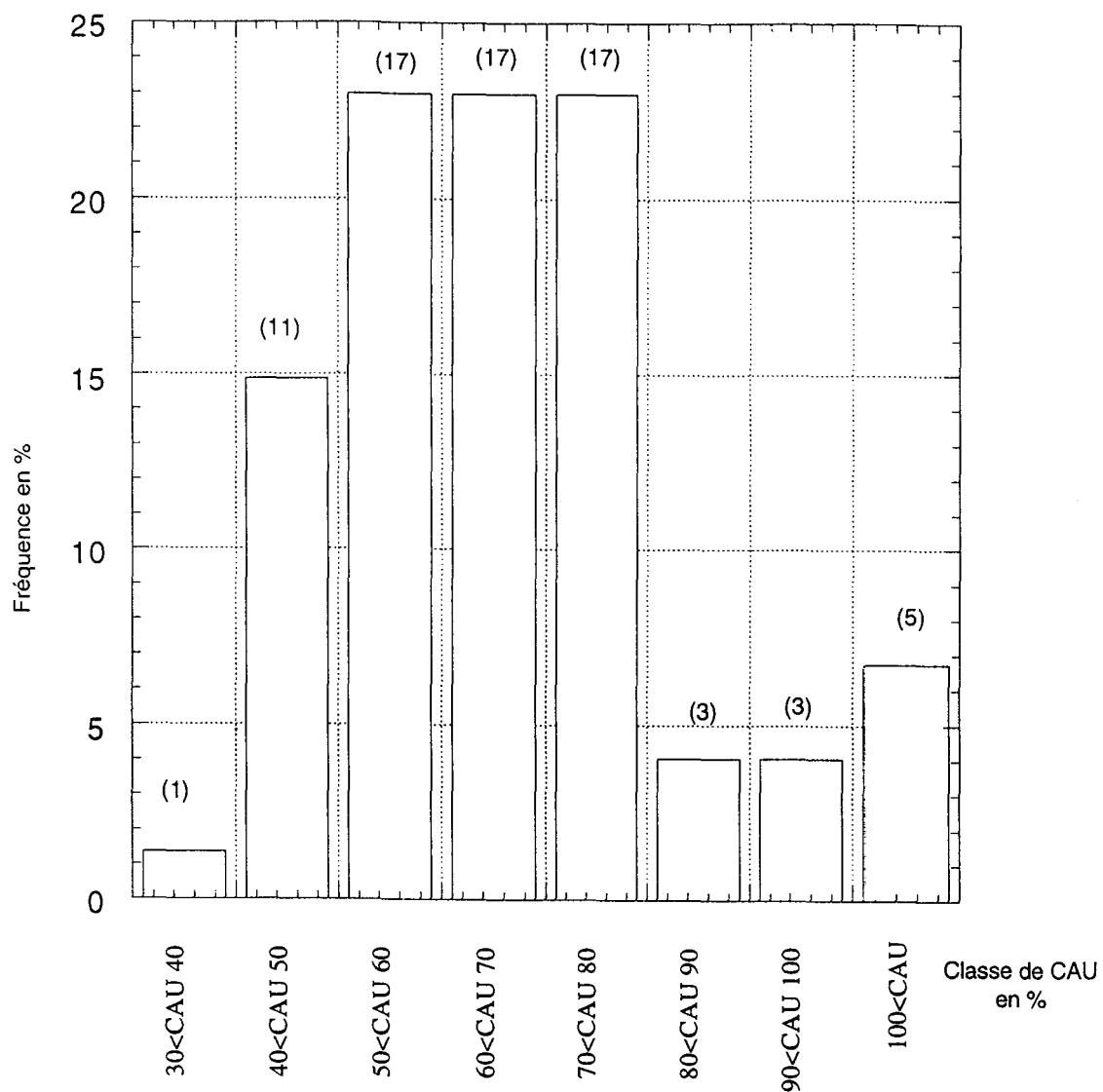
P_o = azote absorbé par le peuplement en l'absence d'engrais en kg N.ha^{-1}

X = dose d'engrais apporté en kg N.ha^{-1}

CAU = coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais en %

2.3.3.1. Variabilité

Nous avons pu au total, analyser 74 résultats provenant d'expérimentations suivies de 1992 à 1997. Les CAU, mesurés à l'optimum de la courbe de réponse, (tel que définis au chapitre



Graphique n° 6 - Histogramme des CAU à l'optimum de réponse à l'azote calculés sur 74 essais conduits en Lorraine de 1992 à 1997.
 () : Effectif par classe

3.2.2.3.) sont très variables. La moyenne s'établit à 67,3 % avec un écart type de 16,74 %, les valeurs extrêmes variant de 38 % à 124 % (graphique n° 6). Plus de 2/3 des valeurs observées (68,9 %) se situent entre 50 % et 80 %, les pourcentages des valeurs inférieures à 50 % et supérieures à 80 % étant à peu près identiques (respectivement 16,2 % et 14,9 %). Une étude similaire conduite en Poitou-Charentes indique une valeur moyenne un peu supérieure (72 %) avec 30 % des valeurs supérieures à 80 % (PLAS, 1992).

2.3.3.2. Signification des coefficients d'utilisation de l'engrais (CAU et CRU)

Tel qu'il est défini, le CAU ne représente qu'une utilisation apparente de l'engrais. L'utilisation pourrait être qualifiée de réelle si la contribution du sol P_o , mesurée en l'absence de fertilisation, n'était pas modifiée par l'apport d'engrais. Or, l'utilisation de l'isotope stable ^{15}N permet de mesurer le coefficient réel d'utilisation (CRU) en identifiant la proportion réelle d'engrais marqué retrouvée dans la plante, et par différence avec l'azote total absorbé, les quantités provenant réellement du sol (Ndfs pour Nitrogen derived from soil). De nombreuses observations montrent que les valeurs de Ndfs sont souvent supérieures à celles de P_o (BROADBENT et NAKASHIMA, 1971 ; HAUCK et BREMNER, 1976 ; JENKINSON *et al.*, 1985 ; HART *et al.*, 1986 ; MACHET *et al.*, 1987 ; ROBERTS et JANZEN, 1989 ; RAO *et al.*, 1992). Ceci suggère qu'il existe une interaction entre l'azote apporté et l'azote natif du sol (ANI, pour Added Nitrogen Interaction). Il a été montré que cette interaction relève en général de phénomènes de substitution de pool : une partie des besoins en azote de la microflore du sol étant assurée par l'azote de l'engrais, les quantités d'azote du sol absorbées par la culture augmentent (BROADBENT, 1965 ; SORENSEN, 1982 ; JENKINSON *et al.*, 1985 ; WICKRAMASINGHE *et al.*, 1985 ; AZAM *et al.*, 1991 ; POWLSON *et al.*, 1992 ; RAO *et al.*, 1992). La conséquence est que l'utilisation réelle de l'engrais par la plante n'est jamais égale à 100, et que l'utilisation apparente est dans la majorité des cas supérieure à l'utilisation réelle :

$$\text{Ndfs} > P_o \Rightarrow \text{CRU} < \text{CAU}$$

On peut alors écrire l'équation d'efficience de l'azote de deux façons :

$$\text{Equation 1 : } P_x = P_o + \text{CAU} \cdot x \quad \text{où } P_x = \text{azote prélevé à la dose } x$$

$$\text{Equation 2 : } P_x = \text{Ndfs} + \text{CRU} \cdot x$$

L'examen de ces deux écritures conduit à plusieurs remarques :

1. L'utilisation de l'équation 1 ne nécessite en aucun cas, comme cela a pu être écrit par le passé (CARLOTTI, 1992 ; GATE, 1995) de faire l'hypothèse d'une valeur identique de la fourniture en azote du sol en situation fertilisée et non fertilisée.

2. Les deux équations sont opérationnelles pour le calcul de la dose x , dès lors qu'on est capable de modéliser les termes Po et CAU d'une part et $Ndfs$ et CRU d'autre part. Dans la pratique, le coût d'acquisition des références sur Po et CAU est sans commune mesure avec celui induit par l'utilisation du traceur ^{15}N indispensable pour accéder aux valeurs de $Ndfs$ et du CRU . Dans ces conditions, et compte tenu des avantages déjà cités liés à l'utilisation de l'équation 1, la modélisation ou le paramétrage de modèles existants peuvent être réalisés à moindres frais, sur des réseaux expérimentaux suffisamment importants pour couvrir la variabilité pédoclimatique et celle des systèmes de culture existants au niveau régional.

3. Il est possible d'observer des CAU supérieurs à 100 %. Dans ce cas, on peut écrire :

$$CAU > 100 \rightarrow 100 - CRU < CAU - CRU \text{ (équation 3)}$$

En remplaçant CAU et CRU dans l'équation 3 par leurs valeurs extraites des équations 1 et 2, on obtient l'équation :

$$100 - CRU < \frac{100 (Ndfs - Po)}{x}$$

ou encore $100 - CRU < 100 \frac{ANI}{x}$

On voit donc que dans les situations où $100 - CRU$ est petit (CRU élevé) et où $100 \frac{ANI}{x}$ est grand (ANI élevé associé à une valeur de x faible), il est possible d'obtenir un $CAU > 100$.

2.3.3.3. Facteurs de variation

2.3.3.3.1. *CAU et courbe de réponse à l'azote*

Dans la partie ascendante de la courbe de réponse à l'engrais azoté, plusieurs auteurs ont montré que le CAU est généralement constant (SIMAN, 1974 ; SPIERTZ, 1980 ; VAN KEULEN et VAN HEEMUST, 1982, cités par GREENWOOD et DRAYCOTT, 1988 ; BLOOM *et al.*, 1988 ; GREENWOOD *et al.*, 1989, sauf pour les légumes où il commence à décroître avant l'atteinte du rendement maximum).

Ceci revient à admettre que les quantités d'azote de l'engrais non utilisées par la plante sont proportionnelles à la dose apportée. En effet, le complément à 100 du coefficient apparent de l'engrais intègre à la fois le supplément de reliquats après récolte par rapport à une culture non fertilisée (ΔRAR) et les pertes liées à l'apport d'engrais (pertes gazeuses Gx , pertes par lessivage Lx) et le supplément d'organisation d'azote lié à l'apport d'engrais (Ix) (MEYNARD *et al.*, 1996).

On peut donc écrire :

$$(1 - \text{CAU}) X = \Delta \text{RAR} + G_x + L_x + I_x$$

En général, tant qu'on n'a pas dépassé l'optimum de fertilisation la valeur de ΔRAR est minime, voir nulle (MACHET et MARY, 1990). De même, le fractionnement de l'engrais permet le plus souvent d'éviter qu'il soit entraîné hors de portée des racines. On peut donc également négliger ce terme. L'équation devient alors : $(1 - \text{CAU}) X = G_x + I_x$. Les quantités perdues par organisation ou par voies gazeuses sont donc bien proportionnelles à la dose apportée.

Au-delà de l'optimum, le CAU diminue (GREENWOOD *et al.*, 1989 ; PLAS, 1992 ; LIMAUX, 1994). Pour ce qui concerne la valeur prédictive à prendre en compte, jusqu'à l'optimum de la courbe de réponse, il existe peu de recommandations pratiques scientifiquement argumentées. GRILLS *et al.* (1997) sur 4 sites expérimentaux suivis pendant les années 1985, 1986 et 1987, observent un CAU moyen de 55 %, avec des différences minimales entre sites et années, ceci résultant du fait que les expérimentations étaient conduites sur les mêmes types de sol associées à des systèmes de culture identiques. BLOOM *et al.* en 1988, sur 70 essais suivis de 1981 à 1986, trouvent une valeur moyenne de 59 % sans mettre en évidence de différences significatives liées au précédent ou à l'année. Toutefois, une part de la variabilité importante (de 43 % à 88 %) pourrait être expliquée par le site géographique. D'autre part, une corrélation faible, mais significative montre que le CAU serait positivement relié à la quantité d'azote absorbé à l'optimum de la courbe de réponse.

2.3.3.3.2. CAU et dates d'apport

Les apports d'engrais azoté sur blé d'hiver sont en général fractionnés, au moins en 2 apports, réalisés à la reprise de la végétation et à la fin du tallage.

Dans ces conditions, on remarque systématiquement une augmentation du CAU avec la date d'apport (MACHET *et al.*, 1987). PLAS (1992) propose en l'absence de facteurs limitants, une valeur de 70 % pour le premier apport et de 90 % pour le deuxième apport. LIMAUX (1994) indique des valeurs du même ordre de grandeur : 60 % au premier apport et 90 % au deuxième apport, ce qui revient à proposer pour un fractionnement classique représentant 1/3 au premier apport et 2/3 au deuxième apport, un CAU moyen de 80 %.

Plus généralement, les hypothèses avancées pour expliquer ces différences reposent sur l'idée que plus l'engrais reste longtemps dans le sol sans être absorbé par le peuplement, plus il a de chances d'être soumis aux phénomènes de lixiviation, organisation et pertes par voies gazeuses (REMY et HEBERT, 1977 ; RECOUS, 1983 ; RECOUS et MACHET, 1998). Les

observations réalisées par LIMAUX (1994) vont dans le même sens : il observe sur blé, que les meilleurs CAU sont associés à des niveaux de biomasse du peuplement végétal élevés au moment de l'apport d'azote et inversement : un CAU de 80 % serait atteint avec une biomasse de l'ordre de 120 g.m^{-2} alors qu'une biomasse de 20 g.m^{-2} ne conduirait qu'à un CAU de 40 %.

2.3.3.3. CAU et conditions de milieu

Généralement, les types de sol ne discriminent pas les valeurs de CAU observées sur des réseaux expérimentaux multilocaux et pluriannuels. Sur blé, LIMAUX (1994) indique une gamme de CAU très variable que ce soit en sol argileux profond ou en sols superficiels argilo-calcaires (40 % à 100 %). La même constatation est faite par LE GALL (1997) en confrontant les résultats observés dans l'Indre et en Poitou-Charentes.

Il reste que, sur ces réseaux expérimentaux, l'état structural du sol est rarement observé. Il semble pourtant être un des éléments importants de variations du CAU. En effet, WIBAWA (1992) observe qu'en l'absence de tassements, le CAU d'un apport d'engrais au semis sur orge de printemps peut atteindre 85 %, alors qu'il peut baisser jusqu'à 30 % lorsque les deux tiers du volume de l'horizon labouré non repris sont tassés.

2.3.3.4. Questions ouvertes

Pour expliquer les variations du coefficient d'utilisation, on peut examiner les résultats acquis grâce au marquage isotopique qui montrent que lorsque l'apport d'engrais est fractionné, le premier apport effectué en général à la reprise de végétation est moins bien valorisé que le second, appliqué en début de montaison (MACHET *et al.*, 1987 ; NEETESON, 1995). En règle générale, le coefficient d'utilisation augmente jusqu'à la floraison. Cependant, même en respectant ces règles de fractionnement, nous avons constaté qu'il existe encore une grande variabilité du CAU moyen des deux apports et ce pour des doses d'azote ne dépassant pas l'optimum. En dehors des quelques travaux précédemment cités (WIBAWA, 1992 ; LIMAUX, 1994), nous ne disposons pas d'éléments pour expliquer ces variations de façon satisfaisante.

Si les variations de biomasse au moment des apports peuvent en partie les expliquer, alors quel est le devenir de l'azote non absorbé et quelles sont les compétitions mises en jeu ?

Ces compétitions pour l'azote apporté sont-elles en relation avec le fonctionnement du peuplement après l'apport ?

2.4. ORGANISATION DU MEMOIRE

2.4.1. BESOINS EN AZOTE DU PEUPLEMENT

Pour étudier les besoins en azote du peuplement, nous procéderons en deux étapes :

- **L'étude du rendement potentiel**

Etant donné les difficultés déjà évoquées de caractériser les propriétés hydriques des sols et d'estimer correctement leur réserve utile, nous analyserons la réponse au déficit climatique pour chaque type de sol en utilisant la codification Lorraine des sols réalisée par la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine et l'ENSAIA (1992).

- **L'étude des besoins par unité de production**

Nous avons évoqué la possibilité d'utiliser le ratio

$$B = \frac{\text{Azote absorbé par la plante entière}}{\text{Matière sèche des parties aériennes}}$$

Une telle procédure d'estimation des besoins est en effet susceptible de plus de robustesse que la procédure classique qui utilise la valeur de b : en effet, on a vu que l'estimation de b devait en toute rigueur tenir compte de la variété et de conditions probables de remplissage du grain. On peut penser que les besoins B par quintal de biomasse, à l'optimum de la courbe de réponse à l'engrais seront plus stables, car moins soumis aux variations de l'indice de récolte que b . Le test de cette hypothèse sera réalisé sur un réseau bisannuel multilocal d'essais "variétés", dans le but de couvrir une large gamme d'indices de récolte.

2.4.2. CAPACITÉ DE MINÉRALISATION DES SOLS POUR LA PRÉVISION DE LA VALEUR DE P_o

Nous avons précisé qu'en dehors du logiciel PC azote et des grilles prédictives, il n'existe pas actuellement de procédures qui utilisent les résultats acquis par la recherche, notamment sur les capacités de minéralisation des sols pour la prévision de la valeur de P_o .

Nous testerons donc l'intérêt de bilans incluant des valeurs de minéralisation issues de différents modèles. Pour ce faire, nous nous appuierons sur un réseau multilocal et bisannuel de réseaux de témoins non fertilisés, choisis de façon à représenter la grande variabilité observée de P_o , mais également, celle des paramètres physico-chimiques et climatiques qui sont censés agir sur la minéralisation.

Pour compléter l'approche, nous réaliserons des incubations en milieu contrôlé sur une partie des sols suivis au champ, ce afin de proposer éventuellement des améliorations des modèles testés.

2.4.3. COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DE L'AZOTE

Pour le coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais, nous tenterons de valider et de confronter, à partir d'expérimentations en particulier densité et date de semis, le modèle qui utilise la biomasse comme prédicteur du CAU, mais également d'améliorer ce modèle, notamment en intégrant le fonctionnement du peuplement après l'apport d'azote. Nous étudierons également la compétition entre les différents devenir de l'azote (organisation et pertes par voies gazeuses et utilisation par la plante). Pour l'organisation, il a été montré qu'elle reste à peu près constante quand on fait varier les dates d'apport d'engrais et que l'augmentation de la vitesse de prélèvement par le peuplement au cours du cycle végétatif, s'accompagne d'une diminution des pertes par voies gazeuses (RECOUS, MACHET, 1998). Mais dans toutes les expériences réalisées, le facteur expérimental est la date d'apport. Il est donc impossible de faire la part de ce qui relève du fonctionnement du peuplement (niveau de biomasse, vitesse de croissance, demande en azote) et des conditions de milieu (température, rayonnement, humidité du sol), qui varient sous l'effet de celle-ci.

Nous testerons donc l'hypothèse selon laquelle la vitesse de croissance est bien l'élément déterminant de l'utilisation de l'engrais et de la diminution des pertes par voies gazeuses, en décorrelant date d'apport d'engrais, conditions édaphiques et vitesse de prélèvement d'azote par la culture.

Ce travail sera réalisé en utilisant le traceur ^{15}N sur des expérimentations comportant plusieurs densités susceptibles de générer des fonctionnements du peuplement différents à une même date d'apport d'azote.

CHAPITRE 3

ESTIMATION DES BESOINS EN AZOTE

CODIFICATION DES SOLS

Méthode tarière
Méthode cailloux

si < 25 % de cailloux en surface et profondeur > 30cm
dans les autres cas

CRITERE 1 : La nature du matériau atteint
en fond de tarière

A = Argile	on ajoute :
C = Calcaire	
G = Grès	U : si colluvions
Ga = Galets alluviaux	V : si alluvions
Gr = Grève	(sauf Ga)
L = Limon	+ : si le matériau
M = Marnes	est carbonaté
S = Sables	
D = Divers	

CRITERE 3 : Le développement du profil

- Au numérateur : la texture de surface**
- Classes du triangle de texture, si analyse
 - Appréciation tactile : Alo - A - AL - LA - S
- On ajoute un C si cailloux
et un + si le matériau est carbonaté
- Au dénominateur**
- L'apparition d'un matériau différent de celui de surface avec sa profondeur
 - La profondeur d'apparition d'un horizon compacté (HC)

CRITERE 2 : La profondeur de prospection possible
à la tarière ou le % de cailloux en surface

1 = Prof < 20 cm	
2 = 20 < p < 40	
3 = 40 < p < 60	I : < 10 %
4 = 60 < p < 80	II : 10 à 25 %
5 = 80 < p < 100	III : 25 à 45 %
6 = 100 < p < 120	IV : > 45 %
7 = p > 120	

CRITERE 4 : La sensibilité à l'excès d'eau et les traces
d'hydromorphie visibles

R : Vitesse de ressuyage au printemps

S : Sol très sain dans lequel il n'y a jamais de problème d'hydromorphie **R : > 2 jours**

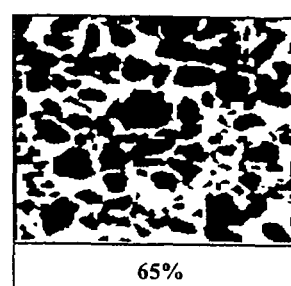
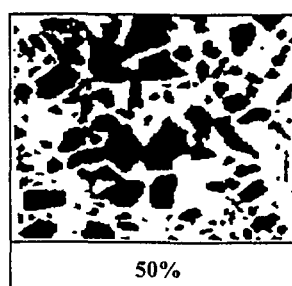
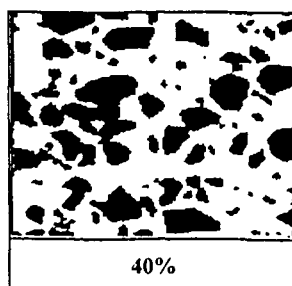
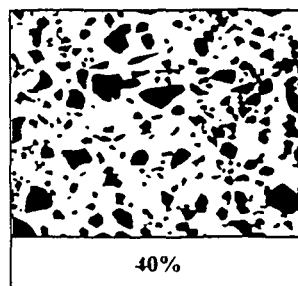
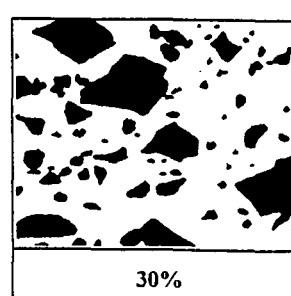
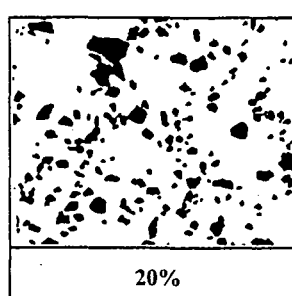
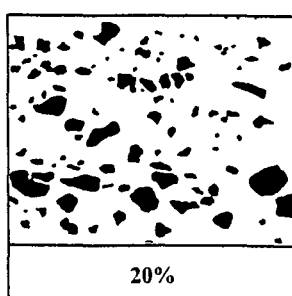
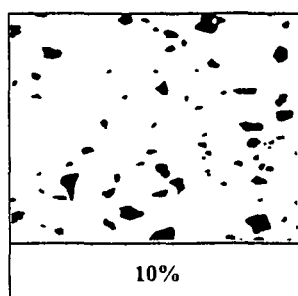
D : Sol sain et bien drainé. Les problèmes d'excès d'eau restent occasionnels **R : 2 à 3 jours**

M : Sol moyennement sain. Travaux de drainage fréquents **R : 4 à 5 jours**

H : Sol humide. Excès d'eau fréquent **R : > 5 jours**

On ajoute à la lettre la profondeur d'apparition des signes d'hydromorphie

Grille d'estimation de la pierrosité de surface



3.1. INTRODUCTION

Comme cela a déjà été précisé, dans la majorité des situations, l'estimation des besoins se résume à une prévision de l'objectif de rendement.

Nous proposons dans ce chapitre de voir comment la prise en compte des caractéristiques du milieu (sol, climat) peut permettre d'améliorer la prévision de l'objectif de rendement et de quantifier les risques de ne pas l'atteindre. De plus, nous testerons l'intérêt de la matière sèche des parties aériennes, plutôt que du seul rendement en grain, comme prédicteur des besoins en azote.

3.2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.2.1. ESTIMATION DU RENDEMENT POTENTIEL

3.2.1.1. Le réseau expérimental OPAL (Observatoire des Potentialités Agroclimatiques en Lorraine)

Le rendement potentiel, tel que défini au chapitre 2.3.1.2., est la résultante des caractéristiques du sol (pierrosité, hydromorphie, discontinuités texturales etc.), des conditions climatiques, du système de culture (principalement variétés, dates et densités de semis).

Le dispositif mis en place permet de mettre en évidence l'effet du sol et du climat tout en s'affranchissant des variations dues au système de culture : dans 36 parcelles d'agriculteurs, on identifie 2 à 4 stations d'une surface de 5 ares environ (1 largeur de rampe de pulvérisateur x 20 m de longueur) en faisant en sorte que chacune corresponde à un type de sol donné. Les sols ont été caractérisés selon la codification régionale élaborée par FLORENTIN et LIMAUX (1992), conçue pour être discriminante des potentialités agricoles (Tableau n° 3 et annexe n° 1). A l'intérieur de chaque station, 4 sites d'échantillonnage de 1,5 m² ont été tirés au hasard. Sur chacun d'eux on a suivi les stades de développement tout au long du cycle végétatif (levée, stade épi à 1 cm, épiaison) de même que le rendement et ses composantes (nombre de pieds, nombre d'épis, poids de mille grains).

Au total, plus de 100 stations sont ainsi suivies sur l'ensemble de la région réparties chez 12 agriculteurs pendant 6 années. On peut alors pour chaque parcelle, étudier les variations de rendement à l'intérieur d'une parcelle, en fonction des types de sol (puisque les autres paramètres sont identiques). On peut également comparer entre parcelles le rendement obtenu pour des types de sol équivalents selon l'année ou la région climatique et aussi quantifier

l'incidence des paramètres climatiques sur les variations de rendement pour un même type de sol.

3.2.1.2. Calcul des indicateurs climatiques

- Le déficit climatique (ETP-P) est calculé à partir du 1er mars, date avant laquelle P est généralement supérieur à ETP sous le climat Lorrain, jusqu'à la fin de remplissage du grain. La fin du remplissage du grain est déterminée en comptabilisant 750 degrés jours en base 0°C depuis l'épiaison :

- Epiaison - floraison : 110 dj
 - Floraison - début remplissage du grain : 140 dj
 - Durée de remplissage grain : 500 dj
- (GATE, 1995 ; OURY *et al.*, 1993)

L'évapotranspiration potentielle est calculée selon la formule de PENMAN, sur un pas de temps décadaire.

On effectue une sommation de toutes les valeurs positives des déficits climatiques (ETP-P) décadaires, soit :

$$\text{Déficit climatique en mm d'eau} = \sum_{1-03}^{\text{Epiaison} + 750 \text{ dj}} \text{ETP} - P > 0 \text{ (pas de temps décadaire)}$$

- L'excédent climatique hivernal (P-ETP) cumulé est calculé à partir du 1er septembre jusqu'à la fin du mois de février. De la même façon que pour le déficit climatique, les calculs sont réalisés sur un pas de temps décadaire et on effectue une sommation de toutes les valeurs positives, soit:

$$\text{Excédent climatique en mm d'eau} = \sum_{01-09}^{28-02} P - \text{ETP} > 0 \text{ (pas de temps décadaire)}$$

3.2.2. ESTIMATION DES BESOINS EN AZOTE À PARTIR DE LA MATIÈRE SÈCHE DES PARTIES AÉRIENNES (MSPA)

3.2.2.1. Le réseau expérimental de l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF)

Ne disposant pas d'expérimentations spécifiques multivariétales et multilocales, sur lesquelles la matière sèche des parties aériennes (MSPA) et l'azote absorbé par la plante entière (N_{absPE}) soient déterminées à l'optimum de la courbe de réponse à l'azote, nous avons utilisé les

résultats d'essais conduits par l'ITCF pendant deux années (1995 et 1996) dans différents département français : Marne, Seine-et-Marne, Essonne, Morbihan et Charente-Maritime.

Quatre variétés ont été retenues :

AMI, FORBY, SOISSONS, présentes les deux années sur 3 des 5 sites expérimentaux (BIGNAN, LE MAGNERAUD et BOULANCOURT) et une seule année sur les deux autres sites (1995 à CUPERLY et 1996 à BOULANCOURT) et QUALITAL, variété de blé de Force réputé pour la haute teneur en protéines de ses grains, mais qui n'était présente qu'à BOULANCOURT les deux années (Tableau n° 4).

Les dispositifs expérimentaux étaient conçus selon la méthode des blocs complets randomisés, à 4 répétitions, la taille des parcelles élémentaires étant de l'ordre de 25 m².

Site	Bignan (56)		Le Magneraud (17)		Boulancourt (77)		Villiers (91)		Cuperly (51)	
année	1995	1996	1995	1996	1995	1996	1995	1996	1995	1996
Variété										
Ami	x	x	x	x	x	x		x	x	
Forby	x	x	x	x	x	x		x	x	
Soissons	x	x	x	x	x	x		x	x	
Qualital					x	x				

Tableau n° 4 - Récapitulatif des variétés étudiées (x) en fonction des sites expérimentaux et des années.

3.2.2.2. Détermination de la matière sèche des parties aériennes et de l'azote absorbé

Peu après la maturité physiologique, un prélèvement d'un bottillon d'une cinquantaine de plantes entières (parties aériennes coupées au ras du sol) est réalisé dans chaque parcelle élémentaire. Après battage, séchage 48 heures à 70°C et pesée séparée des grains et du reste des parties aériennes, on établit le rapport grain/paille + balles (G/P).

Le rendement en grain (RG) est mesuré par une moissonneuse batteuse expérimentale. Le rendement en paille (Rp) est calculé à partir du rendement en grains et du rapport G/P estimé par le bottillon :

$$R_p = \frac{RG}{G/P}$$

La teneur en azote des grains (% NG) et de la paille (% Np) est déterminée après broyage, par la méthode DUMAS. On peut alors calculer la quantité d'azote absorbé par les parties aériennes (N_{absPA}), soit :

$$N_{absPA} = (RG \times \% NG) + (Rp \times \% Np)$$

N_{absPA} en $kg \cdot ha^{-1}$

RG et Rp en $q \cdot ha^{-1}$

Après prise en compte des quantités d'azote dans le système racinaire (cf 2.3.1.) les quantités d'azote absorbé par la plante entière (N_{absPE}) sont données par la relation :

$$N_{absPE} = \frac{N_{absPA}}{0,8}$$

3.2.2.3. Détermination de l'optimum de réponse à l'azote

Dans les expérimentations "doses d'azote croissantes", la détermination des coordonnées de l'optimum de réponse est délicate car elle est directement liée à la méthode d'ajustement statistique retenue pour rendre compte de variations de rendement en fonction de l'azote apporté. Par exemple, pour une même série de données, selon qu'on adopte un ajustement exponentiel, quadratique ou du type bilinéaire, l'optimum déterminé peut varier de 100 à 160 $kg \cdot ha^{-1}$ (BOYD, 1976 cité par PLAS, 1992).

Une autre possibilité consiste à utiliser les résultats d'une analyse statistique. On peut alors décider que la dose optimale est la dose la plus faible au-delà de laquelle une augmentation de la dose n'entraîne plus de différences significatives de rendement. Dans le cas le plus général, où on utilise le test de Newman et Keuls, cette méthode peut se révéler intéressante lorsqu'il n'y a pas ou peu de chevauchement des groupes homogènes au plan statistique. Mais bien souvent, les doses d'azote les plus élevées génèrent des augmentations de rendement faibles, mais régulières, qui dans la plupart des cas ne sont pas significativement différentes (les groupes homogènes se chevauchent) mais qui sont néanmoins réelles. On peut alors être conduit, avec la règle de décision citée plus haut, à adopter pour le rendement optimum une valeur qui dans certains cas est inférieure de plus de 10 $q \cdot ha^{-1}$ au rendement maximum observé (Tableau 5).

Pour éviter ce problème, nous avons procédé de la façon suivante :

- L'examen des analyses statistiques de nombreux essais "doses d'azote croissantes" montre que, dans le meilleur des cas (essais précis et non chevauchement des groupes homogènes), les différences significatives les plus faibles qu'on peut mettre en évidence, ne sont jamais inférieures à 3 % (exprimées en % du rendement le plus élevé).
- Nous considérons donc comme optimale la dose d'azote la plus faible ayant permis d'atteindre un rendement qui soit au moins égal à 97 % du meilleur rendement de l'essai, cette règle étant valable pour des pas de doses d'azote compris entre 40 et 60 $kg \cdot ha^{-1}$, ce qui était le cas pour l'ensemble des essais du réseau ITCF.

Essai	Dose d'azote en kg.ha ⁻¹	Rendement à 15 % H ₂ O en q.ha ⁻¹	Groupes homogènes de Newman et Keuls	Optimum statistique	Optimum selon la règle de décision adoptée
SAINT-HILAIRE 1992	0	69,3	D		
	80	91,6	C		
	120	98,3	B	X	
	160	100,3	A B		X
	200	102,6	A		
	240	100,2	A B		
MANONVILLE 1993	0	29,0	D		
	50	42,4	C		
	75	45,9	B C		
	100	49,4	A B C	X	
	130	54,5	A B		
	160	55,9	A B		
	190	58,7	A		X
	220	55,4	A B		

Tableau n° 5 - Exemples de détermination de l'optimum de réponse à l'azote sur 2 essais.

3.3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.3.1. ESTIMATION DU RENDEMENT POTENTIEL

Nous examinerons successivement dans ce chapitre :

- L'incidence des variations du type de sol sur le niveau du rendement.

Pour ce faire, nous procéderons à une comparaison de rendements obtenus sur différentes stations du réseau OPAL, dans les mêmes conditions climatiques. Au total vingt deux situations, comprenant à chaque fois 3 ou 4 types de sol différents, seront examinées.

- L'incidence des variations climatiques sur le niveau de rendement.

Les effets du déficit climatique seront étudiés en confrontant sur des types de sol équivalents, les résultats pour des niveaux de déficit différents, ceux-ci étant le résultat de variations microrégionales ou interannuelles du climat.

Dix types de sol, représentant la grande majorité des sols lorrains seront étudiés

- Effet de l'excédent climatique

Pour apprécier l'incidence de ce facteur, nous utiliserons les résultats de deux sites du réseau OPAL pour lesquels nous disposons pour des types de sols différents, de 2 ou 3 années de

résultats, présentant des niveaux de déficit climatiques équivalents, mais des excédents climatiques hivernaux bien différenciés.

3.3.1.1. Types de sol et rendements

Le tableau n° 6 récapitule les résultats enregistrés entre 1989 et 1995 sur différentes parcelles comprenant à chaque fois plusieurs types de sols (au moins trois). Les sites expérimentaux sont classés par déficit climatique croissant, chaque type de sol étant décrit par ses principales caractéristiques agropédologiques, l'information étant synthétisée à partir de la codification lorraine.

Ainsi, en 1991, année pour laquelle le déficit climatique est le plus élevé, on observe des différences très importantes : par exemple à HARMONVILLE, on passe de 37,1 q.ha⁻¹ à 102,1 q.ha⁻¹, ou à BOUILLONVILLE de 29 q.ha⁻¹ à 73,8 q.ha⁻¹, selon les types de sol.

Lorsque le déficit climatique est plus faible (exemple de 1989 à LA GRANGETTE), la différence entre les types de sol est atténuée : de 76,4 q.ha⁻¹ à 104,3 q.ha⁻¹. Au total, les variations de rendement dues aux différences de types de sol sont donc considérables, surtout quand on les observe sur des années climatiques différentes.

Année	Site expérimental	Nature du matériau atteint en fond de tarière	Profondeur de prospection par la tarière	Développement du profil	Sensibilité à l'excès d'eau au printemps	Types de sol	Déficit climatique en mm d'eau	Rendement Q.ha ⁻¹	Différence maximale de rendement
1993	Valfroicourt (88)	Calcaire Calcaire Dolomie	30 cm 90 cm 120 cm	Argilo-limoneux carbonaté limono-argileux Argile sur dolomie à 50 cm	Sol sain Peu sensible Peu sensible	1 C - 3 - Al ⁺ - S 2 C - 5 - La - D 3 - D - 7 $\frac{M}{D50}$ - D	111	62,3 64,2 62,7	1,5
1995	Valfroicourt (88)	Calcaire Calcaire Calcaire	90 cm 70 cm < 30 cm + cailoux	Argilo-limoneux carbonaté sur limon argileux à 60 cm Argilo-limoneux carbonaté sur limon argileux à 60 cm Argileux carbonaté	Peu sensible Peu sensible Sain	1 C - 5 - $\frac{Al^+}{La60}$ - D 2 C - 4 - $\frac{Al^+}{A60}$ - D 3 C - IV - A ⁺ - S	115	71,6 64,2 63,3	8,3
1994	Demange aux Eaux (55)	Calcaire Calcaire Calcaire	30 cm < 30 cm + cailoux < 30 cm + cailoux	Argileux carbonaté sur marnes à 35 cm Argileux Argileux	Sain Sain Sain	1 C - 2 - $\frac{A^+}{M35}$ - S 2 C - II - A - S 3 C - IV - A - S	125	66,6 79,3 73,3	12,7
1992	Valfroicourt (88)	Calcaire Calcaire Calcaire	90 cm 70 cm < 30 cm + cailoux	Argilo-limoneux carbonaté sur limon argileux à 60 cm Argilo-limoneux carbonaté sur limon argileux à 60 cm Argileux carbonaté	Peu sensible Peu sensible Sain	1 C - 5 - S - $\frac{Al^+}{La60}$ - D 2 C - 4 - $\frac{Al^+}{A60}$ - D 3 C - IV - A ⁺ - S	147	98,4 94,0 65,3	33,1
1992	La Grangette (55)	Calcaire Calcaire Calcaire	30 cm < 30 cm + cailoux 90 cm	Argileux carbonaté Argileux carbonaté Argilo-limoneux carbonaté	Sain Sain Sain	1 C - 2 - A ⁺ - S 2 C - IV - Al ⁺ - S 3 C - 5 - Al ⁺ - S	149	85,3 37,7 82,0	47,6
1994	Limey (54)	Calcaire Calcaire Argile	50 cm 30 cm > 120 cm	Argileux carbonaté Argileux carbonaté Argileux carbonaté	Sain Sain Peu sensible	1 C - 3 - A ⁺ - S 2 C - 2 - A ⁺ - S 3 A - 7 - A ⁺ - D	161	66,5 62,0 90,1	28,1
1989	Grangette (55)	Calcaire Calcaire Calcaire	30 cm < 30 cm + cailoux 90 cm	Argileux carbonaté Argileux carbonaté Argilo-limoneux carbonaté	Sain Sain Sain	1 C - 2 - A ⁺ - S 2 C - IV - Al ⁺ - S 3 C - 5 - Al ⁺ - S	168	92,1 76,4 104,3	27,9

Tableau n° 6 - Rendements et types de sol sur 22 sites du réseau OPAL entre 1989 et 1995

Année	Site expérimental	Nature du matériau atteint en fond de tarière	Profondeur de prospection par la tarière	Développement du profil	Sensibilité à l'excès d'eau au printemps	Types de sol	Déficit climatique en mm d'eau	Rendement Q.ha ⁻¹	Différence maximale de rendement
1993	Heippes (55)	Marnes	> 120 cm	Argilo-limoneux sur marnes à 30 cm	Sensible	1 M - 7 - $\frac{Al}{M30}$ - M	183	80,2	10,1
		Marnes	70 cm	Argileux sur marnes à 30 cm	Sensible	2 M - 4 - $\frac{A}{M30}$ - M		80,1	
		Marnes	70 cm	Argilo-limoneux sur marnes à 50 cm	Peu sensible	3 M - 4 - $\frac{Al}{M50}$ - D		70,1	
		Marnes	70 cm	Limono-argileux sur marnes à 30 cm	Sensible	4 - M - 4 - $\frac{Ca}{M30}$ - M		77,6	
1992	Limey (54)	Calcaire	< 30 cm + cailloux	Argileux carbonaté	Sain	1 C - III - A+ - S	185	42,7	38,0
		Calcaire	30 cm	Argileux carbonaté	Sain	2 C - 2 - A+ - S		65,0	
		Calcaire (alluvions)	90 cm	Limon argileux	Peu sensible	3 Cu - 5 - La - D		75,2	
		Calcaire	110 cm	Argile limoneuse	Peu sensible	4 C - 6 - Al - D		80,7	
1994	Charly (57)	Marnes + calcaire	70 cm	Argileux	Sensible	1 Mc - 4 - A - M	188	74,8	3,0
		Marnes + calcaire	> 120 cm	Argile sur argilo-limono-sableux à 30 cm et marnes à 40 cm	Sensible	2 Mc - 7 - $\frac{A}{Als30+M40}$ - M		75,8	
		Calcaire	50 cm	Argile sur limono-argileux à 30 cm	Sensible	3 C - 3 - $\frac{A}{La30}$ - M		72,8	
1992	Bouvron (54)	Marnes	> 120 cm	Argilo-limoneux sur limono-argileux à 30 cm et marnes à 50 cm	Peu sensible	1 M - 7 - $\frac{Al}{La30+M50}$ - D	196	84,9	27,0
		Marnes	> 120 cm	Argilo-limoneux sur marnes à 80 cm	Peu sensible	2 M - 7 - $\frac{Al}{M80}$ - D		80,7	
		Marnes	> 120 cm	Argileux carbonaté sur graviers à 30 cm, argileux à 40 cm, marnes à 70 cm	Peu sensible	3 M - 7 - $\frac{Al}{?}$ - D		82,2	
1992	Bures (54)	Argilo-limoneux	> 120 cm	Argile limoneuse	Peu sensible	1 Al - 7 - Al - D	197	75,0	13,2
		Marnes	> 120 cm	Argile sur marnes à 30 cm	Peu sensible	2 M - 7 - $\frac{A}{M30}$ - D		73,2	
		Dolomie	< 30 cm + cailloux	Limon sableux	Sain	3 D - II - LS - S		61,8	
		Calcaire	90 cm	Argile sur argilo-limono-sableux à 30 cm	Peu sensible	4 C - 5 - $\frac{A}{Als30}$ - D		64,5	

Tableau n° 6 (suite)

Année	Site expérimental	Nature du matériau atteint en fond de tarière	Profondeur de prospection par la tarière	Développement du profil	Sensibilité à l'excès d'eau au printemps	Types de sol	Déficit climatique en mm d'eau	Rendement Q ha ⁻¹	Différence maximale de rendement
1993	Demange aux Eaux (55)	Calcaire	< 30 cm + cailloux	Argileux	Sain	1 C - III - A - S	198	60,8	18,5
		Calcaire	50 cm	Argilo-limoneux sur argile à 30 cm	Sain	2 C - 3 - $\frac{Al}{A_{30}}$ - S		79,3	
		Calcaire	30 cm	Argilo-limoneux	Sain	3 C - 2 - Al - S		66,0	
1995	Bouvron (54)	Marnes	> 120 cm	Argilo-limoneux sur limono-argileux à 30 cm et marnes à 50 cm	Peu sensible	1 M - 7 - $\frac{Al}{La_{30}+M_{50}}$ - D	207	67,9	17,1
		Marnes	> 120 cm	Argilo-limoneux sur marnes à 80 cm	Peu sensible	2 M - 7 - $\frac{Al}{M_{80}}$ - D		85,0	
		Marnes	> 120 cm	Argileux carbonaté sur graviers à 30 cm, argileux à 40 cm, marnes à 70 cm	Peu sensible	3 M - 7 - $\frac{A^+}{Gr_{30} + A_{40}}$ - D		73,1	
1995	Grangette (55)	Calcaire	30 cm	Argileux carbonaté	Sain	1 C - 2 - A ⁺ - S	207	72,8	18,4
		Calcaire	< 30 cm + cailloux	Argileux carbonaté	Sain	2 C - IV - Al ⁺ - S		55,2	
		Calcaire	90 cm	Argilo limoneux carbonaté	Sain	3 C - 5 - Al ⁺ - S		73,6	
1994	Gorze (57)	Calcaire	< 30 cm + cailloux	Argileux carbonaté	Sain	1 C - II - A ⁺ - S	211	73,7	6,6
		Calcaire	70 cm	Argileux carbonaté	Sain	2 C - 4 - A ⁺ - S		76,5	
		Calcaire	90 cm	Argilo-limoneux sur argile à 40 cm	Peu sensible	3 C - 5 - $\frac{Al}{A_{40}}$ - D		80,3	
1994	Bures (54)	Argilo-limoneux	> 120 cm	Argile limoneuse	Peu sensible	1 Al - 7 - Al - D	223	66,5	20,2
		Marnes	> 120 cm	Argile sur marnes à 30 cm	Peu sensible	2 M - 7 - $\frac{A}{M_{30}}$ - D		51,4	
		Dolomie	< 30 cm + cailloux	Limon sableux	Sain	3 D - II - LS - S		46,3	
		Calcaire	90 cm	Argile sur argilo-limono-sableux à 30 cm	Peu sensible	4 C - 5 - $\frac{A}{Al_{30}}$ - D		64,8	
1992	Gorze (57)	Calcaire	< 30 cm + cailloux	Argileux carbonaté	Sain	1 C - II - A ⁺ - S	234	71,7	17,4
		Calcaire	70 cm	Argileux carbonaté	Sain	2 C - 4 - A ⁺ - S		75,1	
		Calcaire	90 cm	Argilo-limoneux sur argile à 40 cm	Peu sensible	3 C - 5 - $\frac{Al}{A_{40}}$ - D		88,5	

Tableau n° 6 (suite)

Année	Site expérimental	Nature du matériau atteint en fond de tarière	Profondeur de prospection par la tarière	Développement du profil	Sensibilité à l'excès d'eau au printemps	Types de sol	Déficit climatique en mm d'eau	Rendement Q.ha ⁻¹	Différence maximale de rendement
1993	Bures (54)	Marnes	> 120 cm	Argile sur marnes à 50 cm	Sensible	1 M - 7 - $\frac{A}{M50}$ - M	249	85,5	9,8
		Argile	> 120 cm	Argile lourde sur argile à 30 cm	Sensible	2 A - 7 - $\frac{Als}{A30}$ - M		88,1	
		Argile	> 120 cm	Argile lourde sur marnes à 30 cm	Sensible	3 A - 7 - $\frac{Als}{M30}$ - M		78,3	
1991	Harmonville (88)	Marnes	> 120 cm	Limono-argileux sur argilo-limoneux à 40 cm et marnes à 90 cm	Sensible	1 M - 7 - $\frac{La}{Al40+A90}$ - M40	295	102,1	65,0
		Calcaire	90 cm	Argilo-limoneux carbonaté	Peu sensible	2 C - 5 - Al ⁺ - D		57,2	
		Calcaire	< 30 cm + cailloux	Argileux carbonaté	Sain	3 C - III - A+ - S		37,1	
1991	Bures (54)	Argilo-limoneux	> 120 cm	Argile limoneuse	Peu sensible	1 Al - 7 - Al - D	317	95,3	23,3
		Marnes	> 120 cm	Argile sur marnes à 30 cm	Peu sensible	2 M - 4 - $\frac{LS}{M20}$ - D		63,0	
		Dolomie	< 30 cm + cailloux	Limon sableux	Sain	3 D - II - LS - S		59,6	
		Calcaire	70 cm	Argile sur argilo-limono-sableux à 30 cm	Peu sensible	4 C - 4 - $\frac{A}{Als30}$ - D		72,0	
1991	Bouillonville (54)	Calcaire	70 cm	Argilo-limoneux carbonaté	Sain	1 C - 4 - Al ⁺ - S	320	73,8	44,8
		Calcaire	< 30 cm + cailloux	Argilo-limoneux carbonaté	Sain	2 C - II - A ⁺ - S		66,3	
		Calcaire	< 30 cm + cailloux	Argilo-limoneux carbonaté	Sain	3 C - IV - A ⁺ - S		29,0	

Tableau n° 6 (suite et fin)

3.3.1.2. Rendement et déficit climatique

3.3.1.2.1. Méthode d'interprétation des résultats

Comme cela a été précisé plus haut, nous réaliserons pour chaque type de sol étudié, un graphique mettant en relation le rendement observé en fonction du déficit climatique cumulé. Mais, dans la majorité des situations, celui-ci n'est pas le seul facteur à l'origine des variations du rendement : outre la fertilisation minérale a priori non limitante, la densité de semis, la date de semis, les conditions de levée, la verse physiologique, un profil cultural dégradé, sont autant de facteurs qui empêchent l'extériorisation des potentialités agricoles. Or, nous ne disposons pas toujours de suffisamment d'observations pour identifier ces facteurs limitants. Nous utiliserons donc l'enveloppe des meilleurs résultats observés pour différents niveaux de déficit climatique pour quantifier la relation rendement potentiel et déficit climatique. Il reste alors à définir une méthode pour la construction de l'enveloppe.

- Forme de l'enveloppe

L'examen des graphiques n° 7 à 9 qui comprennent le plus de résultats montre que l'enveloppe supérieure du nuage est approximativement linéaire et décroissante. Cette observation est cohérente avec les données de la bibliographie qui précisent qu'il existe une relation sensiblement linéaire entre la production de matière sèche et la satisfaction des besoins en eau (ROBELIN, 1958, cité par SEBILLOTTE (1996) ; PUECH *et al.*, 1976 ; MERRIEN et GRANDIN, 1990).

D'autres études régionales, mettant en relation le rendement ou le nombre de grains par m² avec le bilan hydrique ($P + RU - ETM$) cumulé à la récolte (pour le rendement) ou à la floraison (pour le nombre de grains) aboutissent à la même conclusion (BOIFFIN *et al.*, 1982 ; LIMAUX, 1985 ; MEYNARD et LIMAUX, 1987 ; LE GALL, 1997).

Compte tenu de ces nombreux points de convergence quant à l'allure de ce type de relation, nous retiendrons donc une forme linéaire pour le calcul de l'enveloppe.

- Calcul de l'équation de l'enveloppe

Généralement, les enveloppes sont tracées en joignant les deux points d'ordonnée les plus élevées. Cette technique donne satisfaction lorsqu'il existe de nombreux points intermédiaires et dont les valeurs de l'ordonnée sont proches de celles calculées par la droite ci-dessus définie (exemple du sol n° 8, graphique n° 14). En revanche, lorsque l'un des deux points apparaît anormalement éloigné du nuage (risque d'imprécision sur la mesure par exemple), l'équation de la droite calculée de cette façon ne rendrait pas correctement compte de la réalité (exemple du sol n° 6, graphique n° 12). Afin d'éviter ce type de problème, nous avons donc proposé la méthode suivante :

Pour chaque classe de déficit de 50 mm, on retient la valeur de rendement la plus élevée et toutes celles qui lui sont inférieures de moins de 10 %. On calcule alors l'équation de régression linéaire sur les points sélectionnés.

3.3.1.2.2. Résultats pour les rendzines sur calcaire dur

Ce sont les sols pour lesquels la possibilité de prospection à la tarière ne dépasse pas 30 cm. Ils sont alors différenciés selon la quantité de cailloux présents à la surface du sol (en % de la surface).

- Type de sol n° 1 : Sols sur calcaire dur, comprenant 45 à 65 % de cailloux en surface, argileux carbonatés et sains.

Codification type : C - IV - A⁺ - S

Les rendements les plus élevés sont atteints en 1993 et 1994 et sont proches de 75 q.ha⁻¹ pour un niveau de déficit climatique situé entre 125 et 150 mm. Le rendement le plus faible (29 q.ha⁻¹) est observé en 1991 pour un déficit climatique de 320 mm.

Equation de l'enveloppe : $R = -0,250 \text{ DC} + 108,5$ (Graphique n° 7, R en q.ha⁻¹ et DC en mm)

- Type de sol n° 2 : Sols sur calcaire dur, comprenant 25 à 45 % de cailloux en surface, argileux carbonatés et sains.

Codification type : C - III - A⁺ - S

Les rendements les plus élevés sont atteints en 1988 et sont proches de 85 q.ha⁻¹ pour un niveau de déficit climatique de l'ordre de 130 mm. Là encore, c'est l'année 1991 qui génère les rendements les plus faibles (40 à 50 q.ha⁻¹ pour un niveau de déficit climatique compris entre 300 et 320 mm.

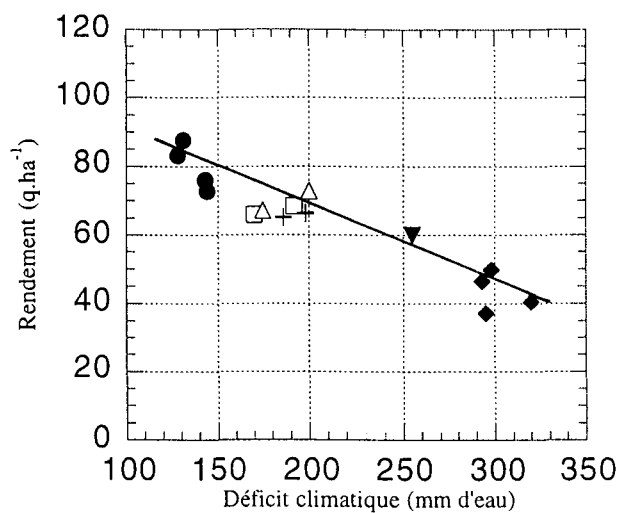
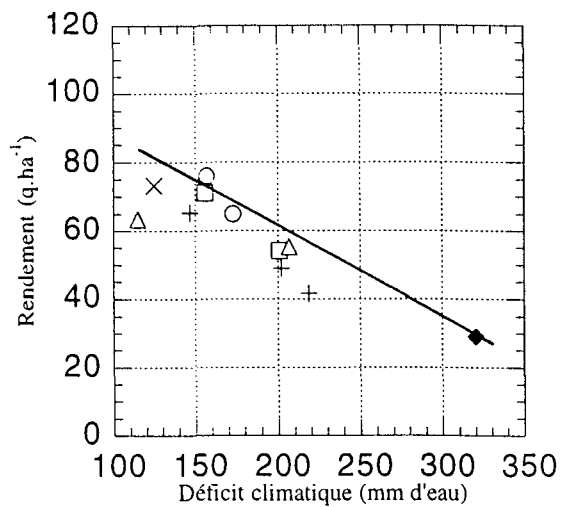
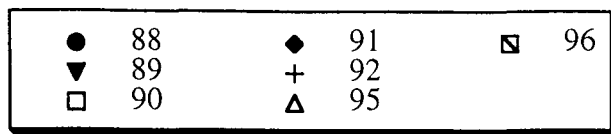
Equation de l'enveloppe : $R = -0,221 \text{ DC} + 113,6$ (Graphique n° 8)

- Type de sol n° 3 : Sols sur calcaire dur, comprenant 10 à 25 % de cailloux en surface, argileux carbonatés et sains.

Codification type : C - II - A⁺ - S

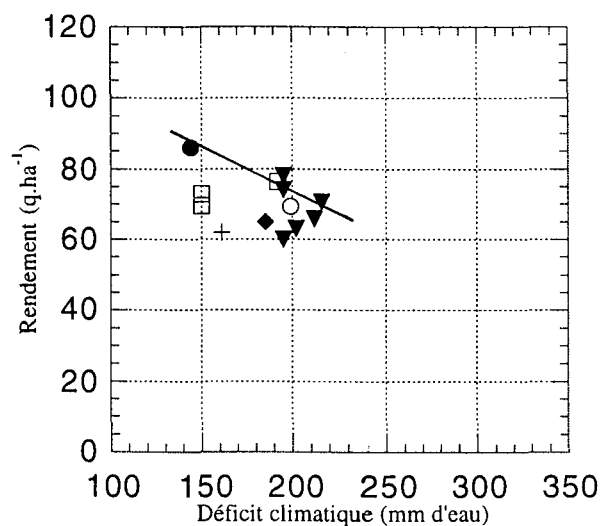
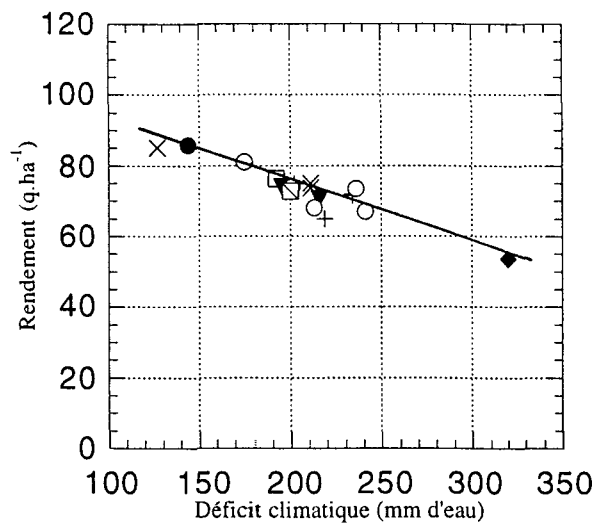
Pour les faibles niveaux de déficit climatique (120 à 140 mm), les rendements sont également de l'ordre de 85 q.ha⁻¹ et ils sont observés en 1988 et 1994. Pour le niveau de déficit climatique le plus élevé (320 mm en 1991), le seul rendement observé est proche de 55 q.ha⁻¹.

Equation de l'enveloppe : $R = -0,161 \text{ DC} + 108,3$ (Graphique n° 9)



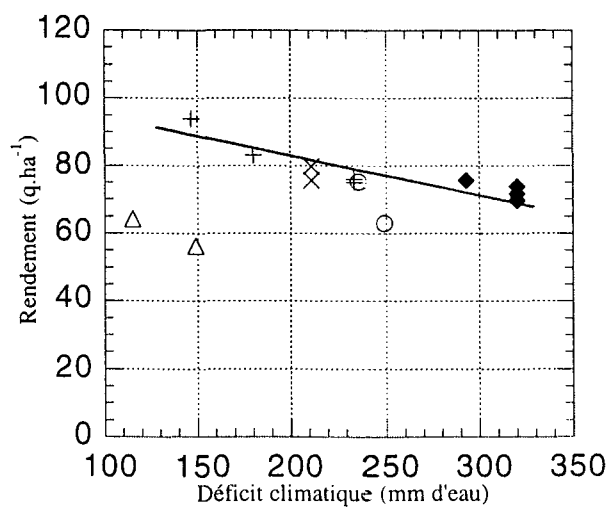
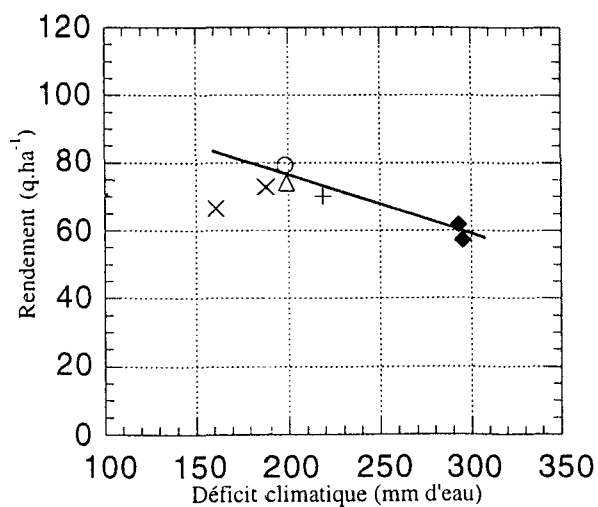
Graphique n° 7

Graphique n° 8



Graphique n° 9

Graphique n° 10



Graphique n° 11

Graphique n° 12

3.3.1.2.3. Résultats pour les sols non ou peu caillouteux développés sur calcaire

- Type de sol n° 4 : Sols sur calcaire, d'une profondeur comprise entre 20 et 40 cm, argileux, carbonatés et sains
 Codification type : C - 2 - A⁺ - S
 Les meilleurs rendements s'échelonnent de 85 q.ha⁻¹ en 1992 pour un déficit climatique de 150 mm à 75 q.ha⁻¹ pour un déficit climatique de 210 mm en 1995.
 Equation de l'enveloppe : $R = -0,243 \text{ DC} + 121,9$ (Graphique n° 10)

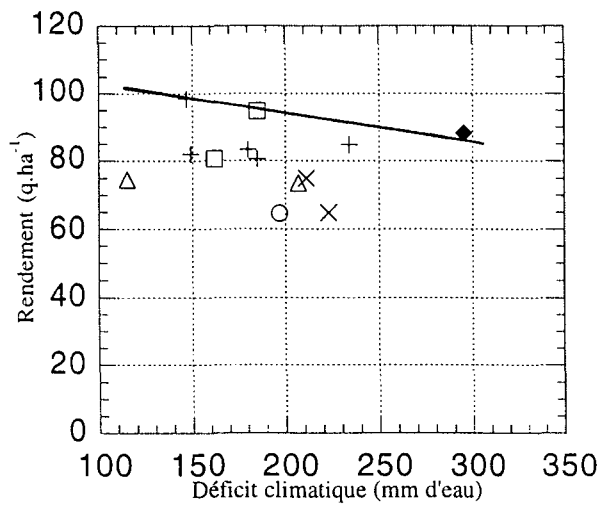
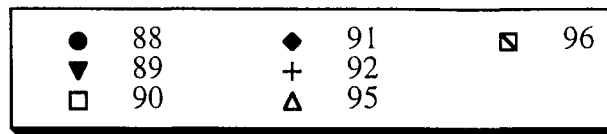
- Type de sol n° 5 : Sols sur calcaire, d'une profondeur comprise entre 40 et 60 cm, argileux, carbonatés et sains.
 Codification type : C - 3 - A⁺ - S
 La gamme des meilleurs rendements observés varie de 79,3 q.ha⁻¹ en 1993 pour un déficit climatique de 198 mm en 1993 à 61,7 q.ha⁻¹ pour un déficit climatique de 293 mm en 1991.
 Equation de l'enveloppe : $R = -0,174 \text{ DC} + 110,6$ (Graphique n° 11)

- Type de sol n° 6 : Sols sur calcaire, d'une profondeur comprise entre 60 et 80 cm, argileux, carbonatés et sains.
 Codification type : C - 4 - A⁺ - S
 Le meilleur rendement est observé en 1992 (94 q.ha⁻¹) pour un déficit climatique de 147 mm. Pour le déficit climatique le plus sévère (320 mm en 1991) les rendements plafonnent entre 70 et 75 q.ha⁻¹.
 Equation de l'enveloppe : $R = -0,093 \text{ DC} + 100,1$ (Graphique n° 12)

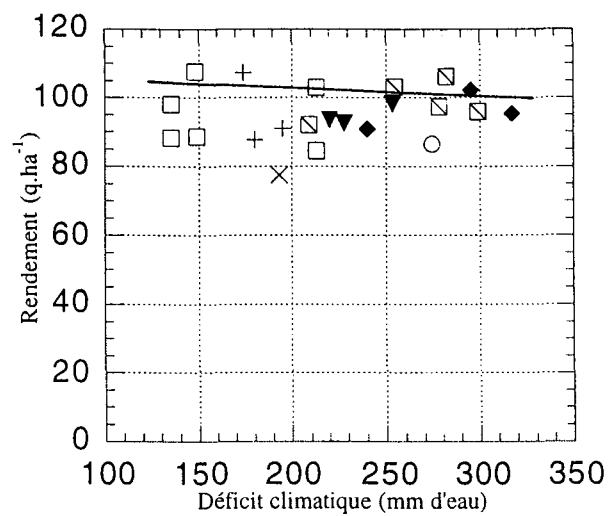
- Type de sol n° 7 : Sols sur calcaire, d'une profondeur comprise entre 80 cm et 1 m, argileux, carbonatés et sains.
 Codification type : C - 5 - A⁺ - S
 Les rendements observés s'échelonnent de 98,4 q.ha⁻¹ en 1992 pour un déficit climatique de 147 mm à 88,2 q.ha⁻¹ en 1991 pour un déficit climatique de 295 mm.
 Equation de l'enveloppe : $R = -0,077 \text{ DC} + 108,3$ (Graphique n° 13)

3.3.1.2.4. Résultats pour les sols profonds, développés sur argile

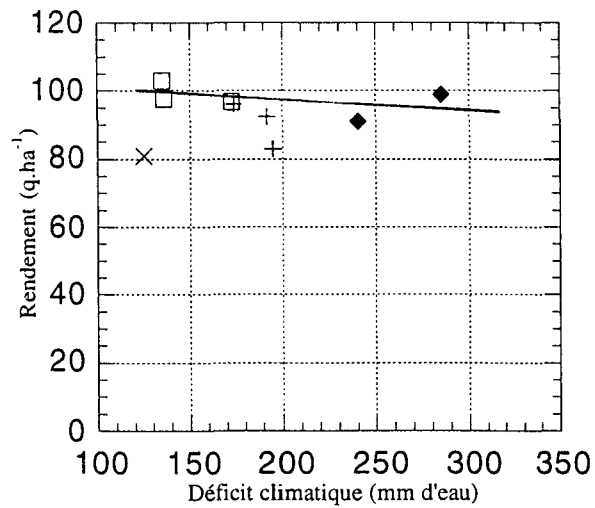
- Type de sol n° 8 : Résultats pour les sols profonds, développés sur argile présentant une texture de surface comprise entre 25 et 35 % d'argile (donc classés La ou Al selon les cas) avec un enrichissement systématique en argile dès 50 à 60 cm, générant une diminution de la densité d'enracinement.
 Codifications types : $A - 7 - \frac{Al}{A_{50}} - D$ et $Al - 7 - \frac{La}{Al_{50}} - D$



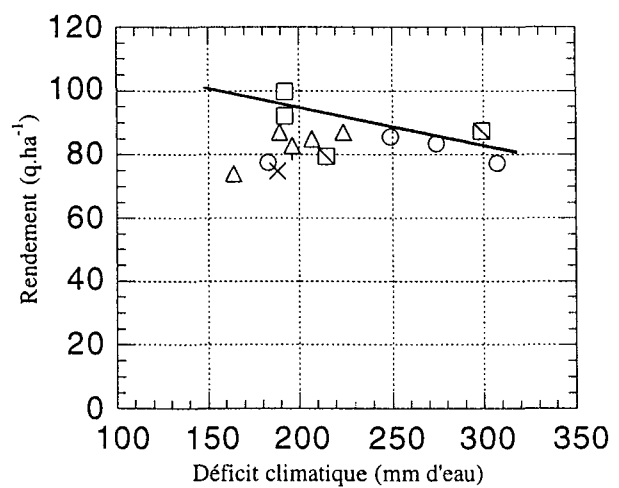
Graphique n° 13



Graphique n° 14



Graphique n° 15



Graphique n° 16

Graphique n° 7 à 16 (sols n° 1 à 10) - Relation entre le déficit climatique et le rendement de blé

Nous avons décidé d'agréger ces deux types de sol sur la base de deux critères :

- * Les teneurs en argile des textures de surface sont souvent assez peu différentes et limites (supérieures pour les premiers et inférieures pour les seconds) des classes définies par le triangle de texture du GEPPA (Annexe n° 1).
- * Les examens des densités et profondeurs d'enracinement ne montrent pas de différences majeures pour ces deux types de sol.

L'examen des résultats montre que ces sols sont, pour les meilleurs rendements observés, insensibles aux variations de déficit climatique (106 à 107 q.ha⁻¹ quel que soit le niveau)

Equation de l'enveloppe : $R = -0,023 DC + 106,8$ (Graphique n° 14)

3.3.1.2.5. Résultats pour les sols profonds développés sur limons

- Type de sol n° 9 : Ces sols contiennent en général autour de 20 % d'argile en surface et environ 60 à 70 % de limons totaux. Ils sont donc moins riches en argile que les précédents, mais présentent également moins de discontinuité texturale sur l'ensemble du profil.

Codification type : L - 7 - L - D

Les résultats observés sont de l'ordre de 97 q.ha⁻¹ quel que soit le niveau du déficit climatique.

Equation de l'enveloppe : $R = -0,025 DC + 101,4$ (Graphique n° 15)

3.3.1.2.6. Résultats pour les sols profonds développés sur marnes

- Type de sol n° 10 : Ces sols sont en général argileux en surface présentant un degré de carbonatation variable selon les situations géologiques, avec apparition d'une couche de marnes entre 70 et 80 cm, générant systématiquement une diminution brutale de la densité d'enracinement.

Les meilleurs résultats observés plafonnent à 87 q.ha⁻¹ pour un niveau de déficit climatique voisin de 225 mm (année 1995) et à 77 q.ha⁻¹ pour un déficit climatique voisin de 310 mm (année 1993).

Equation de l'enveloppe : $R = -0,119 DC + 117,2$ (Graphique n° 16)

3.3.1.3. Effet de l'excès d'eau

• Résultats sur le site de VALFROICOURT (Tableau n° 7)

La comparaison porte sur les années de récolte 1992 et 1995. Le niveau des déficits climatiques est faible et comparable (147 mm en 1992 contre 115 mm en 1995) alors que l'excès d'eau hivernal passe du simple au plus du double (215 mm en 1992 contre 477 mm en 1995). Pour le sol caillouteux superficiel, les résultats sont conformes aux hypothèses émises précédemment, à

savoir, une non sensibilité à l'excès d'eau hivernal, qui se traduit par des rendements équivalents (2 q.ha^{-1} de différence).

En revanche, pour les sols argilo-limoneux sur argile à 60 cm (stations 2 et 3) la différence de rendement observée peut atteindre jusqu'à 30 q.ha^{-1} .

		Année	
		1992	1995
Déficit climatique en mm d'eau		147	115
Excès d'eau hivernal en mm d'eau		215	477
Rendement en q.ha^{-1}	<u>Station 1</u> Sol caillouteux superficiel $C - IV - A^+ - S$	65,3	63,3
	<u>Station 2</u> Sol argilo-limoneux sur calcaire à 70 cm $C - 4 - \frac{Al^+}{A_{60}} - D$	94,0	64,2
	<u>Station 3</u> Sol argilo-limoneux sur calcaire à 90 cm $C - 5 - \frac{Al^+}{A_{60}} - D$	98,4	71,6

Tableau n° 7 - Conséquences de l'excédent climatique sur le site expérimental de VALFROICOURT

• Résultats sur le site de REZONVILLE (Tableau 8)

La comparaison porte sur les années de récolte 1992, 1994, et 1996. Le niveau des déficits climatiques est peu variable (234 mm en 1992, 211 mm en 1994 et 263 mm en 1996) alors que l'excès d'eau hivernal se situe à 249 mm en 1992, 418 en 1994 et 159 en 1996. Là encore, le sol moyennement caillouteux ne semble pas réagir aux excès d'eau (rendement équivalent en 1992 et 1994) alors que le sol sur argile à 40 cm montre une différence de rendement de 8 q.ha^{-1} entre 1992 et 1994.

Dans les deux cas, le rendement de 1996 est le plus élevé et il correspond à un excès d'eau hivernal très faible. On peut toutefois évoquer d'autres éléments climatiques pour expliquer ces niveaux de rendement tels que le rayonnement exceptionnel du printemps de cette année qui a généré des indices de récolte très élevés.

En l'absence de notations précises sur ces sites expérimentaux, outre les éléments théoriques déjà cités, la connaissance sur les relations existantes entre les composantes du rendement nous autorise à émettre l'hypothèse, pour ces situations, d'une diminution de nombre de grains/ m^2 et d'épis/ m^2 , elle-même consécutive au déficit de croissance avant le stade épi 1 cm (MEYNARD, 1985 ; MEYNARD, AUBRY, 1988).

		Année		
		1992	1994	1996
Déficit climatique en mm d'eau		234	211	263
Excès d'eau hivernal en mm d'eau		249	418	159
Rendement en q.ha ⁻¹	<u>Station 1</u>			
	Sol moyennement caillouteux superficiel	71,7	73,7	80,2
	C - II - A ⁺ - 5			
	<u>Station 2</u>			
	Sol argilo-limoneux sur calcaire	88,5	80,3	94,8
	C - 5 - $\frac{Al}{A_{40}}$ - D			

Tableau n° 8 - Conséquences de l'excédent climatique sur le site expérimental de REZONVILLE

3.3.1.4. Discussion partielle

L'examen des relations entre le rendement et le déficit climatique montre qu'il existe des différences importantes en fonction des types de sol. En particulier, on peut observer un comportement différent entre les sols à cailloux (sols n° 1, 2 et 3) et les autres.

3.3.1.4.1. Cas des rendzines sur calcaire dur

Pour les sols caillouteux, superficiels et filtrants, la plus grande partie de variation de rendement est expliquée par les variations du déficit climatique, ce qui semble assez logique, compte tenu du faible niveau de réserve en eau (de l'ordre de 40 à 70 mm). De plus, ces sols ne sont pas propices à l'expression d'autres facteurs limitants :

- Généralement carbonatés en surface, ils présentent une structure grumeleuse très favorable à des enracinements denses. Les accidents consécutifs au travail du sol (compactages, semelles de labour) sont exceptionnels et la structure est généralement de type "fragmentaire" (éléments structuraux bien individualisés et fragmentaires, agrégats discernables dans les mottes dont les faces de fragmentation présentent une rugosité importante) selon la classification proposée par MANICHON (1982). Cette structure favorable est due à la forte aptitude à la fissuration et à la rapidité de ressuyage de ces sols, ce qui assure, en toute saison, un respect des dates prévisionnelles d'intervention pour les différentes techniques culturales (désherbage et apports d'azote en particulier).
- Les dates de semis pratiquées sont généralement précoces : ces types de sols se rencontrent majoritairement dans les exploitations céréalières où les cultures de blé d'hiver suivent toujours ou presque un colza d'hiver, précédent qui permet d'intervenir tôt pour la préparation des semis. Ainsi, il n'est pas rare, dans ces situations que ceux-ci soient achevés pour le début d'octobre, permettant ainsi un développement rapide de la culture

qui peut atteindre le début du tallage avant l'hiver. Les densités de semis mises en oeuvre sont toujours élevées (de l'ordre de 350 grains.m²), ce qui combiné aux dates de semis, génère des niveaux de biomasses importantes au stade épi 1 cm (MEYNARD, LIMAUX, 1987) et donc des niveaux de composantes du rendement potentiellement élevés (FLEURY, LIMAUX, 1987), non limitants de l'expression du rendement permis par les conditions climatiques.

- Enfin, le socle calcaire fissuré sur lequel sont développés ces sols permet une évacuation de l'excès d'eau hivernal et un réchauffement rapide au printemps, favorable à une reprise précoce de la croissance.

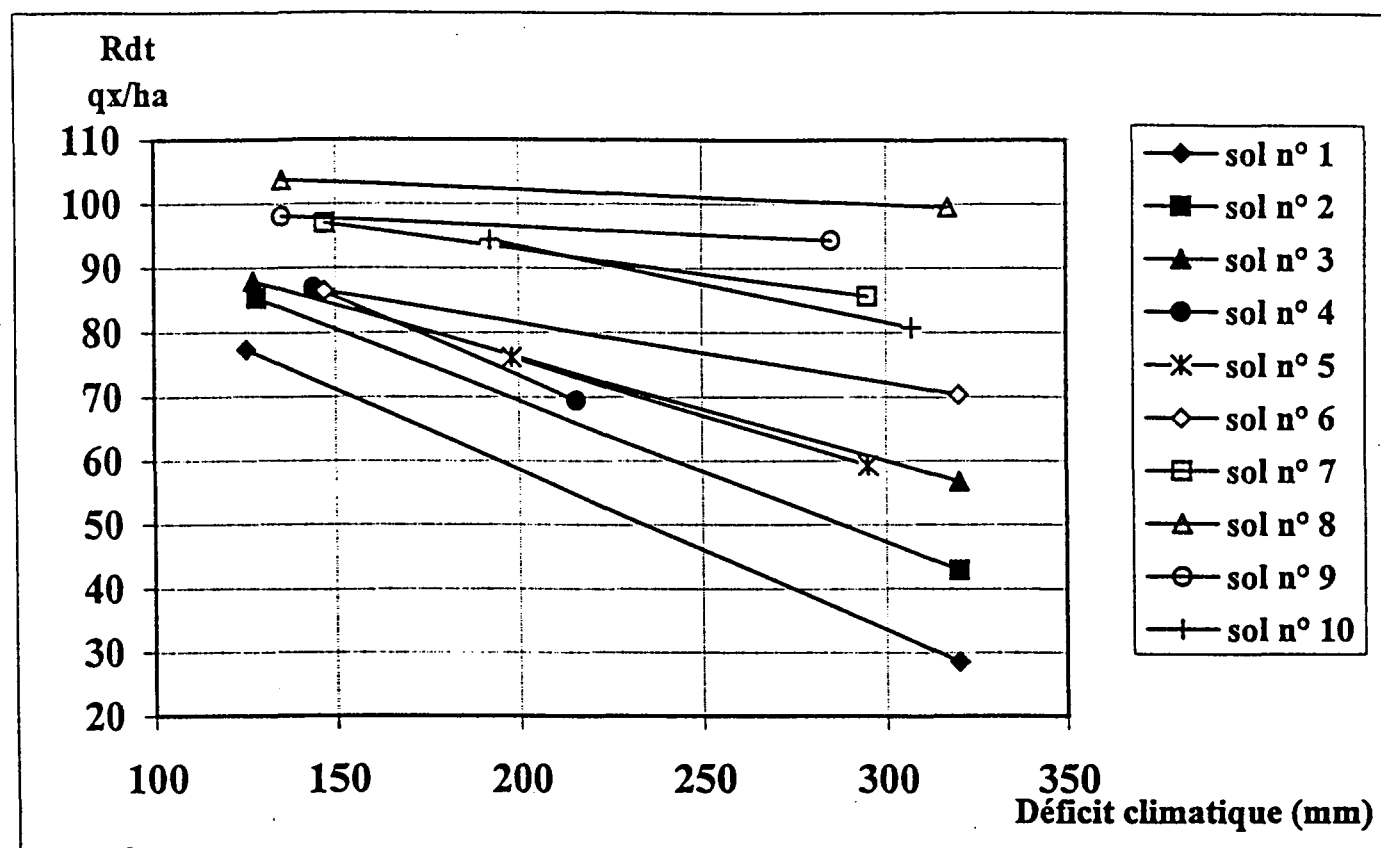
On voit donc, qu'au total, l'ensemble des conditions pédo-agronomiques et techniques qui sont associées au déroulement de l'itinéraire cultural, ne sont pas ou peu limitantes pour le rendement potentiel, la satisfaction des besoins en eau restant l'élément explicatif essentiel des variations observées.

3.3.1.4.2. Cas des sols argileux et limoneux

A l'inverse des sols caillouteux, on observe pour chaque type de sol une dispersion importante des résultats : de nombreux résultats sont très nettement inférieurs aux rendements théoriques calculés à partir de l'équation de l'enveloppe (exemple : -28 % pour les sols n° 8, -34 % pour les sols n° 6, -19 % pour les sols n° 5, -25 % pour les sols n° 4). Nous avons déjà évoqué les conséquences de l'excédent climatique hivernal sur les sites de VALFROICOURT et REZONVILLE (cf chap. 3.3.1.3.). Selon MEYNARD et AUBRY (1988), les diminutions du nombre de grains par m² peuvent atteindre 20 % en situations d'hydromorphie.

La cause principale en serait, selon ces auteurs, la diminution de "l'efficacité de l'azote" $\left(\frac{\text{azote disponible sol} + \text{engrais}}{\text{azote absorbé}} \right)$ elle-même consécutive à une diminution de la densité racinaire et à des conditions favorables à la dénitrification. Ces observations sont confirmées par d'autres auteurs : THOMSON *et al.*, (1989) cités par REBIERE (1996), ont mis en évidence une diminution de la croissance racinaire lorsque la concentration en oxygène du milieu diminue. Selon l'intensité et la durée du déficit en oxygène, le système racinaire peut, non seulement être affecté dans sa croissance mais faire l'objet d'une régression (REBIERE, 1996).

- la profondeur d'enracinement au début de la montaison est inversement corrélée à la profondeur de nappe moyenne hivernale (PONS, 1988).
- l'activité photosynthétique maximum de la biomasse aérienne diminue quand augmente la proportion du système racinaire soumis à engorgement (REBIERE, 1996).



Graphique n° 17 - Comparaison des enveloppes établies pour les 10 types de sol (rendement en fonction du déficit climatique)

Concernant les effets sur la croissance et le développement, MASSE et CAPY (1988) à partir de leurs propres travaux et d'une importante synthèse bibliographique montrent que l'excès d'eau peut avoir des conséquences à différents stades :

- il peut générer un retard à la levée (CANNELL *et al.*, 1980 ; CANNELL et BELFORD, 1982).
- le rythme d'apparition des feuilles ne serait pas modifié (CANNELL *et al.*, 1980 ; GUYOT et PRIOUL, 1985) pour des excès d'eau précoces (avant la levée ou le début du tallage). Toutefois, l'excès peut modifier le statut thermique du sol ainsi que le degré de compaction et dans ces conditions la valeur du phyllochrone qui dans un premier temps ne serait pas modifié, verrait sa valeur augmenter de 40°C.
- le nombre de talles est affecté (CANNELL *et al.*, 1980) ainsi que la croissance racinaire (CANNELL *et al.*, 1985).
- la croissance des parties aériennes même si elle n'est jamais complètement stoppée est généralement ralentie suite à une diminution des surfaces et des poids secs foliaires (TROUGHT et DREW, 1982 ; GUYOT et PRIOUL, 1985).

3.3.1.4.3. Comparaison des pentes des enveloppes obtenues pour chaque type de sol (Graphique n° 17 tableau n° 9)

Les pentes observées pour les potentiels de rendement en fonction du déficit climatique peuvent être très différentes selon les types de sol : -0,023 pour les sols n° 8 (soit une perte de rendement potentiel de 2,3 q.ha⁻¹ quand le déficit climatique augmente de 100 mm) à -0,250 pour les sols n° 1 (soit une perte de rendement potentiel de 25,0 q.ha⁻¹ quand le déficit climatique augmente de 100 mm). Ces différences de pente traduisent donc bien, a priori, des différences de sensibilité au déficit en eau. Devant la difficulté déjà soulignée, de calculer avec précision les niveaux de réserves utiles, nous avons essayé de vérifier qu'à de faibles pentes correspondent des volumes de sol élevés donc à des capacités de stockage en eau importante et inversement. Pour les sols sans cailloux, le volume de sol a été apprécié à partir de la profondeur de prospection à la tarière sauf pour les sols sur marnes, où c'est la profondeur d'apparition de la couche de marnes qui a été prise en compte, et ce au vu des observations réalisées sur des profils d'enracinement.

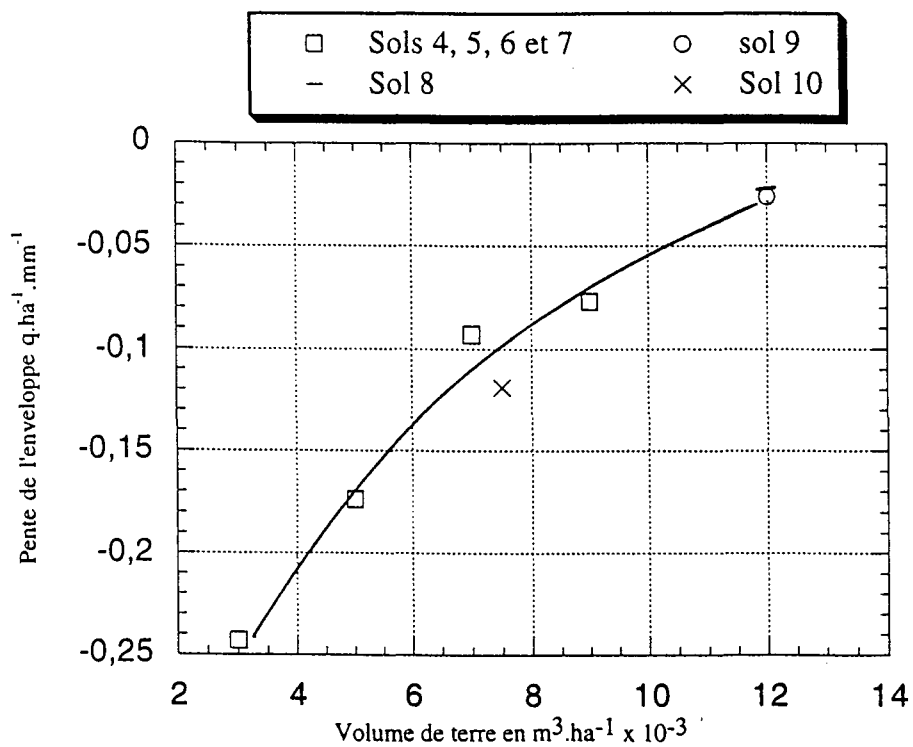
Pour les sols à cailloux, le volume total de sol est difficilement calculable. Aussi nous avons utilisé la relation établie par FLORENTIN (1991) qui, à partir de 53 observations réalisées dans ce type de sol, a pu montrer que, dans l'horizon cultivé, le pourcentage du volume occupé par la terre fine est corrélé négativement au pourcentage de cailloux en surface :

$$\% \text{ TF} = -0,76 \% \text{ CS} + 94 \quad r^2 = 0,75$$

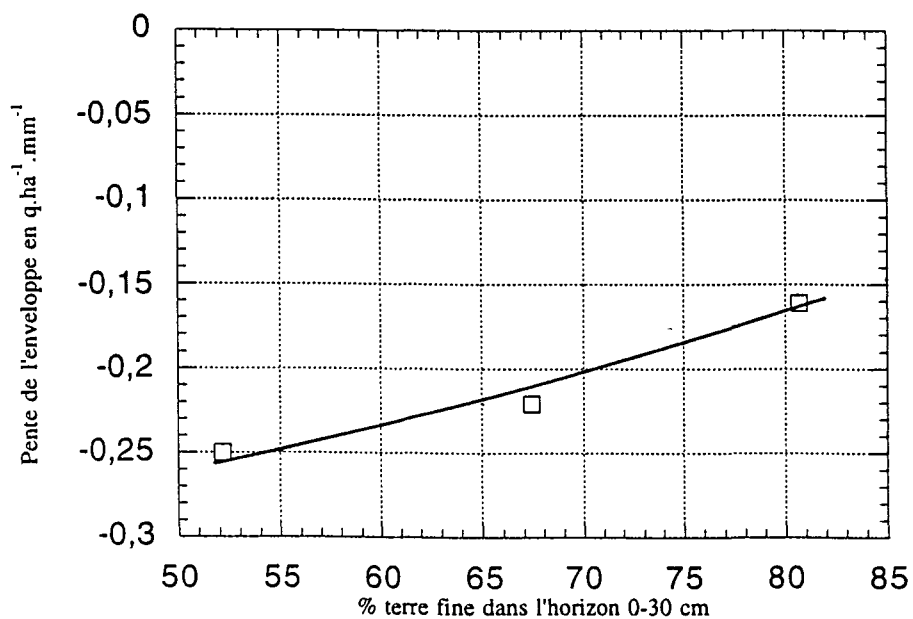
où :

% TF = % de terre fine dans 0-30 cm

% CS = % de cailloux en surface



Graphique n° 18 a



Graphique n° 18 b

Relation entre la pente des enveloppe des nuages de points reliant le rendement au déficit climatique et :

- le volume de sol exploitable par les racines : graphique 18 a
- le % de terre fine dans l'horizon 0+30 cm : graphique 18 b

Les relations ainsi établies sont les suivantes :

* Sols sans cailloux (Graphique n° 18a)

$$\text{Pente} = 0,365 \log V - 0,421 \quad r^2 = 97,88 \% \text{ *****} \quad 7 \text{ valeurs}$$

où $V = \text{Volume de terre en } m^3 \cdot ha^{-1} \times 10^{-3}$

* Sols à cailloux (Graphique n° 18b)

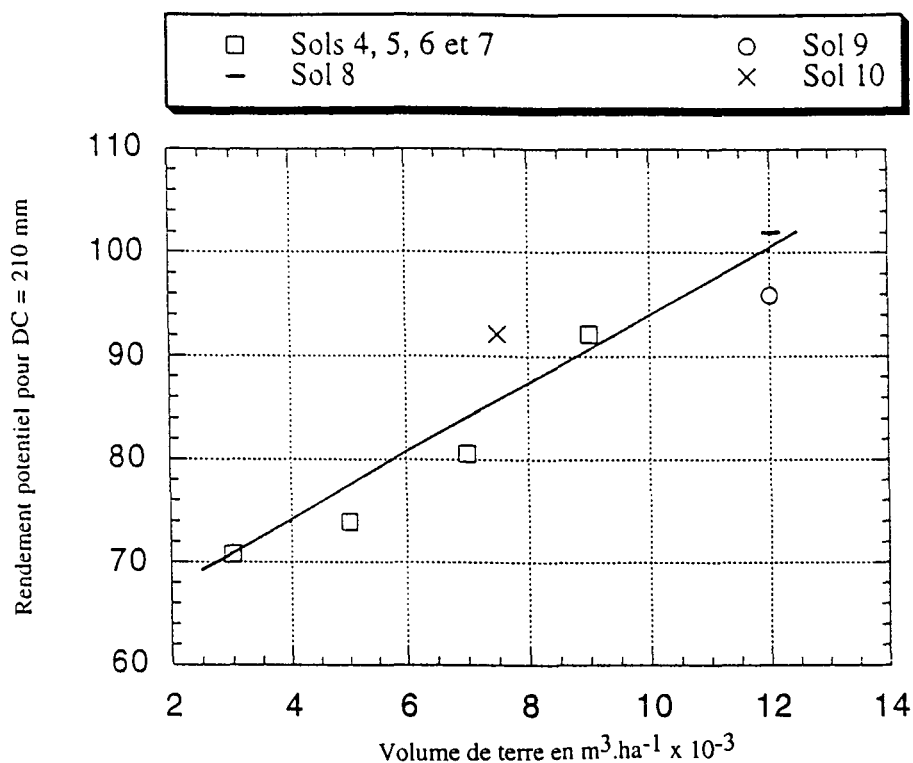
$$\text{Pente} = -2,359 \cdot 10^{-5} TF^{-2} - 0,319 \quad r^2 = 96,95 \% * \quad 3 \text{ valeurs}$$

où $TF = \% \text{ de terre fine dans } 0-30 \text{ cm}$

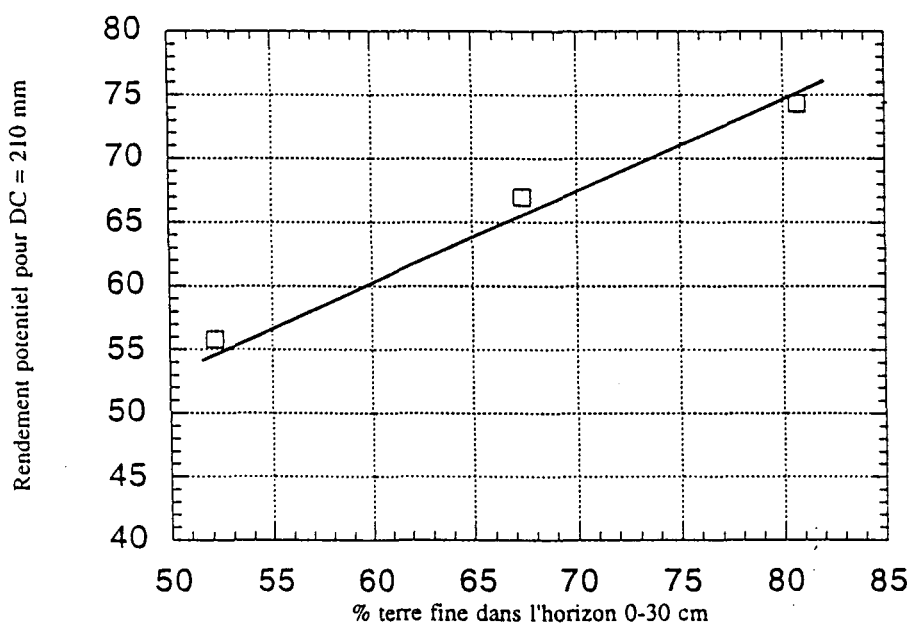
Dans les deux cas, elles sont significatives. Or, la réserve en eau utile qui permet de tamponner le déficit climatique est étroitement lié au volume de sol exploitable par le système racinaire. De plus, lorsqu'on examine la position des enveloppes les unes par rapport aux autres, on peut remarquer qu'en général, plus la pente de l'enveloppe est faible, plus celle-ci se situe dans la partie supérieure du graphique, ce qui signifie que pour une même valeur du déficit climatique, le niveau de rendement potentiellement accessible est plus élevé que pour les enveloppes se situant dans la partie basse du graphique. En d'autres termes, pour une même valeur de DC, les sols plus profonds présentent des potentialités supérieures.

Sols n°	Codification type	Construction de l'enveloppe				% en volume de terre fine dans l'horizon cultivé	Volume de terre exploitable en m^3	Rendement potentiel pour DC = 210 mm
		Nombre de points	Domaine de validité du déficit climatique	pente	ordonnée à l'origine			
1	C - IV - A ⁺ - S	6	(125-320)	-0,250	108,5	52,2		55,8
2	C - III - A ⁺ - S	8	(128-320)	-0,221	113,6	67,4		62,03
3	C - II - A ⁺ - S	7	(127-320)	-0,161	108,3	80,7		74,3
4	C - 2 - A ⁺ - S	6	(144-216)	-0,243	121,9		3000	70,8
5	C - 3 - A ⁺ - S	5	(198-295)	-0,174	110,6		5000	73,9
6	C - 4 - A ⁺ - S	11	(147-320)	-0,093	100,1		7000	80,6
7	C - 5 - A ⁺ - S	4	(147-295)	-0,077	108,3		9000	92,10
8	A - 7 - $\frac{Al}{A50}$ - D	8	(135-317)	-0,023	106,8		12000	101,9
9	L - 7 - L - D	7	(135-285)	-0,025	101,4		12000	95,9
10	M - 7 - $\frac{A^+}{M75}$ - M	7	(192-307)	-0,119	117,2		7500	92,1

Tableau n° 9 - Valeurs des pentes et de l'ordonnée à l'origine des enveloppes pour les graphiques $R = f(DC)$, % de terre fine ou volume de terre, et R calculé pour un déficit de 210 mm, pour les 10 types de sols étudiés.



Graphique n° 19 a



Graphique n° 19 b

Relation entre le rendement potentiel calculé pour un déficit climatique (DC) de 210 mm et :

- le volume de sol : graphique 19 a (types de sol n° 4 à n° 10)

$$R = 3,288 V \cdot 10^{-3} + 60,68 \quad r^2 = 89,11 \% \quad ****$$

- % de terre fine dans l'horizon 0-30 cm : graphique 19 b (types de sol n° 1 à n° 3)

$$R = 0,722 TF + 16,72 \quad r^2 = 97,82 \% \quad *$$

Aussi la mise en relation du rendement potentiel calculé pour un déficit climatique de 210 mm (valeur commune à toutes les enveloppes) avec le volume de sol ou le pourcentage de terre fine dans l'horizon cultivé pour les terres à cailloux, confirme bien ce classement (Graphiques n° 19a et 19b).

La cohérence de ces résultats conforte aussi bien le mode de construction des enveloppes que les termes de la codification régionale, puisqu'ils permettent le regroupement de sols ayant le même comportement vis-à-vis des potentialités de production.

Il reste que nos dispositifs expérimentaux ne nous permettent pas de discuter des niveaux de potentialités en l'absence de déficit climatique, puisque les déficits les plus faibles se situent à 125 mm (Tableau n° 9). Lorsque les pentes des enveloppes sont très faibles (cas des sols n° 8 et 9) on peut considérer que l'ordonnée à l'origine de l'équation de l'enveloppe donne une bonne idée de ce niveau de potentialité. Pour les autres sols et en particulier les sols à cailloux (sols n° 1, 2 et 3), on peut imaginer l'existence d'un palier dont la longueur serait fonction du niveau de réserve utile, avant d'observer une enveloppe à pente négative. Faute de disposer de sites expérimentaux permettant de mettre en oeuvre l'irrigation sur blé, nous n'avons pu tester cette hypothèse.

3.3.2. COMPARAISON DE L'ESTIMATION DES BESOINS EN AZOTE SUR LA BASE DU RENDEMENT ET DE LA MATIÈRE SÈCHE DES PARTIES AÉRIENNES (MSPA)

3.3.2.1. Définition du ratio "B"

Par analogie à b qui définit la quantité d'azote absorbé par quintal de grain, ou à β qui définit la quantité d'azote absorbé par nombre de grain, nous définissons le ratio B comme étant la quantité d'azote absorbé en kg par quintal de matière sèche de parties aériennes, soit

$$B = \frac{N_{absPE}}{MSPA}$$

N_{absPE} en kg d'azote.ha⁻¹

$MSPA$ en q de matière sèche.ha⁻¹

3.3.2.2. Variation des ratios b et B

Pour cette partie de l'analyse des résultats, nous n'avons retenu que les variétés présentes ensemble sur tous les sites expérimentaux et pour une même année, à savoir : AMI, FORBY et SOISSONS.

Pour chacune des deux années de suivi, nous avons calculé pour chaque variété et pour chaque site expérimental, les valeurs de b (par souci de cohérence avec le ratio B , b est exprimé par rapport à la matière sèche du grain et non par rapport au rendement aux normes classiquement utilisé) et de B .

3.3.2.2.1. Effet de l'année et de la variété

• Résultats annuels, par variété et par site expérimental (Tableau n°10)

* Résultats 1995

La gamme des valeurs observées pour b s'échelonne de 3,03 (AMI à Bignan) à 4,09 (SOISSONS au Magneraud). Pour une même variété, les valeurs de b sont différentes selon les sites expérimentaux, mais le classement AMI < FORBY < SOISSONS est presque toujours respecté (l'exception est Boulancourt où FORBY > SOISSONS).

Les valeurs moyennes s'établissent à 3,20 pour AMI, 3,67 pour FORBY, 3,73 pour SOISSONS, la variation entre sites étant la plus faible pour FORBY (CV = 3 %) et la plus forte pour AMI (CV = 6,53 %).

Pour B , la gamme des valeurs observées s'échelonne de 1,53 (AMI au Magneraud) à 1,82 (SOISSONS au Magneraud). Comme pour b , le classement AMI < FORBY < SOISSONS est toujours respecté, sauf pour Boulancourt où il est inversé.

Les valeurs moyennes s'établissent à : 1,58 pour AMI, 1,64 pour FORBY, 1,73 pour SOISSONS, la variation entre sites étant, comme pour b , la plus faible pour FORBY (CV = 1,08 %) et la plus forte pour AMI (CV = 3,66 %), mais dans tous les cas, les CV sont plus faibles que pour b .

* Résultats 1996

La gamme des valeurs observées pour b est peu différente de 1995 : 2,88 (FORBY à Boulancourt) à 3,86 (SOISSONS à Villiers), toutefois le classement des variétés par rapport à cette valeur n'est plus le même pour tous les sites expérimentaux, et en particulier, il est modifié à Bignan et Boulancourt pour lesquels on a FORBY < AMI < SOISSONS.

Les valeurs moyennes s'établissent à : 3,16 pour AMI, 3,17 pour FORBY, 3,67 pour SOISSONS, la variation entre site étant cette fois-ci la plus faible pour AMI (CV = 3,26 %) et la plus forte pour FORBY (CV = 6,62 %).

Pour B, la gamme des valeurs observées est identique à 1995 : 1,48 (FORBY à Boulancourt) à 1,85 (SOISSONS au Magneraud). Le classement entre variété est modifié dans le même sens que pour b, par rapport 1995.

Les valeurs moyennes s'établissent à : 1,62 pour AMI, 1,62 pour FORBY, 1,81 pour SOISSONS, la variation entre sites étant la plus faible pour SOISSONS (CV = 1,96 %) et la plus forte pour FORBY (CV = 5,85 %).

1995	AMI		FORBY		SOISSONS	
	b	B	b	B	b	B
Bignan	3,03	1,55	3,61	1,62	3,65	1,81
Boulancourt	3,55	1,68	3,86	1,67	3,48	1,66
Le Magneraud	3,17	1,53	3,58	1,64	4,09	1,82
Cuperly	3,05	1,57	3,64	1,64	3,69	1,66
Moyenne	3,2	1,58	3,67	1,64	3,73	1,73
σ	0,209	0,058	0,11	0,017	0,223	0,077
CV %	6,53	3,66	3,00	1,08	5,99	4,46

1996	AMI		FORBY		SOISSONS	
	b	B	b	B	b	B
Bignan	3,30	1,66	3,13	1,60	3,54	1,76
Boulancourt	3,03	1,57	2,88	1,48	3,76	1,84
Le Magneraud	3,21	1,57	3,20	1,66	3,53	1,85
Villiers	3,10	1,68	3,47	1,74	3,86	1,80
Moyenne	3,16	1,62	3,17	1,62	3,67	1,81
σ	0,103	0,05	0,21	0,094	0,142	0,055
CV %	3,26	3,11	6,62	5,85	3,86	1,96

Tableau n° 10 - Valeurs de b et B pour les 3 variétés sur les différents sites expérimentaux. Moyenne, écart type et coefficient de variation par variété et par année.

• Résultats moyens (Tableau n° 11)

En moyenne sur les 2 années, le classement AMI < FORBY < SOISSONS se confirme, que ce soit pour b ou B, la variété la plus stable étant SOISSONS pour b et AMI pour B. En revanche, FORBY accuse les coefficients de variation les plus élevés (8,83 % pour b et 4,24 % pour B). Dans tous les cas, le coefficient de variation de B est plus faible que celui de b.

	1						2				3	
	AMI		FORBY		SOISSONS		1995		1996		1995 + 1996	
	b	B	b	B	b	B	b	B	b	B	b	B
Moyenne	3,18	1,601	3,42	1,631	3,70	1,775	3,533	1,654	3,334	1,683	3,433	1,677
σ	0,166	0,057	0,302	0,069	0,189	0,071	0,302	0,085	0,286	0,111	0,310	0,100
CV %	5,22	3,56	8,83	4,24	5,11	4,00	8,55	5,16	8,60	6,60	9,05	6,03

Tableau n° 11 - Moyenne, écart type et coefficient de variation de b et B
 - par variété, les deux années confondues (1)
 - par année, les trois variétés confondues (2)
 - années et variétés confondues (3)

Toutes variétés confondues, la valeur de b s'établit à 3,53 en 1995 contre 3,33 en 1996, alors que celle de B reste plus stable (1,65 en 1995 contre 1,68 en 1996). Là encore le CV de B est plus faible que celui de b (5,16 % contre 8,55 % en 1995 et 6,60 % contre 8,60 % en 1996).

En moyenne, toutes années confondues, la valeur de b s'établit à 3,43 (soit 2,92 pour un rendement exprimé à 15 % d'humidité) ce qui est très proche de la valeur préconisée de 3 $\text{kg} \cdot \text{q}^{-1}$, et celle de B à 1,68, le coefficient de variation de celle-ci étant plus faible que pour b (6,03 % contre 9,05 %) (Tableau n° 11).

3.3.2.2. Relations avec l'indice de récolte

On a vu que, globalement, le ratio B est plus stable que le ratio b , quelles que soient les variétés ou les années. Pour tenter d'expliquer la plus grande stabilité de B par rapport à b , il est intéressant d'examiner les variations de l'indice de récolte (HI) car .

$$B = \frac{N_{\text{abs}}}{\text{MSPA}}, \text{ ou encore } B = \frac{N_{\text{abs}}}{\text{MSG}} \cdot \frac{\text{MSG}}{\text{MSPA}} = b \cdot \text{HI}$$

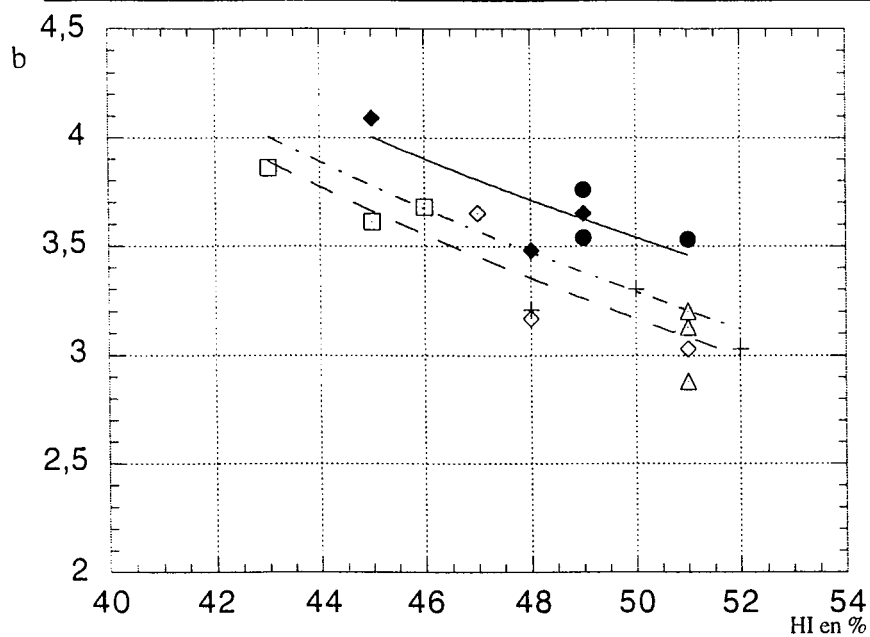
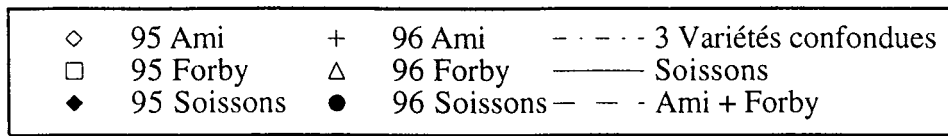
$$\text{Donc } B = b \cdot \text{HI} \text{ et } b = \frac{B}{\text{HI}}$$

• Variations interannuelles de HI

L'examen des indices de récolte (HI pour Harvest Index) montre des différences importantes entre les deux années (Tableau n° 12). En moyenne leur valeur est supérieure en 1996. Ceci est vrai également quand on compare les variétés, année par année tous sites confondus (Tableau n° 13).

Année	Site expérimental	Variété	b	B	HI en %
1995	Bignan	Ami	3,03	1,55	51
		Forby	3,61	1,62	45
		Soissons	3,65	1,81	49
	Le Magneraud	Ami	3,17	1,53	48
		Forby	3,58	1,64	46
		Soissons	4,09	1,82	45
	Boulancourt	Ami	3,65	1,68	47
		Forby	3,86	1,67	43
		Soissons	3,48	1,66	48
1996	Bignan	Ami	3,30	1,66	50
		Forby	3,13	1,70	51
		Soissons	3,54	1,76	49
	Le Magneraud	Ami	3,21	1,57	48
		Forby	3,20	1,66	51
		Soissons	3,53	1,85	51
	Boulancourt	Ami	3,03	1,57	52
		Forby	2,88	1,48	51
		Soissons	3,76	1,84	49

Tableau n° 12 : Valeur de b , B et HI pour Ami, Forby et Soissons sur les 3 sites expérimentaux en 1995 et 1996.



Variétés confondues : $b = \frac{2,12}{HI} - 0,939$

$r^2 = 54,10 \% ***$

SOISSONS : $b = \frac{2,086}{HI} - 0,633$

$r^2 = 63,70 \% ***$

FORBY + AMI : $b = \frac{2,167}{HI} - 1,186$

$r^2 = 85,30 \% ***$

Graphique n° 20 - Evolution du ratio b en fonction de l'indice de récolte

	HI en %	CV en %	MSPA en q.ha ⁻¹	CV en %	MSG en %	CV en %	N _{abs} en kg.ha ⁻¹	CV en %	b	B
1995	46,8	6,03	176,1	11,93	81,52	13,69	296,5	13,8	3,64	1,68
1996	50,2	3,52	175,2	16,17	87,94	16,74	296,1	16,78	3,37	1,69

Tableau n° 13 - Valeurs de HI, MSPA, MSG, Nabs, assorties de leur coefficient de variation, de b et B, pour les 2 années d'essai, sites et variétés confondus

Site expérimental	Variété	$\frac{b_{96} - b_{95}}{b_{95}}$ en %	$\frac{HI_{96} - HI_{95}}{HI_{95}}$ en %
Bignan	Ami	8,9	-1,9
	Forby	-1,2	0
	Soissons	-14,6	10,6
Le Magneraud	Ami	-13,3	13,3
	Forby	-10,6	11,1
	Soissons	-25,4	20,9
Boulancourt	Ami	-3	0
	Forby	-13,7	11,1
	Soissons	8	2,1

Tableau n° 14 : Variations relatives des valeurs de b et HI pour Ami, Forby et Soissons sur les 3 sites expérimentaux en 1995 et 1996.

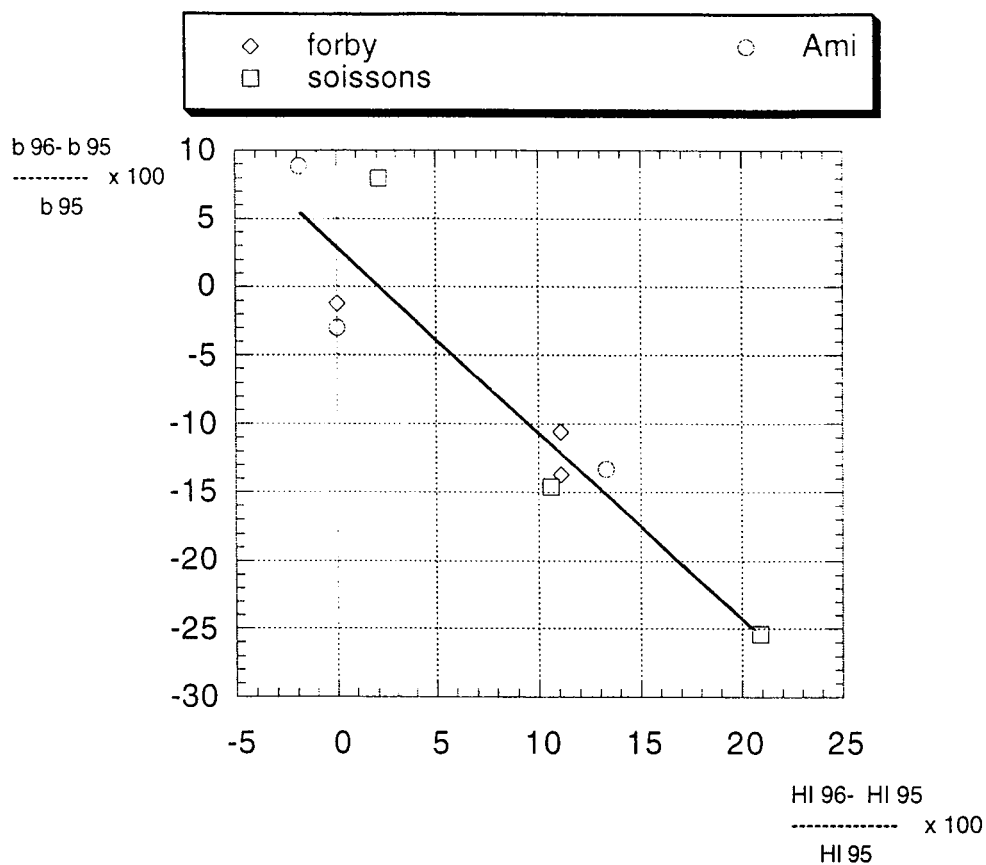
La production de matière sèche des parties aériennes (MSPA) n'est pas à l'origine de ces variations d'indice de récolte. Le tableau 13 montre que pour une MSPA en moyenne équivalente en 1995 et 1996 (176,1 q.ha⁻¹ et 175,2 q.ha⁻¹ respectivement) l'indice de récolte augmente de 3,4 %. De même, les quantités totales d'azote absorbé sont strictement identiques les deux années (296,5 kg.ha⁻¹ et 296,1 kg.ha⁻¹ respectivement). En conséquence, on observe une augmentation du rendement en grains de plus de 6 q.ha⁻¹ en 1996 et une diminution de plus de 7 % de la valeur du ratio b, alors que le ratio B reste stable.

• Relation entre b, B et HI

La condition pour que B soit constant est : $b \cdot HI = K$, donc $b = \frac{K}{HI}$ (relation hyperbolique). En revanche, pour que b soit constant, il faut $\frac{B}{HI} = K$ donc $B = K \cdot HI$ (relation linéaire).

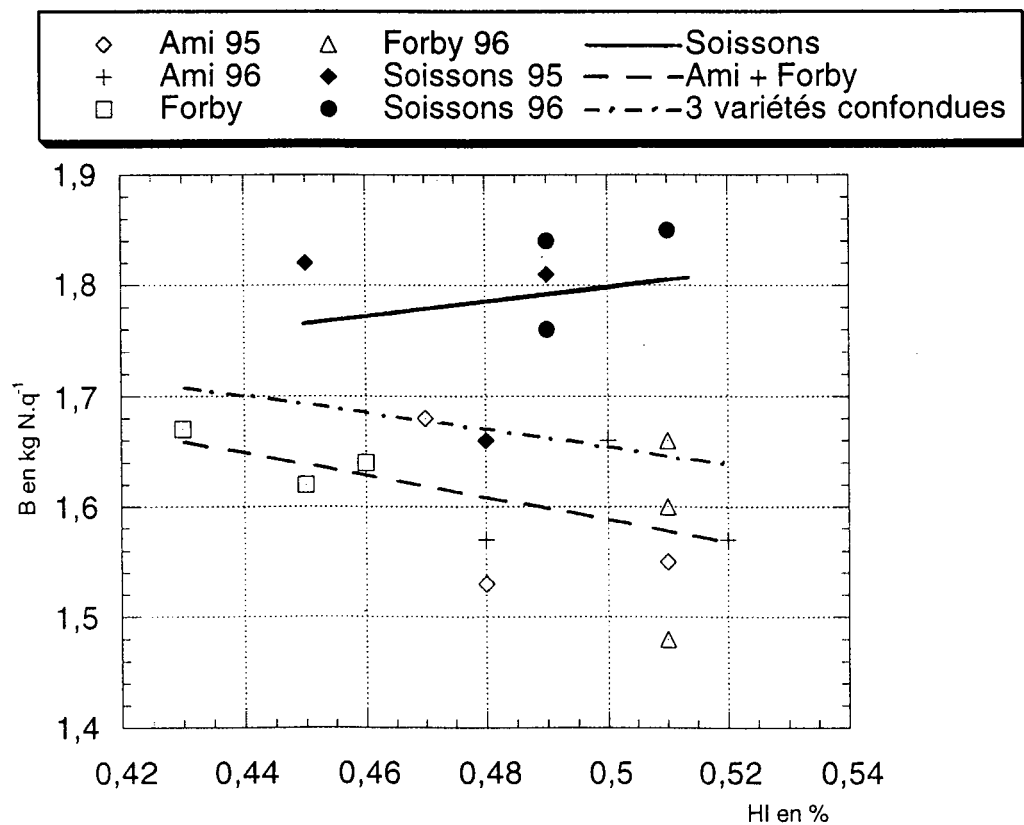
- Relation entre b et HI

Le Graphique n° 20 montre que, toutes variétés confondues, seulement 54 % de la variation de b est expliquée par la variation HI. Pour une même valeur de HI, la valeur de b peut varier de 0,5 kg N.q⁻¹. Mais ceci est dû à la différence de comportement entre SOISSONS d'une part, et AMI et FORBY d'autre part. Pour chacune des variétés b est inversement corrélé à HI ($r^2 = 63,70$ % pour SOISSONS et $r^2 = 85,30$ % pour AMI et FORBY).



$$100 \times \frac{b_{96} - b_{95}}{b_{95}} = -1,353 \left(100 \times \frac{HI_{96} - HI_{95}}{HI_{95}} \right) + 2,84 \quad r^2 = 86 \% ***$$

Graphique n° 21 - Variation relative du ratio b en fonction de la variation relative de l'indice de récolte



Variétés confondues = $B = -0,769 HI + 2,03$

$r^2 = 3,1 \% NS$

SOISSONS : $B = 0,666 HI + 1,46$

$r^2 = 3,4 \% NS$

FORBY + AMI : $B = -1,000 HI + 2,09$

$r^2 = 21 \% NS$

Graphique n° 22 - Evolution du ratio B en fonction de l'indice de récolte.

Ceci suggère que l'observation de valeurs de b différentes selon les variétés résulte non seulement de variations d'indices de récolte entre variétés pour une même année, ou entre années pour une même variété, mais également d'une variation de la teneur en azote de la biomasse. La variété SOISSONS présente ainsi, toutes conditions égales par ailleurs, un b plus élevé que AMI et FORBY. Toutefois, les pentes des 3 régressions sont très proches (2,112 pour les 3 variétés, 2,086 pour SOISSONS et 2,167 pour AMI + FORBY), ce qui laisse présager que les variations relatives de b en fonction des variations relatives de HI doivent être identiques. Ceci est confirmé par le graphique n° 21 sur lequel on a représenté pour chaque variété et pour chaque site expérimental la variation relative de b entre 1996 et 1995 (soit $\frac{b_{1996} - b_{1995}}{b_{1995}} \times 100$) en fonction de la variation relative de HI (soit $\frac{HI_{1996} - HI_{1995}}{HI_{1995}} \times 100$) (valeurs tableau n° 14).

La relation est très étroite ($r^2 = 86,00$), ce qui traduit le fait que, pour un type variétal donné, la majeure partie des variations de b est expliquée par la variation de l'indice de récolte.

- Relation entre B et HI

Au contraire de b , B n'est pas influencé par l'indice de récolte (Graphique n° 22) : aucun coefficient de corrélation entre B et HI (par variété ou toutes variétés confondues) n'est significatif. Pour la variété SOISSONS, la valeur de B est proche de 1,8, pour AMI et FORBY elle varie de 1,58 à 1,65.

Au terme de l'analyse des conditions de variation de b et B , on peut formuler quelques conclusions provisoires :

- B est beaucoup moins variable que b , que ce soit entre années ou variétés.
- b est différent selon les variétés. Toutefois, B , bien que moins variable, ne peut être considéré comme identique pour toutes les variétés.
- B semble plus facilement prévisible que b , car il est moins affecté par le climat pendant le remplissage du grain qui affecte l'indice de récolte. Toutefois, l'utilisation de ce ratio pour la prévision des besoins en azote, nécessitera la mise au point de modèles de potentialités de production qui se réfèrent à la biomasse aérienne (MSPA) alors que l'ensemble des références utilisées à ce jour sur blé d'hiver font appel au rendement en grain.

3.3.2.3. Etude des relations entre l'azote absorbé, le rendement et la MSPA

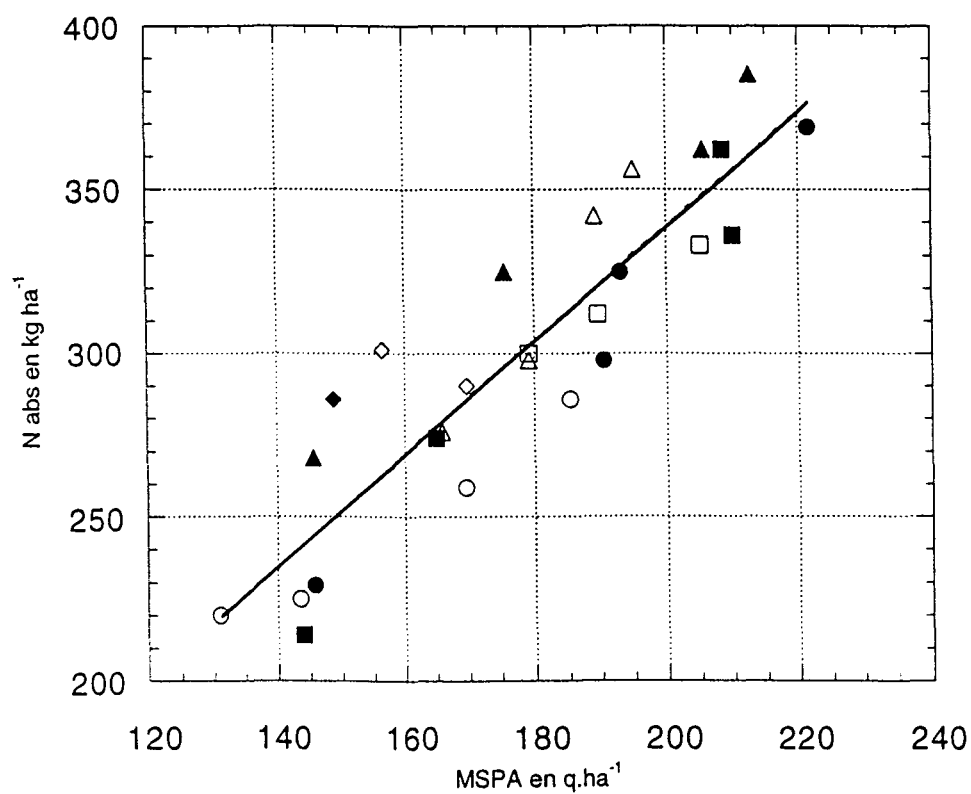
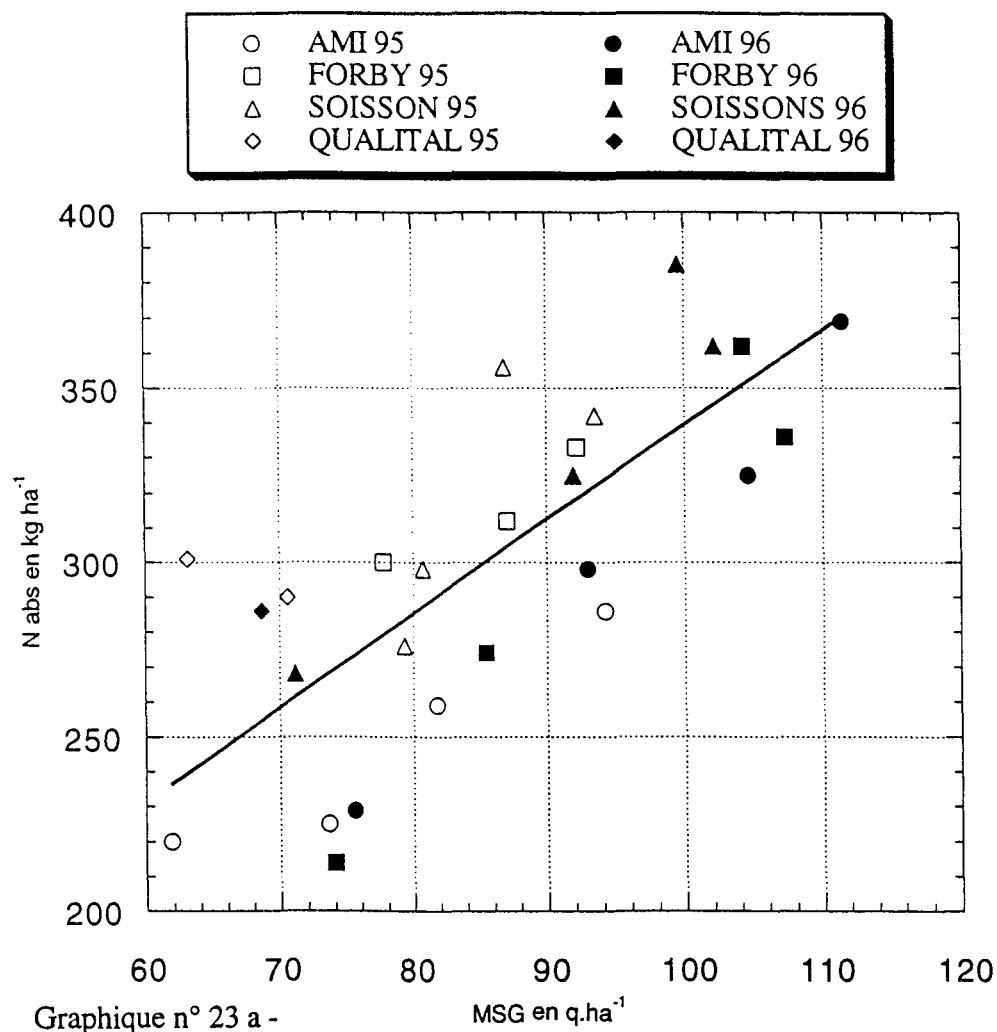
Nous avons, pour l'ensemble des données retenues c'est-à-dire en incluant la variété QUALITAL et les sites de VILLIERS et CUPERLY (14 en 1995 et 13 en 1996) établi les relations statistiques, par ajustement linéaire, entre l'azote absorbé dans la plante entière et la production exprimée, soit en matière sèche des parties aériennes (MSPA), soit en matière sèche grain (MSG).

• L'examen des relations (Tableau n° 15) montre que :

- la variation des quantités d'azote absorbé est toujours mieux corrélée aux variations de la MSPA qu'à celles de la MSG :
 - $r^2 = 76,40 \%$ contre $37,40 \%$ en 1995
 - $r^2 = 84,60 \%$ contre $70,80 \%$ en 1996
 - $r^2 = 81,90 \%$ contre $57,60 \%$ pour les deux années
- les pentes des droites de régression sont plus stables pour MSPA (1,696 en 1995, 1,710 en 1996 et 1,715 pour les deux années) que pour MSG (2,322 en 1995, 3,044 en 1996 et 2,591 pour les deux années)
- les ordonnées à l'origine des relations sont beaucoup plus faibles et proches de 0 pour MSPA que pour MSG, ce qui traduit une plus grande stabilité du ratio B que du ratio b.
 - en 1995, b varie de 4,08 à 3,29 et B de 1,67 à 1,68
 - en 1996, b varie de 3,57 à 3,33 et B reste stable à 1,70
 - pour les deux années, b varie de 3,90 à 3,31 et B de 1,68 à 1,69

1995			
Nabs =	2,322 MSG + 105,96	14 valeurs	$r^2 = 37,40 \%$
Pour	MSG = 60, b = 4,08		*****
	MSG = 110, b = 3,29		
Nabs =	1,696 MSPA - 3,18	14 valeurs	$r^2 = 76,40 \%$
Pour	MSPA = 125, B = 1,67		*****
	MSPA = 225, B = 1,68		
1996			
Nabs =	3,044 MSG + 32,06	13 valeurs	$r^2 = 70,80 \%$
Pour	MSG = 60, b = 3,57		*****
	MSG = 110, b = 3,33		
Nabs =	1,710 MSPA - 1,18	13 valeurs	$r^2 = 84,60 \%$
Pour	MSPA = 125, B = 1,70		*****
	MSPA = 225, B = 1,70		
1995 + 1996			
Nabs =	2,591 MSG + 79,00	27 valeurs	$r^2 = 57,60 \%$
Pour	MSG = 60, b = 3,90		*****
	MSG = 110, b = 3,31		
Nabs =	1,715 MSPA - 4,34	27 valeurs	$r^2 = 81,90 \%$
Pour	MSPA = 125, B = 1,68		*****
	MSPA = 225, B = 1,69		

Tableau n° 15 - Equations des ajustements entre l'azote contenu dans la plante entière à la récolte (N_{abs}) et la matière sèche du grain d'une part (MSG) ou la matière sèche des parties aériennes d'autre part (MSPA).



Relation entre l'azote absorbé et : - la MSG à la récolte : 23 a
- la MSPA à la récolte : 23 b

• par ailleurs l'examen des graphiques n° 23a et 23b montre que les résidus de la relation $N_{abs} = f(MSG)$ sont moins bien répartis que ceux de la relation $N_{abs} = f(MSPA)$:

- Dans le premier cas (23a), à l'exception de la variété AMI, toutes les valeurs 1995 sont au-dessus de la relation alors que celles de 1996 sont majoritairement en dessous.
- Dans le second (23b), les valeurs se répartissent également de chaque côté de la relation. On peut toutefois noter que l'ensemble des valeurs de AMI sont au-dessous et celles de SOISSONS au-dessus.

L'ensemble des résultats est consigné dans l'annexe n° 2.

3.3.2.4. Test des trois modèles d'estimation des besoins

L'étude des résultats du réseau ITCF suggère que l'on pourrait espérer une prévision des besoins en azote plus précise en utilisant un objectif de MSPA, plutôt que l'objectif de rendement classique. Cependant, ceci suppose de vérifier la stabilité des relations susceptibles d'être utilisées, sur des données issues d'autres régions et d'autres années.

3.3.2.4.1. Modèles testés

Les modèles testés sont les suivants :

- le modèle MSG : $N_{abs} = 2,591 \text{ MSG} + 79,00$
- le modèle proposé par COÏC (1956) :

$$N_{abs} = 3 \times \text{rendement à } 15 \% \text{ d'humidité}$$
 soit
$$N_{abs} = 3,529 \text{ MSG}$$
- le modèle MSPA : $N_{abs} = 1,715 \text{ MSPA} - 4,34$

3.3.2.4.2. Données disponibles

Les données retenues pour tester ces modèles proviennent d'expérimentations doses d'azote conduites en Lorraine pendant les années 1992 à 1996 et en Poitou-Charentes en 1993 et 1994. Sur l'ensemble de ces essais (82 au total), les quantités d'azote absorbé à l'optimum de la courbe de réponse à l'azote de la MSPA et la MSG ont été déterminées selon la méthode décrite aux chapitres 3.2.2.2. et 3.2.2.3. L'ensemble des résultats est consigné dans l'annexe n° 3.

3.3.2.4.3. Méthode de comparaison des modèles

Pour chaque résultat élémentaire, nous avons calculé la quantité d'azote contenue dans la plante entière prévue par chacun des modèles, puis nous l'avons confronté à la valeur réellement observée. La comparaison se fait graphiquement et par le calcul de l'erreur quadratique moyenne (MSE), le meilleur modèle étant celui pour lequel la valeur de la MSE est la plus faible (WALLACH et GOFFINET, 1987) :

$$MSE = \frac{\sum (N_p - N_{mes})^2}{n} \text{ en } (kg \text{ N.ha}^{-1})^2$$

N_p = valeur prévue par le modèle en $kg \text{ N.ha}^{-1}$

N_{mes} = valeur mesurée en $kg \text{ N.ha}^{-1}$

n = nombre de données testées

		Expérimentations azote Lorraine					Expérimentation azote Poitou-Charentes		Lorraine	PC	Total	
Modèle	Année	1992	1993	1994	1995	1996	1996	1993	1994	5 années	2 années	5 années
	Nombre	6	5	5	18	14	19	10	5	67	15	82
MSG		2409	1971	809	2694	2135	2098	668	230	2188	522	1883
MSPA		677	411	197	952	147	554	291	298	550	293	503
COïC		1783	851	406	618	1099	1364	507	405	1036	473	933

Modèles de prévision des besoins en azote

Modèle MSG : $N_{abs} = 2,591 \text{ MSG} + 79,00$

Modèle MSPA : $N_{abs} = 1,715 \text{ MSPA} - 4,34$

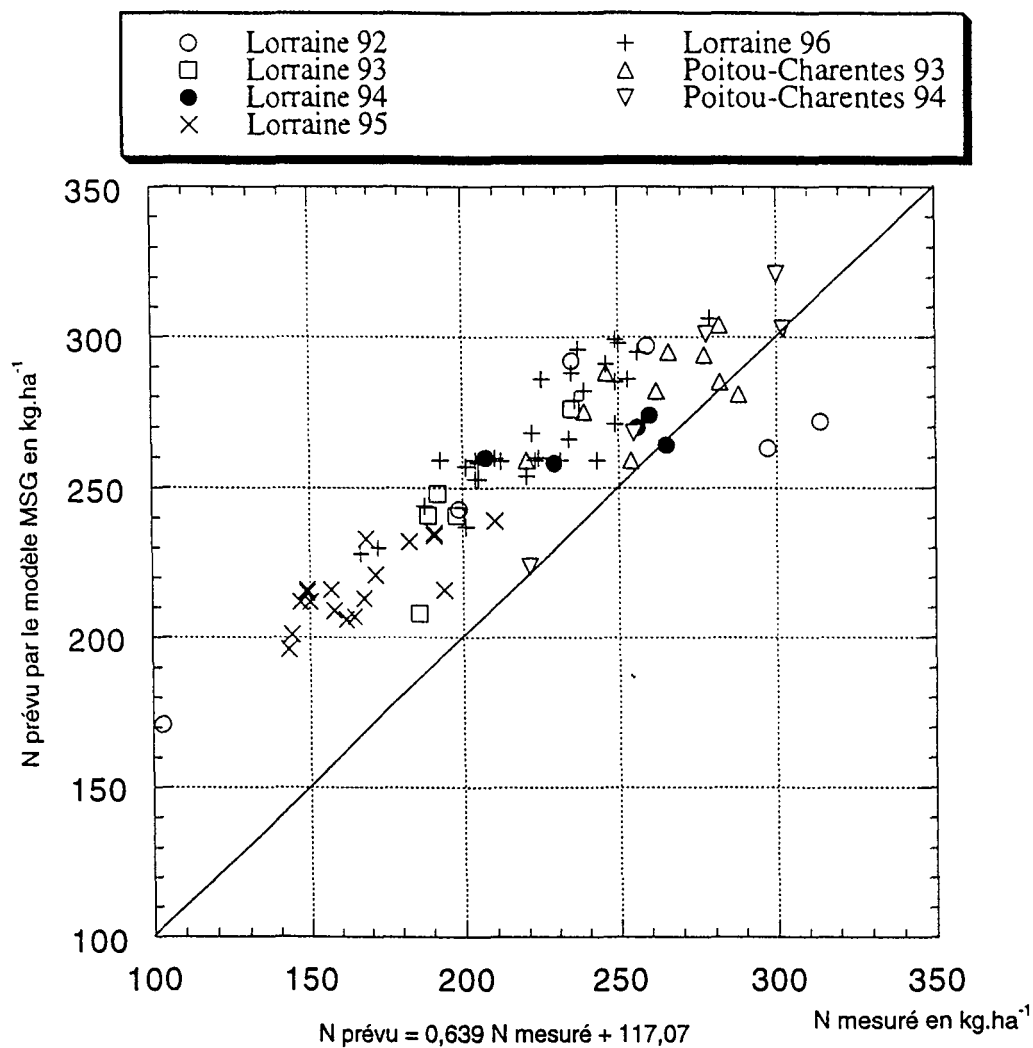
Modèle COÏC : $N_{abs} = 3,529 \text{ MSG}$

Tableau n° 16 - Valeurs des MSE pour les trois modèles de prévision des quantités d'azote absorbé

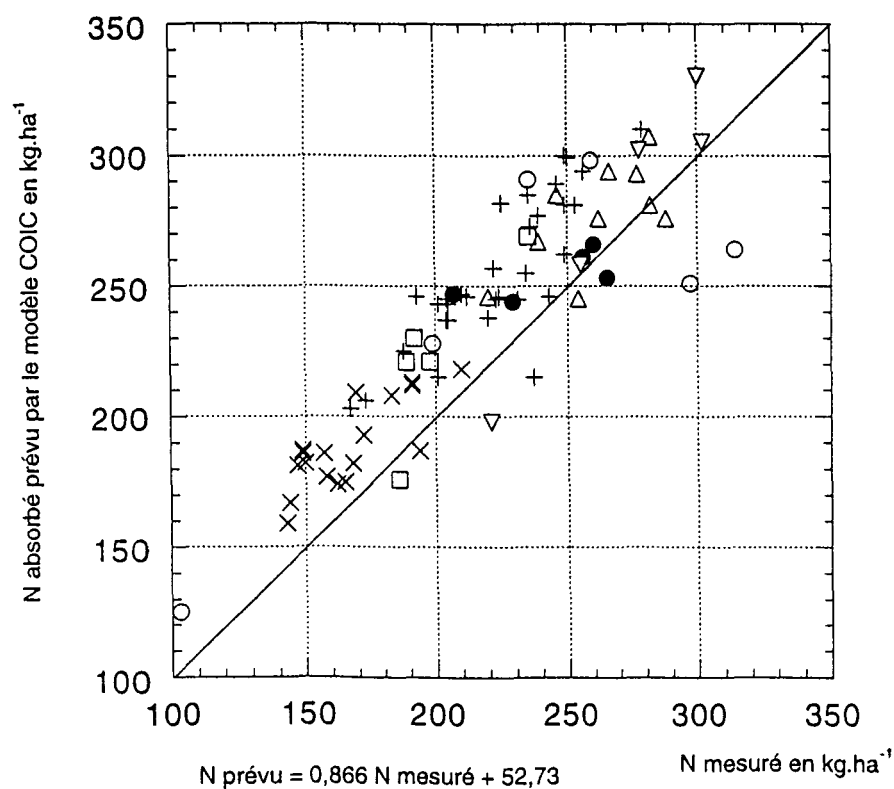
3.3.2.4.4. Résultats des tests

Les erreurs quadratiques moyennes sont consignés dans le tableau n° 16. Les calculs ont été réalisés pour chaque année dans les deux régions, par région pour l'ensemble des années (67 résultats sur 5 années en Lorraine et 15 résultats sur 2 années en Poitou-Charentes), et enfin régions et années confondues.

Les résultats des comparaisons visuelles valeur prévue/valeur observée font l'objet des graphiques n° 24, 25 et 26. Pour plus de précision dans la comparaison, nous avons calculé l'équation de régression entre les valeurs prévues et mesurées, puis à partir de cette équation, les valeurs correspondant aux valeurs extrêmes et moyennes réellement mesurées, soit 150 kg N.ha^{-1} et 300 kg N.ha^{-1} pour les extrêmes et 220 kg N.ha^{-1} pour les moyennes.



Graphique n° 24 - Test du modèle MSG



Graphique n° 25 - Test du modèle COIC

• Modèle MSG

Hormis les résultats Poitou-Charentes 1994, les valeurs de MSE issues du modèle MSG, sont toujours les plus élevées. La quasi totalité des valeurs prévues est supérieure aux valeurs mesurées (graphique n° 24). D'après l'examen des valeurs obtenues à partir de l'équation de régression $N \text{ prévu} = 0,639 N \text{ mesuré} + 117,07$, pour les valeurs minimales (150 kg N.ha^{-1}), le modèle surestime les besoins en azote de 63 kg N.ha^{-1} (Tableau n° 17).

Valeurs mesurées	Valeurs prévues	Valeurs prévues - valeurs mesurées
Mini : 150	213	+ 63
Moyenne : 220	258	+ 38
Maxi : 300	309	- 9

Tableau n° 17 - Comparaison des valeurs d'azote absorbé en kg.ha^{-1} , prévues et mesurées (mini, moyenne et maxi) pour le modèle MSG.

Valeurs mesurées	Valeurs prévues	Valeurs prévues - valeurs mesurées
Mini : 150	182	+ 32
Moyenne : 220	243	+ 23
Maxi : 300	312	+ 12

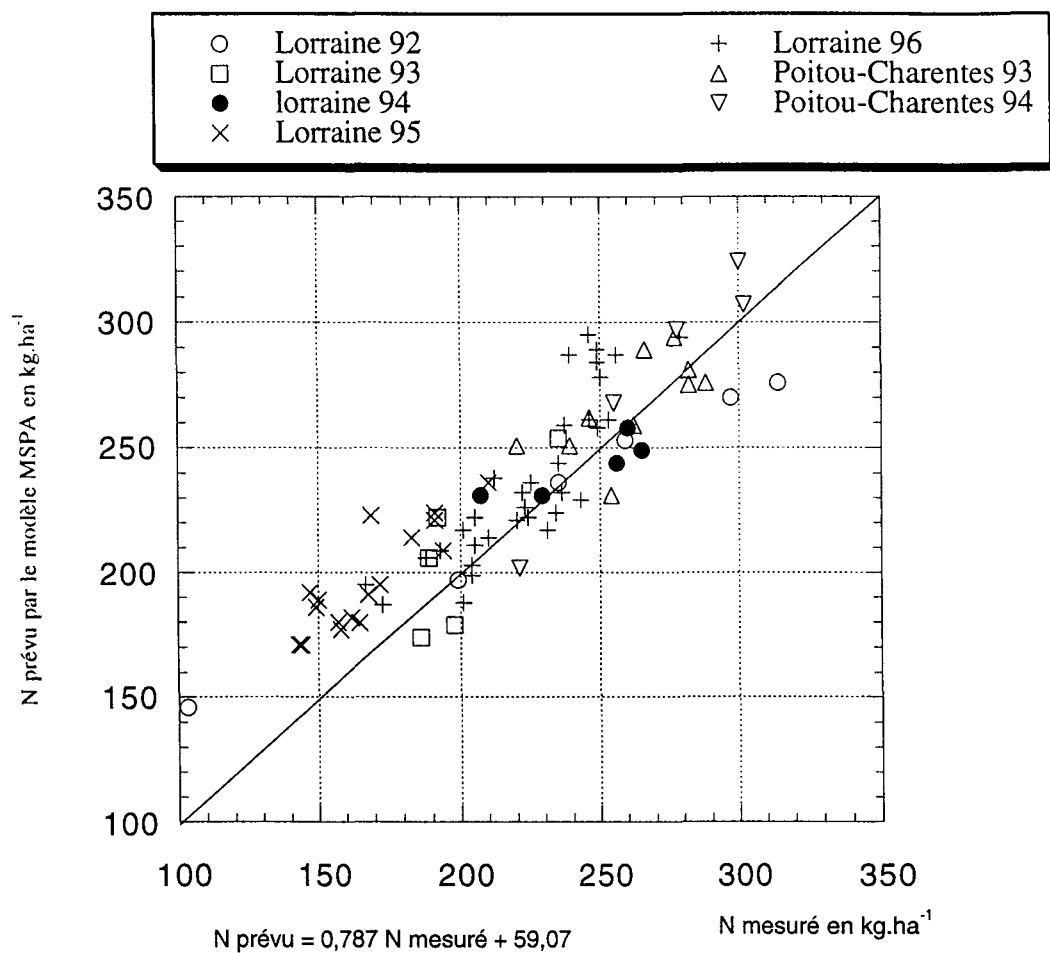
Tableau n° 18 - Comparaison des valeurs d'azote absorbé en kg.ha^{-1} , prévues et mesurées (mini, moyenne et maxi) pour le modèle COÏC.

Valeurs mesurées	Valeurs prévues	Valeurs prévues - valeurs mesurées
Mini : 150	177	+ 27
Moyenne : 220	232	+ 12
Maxi : 300	296	- 5

Tableau n° 19 - Comparaison des valeurs d'azote absorbé en kg.ha^{-1} , prévues et mesurées (mini, moyenne et maxi) pour le modèle MSPA.

• Modèle COÏC

Pour ce modèle, la valeur de la MSE est plus faible que pour le modèle MSG. Mais la grande majorité des valeurs prévues est supérieure aux valeurs mesurées (graphique n° 25).



Graphique n° 26 - Test du modèle MSPA

Le tableau n° 18 montre toutefois que les écarts entre les valeurs prévues et mesurées, calculées à partir de l'équation : $N \text{ prévu} = 0,866 N \text{ mesuré} + 52,73$, sont moins grands que pour le modèle MSG.

• **Modèle MSPA**

Pour le modèle MSPA, la valeur de la MSE est la plus faible (503) et le graphique n° 26 montre une bien meilleure répartition des valeurs autour de la bissectrice.

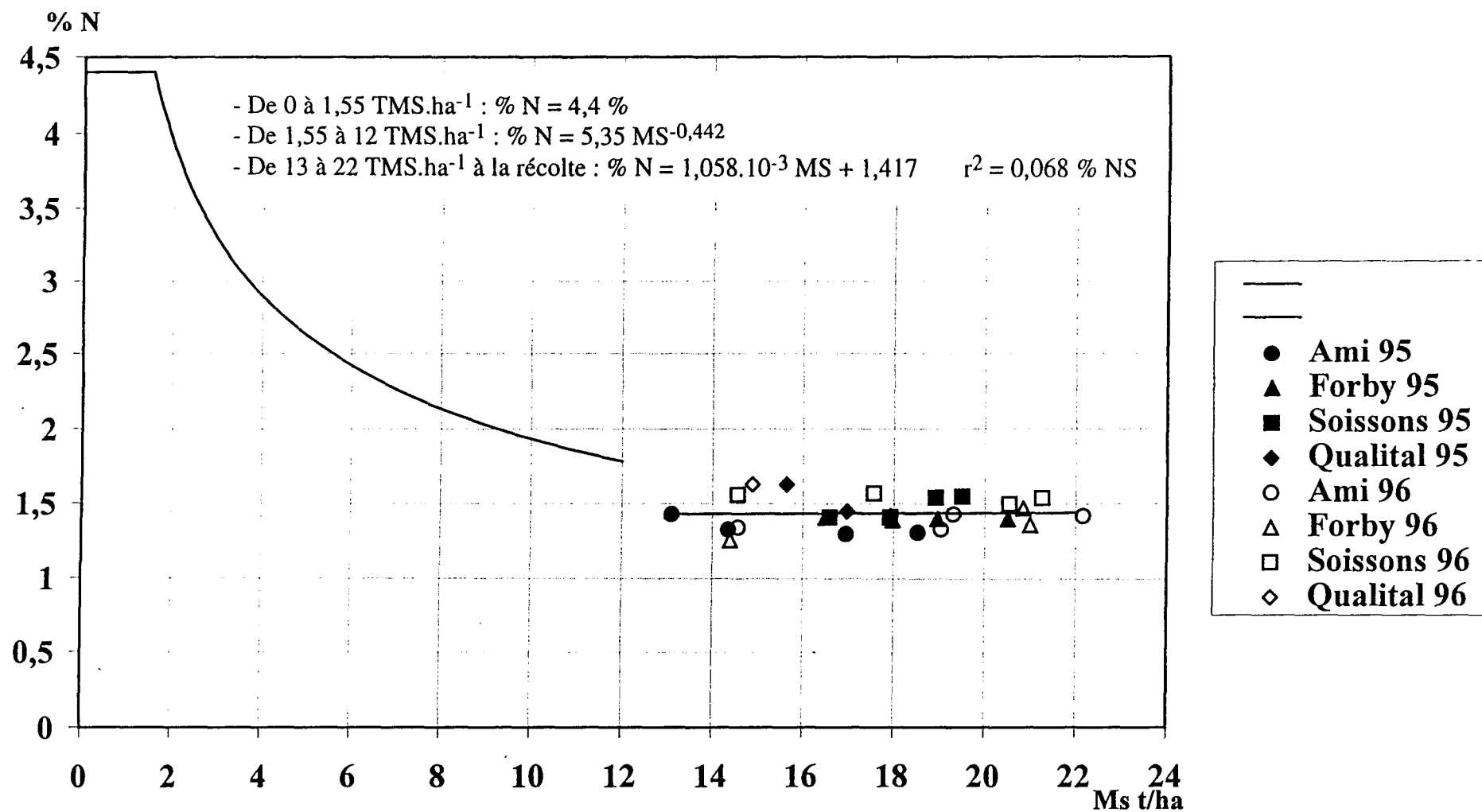
La valeur moyenne prévue, calculée à partir de l'équation $N \text{ prévu} = 0,787 N \text{ mesuré} + 59,07$ se rapproche de la valeur moyenne mesurée mais on observe encore une légère surestimation des quantités prévues par le modèle pour les faibles valeurs mesurées (Tableau n° 19)

3.3.2.5. Discussion partielle

Nous avons mis en évidence une grande variabilité du b , liée entre autres à des différences variétales. Alors qu'actuellement la valeur de 3 kg N.q^{-1} est utilisée, quelle que soit la variété, une amélioration possible consisterait à proposer des valeurs de b modulées selon le type variétal. Un travail de typologie est actuellement en cours à l'ITCF qui devrait permettre de prévoir la valeur la plus probable de b en fonction du groupe variétal, valeur pouvant varier de 2,8 pour les variétés du type AMI à 3,5 pour celles du type QUALITAL (Document interne, ITCF).

Toutefois, cette démarche, même si elle constitue un progrès indiscutable, risque de se heurter à deux types de problèmes :

- Dans les mêmes conditions pédoclimatiques, les variétés pour lesquelles la valeur du ratio b est la plus faible sont généralement celles qui ont une valeur de HI et donc du rendement en grain la plus élevée. Dans ces conditions, si on admet une modulation de la valeur de b , on est conduit à accepter une modulation de la valeur de l'objectif de rendement : à de faibles valeurs de b seraient associées des valeurs de Y plus élevées et inversement.
- Pour une même variété, l'indice de récolte (HI) peut varier considérablement selon les conditions climatiques de l'année. Le niveau du rayonnement pendant le mois qui précède l'anthèse explique bien les variations du nombre de grains par épi, donc pour un nombre d'épis donné, le poids de grain par épi ; ce facteur rayonnement serait donc également explicatif des variations de HI (FISCHER et STOCKMAN, 1980 ; FISCHER, 1985). Par ailleurs, les conditions de température pendant le remplissage du grain peuvent également jouer un rôle important, les faibles températures favorisant l'augmentation du poids du grain en augmentant la durée du remplissage, donc l'interception du rayonnement et au total la valeur de l'indice de récolte (GIRARD, 1997). Il nous faut donc admettre, qu'au



Graphique n° 27 - Relation entre la teneur en azote à l'optimum de la courbe de réponse et la production de matière sèche à la récolte. Positionnement des résultats par rapport à la courbe de teneur en azote critique établie par JUSTES (1995).

total une prévision plus fiable des besoins en azote, à partir du rendement en grain et du ratio b , ne pourra pas faire l'économie d'une complication du référentiel sur les valeurs de b , intégrant le type variétal, les conditions climatiques probables et le choix des objectifs de rendement.

Une autre façon d'estimer les besoins en azote consiste à prendre en compte, non plus le seul rendement en grain, mais le rendement en matière sèche totale des parties aériennes. On peut d'ailleurs s'étonner que le calcul des besoins se soit jusqu'à maintenant effectué à partir de la seule partie marchande de la récolte, alors que les modèles mécanistes qui simulent la croissance à pas de temps journalier calculent d'abord le niveau de matière sèche à la récolte, et ensuite le rendement en grain par le biais d'une estimation de l'indice de récolte.

En moyenne, on a montré que le ratio B est plus stable que b . Il est sensiblement différent selon les groupes variétaux, mais moins que b et semble indépendant des conditions climatiques qui modifient l'indice de récolte. De plus, à l'inverse de b , il est relativement stable pour la gamme des valeurs de MSPA étudiées. La corrélation entre la teneur en azote de la biomasse à la récolte, et la quantité de matière sèche produite n'est pas significative :

La valeur moyenne s'établit à 1,689 % $r^2 = 0,068$ % NS

Ce résultat peut sembler a priori en contradiction avec un certain nombre de connaissances acquises qui montrent que, généralement, la teneur en azote critique de la biomasse (teneur minimale au-delà de laquelle la production n'augmente plus) diminue quand celle-ci augmente (LEMAIRE et SALETTE, 1984 ; JUSTES *et al.*, 1994 ; PLENET, 1995 ; LEMAIRES *et al.*, 1995 ; LEMAIRES *et al.*, 1996 ; RAHN, 1995 ; GRINDLAY *et al.*, 1995).

En réalité la contradiction n'est qu'apparente car, dans les études précitées, la modélisation de la teneur en azote est généralement limitée aux phases végétatives. Des travaux conduits sur légumineuses, pour lesquels les mesures étaient effectuées jusqu'à la fin de la période de remplissage des grains, montrent qu'à partir de la floraison, la teneur en azote reste stable (NEY *et al.*, 1996), l'accumulation d'azote dans les organes reproducteurs à haute teneur contrebalançant la diminution de la teneur en azote des feuilles et des tiges. Ce type de fonctionnement a également été mis en évidence sur maïs (PLENET, 1995) : tant qu'il n'y a pas d'organes en remplissage, on est dans le domaine de validité de la courbe de teneur en azote critique, au-delà, on observe une constance de la teneur en azote. Dans ces conditions, il n'est pas anormal de constater une teneur en azote stable pour le blé à la récolte, quel que soit le niveau de matière sèche, puisque cette teneur est toujours mesurée en fin de période de grossissement du grain. On peut d'ailleurs vérifier que la valeur que nous proposons (1,7 kg N.q⁻¹) est tout à fait cohérente avec l'extrapolation de la courbe proposée par JUSTES en 1993

(limitée à 12 T.MS.ha⁻¹ et à la floraison du blé) alors que nos résultats "récoltes" s'échelonnent de 13 à 22 T MS.ha⁻¹ (graphique n° 27).

3.4. DISCUSSION GÉNÉRALE

La prévision des besoins en azote du blé, lorsqu'elle fait l'objet d'une recherche, est le plus généralement réalisée à partir d'une estimation du rendement en grains. On a vu que, selon les types de sols, certains indicateurs comme le déficit climatique pouvaient rendre compte des variations observées avec plus ou moins de pertinence. Il reste toutefois un certain nombre de problèmes posés par ce type d'approche.

Dans le cas des sols à cailloux, l'ensemble des variations de rendement observées est bien expliqué par le déficit climatique, mais ce dernier n'est pas prévisible à l'époque où on calcule les besoins de la culture. Aussi, ces types de sol apparaissent très variables quant à leurs potentialités.

De ce fait, le calcul prévisionnel des doses d'azote est délicat à réaliser et les situations où cette dose est excédentaire par rapport aux besoins réels du blé sont fréquentes. Dans ces conditions, les risques de lixiviation au-delà du système racinaire, généralement limité en profondeur, sont grands.

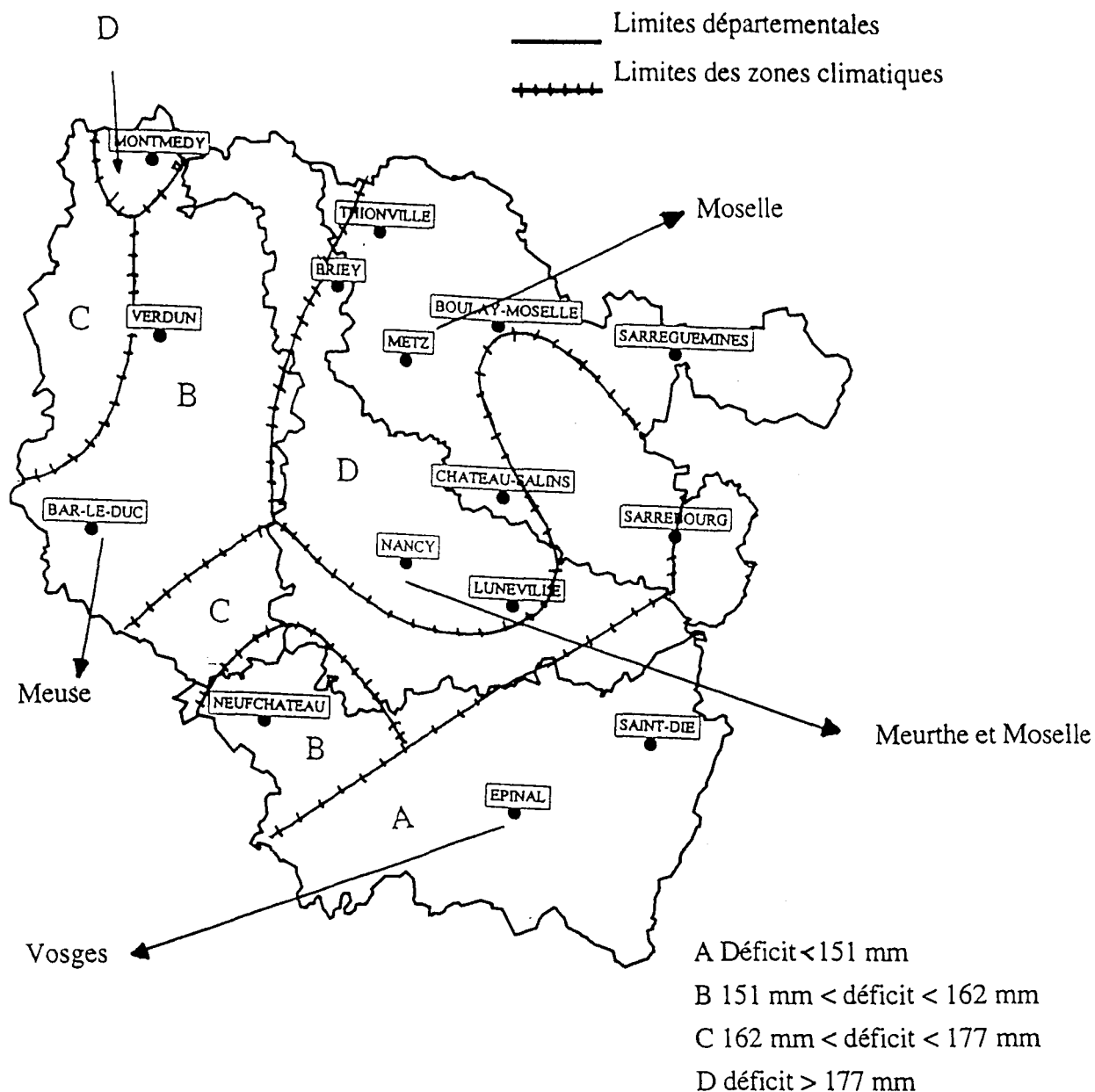
Ce sont donc, selon la grille proposée par SEBILLOTTE et MEYNARD en 1990 des sols à risques, pour lesquels on ne peut valablement raisonner l'objectif de rendement qu'en terme de probabilité : l'analyse fréquentielle de la valeur du déficit climatique permet ce type d'approche. Le classement des valeurs sur les 40 dernières années permet de déterminer le niveau atteint 1 année sur 5, 1 année sur 2, 4 années sur 5 ou 9 années sur 10 par exemple.

En utilisant les modèles présentés au chapitre 3.3.1.2. (Graphiques n° 7 à 16). on peut alors calculer les rendements correspondants et choisir un objectif de rendement assorti d'une probabilité d'être atteint.

Mais, la variabilité interannuelle du déficit climatique n'est pas la seule à prendre en compte : il existe également une variabilité spatiale importante générée par des microclimats dont l'origine est le plus souvent expliquée par les modifications du relief et de l'altitude.

POSTE	Q1	M	Q4	D9
BADONVILLER	77.45	129.85	177.1	201.7
REMIREMONT	65.6	130.2	179.2	196.6
BROUVELIEURES	80.4	135.05	175.9	194.7
BACCARAT	89.2	143.1	200.3	207.0
TRESSANGE	118.3	144.2	202.4	218.2
ROVILLE-AUX-CHENES	88.3	146.6	205.3	244.1
CHAUMOUSEY	91.8	147.8	194.6	230.2
GOLBEY	79.6	148.1	183.2	195.0
LAMARCHE	125.0	149.4	209.5	221.1
ERNEVILLE-AUX-BOIS	103.35	150.15	198.55	223.3
LONGUYON	115.4	151.6	197.4	226.9
CHAUMONT-SUR-AIRE	105.2	152.6	205.5	235.2
SAUDRUPT	108.6	153.6	192.1	199.0
VITTEL	100.5	156.4	202.8	222.5
NEUFCHATEAU	106.45	156.7	211.0	225.1
BULLIGNY	107.8	156.8	210.2	244.5
VIGNEULLES-LES-HATTONCHATEL	116.9	157.15	212.35	240.35
MAXEY-SUR-VAISE	122.05	157.2	213.9	227.8
DANNE-ET-QUATRE-VENTS	103.1	157.45	211.1	232.2
JAMETZ	127.4	158.0	217.0	227.7
LIGNY-EN-BARROIS	100.9	160.05	198.3	223.8
BAINS-LES-BAINS	94.3	161.1	190.2	204.3
BRAS-SUR-MEUSE	114.1	161.8	198.15	203.0
GONDRECOURT-LE-CHATEAU	106.5	165.65	213.0	224.8
CHARMES	129.5	165.8	205.6	219.9
GONDREXANGE	115.2	166.85	217.7	241.8
VAUCOULEURS	122.8	167.0	223.1	243.6
MITTERSHEIM	128.15	168.9	209.45	229.9
COURCELLES-CHAUSSY	139.0	169.5	220.1	248.7
ROSIERES-EN-HAYE	133.1	170.25	215.2	261.9
PRAYE	133.9	170.4	226.0	246.1
OCHEY-THUILLEY	128.15	170.45	200.75	245.85
FAULQUEMONT	130.6	172.6	206.4	249.6
CLERMONT -EN-ARGONNE	123.25	172.7	228.8	250.0
TOUL	144.0	175.2	225.8	279.4
BRIZEAUX	124.2	176.6	213.3	242.9
MONTMEDY	129.6	178.15	208.9	225.6
DAMVILLERS	126.25	178.3	220.05	230.65
ESSEY-ET-MAIZERAIS	140.8	180.1	248.6	263.0
TOMBLAINE	145.8	181.9	230.1	270.1
CHATEAU-SALINS	153.25	184.4	218.1	248.3
AMNEVILLE	124.7	186.2	232.2	273.9
LUNEVILLE	126.5	192.55	227.6	248.8
KAPPELKINGER	159.3	192.55	235.55	263.05
METZ	141.6	193.55	246.6	270.9
METZERVISSE	138.6	201.9	238.5	260.6

Tableau n° 20 - Valeur du premier quintile, médiane, quatrième quintile et neuvième décile pour le déficit climatique cumulé du 1er mars au 20 juillet sur 46 postes météo en Lorraine



Carte n° 1 :

Cartographie de la valeur médiane du déficit climatique cumulé au 20 juillet en Région Lorraine.

Blé d'hiver

Conséquences pour le rendement accessible au moins une année sur deux pour un même sol à cailloux du plateau de Haye (sol n° 2, graphique n° 7 et chapitre 3.3.1.2.2.) selon qu'il est situé

- à proximité de Metz (zone D) : $76,2 \text{ q.ha}^{-1}$
- à proximité de Lamarche (zone A) : $81,9 \text{ q.ha}^{-1}$

Il y a donc nécessité de spatialiser ces études fréquentielles. Nous avons réalisé ce travail sur 46 postes climatiques en région Lorraine (Tableau n° 20) et nous avons calculé les valeurs du premier quintile (Q1), de la médiane (M), du 4ème quintile (Q4) et du neuvième décile (D9) pour chacun des postes. La mise en carte de ces résultats, traduits en rendements potentiels, permet de bien visualiser les différences (Carte n° 1) selon les secteurs. Aussi, le département des Vosges couvert par les zones A et B permet en moyenne l'obtention de rendements plus élevés que dans le reste de la région (à sols équivalents et systèmes de culture identiques). C'est pourtant le département lorrain où les rendements de référence sont les plus faibles !

Ce type d'outils est actuellement utilisé dans les secteurs Ferti Mieux et dans le cadre des mesures de réduction d'intrants pour calculer des objectifs de rendement susceptibles d'être atteints assez régulièrement. Par exemple, le choix d'un objectif accessible une année sur deux, accompagné d'un calcul précis de la dose d'azote ne génère une augmentation des reliquats en azote à la récolte qu'une année sur deux, ce qui représente un progrès considérable par rapport à la dose qui permet le rendement maximum, mais également, compte tenu du peu de chance d'être atteint, le risque maximum d'augmentation du reliquat azoté.

La mise au point d'un certain nombre d'outils de pilotage ainsi que les connaissances acquises sur les possibilités d'absorption tardives de l'azote (BOUCHARD, 1997 ; GIRARD, 1997) ouvre une voie d'amélioration possible à l'utilisation de ces modèles : on pourrait choisir un objectif de rendement accessible 4 années sur 5, et réaliser les deux premiers apports (reprise de végétation et stade épi 1 cm). Pour satisfaire cet objectif, l'observation ultérieure de la pluviométrie couplée à l'utilisation de tests de nutrition de jus de base de tiges (à condition toutefois de l'adapter aux terres à cailloux en situations sèches) permettrait alors de décider d'un troisième apport susceptible de générer un rendement accessible 1 année sur 2 ou 1 année sur 5 par exemple.

Dans le cas des sols argileux ou limoneux, nous avons pu mettre en évidence que le déficit climatique n'est pas l'indicateur le plus pertinent pour rendre compte des variations de rendement, les réserves utiles de ce type de sol étant souvent importantes (de l'ordre de 200 mm). En l'absence d'autres facteurs limitants, les rendements potentiels se situent le plus souvent entre 90 et 100 q.ha⁻¹. Toutefois, on a vu que les écarts à ces niveaux potentiels peuvent être importants et nous avons déjà discuté de l'importance des conditions de semis (date et densité), et de l'excès d'eau hivernal. Une amélioration de la prévision de l'objectif de rendement dans ces conditions pourrait être envisagée, à condition de pouvoir quantifier l'incidence de ces différents facteurs sur le rendement final.

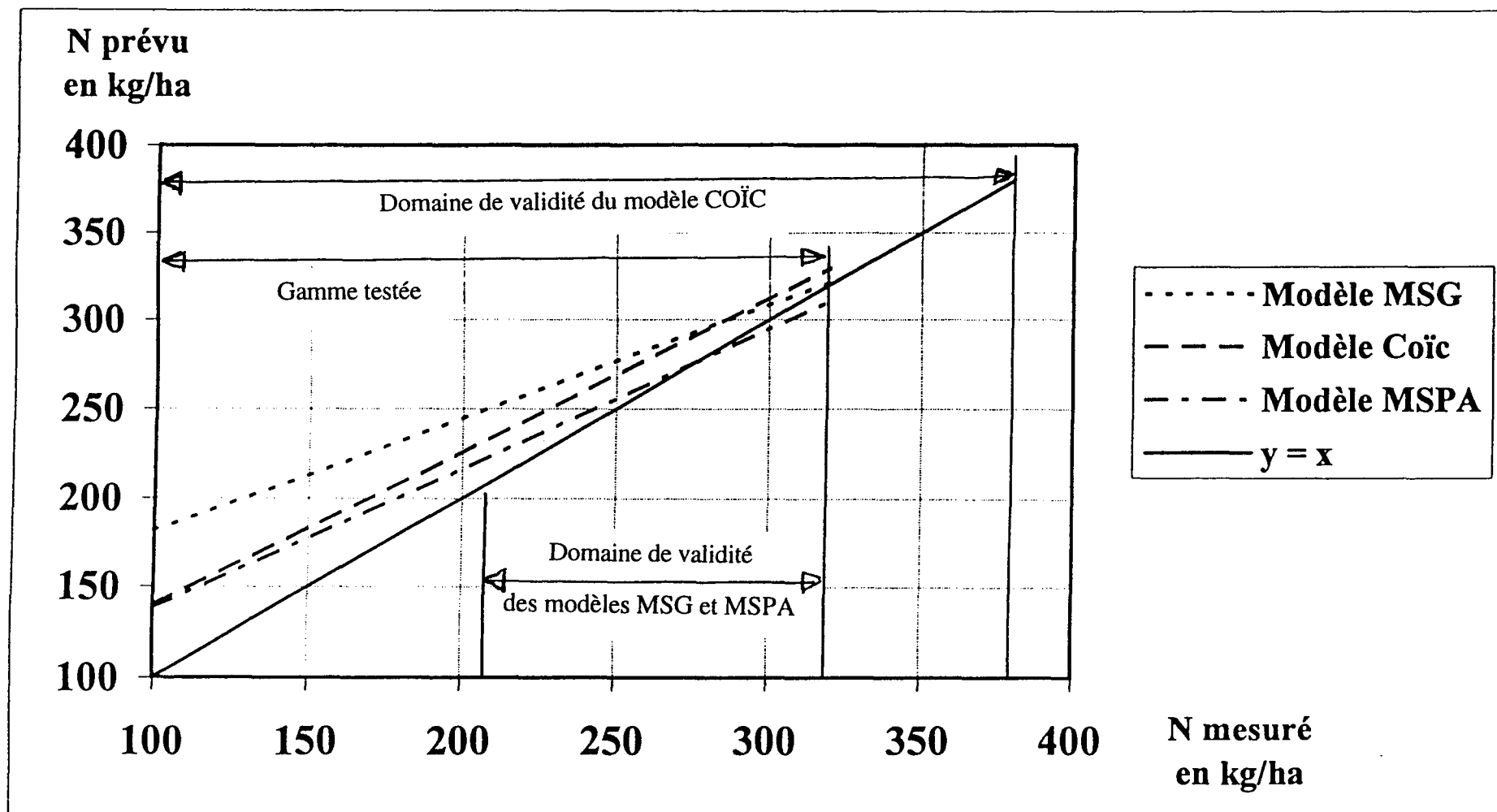
Une autre possibilité consisterait à faire l'hypothèse que l'ensemble de ces facteurs limitants, bien avant d'affecter le rendement final, ont une répercussion importante sur certains états de croissance intermédiaires du peuplement, en particulier en fin de tallage. La matière sèche des

Graphique n° 28 - Relations entre les quantités d'azote prévues et mesurées pour les 3 modèles testés

Modèle MSPA : $N \text{ prévu} = 0,787 N \text{ mesuré} + 59,07$

Modèle MSG : $N \text{ prévu} = 0,639 N \text{ mesuré} + 117,07$

Modèle COİC : $N \text{ prévu} = 0,866 N \text{ mesuré} + 52,73$



parties aériennes au stade épi 1 cm pourrait ainsi se révéler être un indicateur précieux qui rendrait compte à la fois des conditions de croissance (température, excès d'eau, accidents de structure), de la durée de la phase levée jusqu'à ce stade (MEYNARD, LIMAUX, 1987), et de la densité de peuplement. On sait par ailleurs qu'elle est un bon prédicteur du nombre d'épis potentiels (MASLE, 1985 ; MEYNARD, 1985), donc du nombre de grains par m² et du rendement potentiel. Ainsi des modèles simples reliant le rendement en grain à la MSPA 1 cm mesurée, pourraient dans le cas des sols relativement insensibles au déficit climatique, constituer un réel progrès en matière de révision en cours de campagne des objectifs de rendement prévisionnels.

Une autre piste s'avère prometteuse pour mieux prévoir les besoins en azote du peuplement : l'utilisation du ratio B. Il serait bien sûr intéressant de valider ces résultats sur d'autres variétés et sur des sites plus nombreux. D'ores et déjà le test des modèles mis au point confirme son intérêt pour une prévision plus fiable des besoins en azote, même si les tests ont été effectués sur une gamme de valeurs qui s'écartaient nettement de la gamme des valeurs ayant servi à construire les modèles (Graphique n° 28). Le problème qui reste alors posé est celui de la prévision de la matière sèche. On peut, comme pour le rendement en grain, imaginer des modèles qui prennent en compte le déficit climatique pour les sols sensibles au déficit hydrique, ou la MSPA au stade épi 1 cm pour les sols à forte réserve utile. Plus globalement, on pourrait imaginer un modèle empirique qui associe la satisfaction des besoins en eau $\left(\frac{ETR}{ETM}\right)$ et l'état de croissance au stade épi 1 cm, ou encore des modèles mécanistes déjà cités (cf chapitre 2.4.1.4.) à l'intérieur desquels différents sous modèles permettent de prévoir la MSPA à la récolte.

Bien sûr, ces modèles ne feront pas l'économie des études fréquentielles déjà précitées, mais sous l'hypothèse de l'adoption d'une valeur moyenne standard pour B, justifiée par le peu de variation observée entre niveau de production et entre années (1,7 kg N.q⁻¹), on pourrait déboucher sur une quantité d'azote absorbable à la parcelle, l'incidence de la variété et du rendement en grain potentiellement accessible devenant alors un problème secondaire.

CHAPITRE 4

PREVISION DES FOURNITURES EN AZOTE DU SOL

4.1. INTRODUCTION

Après avoir décrit les différentes expérimentations et les conditions de leur mise en oeuvre, nous nous attacherons dans ce chapitre à :

- Evaluer, et si possible, améliorer les différents modèles d'estimation du terme Po de l'équation d'efficacité de l'engrais.
- Analyser les principaux facteurs de variation du poste "minéralisation de l'humus", et évaluer les modèles disponibles pour l'estimer.

Nous discuterons ensuite de la valeur prédictive des différents modèles en suggérant des voies d'amélioration issues de nos observations.

4.2. MATERIELS ET METHODES

4.2.1. ETUDES AU CHAMP

Les études au champ ont été réalisées sur des placettes non fertilisées en azote issues soit du réseau OPAL (cf 3.2.1.1.), soit des expérimentations "doses croissantes d'azote" (cf 5.2.1.1.). Au total 23 sites ont été suivis (14 en 1995 et 9 en 1996). Les caractéristiques physico-chimiques et les renseignements sur le système de culture sont présentés dans le tableau n° 21.

Site	Argile en ‰	Calcaire en ‰	Azote en ‰	Précédent	Devenir des résidus de récolte	CRF
1	527	122	3,2	colza	enfouis	1,2
2	530	126	2,0	colza	enfouis	1,2
3	574	237	1,9	colza	enfouis	1,2
4	646	42	2,3	colza	enfouis	1,2
5	359	20	1,7	colza	enfouis	0,9
6	467	0	2,8	colza	enfouis	0,9
7	504	0	2,4	colza	enfouis	0,9
8	440	0	2,7	colza	enfouis	0,9
12	384	0	1,6	colza	enfouis	0,9
13	433	363	2,4	colza	enfouis	0,9
14	425	48	1,7	orge hiver	exportés	1,0
15	294	0	1,6	colza	enfouis	1,1
17	416	76	1,8	prairie permanente		0,8
18	193	0	1,6	maïs	exportés	1,0
19	332	0	1,6	maïs	exportés	1,0
20	370	12	1,7	orge hiver	exportés	1,0
21	200	0	1,3	maïs	exportés	1,0
22	319	0	1,2	pois	enfouis	1,0
23	453	198	2,0	blé	exportés	0,8
24	601	0	4,0	colza	enfouis	0,8
25	309	39	1,2	blé	exportés	1,2
26	366	0	2,5	blé	exportés	1,2
27	228	0	1,2	blé	exportés	1,2

Tableau n° 21 - Caractéristiques physico-chimiques et systèmes de culture des parcelles étudiées.

4.2.1.1. Dispositifs

- Sur le réseau OPAL : la placette non fertilisée représente 1/4 de la station, soit une demi rampe de pulvérisation (en général 12 m) sur 10 m de long. De plus, les stations du réseau faisant l'objet d'un suivi pluriannuel, l'emplacement du témoin non fertilisé change chaque année de telle façon qu'il se situe toujours derrière un précédent ayant reçu une fertilisation azotée.
- Sur les expérimentations "doses croissantes d'azote", on utilise les témoins non fertilisés (3 ou 4 selon le nombre de répétitions).

Dans les deux cas, le suivi est effectué sur des dispositifs dont la surface ne dépasse pas 250 m² et pour lesquels on s'est assuré de l'homogénéité de la nature du sol en utilisant la méthode de caractérisation mise au point au niveau régional (cf 3.2.1.1.).

4.2.1.2. Mesures

- Dans le sol : la mesure des reliquats en azote minéral a été effectuée à l'ouverture du bilan (dans la plupart des situations, la date du prélèvement était située dans le courant du mois de février) et à la récolte.

Dans chaque site, les prélèvements ont été effectués à la tarière, sur 4 répétitions et à 3 niveaux (0-30 cm, 30-70 cm et 70-120 cm) chaque fois que le type de sol permettait d'atteindre ces profondeurs. Dans les autres cas, les prélèvements ont été effectués jusqu'à la limite de prospection possible à la tarière. Ces résultats ont été recalés en fonction des profondeurs réelles d'enracinement observées sur profils ouverts à la pelle mécanique, juste après la récolte. Les quantités d'azote minéral constituant le reliquat sont alors calculées à partir des résultats du laboratoire (extraction au KCl molaire et dosage colorimétrique) en prenant en compte des densités apparentes établies au niveau régional (FLORENTIN, 1991) et en comptabilisant la totalité de l'azote nitrique et l'azote ammoniacal sur 0-30 cm. Les valeurs de reliquats seront par la suite désignées par :

- RSH (Reliquat Sortie Hiver) pour les mesures à l'ouverture du bilan en kg N.ha⁻¹
- RAR (Reliquats Après Récolte) pour les mesures à la récolte en kg N.ha⁻¹

- Dans la plante : les mesures sont réalisées aux mêmes dates que dans le sol.
 - A l'ouverture du bilan, 4 échantillons de plantes sont prélevés sur 1 mètre linéaire (soit 0,5 à 0,7 m² selon l'écartement entre les rangs). Les racines étant coupées au niveau du plateau de tallage, les parties aériennes sont mises à sécher à 70°C pendant 48 heures afin de déterminer la quantité de matière sèche (MS exprimée en g.m⁻²). La teneur en azote est

ensuite analysée après broyage, par la méthode DUMAS. La quantité d'azote absorbé par la plante entière est alors déterminée de la façon suivante :

$$NSH = MS \times \% N \cdot 10^{-1} \cdot 1,33$$

NSH = Azote absorbé par la plante entière en kg ha⁻¹ à l'ouverture du bilan

MS = Matière sèche des parties aériennes en g/m⁻²

% N = Teneur en azote total en %

1,33 = coefficient permettant de prendre en compte la quantité d'azote contenue dans les racines à ce stade (MEYNARD, 1985).

- A la récolte, les quantités d'azote absorbé par la plante entière sont calculées selon la méthodologie décrite au chapitre 3.2.2.2.

Les valeurs d'azote absorbé en l'absence de fertilisation seront par la suite désignées par :

NSH (azote absorbé sortie hiver) pour les mesures effectuées à l'ouverture du bilan

P₀ pour les mesures effectuées à la récolte

4.2.2. PRÉSENTATION DES MODÈLES UTILISÉS POUR L'ESTIMATION DE LA FOURNITURE DU SOL

Nous avons testé 5 modèles : AZOBIL, AZODYN, SUNDIAL, PC azote et les grilles de prévision Lorraine. Les deux premiers sont des modèles développés par l'INRA, le troisième par l'équipe de recherche du département Science du sol de la Station de recherche de ROTHAMSTED (Royaume Uni), le quatrième par la Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes et la Chambre d'Agriculture de l'Indre, et le cinquième par la Chambre d'Agriculture de Lorraine.

Nous étudierons la valeur prédictive de deux fonctions de ces modèles :

- la fourniture en azote du sol en l'absence d'engrais azoté (sauf pour SUNDIAL)
- la minéralisation de l'humus (sauf pour les grilles de prévision Lorraine)

4.2.2.1. Organisation générale de chaque modèle

a) Modèles non dynamiques

• AZOBIL (MACHET *et al.*, 1990)

La fourniture du sol aux cultures correspond dans ce modèle à la somme des termes Mh + Ma + Mr + Ap de l'équation du bilan de masse décrite au chapitre 2.2.1. Par la suite, la valeur qui représente la somme de ces quatre termes sera désignée : Nmin Azobil. Les valeurs de Ma (contribution des amendements organiques et des engrais verts), de Mr (contribution nette des

résidus de récolte) et de Ap (arrière effet des prairies) sont données par des tables dont les valeurs sont issues d'expérimentations.

Le terme Mh (minéralisation nette de l'humus) est défini de la façon suivante :

$$Mh = K_2 \cdot \text{Massol} \cdot [N] \cdot \text{CRF} \cdot \text{COS} \quad \text{équation 4.1}$$

- K_2 = coefficient de minéralisation de l'azote organique du sol

Ce coefficient prend en compte la température moyenne annuelle, la teneur en argile et en carbonate de calcium.

$$K_2 = \frac{1200}{(\text{Arg} + 200) (0,3 \text{ CaCo}_3 + 200)} \times \text{FC} \quad \text{équation 4.2}$$

Arg = teneur en argile en ‰

CaCo₃ = teneur en carbonate de calcium en ‰

FC = facteur climatique = $(0,2 \times \text{CLIMA}) - 1$; CLIMA représentant la température moyenne annuelle

- MASSOL = Masse de terre fine de la couche labourée en tonne.ha⁻¹

$$\text{MASSOL} = \text{PL} \cdot \text{da} \cdot 1,3 (100 - \text{CC})$$

où

PL = profondeur de labour en cm

da = densité apparente de la couche labourée

1,3 = coefficient prenant en compte la minéralisation des horizons sous-jacents, estimée à 30 % de la minéralisation de l'humus de la couche labourée

CC = charge en cailloux de la couche labourée

- [N] = Teneur en azote organique du sol en ‰.
- CRF = coefficient lié à l'histoire culturale prenant en compte le régime de restitution des résidus de récolte et d'apport des amendements organiques.

Le tableau n° 22 donne les valeurs de ce coefficient.

Résidus de récolte	Fréquence des apports organiques			
	rien	5 à 10 ans	3 à 5 ans	< 3 ans
Enlevés ou brûlés	0,8	0,9	1,0	1,1
Enfouis une fois sur deux	0,9	1,0	1,1	1,2
Toujours enfouis	1,0	1,1	1,2	1,3

Tableau n° 22 - Valeurs de CRF (équation 4.1)

- COS = Coefficient prenant en compte le temps d'occupation du sol par la culture. Pour le blé, la valeur est égale à 0,5.

Le modèle indique en sortie la température moyenne annuelle, la valeur du facteur climatique FC, la quantité d'azote minéralisé sur l'année affectée du coefficient d'occupation du sol (COS) en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Annexe n° 4).

• **PC azote** (PLAS, 1992 ; LE GALL, 1997)

Dans ce modèle, on considère que les quantités d'azote minéralisé par l'humus, sont peu variables. Dans un premier temps, PLAS (1992) propose une valeur fixe de $30 \text{ kg d'azote} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour les terres à cailloux. Cette valeur est issue d'expérimentations sur lesquelles la valeur du terme RSH était voisine de zéro. LE GALL (1997) a proposé une adaptation de cette valeur pour les sols plus profonds. Le terme correctif est le suivant : $\left(\frac{\text{RU}}{70}\right)^{0,25}$ (RU = réserve utile du sol en mm d'eau). L'augmentation de la minéralisation est cohérente avec l'augmentation de la réserve en eau utile du sol : les résidus enfouis sont en quantité plus importante et, pour un système à l'équilibre, la minéralisation est donc accrue.

Au total, la valeur de la minéralisation nette de l'humus Mh est donc : $30 \times \left(\frac{\text{RU}}{70}\right)^{0,25}$. La prise en compte de la nature et du devenir des résidus de récolte du précédent, Mr, s'effectue à partir de quantités fixes ajoutées ou retranchées au terme Mh :

Colza pailles enfouies	+ 10
Tournesol pailles enfouies	+ 5
Céréales pailles enfouies	- 10
Céréales pailles enlevées ou brûlées	0

Par la suite, la somme des valeurs Mh + Mr sera désignée par le terme Nmin PC azote.

Le modèle donne en sortie la valeur en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de la quantité d'azote minéralisée utilisable pour la culture.

b) Modèles dynamiques à pas de temps journalier ou hebdomadaire

• **AZODYN** (JEUFFROY, RECOUS, 1998)

Pour le sous modèle sol, directement dérivé du précédent, les valeurs de Ma, Mr et Ap sont identiques. Seule la valeur de K₂ est différente par la façon dont on fait intervenir la température. Au lieu d'utiliser la température moyenne annuelle, on considère que la vitesse de

minéralisation est une fonction exponentielle de la température telle que $V_{min} = V_0 e^{K(T-T_{ref})}$ (loi d'action de type Van't Hoff).

Le paramétrage de cette fonction (RECOUS, 1995) aboutit à une valeur de 0,115 pour K, ce qui correspond à une valeur du Q10 de 3,17 (les quantités d'azote minéralisées sont multipliées par 3,17 quand la température augmente de 10°C). De plus, la minéralisation est calculée de façon dynamique, à l'origine sur un pas de temps journalier. Pour nos travaux nous avons allégé la procédure de calcul en utilisant un pas de temps hebdomadaire. En utilisant la valeur de 10°C pour la température de référence et en travaillant sur un pas de temps hebdomadaire, l'expression de K_2 devient :

$$K_2 = \frac{\frac{1200}{52}}{(Arg + 200) (0,3 CaCO_3 + 200)} e^{0,115 (T - 10)} \quad \text{équation 4.3}$$

où T est la température moyenne de la semaine considérée. Les quantités d'azote provenant de la minéralisation de l'humus en $kg \cdot ha^{-1} \cdot semaine^{-1}$ sont alors données par la relation :

$$mh = K_2 \cdot MASSOL \cdot [N] \quad \text{équation 4.4}$$

Il reste à prendre en compte le coefficient CRF et à sommer les valeurs de mh depuis l'ouverture du bilan jusqu'à la récolte pour accéder à la valeur Mh, soit :

$$Mh = \sum_{OB}^{récolte} mh \times CRF \quad \text{équation 4.5}$$

OB : ouverture du bilan

Par la suite, la valeur qui représente la somme des termes $Mh + Ma + Mr + Ap$ sera désignée par le terme : $N_{min} \text{ Azodyn}$

Le modèle indique en sortie la température moyenne sur la période considérée, la quantité d'azote minéralisé de la matière organique et des résidus de récolte, par semaine, pour la période retenue et pour l'année en $kg \cdot ha^{-1}$.

Il permet également de calculer le nombre de jours normalisés à une température de référence (15°C).

$$NJ_{15} = NJ e^{0,115 (T-15)}$$

où

NJ_{15} = nombre de jours normalisés à 15°C

NJ = nombre de jours calendaires sur la période de calcul (Annexe n° 4)

Le calcul des quantités d'azote minéralisé par jour normalisé permet alors de comparer les résultats du modèle à des bilans calculés au champ ou à des résultats d'incubation en laboratoire, si ceux-ci sont également exprimés dans la même unité.

• **SUNDIAL : SimUlation of Nitrogen Dynamics In Arable Land** (BRADBURY *et al.*, 1993)

Le modèle SUNDIAL décrit les flux d'azote dans le sol et la culture à l'échelle de la parcelle. Les calculs sont réalisés sur un pas de temps hebdomadaire. Pour ce qui concerne le sous modèle sol, les restitutions de carbone et d'azote de la culture se font sous forme de débris végétaux qui alimentent au cours de leur décomposition deux compartiments que sont la biomasse microbienne et l'humus du sol. La biomasse microbienne et l'humus accumulent de l'azote (organisation de l'azote minéral) ou en libèrent (minéralisation de l'azote organique). L'équilibre minéralisation-organisation est défini par les rapports carbone/azote des compartiments biomasse et humus, qui sont tous deux fixés à 8,5. Ce modèle est dérivé de celui proposé par JENKINSON (1988) (Annexe n° 6).

Contrairement aux autres modèles, SUNDIAL décrit des flux bruts d'azote associés à la décomposition du carbone introduit dans le sol par la rhizodéposition et par les débris végétaux., la minéralisation nette sur une période considérée résultant de la différence entre les deux flux bruts

La situation est décrite par le type de sol (sableux, limoneux ou argileux), la profondeur maximale d'enracinement (50, 100 ou 150 cm), la nature et le rendement du précédent. Ces données d'entrée déterminent le carbone et l'azote et la proportion de carbone total sous forme active (carbone microbien + carbone de l'humus facilement décomposable). L'effet à moyen terme (10 ans) induit par le système de culture (ex. présence d'une prairie) est pris en compte par un facteur de pondération du carbone organique total du sol. Pour la campagne étudiée, sont pris en compte :

- la date de semis et la date de récolte
- les apports de matière organique (teneur en azote, pourcentage de matière sèche, quantité appliquée et date d'application)
- les paramètres climatiques (précipitations hebdomadaires, ETP hebdomadaire et température moyenne hebdomadaire)

Le modèle donne en sortie la valeur du stock d'azote du sol initial et final ainsi que le bilan des apports et des pertes en azote minéral et la valeur de Nmin correspondant à la minéralisation nette utile à la culture (Annexe n° 7).

4.2.3. INCUBATIONS

Les incubations en milieu contrôlé ont été réalisées sur la série des 18 sols suivis au champ en 1995. Ces sols ont été choisis de telle façon qu'ils représentent une gamme la plus large possible pour les paramètres qui influent directement sur la vitesse de minéralisation (argile : 186 à 587 ‰, CaCO_3 : 0 à 363 ‰, azote : 1,2 à 3,3 ‰, C/N : 7,9 à 9,3) (Tableau n° 23)

n°	Argile en ‰	CaCO_3 en ‰	N en ‰	Matière organique (C x 1,72) en ‰	$\frac{\text{C}}{\text{N}}$	pH eau	présence de cailloux
1	470	122	3,2	46,8	8,5	7,9	
2	480	126	2,0	28,4	8,1	8,1	
3	472	237	1,9	28,4	8,4	8,0	X
4	587	42	2,3	31,2	7,9	7,3	
5	322	20	1,7	23,6	7,9	7,9	
6	402	0	2,8	44,8	9,3	8,1	
7	468	0	2,4	37,0	9,0	7,7	X
8	418	0	2,7	44,2	9,3	7,7	X
9	309	39	1,2	16,7	8,0	8,1	
10	366	0	2,5	38,4	8,9	7,2	
11	228	0	1,2	17,8	8,3	6,6	
12	351	0	1,6	24,6	8,8	7,7	
13	445	363	2,4	39,4	9,7	8,1	
14	437	48	1,7	23,6	8,1	8,1	
15	325	0	1,6	25,0	9,1	6,7	
16	350	65	3,3	52,5	9,2	7,8	X
17	402	76	1,8	27,0	8,7	8,0	
18	186	0	1,6	23,9	8,5	7,1	

Tableau n° 23 - Caractéristiques physico-chimiques des sols mis en incubation.

4.2.3.1. Dispositif

Les échantillons pour mise en incubation ont été prélevés début avril 1995. Le prélèvement a été effectué à la bêche sur une surface de $0,04 \text{ m}^2$ et sur une profondeur de 0,27 cm. soit un poids de terre de l'ordre de 10 à 15 kg selon les types de sol.

Ils ont ensuite été mis à sécher pendant 15 jours à l'air libre. Au terme de ce séchage, on a opéré un concassage et un broyage manuel, puis un tamisage à 5 mm. On a alors procédé à une détermination de l'humidité à pF 2,7 en soumettant les échantillons à une pression de 500 millibars en utilisant la presse de Richards. A la suite de cette détermination nous avons

constitué des échantillons (15 par sol) dans des pots en plastique de 220 cc en rajoutant à la terre sèche la quantité d'eau pour obtenir au total 100 g de sol humide à pF 2,7.

La quantité d'eau à rajouter dans chaque pot a été calculée de la façon suivante : si x en % du sol sec est l'humidité à pF 2,7 alors chaque pot de 100 g de terre humide devra contenir pour être à cette humidité $\frac{x}{100+x}$ 100 grammes d'eau et $100 - \frac{x}{100+x}$ 100 grammes de terre sèche.

Les pots ainsi constitués ont été fermés et mis à incuber en phytotron à une température constante de 15°C. L'humidité a été contrôlée deux fois par semaine par pesée des pots et ajout d'eau éventuel de façon à maintenir une humidité constante pendant toute la durée de l'incubation.

Parallèlement, on a réalisé une extraction au temps 0 afin de déterminer les quantités d'azote minéral initiales pour chaque sol, sur 3 répétitions ainsi que l'humidité initiale. On a ainsi pu constater que, selon les types de sol, il restait entre 8 et 21 % d'eau dans les échantillons. De fait, nous avons omis de prendre en compte cette quantité pour calculer le volume d'eau nécessaire à rajouter au sol pour le ramener à pF 2,7 en considérant qu'après séchage à l'air libre, les sols étaient à 0 % d'humidité. Le résultat de cette erreur a conduit à des teneurs en eau des échantillons soumis à incubation supérieures à celles correspondantes à pF 2,7. Les humidités réelles d'incubation ont été recalculées à partir des quantités d'eau initiales et de celles ajoutées. Pour chaque sol, a été établie la courbe d'humidité en fonction du pF en réalisant 7 mesures complémentaires : humidité à saturation, pF 1,5, 2,0, 2,6, 3,0, 3,7 et 4,2. Ainsi après calcul de la relation statistique entre Humidité et pF pour chaque type de sol, nous avons pu recalculer le pF correspondant à l'humidité réelle d'incubation.

De plus, des mesures d'humidité ont été réalisées au mois de novembre sur 5 sites choisis pour représenter la gamme de texture des situations étudiées. A cette époque, l'ETP est très faible et après réhumectation par les pluies d'automne et ressuyage par gravité, l'humidité ainsi mesurée est une estimation correcte de la capacité au champ (BRUAND *et al.*, 1996 ; FLORENTIN communication personnelle).

4.2.3.2. Mesures

Après l'extraction correspondant à la date de mise en incubation, 5 autres mesures ont été réalisées aux jours 14, 28, 44, 56 et 84. Les extractions ont été réalisées à chaque fois sur 3 répétitions avec 300 ml de KCl molaire après agitation de 30 minutes et filtration. Les extraits ont été conservés en chambre froide à 4°C. Le dosage de l'ammonium et du nitrate a été réalisé par colorimétrie à flux continu.

4.2.3.3. Transposition des résultats au champ

Les résultats au champ sont exprimés en kg d'azote.ha⁻¹. Dans un premier temps, nous avons transformé les résultats de laboratoire exprimés en mg d'azote par litre d'extrait en mg d'azote rapportés à la quantité de terre sèche :

$$\frac{\text{mg N}}{\text{kg TS}} = \frac{[\text{N}] \cdot (0,3 + \text{VH})}{\text{qTS}} \cdot 10^3$$

où :

$\frac{\text{mg N}}{\text{kg TS}}$ = milligramme d'azote par kg de terre sèche

[N] = milligramme d'azote par litre d'extrait

0,3 = quantité de KCl ajoutée en litre

VH = volume d'eau en litre contenu dans les 100 g de terre humide

qTS = poids de terre sèche en gramme dans les 100 g de terre humide

Par la suite, cette valeur sera appelée V_{min incub}, pour quantité d'azote minéralisé pour 100 g de terre sèche pendant 85 jours à 15°C. Ensuite, la prise en compte de la densité apparente et de la profondeur de prélèvement permet de calculer des quantités d'azote en kg.ha⁻¹ :

$$\text{kg N.ha}^{-1} = \text{V}_{\text{min incub}} \times \text{P} \times \text{da}$$

où

kg N.ha⁻¹ = quantité d'azote en kg.ha⁻¹ prévue par incubation

P = profondeur en décimètres

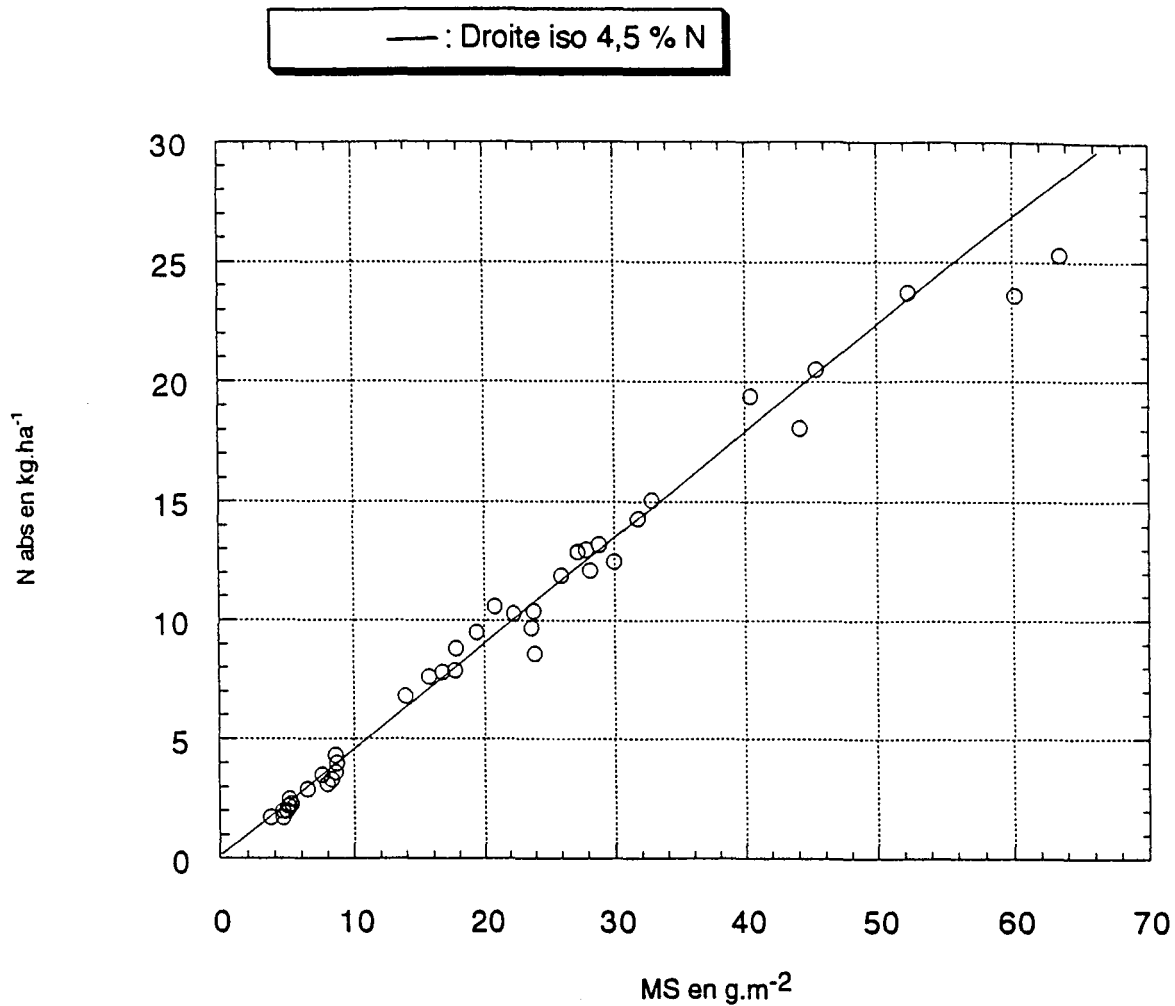
da = densité apparente

Par la suite, cette valeur sera appelée N_{min incub} pour quantité d'azote minéralisé par hectare pendant 85 jours, calculée à partir des résultats d'incubation.

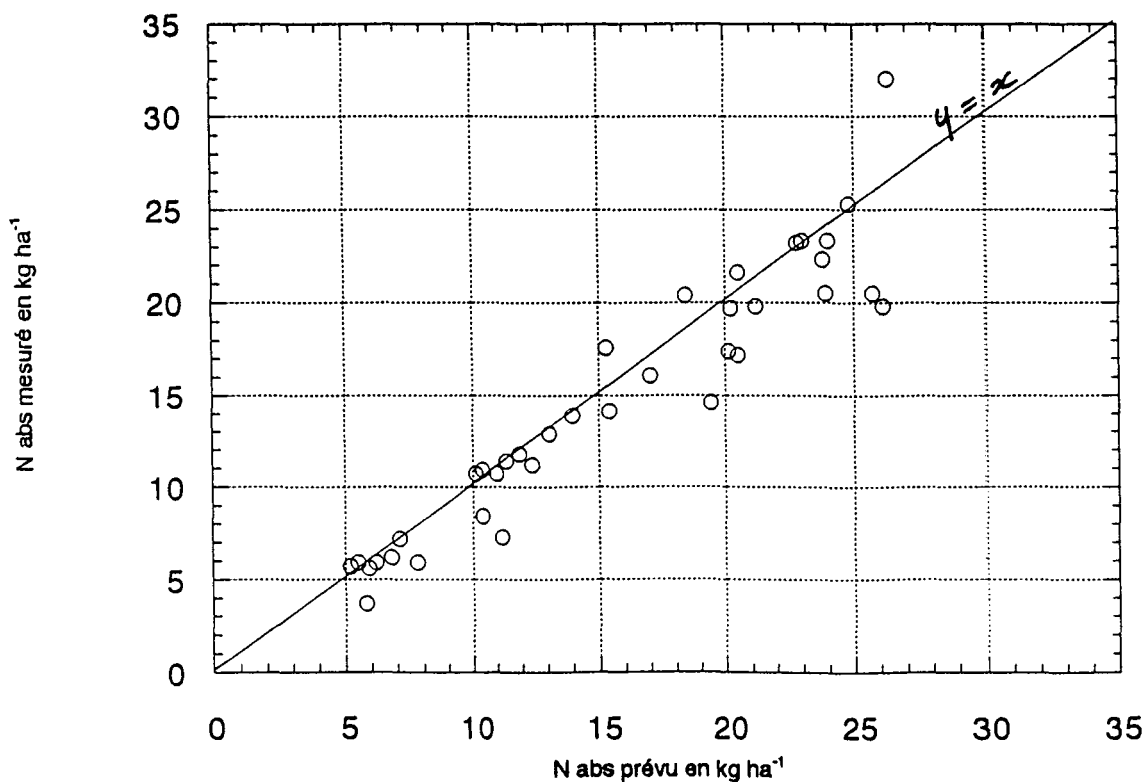
4.2.4. ETABLISSEMENT DES BILANS

Deux types de bilan ont été établis, selon qu'il s'agit de tester les modèles sur la fourniture totale du sol, ou sur la seule minéralisation de l'humus :

- **Prévision de la fourniture en azote du sol (valeur Po)** : Dans ce cas, on confronte la valeur de Po mesurée à la somme [NSH + (RSH-RAR) + Nmin] (NSH, RSH sont mesurés, RAR est mesuré ou estimé), Nmin est estimé à partir de différents modèles (Azobil, Azodyn, PC azote). Les résultats sont exprimés en Kg N.ha⁻¹ sur la période comprise entre l'ouverture du bilan et la récolte.



Graphique n° 29 - Relation entre l'azote absorbé et la matière sèche des parties aériennes.



Graphique n° 30 - Test de la relation entre l'azote absorbé et la matière sèche des parties aériennes

Dans le cas où la valeur de RAR est estimée, nous utiliserons les valeurs proposées par MACHET *et al.* (1990)

N minéral restant dans le profil = RAR en kg.ha ⁻¹	Profondeur du profil en cm
15	30
25	60
30	90
40	120

Tableau n° 24 - Valeurs prévisionnelles du RAR en fonction de la profondeur du sol.

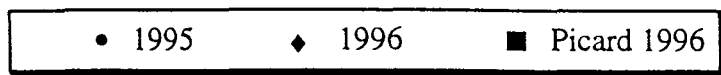
- **Prévision de la minéralisation nette de l'humus** : Dans ce cas, on compare les valeurs de Nmin (kg N.ha⁻¹) issues des modèles Azobil, Azodyn, SUNDIAL, PC azote, ou du test d'incubation au bilan suivant :

$$Po - NSH - (RSH - RAR)$$

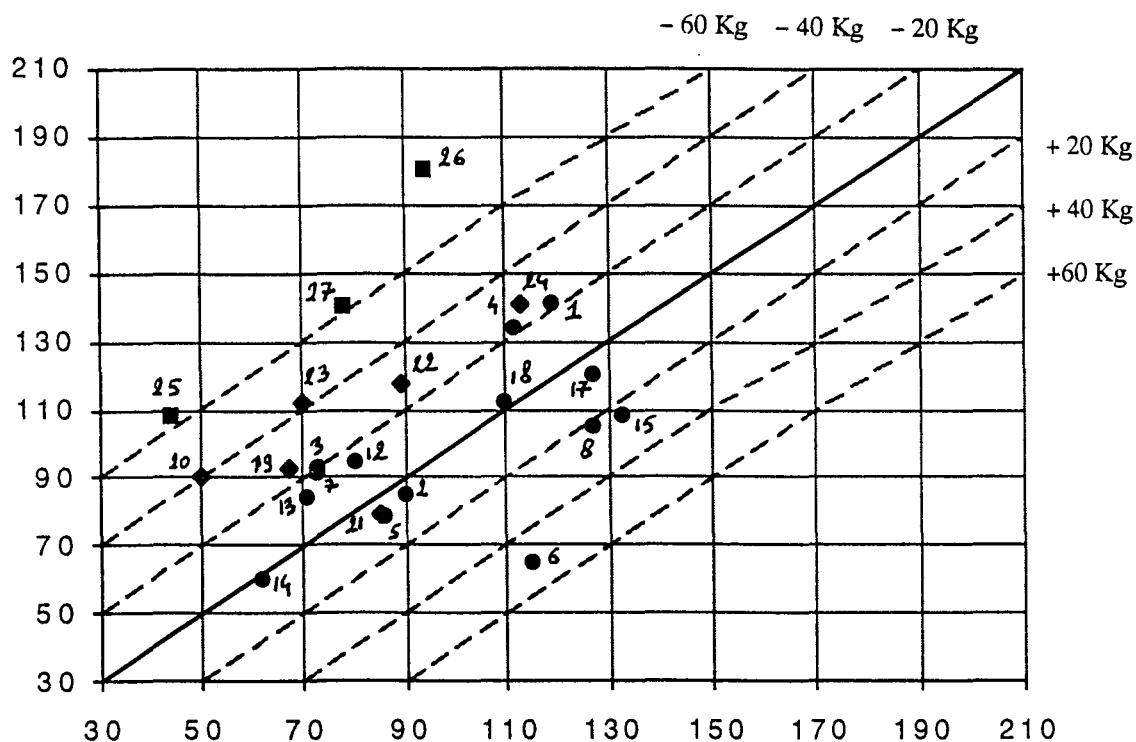
Par souci de cohérence avec les conditions d'incubation, nous avons procédé à deux transformations :

- * Toutes les valeurs de Nmin issues des différents modèles du bilan au champ, ou du test d'incubation sont exprimées en quantité d'azote par hectare et par jour à 15°C : pour chaque site expérimental, on a donc divisé les valeurs calculées de Nmin et des bilans au champ par le nombre de jours normalisés à 15°C selon la méthode proposée par JEUFFROY et RECOUS (1998). Pour les résultats d'incubation, la valeur de Nmin incub, précédemment définie, a été divisée par 85 jours, durée de l'incubation à température constante de 15°C. Les résultats sont alors exprimés en kg d'azote par hectare et par jour à 15°C, soit kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹.
- * Nous ne disposons pas de mesures d'humidité sur les dispositifs au champ. Nous avons considéré qu'en moyenne, pour les deux années et sur la période pour laquelle la minéralisation est calculée par le bilan au champ, l'humidité était voisine de 2/3 de la capacité au champ. Ceci nous a conduit à exprimer les résultats de Nmin incub.J₁₅⁻¹ à 2/3 de la capacité au champ. Pour ce faire, nous avons utilisé le facteur humidité proposé par ANDREN et PAUSTIAN (1987), qui est basé sur une relation exponentielle entre potentiel hydrique du sol et vitesse de minéralisation. Ce facteur de correction g(w) est calculé de la façon suivante :

$$g(w) = \frac{\text{Log} (\psi_{\text{min}} / \psi)}{\text{Log} (\psi_{\text{min}} / \psi_{\text{max}})}$$



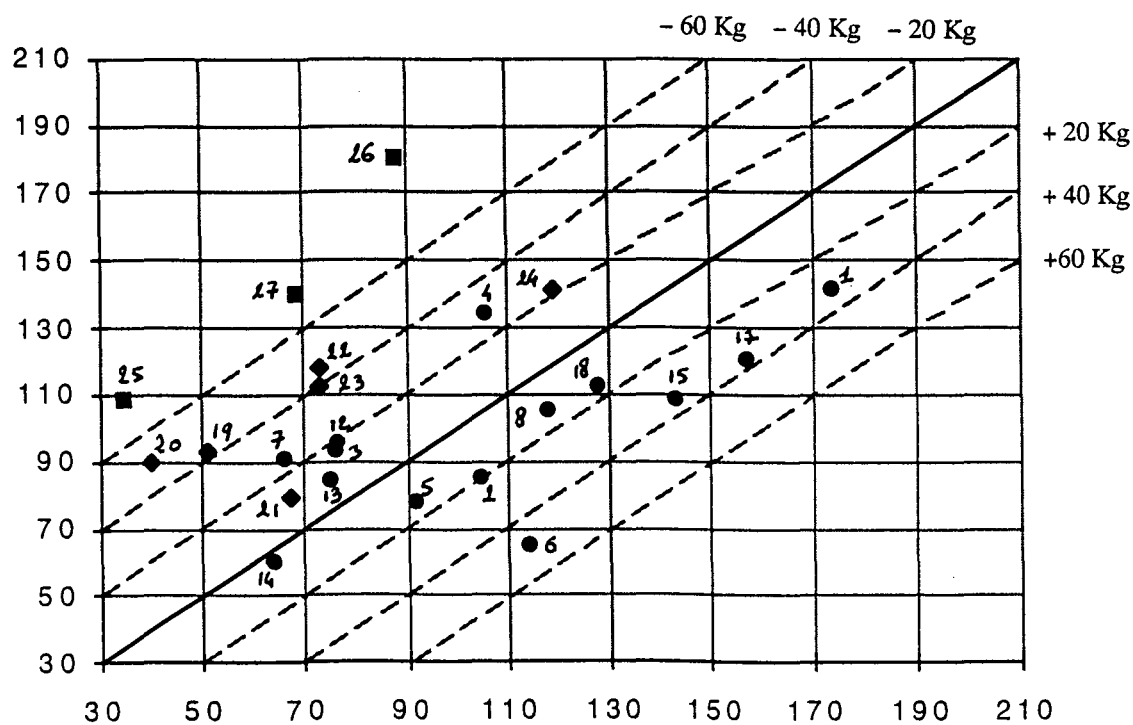
Po en kg.ha⁻¹



B1 en kg.ha⁻¹

Graphique n° 31a : Relation entre les valeurs de Po et les valeurs prédites par le bilan n° 1 : NSH + (RSH - RARmes) + Nmin Azobil

Po en kg.ha⁻¹



B2 en kg.ha⁻¹

Graphique n° 31b : Relation entre les valeurs de Po et les valeurs prédites par le bilan n° 2 : NSH + (RSH - RARest) + Nmin Azobil

ψ étant le potentiel hydrique mesuré (en Mpa); $\psi_{\max}$ le potentiel hydrique maximal (-0,01 Mpa) et $\psi_{\min}$ le potentiel hydrique minimal (-7,58 Mpa).

Les potentiels hydriques correspondant aux humidités d'incubation étaient dans la plupart des cas compris entre -0,001 et -0,006 Mpa (ceci compte tenu de l'erreur commise sur les quantités d'eau rajoutées au moment de la mise en incubation). Nous avons donc considéré que la relation était extrapolable jusqu'à -0,001 Mpa. Ensuite, les calculs ont été réalisés de la façon suivante :

- Calcul de l'humidité à la capacité au champ (HCC) pour chaque situation à partir de la relation établie entre l'humidité mesurée en novembre sur les 5 situations représentatives et la teneur en argile. (HCC est exprimée en % volumique par rapport à la terre sèche).
- Calcul de l'humidité 2/3 HCC
- A partir de l'humidité 2/3 HCC et des relations humidité/potentiel hydrique sur chaque parcelle, calcul du potentiel hydrique correspondant à 2/3 HCC
- La valeur du potentiel hydrique correspondant à 2/3 HCC permet alors de calculer le facteur de correction à appliquer à $V_{\min \text{ incub.}} J_{15}^{-1}$ pour obtenir une vitesse de minéralisation correspondant à 2/3 HCC.

4.3. RÉSULTATS

4.3.1. PRÉVISION DE NSH

Nous avons mis en relation les quantités d'azote absorbé par le peuplement avec la biomasse sur 42 mesures réalisées en 1993 et 1994. Le résultat (graphique n° 29) montre une relation très forte entre les deux paramètres :

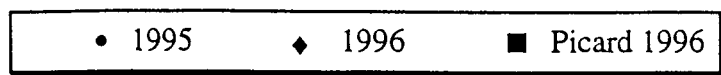
$$\text{NSH} = 0,428 \text{ MSPA} + 0,33 \quad r^2 = 98,33 \%$$

Gamme des MSPA : 3,7 à 65 g.m⁻²

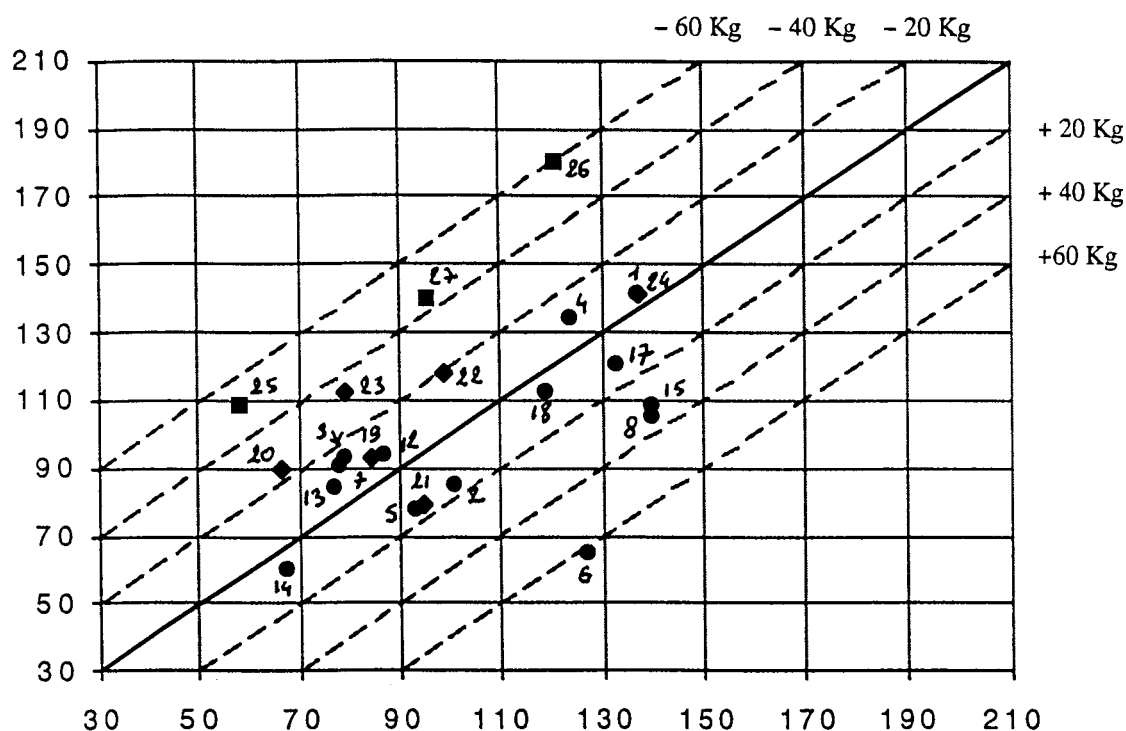
NSH en kg N.ha⁻¹

MSPA en g.m⁻²

On est donc très proche de la valeur proposée par JUSTES *et al.* (1994) qui est de 4,42 %. Le test de ce modèle sur 40 mesures réalisées en 1995 et 1996 montre que les valeurs de NSH sont bien prévues : $\sqrt{\text{MSE}} = \pm 2,72 \text{ kg N.ha}^{-1}$ (graphique n° 30).

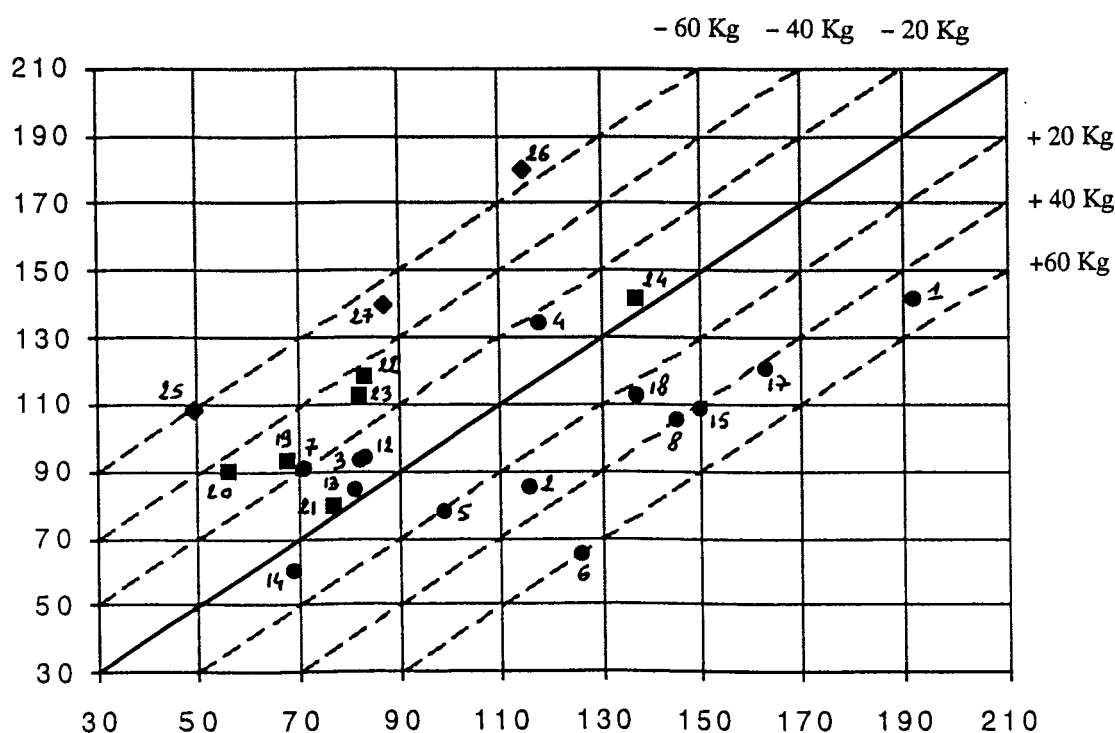


Po en kg.ha⁻¹



B3 en kg.ha⁻¹

Po en kg.ha⁻¹



B4 en kg.ha⁻¹

4.3.2. EVALUATION DES MODÈLES DE PRÉVISION DE LA FOURNITURE EN AZOTE DU SOL

Pour l'ensemble des 23 situations étudiées (14 en 1995 et 9 en 1996), sauf pour PC azote pour lequel nous n'avons pu tester que 10 situations en 1995 et 9 situations en 1996, nous confronterons la valeur mesurée du terme P_o , soit au bilan au champ, soit aux valeurs de fournitures du sol calculées par PC azote soit aux valeurs prévues par les grilles de la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine (Tableau n° 25).

La gamme des valeurs testées s'échelonne de 63 kg N.ha^{-1} à 141 kg N.ha^{-1} en 1995, et de 79 kg N.ha^{-1} à 180 kg N.ha^{-1} en 1996. Sur les deux années, 78 % des valeurs sont comprises entre 50 kg N.ha^{-1} et 125 kg N.ha^{-1} . Nous pouvons donc considérer que ces 23 situations sont un échantillon assez représentatif de la gamme observée en Lorraine (cf chapitre 2.3.2.1.).

4.3.2.1. Prévision à partir d'Azobil

Les valeurs mesurées de P_o sont comparées au bilan suivant : $NSH + (RSH - RAR) + N_{min}$ Azobil. La valeur de RAR est soit mesurée, soit estimée (cf chapitre 4.2.4.).

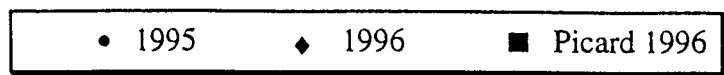
• Cas où la valeur de RAR est mesurée : (graphique n° 31a)

Observés globalement, les résultats montrent une grande dispersion avec quelques situations pour lesquelles la valeur prévue est très éloignée de la valeur mesurée (station n° 6 en 1995, n° 25, 26 et 27 en 1996 appartenant toutes les trois à la même parcelle et identifiées PICARD 1996 sur le graphe.

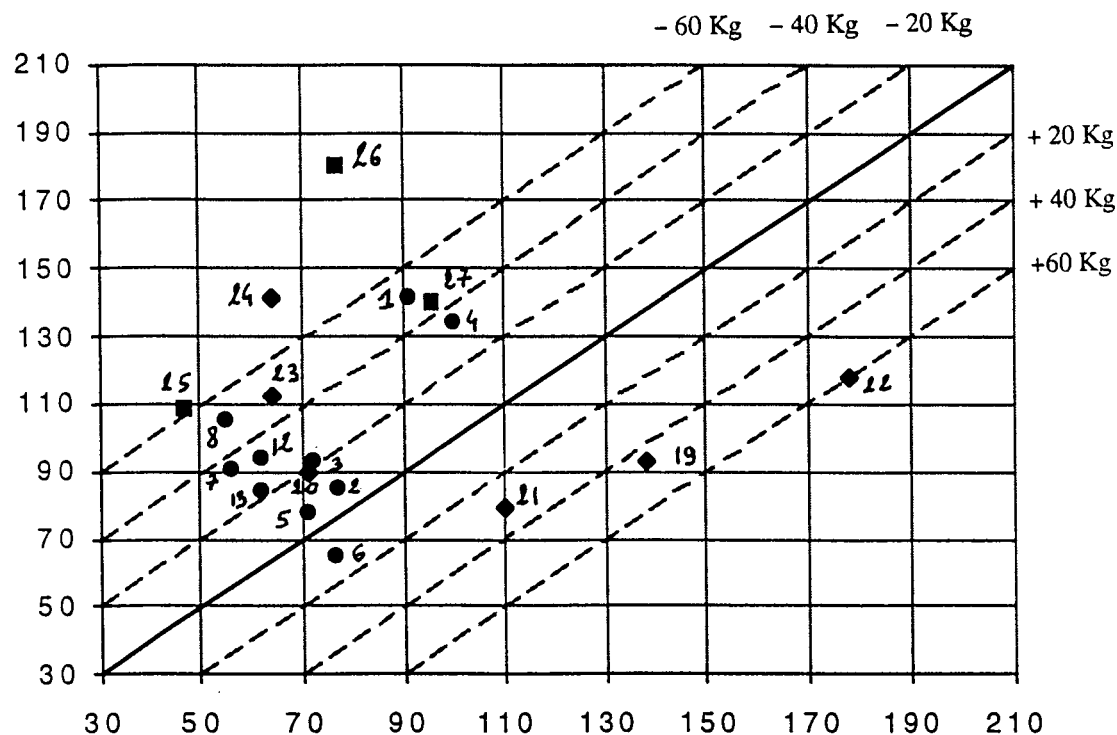
Si on observe les résultats par année, on constate que les valeurs de 1995 sont globalement bien réparties autour de la bissectrice alors que celles de 1996, à l'exception de la station n° 21, se situent toutes au dessus. Au total, la prévision est fiable à $\pm 20 \text{ kg ha}^{-1}$ dans 10 cas sur 23, à $\pm 40 \text{ kg ha}^{-1}$ dans 18 cas sur 23 et à $\pm 60 \text{ kg ha}^{-1}$ dans 20 cas sur 23 (Tableau n° 26).

• Cas où la valeur de RAR est estimée (graphique n° 31b)

On observe une plus grande dispersion que précédemment. Les valeurs de 1996 sont cette fois toutes au dessus de la bissectrice alors que la majorité des valeurs de 1995 sont au dessous. Globalement, la prévision est moins fiable qu'avec la valeur de RAR mesurée : 9 cas sur 23 à $\pm 20 \text{ kg ha}^{-1}$, 16 cas sur 23 à $\pm 40 \text{ kg ha}^{-1}$ et 20 cas sur 23 à $\pm 60 \text{ kg ha}^{-1}$.

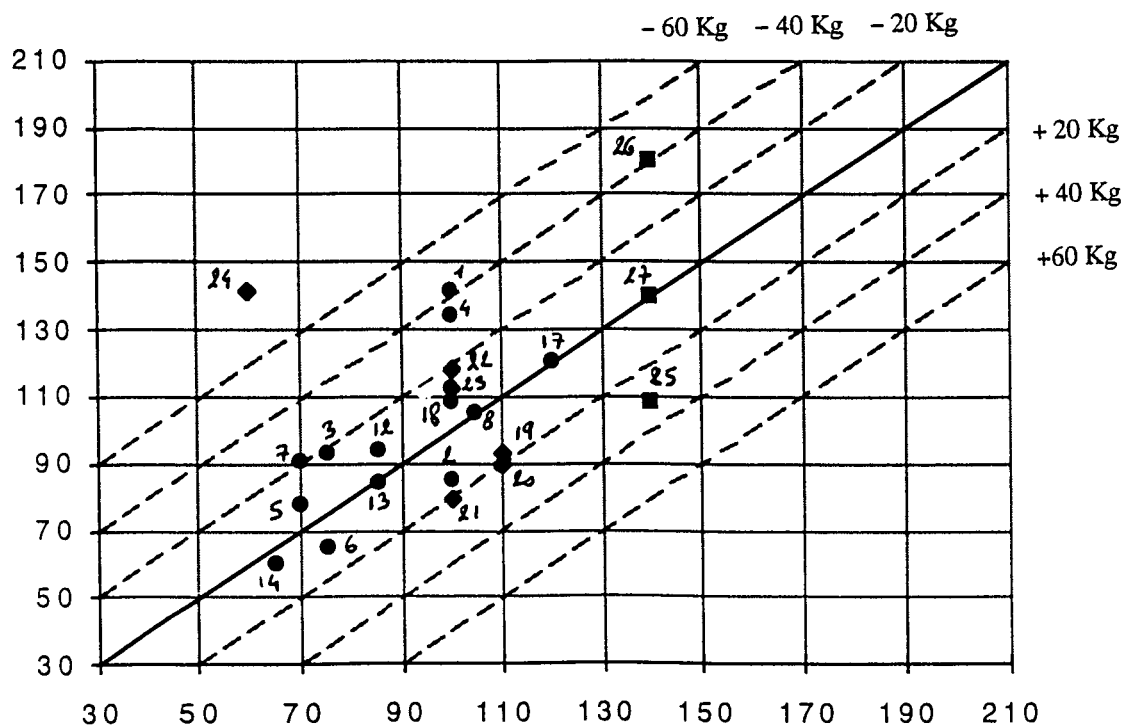


Po en kg.ha⁻¹



PC azote

Po en kg.ha⁻¹



Grilles Lorraine

4.3.2.2. Prévision à partir d'Azodyn

Les valeurs mesurées de Po sont comparées au bilan suivant :

$$\text{NSH} + (\text{RSH} - \text{RAR}) + \text{N min Azodyn}$$

- **Cas où la valeur de RAR est mesurée** (graphique n  31c)

Par rapport à la prévision à partir d'Azobil, les résultats sont en moyenne mieux centrés autour de la bissectrice, ceci étant dû à des valeurs de Nmin Azodyn systématiquement supérieures à celles de Nmin Azobil (Tableau n  25). Une majorité des résultats 1995 se situent sous la bissectrice (8 sur 14) alors que les résultats 1996 restent, à une exception près, au dessus. La qualité de la prévision s'en trouve améliorée : 15 cas sur 23 à $\pm 20 \text{ kg ha}^{-1}$, 19 cas sur 23 à $\pm 40 \text{ kg ha}^{-1}$ et 22 cas sur 23 à $\pm 60 \text{ kg ha}^{-1}$.

- **Cas où la valeur de RAR est estimée** (graphique n  31d)

Comme pour la prévision à partir d'Azobil, la dispersion augmente. L'effet année est encore plus marqué puisque tous les résultats 1996 sont au dessus de la bissectrice alors que en 1995, 9 résultats sur 14 se situent au dessous de celle-ci. Dans ces conditions, la qualité de la prévision se dégrade : 8 cas sur 23 à $\pm 20 \text{ kg ha}^{-1}$, 15 cas sur 23 à $\pm 40 \text{ kg ha}^{-1}$ et 21 cas sur 23 à $\pm 60 \text{ kg ha}^{-1}$.

4.3.2.3. Evaluation de la prévision à partir de PC azote

On constate une relative stabilité des valeurs prévues par PC azote : 12 résultats sur 19 sont compris entre 50 et 80 kg ha^{-1} alors que les valeurs correspondantes de Po mesurées s'échelonnent de 63 kg à 180 kg. De ce fait, la qualité de la prévision est mauvaise : 4 cas sur 19 à $\pm 20 \text{ kg ha}^{-1}$, 9 cas sur 14 à $\pm 40 \text{ kg ha}^{-1}$ et 17 cas sur 19 à $\pm 60 \text{ kg ha}^{-1}$ (les stations 14, 15, 17 et 18 de 1995 n'ont pas fait l'objet du test avec PC azote) (graphique n  31e).

4.3.2.4. Evaluation à partir des grilles de fournitures de la CRA Lorraine

A deux exceptions près (stations 24 et 26 en 1996) l'ensemble des résultats est bien réparti autour de la bissectrice et ce, quelle que soit l'année. La qualité de la prévision est nettement améliorée par rapport aux autres modèles : 16 cas sur 23 à $\pm 20 \text{ kg ha}^{-1}$, 21 cas sur 23 à $\pm 40 \text{ kg ha}^{-1}$ et 22 cas sur 23 à $\pm 60 \text{ kg ha}^{-1}$. On peut remarquer que deux des trois stations PICARD ainsi que la station n  6 font l'objet d'une très bonne prévision, contrairement à ce qui était observé pour les modèles précédents (graphique n  31f).

Année	Site	Po mesuré	Eléments des bilans						Valeurs calculées de Po							
			RSH- RAR	RSH- RAR	N min	Nmin Azodyn	Nmin Azobil	NSH	Bilan 1	Bilan 2	Bilan 3	Bilan 4	Bilan 5	Bilan 6	PC Azote	Grilles Lorraines
			mesuré	estimé	Azodyn	CaCO ₃										
1995	1	141	-14	41	114	131	96	37	119	174	137	192	154	209	91	100
	2	85	6	21	80	92	69	15	90	105	101	116	113	113	77	100
	3	93	-6	-3	57	70	51	28	73	76	79	82	92	95	72	75
	4	134	5	-1	88	92	76	31	112	106	124	118	128	112	100	100
	5	78	-14	-8	72	74	65	35	86	92	93	99	95	101	71	70
	6	65	1	0	95	95	83	31	115	114	127	126	127	126	76	75
	7	91	-6	-13	51	51	46	33	73	66	78	71	78	71	56	70
	8	105	2	7	93	93	80	45	127	118	140	145	140	131	55	105
	12	94	-2	-8	66	66	59	23	80	76	87	83	87	83	62	85
	13	84	-12	-8	61	83	55	28	71	75	77	81	99	103	62	85
	14	60	2	4	45	49	40	20	62	64	67	69	71	73	ND	65
	15	108	24	34	87	87	80	29	133	143	140	150	140	150	ND	100
	17	120	16	46	84	88	78	33	127	157	133	163	137	167	ND	120
	18	112	16	34	80	80	71	23	110	128	119	137	119	137	ND	100
1996	19	93	25	9	45	45	28	14	67	51	84	68	84	68	138	110
	20	90	11	1	47	48	31	8	50	40	66	56	67	57	71	110
	21	79	18	0	47	47	37	30	85	67	95	77	95	77	110	100
	22	118	19	3	57	57	47	23	89	73	99	83	99	83	178	100
	23	112	26	29	26	38	17	27	70	73	79	82	91	94	64	100
	24	141	28	34	61	61	43	42	113	119	137	137	131	137	64	60
	25	108	-10	-19	37	39	23	31	44	35	58	49	60	51	47	140
	26	180	3	-3	73	73	46	45	94	88	121	115	121	115	77	140
	27	140	-3	-12	50	50	32	49	78	69	96	87	96	87	96	140

Tableau n° 25 - Valeurs de Po mesurées, calculées et éléments de calcul des différents bilans (en kg.N.ha⁻¹)

Bilan 1 = NSH + (RSH - RAR mes) + N min Azobil

Bilan 2 = NSH + (RSH - RAR est) + N min Azobil

Bilan 3 = NSH + (RSH - RAR mes) + N min Azodyn

Bilan 4 = NSH + (RSH - RAR est) + N min Azodyn

Bilan 5 = NSH + (RSH - RAR mes) + N min Azodyn sans CaCO₃

Bilan 6 = NSH + (RSH - RAR est) + N min Azodyn sans CaCO₃

Modèles	Nombre de situations où la valeur prévue de la Po est comprise dans la fourchette		
	$\pm 20 \text{ kg.ha}^{-1}$	$\pm 40 \text{ kg.ha}^{-1}$	$\pm 60 \text{ kg.ha}^{-1}$
Azobil (RAR mesuré)	10/23	18/23	20/23
Azobil (RAR estimé)	9/23	16/23	20/23
Azodyn (RAR mesuré)	15/23	19/23	22/23
Azodyn (RAR estimé)	8/23	15/23	21/23
PC azote	4/19	9/19	17/19
Grilles prédictives CRA Lorraine	16/23	21/23	22/23
Azodyn-CaCO ₃ (RAR mesuré)	14/23	18/23	22/23
Azodyn-CaCO ₃ (RAR estimé)	8/23	16/23	20/23

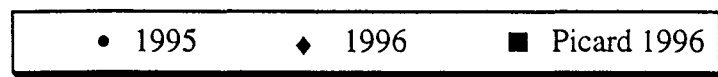
Tableau n° 26 - Qualité de la prévision de Po par les différents modèles.

4.3.3. DISCUSSION PARTIELLE SUR LES ERREURS DE PRÉVISION DE LA FOURNITURE EN AZOTE DU SOL PAR LES DIFFÉRENTS MODÈLES

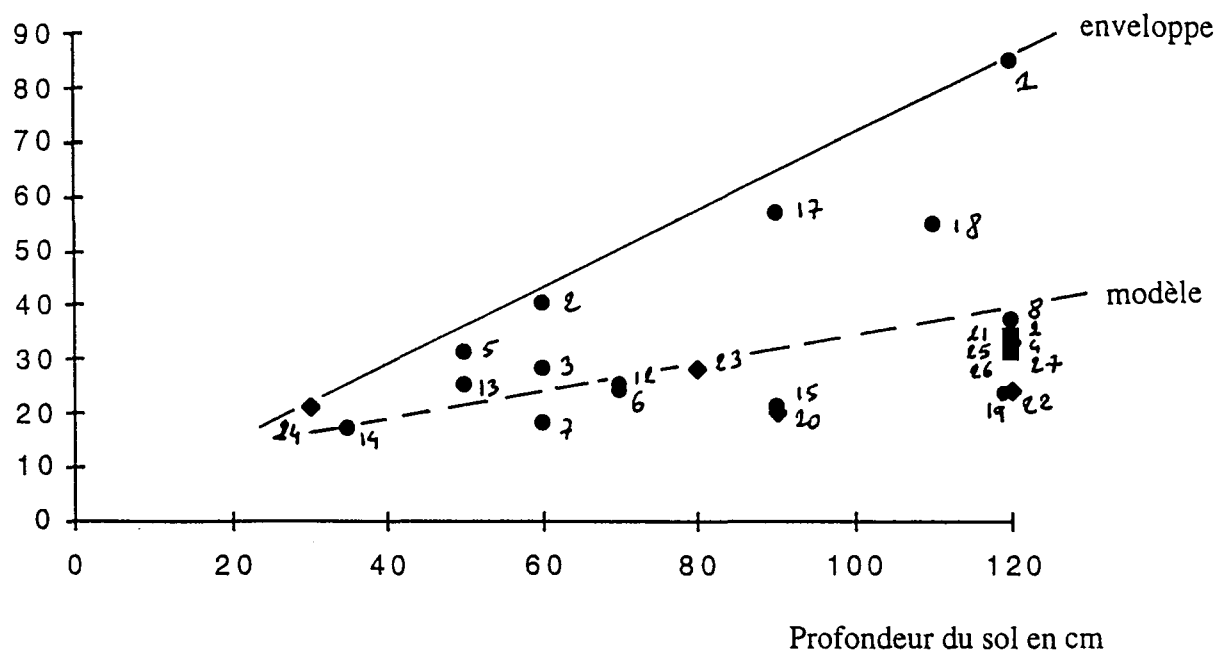
4.3.3.1. Variabilité des résultats

Nous avons observé une assez grande variabilité de la qualité de la prévision des fournitures en azote du sol selon les modèles utilisés. En particulier, lorsque la prévision est réalisée à partir d'un bilan, on observe toujours une surestimation de la station n° 6 et une sous-estimation des trois stations PICARD. En fait, ces trois dernières stations sont issues de la même parcelle du réseau OPAL. Le système de culture y est identique mais le type de sol diffère entre les trois stations.

Les données relevées sur ces stations ne sont pas aberrantes : les rendements sont respectivement de 49,0, 77,6 et 54,7 q.ha⁻¹. Les teneurs en azote sont conformes à celles qu'on peut observer généralement sur des témoins non fertilisés (0,48 à 0,68 % pour les pailles et 1,57 % pour les grains). Au total, les valeurs de b calculées se situent entre 2,18 et 2,55 kg N.q⁻¹, donc à des niveaux tout à fait normaux. Pour ce qui est des valeurs prévues à partir d'Azobil, les valeurs de NSH (31 à 49 kg N.ha⁻¹) et de RAR (28 à 36 kg N.ha⁻¹) apparaissent également normales. Seules les valeurs de RSH apparaissent un peu faibles (20 à 37 kg N.ha⁻¹) eu égard à la profondeur du sol et aux valeurs moyennes observées en 1996 dans les mêmes situations (50 kg N.ha⁻¹). On peut donc imaginer qu'il existe une incertitude sur cette valeur. Pour la station n° 6 (située dans la même parcelle du réseau OPAL que la station n° 5, on observe le phénomène inverse : la valeur de Po est très inférieure à la valeur simulée à partir d'Azobil ou d'Azodyn. Compte tenu du type de sol (argile limoneuse sur



RAR mesuré en kg.ha^{-1}



Graphique n° 32 - Relation entre les valeurs mesurées de RAR et la profondeur du sol

marnes à 40 cm), la possibilité d'une erreur sur la mesure du rendement à la récolte n'est pas à exclure (29 q.ha⁻¹ seulement).

4.3.3.2. Etude analytique des résultats d'Azobil et Azodyn

• Effet du précédent cultural

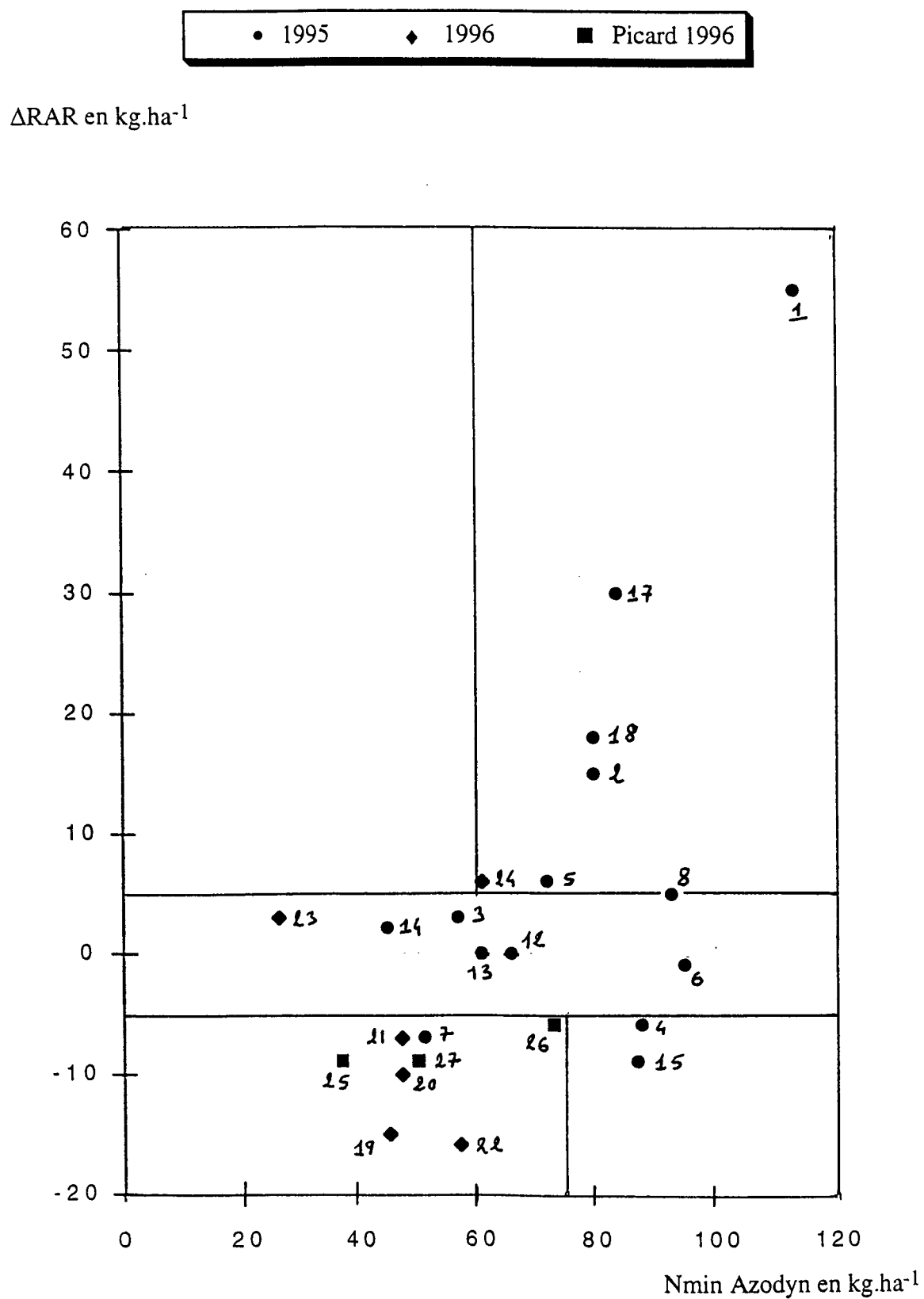
Nous avons observé, pour les prévisions réalisées à partir d'Azobil et Azodyn, une tendance à la surestimation pour les résultats de 1995 et, à l'inverse, une tendance à la sous estimation pour les résultats de 1996. Or, l'examen des précédents culturaux nous montre que, en 1995 tous les précédents sont des colzas pailles enfouies ($Mr = 20$), à l'exception des stations n° 17 (prairie permanente ; $Mr = 40$), 14 (orge d'hiver pailles exportées ; $Mr = 0$) et 18 (maïs fourrage : $Mr = 0$).

En revanche en 1996, la situation est complètement inversée puisque une seule station est en précédent colza (station 24) les autres étant en précédent maïs fourrage (stations 19 et 21), céréales d'hiver pailles exportées (stations 20, 23, 25, 26 et 27) et pois de printemps (station 22). On pourrait donc imaginer qu'un biais dans la prise en compte du précédent colza ou pois, contribuant au travers de Mr pour 20 kg dans la valeur de N_{min} (Azobil ou Azodyn), soit l'explication de cet effet apparent dû à l'année. Toutefois la position des résultats des stations 14 et 18 en 1995 d'une part, et 24 en 1996 d'autre part, par rapport à l'ensemble des résultats de chacune des années, ne confirme pas cette hypothèse.

• Le poids des reliquats après récolte

Les valeurs du reliquat après récolte mesurées et estimées présentent des moyennes équivalentes, respectivement 32,3 kg N.ha⁻¹ et 30,3 kg N.ha⁻¹ (Tableau n° 27). Toutefois ces moyennes sont assorties d'écart types très différents : 15,0 kg N.ha⁻¹ soit un coefficient de variation de 46,5 % pour les valeurs mesurées et 7,8 kg N.ha⁻¹ soit un coefficient de variation de 25,9 % pour les valeurs estimées. En fait le RAR augmente quasi proportionnellement avec la profondeur du sol, et suit approximativement la référence proposée par REMY et HEBERT (1977) : 10 kg N.ha⁻¹ par horizon de 30 cm de profil. Cette valeur correspondrait à la valeur minimale des quantités d'azote minéral dans le sol, comme si les plantes ne pouvaient en absorber en dessous de cette "concentration". En réalité, cela correspond plutôt dans les horizons de surface à la trace instantanée du turn-over de l'azote, et en sous sol, au fait que la colonisation imparfaite des horizons profonds ne permet d'accéder à tout l'azote disponible.

On peut toutefois observer que l'enveloppe supérieure du nuage de points (graphique n° 32) reproduit bien cette tendance à l'augmentation de la valeur de RAR avec la profondeur du sol,



Graphique n° 33 - Relation entre la différence des valeurs de RAR mesuré et estimé (ΔRAR) et les quantités d'azote minéralisé issues du modèle Azodyn

mais avec une pente bien supérieure au modèle ($0,71 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ au lieu de 0.33 dans le modèle, pente calculée à partir des coordonnées des points 1 et 24).

Pour expliquer la grande variabilité de RAR, on peut avancer l'hypothèse suivante : une fraction de la minéralisation de l'azote organique a lieu alors que l'absorption par la plante est ralentie, et en particulier, à partir de la floraison. Dans ces conditions, la valeur de RAR serait également dépendante de la valeur de $N_{\min}$. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons confronté la part de l'azote absorbé à la floraison par des témoins non fertilisés en azote à la part de l'azote minéralisé à cette même époque, prévue par le modèle Azodyn. Les mesures d'azote absorbé par le peuplement à la floraison (P_{flo}) n'ont été effectuées qu'en 1995 sur 14 sites. Sur ces sites 69 % à 82 % de la valeur de P_0 étaient déjà absorbés à la floraison. Ces valeurs sont proches de celles observées par PLAS en 1992, à savoir 73,5 % (moyenne de 4 essais sur 2 années) et par MEYNARD (1985), en situation fertilisée à l'optimum (80 %).

Dans Azodyn, le calcul des quantités d'azote minéralisées est effectué de façon dynamique. Nous avons donc pu faire la part des quantités minéralisées à la floraison par rapport aux quantités cumulées à la récolte. Sur les années 1995 et 1996 et sur 28 sites, en moyenne, 48 % de la minéralisation nette du cycle a lieu avant la floraison. L'examen du nombre de jours normalisés (jours à 15°C) confirme ce constat puisqu'en moyenne, ils sont répartis à part égale avant et après floraison.

Le constat de ce décalage entre l'offre d'azote minéral du sol et la cinétique d'absorption par le peuplement suggère que pour des valeurs élevées d'azote minéralisable, la fraction non absorbée par le peuplement augmente et ainsi contribue à l'augmentation de la valeur de RAR. Ceci est confirmé par l'existence d'une relation significative au seuil de 1 % entre les valeurs de RAR et les quantités d'azote minéralisable prédites par $N_{\min}$ Azodyn :

$$\text{RAR mes} = 0,429 N_{\min} \text{ Azodyn} + 4,01 \quad r^2 = 37,08 \% \quad ****$$

Les différences entre les valeurs mesurées et prévues de RAR (dénommées ici ΔRAR) sont plus grandes pour les valeurs élevées de $N_{\min}$ Azodyn et inversement. Ainsi, sur dix valeurs pour lesquelles RAR est surestimé d'au moins 5 kg N.ha^{-1} , huit situations correspondent à une valeur de $N_{\min}$ dyn inférieures à 75 kg N.ha^{-1} . A l'inverse, sur sept valeurs pour lesquelles RAR est sous estimé d'au moins 5 kg N.ha^{-1} , six correspondent à une valeur de $N_{\min}$ dyn supérieure à 70 kg N.ha^{-1} (graphique n° 33 et tableau n° 26).

En définitive, le reliquat d'azote minéral après récolte est expliqué par la profondeur du sol et $N_{\min}$ Azodyn :

$$\text{RAR} = 0,1569 \text{ prof} + 0,3992 N_{\min} \text{ Azodyn} - 7,81 \quad r^2 = 47,18 \% \quad ****$$

Année	Station	RAR mesuré en kg N.ha ⁻¹	RAR estimé en kg N.ha ⁻¹	ΔRAR en kg N.ha ⁻¹	N dyn en kg N.ha ⁻¹	Prof en cm
1995	1	85	30	55	114	120
	2	40	25	15	80	60
	3	28	25	3	57	60
	4	34	40	-6	88	120
	5	31	25	6	72	50
	6	24	25	-1	95	70
	7	18	25	-7	51	60
	8	37	32	5	93	120
	12	25	25	0	66	70
	13	25	25	0	61	50
	14	17	15	2	45	35
	15	21	30	-9	87	90
	17	57	27	30	84	90
	18	55	37	18	80	110
1996	19	24	40	-15	45	120
	20	20	30	-10	47	90
	21	33	40	-7	47	120
	22	24	40	-16	57	120
	23	28	25	3	26	80
	24	21	15	6	61	30
	25	31	40	-9	37	120
	26	34	40	-6	73	120
	27	31	40	-9	50	120
	M	32,30	30,26			
	σ	15,02	7,83			
	CV	46,50 %	25,87 %			

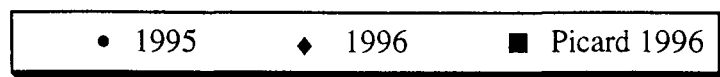
Tableau n° 27 - Valeurs de RAR mesuré, estimé par Azobil, de N minéralisé prévu par Azodyn et profondeur du sol pour les 23 stations étudiées.

4.3.3.3. Etude analytique des résultats de PC azote

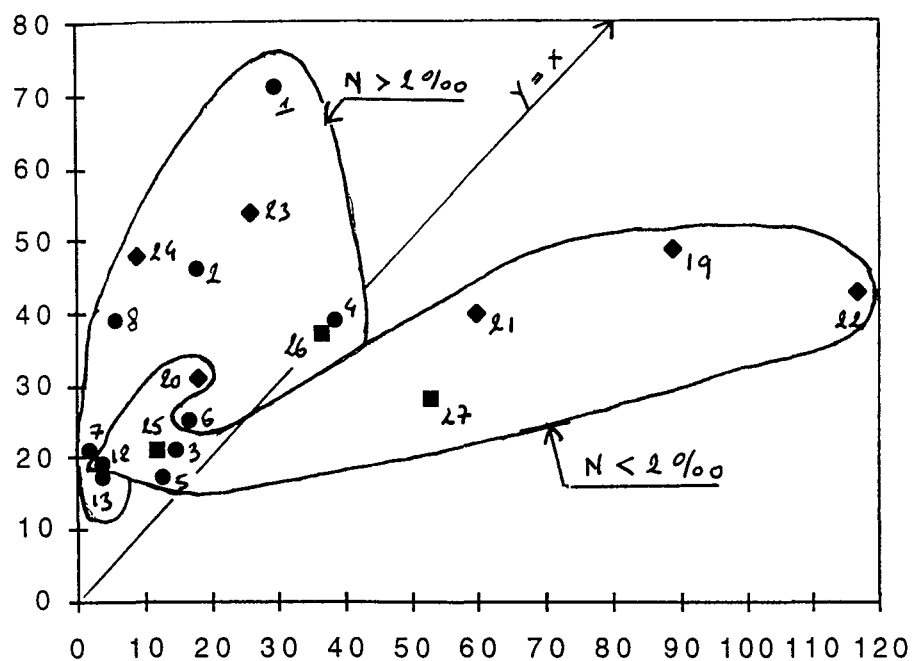
On a vu que la prévision de Po à partir de PC azote donne des résultats médiocres. Ce modèle simule les valeurs de Po à partir de deux sous modèles (prévision du RSH et prévision de la minéralisation de printemps accessible au blé) aussi examinerons-nous successivement la variabilité observée sur chacun de ces deux termes.

• Le reliquat sortie hiver : RSH

La confrontation des valeurs de RSH simulées et mesurées (graphique n° 34) montre que dans la grande majorité des situations, PC azote sous estime la valeur de RSH. Dans la mesure où les quantités d'azote lessivées sont calculées à partir du modèle proposé par BURNS (1976), celui-ci ayant été largement validé sur des expérimentations réalisées en cases lysimétriques (PLAS, 1992), l'erreur provient probablement de l'estimation du stock d'azote minéral soumis au lessivage hivernal (appelé Bp comme Bilan du précédent).



RSH mesuré en kg N.ha⁻¹



RSH prévu PC azote en kg N.ha⁻¹

Graphique n° 34 - Comparaison des valeurs de RSH mesurées et prévues par PC azote

$$Bp = RSH \text{ n}^{-1} + E - N_{\text{abs}} \text{ précéd} + \text{Min humus précéd} + \text{effet anteprec} + N \text{ irrigation sur le précéd}$$

- a) $RSH \text{ n}^{-1}$ = Reliquat sortie hiver du précédent
- b) E = Azote minéral apporté par l'engrais sur le précédent
- c) $N_{\text{abs}} \text{ précéd}$ = Quantité d'azote absorbé par le précédent
- d) Min humus précéd = Quantité d'azote minéralisé sur le cycle du précédent
- e) Effet anteprec. = Minéralisation nette des résidus de l'anteprecédent
- f) $N \text{ irrigation sur le précédent}$ = Quantité d'azote apporté par l'eau d'irrigation sur le précédent (valeur nulle en Lorraine)

Si le précédent est fertilisé à l'optimum, ce qui est généralement le cas dans le réseau OPAL, la source principale de l'azote minéral présent à l'entrée de l'hiver, et donc susceptible de contribuer au niveau de RSH, est la minéralisation après floraison, et surtout après récolte du précédent.

Or, la valeur prise en compte pour le poste d dans le logiciel PC azote est une valeur fixe : 75 kg N.ha^{-1} . Si on peut admettre qu'en Poitou-Charentes la standardisation des systèmes de culture génère des teneurs en azote organique des sols peu variables, et que les caractéristiques chimiques des sols qui influent sur les quantités d'azote minéralisées (argile, calcaire) sont également peu variables, il n'en est pas de même en Lorraine où on observe une grande variabilité pour ces trois paramètres :

- de 1,2 ‰ à 4 ‰ pour l'azote organique
- de 187 ‰ à 625 ‰ pour l'argile
- de 0 à 384 ‰ pour le calcaire

Sur le graphique n° 34 qui confronte les valeurs de RSH prévues par PC azote et celles réellement mesurées, on a identifié les situations pour lesquelles la teneur en azote est soit inférieure à 2 ‰, soit supérieure à 2 ‰ : on constate que la grande majorité des surestimations de RSH correspond aux valeurs inférieures à 2 ‰ et qu'inversement les sous estimations sont presque toujours le cas des valeurs supérieures à 2 ‰.

La non prise en compte de la teneur en azote organique des sols dans le calcul des quantités d'azote minéralisées avant le semis du blé, explique donc pour partie la différence observée entre les valeurs mesurées du terme RSH et celles prévues par PC azote.

• **Les quantités d'azote absorbées par le blé au moment du calcul du reliquat**

Dans PC azote, cette valeur est fixe, égale à 15 kg N.ha^{-1} . Or, l'examen des données Lorraines montre une valeur mesurée en moyenne beaucoup plus importante (30 kg N.ha^{-1}), assortie d'une grande variabilité : 8 kg N.ha^{-1} (station n° 16) à 49 kg N.ha^{-1} (station 23). Au total, seulement trois valeurs sont égales ou inférieures à 15 kg N.ha^{-1} . On peut donc imaginer, dans ces conditions que la sous estimation quasi systématique de ce poste explique pour partie la mauvaise prévision de la valeur de Po par PC azote.

4.3.3.4. Etude des résultats des grilles prédictives lorraines

La prévision, à partir de ces grilles, est effectuée globalement sur la base des types de sol et des systèmes de culture. Dans ces conditions, il est difficile pour expliquer la variabilité entre valeurs prévues et mesurées, de faire la part de ce qui revient aux différents termes qui constituent la valeur de Po, à savoir RSH, NSH et N min. On peut toutefois faire les observations suivantes :

- Les valeurs de Po qui sont le plus sous estimées par les grilles (stations 1, 4, 24 et 26) présentent à la fois des valeurs de NSH élevées (respectivement 37, 31, 42 et 45 kg N.ha^{-1}) et des teneurs en azote organique du sol élevées (respectivement 3,2, 2,3, 4,0 et 2,5 ‰).
- A l'inverse, les valeurs de Po qui sont le plus surestimées par la grille (stations 2, 19, 20, 21 et 25) présentent des valeurs plus faibles de NSH (respectivement 15, 14,8,30 et 31 kg N.ha^{-1}) et également des teneurs en azote organique du sol plus faibles (respectivement 2, 1,6, 1,7, 1,3 et 1,2 ‰).

Il est donc probable que la classification des systèmes de culture qui tient compte du précédent, du devenir des résidus de récolte, de la fréquence des apports organiques, et du passé prairial, n'est pas suffisamment précise pour rendre compte des variations de teneurs en azote du sol.

Année	Site	Traitement		Po en kg N.ha ⁻¹	Rendement en q.ha ⁻¹
		Date	Densité		
1994	Jovilliers	unique	faible	110	43,6
			moyenne	108	44,6
			forte	107	41,3
	Meligny	unique	faible	93	42,7
			forte	99	41,8
	Courcelles	unique	faible	111	44,4
			forte	110	49,1
	Liffol	précoce	unique	83	36,4
		tardive		84	38,1
1995	Mirecourt	précoce	faible	64	29,3
			forte	60	30,8
		moyenne	faible	59	33,3
			forte	62	37,7
		tardive	faible	58	27,3
			forte	59	25,7
	Lixières	précoce	forte	96	37,7
		moyenne	moyenne	75	35,8
			forte	77	31,3
		tardive	moyenne	88	36,3
1996	Mirecourt	unique	faible	93	38,2
			forte	87	33,6

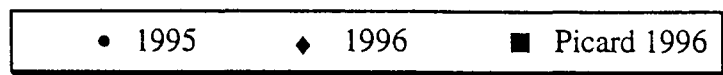
Tableau n° 28 - Valeurs de Po et du rendement sur des témoins non fertilisés en azote, pour différents traitements, densités x date de semis en 1994, 1995 et 1996.

On pourrait par ailleurs, évoquer l'incidence d'autres éléments des systèmes de culture, en particulier des densités et dates de semis, pour expliquer les écarts à la prévision. Les semis précoces et denses pourraient absorber plus d'azote à l'automne et pendant l'hiver et de ce fait, limiter les pertes hivernales de nitrates par rapport aux semis tardifs et clairs. Au total dans les mêmes conditions de milieu, cela conduirait à une valeur finale de Po plus élevée. Les observations réalisées sur des essais mis en place pour la modélisation du CAU (cf chapitre 5) montrent que dans la plupart des situations, il n'y a pas de différence marquée sur la valeur de Po entre dates et densités de semis (Tableau n° 28).

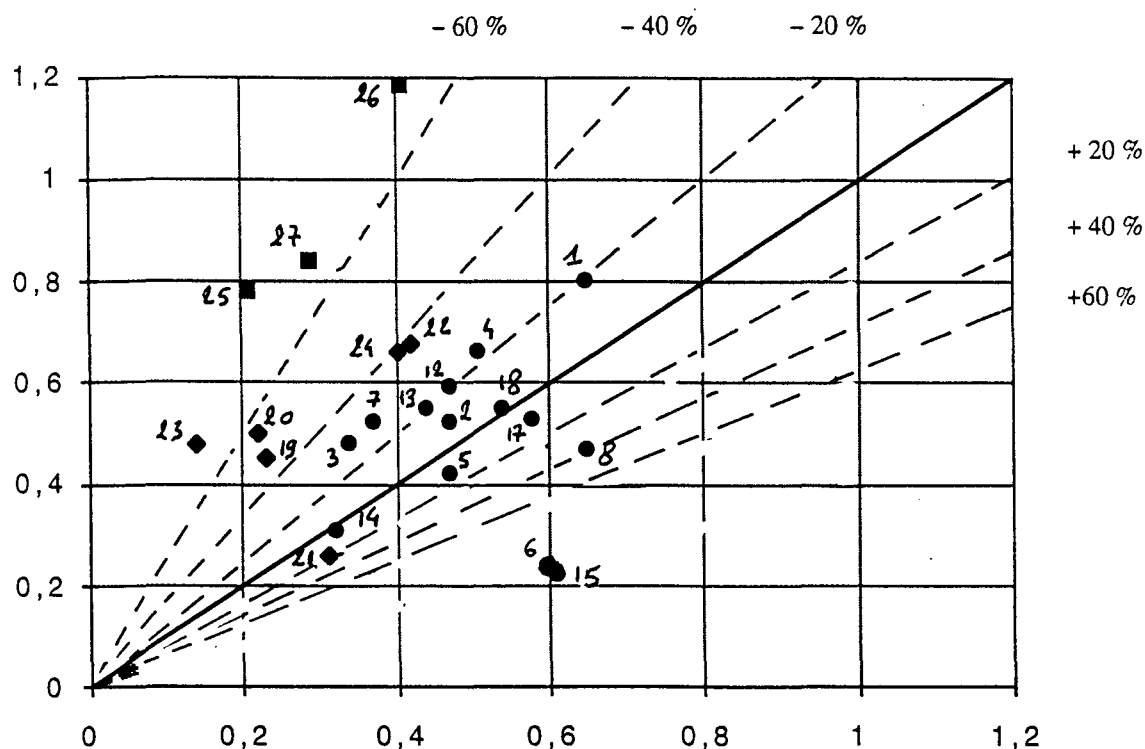
4.3.4. ETUDE ET MODELISATION DE LA MINERALISATION

Après avoir évalué différents modèles de prévision de la fourniture en azote du sol, et constaté leurs différences, nous essayerons dans ce chapitre de faire la part de ce qui revient à la minéralisation de l'humus et aux résidus de récolte. Pour ce faire, nous confronterons les résultats des modèles de minéralisation aux valeurs issues du bilan au champ, à savoir :

$$N_{\min} = Po - NSH - (RSH - RAR)$$



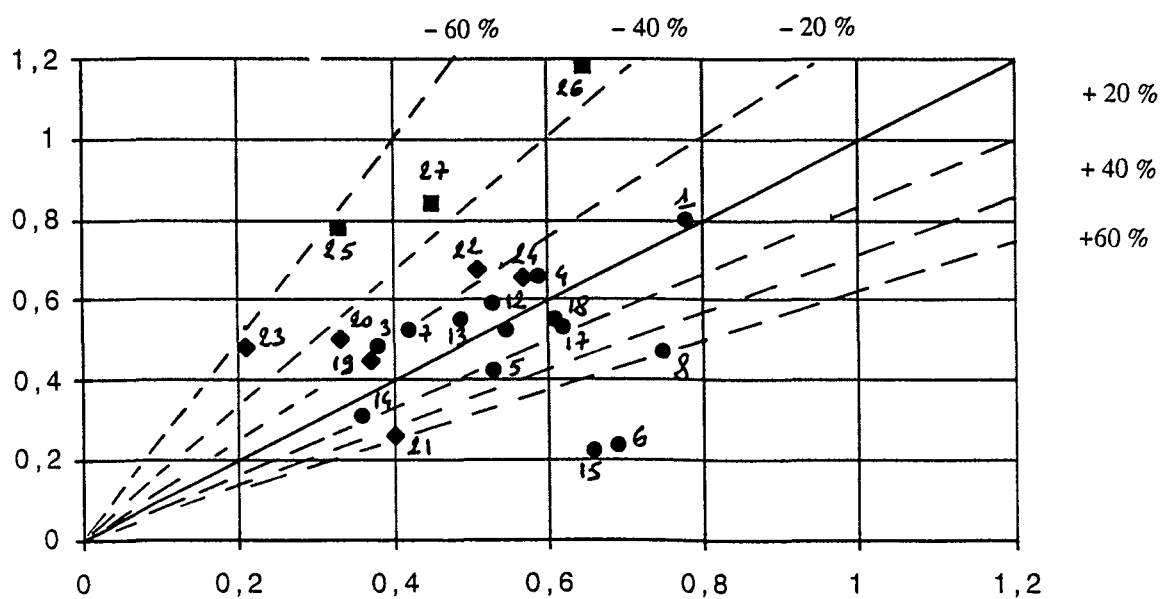
Bilan champ en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$



Nmin Azobil en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$

Graphique n° 35 a

Bilan champ en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$



Nmin Azodyn en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$

Graphique n° 35 b

4.3.4.1. Evaluation des modèles de minéralisation

Le tableau n° 29 récapitule les différents résultats obtenus : les valeurs issues du bilan au champ montrent une gamme de variations importante (de 0,22 à 1,18 kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹). Parmi les différents modèles testés, c'est Azodyn qui se rapproche le plus du bilan au champ, tant au niveau des valeurs extrêmes que de la moyenne. A l'opposé, PC azote sous estime largement les valeurs maximales et la moyenne, alors que Azobil et SUNDIAL ont un comportement intermédiaire (Tableau n° 30).

• Azobil

La comparaison des quantités d'azote minéralisées exprimées en kg d'azote par hectare et par jour à 15°C, avec celles issues du bilan au champ, est présentée sur le graphique n° 35a. On remarque qu'à l'exception de la station 21, toutes les valeurs 1996 sont sous estimées alors que celles de 1995 sont globalement bien réparties autour de la bissectrice.

• Azodyn

Là encore, à l'exception de la station 21, toutes les valeurs de 1996 sont sous estimées par Azodyn, mais dans l'ensemble, moins qu'avec le modèle Azobil (graphique n° 35b).

• SUNDIAL

A l'exception de la station n° 18, le modèle conduit à l'obtention de valeurs très stables (entre 0,4 et 0,5 kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹).

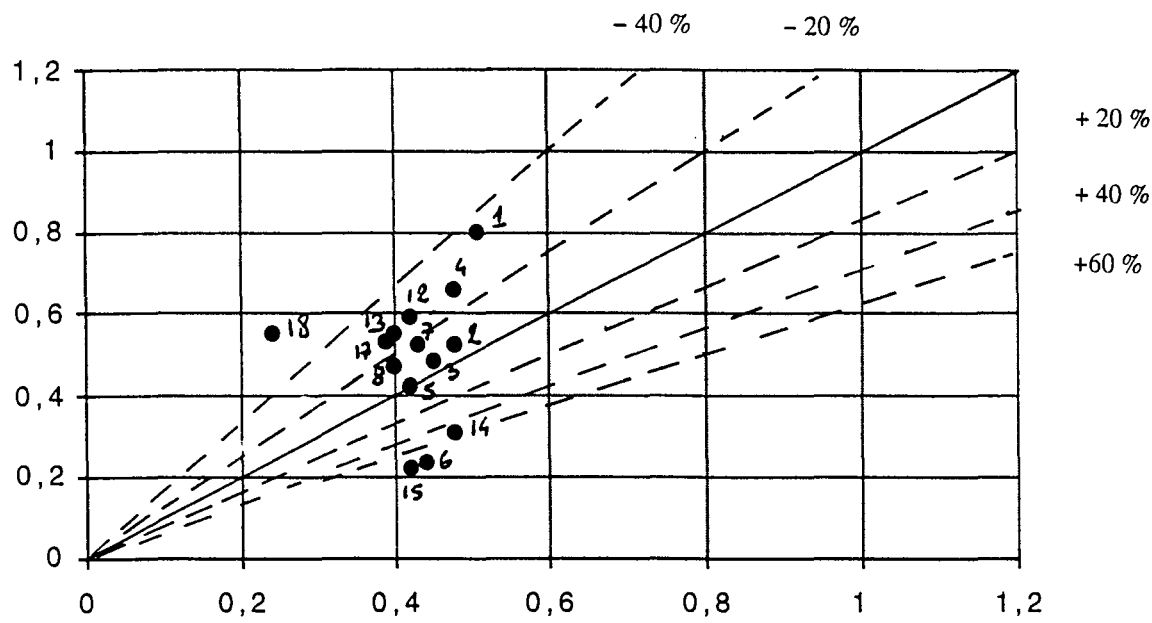
De plus, la plupart des situations (11/14) sont sous estimées. S'agissant de données issues des stations suivies en 1995, ces résultats divergent de ceux observés pour Azobil ou Azodyn (graphique n° 35c).

• PC azote

Comme pour le modèle précédent, les valeurs issues de test de PC azote sont très stables (0,22 à 0,34 kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹) et 17 valeurs sur 19 sont sous estimées (graphique n° 35d).

En résumé, les modèles SUNDIAL et PC azote prédisent des valeurs de minéralisation très stables, quel que soit le site considéré : 0,4 à 0,5 kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹ pour SUNDIAL et 0,2 à 0,3 kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹ pour PC azote. A l'inverse d'Azobil et Azodyn, il n'apparaît pas d'effet année marqué. Les prévisions sont relativement mauvaises dans les deux cas (à ± 20 % dans 5 cas

Bilan champ en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$



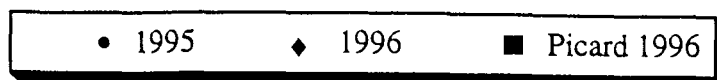
SUNDIAL en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$

Graphique n° 35c

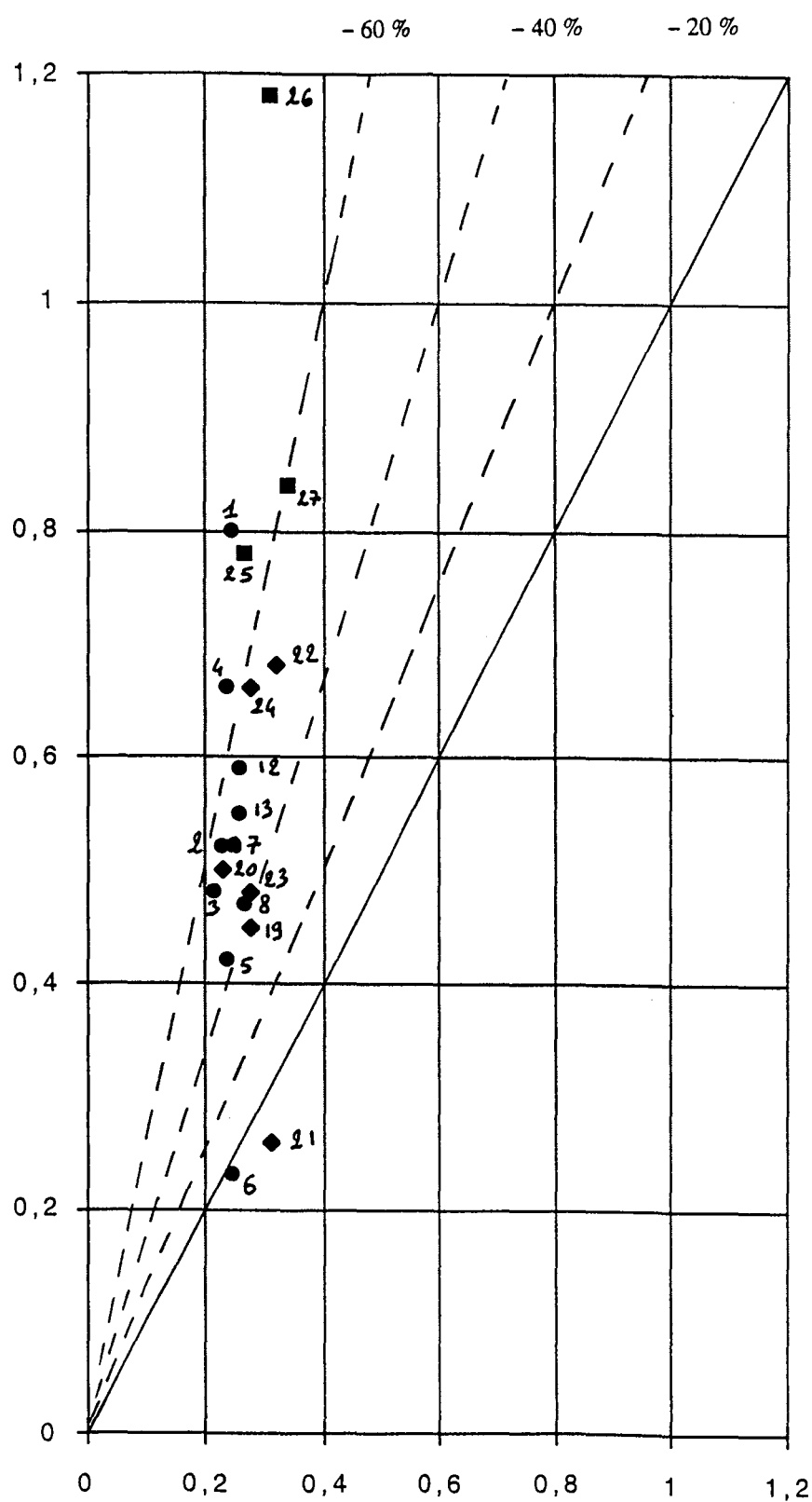
sur 14 pour SUNDIAL et dans 2 cas sur 19 pour PC azote). En revanche, Azobil et Azodyn sont plus proches du bilan au champ à ± 20 % respectivement dans 8 cas sur 23 et 11 cas sur 23 (Tableau n° 31)

Site	Bilan champ	N min Azobil	N min Azodyn	N min Azodyn CaCO ₃	SUNDIAL	PC azote	N min incub 2/3 HCC
1995							
1	0,80	0,65	0,78	0,89	0,51	0,25	0,95
2	0,52	0,47	0,55	0,62	0,48	0,23	1,00
3	0,48	0,34	0,38	0,47	0,45	0,22	1,09
4	0,66	0,51	0,59	0,62	0,48	0,24	1,04
5	0,42	0,47	0,53	0,54	0,42	0,24	0,84
6	0,23	0,60	0,69	0,69	0,44	0,25	ND
7	0,52	0,37	0,42	0,42	0,43	0,23	0,42
8	0,47	0,65	0,75	0,75	0,40	0,27	0,68
9	ND	0,46	0,51	0,53	0,36	ND	0,60
10	ND	0,80	0,92	0,92	0,41	ND	0,66
11	ND	0,59	0,67	0,67	0,39	ND	0,57
12	0,59	0,47	0,53	0,53	0,42	0,26	0,78
13	0,55	0,44	0,49	0,67	0,40	0,26	0,83
14	0,31	0,32	0,36	0,39	0,48	ND	0,87
15	0,22	0,61	0,66	0,66	0,42	ND	0,41
16	ND	0,54	0,71	0,77	0,43	ND	ND
17	0,53	0,58	0,62	0,66	0,39	ND	1,02
18	0,55	0,54	0,61	0,61	0,24	ND	0,62
1996							
19	0,45	0,23	0,37	0,37	ND	0,28	ND
20	0,50	0,22	0,33	0,34	ND	0,23	ND
21	0,26	0,31	0,40	0,40	ND	0,31	ND
22	0,68	0,42	0,51	0,51	ND	0,32	ND
23	0,48	0,14	0,21	0,28	ND	0,28	ND
24	0,66	0,40	0,57	0,57	ND	0,28	ND
25	0,78	0,21	0,33	0,35	ND	0,27	ND
26	1,18	0,41	0,65	0,65	ND	0,31	ND
27	0,84	0,29	0,45	0,45	ND	0,34	ND

Tableau n° 29 - Valeurs des quantités d'azote minéralisé (en kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹) calculées à partir du bilan au champ et prévues à partir des différents modèles.



Bilan champ en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$



PC azote en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$

Graphique n° 35 d

Graphique n° 35 - Relation entre les quantités d'azote minéralisé, calculées à partir du bilan au champ et les valeurs prévues par différents modèles

	Bilan au champ			Azobil			Azodyn			SUNDIAL			PC azote		
	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy
1	0,22	1,18	0,55	0,14	0,65	0,42	0,21	0,78	0,51						
2	0,22	0,80	0,49	0,14	0,65	0,44	0,21	0,78	0,52						
3	0,22	0,80	0,48	0,32	0,65	0,50	0,36	0,78	0,57	0,24	0,51	0,43			
4	0,23	0,80	0,58	0,14	0,65	0,40	0,21	0,78	0,53				0,22	0,34	0,27

1 : 23 stations 95 + 96 ; 2 : 20 stations 95 + 96 (les 3 stations PICARD sont exclues) ; 3 : 14 stations 95 (test SUNDIAL) ; 4 : 19 stations 95 + 96 (test PC azote)

Tableau n° 30 - Valeurs moyennes, minimales et maximales des quantités d'azote minéralisées (en kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹) pour le bilan au champ et les différents modèles de minéralisation.

	Nombre de cas où la valeur prévue par le modèle de minéralisation se situe dans la fourchette $\pm x$ % de la valeur calculée à partir du bilan au champ		
	x = ± 20 %	x = ± 40 %	x = ± 60 %
Azobil	8/23	15/23	17/23
Azodyn	11/23	17/23	21/23
Azodyn sans CaCO ₃	12/23	17/23	21/23
PC azote	2/19	3/19	15/19
N min incub 2/3 HCC	3/13	4/13	7/13
SUNDIAL	5/14	11/14	14/14

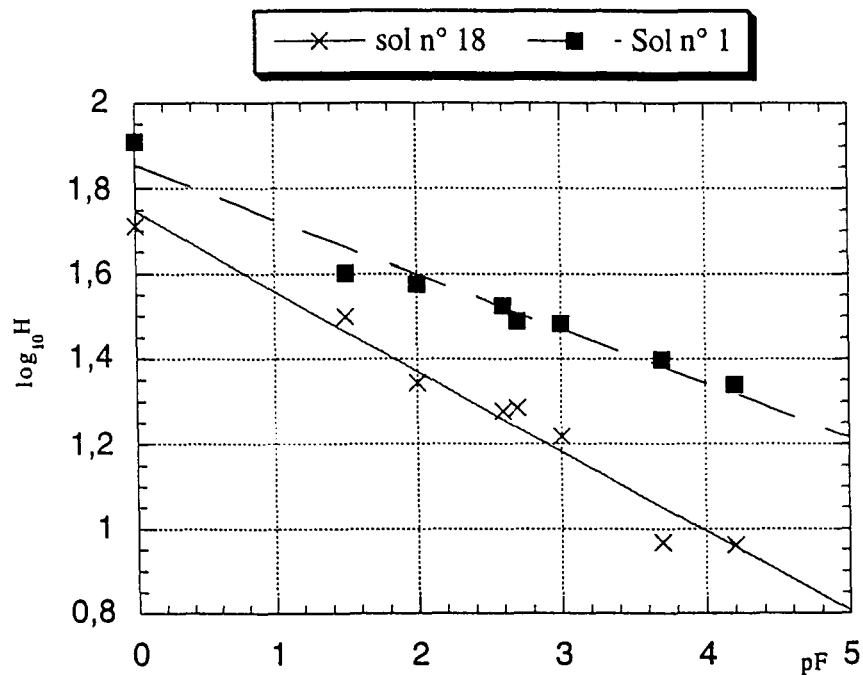
Tableau n° 31 - Résultats de l'évaluation des différents modèles de minéralisation confrontés au bilan au champ.

4.3.4.2. Résultats des incubations

4.3.4.2.1. Caractéristiques hydriques des sols soumis à incubation

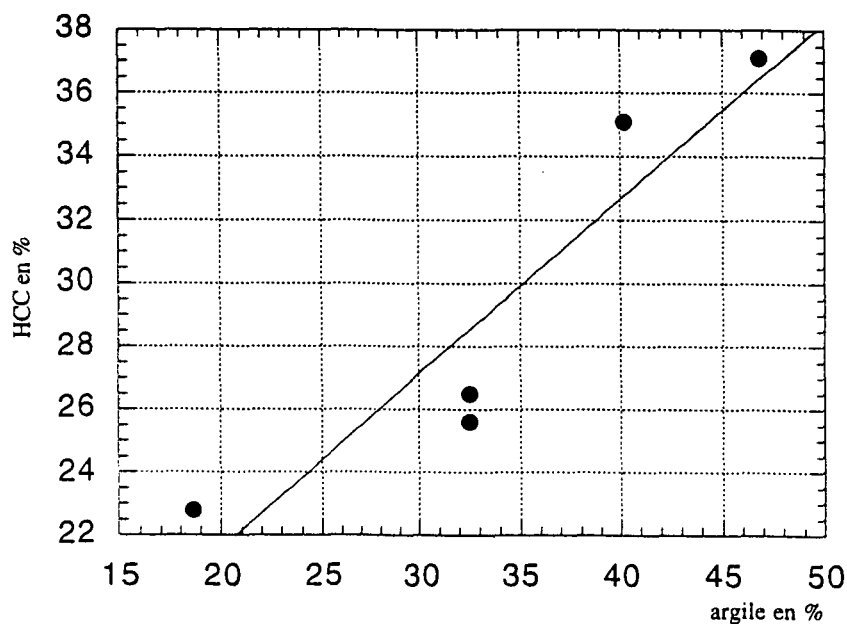
• Relation humidité/potentiel

Les résultats des humidités, exprimés en % de la terre sèche, mesurée aux différentes valeurs de potentiel hydrique (de la saturation à -16000hpa, correspondant à des pF de 0 à 4,2) sont présentés en annexe n° 5.



Graphique n° 36 - Relation entre l'humidité et le potentiel hydrique : exemple pour les sols n° 1 et n° 18.

Sol n° 1 : $\log_{10}H = -0,129 \text{ pF} + 1,859$ $r^2 = 96,54 \%$ *****
 Sol n° 18 : $\log_{10}H = -0,188 \text{ pF} + 1,747$ $r^2 = 96,88 \%$ *****



Graphique n° 37 - Relation entre l'humidité à la capacité au champ (HCC) et la teneur en argile.

$HCC = 0,553 \text{ argile} + 6,60$ $= 85,89 \%$ **

On observe une gamme de variations importante selon les types de sol. Par exemple pour les valeurs de pF extrêmes (0 et 4,2) les humidités varient respectivement de 51 % à 81 % et de 9 % à 22 % selon qu'il s'agit du sol n° 1 (argile lourde) ou du sol n° 18 (limon sablo-argileux). A quelques exceptions près (sols 13 et 18), pour la mesure à pF 2,7 et sols 2, 4, 6, 12 et 14 pour la mesure à pF 3, les humidités diminuent régulièrement quand le potentiel hydrique baisse (ou quand le pF augmente). Les relations statistiques entre ces deux variables sont consignées dans le tableau n° 32. Elles sont linéaires et toutes significatives au seuil de 1 %. Le graphique n° 36 montre deux de ces relations (échantillon 1 et 18 correspondant aux sols ayant la teneur en argile la plus faible et la plus forte).

Après correction de la valeur de l'humidité à la mise en incubation (30,3 % à 55,0 % pour les valeurs extrêmes, respectivement site n° 9 et n° 16), ces relations permettent de recalculer la valeur du pF à la mise en incubation. Comme prévu, compte tenu de l'erreur de manipulation évoquée au chapitre 4.2.3.1., on constate des valeurs de pF bien inférieures à la valeur recherchée (2,7), la grande majorité des échantillons se situant entre 1 et 1,8 (Tableau n° 32)

• Calcul des humidités à la capacité au champ

Les mesures ont été effectuées sur les échantillons n° 18, 15, 5, 17 et 7, présentant une gamme de teneurs en argile de 18,5 % à 46,8 % et une gamme de teneurs en matière organique de 2,39 % à 3,70 % (Tableau n° 33). La mise en relation des résultats des mesures d'humidité avec ces deux paramètres donne les résultats suivants :

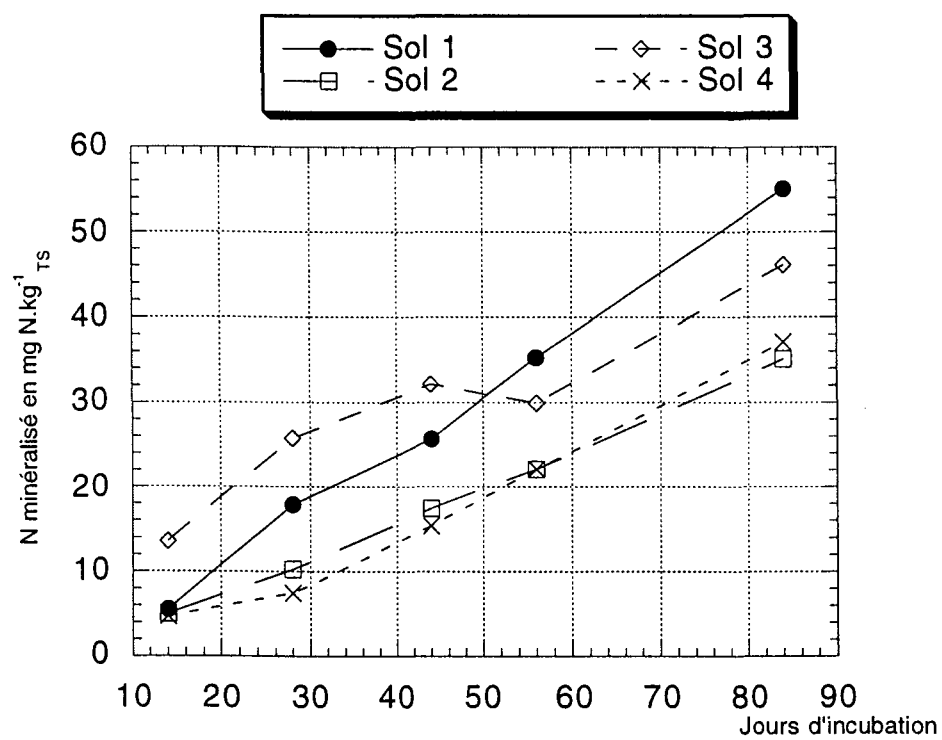
$$\text{Relation 1} \quad \text{HCC} = 0,4298 \text{ Arg} + 2,9853 \text{ Mo} + 6,60$$

$$r^2 = 88,63 \% \quad \text{ddl} = 2 \quad *$$

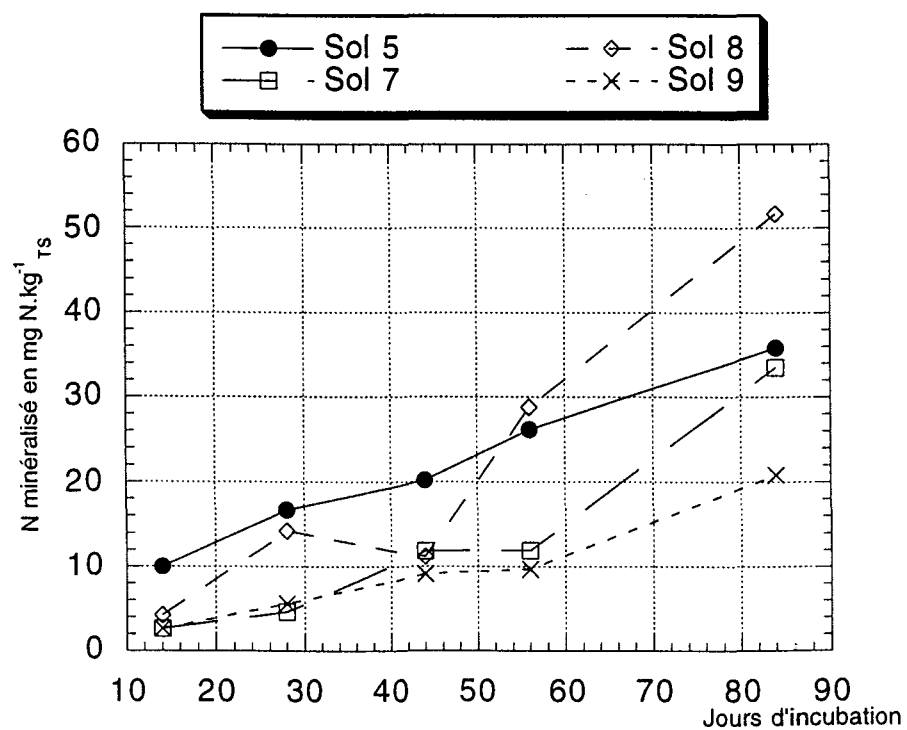
$$\text{Relation 2} \quad \text{HCC} = 0,5530 \text{ Arg} + 10,5$$

$$r^2 = 85,89 \% \quad \text{ddl} = 3 \quad **$$

Malgré un coefficient de détermination plus élevé, la relation 1 n'est significative qu'au seuil de 10 %. Nous avons donc choisi d'utiliser la relation 2 pour effectuer le calcul de la valeur de l'humidité à la capacité au champ pour l'ensemble des stations (graphique n° 37). Les résultats sont consignés dans le tableau n° 32.



Graphique n° 38 a



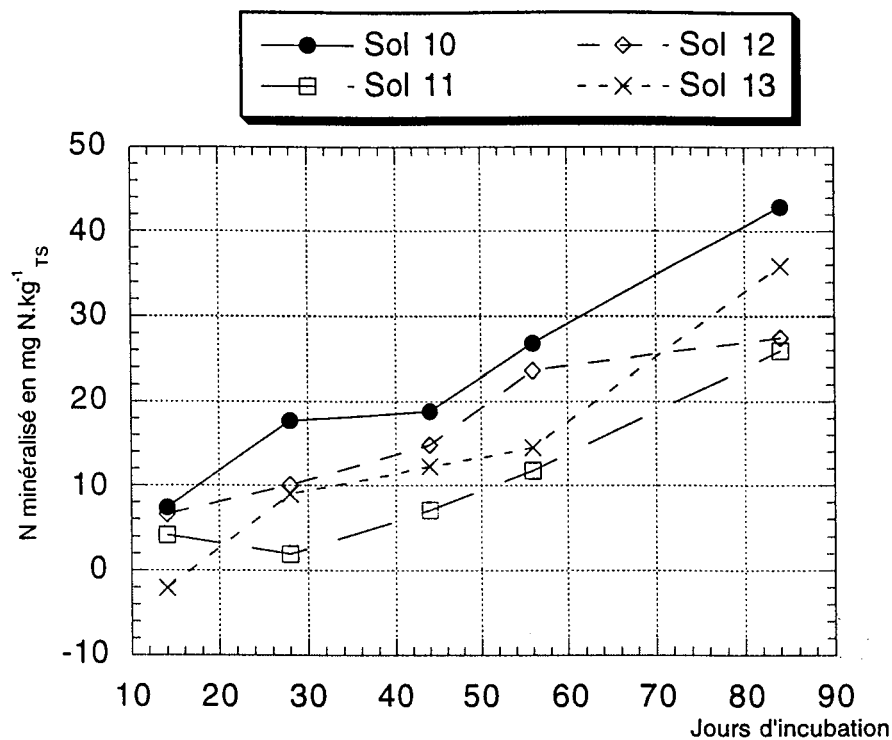
Graphique n° 38 b

Site	Relation $H = f(pF)$	r^2 en %	H incub	pF H incub	HCC	pF HCC
1	$\log H = -0,129 pF + 1,859$	96,54	53,0	1,04	39,6	2,02
2	$\log H = -0,134 pF + 1,809$	98,94	38,8	1,63	39,8	1,56
3	$\log H = -0,133 pF + 1,783$	97,21	40,8	1,29	42,2	1,18
4	$\log H = -0,122 pF + 1,807$	95,25	46,2	1,16	46,2	1,16
5	$\log H = -0,151 pF + 1,782$	98,82	34,8	1,58	30,3	1,99
6	$\log H = -0,139 pF + 1,802$	98,53	35,8	1,78	36,3	1,74
7	$\log H = -0,138 pF + 1,820$	98,74	46,1	1,12	38,4	1,70
8	$\log H = -0,151 pF + 1,841$	97,62	42,5	1,59	34,8	1,60
9	$\log H = -0,117 pF + 1,796$	98,70	30,3	1,82	29,9	2,73
10	$\log H = -0,140 pF + 1,834$	98,41	45,4	1,19	31,9	2,35
11	$\log H = -0,196 pF + 1,830$	96,98	33,1	1,57	22,7	2,41
12	$\log H = -0,159 pF + 1,788$	98,58	33,3	1,66	31,7	1,80
13	$\log H = -0,141 pF + 1,786$	94,42	41,7	1,18	34,5	1,76
14	$\log H = -0,136 pF + 1,777$	96,98	41,4	1,17	34,0	1,80
15	$\log H = -0,158 pF + 1,814$	99,15	41,6	1,23	26,7	2,45
16	$\log H = -0,157 pF + 1,856$	97,96	55,0	0,74	32,1	2,22
17	$\log H = -0,158 pF + 1,841$	97,86	46,9	1,07	33,5	2,00
18	$\log H = -0,188 pF + 1,746$	96,88	33,9	1,15	21,2	2,23

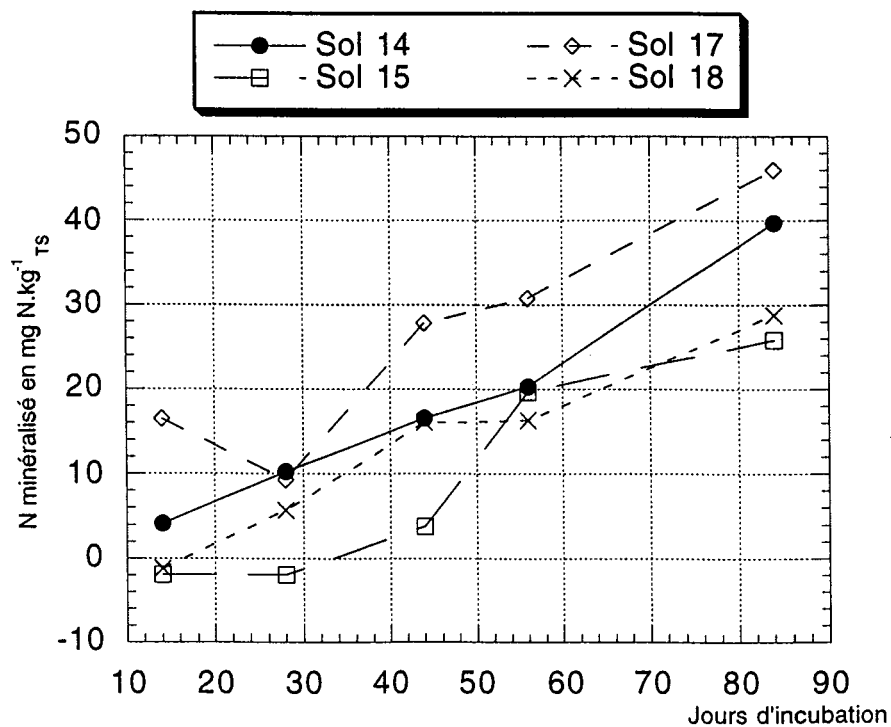
Tableau n° 32 - Relation humidité/pF pour les sols mis en incubation. Valeur de l'humidité réelle à la mise en incubation et pF correspondant. Valeur de l'humidité à la capacité au champ (HCC) et pF correspondant.

n° échantillon	% argile	% matières organiques	Humidité à la capacité au champ (HCC) en %
18	18,6	2,39	22,8
15	32,5	2,50	26,5
5	32,5	2,36	25,6
17	40,2	2,70	35,1
7	46,8	3,70	37,1

Tableau n° 33 - Caractéristiques des échantillons pour lesquels la capacité au champ a été mesurée.



Graphique n° 38 c



Graphique n° 38 d

graphiques n° 38 - Cinétique de minéralisation des sols mis en incubation

a : sols 1, 2, 3 et 4

b : sols 5, 7, 8 et 9

c : sols 10, 11, 12 et 13

d : sols 14, 15, 17 et 18

4.3.4.2.2. Les quantités d'azote minéralisé

L'examen des cinétiques de minéralisation montre qu'il existe une relation nette entre les quantités d'azote minéralisé et la durée d'incubation (graphique n° 38). A l'exception des sols n° 6 et n° 16 qui présentent une cinétique désordonnée et pour lesquels l'ajustement linéaire n'est pas significatif, toutes les relations sont significatives au moins au seuil de 2 % (Tableau n° 34).

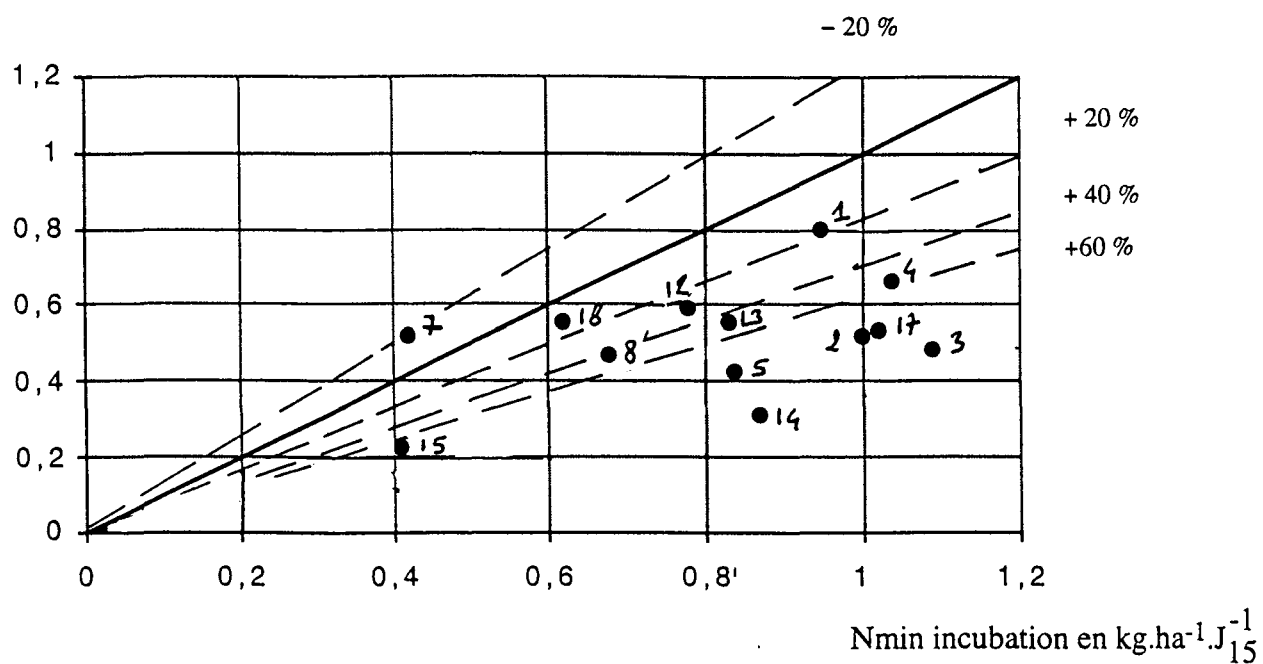
Les valeurs maximales obtenues après 85 jours d'incubation varient de 20,8 mg N.kgTS pour le sol n° 9 à 55,1 pour le sol n° 1 alors que les vitesses varient dans une gamme de 0,25 mg N.kgTS.J₁₅⁻¹ à 0,69 (toujours pour les sols n° 9 et n° 1) (Tableau n° 34).

n°	a	b	r ² en %	signification
1	0,694	-3,48	99,55	*****
2	0,431	-1,52	99,85	*****
3	0,416	10,69	91,32	***
4	0,479	-4,31	98,27	*****
5	0,362	5,39	99,18	*****
6	-0,030	87,85	0,08	NS
7	0,433	-6,71	90,35	****
8	0,666	-8,10	90,34	****
9	0,250	-1,74	94,87	****
10	0,482	0,90	96,36	****
11	0,315	-3,48	89,11	***
12	0,318	2,11	94,17	****
13	0,499	-8,66	94,17	****
14	0,495	-4,21	97,39	*****
15	0,449	-11,23	88,50	***
16	0,246	-6,00	40,42	NS
17	0,487	4,05	86,32	**
18	0,419	-5,82	96,97	****

Tableau n° 34 - Valeurs des coefficients de la régression (a) et des ordonnées à l'origine (b) pour la relation entre les quantités d'azote minéralisé (en mg N.kg de terre sèche) et le temps (en jour à 15°C).

La vitesse de minéralisation la plus élevée (0,69 mg N.kgTS⁻¹.J₁₅⁻¹) est obtenue pour la teneur en azote la plus forte (3,2 ‰, station n° 1). A l'inverse, les valeurs les plus faibles (0,25 et

Bilan champ en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$



Graphique n° 39 - Relation entre les quantités d'azote minéralisé, calculées à partir du bilan au champ et les valeurs issues des incubations

0,31 mg N.kgTS⁻¹.J₁₅⁻¹) correspondent aux teneurs en azote les plus faibles (1,2 ‰, stations 9 et 11).

La relation entre les valeurs de Vmin incub (mg N.KgTS⁻¹ pendant 85 jours) et la teneur en azote total est significative au seuil de 1 % :

$$V \text{ min incub} = 13,58 [N] (\pm 2,92) + 9,67 (\pm 6,25) \quad r^2 = 60,70 \% ****$$

[N] = teneur en azote en ‰.

Nous avons également calculé la relation à partir des valeurs de N min incub recalculées pour un même potentiel hydrique (-0,001 Mpa). Les résultats sont peu différents :

$$V \text{ min incub} = 12,11 [N] (\pm 3,10) + 15,74 (\pm 6,63) \quad r^2 = 52,29 \% ****$$

L'examen des intervalles de confiance au seuil de 5 %, de la pente et de l'ordonnée à l'origine montrent qu'en fait, les relations ne sont pas significativement différentes. Sous réserve de l'hypothèse de validité de la relation d'ANDREN et PAUSTIAN jusqu'à -0,001 Mpa, ces résultats suggèrent que le fait d'avoir conduit les incubations à des pF différents selon les types de sols, n'a pas généré de biais important sur les quantités d'azote minéralisé.

4.3.4.2.3. Confrontation des résultats avec le bilan au champ

Après transformation des résultats d'incubation en kg N.ha⁻¹.J₁₅⁻¹ selon la méthodologie décrite au chapitre 4.2.4., nous avons pu les confronter, au même titre que les modèles de minéralisation, aux valeurs issues du bilan au champ (graphique n° 39). On observe une surestimation générale. La prévision est fiable à : ± 20 % dans 3 cas sur 13, ± 40 % dans 4 cas sur 13 et ± 60 % dans 7 cas sur 13 (Tableau n° 31).

n°	Résultats des incubations				Transposition au champ					
	1	2	3	4	Densité apparente du sol	Profondeur du sol en cm	5	6	7	8
	mg N/KgTS pendant 85 j	potentiel hydrique en Mpa (H incub)	Facteur humidité	Mg N/KTS pendant 85 j au Pot hyd max -0,001 Mpa			kg.N.ha ⁻¹ pendant 85 j	potentiel hydrique en Mpa H = 2/3 HCC	Facteur humidité	kg N.ha ⁻¹ .J ₁₅ ⁻¹ à 2/3 HCC
1	55,2	-0,0011	0,99	55,8	1,40	27	210,8	-0,2455	0,38	0,95
2	35,2	-0,0043	0,84	42,0	1,45	27	164,5	-0,0758	0,52	1,00
3	46,1	-0,0019	0,93	49,8	1,45	27	195,1	-0,0320	0,61	1,09
4	37,1	-0,0014	0,96	38,7	1,45	27	151,5	-0,0404	0,59	1,04
5	35,8	-0,0038	0,85	42,1	1,40	27	159,1	-0,1393	0,45	0,84
7	33,6	-0,0013	0,97	34,6	1,40	27	72,2	-0,0924	0,49	0,42
8	50,0	-0,0025	0,90	55,5	1,45	27	217,5	-0,0312	0,61	0,68
9	20,8	-0,0066	0,79	26,4	1,40	27	99,7	-0,0777	0,51	0,60
10	42,9	-0,0015	0,95	45,1	1,45	27	176,6	-0,4489	0,32	0,66
11	26,0	-0,0039	0,85	30,7	1,45	27	120,0	-0,2048	0,40	0,57
12	27,5	-0,0046	0,83	33,1	1,45	27	129,7	-0,0801	0,51	0,78
13	35,8	-0,0015	0,95	37,5	1,45	27	147,0	-0,1034	0,48	0,83
14	39,7	-0,0015	0,96	41,5	1,40	27	156,9	-0,1137	0,47	0,47
15	25,8	-0,0017	0,94	27,4	1,40	27	103,7	-0,3671	0,34	0,41
17	46,1	-0,0012	0,98	46,9	1,50	27	190,1	-0,1301	0,46	1,02
18	28,8	-0,0014	0,96	30,0	1,45	27	117,3	-0,1371	0,45	0,62

Tableau n° 35 - Résultats des incubations

- 1 = Quantité d'azote minéralisé pendant 85 j, à 15°C, à l'humidité réelle d'incubation
- 2 = Potentiel hydrique correspondant à l'humidité réelle d'incubation
- 3 = Facteur humidité calculé d'après la formule d'Andren et Paustian, pour le potentiel hydrique correspondant à l'humidité d'incubation
- 4 = Quantité d'azote minéralisé pendant 85 j, à 15°C, à une humidité correspondant à un potentiel hydrique = -0,001 Mpa
- 5 = Quantité d'azote minéralisé pendant 85 j, à 15°C, à l'humidité d'incubation, en kg N.ha⁻¹
- 6 = Potentiel hydrique correspondant à une humidité égale à 2/3 de l'humidité à la capacité au champ
- 7 = Facteur humidité correspondant à une humidité égale à 2/3 de l'humidité à la capacité au champ
- 8 = Quantité d'azote minéralisé en kg ha⁻¹.J₁₅⁻¹ à 2/3 de l'humidité à la capacité au champ

4.3.5. DISCUSSION PARTIELLE

4.3.5.1. Azobil et Azodyn

De la même façon que pour la prévision du terme P_o , on observe assez nettement un effet année : les valeurs d'azote minéralisé sont systématiquement sous estimées pour l'année 1996. L'année 1996 est plus froide que l'année 1995 et ce, quelle que soit la période considérée :

- 1691 dj en 1996 contre 1830 dj en 1995, valeurs moyennes sur la période ouverture du bilan - récolte, base de calcul pour Azodyn
- 3232 dj en 1996 contre 3856 dj en 1995, valeurs moyennes sur l'année, base de calcul pour Azobil.

Dans ces conditions, il apparaît logique que les deux modèles prévoient des quantités d'azote minéralisé en moyenne plus faibles en 1996 qu'en 1995. En réalité, les valeurs moyennes issues du bilan au champ sont pratiquement identiques (si on excepte les 3 parcelles PICARD en 1996) (Tableau n° 36).

Année \ N minéralisé	Azobil	Azodyn	Bilan au champ
1995	0,50	0,57	0,49
1996	0,29	0,42	0,65
1996 sans parcelles PICARD	0,29	0,40	0,51

Tableau n° 36 - Valeurs moyennes par année des quantités d'azote minéralisé pour Azobil, Azodyn et le Bilan au champ ($\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$).

Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce décalage entre les modèles et le bilan au champ :

- Les variations de la température de l'air (température prise en compte dans le calcul des facteurs climatiques) n'auraient pas eu la même répercussion selon les années sur la température du sol, qui toutes choses égales par ailleurs, règle la vitesse de minéralisation. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons étudié sur la station INRA de MIRECOURT, pour laquelle les deux données sont disponibles (température moyenne décadaire sous abri à 2 m et température moyenne décadaire à -10 cm) la relation entre ces deux valeurs en 1995 et 1996, pour la période sur laquelle est calculée la minéralisation, à savoir du 1er mars au 20 juillet.

Les ajustements linéaires sont les suivantes

$$1995 \text{ Ts} = 1,055 \text{ Tat} + 1,35 \quad r^2 = 96,63 \% \text{ *****}$$

$$1996 \text{ Ts} = 1,055 \text{ Tat} + 1,27 \quad r^2 = 97,27 \% \text{ *****}$$

Ts = température du sol

Tat = température de l'atmosphère

La similitude des pentes et des ordonnées à l'origine conduit à rejeter cette hypothèse

- La deuxième hypothèse concerne les effets de l'excès d'eau. En situation d'anoxie, l'oxygène du nitrate peut être utilisé par les microorganismes du sol pour assurer leur métabolisme, le transformant ainsi en azote gazeux (N₂ ou N₂O). C'est le phénomène de la dénitrification qui peut conduire à des pertes d'azote non négligeables (ADDISCOTT et POWLSON, 1992).

Nous ne disposons pas de mesures d'humidité suffisamment fréquentes et nombreuses pour étayer cette hypothèse, mais nous pouvons noter que les pluviométries en fin d'hiver et au printemps 1995 étaient beaucoup plus importantes qu'en 1996 (Tableau n° 37). Par exemple, entre janvier et avril au poste de Nancy, la pluviométrie cumulée atteint 180 % de la moyenne calculée sur les 43 dernières années alors qu'elle est à peu près normale sur mai et juin. On peut admettre, dans ces conditions, que les quantités d'azote minéralisées au début du printemps puissent avoir été soumises à une dénitrification partielle ce qui, malgré des températures moyennes plus élevées en 1995, conduirait à des valeurs du bilan au champ peu différentes.

pluviométrie cumulée	METZ		VITTEL		NANCY		
	1994 à 1995	1995 à 1996	1994 à 1995	1995 à 1996	1994 à 1995	1995 à 1996	Moyenne 43 années
Octobre Novembre Décembre	145	122	178	132	155	148	193
Janvier Février Mars Avril	293	87	422	84	391	72	216
Mai Juin	79	105	148	137	126	117	136

Tableau n° 37 - Pluviométrie cumulée d'octobre à décembre, de janvier à avril et de mai à juin en 1995 et 1996 pour les postes de METZ, VITTEL et NANCY et valeur moyenne des 43 dernières années (1995 à 1997) au poste de NANCY

Un dernier point concerne la comparaison des deux modèles. On a vu que globalement, les résultats 1996 sont moins bien prévus que ceux de 1995. Mais ceci est moins vrai pour Azodyn

• 1995

◆ 1996

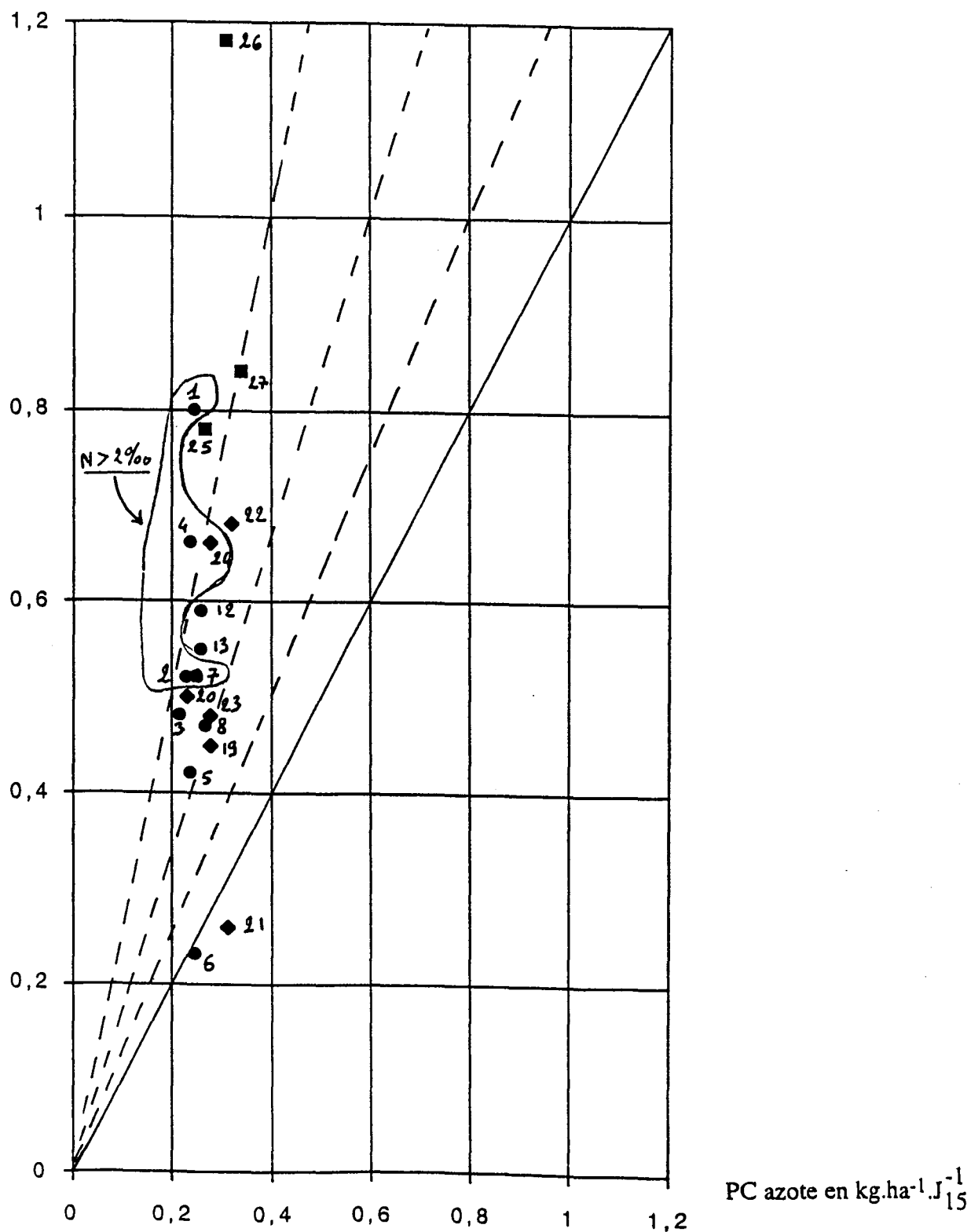
■ Picard 1996

Bilan champ en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$

- 60 %

- 40 %

- 20 %



Graphique n° 40 - Relation entre les quantités d'azote minéralisé, calculées à partir du bilan au champ et les valeurs prévues par PC azote

que pour Azobil (Tableau n° 30). Pour Azobil, la diminution de minéralisation entre 1995 et 1996 est de 41 % ($0,50 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}_{15}^{-1}$ en 1995 contre 0,29 en 1996), alors que pour Azodyn la diminution (de 0,57 en 1995 à 0,42 en 1996) ne représente que 26,3 %. Ceci est à rapprocher des conditions de température moyenne précédemment évoquées : pour Azodyn, la diminution relative de la température (exprimée en somme de degrés-jour) de 1996 par rapport à 1995 représente 7,6 % alors que pour Azobil elle représente 16,2 %. Dans ces conditions, le modèle Azodyn, pour lequel on utilise les températures sur la période de minéralisation, rend mieux compte des quantités réellement minéralisées qu'Azobil, pour lequel on utilise la température moyenne annuelle qui s'avère dans ce cas plus variable entre les deux années.

4.3.5.2. SUNDIAL et PC Azote

On a vu que ces deux modèles sous estiment assez systématiquement les quantités d'azote minéralisé prévues par le bilan au champ. Ceci est particulièrement vrai pour PC Azote. Dans ce modèle (cf chapitre 4.2.2.1.) seule la réserve utile est prise en compte pour moduler une quantité fixe d'azote ($30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) issue de la minéralisation. Or, l'examen de nos données montre que le sol le moins profond (station n° 24) possède la teneur en azote organique la plus élevée (4 ‰). A l'inverse, les sols les plus profonds (> 120 cm) pour lesquels la réserve utile est la plus élevée, peuvent présenter des teneurs en azote organique très variables. Par exemple, les sols n° 1 et n° 26 présentent des teneurs en azote respectivement de 3,2 et 2,5 ‰ alors que les sols n° 21, 22, 25 et 27 présentent des teneurs en azote respectivement de 1,3, 1,2, 1,2 et 1,2 ‰.

On peut vérifier sur le graphique n° 40 qu'à l'exception des stations 6, 25, 26 et 27 pour lesquelles il existe une incertitude sur la valeur du bilan au champ, les stations qui sont les plus sous estimées par le modèle (1, 2, 4, 7 et 24) correspondent à des teneurs en azote supérieures à 2 ‰.

Pour SUNDIAL, même si l'échantillon est différent, on remarque également une sous estimation assez systématique des valeurs d'azote minéralisé, mais avec moins de différences par rapport au bilan au champ que pour PC Azote. Nous sommes en fait dans une situation intermédiaire entre Azobil, Azodyn qui prennent en compte la teneur en azote organique du sol, et PC Azote. Dans ce modèle, les sols sont classés en trois grandes catégories par rapport à leur textures (sables, limons et argile). Le fait de leur attribuer une teneur en matières organiques croissante en fonction de la teneur en argile avec un C/N stable de 8,5 conduit à une modulation de la teneur en azote, mais probablement insuffisante pour rendre compte de la gamme des valeurs réelles de teneur en azote observées.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons réalisé des simulations pour 4 situations (2 en classe Argile et 2 en classe Limons, chacune étant contrastée par sa teneur en azote) en entrant la quantité réelle d'argile ou la quantité réelle d'azote organique. Le résultat de ces simulations

(Tableau n° 38) montre que l'azote minéralisé varie très peu pour les valeurs "par défaut" ou avec la teneur réelle en argile. En revanche, si on entre dans le modèle les quantités d'azote organique, sans changer aucun autre paramètres, les quantités minéralisées se différencient très fortement, mais elles sont alors beaucoup trop élevées. Il faudrait probablement modifier d'autres paramètres (rapport C/N de la matière organique par exemple) pour parvenir à une meilleure simulation. Le modèle SUNDIAL dans sa version "par défaut" (option Argile. Limon ou Sable) diffère donc très fortement des modèles du type Azobil et ne restitue pas la variabilité des teneurs en azote organique des sols.

Types de sol	Site expérimental	n°	Teneur en azote en ‰	Stock d'azote en kg.ha ⁻¹			Quantités d'azote minéralisé sur l'année (en kg N.ha ⁻¹)				
				option "clay"	option % argile	option ‰ N	option "clay"	option % argile	option ‰ N	valeur Azobil	valeur Azodyn
Argileux	Mirecourt 1	14	1,7	5190	4442	6415	99	94	157	99	121
	Charly 1	1	3,2	5,90	4489	12062	98	89	236	133	167
Limoneux	Demanges 3	8	2,7	4248	4443	10177	105	80	146	81	100
	Bouvron 1	5	1,7	4248	4300	6417	123	108	332	127	152

Tableau n° 38 - Valeurs des stocks d'azote minéral et des quantités d'azote minéralisé pour les 4 situations où le modèle SUNDIAL a été testé avec les options % argile et ‰ azote. Rappel des valeurs simulées par Azobil et Azodyn sur la même période.

4.3.5.3. Résultats des incubations

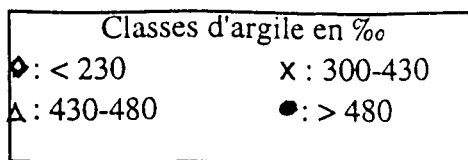
• Aspects méthodologiques

La comparaison avec le bilan au champ a été réalisée en calculant les résultats de minéralisation pour une valeur égale à 2/3 de la capacité au champ. Cependant, si on peut admettre que cette valeur de 2/3 représente assez bien une réalité, tous types de sols confondus, sur la durée de calcul du bilan au champ, il est possible que, certains sols se trouvent assez éloignés de cette valeur, compte tenu de la valeur calculée de l'humidité à la capacité au champ (HCC) qui varie du simple au double (21,2 % à 46,2 %). Il faudrait, pour étayer cette hypothèse, disposer de mesures d'humidité au champ sur chacun des types de sol et ce de façon continue afin de rendre compte des changements brusques de pluviométrie et d'ETP observés en 1995.

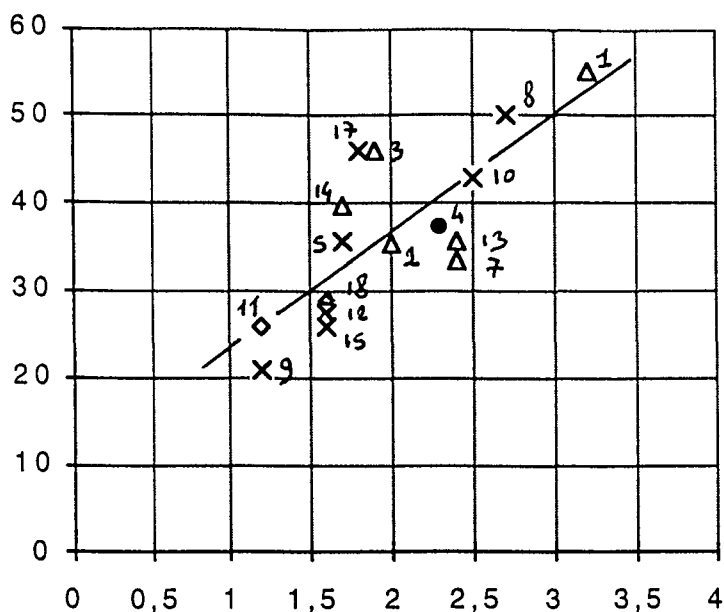
Un deuxième aspect concerne la valeur calculée du pF à HCC. Pour des sols argileux lourds et argileux, BRUAND *et al.*, 1996 considèrent que le pF à l'humidité à la capacité au champ correspond à une valeur proche de 2, alors que HALL *et al.*, 1977 indiquent une valeur de 1,7. Pour les 12 sols qui s'apparentent à ces textures, les pF calculés à HCC varient de 1,16 à 2,02

avec une valeur moyenne de 1,69 (écart type = 0,27, CV = 26 %). Pour les autres textures, argiles limoneuses ou limono-argileuses, RATLIFF *et al.*, 1983 indiquent des valeurs de pF à HCC supérieurs à 2,5. Pour les 6 sols correspondant à ces textures, les pF calculés varient de 2,22 à 2,73 avec une valeur moyenne de 2,40 (écart type = 0,17, CV = 7,12 %).

Nos valeurs de pF pour l'humidité calculée à la capacité au champ sont donc légèrement inférieures à celles de la littérature. BRUAND *et al.* (1996) font observer que pour une même valeur de pF, les valeurs de l'humidité mesurée sur des échantillons non perturbés sont toujours inférieures à celles mesurées sur des échantillons préalablement séchés et tamisés et ce d'autant plus que les textures sont argileuses. Pour ce qui concerne nos déterminations, les mesures de l'humidité sur les cinq échantillons qui ont permis d'établir la relation $HCC = f(\text{argile})$ ont été réalisées sur des échantillons non remaniés. En revanche, les relations humidité potentiel ont été établies à partir d'échantillons remaniés et de ce fait, les valeurs de pF correspondant aux valeurs calculées de HCC sont certainement inférieures à celles qui découleraient du même type de relation, mais établie à partir d'échantillons non perturbés. Dans ces conditions, on peut admettre que l'ensemble de valeurs de pF que nous avons calculées devraient être revues à la hausse, en particulier celles correspondant aux échantillons n° 3 et n° 4 (respectivement 1,18 et 1,16) qui sont précisément les deux échantillons les plus argileux.

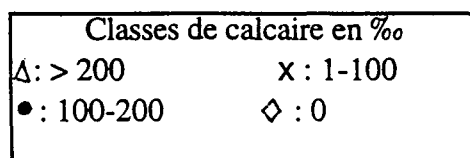


Nmin incub en mg N.kg⁻¹TS

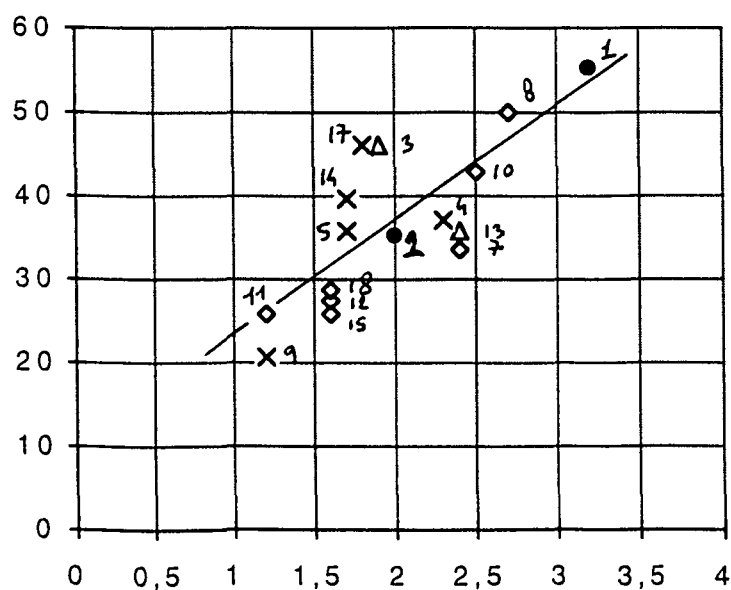


Azote en ‰

Graphique n° 41 - Relation entre les quantités d'azote minéralisé issues de l'incubation et la teneur en azote du sol avec identification des classes d'argile

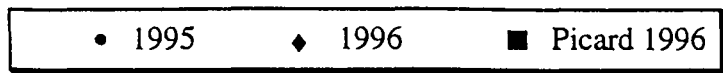


Nmin incub en mg N.kg⁻¹TS

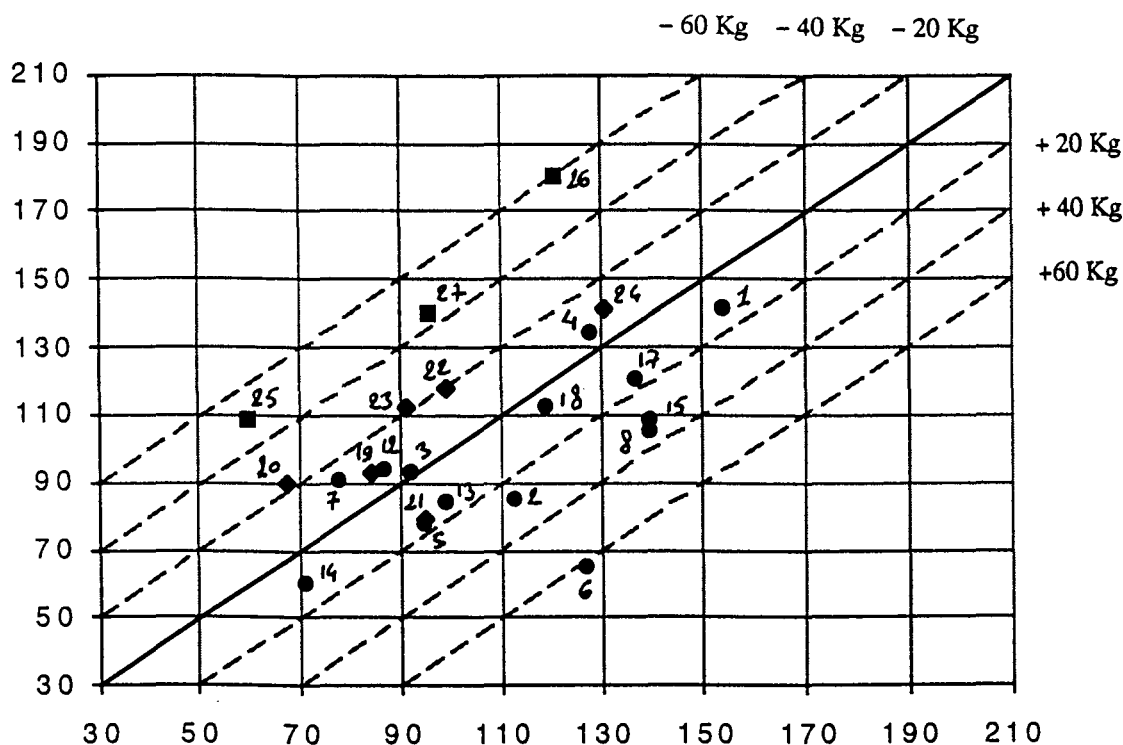


Azote en ‰

Graphique n° 42 - Relation entre les quantités d'azote minéralisé issues de l'incubation et la teneur en azote du sol avec identification des classes de calcaire.



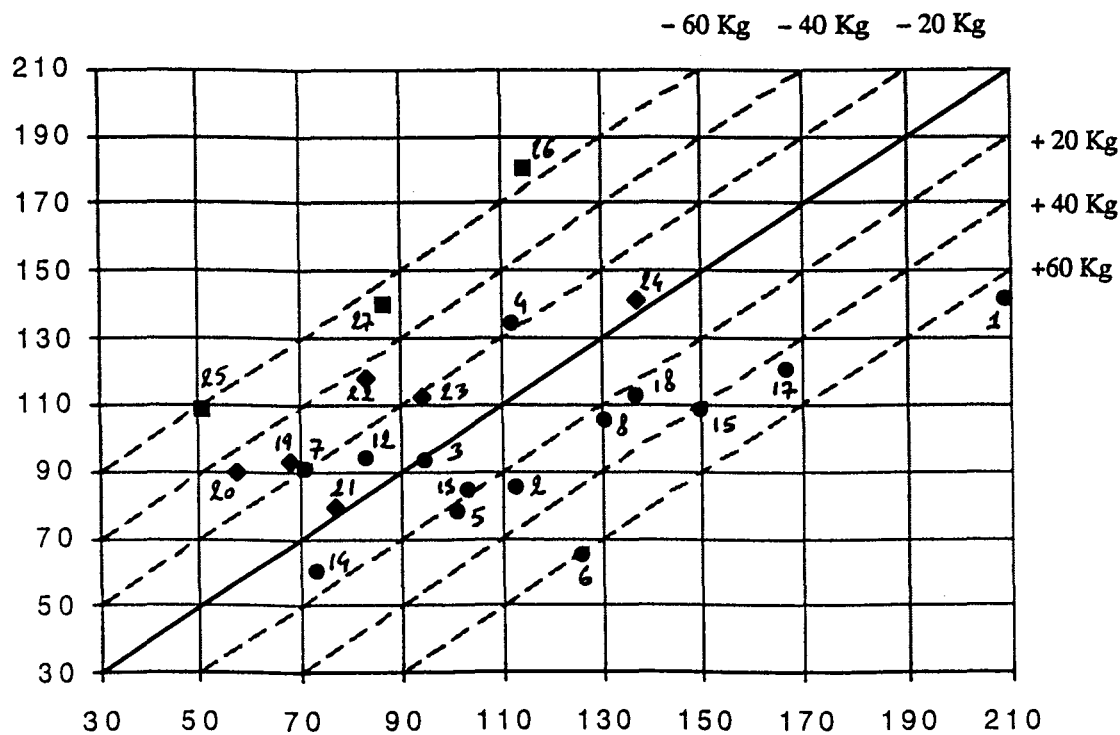
Po en kg.ha⁻¹



B5 en kg.ha⁻¹

Graphique n° 43 - Relation entre les valeurs de Po et les valeurs prédites par
-le bilan n° 5 $NSH + (RSH - RAR_{mes}) + NminAzodyn(sans CaCO_3)$

Po en kg.ha⁻¹



B6 en kg.ha⁻¹

Graphique n° 44 - Relation entre les valeurs de Po et les valeurs prédites par
-le bilan n° 6 $NSH + (RSH - RAR_{est}) + NminAzodyn(sans CaCO_3)$

4.3.5.4. L'importance des paramètres physico-chimiques

• La teneur en azote du sol

Les incubations ont mis en évidence l'importance de la teneur en azote total du sol sur les quantités d'azote minéralisé. Ces résultats avaient déjà été observés par le passé. MARY et REMY (1979), pour des incubations conduites à 65 % de la capacité de rétention et à 35°C pendant 1 mois, obtiennent des résultats dans lesquels la quantité d'azote minéralisé est multipliée par 2,3 quand la teneur en azote varie de 0,8 à 2,5 ‰. Les résultats des expérimentations conduites par DELPHIN (1986) vont dans le même sens. Pour des incubations conduites à 20°C pendant 300 jours à une humidité comprise entre 70 et 80 % de l'humidité équivalente, la relation entre les quantités d'azote minéralisé (Min) en mg N.K⁻¹ sol et la teneur en azote total (Ntot en ‰) est la suivante :

$$\text{Min} = 9,9 \text{ Ntot} + 25,0 \quad r^2 = 80,00 \% \quad 16 \text{ valeurs}$$

• L'influence du taux d'argile et de calcaire

On a vu que la valeur du K2 introduite dans Azobil ou Azodyn est modulée par un coefficient qui prend en compte la teneur en argile et en calcaire. Les nombreuses études sur la dégradation des matières organiques effectuées dans les années 1970 ont conduit à proposer des valeurs de K2 différentes en fonction des types de sol (HEBERT, 1957 ; JACQUIN, 1963 ; MOREL, 1968). Ceci a permis de proposer une expression empirique qui approche au mieux les valeurs existantes (REMY et MARIN LAFLECHE, 1974) : $K2 = \frac{1200}{(A + 200)(\text{CaCO}_3 + 200)}$. Dans ces conditions pour des sols non calcaires, la valeur de K2 varie de 0,024 pour un sol à 50 ‰ d'argile à 0,012 pour un sol à 300 ‰ d'argile. Lorsque la teneur en calcaire passe de 0 à 400 ‰ pour une teneur en argile de 300 ‰, le K2 varie de 0,012 à 0,004. Cette approche sur l'effet de l'argile et des carbonates a été confirmée par DELPHIN (1986) qui montre qu'on améliore le coefficient de détermination lorsqu'on ajoute comme variables explicatives de la quantité d'azote minéralisé, le taux d'argile et de calcaire (fraction inférieure à 2 µ).

Si on examine de plus près nos résultats d'incubation, on n'observe pas cet effet du calcaire et de l'argile. Sur les graphiques n° 41 et 42 on a identifié les différentes situations par rapport aux classes d'argile et de calcaire. On peut remarquer que dans les deux cas, celles-ci sont réparties de façon aléatoire par rapport aux quantités d'azote minéralisées. Les deux sols les plus calcaires (sol n° 3) 137 ‰ et sol n° 13 à 363 ‰ n'ont pas un comportement différent des sols peu ou pas calcaire (sol n° 7 à 0 ‰ et sol n° 17 à 76 ‰).

Pour ce qui est des teneurs en argile on peut faire la même observation : par exemple les sols n° 12 (35 ‰ d'argile) et 18 (18,6 ‰ d'argile), présentant la même teneur en azote donnent des quantités d'azote minéralisé équivalentes. Pour vérifier cette observation, nous avons confronté

la valeur de P_o avec le bilan au champ calculé à partir du modèle Azodyn (valeur du RAR mesuré ou estimé) en entrant dans le k_2 , une valeur nulle pour la teneur en CaCO_3 . Les résultats des graphiques n° 43 et n° 44 et du tableau n° 39 montrent que la qualité de la prévision ne s'en trouve pas détériorée. On observe les mêmes résultats lorsqu'on confronte les quantités d'azote minéralisé prévues par Azobil ou Azodyn sans CaCO_3 , et le bilan au champ (Tableaux n° 29 et 31).

En fait, lorsqu'on examine dans le détail l'ensemble des valeurs d'azote, d'argile et de calcaire, on peut remarquer que

- Les sols les plus calcaires ($> 10\% \text{ CaCO}_3$) possèdent tous une teneur en argile $> 40\%$, la réciproque n'étant que partiellement vraie puisque seulement 8 sols sur 12 possédant une teneur en argile $> 40\%$ ont un taux de calcaire $< 10\%$. Tous les autres sols (teneurs en argile $< 40\%$ présentent des teneurs en calcaire $< 4\%$) (Tableau n° 23)
- Les sols les plus argileux sont aussi en général les plus riches en azote. Il existe en effet une relation significative entre ces deux paramètres :

$$[\text{N}] = 3,55 \cdot 10^{-3} \text{ argile} + 0,68 \quad (n = 18) \quad r^2 = 35,20\% \quad ****$$

Gamme des valeurs d'argile : 19 % à 59 %

Il apparaît donc logique que, compte tenu de ces caractéristiques, on n'observe pas l'effet modérateur de l'argile et du calcaire sur la minéralisation dans notre échantillon dans la mesure où les sols suffisamment riches en ces éléments sont souvent à la fois riches en azote, ce qui n'est pas le cas pour les gammes étudiées par DELPHIN (1986) et par MARY et REMY (1979).

De plus, si on examine les valeurs moyennes des teneurs en azote sur les sols suivis en 1995 et 1996, on s'aperçoit qu'elles sont relativement élevées (2,10 ‰) par rapport aux sols d'autres régions (la moyenne de 30 sols incubés par MARY et REMY n'est que de 1,16 ‰). Ceci nous renvoie à l'importance de la prise en compte de ce paramètre pour prévoir la minéralisation en Lorraine. L'examen de l'historique des systèmes de culture montre que, la spécialisation exclusive des exploitations vers la céréaliculture étant relativement récente, bon nombre de parcelles cultivées ont connu par le passé, des apports organiques fréquents et en quantités importantes. Par ailleurs, comme cela a été précisé en introduction, l'avènement des quotas laitiers a généré des retournements de prairies. Par exemple, les parcelles n° 1 et n° 24 (Tableau n° 21) qui présentent les teneurs en azote les plus fortes (respectivement 3,2 ‰ et 4 ‰) étaient encore en prairies il y a moins de 15 ans.

4.4. DISCUSSION GENERALE

4.4.1. COMPARAISON DE LA VALEUR PRÉDICTIVE DES DIFFÉRENTS MODÈLES

Les différents modèles de prévision de la valeur de P_o ont été comparés à partir du calcul de l'erreur quadratique moyenne (cf 3.3.2.4.3.) et plus précisément de sa racine carrée afin d'obtenir des valeurs en kg N.ha^{-1} .

Les différents bilans et la grille prédictive lorraine ont été calculés sur les 23 stations, alors que la comparaison avec PC azote n'est possible que sur 19 stations. Ces comparaisons sont également réalisées sans les stations PICARD, dont les résultats s'écartaient très nettement des prévisions pour plusieurs modèles soit respectivement 20 et 16 stations. L'ensemble des résultats consignés dans le tableau n° 20 montre que lorsqu'on effectue la comparaison sur l'ensemble de l'échantillon (23 valeurs), ce sont les grilles de prévision lorraines qui apparaissent les plus performantes ; retirer les 3 stations PICARD de l'échantillon ne modifie pas la qualité de la prévision. S'agissant d'un modèle empirique et global (on ne considère pas séparément les différentes sources d'azote qui constituent la valeur de P_o), ce résultat peut paraître quelque peu surprenant. En réalité, si on examine en détail les deux éléments principaux qui constituent cette grille de prévision, on peut remarquer que :

- Le sol est pris en compte à la fois :
 - * par sa texture de surface, ce qui conjugué au système de culture (résidus de culture enfouis ou exportés et apport ou non régulier de fumier) peut permettre de simuler grossièrement une teneur en azote organique.
 - * par sa profondeur : en l'absence d'une mesure du reliquat sortie hiver, la profondeur du sol donne une indication sur les quantités d'azote minéral présentes en sortie d'hiver en tamponnant le lessivage hivernal. Par ailleurs, la quantité d'azote minéralisé dans les horizons sous-jacents à l'horizon de surface est également liée à la profondeur du sol. Des expérimentations conduites en milieu contrôlé (GASSMANN et MUNN, 1980) montrent que ces horizons peuvent contribuer de façon non négligeable à la minéralisation (environ 50 % du total minéralisé). Enfin, la profondeur conditionne le niveau de rendement potentiel, donc le volume des résidus de récolte, lesquels contribuent à la fois à l'enrichissement en matières organiques humifiées et à la fourniture en azote pour la culture suivante (poste Mr), ceci étant particulièrement vrai pour les résidus riches en azote tels que les pailles de colza ou de pois.

- Le système de culture

La variabilité des systèmes de culture est principalement due à la nature du précédent (colza ou maïs fourrage pour la plupart des situations), à la fréquence des apports de fumiers, et au passé prairial. L'absence de précédents à résidus de récolte riches en azote (légumineuses, betteraves, pommes-de-terre, cultures légumières) est certainement un élément qui permet d'expliquer que les trois grands systèmes proposés sont suffisamment discriminants pour bien rendre compte de la variabilité des teneurs en azote organique des sols.

Bilan	B1	B2	B3	B4	Grilles	PC azote	B5	B6
20 valeurs	22,5	30,6	24,2	30,2	25,0	ND	22,7	31,6
23 valeurs	28,0	35,7	34,3	40,2	24,8	ND	28,0	36,3
16 valeurs	23,5	30,0	26,3	31,0	27,5	38,6	23,5	30,9
19 valeurs	29,7	33,6	37,3	42,4	26,8	46,0	29,5	36,6

Tableau n° 39 - Qualité de la prévision de Po exprimée par les $\sqrt{MSE}$ en kg N.ha⁻¹

20 valeurs = 14 valeurs 1995 + 6 valeurs 1996 (stations PICARD exclues)

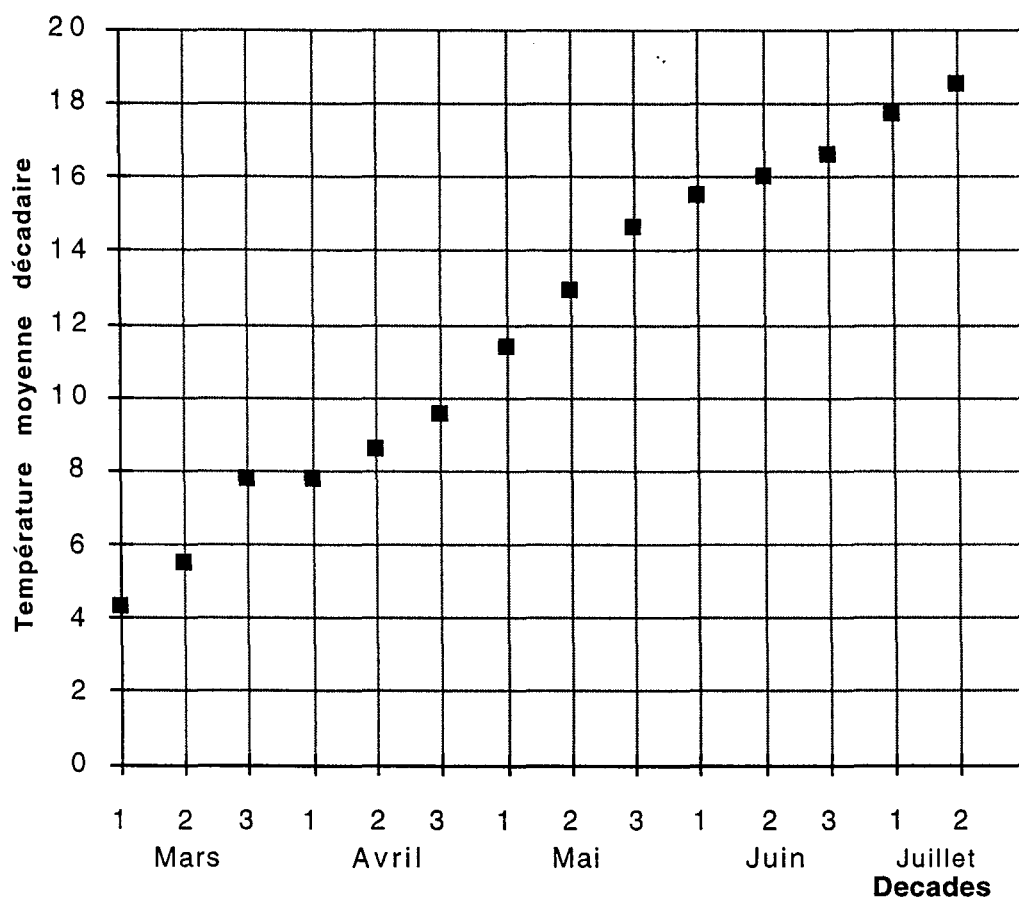
23 valeurs = 14 valeurs 1995 + 9 valeurs 1996 (stations PICARD incluses)

16 valeurs = correspondant au test PC azote (stations PICARD exclues)

19 valeurs = correspondant au test PC azote (stations PICARD incluses)

B1	bilan à partir	RAR mesuré
B2	d'Azodyn	RAR estimé
B3	bilan à partir	RAR mesuré
B4	d'Azobil	RAR estimé
B5	bilan à partir	RAR mesuré
B6	d'Azodyn (CaCO ₃ = 0)	RAR estimé

L'examen des résultats des bilans réalisés à partir d'Azobil ou d'Azodyn (B1 à B4) montre qu'on obtient toujours une meilleure prévision à partir d'Azodyn (sauf pour B2 sur l'échantillon de 20 valeurs). Nous avons déjà discuté cet aspect en indiquant que la température moyenne sur la période ouverture du bilan récolte était moins variable entre les deux années que la température moyenne annuelle qui sert de base au calcul de facteur climatique dans Azobil. Dans ces conditions, la prise en compte des températures réelles rend mieux compte des variations interannuelles de minéralisation et au total le bilan effectué de cette façon est plus fiable. Lorsqu'on raisonne en terme de prévision, le problème se pose différemment : qu'on utilise l'un ou l'autre des modèles, on est tenu de réaliser une étude fréquentielle du climat afin de choisir une valeur de température qui permette le calcul du facteur climatique. Si, par exemple on adopte une valeur susceptible d'être atteinte au moins une année sur deux, cela revient à calculer la valeur médiane de la température pour chaque décade du 1er mars au 20



Graphique n° 45 - Evolution des températures moyennes décadaires du 1er mars au 20 juillet (poste de Nancy-Essey), moyenne de 43 années

juillet (valeur moyenne de la récolte en Lorraine) pour le modèle Azodyn et la valeur médiane de la température annuelle pour le modèle Azobil. Nous avons réalisé cette étude sur le poste de Nancy-Essey pour les 43 dernières années. Le graphique n° 45 montre que l'évolution des températures moyennes décadaires est régulière avec le temps.

La comparaison des températures moyennes sur la période du 1er mars au 20 juillet d'une part et sur l'année d'autre part, montre que la dispersion n'est pas plus élevée sur la période annuelle que sur la période de minéralisation (tableau n° 40) ce qui n'était pas le cas pour les deux années étudiées. Cette étude fréquentielle nous permet également de confirmer la valeur du coefficient d'occupation du sol dont la valeur moyenne s'établit à 0,465 (1697/3653) donc très proche de celle proposée par Azobil (0,5). En outre dans l'expression du facteur climatique, il est précisé que la température moyenne annuelle en l'absence de connaissances de sa valeur réelle peut être égale à 10°C dans le Nord de la France. Les sommes de degré jour en base 0°C à Nancy-Essey confirment tout à fait cette valeur (3653 dJ). Il resterait toutefois à réaliser les études fréquentielles sur d'autres postes météo en Lorraine pour affiner la prévision.

Période	SdJ médiane	CV en %
1-03 au 20-07	1697	6,04
Année	3653	5,56

Tableau n° 40 - Valeurs médianes des sommes de degré jours en base 0°C pour les périodes de minéralisation correspondant à Azodyn (1er mars au 20 juillet) ou à Azobil (année).

4.4.2. IDENTIFICATION DES SOURCES DE PROGRÈS POSSIBLES POUR LA PRÉVISION DE PO

La confrontation des résultats des valeurs prévues de Po par les différents modèles aux valeurs mesurées au champ fait apparaître dans certaines situations des écarts importants, ces écarts pouvant être générés par l'un ou l'autre des postes du bilan (RSH, NSH, Nmin, RAR). Nous avons donc cherché, pour chacun de ces modèles, quelles étaient les voies possibles d'amélioration de la prévision.

4.4.2.1. Modèles de prévision utilisant Azobil et Azodyn

- La mesure de RSH

Cette détermination a été réalisée à partir de 4 prélèvements. Compte tenu de la faible surface concernée (1 are), et des précautions prises pour s'assurer de l'homogénéité du sol, on peut penser que ce nombre de prélèvements est suffisant. Toutefois, certains travaux montrent que la

variabilité spatiale des valeurs de reliquats peut être importante et ce pour des surfaces inférieures à un are (LAFOLIE et NEEL, 1996). On peut donc imaginer augmenter la fiabilité de cette mesure en augmentant le nombre de prélèvements, ce qui est possible quand on mécanise l'opération. Toutefois, il n'est pas assuré que le gain de précision soit à la mesure des coûts supplémentaires à engager. Dans tous les cas, cette possible amélioration de la qualité de la mesure n'aura son intérêt que dans les situations où le niveau de reliquats peut être élevé et ce de façon imprévisible (fumure organique importante par exemple).

- La prévision de RAR

Nous avons mis en évidence des écarts importants entre la mesure de cette valeur et sa prévision (+ 55 kg pour la station 1 et -16 kg pour la station 22, valeurs extrêmes). Un des éléments qui explique ce décalage est que des quantités d'azote importantes peuvent être minéralisées alors que le blé en fin de cycle absorbe moins d'azote, contribuant à augmenter la valeur de RAR. Des modèles qui confronteraient les quantités d'azote absorbé par le peuplement entre la floraison et la récolte et les quantités d'azote issues de la minéralisation sur la même époque permettraient certainement d'améliorer la prévision (GIRARD, 1997). Si un modèle tel qu'Azodyn permet actuellement de prévoir correctement l'offre en azote du sol pendant cette période, l'estimation des besoins en azote pour la croissance pendant cette phase du cycle, n'a pas fait l'objet de recherches aussi précises que pour la phase végétative. Ces modèles pourraient être utilisés à condition d'avoir une bonne valeur prédictive en dynamique, pour l'estimation de la fourniture du sol et le pilotage de la teneur en protéines, mais aussi pour identifier *a posteriori* les situations culturales à fort reliquat après récolte (RAR), redevables de l'implantation d'une culture intermédiaire.

On a vu que l'introduction de la valeur de Nmin Azodyn comme deuxième variable explicative de la valeur de RAR permettait d'augmenter de 30 % l'explication de sa variation. Dans ces conditions on peut imaginer un modèle de prévision qui intégrerait ces deux variables, le coefficient affecté à chacune d'elles (0,16 pour la profondeur et 0,4 pour Nmin Azodyn dans l'équation de régression multiple) pouvant faire l'objet d'un calage plus précis à partir d'expérimentation multilocales croisant profondeur du sol et teneur en azote organique.

- La prévision de Mr

L'estimation de la contribution azotée nette des résidus de récolte ne prend en compte que la nature du précédent cultural et le devenir des résidus (MARY, 1987). Or, bon nombre de facteurs ont été identifiés comme pouvant moduler à la fois la vitesse de décomposition de ces résidus et les quantités nettes minéralisées : outre la nature du résidu, on peut citer la quantité apportée, le mode d'incorporation, la température, l'humidité du sol, les alternances dessiccation-humectation, la teneur en argile, la forme d'azote minéral et la quantité d'azote

minéral présente au moment de l'enfouissement. Sans imaginer utiliser en conditions agricoles un modèle qui prendrait en compte tous ces facteurs et leurs interactions possibles, il semble que la modulation de la valeur de M_r pour une espèce donnée pourrait être effectuée de façon simple à partir de :

- La quantité de résidus enfouis : sur des expérimentations conduites sur colza d'hiver, nous avons mesuré les quantités d'azote contenues dans les pailles à la récolte. Il apparaît que cette valeur est corrélée de façon positive avec le rendement en grain (RG).

$$N_{\text{exporté}} = 1,744 \text{ RG} - 40,19 \quad r^2 = 79,91 \%$$

(2 essais - 15 traitements - 1 année)

Domaine de validité de RG : 34 à 50 q.ha⁻¹

Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où pour une situation pédoclimatique donnée, l'indice de récolte est relativement stable.

- La quantité d'azote minéral présente dans le sol au moment de l'enfouissement
Pour une quantité donnée de carbone restitué au sol, la vitesse de décomposition est d'autant plus rapide que la quantité d'azote minéral est importante (MARY, 1987). En effet, dans ces conditions les besoins en azote de la microflore sont assurés par l'azote minéral du sol, celui provenant de la décomposition des résidus étant alors moins sujet à réorganisation et donc plus disponible pour l'alimentation de la culture suivante.
L'accès à ces deux valeurs étant facile, on pourrait tester l'intérêt d'une modulation de la valeur de M_r . Par exemple, pour le précédent colza pailles enfouies (le cas le plus fréquent en Lorraine), la valeur moyenne de 20 kg.N.ha⁻¹ pourrait être revue à la baisse dans le cas de rendements faibles associés à des faibles valeurs de RAR et inversement.

• La prévision de M_h

Le coefficient de minéralisation de l'humus, K_2 , prend en compte à la fois les caractéristiques physico-chimiques du sol, l'effet de la température et un coefficient relatif au système de culture (MARY et GUERIF, 1994). La confrontation de nos bilans au champ avec les résultats issus des deux modèles et des valeurs d'incubation permet de suggérer quelques améliorations possibles.

- Les coefficients affectés aux paramètres physico-chimiques

Nos résultats d'incubation, ainsi que les bilans au champ ont montré que, contrairement aux données préalablement acquises sur d'autres expérimentations, la teneur en calcaire et en argile influe peu sur la vitesse de minéralisation. Nous avons également observé que les sols les plus riches en azote étaient aussi le plus souvent riches en argile et en calcaire. On peut dans ces conditions imaginer que l'effet attendu de ces deux paramètres soit

complètement masqué par l'effet "teneur en azote". De plus, les conditions au champ sont différentes de celles mises en oeuvre pour les incubations : un sol argileux possède une humidité à la capacité au champ plus élevée qu'un sol limoneux et donc pour une même pluviométrie, va manifester moins de symptômes liés à l'excès d'eau que ce dernier. De plus, s'il est calcaire, il est en général mieux structuré et l'évacuation de l'eau en excès y est plus rapide quand le sous sol est fissuré. A l'inverse, un sol limoneux est très sensible aux conséquences de l'excès d'eau (tassements, battance). On ne peut donc pas exclure que certains types de sol qui *a priori* sont réputés favorables à une minéralisation rapide de l'humus, se voient au total pénalisés par les conditions climatiques et qu'à l'inverse, les sols qui conservent une structure moins dégradée et un niveau d'aération suffisant, présentent des vitesses de minéralisation normales, quelles que soient leurs caractéristiques physico-chimiques.

- Le facteur climatique

Nos expérimentations en milieu contrôlé ne nous permettent pas de porter un jugement sur la validité des facteurs climatiques utilisés dans Azobil ou Azodyn, dans la mesure où elles sont effectuées à température constante. Cependant, les résultats moyens acquis à partir des bilans au champ, sur deux années climatiques contrastées, nous permettent de suggérer quelques améliorations : la valeur moyenne de minéralisation issue d'Azobil est proche de celle du bilan au champ pour 1995 (T moyenne = $10,5^{\circ}\text{C}$), mais inférieure à celle-ci en 1996 (T moyenne = $8,85^{\circ}\text{C}$). Le facteur climatique, tel qu'il est paramétré ($\text{FC} = 0,2 T - 1$) prend une valeur nulle pour une température de 5°C . On peut donc imaginer qu'un paramétrage différent (modification de la pente et de l'ordonnée à l'origine) permettrait d'augmenter les valeurs de FC pour les températures les plus basses.

Pour ce qui concerne Azodyn, le constat est un peu différent puisqu'il surestime les valeurs en 1995 (0,57 contre 0,49) et les sous-estime en 1996 (0,40 contre 0,51). Dans l'expression du facteur climatique $\text{FC} = e^{K(T-10)}$, le coefficient $K = 0,115$ est issu d'une valeur du $Q_{10} = 3,17$ proposée par RECOUS en 1995. En réalité, selon les auteurs, cette valeur varie de 1,7 à 3,5 (NICOLLARDOT *et al.*, 1996). L'adoption d'une valeur de Q_{10} inférieure à 3,17, tout en conservant une température de référence de 10°C permettrait d'augmenter les valeurs de FC dans la gamme des températures inférieures à 10°C et de les diminuer au-delà de cette valeur.

- Un dernier point à propos d'Azobil et d'Azodyn concerne la profondeur d'enracinement. Ces deux modèles prévoient des quantités d'azote minéralisé utilisables par la culture. Nous avons déjà évoqué le fait que la minéralisation n'est pas nulle dans les horizons profonds et dans ces conditions, il serait intéressant de prévoir la profondeur utile par types de sol, ce qui rendrait compte à la fois d'une modulation des quantités minéralisées, mais également d'une possibilité d'interception de cet azote par le système racinaire.

4.4.2.2. PC Azote et les grilles prévisionnelles lorraines

• PC Azote

Nous avons pu montrer qu'il y avait une sous-estimation quasi systématique des trois postes qui constituent la valeur de Po. Même si, *a priori*, ce modèle donne de bons résultats dans la région climatique et pour les systèmes de culture pour lesquels il a été mis au point, son utilisation dans d'autres conditions devra faire l'objet d'améliorations en particulier pour la prévision des quantités d'azote minéralisé à l'automne qui conditionnent la valeur de RSH et pour la minéralisation de printemps. La non prise en compte de la teneur en azote organique du sol conduit à des résultats peu variables, assez éloignés de nos observations au champ. Pourtant, tous les résultats d'incubation déjà cités montrent l'importance de ce facteur. De plus, pour des conditions pédoclimatiques données, le rapport entre l'azote minéralisable et l'azote total augmente avec le stock d'azote total (CAMPBELL *et al.*, 1991 ; MARY et GUERIF, 1994). L'ajout d'un facteur correctif prenant en compte la teneur en azote total du sol devrait donc améliorer la prévision. Pour ce qui concerne la valeur de NSH, il apparaît qu'une appréciation de sa valeur en sortie hiver, soit par une mesure de l'azote absorbé, soit par une estimation de cette quantité à partir de la biomasse, permettrait de mieux approcher la diversité des états du peuplement à cette époque.

• Les grilles de prévision lorraines

Pour ce modèle, la profondeur du sol, sa texture de surface et les systèmes de culture intègrent empiriquement les principaux facteurs qui agissent sur la minéralisation et le RSH. Toutefois, deux facteurs importants ne sont pas pris en compte :

- Il s'agit d'une part de la pluviométrie hivernale qui peut avoir une incidence importante sur le lessivage de l'azote minéral présent dans le sol à l'automne. Même si les deux années étudiées ne permettent pas de mettre ce phénomène en évidence, on peut estimer, au regard des nombreuses connaissances acquises sur ce sujet que l'ajout d'un terme correctif permettrait d'améliorer la prévision. De nombreux sites à bougies poreuses, permettant de mesurer les quantités d'azote lixiviées sous culture ont été installés en Lorraine. Une exploitation de ces résultats devrait permettre de paramétrer un modèle de lessivage adapté aux particularités des sols lorrains (MARY *et al.*, 1996 ; LIMAUX *et al.*, 1998).
- D'autre part, la grande variabilité des teneurs en azote organique du sol (1,4 ‰ à 4 ‰) suggère que, comme pour PC azote, le résultat de la prévision soit modulé en fonction de cette valeur. L'utilisation d'un des modèles de minéralisation précédemment évoqués (Azobil ou Azodyn) qui prévoient les quantités d'azote minéralisé en fonction de cette teneur, devrait permettre d'adapter la prévision des grilles au cas par cas, surtout lorsqu'il y a sous estimation.

4.4.2.3. En conclusion

Les différents modèles que nous avons utilisés ne rendent compte que de façon imparfaite des observations au champ. Toutefois, chacun d'entre eux présente un intérêt particulier et un certain nombre d'améliorations sont envisageables pour accroître leurs performances.

En terme de prévision, nous pensons qu'à court terme, plusieurs possibilités se dessinent pour une prévision de P_o :

- Dans certaines régions, les grilles prévisionnelles de fourniture sont déjà opérationnelles et on a vu que leur performance est globalement bonne. De plus, on peut espérer les améliorer à partir de résultats issus de la recherche, et ce à peu de frais et très rapidement. Dans ces conditions, il faut privilégier leur utilisation, leur simplicité de mise en oeuvre restant un atout non négligeable pour convaincre les utilisateurs potentiels.
- Dans les situations où le niveau du reliquat sortie hiver risque d'être très variable et pas facilement prévisible (précédents légumineuses, forte pression organique), et si la mesure est possible (sols sans cailloux), nous pensons qu'il faut privilégier cette détermination. Associée à une estimation des quantités d'azote absorbé en fin d'hiver et au modèle Azobil (sous réserve d'améliorer la prévision de la valeur du RAR), elle doit constituer un outil rapidement opérationnel de l'estimation des valeurs de P_o , dans les régions où il n'existe pas de grilles prédictives.
- Lorsque la mesure du reliquat est impossible, les éléments existent pour construire rapidement un outil de prévision de P_o qui associerait un modèle de lessivage (simulation de RSH), une estimation de NSH et une prévision de la minéralisation à partir d'Azobil.

Pour ce qui concerne le suivi des cultures en temps réel, les modèles de minéralisation dynamique, tel qu'Azodyn offrent des perspectives intéressantes. Couplés aux modèles de croissance, de lessivage et de besoins en azote du peuplement, ils seront indispensables dans un proche avenir pour piloter la fertilisation en temps réel. La prévision des dates d'entrée en carence du peuplement devrait permettre d'améliorer considérablement les techniques de fractionnement de l'engrais (JEUFFROY et RECOUS, 1998).

De plus, dans la mesure où l'absorption de l'azote entre la floraison et la récolte a fait l'objet de modélisation récente, ces modèles seraient très utiles pour mieux prévoir la valeur réelle du reliquat après récolte et ainsi identifier les situations à risque pour le lessivage des nitrates pendant l'interculture.

CHAPITRE 5

MODELISATION DU COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DE L'AZOTE DE L'ENGRAIS

5.1. INTRODUCTION

La grande variabilité du coefficient d'utilisation de l'azote de l'engrais rend difficile l'adoption d'une valeur prévisionnelle, pourtant indispensable pour le calcul *a priori*, de la dose d'azote lorsqu'on utilise l'équation d'efficacité d'utilisation de l'engrais.

Afin de mieux comprendre les conditions de variation de l'utilisation de l'engrais nous proposons dans ce chapitre :

- de conforter les références acquises quant à l'incidence du niveau de biomasse au moment de l'apport d'engrais sur la variation du CAU
- de tester l'intérêt de la vitesse de croissance du peuplement au moment de l'apport d'engrais, comme prédicteur du CAU
- d'étudier le devenir de l'engrais non utilisé par la plante en faisant la part de l'organisation et des pertes par voies gazeuses

5.2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

5.2.1. ESSAIS DOSES CROISSANTES D'AZOTE

5.2.1.1. Les expérimentations

Les expérimentations conduites entre 1990 et 1996 ont été réparties chaque année sur des sols différents représentant autant que faire se peut, la diversité des sols rencontrés en Lorraine. Le tableau n° 41 récapitule l'ensemble des informations par site et par année.

Sur chaque essai, on compare 4 à 7 doses d'azote croissantes, selon les années, et un témoin non fertilisé. Les dispositifs ont été réalisés en blocs avec 3 ou 4 répétitions, chaque parcelle élémentaire représentant une surface comprise entre 9 m² et 15 m² selon les essais.

La technique d'épandage d'azote a évolué selon les années :

- en 1990 et 1992, l'apport a été réalisé manuellement sous forme d'ammonitrate.
- de 1993 à 1995, l'apport a été réalisé sous forme d'ammonitrate dissous dans l'eau, puis épandu avec un pulvérisateur à pression préalable équipé d'une rampe de 1 m munie de 4 buses trifilets. Cette technique a été adoptée pour pallier les 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).

Année	Site expérimental	Types de sol	Variété	Nature des traitements	Engrais azoté		Nombre de résultats par site	Organisme assurant le suivi
					Nature	Forme		
1990	Monthureux	Argilo-calcaire sup.	Appolo	Doses d'azote	Amo	Solide	1	CRAL
1992	Letricourt	Limond profond	forby	Doses d'azote	Amo	Solide	1	CRAL
		Argile profond	Forby	Doses d'azote	Amo	Solide	1	CRAL
	Secheprey	Argile calc. sup.	Thésée	Doses d'azote	Amo	Solide	1	CRAL
		Arg. moy. profond	Thésée	Doses d'azote	Amo	Solide	1	CRAL
	St Hilaire	Limon profond	Pepital	Doses d'azote			1	ITCF
	Noers	Argile sur marnes	Baroudeur	Doses d'azote			1	SCAVC
	Villancy	Limon profond	Pepital	Doses d'azote			1	SCAVC
	Cous	Limon Arg. moy. prof.	Pepital	Doses d'azote			1	SCAVC
	Han	Arg. cal. moy. prof.	Ritmo	Doses d'azote			1	SCAVC
1993	Rosières	Limon arg. prof.	Thésée	Doses d'azote + dates d'apport	Amo	Liquide	5	CRAL
	Manonville	Arg. Calc. superf.	Thésée	Doses d'apport + irrigation	Amo	Liquide	2	CRAL
		Arg. sur marnes	Thésée	Doses d'azote	Amo	Liquide	1	CRAL
	Demange	Argilo-calcaire sup.	Thésée	Doses d'apport	Amo	Liquide	1	CRAL
	Demange	Argilo-calcaire sup.	Thésée	Doses d'apport	Amo	Liquide	1	CRAL
	Harmonville	Argilo-calcaire sup.	Sidéral	Doses d'apport	Amo	Liquide	1	CRAL
	Courcelles	Limon profond	Thésée	Doses d'apport	Amo	Liquide	1	CRAL
	Crézilles	Argile profond	Thésée	Doses d'apport	Amo	Liquide	1	CRAL
	St Hilaire	Lim. Argil. prof.	Thésée	Doses d'apport			1	CRAL
1994	Jovilliers	Lim arg. prof.	Soissons	Doses d'azote + dates d'apport	Amo	Liquide	2	CRAL
	Meligny	Arg. calc. superf.	Forby	Doses d'azote + dates d'apport	Amo	Liquide	3	CRAL
	Courcelles	Lim. arg. prof.	Forby	Doses d'azote + dates d'apport	Amo	Liquide	2	CRAL
1995	Dommartin	Sab. limon prof.	Apollo	Doses d'apport	Amo	Liquide	1	CRAL
	Jaulny	Arg. calc. sup.	Rossini	Doses d'apport	Sol30S	Liquide	1	CRAL
	Mirecourt	Arg. sur marnes	Ritmo	Doses - Densité + dates d'apport	Amo	Liquide	4	CRAL
	Lixières	Arg. limon sur marnes	Ritmo	Doses - Densité + dates d'apport	Amo	Liquide	4	CRAL
1996	Secheprey	Arg. sur marnes	Ritmo	Doses d'azote + dates d'apport	Sol390	Liquide	2	CRAL
	Mirecourt	Arg. profond	Eureka	Doses d'azote + dates d'apport	Sol390	Liquide	2	CRAL

	Dieulouard	Lim. arg. prof.	Sidéral	Doses d'azote + dates d'apport	Sol390	Liquide	2	CRAL
	Méligny	Arg. calcaire	Thésée	Doses d'azote + dates d'apport	Sol390	Liquide	2	CRAL
	Bousse	Lim.sabl. prof.	Sidéral	Doses d'azote + dates d'apport	Sol390	Liquide	2	CRAL
	Sierck	Arg. prof.	Trémie	Doses d'azote + dates d'apport	Sol390	Liquide	2	CRAL
	Limey	Arg. calc sup.	Trémie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
		Arg. lim. moy. prof	Trémie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
	Bouvron	Arg. lim sur marnes	Trémie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
		Lim. arg sur marnes	Trémie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	2	CRAL
	Charly	Arg. sur marnes	Trémie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	2	CRAL
		Arg. lim. sur marnes	Tilburie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
	Hautecourt	Arg. lim. sur marnes	Génial	Doses d'azote	Sol390	Liquide	3	CRAL
		lim. sur argile	Génial	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
	Rezouville	Arg. calcaire sup.	Ritmo	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
		Arg. moy prof.	Ritmo	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
	Harmonville	Arg. prof.	Trémie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
		Arg. calc. moy. prof.	Trémie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
		Arg. calc. sup.	Trémie	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
	Heippes	Arg. lim. sur marnes	Pépital	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
		Arg. sur marnes	Pépital	Doses d'azote	Sol390	Liquide	1	CRAL
	Stainville	Arg. lim. prof.	Apollo	Doses d'azote + dates d'apport			2	CC

Arg. calc. : sol argileux, calcaire avec cailloux
 Sup. : profondeur 40 cm
 Moy. : profondeur 40 à 80 cm
 prof. : profondeur > 80 cm

Amo : nitrate d'ammonium
 Sol 30S : solution azote soufré
 Sol390 : solution azotée

CRAL : Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine
 SCAVC : Société Coopérative Agricole de la Vallée de Chiers
 ITCF : Institut Technique des Céréales et des Fourrages
 CC : Champagne Céréales

Tableau n° 41 : Principales caractéristiques des essais doses d'azote croissantes

- à partir de 1996, l'apport a été réalisé sous forme de solution azotée 390. avec la technique décrite plus haut.

5.2.1.2. Les mesures

Les quantités d'azote absorbé sont déterminées selon la méthodologie décrite au chapitre 3.2.2.2., sauf pour ce qui concerne la mesure du rendement en grain et la détermination de la teneur en azote des grains.

- Pour le rendement en grain, on procède à une récolte manuelle des épis sur une surface d'environ 1 m² (variable selon l'écartement entre les lignes des semis) sur chaque parcelle élémentaire. Les épis sont ensuite battus, puis les grains sont passés à l'humidimètre de façon à pouvoir calculer le rendement aux normes en q.ha⁻¹ (15 % d'humidité).
- Pour la détermination de la teneur en azote des grains, nous avons utilisé l'INFRATEC. Cet appareil effectue une mesure physique basée sur le principe de la spectroscopie infrarouge. Chaque année, l'appareil est calé par rapport à la méthode DUMAS à partir d'une quinzaine d'échantillons choisis de telle manière qu'ils représentent une gamme de variation suffisamment large de la teneur en azote (1,3 % à 2,7 %). Les résultats du calage montrent que dans ces conditions, l'infralyseur permet une mesure rapide et suffisamment fiable (Annexe n° 8).

5.2.1.3. Le calcul du CAU

Pour chaque expérimentation, le calcul du CAU est réalisé sur l'ensemble des traitements en effectuant le rapport de la différence d'azote absorbé entre le traitement fertilisé et non fertilisé, à la quantité d'azote apporté,

$$\text{soit : CAU} = \frac{\text{NabsPE Fert} - \text{NabsPE To}}{\text{N apporté}} \times 100$$

où :

NabsPE Fert = azote absorbé par la plante entière en situation fertilisée

NabsPE To = azote absorbé par la plante entière en situation sans engrais

N apporté = azote apporté par l'engrais

(valeurs exprimées en kg.ha⁻¹)

5.2.1.4. Le calcul de la vitesse de croissance

A partir de la mesure des états de croissance du peuplement au moment des apports d'azote, et d'une mesure réalisée ultérieurement (le plus généralement entre 10 et 20 jours après le premier prélèvement), nous avons calculé les vitesses de croissance instantanées au moment de l'apport

d'azote. La cinétique de croissance étant de type exponentiel en fonction de la somme de degrés jours, les vitesses sont calculées en utilisant la formule suivante (GREENWOOD, 1976) :

$$VC = \frac{\ln MS_2 - \ln MS_1}{T_2 - T_1} \cdot MS_1 \cdot 10^{-2}$$

où :

VC = vitesse de croissance en g MS.10⁻².m⁻².degré jour⁻¹

MS₂ = biomasse en g MS.m⁻² au prélèvement 2

MS₁ = biomasse en g MS.m⁻² au prélèvement 1

T₂-T₁ = somme de degrés-jours en base 0° cumulée entre le prélèvement 1 et le prélèvement 2.

5.2.2. ESSAIS BILAN ¹⁵N

5.2.2.1. Les dispositifs expérimentaux

Les expérimentations ont été conduites sur blé d'hiver, sur deux sites différents :

- Une situation de sol argilo-limoneux sur marnes à 75 cm à LIXIERES en 1995
- Une situation de sol argileux peu profond sur marnes à MIRECOURT en 1995
- Nous avons par ailleurs utilisé les données dans une situation de sol limoneux profond à MONS en 1985, dont les résultats d'ensemble ont été présentés par RECOUS *et al.* (1988 I, II)

Les principales caractéristiques physico-chimiques des trois sites sont regroupées dans le tableau n° 42.

Sites	MONS	LIXIERES	MIRECOURT
Caractéristiques			
Argile (en ‰)	181	294	425
Limons (en ‰)	747	559	415
Sables (en ‰)	72	147	160
CaCO ₃ (en ‰)	10	0	99
Carbone (en ‰)	12,0	12,4	12,6
Total N Kjeldahl (en ‰)	1,2	1,4	1,5
pH H ₂ O	7,8	6,7	8,1
C/N	10,0	8,8	8,4
Densité apparente	1,40	1,40	1,45
Humidité à la capacité au champ (%)	24,0	26,60	35,30

Tableau n° 42 - Principales caractéristiques physico-chimiques des sols supports des expérimentations

Sur le site de MONS, on a travaillé sur une seule densité de semis. Sur les sites de LIXIERES et MIRECOURT, plusieurs densités de semis ont été mises en place (Tableau n° 43) (3 densités

à LIXIERES et 2 densités à MIRECOURT), ceci afin de générer au printemps des états de croissance du peuplement différents, pour un stade de développement équivalent.

Modalités de la fertilisation

La fertilisation azotée a été effectuée en deux apports, un premier apport à la sortie de l'hiver et un deuxième apport au début de la montaison (Tableau n° 43), avec du nitrate d'ammonium enrichi avec de l'azote marqué ^{15}N .

Afin de pouvoir déterminer la part de l'azote de l'engrais incorporé dans la matière organique du sol, l'enrichissement en ^{15}N a été beaucoup plus important (de l'ordre de 3 à 3,5 %) que pour la seule mesure dans la plante, pour laquelle un enrichissement 10 fois plus faible se révèle suffisant.

- à MONS, une partie de l'expérimentation a reçu $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ d'azote au premier apport avec de l'engrais enrichi en ^{15}N à 10,06 % et $110 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ au deuxième apport avec de l'engrais non enrichi.
L'autre partie de l'expérimentation a reçu $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ d'azote au premier apport avec l'engrais non enrichi et $110 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ d'azote au deuxième apport avec de l'engrais enrichi à 3,67 %.
- à LIXIERES, on a apporté $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ d'azote au premier apport avec de l'engrais non enrichi et $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ d'azote au deuxième apport avec de l'engrais enrichi à 2,96 %.
- à MIRECOURT, une partie de l'expérimentation a reçu un apport unique de $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ d'azote avec de l'engrais enrichi à 0,3 %. L'autre partie de l'expérimentation a reçu $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ d'azote au premier apport avec de l'engrais non enrichi et $110 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ au deuxième apport avec de l'engrais enrichi à 2,96 %.

Sur les trois essais, l'azote a été apporté sous forme liquide avec un pulvérisateur manuel équipé d'une buse en fente. La quantité d'eau ajoutée à l'engrais a été d'au moins 0,5 litre par m^2 de façon à pouvoir opérer de nombreux recroisements nécessaires à une bonne répartition de l'engrais.

Dispositif

- Sur l'essai de MONS, on a disposé 3 parcelles de $12,25 \text{ m}^2$ correspondant à 3 répétitions. A l'intérieur de chaque parcelle, on a positionné 8 placettes de $0,3 \text{ m}^2$ chacune sur lesquelles les prélèvements de plante et de sol ont été effectués.
- Sur l'essai de MIRECOURT, pour chaque traitement expérimental une surface de 70 m^2 a été fertilisée au sein de laquelle ont été échantillonnées 9 placettes de $0,35 \text{ m}^2$ chacune correspondant à 3 dates de prélèvement et 3 répétitions par date.

Sur les essais de MONS et de MIRECOURT, chaque placette de prélèvement était espacée de sa voisine ou des bordures de l'essai d'au moins 0,40 m.

- Sur l'essai de LIXIERES, afin de diminuer les coûts liés à l'utilisation de l'isotope ^{15}N , les placettes ont été délimitées par des cylindres en PVC (Poly-Vinyl-Chlorid), d'un diamètre de 0,4 m et d'une hauteur de 0,13 m enfoncés dans le sol selon la technique proposée par RECOUS et MACHET. Ces cylindres ont été mis en place le 21 février, chacun étant espacé de son voisin ou des bordures de l'essai d'environ un mètre. Au total, 27 cylindres ont été mis en place afin de pouvoir opérer des prélèvements à 3 dates par densité, avec 3 répétitions pour chaque densité. Au moment du deuxième apport, le 11 avril, les cylindres ont été couverts pour permettre l'application de 100 kg d'azote par hectare (non marqué) sur la surface extérieure à ceux-ci, puis ils ont reçu la dose équivalente en engrais marqué. Afin de vérifier que cette technique d'application ne génère pas de pertes d'engrais par diffusion latérale au dessous de 13 cm, nous avons mesuré, au moment de la récolte, les excès isotopiques sur une couronne de 40 cm à l'extérieur des cylindres.

5.2.2.2. Les mesures

• Sur le végétal

- Parties aériennes

Essai de MONS : Les mesures ont été effectuées 8, 35, 47, 50, 103 et 154 jours (récolte) après le premier apport d'azote, le deuxième apport d'azote ayant été effectué 42 jours après le premier apport.

Essai de MIRECOURT : Les mesures ont été effectuées 42, 52, 72 et 161 jours (récolte) après le premier apport d'azote, le deuxième ayant été effectué 42 jours après le premier apport.

Essai de LIXIERES : les mesures ont été effectuées 10, 30 et 99 jours (récolte) après le deuxième apport.

A chaque prélèvement ont été mesurés, en sectionnant la plante à la base du plateau de tallage, la biomasse des parties aériennes, la teneur en azote et l'excès isotopique. A maturité, des déterminations ont été réalisées sur les grains et les pailles.

- Racines

Essai de MONS : Les racines ont été récupérées dans les échantillons de sol après traitement permettant de les séparer de la terre :

- à chaque prélèvement sur l'horizon 0-10 cm
- à chaque prélèvement sur l'horizon 10-30 cm
- à la floraison sur l'ensemble du profil (0-120 cm)

Essai de LIXIERES : Les racines ont été récupérées dans l'ensemble de chaque cylindre sur l'horizon 0-13 cm aux prélèvements 1 et 2 (10 et 30 jours après le deuxième apport)

Les mêmes mesures que sur les parties aériennes ont été réalisées, l'excès isotopique n'ayant été déterminé que sur les horizons 0-10 et 10-30 cm pour MONS et sur l'horizon 0-13 cm pour LIXIERES.

Il n'y a pas eu de mesure sur les racines dans l'essai de MIRECOURT.

Site	Date de semis	Variété	Densité de peuplement en pieds/m ²	1er apport d'azote		2ème apport d'azote	
				Date	Dose en kg/ha	Date	Dose en kg/ha
LIXIÈRES	18/10/94	Ritmo	D ₁ : 127	21-02	40	11-04	100
			D ₂ : 217	1995	40	1995	100
			D ₃ : 361		40		100
MIRECOURT	20/10/94	Ritmo	D ₁ : 112	28-02	40	11-04	100
			D ₂ : 209	1995	40	1995	100
MONS	15/10/85	Pernel	D ₁ : 250	6-03-85	50	17-04-85	110

Tableau n° 43: Dates des différentes, variétés, densité de peuplement et doses d'azote apporté sur les trois expérimentations.

- Dans le sol

A chaque date de prélèvement, ont été mesurés l'azote minéral en distinguant l'azote provenant de l'engrais, de l'azote provenant du sol, et l'azote de l'engrais organisé. Un échantillon moyen a été constitué à partir de 6 prélèvements par échantillon. Afin de pouvoir récupérer la totalité de l'engrais, les profondeurs de prélèvement ont été augmentées à chaque date.

- Essai de MONS

Prélèvement consécutif au premier apport : au premier et au deuxième prélèvement soit 8 et 35 jours après l'apport, les mesures ont été réalisées à 3 niveaux : 0-10, 10-30 et 30-60 cm. Au troisième prélèvement, soit 103 jours après l'apport et à la récolte, on a réalisé un niveau supplémentaire de 60 à 120 cm.

Prélèvement consécutif au deuxième apport : au premier et au deuxième prélèvement soit 8 et 15 jours après l'apport, les mesures ont été réalisées à 3 niveaux : 0-10, 10-30 et 30-60 cm. Au troisième prélèvement, soit 61 jours après l'apport et à la récolte, on a réalisé un niveau supplémentaire de 60 à 120 cm.

- Essais de LIXIERES et MIRECOURT

Les mesures n'ont été effectuées que sur les prélèvements consécutifs au deuxième apport.

- Au 1er prélèvement, 10 jours après l'apport d'azote, les mesures ont été réalisées à 3 niveaux : de 0 à 13 cm, de 13 à 30 cm et de 30 à 50 cm ;
- Au 2ème prélèvement, 30 jours après l'apport d'azote, les mesures ont été réalisées à 4 niveaux : de 0 à 13 cm, de 13 à 30 cm, de 30 à 50 cm et de 50 à 70 cm ;
- Au 3ème prélèvement, à la récolte, les mesures ont été réalisées à 5 niveaux : de 0 à 13 cm, de 13 à 30 cm, de 30 à 50 cm, de 50 à 70 cm et de 70 cm à 100 cm.

5.2.2.3. Les analyses : détermination de N et ^{15}N minéral, N et ^{15}N organique dans le sol et dans la plante

L'azote minéral est extrait à raison de 150 g de terre humide (TH) dans 300 g d'une solution de KCl 1M (avec deux répétitions par échantillons) avec une agitation à 42 tours.min⁻¹ pendant 30 minutes suivie d'une décantation (3 heures) et d'une filtration. Le dosage de l'azote minéral (N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻) est réalisé sur le filtrat par colorimétrie en flux continu en utilisant pour le nitrate la réaction de Griess-Ilosvay après la réduction du nitrate par le cadmium et pour l'ammonium la méthode à l'indophénol. Pour le dosage du ^{15}N minéral NH₄⁺ et NO₃⁻ sont séparés par distillation avec MgO et l'alliage de Devarda. Le ($^{15}\text{NH}_4$)₂SO₄ ainsi formé est analysé dans un spectromètre de masse (VG SIRA 9) après la conversion du NH₄⁺ en N₂ par combustion selon la méthode de Dumas à l'aide d'un autoanalyseur Carlo Erba (NA 1500).

L'azote organique est déterminé à partir d'un sous-échantillon de 20 g du culot de terre + KCl (après l'extraction de l'azote minéral), mélangé à 80 g de KCl 1M, agité pendant 15 minutes et centrifugé. Le surnageant est éliminé et cette procédure est répétée 3 fois afin d'éliminer toute trace de ^{15}N minéral. Le sol après extraction est séché à 80°C, broyé très finement au broyeur à billes. Leur teneur en N-organique et composition isotopique sont déterminées de la façon décrite précédemment pour l'azote minéral.

Les parties aériennes et les racines de blé sont analysées, après séchage à 80°C et broyage pour leur contenu en azote total et azote 15 selon la méthode décrite précédemment.

Calcul du CRU :

A partir des rendements en grains et en paille, on calcule les quantités d'azote exportées par les grains et les pailles, puis le CRU :

$$\text{CRU} = \frac{(\text{Ng} \cdot \text{Eig}) + (\text{Np} \cdot \text{Eip})}{\text{X} \cdot \text{Eix}} \cdot 100.1,25$$

où :

Ng = azote absorbé par les grains en kg.ha⁻¹

Eig = excès isotopique des grains en %

N_p = azote absorbé par les pailles en kg.ha^{-1}

E_{ip} = excès isotopique des pailles en %

X = azote apporté en kg.ha^{-1}

E_{ix} = excès isotopique de l'engrais en %

1,25 = coefficient pour la prise en compte de l'azote absorbé par les racines

5.3. RÉSULTATS

5.3.1. ANALYSE DES VARIATIONS DU CAU

Nous avons pu, au total, analyser 74 résultats provenant d'expérimentations suivies pendant 6 années (1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996). Sur chacun des essais, les CAU ont été calculés systématiquement pour la dose optimale et dans un certain nombre de cas pour les doses suboptimales et supraoptimales.

5.3.1.1. Variation du CAU le long de la courbe de réponse à l'azote

a - Constance en dose suboptimale

Pour étudier cet aspect de la variabilité du CAU, nous avons retenu les résultats expérimentaux pour lesquels nous disposons d'au moins 4 valeurs du CAU calculées et qui correspondent à des doses d'azote qui ne soient pas au delà de l'optimum, soit au moins 3 valeurs de CAU en doses suboptimales. Pour chaque expérimentation, on calcule la relation :

$$N_{\text{abs PE F}} - N_{\text{abs PE To}} = f(N \text{ apporté})$$

où :

$N_{\text{abs PE F}}$ = azote absorbé par la plante entière en situation fertilisée

$N_{\text{abs PE To}}$ = azote absorbé par la plante entière en témoin non fertilisé

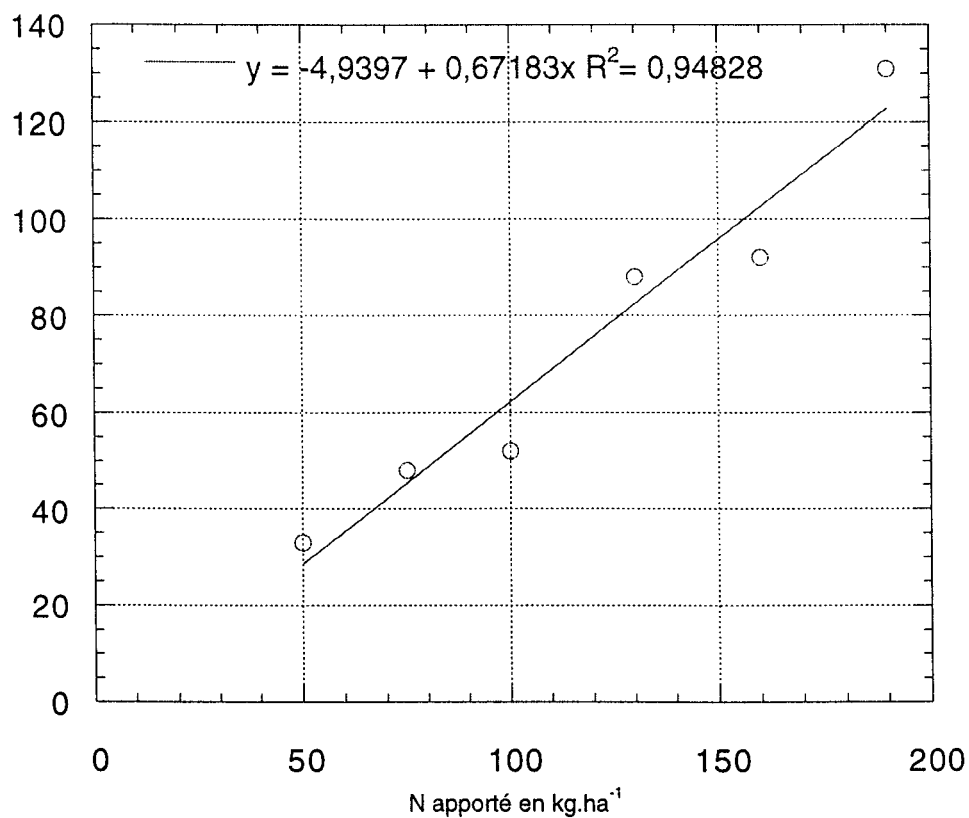
$N \text{ apporté}$ = azote apporté par l'engrais

A partir des relations ainsi établies, on peut alors porter un jugement sur la stabilité du CAU en fonction des doses d'azote apporté :

- On considérera tout d'abord que, lorsque le coefficient de corrélation, r , est significatif au moins au seuil de 5 % (**), cela signifie que l'ajustement linéaire de la forme $y = ax + b$ est justifié.
- Ensuite, l'examen de la valeur de l'ordonnée à l'origine (b) nous permettra de vérifier l'hypothèse de stabilité du CAU : si la valeur de b est nulle ou non significativement différente de 0, l'équation de régression prend la forme $y = ax$ soit $\text{CAU} = \frac{y}{x}$ constante. A l'inverse, si b est significativement différent de 0, la valeur du $\text{CAU} = \frac{y}{x} = a + \frac{b}{x}$ n'est plus constante quand x augmente. Lorsque b est < 0 , cela signifie que le CAU augmente en

$N_{abs_PE}^F - N_{abs_PE}^{T0}$

en $kg.ha^{-1}$



Graphique n° 46 Variation des quantités d'azote absorbé provenant apparemment de l'engrais en fonction de l'azote apporté : Exemple pour l'essai de MAN haut 1993

même temps que la dose, et qu'il diminue avec la dose lorsque b est > 0 . Le graphique n° 46 illustre cette démarche à partir des résultats de l'essai de MAN haut 1993 : le coefficient de corrélation est significatif au seuil de 1 %, la valeur de $b = -4,93$ est non significativement différente de 0, puisque comprise dans l'intervalle de confiance ($\pm 9,96$), donc le CAU est stable pour la gamme des doses explorées (de 50 à 190 kg N.ha⁻¹).

Le tableau n° 44 montre les résultats obtenus sur 14 essais suivis pendant 5 années : à l'exception d'un site, les coefficients de corrélation sont toujours significatifs au moins au seuil de 5 % et la valeur de l'ordonnée à l'origine n'est pas significativement différente de zéro dans 10 cas sur 14. Dans les autres cas, l'ordonnée à l'origine est négative et les valeurs enregistrées s'échelonnent entre -6,10 et -11,38.

Nous avons également pu réaliser un test de constance du CAU en doses suboptimales en effectuant une analyse de variance sur l'ensemble des essais pour lesquels nous disposions de résultats. Au total, 29 essais sont exploitables avec toutefois un nombre de données différentes pour chacun d'eux. Nous avons comparé les résultats par la méthode des couples, un couple étant constitué d'une valeur de CAU à l'optimum et d'une valeur de CAU en dose suboptimale sur le même essai, plusieurs couples pouvant être issus du même essai dans la mesure où plusieurs doses suboptimales étaient exploitables. Au total, 68 couples ont pu être analysés.

Le résultat du test indique qu'il n'existe pas de différence significative au seuil de 5 % entre les CAU à l'optimum et les CAU en doses suboptimales (t observé = 1,7345 < t théorique = 1,960)

b - Décroissance en doses supraoptimales

L'observation des CAU après l'optimum de la courbe de réponse à l'azote montre généralement une diminution d'autant plus importante que l'on s'éloigne de cet optimum.

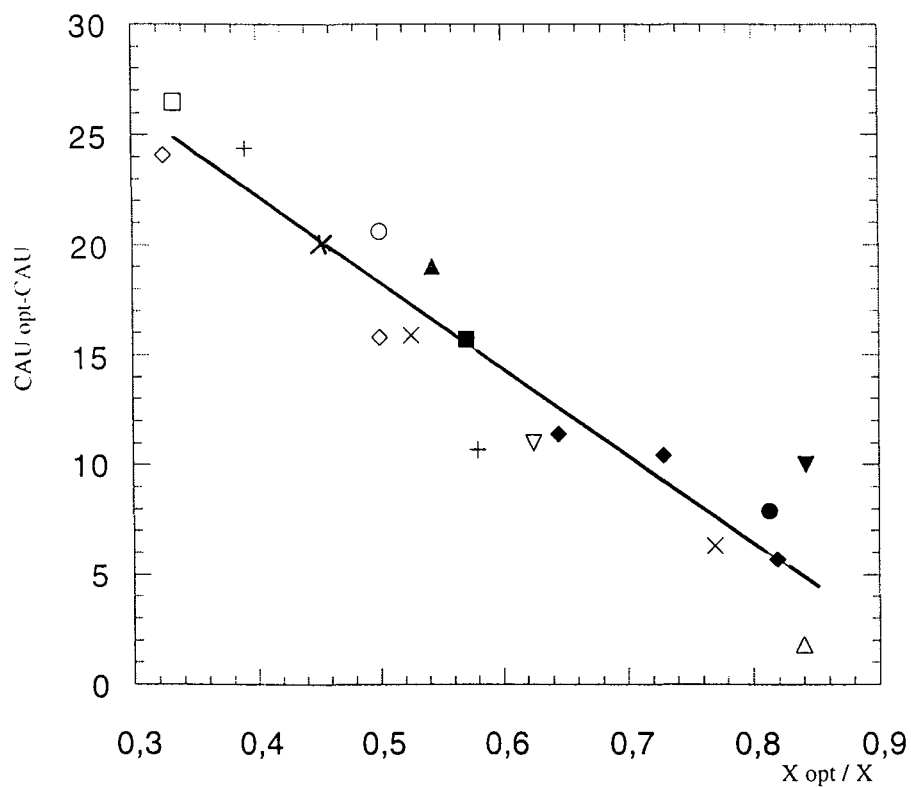
Sur 12 expérimentations issues de 5 années pour lesquelles la diminution du CAU n'était pas la conséquence d'une diminution du rendement par rapport au rendement optimum (verse physiologique en particulier), nous avons pu étudier ce phénomène pour 18 couples CAU supraoptimal/dose supraoptimale. Sachant que les CAU à l'optimum et les doses optimales sont très différentes selon les essais (Tableau n° 45), on ne peut utiliser directement les valeurs supraoptimales de ces deux variables. Nous avons donc cherché un mode d'expression relatif, qui découle de l'équation d'efficacité d'utilisation de l'engrais :

$$(1 - \text{CAU}) X = I_x + G_x + \Delta \text{RAR (MEYNARD } et al., 1996)$$

Site expérimental	Année	Gamme explorée en kg.N.ha ⁻¹	CAU à l'optimum en %	Nombre de mesure	Coefficient de la régression (a)	Ordonnée à l'origine (b)	Coefficient de détermination r ²	Signification statistique	I C de b $\alpha = 0,05$	b # 0
Courcelles	1993	50-220	58,2	4	0,5757	-3,28	97,84	***	± 8,68	
Man. haut		50-190	68,9	6	0,6710	-4,93	94,83	****	± 9,96	
Jovillier M FL	1994	105-210	78,1	4	0,8197	-11,38	98,65	****	± 11,10	x
MC		105-185	67,6	4	0,7217	-8,71	99,57	****	± 5,04	x
Mirecourt	1995	90-155	51,0	4	0,5857	-10,71	95,40	**	± 11,58	
Meligny FL	1996	100-190	49,5	4	0,5366	-2,06	85,00	*	± 23,72	
Sierck FL		80-170	67,1	4	0,6660	+2,16	97,79	***	± 9,15	
Mirecourt FD MC		100-190	75,3	4	0,8100	-5,70	95,16	**	± 19,23	
Dieulouard MC		130-220	53,2	4	0,6200	-13,00	92,65	**	± 22,00	
Auzun MC	1997	80-200	63,0	4	0,6775	-5,60	91,42	**	± 21,57	
St Marcel DFFL		80-200	85,5	4	0,8775	-5,60	99,76	****	± 4,45	x
St Marcel DfMC		80-200	85,5	4	0,8250	+4,00	99,74	****	± 4,34	
St Marcel DfFL		80-200	78,5	4	0,7900	+1,40	97,74	***	± 12,47	
Bouill. FL		80-200	75,0	4	0,7775	-6,10	99,94	*****	± 1,90	x

Tableau n° 44 : Valeurs des coefficients de la régression (a), de l'ordonnée à l'origine (b), du coefficient de détermination (r²) et de l'intervalle de confiance de l'ordonnée à l'origine (IC de b) pour les relations entre l'azote provenant apparemment de l'engrais et azote apporté. (la valeur la plus élevée de la gamme explorée représente la dose à l'optimum).

○ Seich Bas 92	+ Crez. 93	◆ Jov. 94	— — —
□ Seich haut 92	△ Courc. 93	▲ Lix. 95	
◇ Let. haut 92	● Meligny 94	▼ Mir. 96	
× Man bas 93	■ Courc. 94	▽ Seich. 96	



Graphique n° 47 - Diminution du CAU par rapport au CAU optimum (CAU_{opt}) en fonction du rapport dose optimale (X_{opt}) sur dose supraoptimale (X).

$$\text{CAU opt} - \text{CAU} = -38,84 \frac{X_{\text{opt}}}{X} + 37,61$$

$$r^2 = 88,69 \%$$

(18 valeurs, 5 années)

$$\text{pour } \frac{X_{\text{opt}}}{X} = 1 \rightarrow \text{CAU opt} - \text{CAU} = -1,2$$

Avant l'atteinte de l'optimum de la courbe de réponse, la valeur de RAR est stable (MACHET et MARY, 1990), donc on peut négliger ΔRAR et l'équation devient :

$$(1 - CAU \text{ opt}) X = I_x + G_x$$

En revanche, au-delà de l'optimum, les reliquats après récolte augmentent de façon linéaire avec la dose d'engrais (MACHET et MARY, 1990 ; MAKOWSKI *et al.*, 1998). Si on fait l'hypothèse que I_x et G_x continuent à suivre la même loi après qu'avant l'optimum, c'est-à-dire une proportionnalité à $1 - CAU \text{ opt}$, alors l'équation d'efficacité s'écrit :

$$(1 - CAU) X = (1 - CAU \text{ opt}) X + a (X - X_{\text{opt}})$$

$$\text{ou encore } CAU = CAU \text{ opt} - a \frac{(X - X_{\text{opt}})}{X}$$

$$\text{soit } CAU \text{ opt} - CAU = a - a \frac{(X_{\text{opt}})}{X}$$

Les variations de $CAU \text{ opt} - CAU$ devraient donc suivre une relation linéaire quand $\frac{X_{\text{opt}}}{X}$ varie, de forme générale $CAU \text{ opt} - CAU = \alpha - \beta \frac{X_{\text{opt}}}{X}$, avec $\beta = \alpha$.

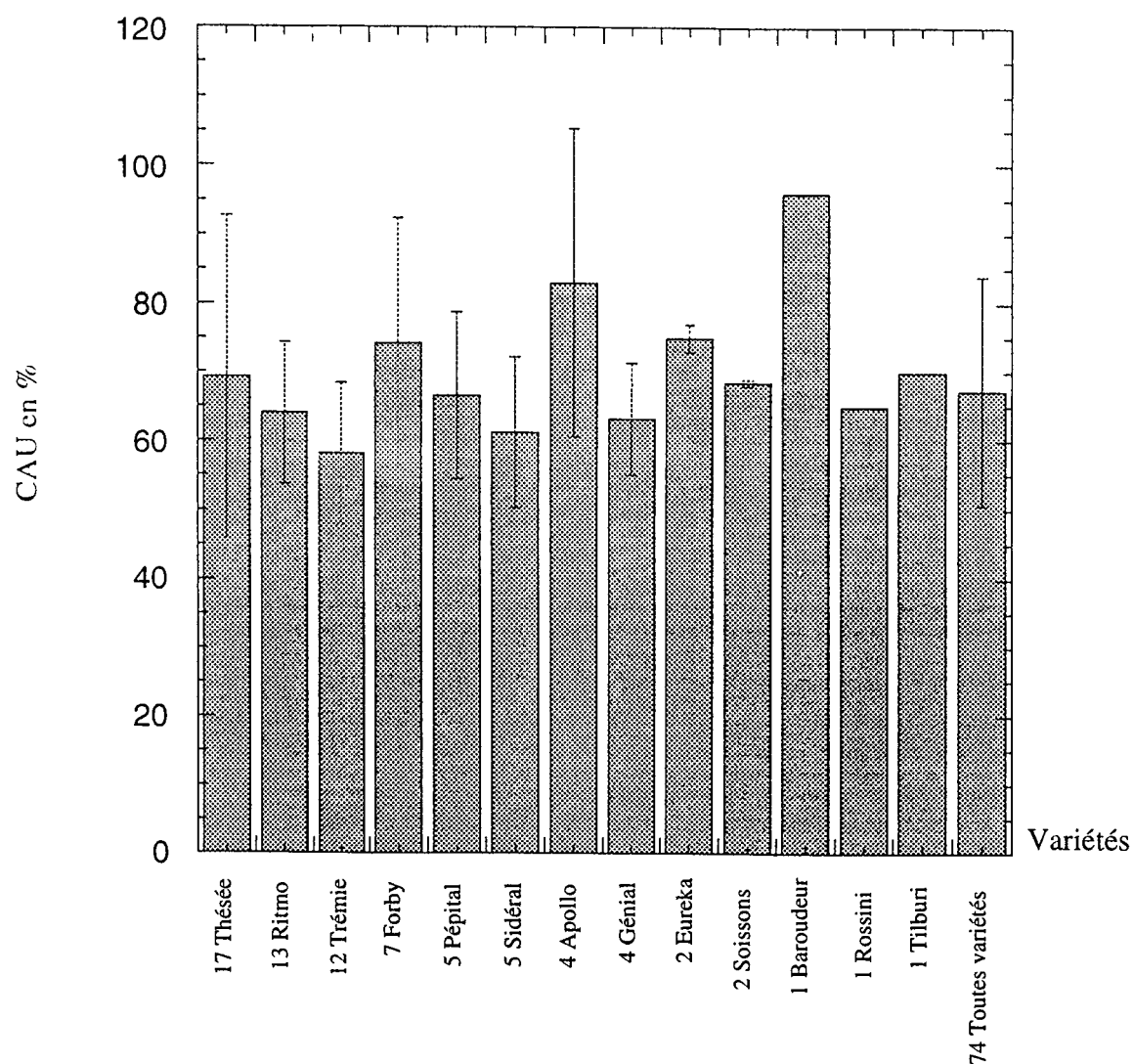
Pour des doses optimales variant de 95 kg N.ha⁻¹ à 190 kg N.ha⁻¹ et des CAU opt de 49 % à 100 % (Tableau n° 45), la relation de régression est la suivante :

$$CAU \text{ opt} - CAU = -38,84 \frac{X_{\text{opt}}}{X} + 37,61$$

(18 valeurs, 5 années)

$$r^2 = 88,69 \%$$

On vérifie donc bien que la relation est linéaire (graphique n° 47) avec un coefficient de détermination élevé et que les valeurs de α et β sont approximativement équivalentes.



Graphique n° 48 - Variabilité du CAU en fonction des variétés (valeur moyenne $\pm$ 1 écart type)

Site expérimental	Dose optimale = X_{opt}	CAU à la dose X_{opt} = CAU _{opt}	CAU supraoptimal = CAU	CAU _{opt} - CAU	$\frac{X_{opt}}{X}$
Seich bas 92	120	100,0	79,4	20,6	0,500
Seich haut 92	40	100,0	58,6	26,5	0,333
Letric. haut 92	100	100,0	84,2 75,9	15,8 24,1	0,500 0,325
Man. bas 93	100	81,1	74,8 65,2 61,0	6,3 15,9 20,1	0,769 0,526 0,454
Crezilles 93	75	49,1	38,4 24,7	10,7 24,4	0,580 0,390
Courcelles 93	190	60,3	58,5	1,8	0,840
Meligny 94	130	74,7	66,8	7,9	0,813
Courcelles 94	120	65,6	49,9	15,7	0,571
Jovilliers 94	135	82,4	76,7 72,0 71,0	5,7 10,4 11,4	0,819 0,729 0,645
Lixières 95	95	71,6	52,6	19,0	0,543
Mirecourt 96	190	74,0	64,0	10,0	0,842
Seicheprey 96	100	55,0	44,0	11,0	0,625

Tableau n° 45 - Données expérimentales pour l'étude des variations du CAU au-delà de l'optimum de la courbe de réponse à l'azote.

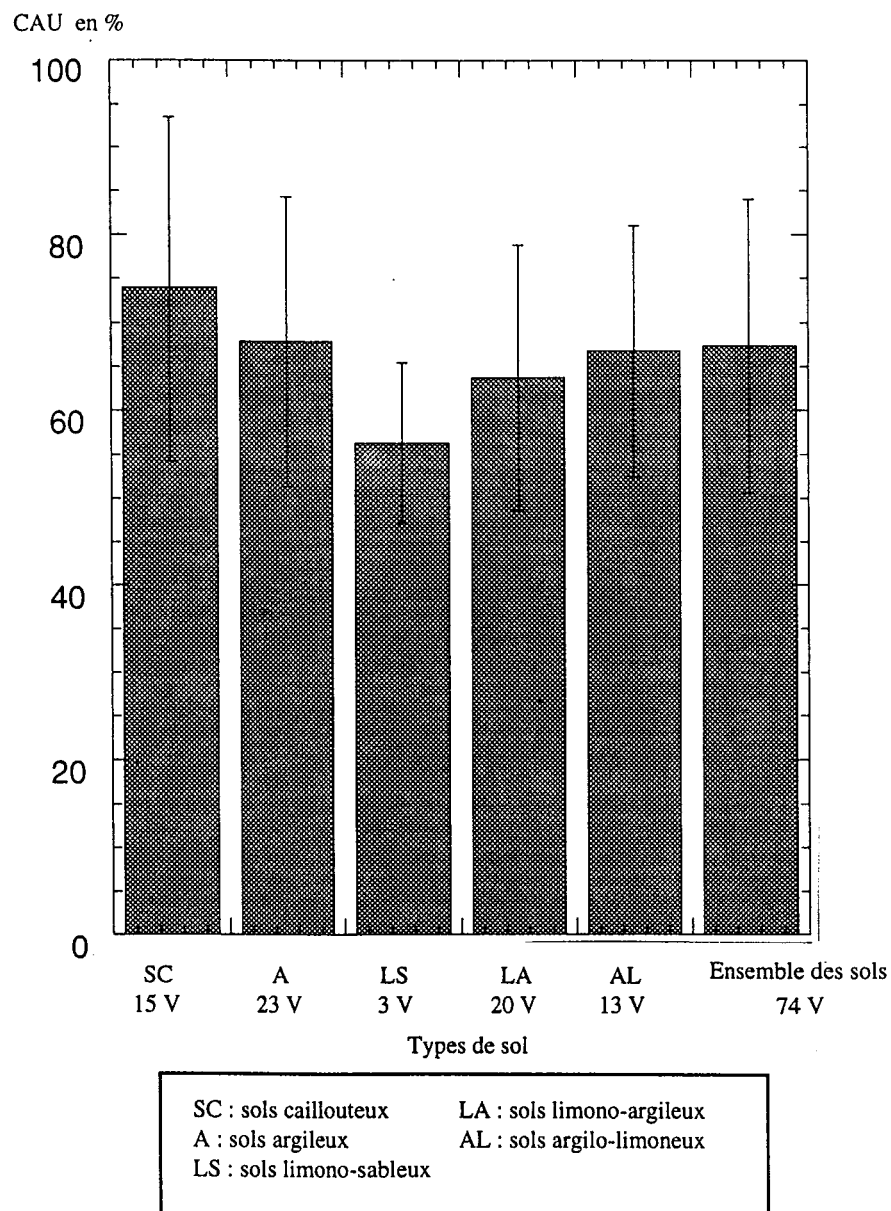
5.3.1.2. Variation du CAU à l'optimum de la courbe de réponse à l'azote

5.3.1.2.1. Effet variété, sol et année

Après avoir montré la variabilité générale du CAU à l'optimum de la courbe de réponse (cf 2.3.3.1.), nous examinerons dans un premier temps la variabilité par rapport aux facteurs variétés, sols et années, puis nous essaierons, à partir d'une analyse de variance, d'identifier parmi ces facteurs, ceux qui peuvent avoir un effet significatif.

* CAU et variétés

La gamme des valeurs moyennes observées sur 13 variétés (graphique n° 48) se situe de 58,16 pour Trémie à 96,00 pour Baroudeur. Il convient toutefois de remarquer que pour certaines d'entre elles, nous ne disposons que de 1 ou 2 valeurs (Eureka, Soissons, Baroudeur, Rossini et Tilburi). Si on examine les résultats des variétés pour lesquelles nous disposons d'au moins 5 valeurs acquises sur au moins 2 années différentes (Thésée, Ritmo, Forby, Pepital et Sidéral, soit 47 résultats sur les 74 acquis) on observe une variabilité plus faible (61,20 % pour Sidéral à 69,24 % pour Thésée), la moyenne de ces 47 résultats étant très proche de la moyenne de l'échantillon total (66,14 % contre 67,32 %). Par ailleurs, pour chaque variété, on observe une variabilité importante, le coefficient de variation s'échelonnant de 16,09 % pour le plus faible (variété Ritmo) à 33,95 % pour le plus élevé (variété Thésée).



Graphique n° 49 - Variabilité du CAU en fonction des types de sol (valeur moyenne $\pm$ 1 écart type)

* CAU et types de sol

L'examen de la distribution des CAU par type de sol (graphique n° 49) montre, hormis pour les limons sableux pour lesquels nous ne disposons que de 3 résultats (CAU moyen = 56,3 %, CV = 16,2 %), une supériorité pour les sols argilo-calcaires à cailloux, avec un CAU moyen de 73,9 % (CV = 26,5 %). Les autres types de sol présentent des valeurs équivalentes : 63,7 % pour les sols de limon argileux (CV = 23,7 %), 66,8 % pour les sols argilo-limoneux (CV = 21,4 %) et 67,8 % pour les sols argileux (CV = 24,3 %).

* CAU et année

Le graphique n° 50 montre les valeurs moyennes annuelles sur 74 résultats acquis pendant 6 années. En 1990, le CAU est le plus élevé (101,0 %), mais nous ne disposons que d'un seul résultat. Pour les autres années, en dehors de l'année 1992 qui se détache très nettement de la moyenne, (CAU moyen = 87,0 %, CV = 23,8 %), il n'apparaît pas d'effet annuel marqué.

1993 : CAU moyen = 67,4 %, CV = 26,4 %

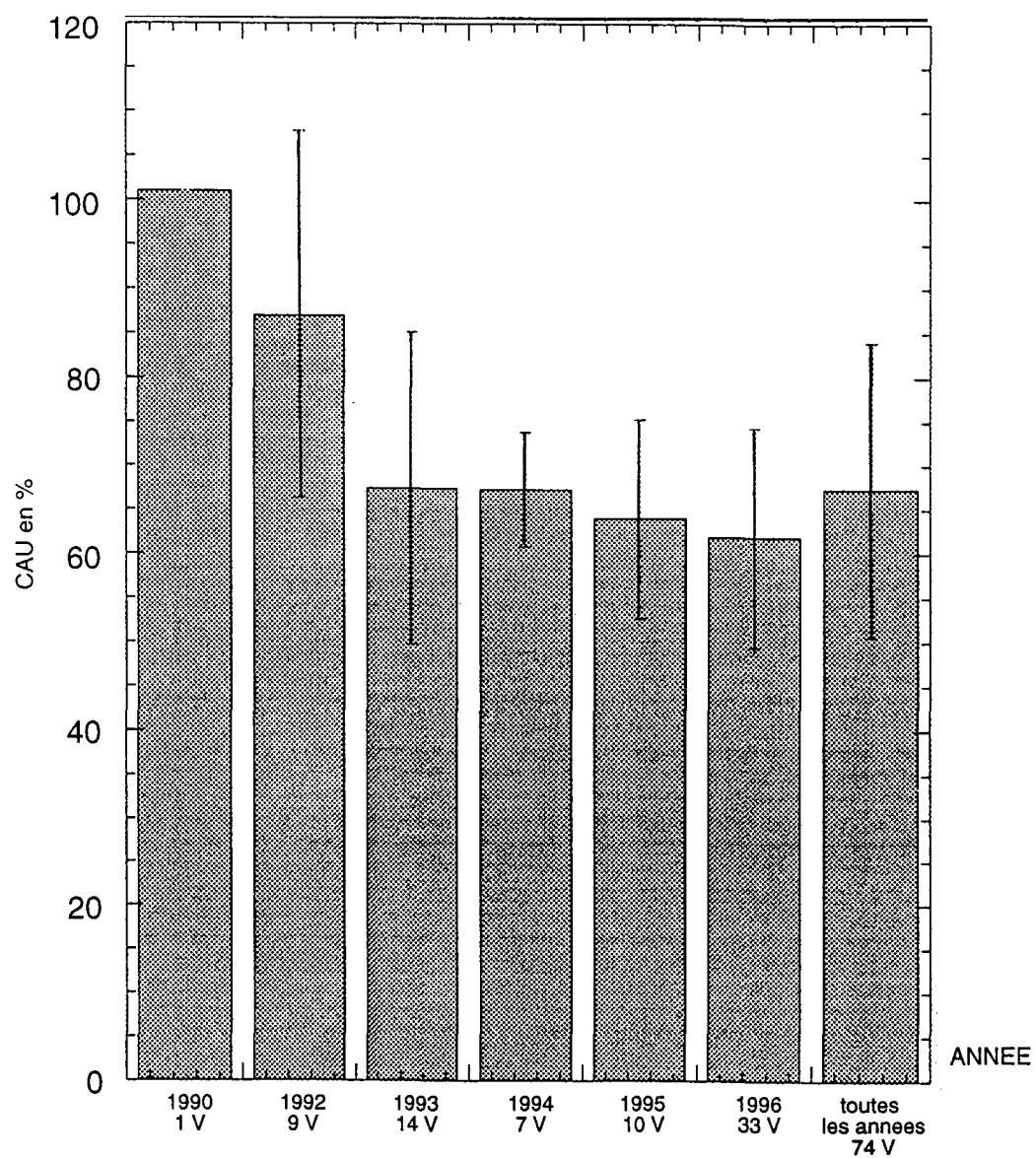
1994 : CAU moyen = 67,3 %, CV = 9,7 %

1995 : CAU moyen = 64,0 %, CV = 17,7 %

1996 : CAU moyen = 61,9 %, CV = 20,2 %

* Analyse statistique de l'ensemble des données

Pour chacune des années, nous ne disposons pas du même nombre de résultats (1 valeur en 1990 contre 33 valeurs en 1996 par exemple). De plus, pour chacune des années la représentation des variétés et des types de sol est différente. Nous avons donc dû procéder à une analyse de variance pour traitements déséquilibrés. Une première analyse globale confirme ce que laissait supposer l'examen de la variabilité, à savoir que le sol et la variété ne sont pas significatifs (au seuil de 5 %). Ensuite, on procède à une élimination progressive des variables non significatives en commençant par celles qui ont la plus grande valeur de F. La comparaison du nouveau modèle ainsi établi au précédent par un test d'équivalence permet ainsi de préciser l'effet des différentes variables. Au terme de cette analyse, nous confirmons que la variété et le sol n'ont pas d'effet. En revanche, il existe un effet significatif pour le facteur année : l'année 1992 apparaît différente de 1993, 1994, 1995 et 1996 (l'année 1990 n'ayant pu être testée puisque nous ne disposons que d'une valeur) et pour ces 4 dernières années, 1993 et 1994 apparaissent différentes de 1995 et 1996.



Graphique n° 50 - Variabilité du CAU en fonction des années (valeur moyenne $\pm$ 1 écart type)

5.3.1.2.2. Effet de la biomasse du peuplement au moment des apports d'azote sur la variation du CAU

L'étude de la variation du CAU en fonction de la biomasse au moment de l'apport d'azote a été effectuée à partir de 25 résultats obtenus sur 5 années (Tableau n° 46). A l'exception des essais Rosières 1, 2 et 5 pour lesquels l'apport d'azote a été effectué soit avant soit après le stade épi 1 cm, toutes les autres mesures ont été réalisées proches de ce stade. La gamme des états de croissance observés est importante : de 41 g MS.m² à St Hilaire D2d1 en 1993 à 185 g MS.m² à Letricourt haut en 1992.

* Etablissement du modèle de variation du CAU à partir de la matière sèche au moment de l'apport d'azote : Modèle MS

Nous avons représenté sur le graphique n° 51 les valeurs du CAU en fonction de la biomasse. La gamme des CAU s'échelonne de 38 % à 103 % avec une valeur moyenne de 70,9 %. Jusqu'à une valeur de 150 g MS.m², le CAU augmente pour atteindre 103 %. On peut toutefois observer une variabilité importante des biomasses pour une valeur identique du CAU ou inversement : par exemple, à un CAU de 70 %, peuvent être associés des niveaux de biomasse variant de 40 g MS.m² à 110 g MS.m² ; de même, pour une valeur de biomasse de l'ordre de 60 g MS.m², on peut observer une plage des CAU variant de 40 % à 70 %. De 140 g à 250 g de biomasse les valeurs du CAU restent à peu près stables entre 90 % et 100 %. A partir de ces résultats, nous avons construit le modèle MS en calculant deux régressions linéaires :

- une première en utilisant toutes les valeurs de CAU pour lesquelles la biomasse est < 150 g MS.m².
- une deuxième en utilisant les valeurs de biomasse correspondantes aux CAU compris entre 90 % et 100 %.

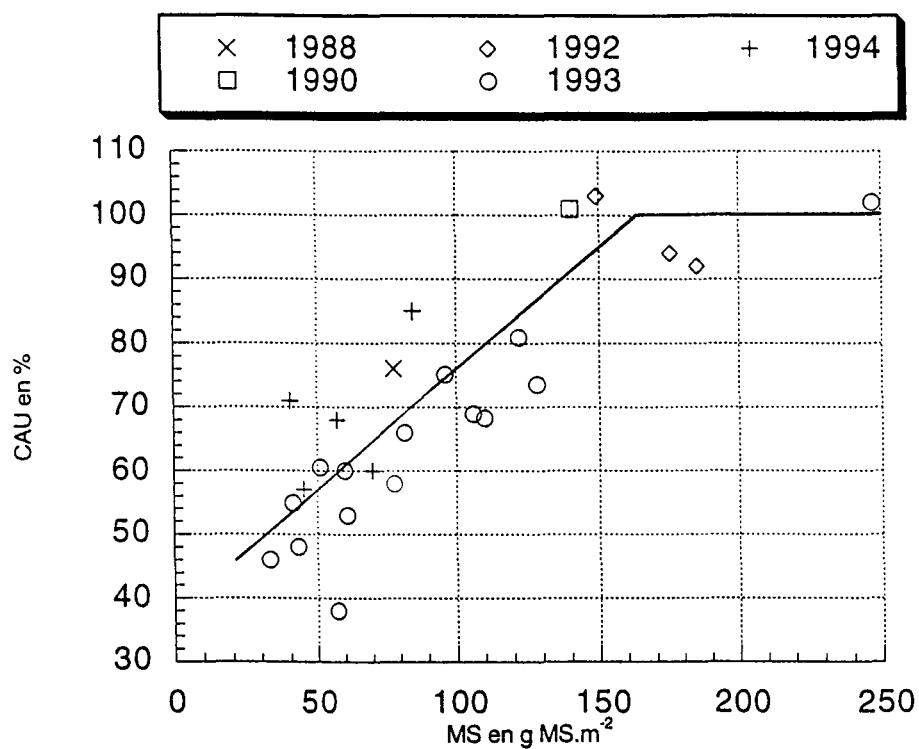
Les résultats de ces ajustements linéaires sont les suivants :

- Pour les valeur de biomasse $\leq 150 \text{ g.m}^{-2}$:

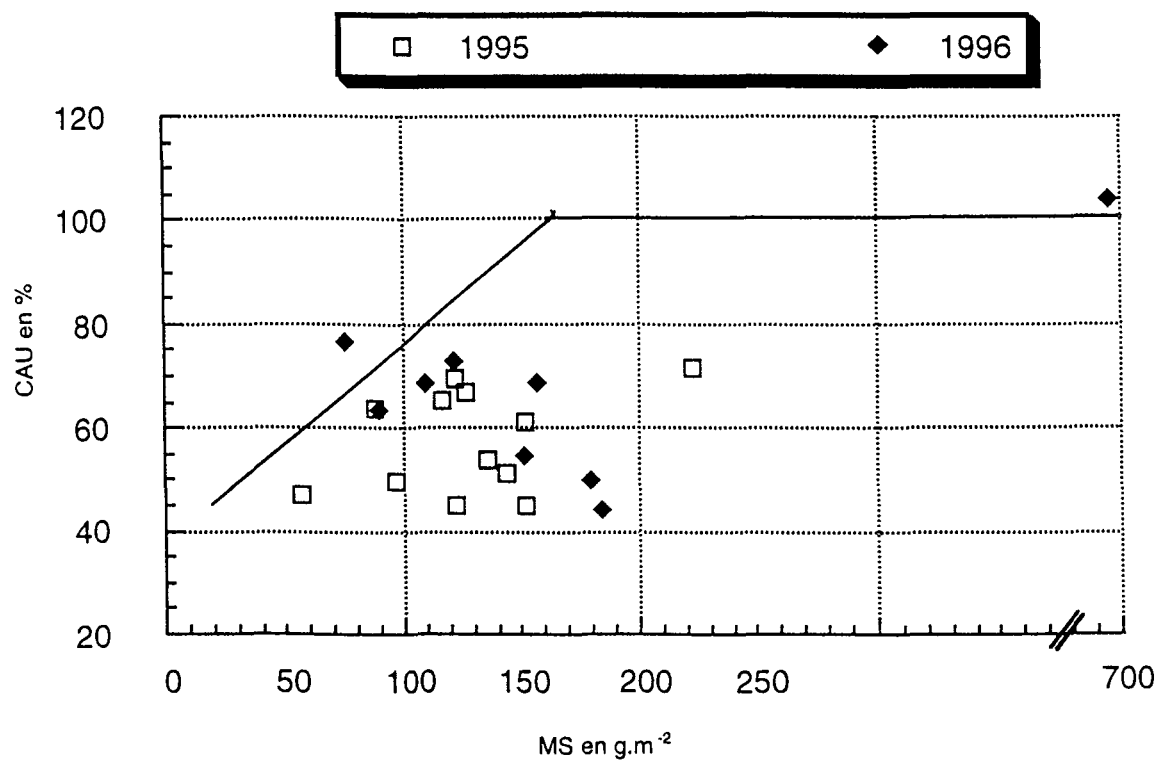
$$\text{CAU} = 0,375 \text{ biomasse} + 37,33 \quad r^2 = 64,28 \% \text{ *****}$$
- Pour les valeurs de CAU comprises entre 90 % et 100 % :

$$\text{CAU} = -0,0021 \text{ biomasse} + 98,78 \quad r^2 = 0,03 \% \text{ NS}$$

Compte tenu de ces résultats, nous considérerons que le modèle est constitué par la première relation jusqu'à une valeur de biomasse correspondant à un CAU de 100 % (162 g MS.m²) et qu'au-delà de cette valeur, le CAU est égal à 100 %.



Graphique n° 51 - Construction du modèle MS



Graphique n° 52 Test du modèle MS à partir des données acquises en 1995 et 1996

Année	Site expérimental		MS en g m ⁻²	CAU en %
1988	Bazoilles		78,1	76,1
1990	Monthureux		140,0	101,0
1992	Seicheprey bas		149,0	103,0
	Letricourt haut		185,0	92,0
	Letricourt bas		175,0	94,0
1993	Manonville haut		106,0	69,0
	Manonville bas		122,0	81,0
	Courcelles		60,0	60,0
	Crézilles		57,0	38,0
	St Hilaire	D ₁ d ₁	51,0	60,6
		D ₂ d ₁	41,0	54,9
		D ₁ d ₂	82,0	66,0
		D ₁ d ₃	96,2	75,1
		D ₂ d ₂	110,0	68,3
		D ₂ d ₃	128,4	73,5
	Rosières	1	33,0	46,0
		2	43,0	48,0
		3	78,0	58,0
		4	61,0	53,0
		5	247,0	102,0
1994	Jovilliers	F.MC	57,0	68,0
		M+fMC	40,0	71,0
	Liffol	T.FL	85,0	85,0
	Courcelles	F.MC	70,0	60,0
		f.MC	45,0	57,0

Tableau n° 46 : Construction du modèle MS : valeurs des CAU et des MS.

*** Test du modèle MS**

Nous avons testé ce modèle à partir de résultats acquis sur les années 1995 et 1996 (21 valeurs). Le tableau n° 47 et le graphique n° 52 montrent que, seuls les meilleurs résultats observés sont assez proches du modèle. On remarquera en particulier que la majeure partie des résultats 1995 (12 valeurs) et que 4 des 9 valeurs de 1996 sont très éloignées des valeurs prévues par le modèle.

Année	Site expérimental		CAU calculé	MS en g m ⁻²	CAU modèle	Δ CAU
1995	Lixières	D ₂ d ₂	49,6	97	73,8	24,2
		D ₂ d ₃	51,2	144	91,4	40,2
		D ₃ d ₂	54,0	136	88,4	34,4
	Mirecourt	D ₃ d ₃	71,6	222	100,0	28,4
		D ₁ d ₂	69,6	123	83,5	14,0
		D ₂ d ₁	47,3	56	58,4	11,1
		D ₂ d ₂	65,4	117	81,3	15,9
		D ₃ d ₂	67,1	127	85,1	18,0
	Lixières N2	D ₂ d ₂	64,0	88	70,4	6,4
		D ₂ d ₃	61,0	152	94,5	33,5
		D ₃ d ₂	45,0	122	83,2	38,2
		D ₃ d ₃	45,0	152	94,5	49,5
1996	Dieulouard		55,0	151	94,1	39,1
	Mélny		44,7	183	100,0	55,3
	Bousse		69,0	109	78,3	9,3
	Seicheprey		50,0	179	100,0	50,0
	Mirecourt FD		77,0	74	65,1	-11,9
	Mirecourt HD		73,0	121	82,8	9,8
	Sierck		64,0	89	70,8	6,8
	Stainville 1		69,0	156	96,0	27,0
	Stainville 2		104,0	694	100,0	-4,0

Tableau n° 47 : Test du modèle MS.

$$0 < MS < 162 : CAU = 0,375 MS + 37,33$$

$$MS > 162 : CAU = 100$$

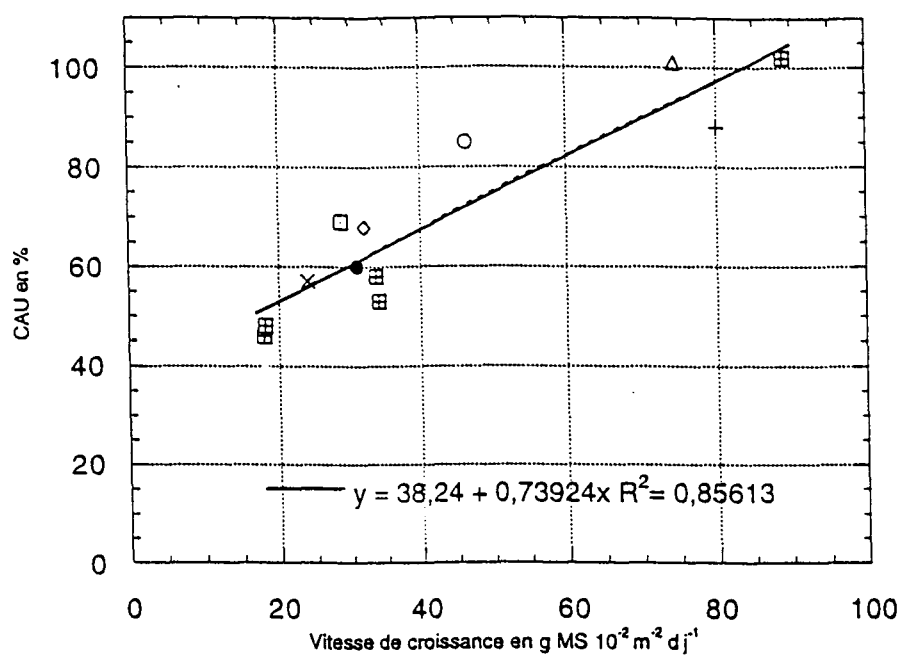
5.3.1.2.3. La vitesse de croissance du peuplement, prédicteur du CAU

Le calcul de la vitesse de croissance instantanée du peuplement, tel que défini au chapitre 5.2.1.4. nécessite au minimum deux mesures de l'état de croissance : une au moment de l'apport d'azote (MS1) et une ultérieure à cet apport (MS2). Excepté l'essai de Monthureux 1990, pour lequel un suivi de l'accumulation de biomasse a été effectué de la levée jusqu'à la récolte, ce type de mesure n'a été pratiqué qu'à partir de 1993 sur certains essais et généralisé seulement en 1994. C'est la raison pour laquelle les données qui ont servi à l'établissement de la relation CAU et vitesse de croissance (VC) sont pour partie différentes de celles qui ont servi à la construction du modèle MS.

* Etablissement du modèle reliant le CAU à la vitesse de croissance instantanée du peuplement au moment de l'apport d'azote : Modèle VC

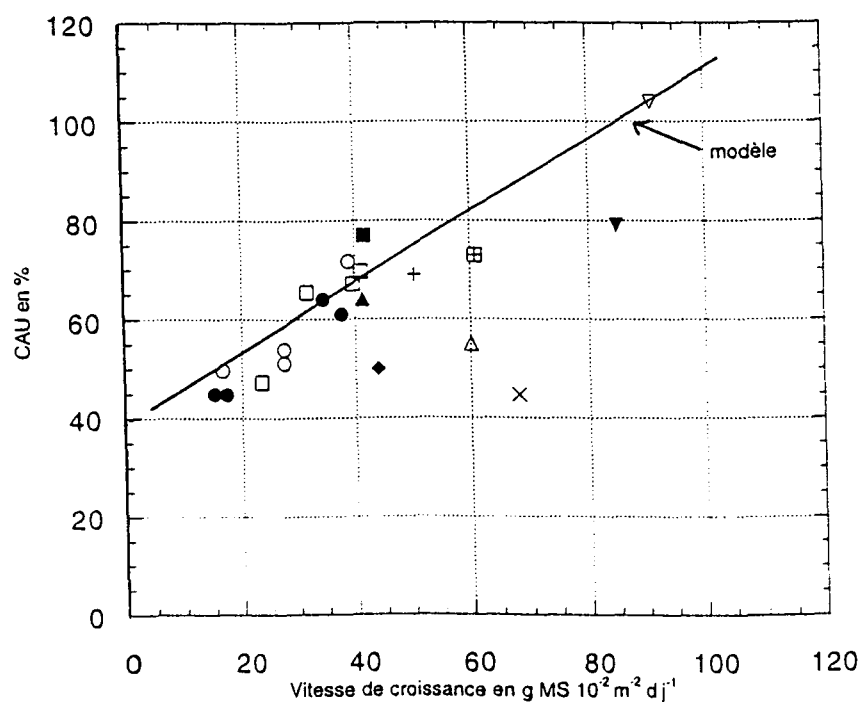
12 résultats issus de 6 expérimentations conduites en 1990, 1993 et 1994, ont été utilisés pour la construction de ce modèle. La gamme des vitesses de croissance observée s'échelonne de 18 à 89 g MS.10⁻².m⁻².dj⁻¹, et la gamme correspondante des CAU de 46 à 102 %. La gamme des états de croissance au moment de l'apport d'azote (MS1) est identique à celle du modèle MS et

◇ JOVILLIERS F 94	● COURCELLES F 94
□ JOVILLIER M+F 94	△ MONTHUREUX 90
○ LIFFOL 94	+ MANONVILLE93
× COURCELLES f 94	⊞ ROS 93



Graphique n° 53 Construction du modèle VC

○ 95 LIXIERES	+ 96 BOUSSE	◆ 96 SEICHEPREY
□ 95 MIRECOURT	△ 96 DIEULOUARD	▲ 96 SIERK
● 95 LIXIERES N2	⊞ 96 MIRECOURT HD	▼ 96 STAINVILLE 1
× 96 MELIGNY	■ 96 MIRECOURT FD	▽ 96 STAINVILLE 2



Graphique n° 54 - Test du modèle VC à partir de données acquises en 1995 et 1996.

les durées mesurées entre les deux prélèvements s'échelonnent de 102 à 274 dj, soit 10 à 20 jours selon les années et les conditions climatiques locales (Tableau n° 48). Le graphique n° 53 montre la relation établie entre le CAU et VC :

$$\text{CAU} = 0,738 \text{ VC} + 38,28 \quad r^2 = 85,5 \%$$

Année	Site expérimental	VC	CAU	MS1	MS2	SDJ
1990	MONTHUREUX	74,4	101,0	140,0	531	251
1993	MANONVILLE	80,0	88,0	150,0	292	125
1993	ROS D1D02	18,0	46,0	33,0	58	102
	ROS D1D03	18,1	48,0	43,0	66	102
	ROS D2D01	33,7	58,0	78,0	247	267
	ROS D2D02	34,0	53,0	61,0	270	267
	ROS D3D01	89,0	102,0	247,0	570	232
1994	JOV.F.MC	31,9	68,0	57,1	264	274
1994	JOV M+F.MC	28,6	69,0	40,3	206	230
1994	LIFFOL tardif	46,4	85,0	85,0	198	155
1994	COURCELLES f	23,9	57,0	45,0	172	252
1994	COURCELLES F	30,8	60,0	70,0	212	252

Tableau n° 48 : Construction du modèle VC : Valeurs des CAU, vitesses de croissance, matière sèche au premier et au deuxième prélèvement (MS1 et MS2), et somme de degré jours séparant les deux prélèvements (SDJ).

* Test du modèle VC

Nous avons testé ce modèle à partir de données issues de 11 expérimentations suivies en 1995 et 1996 (données identiques à celles qui ont servi à tester le modèle MS en 1995 et 1996) (Tableau n° 49). Les résultats présentés sur le graphique n° 54 montrent que globalement le modèle reconstitue bien les valeurs de CAU observées en 1995. En revanche, pour les données 1996, dans 4 cas sur 8, les CAU mesurés sont inférieurs de plus de 20 % aux valeurs prédites.

Année	Site expérimental	CAU en %	MS1	MS2	Sdj	VC en g MS10 ⁻² m ⁻² d j ⁻¹	CAU modèle en %	Δ CAU	
1995	LIXIERES	D2d2	49,6	97	109	117	16,7	50,6	1,00
		D2d3	51,2	144	180	117	27,5	58,6	7,37
		D3d2	54,0	136	206	205	27,5	58,6	4,57
		D2d3	71,6	222	318	205	38,9	66,98	4,61
	MIRECOURT	D1d2	69,6	123	159	77	41,0	68,53	1,06
		D2d1	47,3	56	86	103	23,4	55,54	8,24
		D2d2	65,4	117	155	103	31,7	61,67	-3,72
		D3d2	67,1	127	206	155	39,7	67,57	0,47
	LIXIERES N2	D2d2	64,0	88	139	117	34,4	63,66	-0,33
		D2d3	61,0	152	203	177	37,6	66,02	5,02
		D3d2	45,0	122	163	205	17,2	50,97	5,97
		D3d3	45,0	152	186	205	15,0	49,35	4,35
1996	MELIGNY	44,7	183	314	146	65,5	86,61	41,91	
	BOUSSE	69,0	109	354	255	50,3	75,40	6,40	
	DIEULOUARD	55,0	151	344	207	60,3	82,56	27,56	
	MIRECOURT HD	73,0	121	221	120	60,8	83,15	10,15	
	MIRECOURT FD	77,0	74	217	191	41,9	69,34	-7,65	
	SEICHEPREY	50,0	179	237	198	43,8	70,60	20,60	
	SIERK	64,0	89	198	173	41,2	68,68	4,68	
	STAINVILLE 1	79,0	156	784	397	84,8	100,86	21,86	
	STAINVILLE 2	104,0	694	968	254	91,0	105,43	1,43	

Tableau n° 49 : Test du modèle VC

$$\text{CAU} = 0,738 \text{ VC} + 38,28$$

5.3.1.2.4. Comparaison des modèles

La comparaison des modèles présentés ci-dessus a été effectuée en utilisant comme critère la MSE (cf chapitre 3.3.2.4.3.). Le tableau n° 50 montre que les valeurs de la MSE ($\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) sont toujours inférieures pour le modèle VC, que ce soit année par année (22 contre 847 en 1995 et 405 contre 911 en 1996), ou les deux années réunies (186 contre 874).

Année	1995	1996	1995 + 1996
Nombre de résultats	12	9	21
Modèle MS	847	911	874
Modèle VC	22	405	186

Tableau n° 50 : Test du modèle VC et du modèle MS - Valeurs des MSE
(en $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$)²

5.3.1.3. Discussion

Nous avons déjà évoqué la grande variabilité du CAU mesuré à l'optimum de la courbe de réponse à l'azote (cf 2.3.3.1.). Outre la similitude déjà citée avec les résultats observés en

Poitou-Charentes, on peut également signaler les travaux réalisés par Le GALL (1997) en Champagne Berrichonne, qui montrent une gamme de variation comprise entre 50 % et 130 % (53 résultats) avec 77 % des valeurs comprises entre 70 % et 110 %. Cette variabilité n'est donc pas spécifique à la Lorraine et s'exprime avec une amplitude équivalente, sous des climats et des systèmes de culture qui peuvent être assez différents. L'examen des variétés, des types de sols ne semble pas pouvoir expliquer ces différences. En revanche, l'effet année est signalé dans tous les cas :

- PLAS (1992) indique des valeurs moyennes de CAU plus faibles en 1986, ce phénomène résultant de dates de semis plus tardives que la normale à l'automne 1985 (sécheresse), la conséquence étant une plus grande vulnérabilité de l'azote au lessivage printanier par réduction des capacités d'assimilation précoce du peuplement.
- Le GALL (1997) constate des CAU moyens plus élevés en 1993 et 1994 qu'en 1990, 1991 et 1992.
- Nos propres résultats (Tableau n° 46) montrent des CAU plus élevés en 1992 et en 1993, associés à des niveaux de biomasse importants au moment des apports d'azote.

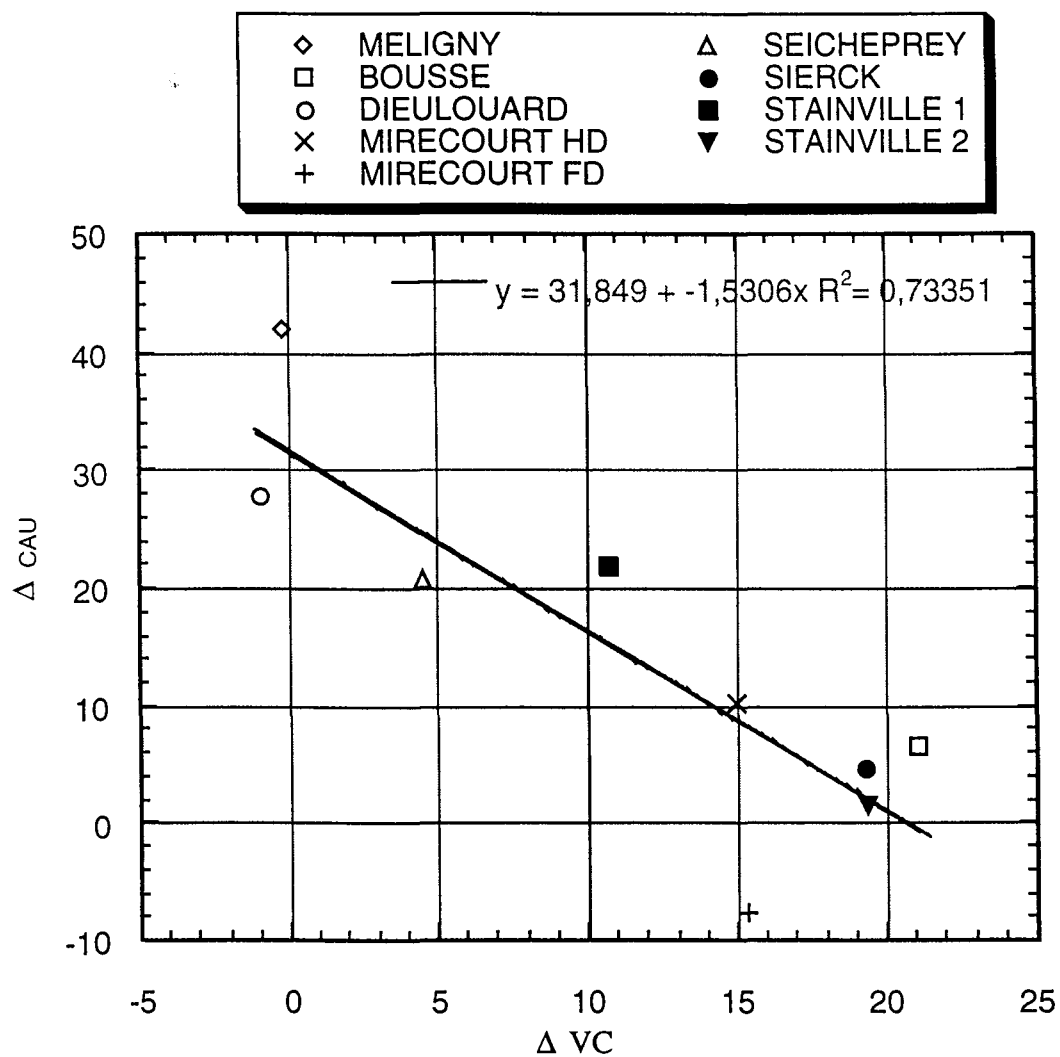
En fait de nombreux facteurs (densité de semis, date de semis, conditions de levée, variété, type de sol en relation avec l'excès d'eau hivernal, dégâts dus au gel hivernal, températures et rayonnement pendant le tallage) concourent à créer à la fin du tallage une gamme très variée d'états de croissance et ce, indépendamment du stade de développement. Notre hypothèse première était que cet état de croissance (traduit par le niveau de biomasse), générant des besoins instantanés en azote du peuplement, pouvait expliquer les différences d'utilisation de l'engrais.

En effet, en condition optimum, le prélèvement d'azote par une culture est proportionnel au LAI : $N(kg \cdot ha^{-1}) = K \cdot LAI$ (LEMAIRE et GASTAL, 1997), ce qui revient à dire que : $\frac{dN}{dt}$ (vitesse de prélèvement de N) est proportionnel à $\frac{dLAI}{dt}$ (vitesse de développement du LAI).

Or, pendant la période de croissance active, le LAI d'une culture augmente de façon exponentielle, donc $\frac{dLAI}{dt}$ augmente avec le LAI, d'où une augmentation de la vitesse de prélèvement d'azote par la culture avec le niveau de croissance de celle-ci.

Le modèle MS, construit à partir des résultats acquis en 1988, 1990, 1992 et 1993, confirme le bien fondé de cette hypothèse, mais le test effectué sur les années 1995 et 1996 montre que d'autres facteurs pouvaient intervenir sur l'absorption de l'azote. L'examen des conditions climatiques avant et après les apports d'azote met en évidence :

- un excès de pluviométrie important en 1995 : 190 mm cumulés sur les mois de mars et avril, soit 173 % de la valeur moyenne établie sur les trente dernières années.



Graphique n° 55 - Variation de ΔCAU (différence entre le CAU prévu par le modèle VC et le CAU observé) en fonction de ΔVC (différence de vitesse de croissance entre fertilisé et non fertilisé)

- un déficit de pluviométrie exceptionnel en 1996 : 33 mm, cumulés sur la même période, soit 30 % de la moyenne.

On imagine dans ces conditions que le fonctionnement du peuplement peut être notablement perturbé et en particulier on peut s'attendre à des diminutions importantes de la croissance. Ce constat nous a amené à imaginer un prédicteur du CAU qui prenne en compte, non seulement l'état de croissance au moment de l'apport d'azote, mais également son fonctionnement après l'apport. Le deuxième modèle (modèle VC) basé sur la vitesse de croissance du peuplement prévoit beaucoup mieux le CAU, en particulier pour l'année 1995 : si l'excès d'eau diminue la vitesse de croissance, alors la vitesse d'absorption de l'azote diminue et, l'azote non absorbé étant plus sujet au lessivage, aux pertes par voie gazeuse ou à l'organisation, le CAU final diminue. En revanche, pour l'année 1996, on observe une prévision moins bonne : à Dieulouard, Seicheprey et Stainville 1, la sous-estimation du CAU dépasse 20 % ; elle atteint même 42 % pour Mélny (graphique n° 54). Ce modèle n'est donc pas robuste en conditions de sécheresse importante.

Pourtant, certaines situations sont correctement prévues (Bousse, Mirecourt, Stainville 2). Pour expliquer ces différences de comportement, il peut être intéressant d'examiner la disponibilité spatiale simultanée de l'azote de l'engrais et de l'azote du sol : si l'azote du sol et l'humidité en profondeur ne sont pas limitants, la croissance n'est pas ou peu affectée par les conditions de sécheresse en surface, alors que l'azote de l'engrais, positionné dans les premiers centimètres du sol, en l'absence de pluviométrie, a peu de chance d'être absorbé. Dans ces conditions, la vitesse de croissance est un mauvais prédicteur du CAU. A l'inverse, si l'azote du sol est limitant de la croissance, et que l'azote de l'engrais n'est pas absorbé, il peut y avoir concordance entre des faibles vitesses de croissance et des faibles CAU.

Pour apprécier la disponibilité en azote du sol et son effet éventuel sur la vitesse de croissance, nous avons comparé pour les situations de 1996, la différence de vitesse de croissance des traitements fertilisés et non fertilisés avec la différence entre le CAU prévu par le modèle VC et le CAU mesuré. On observe effectivement une relation significative entre ces deux variables (Graphique n° 55).

$$\Delta \text{CAU} = -1,53 \Delta \text{VC} + 31,84 \quad (9 \text{ valeurs}) \quad r^2 = 73,35 \% \quad ****$$

Il faut donc admettre que, la vitesse de croissance du peuplement, même si elle est un meilleur indicateur de l'utilisation finale de l'engrais que la seule biomasse, ne permettra pas une prévision correcte du CAU, chaque fois que l'absorption de l'azote de l'engrais sera affectée sans que les conditions de croissance le soient.

Un autre aspect qu'il est important d'évoquer relève du devenir de l'engrais non absorbé. Si, pour des vitesses de croissance faibles, les CAU sont faibles, alors quelle est la part de l'engrais non absorbé qu'on retrouve sous forme minérale dans le reliquat après récolte ? Peut-on assurer que les quantités organisées n'augmentent pas ? Quelle est la part perdue par voies gazeuses ? Bien sûr, les dispositifs classiques mis en place au champ pour modéliser le CAU ne permettent pas de répondre à ces questions. Nous réservons la discussion sur ce sujet à la suite de l'exposé des résultats des essais bilan ^{15}N .

La stabilité du CAU en doses suboptimales a été confirmée par nos travaux. Même si dans quelques situations, le CAU augmente légèrement de façon significative avec la dose, la répercussion sur le CAU entre la dose optimale et les doses inférieures est très faible. A titre d'exemple, sur les 4 expérimentations concernées (Tableau n° 44), nous avons calculé que la différence de CAU dans le cas d'une dose réduite de 20 % par rapport à l'optimum (cas des mesures de réduction d'intrants dans le cadre des mesures agro-environnementales), n'excédait pas 1 %. Il reste que, lorsqu'on examine les relations entre le supplément d'azote absorbé par rapport à un témoin non fertilisé, et l'azote apporté, les ordonnées à l'origine sont fréquemment négatives (même si c'est rarement significatif). Ceci est conforme à l'hypothèse d'une augmentation du CAU quand la part du deuxième apport augmente (PLAS, 1992).

Pour la dose au-delà de l'optimum, nous confirmons la décroissance systématique du CAU ce qui signifie qu'une partie du supplément d'azote apporté n'est pas absorbé par la plante. Ceci est conforme à l'observation quasi systématique de l'augmentation du reliquat après récolte lorsqu'on dépasse la dose optimale (CHANEY, 1989 ; COMIFER, travaux en cours). L'autre fraction du supplément d'azote apporté contribue à enrichir la plante en protéines. Même si l'augmentation de la teneur est la plus importante dans les pailles, les conséquences sur la teneur en protéines des grains ne sont pas négligeables et nous avons mesuré sur nos essais des augmentations qui peuvent atteindre 2 %. Il reste que, si cette technique de fertilisation a souvent été utilisée pour pallier la faible teneur en protéines des variétés les plus productives, elle est devenue complètement incompatible avec les exigences environnementales auxquelles les agriculteurs sont actuellement confrontés.

5.3.2. UTILISATION DE L'ENGRAIS, ÉTAT DE CROISSANCE ET VITESSE DE CROISSANCE DU PEUPLEMENT

5.3.2.1. Conditions climatiques après les applications d'engrais

Les conditions climatiques après chaque application d'engrais (rayonnement incident, température moyenne de l'air, pluviométrie et teneur en eau du sol) sont consignées dans le tableau n° 51.

Pour la même date d'apport de l'engrais (N_1 ou N_2), les conditions de température ne sont pas très différentes (3 à 5°C après le premier apport, 6 à 9°C après le deuxième apport). Il en est de même pour le rayonnement (700 à 900 J.cm⁻² pour N_1 et 760 à 950 J.cm⁻² pour N_2) sauf pour le deuxième apport à Mons où celui-ci est nettement plus élevé (1650 J.cm⁻²).

La caractéristique principale concerne la pluviométrie importante pendant les 10 jours qui ont suivi la seconde application d'azote à Lixières et à Mirecourt en 1995 (43 mm à Lixières et 50 mm à Mirecourt). Le même phénomène est observé sur les mois de mars et d'avril (du premier apport au deuxième apport + 20 jours) où on enregistre une pluviométrie exceptionnelle : 158 mm à Lixières et 191 mm à Mirecourt, soit une valeur moyenne équivalente à 170 % de la moyenne trentenaire.

La détermination de la teneur en eau du sol au moment du premier prélèvement après le deuxième apport d'azote (10 jours après) montre que le sol était saturé à Lixières (116 % de la capacité au champ) alors qu'on n'enregistrait que 87 % à Mirecourt et 86 % à Mons (Tableau n° 52).

Sites expérimentaux	Rayonnement moyen journalier en joules.cm ⁻²	Température moyenne journalière	Pluviométrie en mm d'eau					
			Mars			Avril		
			1ère décade	2ème décade	3ème décade	1ère décade	2ème décade	3ème décade
MONS 1985 N_1	694	3,3°C	12,7	17,5	32,5	26,3	28,0	9,7
N_2	1656	9,5°C						
LIXIERES 1995 N_2	952	7,5°C	18,4	50,9	25,3	1,8	43,4	18,6
MIRECOURT 1995 N_1	906	5,5°C	28,0	57,0	36,3	2,0	50,0	18,0
N_2	756	6,4°C						

Tableau 51 : Valeurs du rayonnement et de la température entre l'apport d'azote et le premier prélèvement

Essai de MONS : du 6/03/85 au 14/03/85 pour N_1

du 17/04/85 au 25/04/82 pour N_2

Essai de LIXIERES : du 11/04/95 au 21/04/95 pour N_2

Essai de MIRECOURT : du 28/02/95 au 10/04/95 pour N_1

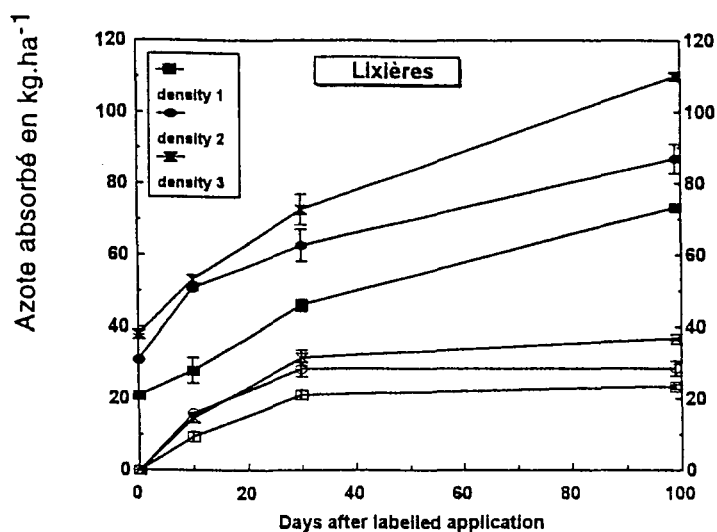
du 11/04/95 au 21/04/95 pour N_2

- Pluviométrie par décade pour les mois de Mars et Avril.

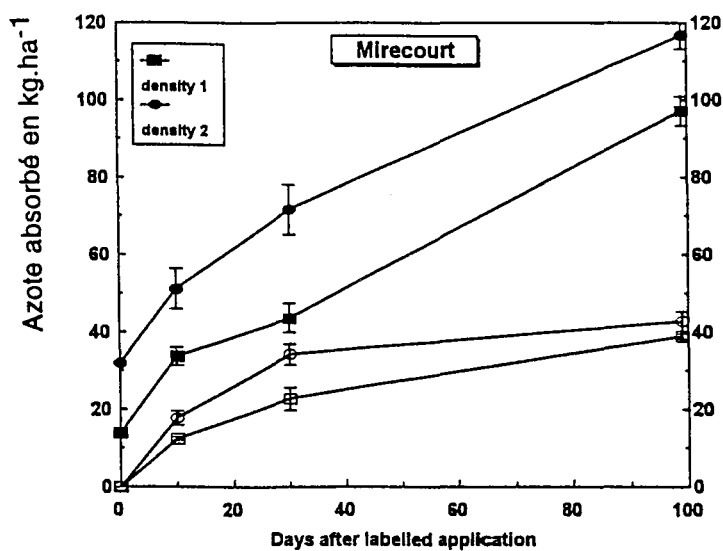
		HCC en % du sol sec	H_{p1} en % sur 0-30 cm	$\frac{H_{p1}}{HCC}$
MONS	N_1	24,0	23,9	0,99
	N_2		20,8	0,86
LIXIERES	N_2	26,5	30,86	1,16
MIRECOURT	N_2	35,1	30,75	0,87

Tableau n° 52 : Humidité à la capacité du champ (HCC), humidité au 1er prélèvement (H_{p1}) et rapport de ces humidités $\frac{H_{p1}}{HCC}$ pour les trois essais.

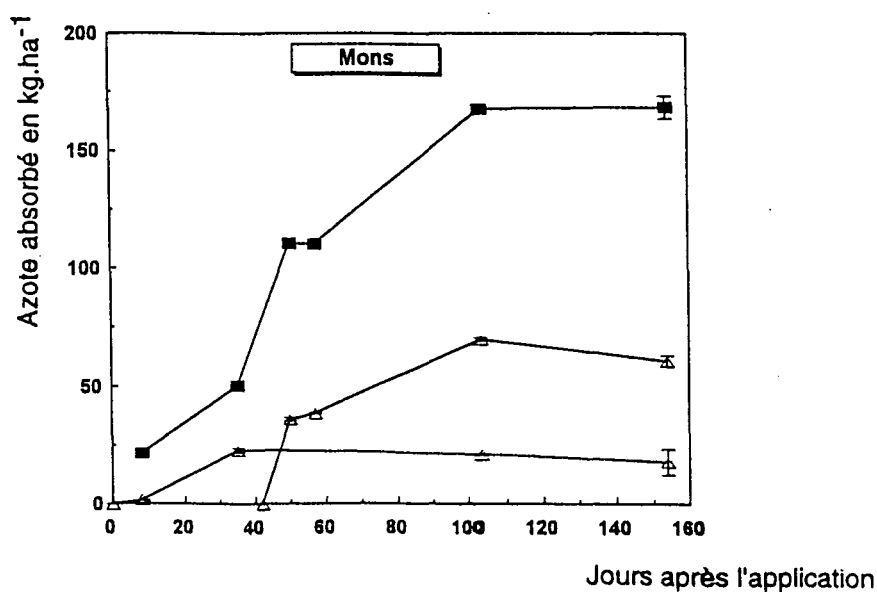
Graphique n° 56a



Graphique n° 56b



Graphique n° 56c



Graphique n° 56 - Cinétique d'absorption de l'azote par la plante

- symboles pleins : azote total
- symboles vides : azote de l'engrais (2ème apport pour Lixières et Mirecourt, 1er et 2ème apport pour Mons)

Site	Date de semis	Variété	Densité de peuplement en pieds/m ²	Vitesse de croissance		Matière sèche des parties aériennes en g.m ⁻²		
				au 1er apport d'azote	au 2ème apport d'azote	au 1er apport	au 2ème apport	au 1er prélèvement après le 2ème apport
LIXIÈRES	18/10/94	Ritmo	D ₁ : 127	ND	10.7	24.2	89.3	97.5
			D ₂ : 217	ND	29.8	25.5	137.3	160.8
			D ₃ : 361	ND	49.6	46.7	177.8	218.0
MIRECOURT	20/10/94	Ritmo	D ₁ : 112	4.1	57.2	25.5	47.9	102.5
			D ₂ : 209	15.0	62.5	34.0	100.4	163.5
MONS	15/10/85	Pernel	D ₁ : 250	35.3	102.3	32.3	159.5	260.0

Tableau n° 53 : Etats de croissance et vitesse de croissance (en g MS. 10⁻².m⁻².dj⁻¹) sur les différents traitements des trois essais.

5.3.2.2. Biomasse, vitesse de croissance et utilisation de l'azote

En considérant l'ensemble des expérimentations, le niveau de biomasse au moment des apports (première et deuxième application) varie très largement, de 24 à 180 g.m⁻² (Tableau n° 53).

Sur les deux expérimentations où on a fait varier les densités, il varie également en fonction des densités. Les quantités totales d'azote accumulé dans les parties aériennes au moment du deuxième apport d'azote sont respectivement de 21(D₁), 31(D₂) et 38(D₃) kg N.ha⁻¹ à LIXIÈRES et 14(D₁) et 32(D₂) kg N.ha⁻¹ à MIRECOURT.

L'examen des cinétiques d'absorption montre que les quantités d'azote absorbé augmentent jusqu'à la récolte, mais également que le classement entre densités reste constant. On peut toutefois observer que la vitesse d'absorption de l'azote de l'engrais est élevée pendant les 30 premiers jours, puis diminue de façon significative à Mirecourt, et devient nulle à Lixières (graphiques n° 56a et b). A Mons, le maximum de recouvrement est obtenu au 35ème jour après l'apport pour le premier apport, et au 61ème jour pour le deuxième apport. La majeure partie de l'azote de l'engrais absorbé à la récolte est donc déjà présente dans la plante, 30 jours après l'apport (graphique n° 56c).

De plus, sur les 3 essais une relation étroite existe entre l'azote recouvré à la récolte et l'azote déjà présent dans la plante 10 jours après l'apport :

$$\% \text{ N prélevé à la récolte} = 1,26 \% \text{ N prélevé } J+10 + 16 \quad r_2 = 87 \% \text{ ****}$$

$$n = 7$$

A Lixières, le recouvrement de l'engrais mesuré à la récolte augmente significativement avec la densité de peuplement : 23,05 ± 0,6 % pour D₁, 23,6 ± 2,1 % pour D₂ et 36,8 ± 0,2 % pour D₃, la fraction de l'azote absorbé par les plantes hors des cylindres étant très faible (< 1 %) et indépendante de la densité.

Sites expérimentaux	Traitement	1 MS des PA en kg.ha ⁻¹	2 N total absorbé en kg.ha ⁻¹ (PA)	3 CRU en % (PA)	4 N dérivé de l'engrais en kg.ha ⁻¹ (PA)	5 N minéral total dans le sol en kg.ha ⁻¹	6 N minéral de l'engrais dans le sol		7 N de l'engrais organisé dans le sol		10 Bilan ¹⁵ N avec N plante PA en %
							en kg.ha ⁻¹	en %	en kg.ha ⁻¹	en %	
LIXIERES 1995	D ₁ N ₂	9723 (209)	73,3 (1,10)	23,5 (0,6)	23,5	39,7 (3,4)	0,47 (0,03)	0,47	19,71 (3,98)	19,71	43,7 (4,5)
	D ₂ N ₂	11464 (852)	87,0 (4,12)	28,6 (2,1)	28,6	39,6 (1,8)	0,75 (0,03)	0,75	19,28 (1,14)	19,28	48,7 (3,3)
	D ₃ N ₂	13802 (286)	110,0 (0,81)	36,8 (0,2)	36,8	39,3 (2,7)	0,75 (0,57)	0,75	20,25 (3,08)	20,25	57,8 (2,9)
MIRECOURT 1995	D ₁ N ₁	6673 (1,54)	52,7 (2,51)	18,8 (1,8)	7,5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	D ₂ N ₁	8293 (551)	55,6 (2,59)	28,8 (2,1)	11,5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	D ₁ N ₂	10511 (547)	97,2 (3,70)	39 (0,7)	39,0	38,1 (2,0)	0,96 (0,08)	0,96	18,48 (1,09)	18,48	58,4 (1,0)
	D ₂ N ₂	12912 (310)	116,8 (3,60)	42,9 (2,5)	42,9	39,5 (1,2)	0,77 (0,01)	0,77	20,49 (0,60)	20,49	64,1 (2,3)
MONS 1985	D ₁ N ₁	17465 (220)	161,3 (5,5)	33,9 (5,6)	18,0	14,8 (0,2)	0,2 (0,0)	0,9	15,87 (1,4)	31,75	66,6 (7,5)
	D ₁ N ₂	18520 (526)	175,9 (4,0)	54,9 (2,3)	60,4	14,8 (0,2)	0,4 (0,0)	0,7	24,58 (1,6)	22,35	78,0 (2,4)

D₁ = Densité 1 ; D₂ = Densité 2 ; D₃ = Densité 3 ; N₁ = 1er apport ; N₂ = 2ème apport ; PA = parties aériennes ; () = écart type de la moyenne

Tableau 54 : Production de matière sèche, azote absorbé, devenir de l'engrais et bilan de l'engrais, à la récolte

A Mirecourt, le recouvrement de l'engrais est significativement plus élevé pour la densité 2 que pour la densité 1 ($42,9 \pm 2,5$ % pour D2 contre $39,0 \pm 0,7$ % pour D1). Il existe également une différence significative pour ces deux densités au premier apport ($28,8 \pm 2,1$ % pour D2 contre $19,1 \pm 1,8$ % pour D1). le pourcentage de recouvrement étant toujours supérieur pour le deuxième apport que pour le premier apport (Tableau n° 54), ceci étant également vérifié pour l'essai de Mons.

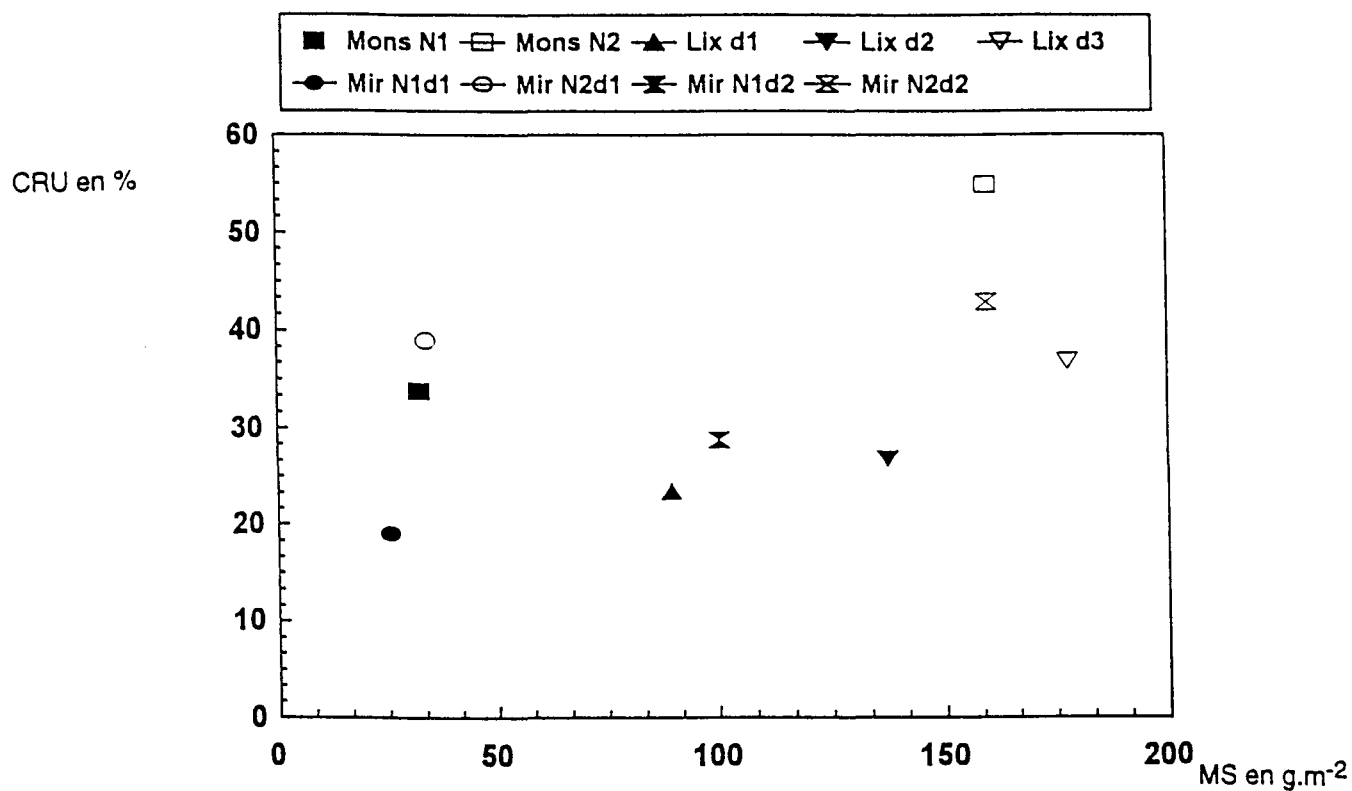
En fait, pour chacune des expérimentations, le coefficient d'utilisation augmente dans le même sens que la biomasse mesurée au moment de l'apport. Mais lorsqu'on analyse les résultats des 3 essais simultanément, on remarque que des CRU équivalents peuvent être associés à des états de croissance variant de 1 à 4 (Graphique n° 57). En revanche, lorsqu'on examine la relation entre le CRU et la vitesse de croissance instantanée du peuplement (variable selon les essais de 4.10^{-2} g MS.m⁻² à 102.10^{-2} g MS.m⁻²) (Tableau n° 53) on observe une relation très hautement significative, indépendante du site expérimental, de la date d'application et de la densité des semis (Graphique n° 58).

5.3.2.3. Le devenir de l'azote de l'engrais dans le sol

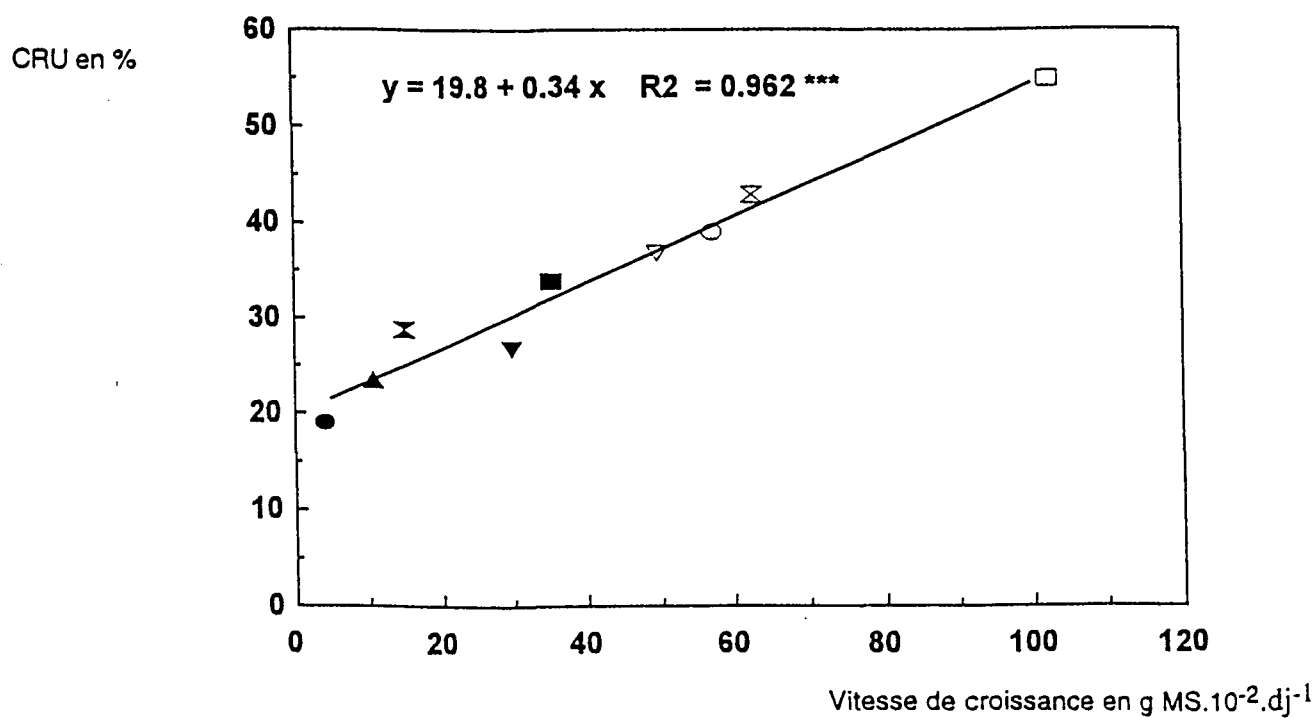
La dynamique de l'azote minéral et de l'azote 15 dans le sol montre qu'il existe des différences infimes entre densité et sites, sauf à Lixières où une différence significative est apparue uniquement au jour 30 entre les trois densités (Graphique n° 59a), cette différence étant gommée à la récolte où on retrouve des quantités moyennes d'azote minéral total de l'ordre de 40 kg.ha⁻¹ sur une profondeur de 1 m.

A Mirecourt, il n'y a pas de différence entre les deux densités en terme de quantité d'azote minéral (Graphique n° 59b). Pour ce qui concerne l'azote minéral de l'engrais à Lixières, on constate une diminution très rapide, avec une disparition presque complète au 30ème jour. Les quantités restantes dans le sol à cette époque sont toutefois significativement différentes entre la densité 1 et 2 (9,5 et 12,8 kg N.ha⁻¹) et la densité 3 (3 kg N.ha⁻¹). Au moment de la récolte, il ne reste plus d'azote de l'engrais dans le sol (< 1 kg N.ha⁻¹). A Mirecourt, la disparition de l'azote minéral de l'engrais dans le sol est plus rapide pour la densité 2 que pour la densité 1, mais en moyenne plus lente qu'à Lixières. La différence entre les deux densités a été gommée au jour 30 et, comme pour Lixières, on ne retrouve pratiquement plus d'azote de l'engrais à la récolte. Pour l'expérimentation de Mons, la principale caractéristique concerne la rapidité de la disparition de l'azote de l'engrais après le deuxième apport, et comme pour les 2 essais précédents, la disparition complète de celui-ci à la récolte (Graphique n° 59c).

La part de l'azote de l'engrais immobilisé dans le sol a été déterminée à la récolte (Tableau n° 54). Pour les essais de Lixières et Mirecourt, comme les quantités appliquées étaient de 100



Graphique n° 57 Relation entre le CRU à la récolte et le niveau de biomasse au moment de l'apport d'azote



Graphique n° 58 Relation entre le CRU à la récolte et la vitesse de croissance du peuplement au moment de l'apport d'azote

kg N.ha⁻¹, le pourcentage d'engrais immobilisé peut être converti directement en quantité d'azote immobilisé en kg N.ha⁻¹. Les quantités immobilisées ne sont pas significativement différentes, que ce soit entre les différentes densités pour chacun des essais, ou que ce soit entre chaque essai. Elles sont de l'ordre de 20 kg N.ha⁻¹, dont 11 à 12 kg N.ha⁻¹ sont présents dans la couche 0-13 cm, et la quasi totalité du reste dans la couche 17-30 cm.

A Mons, la quantité d'azote du deuxième apport immobilisée est égale à 20,2 kg N.ha⁻¹ (soit 22,3 % des 110 kg appliqués). Seule l'immobilisation de l'azote du premier apport est significativement différente (31,7 %) des autres traitements, ce pourcentage élevé correspondant à une quantité d'azote immobilisé plus faible, environ 15 kg N.ha⁻¹ (Tableau n° 54).

5.3.2.4. Le recouvrement total de l'engrais

Le bilan du ¹⁵Ntotal (Tableau n° 54) montre qu'une assez grande quantité de celui-ci n'a pas été récupérée : 42 à 56 % à Lixières, 36 à 42 % à Mirecourt et 22 à 33 % à Mons selon les traitements. Basée sur des précédentes mesures (RECOUS *et al.*, 1988 ; RECOUS et MACHET, à paraître) la sous-estimation du bilan due à la non mesure de l'azote dans les systèmes racinaires peut être estimée à quelques pour-cent. Aucune trace d'azote ¹⁵N n'a été retrouvée dans les couches inférieures à 60 cm, ce qui indique qu'il n'y a pas eu de lixiviation. Par conséquent, l'azote non récupéré peut être supposé dû à des pertes par dénitrification ou par volatilisation. Les conditions très humides qui ont précédé et suivi les apports d'azote en 1995 ont probablement favorisé une intense dénitrification. Les pertes d'engrais ainsi définies (défaut de bilan), exprimées en % de l'azote appliqué, sont plus élevées lorsque celui-ci a été appliqué sur des traitements ayant un faible CRU et diminue linéairement lorsque le CRU augmente (Graphique n° 60) La seule exception concerne le bilan ¹⁵N obtenu pour le premier apport à Mons, où la valeur du défaut de bilan est plus faible que pour les autres traitements.

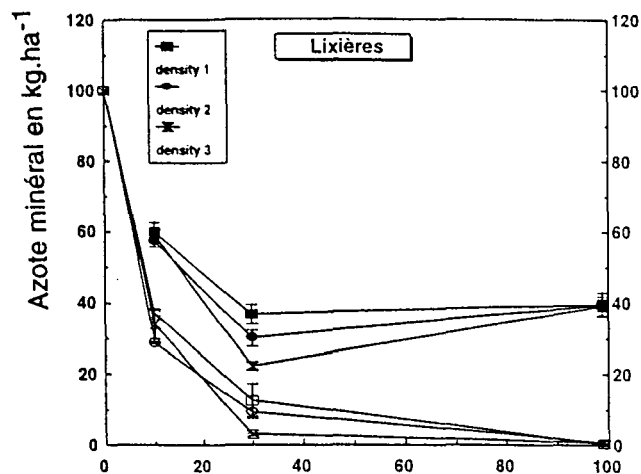
5.3.2.5. Discussion

5.3.2.5.1. Vitesse de croissance et utilisation de l'engrais

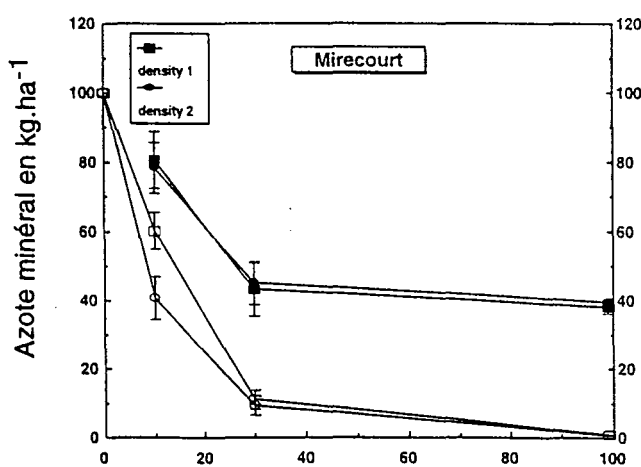
Les comparaisons des vitesses de croissance et de la biomasse pour les 3 expérimentations montre que les vitesses augmentent proportionnellement aux biomasses. En effet, une biomasse plus élevée confère un indice foliaire plus élevé et donc une meilleure utilisation du rayonnement et une photosynthèse plus efficace (GOSSE *et al.*, 1986). mais les relations entre biomasse et vitesse de croissance ne sont pas identiques dans tous les essais.

A Mirecourt et à Mons, les vitesses de croissance calculées au deuxième apport d'azote, se situent dans la gamme 57-100.10⁻² g MS.dJ⁻¹ pour des biomasses comprises entre 48 et 160 g MS.m⁻². Sur le site de Lixières, la gamme des vitesses de croissance est beaucoup plus basse

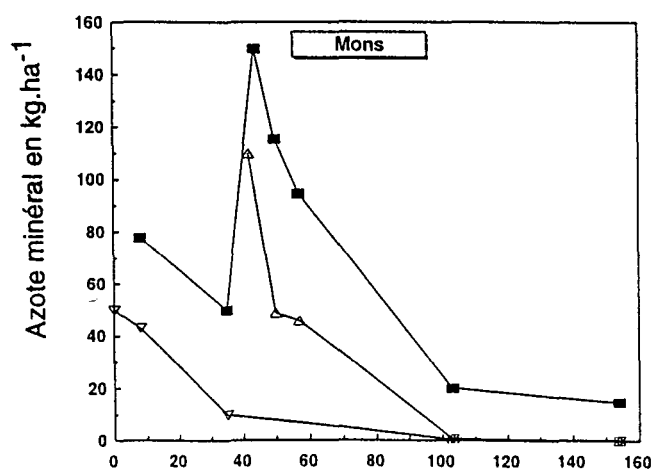
Graphique n° 59a



Graphique n° 59b



Graphique n° 59c



Jours après l'application

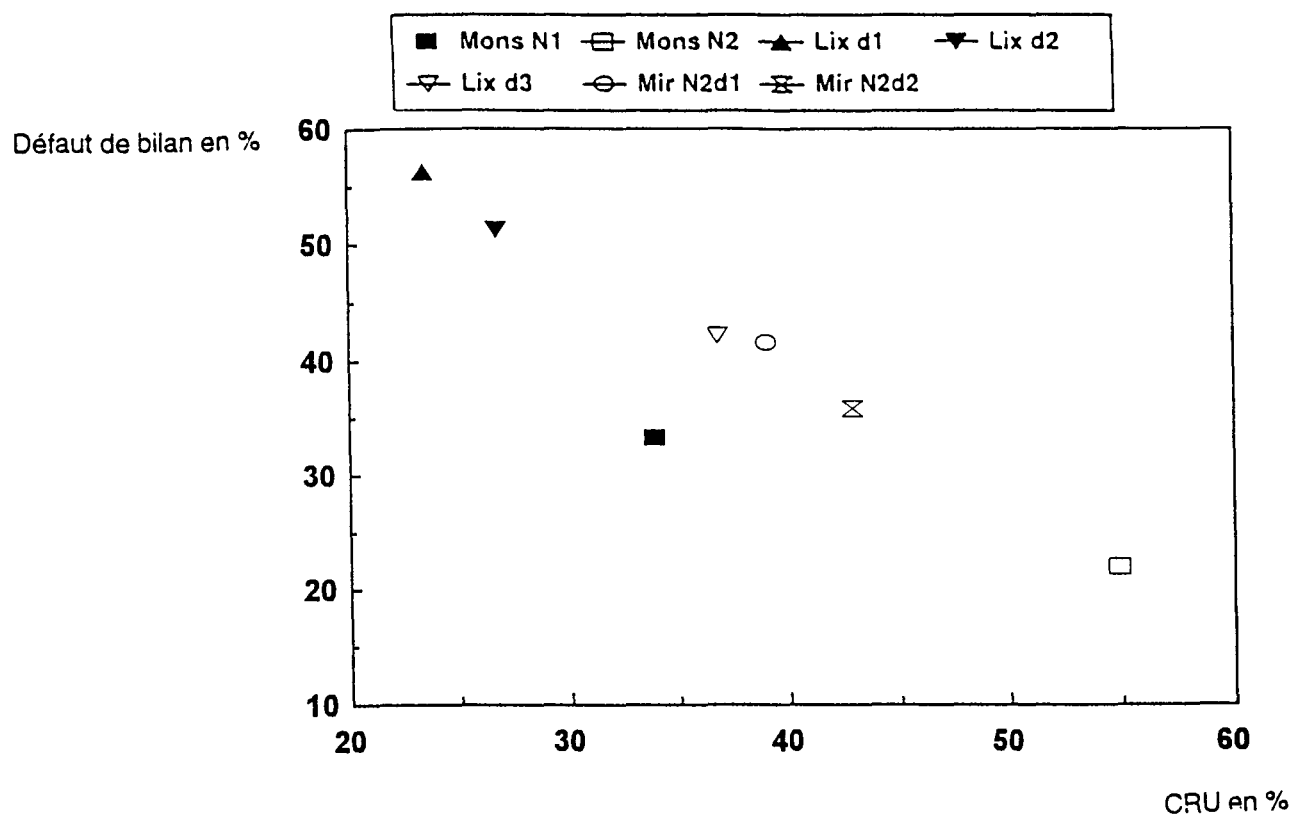
Graphique n° 59 Evolution de l'azote minéral dans le sol

- symboles pleins : azote minéral total
- symboles vides : azote minéral de l'engrais (2ème apport pour Lixières et Mirecourt, 1er et 2ème apport pour Mons)

(11 à 50.10² g MS.m⁻².dJ⁻¹), alors que la gamme des biomasses n'est pas sensiblement différente (90 à 100 g MS.m⁻²). Les différences observées entre le niveau de rayonnement incident pendant la période sur laquelle la vitesse de croissance est calculée, ne peuvent expliquer une telle disparité entre Lixières et les autres sites. Une hypothèse est que la teneur en eau élevée du sol et l'engorgement temporaire sur le site de Lixières a ralenti la croissance du peuplement tout en créant des conditions favorables à la dénitrification conduisant ainsi à un bilan de l'azote dans le sol et la plante plus faible.

Le principal objectif du travail était de faire la distinction entre les effets de la demande en azote de la culture, le climat à la date d'application de l'engrais et l'effet général de la date d'apport sur le devenir de l'azote apporté. Les valeurs du CRU de l'engrais déterminées à la récolte varient de 19 à 55 %, les valeurs les plus faibles correspondant au premier apport. Il existe une relation linéaire étroite entre le CRU mesuré à la récolte et celui mesuré au premier prélèvement (10, 10 et 8 jours après l'apport, respectivement pour Lixières, Mirecourt et Mons), ce qui indique qu'une fraction importante de l'engrais est absorbée par la culture très rapidement après l'application. Ces résultats démontrent également que le CRU de l'engrais à la récolte est relié linéairement à la vitesse de croissance de la culture au moment de l'apport d'engrais. A l'inverse, il est mal relié à la biomasse. Par conséquent, l'utilisation finale de l'engrais par la plante (à la récolte) semble être principalement déterminée par la vitesse de croissance de la culture au moment de l'apport, qui détermine elle même la demande instantanée en azote du peuplement.

Ces résultats suggèrent clairement que, sous nos conditions de culture et de climat, la demande en azote du peuplement qui varie avec la date d'application en relation avec le cycle de développement de la culture, est le principal facteur déterminant le sort de l'engrais et sa répartition entre azote absorbé et les autres processus. La relation établie est valide pour un site expérimental et pour plusieurs densités (par exemple Lixières) mais également lorsqu'on prend en compte globalement les résultats de plusieurs expérimentations conduites sur des sites différents. Le premier point suggère que la vitesse de croissance de la culture, pour des types de sol et des conditions climatiques identiques, détermine le CRU et donc le sort final de l'engrais apporté. Le deuxième point laisse penser que la vitesse de croissance de la culture reste le principal facteur de variation de l'utilisation de l'engrais, sous des conditions édaphiques différentes. Toutefois, la gamme des situations explorées n'est que peu représentative des situations dans lesquelles le blé est cultivé (PILBEAM, 1996). Ainsi, cette relation nécessitera des tests complémentaires pour déterminer son domaine de validité. En particulier, les changements dans les systèmes de culture devraient modifier la qualité et la quantité de carbone retournant au sol et par conséquent la capacité d'organisation de celui-ci. PILBEAM (1996) en examinant des résultats acquis sur une large gamme de climats (USA, Europe, Moyen-Orient et Australie), observe que la répartition entre le sol et la culture, se modifie avec le climat, de plus grandes quantités d'azote étant immobilisées en conditions sèches. Dans ces conditions, les



Graphique n° 60 · Défaut de bilan de l'engrais en fonction du CRU à la récolte

rendements observés étant inférieurs à ceux permis par l'azote disponible, le rapport C/N des résidus augmente donc la capacité d'organisation à moyen et à long terme des sols. De même qu'il a été précisé au chapitre 5.3.1.1.1. la relation entre devenir de l'engrais et vitesse de croissance de la culture n'est valide que pour les doses suboptimales. Le CRU diminue pour les doses supérieures à l'optimum (BLOOM *et al.*, 1988 ; Van KEULEN et STOL, 1991) et l'azote non utilisé par la culture conduit à accumulation d'azote minéral dans le sol à la récolte. On peut alors estimer que les faibles quantités d'azote minéral retrouvées dans le sol à la récolte dans nos expérimentations ($<1 \text{ kg.ha}^{-1}$) démontrent indirectement que les quantités d'azote appliqué dans nos expérimentations n'étaient pas excédentaires par rapport aux capacités maximales d'accumulation par la plante.

5.3.2.5.2. Immobilisation de l'azote de l'engrais

Les quantités d'azote organisé sont à peu près constantes pour tous les sites et proches de 20 kg N.ha^{-1} , quelles que soient les densités de peuplement, et ce pour des quantités d'azote apporté identiques au début du redressement du blé ($100 \text{ à } 110 \text{ kg N.ha}^{-1}$). Ceci confirme des observations antérieures à savoir que ni le type de sol, ni la compétition avec les besoins en azote du peuplement, n'ont d'effet sur la quantité d'azote organisé (POWLSON *et al.*, 1992 ; RECOUS *et al.*, 1992 ; RECOUS et MACHET, à paraître). Cette constance de l'organisation est probablement due au fait que la disponibilité du carbone pour les microorganismes du sol ne varie pas beaucoup lorsque les systèmes de culture sont identiques (terres labourées, résidus de récolte enfouis et peu d'apport de matières organiques). Cette constance de l'organisation, malgré des vitesses d'absorption de l'azote très différentes conduit à une relation étroite entre l'azote non retrouvé dans le sol ou la plante et l'utilisation par la plante (Graphique n° 60), excepté pour une situation (premier apport sur l'essai de Mons). Cette relation entre l'utilisation par la plante et les pertes confirme la tendance observée à court terme (14 jours après l'apport) dans une expérimentation où seule la date d'application variait (RECOUS *et al.*, 1996 ; RECOUS et MACHET, à paraître).

Sur le graphique n° 60, l'écart entre Mons N₁ et la relation générale obtenue à partir des autres traitements est un peu supérieure à 10 %, ce qui correspond approximativement au supplément d'organisation observé pour ce traitement. Dans ces conditions le total de l'azote non retrouvé + organisé est très corrélé au CRU ($r^2 = 99,9 \%$, 7 observations) et par conséquent à la vitesse de croissance du peuplement ($r^2 = 98,4 \%$). Cette constatation suggère que l'azote non utilisé par la culture, fait l'objet d'une compétition entre l'organisation et les autres pertes. Bien sûr, une seule observation est insuffisante pour étayer cette hypothèse et il faudrait, en toute rigueur, disposer de résultats où on a fait varier de façon significative la demande microbienne dans des conditions climatiques identiques, ce qui n'est pas le cas dans les expérimentations puisque les niveaux de fertilisation azotée et de restitution des résidus de récolte sont à un niveau habituel. Toutefois, BOGHAL *et al.* (1997) ont montré que l'incorporation de paille peut avoir un effet

sur les quantités d'azote organisé, après un apport d'azote au printemps si le résidu a été enfoui par un labour séparé d'au moins 1200 degrés jours de la date d'application de l'azote.

5.3.2.5.3. *Utilisation de l'azote par la plante et pertes gazeuses*

Si les quantités d'azote organisé ne varient pas avec l'époque d'application de l'engrais, les variations d'utilisation de l'azote par la culture doivent alors résulter de variations significatives des quantités perdues par voies gazeuses. Dans nos expérimentations, les conditions climatiques après les apports d'azote, sur des sols relativement argileux, suggèrent que la dénitrification était le principal processus mis en cause. Cependant, les pertes par volatilisation ne peuvent être exclues. Dans une expérimentation conduite par RECOUS et MACHET (à paraître), il semblerait que ce soit plutôt le phénomène de volatilisation qui soit en cause. A ce sujet, plusieurs processus peuvent être évoqués :

- Lorsque la vitesse d'absorption est élevée, l'azote reste peu de temps dans le sol et ainsi la probabilité de pertes par voies gazeuses est faible. Pour des vitesses de croissance faibles et pour des quantités d'azote apporté identiques, la concentration en azote de la solution du sol reste plus élevée (GREENWOOD et DRAYCOTT, 1988). Dans ces conditions, il n'est pas étonnant que les pertes par voies gazeuses, qui dépendent des concentrations en ammonium et en nitrate, puissent augmenter ou diminuer proportionnellement au prélèvement par la plante.
- La volatilisation est supposée se produire dans les quelques heures qui suivent l'épandage d'azote et ce, au niveau des premiers centimètres du sol. De ce point de vue, la compétition réelle avec la culture en terme d'espace ou de temps, est discutable. Toutefois, l'augmentation de la taille de la culture, lorsqu'il s'agit d'apports plus tardifs, ou de peuplements plus denses, peut modifier de façon significative les conditions physiques favorables à la volatilisation, par réduction de la vitesse du vent au niveau de la surface du sol. De plus, l'augmentation de la dessiccation du sol, due à un prélèvement en eau plus important peut conduire à une diminution de l'azote absorbé dans les premiers centimètres du sol et ainsi favoriser l'absorption foliaire d'azote gazeux sous forme d'ammoniac (SOMMER *et al.*, 1997 ; WHITEHEAD et RAISTRICK, 1992).

CHAPITRE 6

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS

6.1. LES ACQUIS SUR LES SOURCES DE VARIATION DE LA RÉPONSE À L'ENGRAIS

L'objectif annoncé était de mieux comprendre les causes de variation des différents termes qui constituent l'équation d'efficacité de l'engrais en vue d'améliorer le raisonnement de la fertilisation azotée du blé. Après avoir confirmé la grande variabilité de la valeur de b ($\frac{N \text{ absorbé}}{\text{rendement en grain}}$), que ce soit entre variétés ou entre années, nous avons mis en évidence l'importance de l'indice de récolte (HI). Or, nous savons par ailleurs que cet indice est peu affecté par les conditions de nutrition azotée mais plutôt par le rayonnement avant l'anthèse et les conditions de remplissage de grains (FISCHER et STOCKMAN, 1980 ; FISCHER, 1985). Dans ces conditions, même en proposant une modulation des valeurs de b par type variétal, il paraît difficile d'améliorer de façon significative l'estimation des besoins en azote tant que l'on base celle-ci sur un objectif prévisionnel de rendement en grain.

L'approche que nous avons testée à partir de la matière sèche des parties aériennes (MSPA) apparaît plus performante puisque la valeur du ratio $B \left(\frac{N \text{ absorbé}}{MSPA} \right)$ se révèle beaucoup plus stable entre variétés et entre années, et indépendante de l'indice de récolte. DOUSSINAULT (1989) observe à cet égard, que dans un même lieu, des variétés inscrites à des dates différentes, présentent des rendements et des indices de récolte très différents (0,35 à 0,50), mais des biomasses totales identiques.

S'agissant des fournitures en azote du sol, nous avons pu confronter les résultats de plusieurs modèles de minéralisation avec des bilans découlant d'observations au champ. Même s'il existe encore une incertitude non négligeable dans les estimations de la minéralisation, on doit reconnaître que certains modèles (Azobil, Azodyn) présentent des résultats moyens très cohérents avec ceux issus du terrain. L'intérêt de ces modèles, ainsi que des résultats issus des incubations réside dans le fait qu'ils nous aident à mieux comprendre les sources de variation de la fourniture en azote du sol. Ils nous ont, en particulier, permis d'identifier le caractère essentiel de la teneur en azote total du sol. Ceci permet d'espérer une généralisation beaucoup plus facile que les références utilisées localement qui sont toujours très contingentes des conditions dans lesquelles elles ont été acquises (sols, systèmes de culture, climat).

L'étude des variations du coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais (CAU) a permis de confirmer certains acquis. En outre, l'examen des CAU au-delà de l'optimum de la courbe de réponse à l'azote nous a permis de montrer que les diminutions par rapport au CAU optimum sont corrélées négativement au rapport $\frac{X_{opt}}{X}$ (dose à l'optimum/dose supraoptimale).

Pour des doses proches de l'optimum, on ne retrouve plus d'azote minéral de l'engrais à la récolte (moins de 1 kg.ha⁻¹), ce qui confirme les observations de RECOULS (1988) sur blé d'hiver, mais également sur d'autres cultures telles que le colza, la pomme-de-terre, le haricot ou la betterave sucrière (MacDONALD *et al.*, 1997). Ces résultats sont cohérents avec la

stabilité observée sur de nombreux essais du reliquat après récolte (RAR) jusqu'à l'optimum de la courbe de réponse. La quantité organisée, étant peu variable en système céréalier, est conforme aux résultats obtenus par POWLSON *et al.* (1992) et RECOUS *et al.* (1988,I). Les pertes par voies gazeuses (volatilisation au moment de l'apport, dénitrification) semblent être la principale source de variabilité de la disponibilité de l'azote pour le peuplement.

L'ensemble de nos résultats a été acquis sur des expérimentations qui couvraient de larges gammes, qu'il s'agisse de variétés, de dates de semis, de densités de semis, de types de sol ou plus généralement d'histoire culturale des parcelles. Cet aspect est intéressant à souligner, car c'est au travers de cette diversité qu'on a pu identifier les principaux facteurs de variation des termes de l'équation d'efficacité, et ainsi hiérarchiser les problèmes posés de façon à mettre en oeuvre des dispositifs de recherche expérimentale adaptés. Par exemple, les dispositifs "bilan ^{15}N " de LIXIERES et MIRECOURT n'auraient probablement pas vu le jour si l'importance de la biomasse et de la vitesse de croissance sur l'utilisation finale de l'engrais, n'avait pas été mise en évidence au travers de la comparaison de situations culturales contrastées des parcelles de Lorraine échantillonnées dans la population (blé de maïs fourrage semé tardivement avec un peuplement faible à la sortie de l'hiver d'une part, et blé en semis dense et précoce derrière colza d'autre part).

Ces résultats sont susceptibles d'améliorations :

- Pour la prévision des besoins en azote, quelques questions restent posées :
 - * Même si la valeur du ratio B a été établie à partir d'expérimentations multilocales et pluriannuelles, il apparaît indispensable de tester sa stabilité dans d'autres conditions climatiques et pour d'autres variétés.
 - * Les modèles mécanistes de croissance et de développement du blé, en l'état actuel, peuvent-ils être opérationnels pour une prévision de la biomasse à la récolte ? Quelles adaptations et simplifications peut-on proposer pour les rendre plus accessibles ?
- L'appréciation de la contribution du sol à la fourniture en azote doit pouvoir être aussi améliorée. Nos travaux ont mis en lumière le rôle déterminant de la teneur en azote du sol, mais l'importance qui est donnée dans Azobil et Azodyn à la teneur en argile et en calcaire, n'a pas été validée. Un meilleur calage de tous ces paramètres pourrait être obtenu à partir d'expérimentations multirégionales mises en place sur la base d'une stratification des types de sol, des systèmes de culture en faisant varier notamment la nature, la quantité et la fréquence des apports de matières organiques.

- Concernant l'utilisation de l'engrais, il nous semble que la relation avec la vitesse de croissance du peuplement devrait être validée sur une gamme plus large de climats de façon à vérifier, en particulier, son manque de robustesse en conditions sèches. Sur un plan plus fondamental, nos résultats soulèvent deux questions importantes :
 - * Les pertes par voies gazeuses n'ont été appréciées qu'à partir de défauts de bilan. Les mesures réelles au champ sont possibles, en utilisant des dispositifs appropriés (CELLIER *et al.*, 1996). Peut-on confirmer nos résultats en suivant la cinétique des émissions gazeuses (NH_3 , N_2 , N_2O) à partir d'expérimentations sur lesquelles les mêmes fertilisations seraient appliquées, mais sur des peuplements ayant des vitesses de croissance différentes ?
 - * Les résultats des essais bilan ^{15}N nous suggèrent que, pour un fonctionnement du peuplement donné, il existe une compétition possible entre l'organisation et les pertes par voies gazeuses. Il resterait à vérifier la validité de cette hypothèse dans des systèmes de culture où la disponibilité en carbone est plus importante (déjections animales ou restitution des résidus de récolte en quantités importantes)

6.2. AMÉLIORATION DES RÉFÉRENCES RÉGIONALES POUR LE CALCUL DES DOSES D'ENGRAIS

Les résultats acquis, grâce à l'approche régionale de la variabilité des termes de l'équation d'efficacité, permettent déjà d'envisager l'amélioration des procédures de gestion de la fertilisation azotée :

- La grande variabilité des sols, des climats et des systèmes de culture laisse présager que certains résultats puissent être transposés à peu de frais à d'autres régions. Par exemple, la méthode d'approche des potentialités agronomiques pourrait être testée dans des régions où il existe déjà une méthode de caractérisation des sols (Bretagne, Franche-Comté), de mise en oeuvre facile et faisant l'objet d'un consensus entre les pédologues et les agronomes de terrain.
- En ce qui concerne les fournitures en azote du sol, nous avons pu montrer que, même dans des situations où les modèles empiriques donnent les meilleurs résultats, les modèles théoriques enrichissent les connaissances et suggèrent des pistes d'amélioration pour l'estimation de la contribution du sol à l'alimentation azotée du peuplement. Nous avons ainsi mis en évidence l'importance de la teneur en azote organique. Cet élément devrait permettre d'améliorer considérablement la prévision de la minéralisation nette et ainsi d'élargir le domaine de validité de modèles existants, au-delà de celui dans lequel ils ont été élaborés. Pour l'utilisation de l'azote de l'engrais, la hiérarchisation régionale des facteurs de variation, en particulier le climat de l'année avec ses conséquences sur le fonctionnement du peuplement au moment des apports d'azote, croisées avec les systèmes

de culture, devrait permettre d'élaborer des typologies susceptibles de proposer des valeurs de CAU prévisionnelles au moment des apports d'azote. Nous avons par exemple, pu montrer que la vitesse de croissance potentielle du peuplement pouvait être prévue à partir de l'état de croissance. Cette mesure est coûteuse en temps, mais on peut espérer en faire la prévision, soit à partir des typologies citées plus haut, soit à partir de mesures de réflectances (AKKAL, 1998).

- Pour la région Lorraine, l'équation d'efficience de l'engrais est vulgarisée depuis 1992 et elle est largement utilisée notamment dans les secteurs Ferti Mieux et pour les mesures agri-environnementales de réduction d'intrants. Comme nous l'avons déjà précisé, l'intérêt principal de la méthode réside dans sa simplicité de mise en oeuvre. Les résultats de nos travaux devraient permettre d'augmenter la précision de la valeur prévue pour chacun des termes de l'équation, et au total, celle de la dose d'azote à conseiller. Au niveau du choix des objectifs de rendement, on a vu qu'une bonne connaissance agropédologique des parcelles doit permettre, dans la mesure où l'analyse fréquentielle du climat existe de réaliser un choix de rendement accessible, assorti d'une probabilité d'être atteint. Il reste que, en dehors des situations précitées, la caractérisation des sols est rarement réalisée. Nous avons, en collaboration avec le service Sciences du Sol et Environnement de l'ENSAIA, conduit une expérience pilote sur ce thème au niveau d'une exploitation agricole. Il s'avère possible, à un coût raisonnable, d'établir à grande échelle une carte de la variabilité inter et intraparcellaire des sols et de la modulation des objectifs de rendement qui en découlent. A l'époque où tout le monde parle d'agriculture de précision, il nous semble que ce type de travail est le préalable indispensable à une modulation automatique des intrants à l'intérieur d'une parcelle. Nous avons estimé le prix de revient d'une telle étude à 200 F.ha⁻¹, ce qui correspond au coût actuel de l'azote, à 65 kg N.ha⁻¹. Dans un proche avenir, nous espérons apporter encore plus de précision pour le calcul des besoins en azote. L'utilisation du ratio B implique l'établissement de références du potentiel de production en quintaux de matière sèche plutôt qu'en quintaux de grains. Dans les sols superficiels, comme nous l'avons montré, ce potentiel dépend beaucoup du bilan hydrique. On a vu que dans les sols profonds argileux ou sur marnes, c'est rarement l'eau qui est facteur limitant, mais plutôt la densité et le niveau du tallage. Nous avons donc ébauché la construction d'un modèle empirique, qui associe à la fois la satisfaction des besoins en eau de la plante, mais aussi la potentialité liée à l'état du peuplement au stade épi 1 cm, en considérant que celui-ci n'est plus limitant au-delà de 150 g MS.m⁻² (GATE, 1995). Le modèle proposé est le suivant :

$$MSPA = 170 \frac{ETR}{ETM} - 0,4 \Delta MS \quad r^2 = 98,00 \quad *****$$

9 valeurs, 4 années, 6 sites expérimentaux

($\Delta MS = 150$ - poids de matière sèche au stade épi 1 cm, en g.m⁻²)

Bien sûr, pour rendre ce modèle opérationnel, il resterait à se donner les moyens d'une meilleure prévision de la réserve utile et à réaliser les analyses fréquentielles des valeurs de $\frac{ETR}{ETM}$.

Enfin cela a été précisé au chapitre 4.4.2.2., on peut envisager à peu de frais, une amélioration de la valeur prédictive des grilles de fournitures en y couplant un module de minéralisation qui rendrait beaucoup mieux compte des situations extrêmes en terme de teneur en azote organique. Dans l'attente, nous avons démultiplié un certain nombre de stations du réseau OPAL où nous comparons les fournitures du sol avec et sans fumier (le fumier étant apporté à la dose de 40 à 50 T.ha⁻¹ pour trois années). Les premiers résultats nous permettent d'ores et déjà de proposer un terme correctif aux grilles actuelles. Le même travail est engagé pour les situations recevant des boues industrielles ou de stations d'épuration.

La grande variabilité constatée du coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais ainsi que la mise en évidence des facteurs générant cette variation nous a conduit à remettre en cause les règles généralement retenues pour le fractionnement de l'engrais : si le CAU augmente avec la vitesse de croissance, il est souhaitable d'apporter l'engrais au moment où celle-ci est élevée, c'est-à-dire dans des conditions de température poussante et de peuplement à fort indice foliaire. Nous avons testé, depuis quelques années, différentes techniques en y associant des règles de décision innovantes. Nous avons ainsi étudié une modalité qui consiste à atteindre un niveau de biomasse de 40 g.m⁻² pour réaliser le premier apport d'azote, et de 120 g.m⁻² pour le second sans se préoccuper des stades de développement. Plus récemment, nous avons proposé d'attendre que le peuplement manifeste des symptômes de carence par rapport à une placette normalement fertilisée, pour réaliser les apports d'azote. Les résultats sont encourageants : en général, le même rendement est atteint avec moins d'azote apporté (jusqu'à 60 kg N.ha⁻¹ dans certains cas), le CAU est augmenté (10 à 20 %) et la teneur en protéines des grains est maintenue, voire augmentée. Des tests sont également en cours sur le colza d'hiver avec des résultats également très intéressants. Bien sûr, ces techniques ne feront pas l'économie d'études plus fondamentales pour bien cerner leur domaine de validité.

Par le passé, les agriculteurs ont souvent pratiqué un système de fertilisation azotée de type "assurance tout risque", c'est-à-dire un système où on applique l'azote trop tôt en trop grande quantité. Si on veut qu'ils mettent en oeuvre des pratiques moins risquées vis-à-vis des fuites de nitrate, il faudra leur proposer des outils et des références pour accompagner ce changement. En règle générale, on a peut être parfois trop considéré que les références adaptées aux conditions régionales existaient partout. L'efficacité d'opérations de conseil telles que Ferti Mieux, ne pourra pas faire l'économie d'évaluer les références disponibles localement, et d'envisager leur amélioration.

Les innovations dans le développement de nouvelles techniques suscitent parfois la curiosité et l'intérêt, mais plus souvent la méfiance, que ce soit de la part des agriculteurs ou de leurs conseillers. Un accompagnement de ces actions, en particulier par une formation à la reconnaissance des sols, aux déterminants des besoins en azote, des fournitures en azote du sol et de l'utilisation de l'engrais par la plante, mériterait d'être envisagé.

BIBLIOGRAPHIE

ADDISCOTT T.M. and POWLSON D.S., 1992

Partitioning losses of nitrogen fertilizer between leaching and denitrification.
J. Agri. Sci. Cambridge, **118**, 101-107.

AKKAL N., 1998

Pilotage de la fertilisation azotée du blé d'hiver radiométrique ou du taux de couverture du sol, en vue d'une application à l'agriculture de précision.
Thèse INAPG, 198 p. + annexes.

ANDREN O., PAUSTIAN K., 1987

Barley straw decomposition in the field ; a comparison of models.
Ecology, **68**, 1190-1200.

AZAM F., LODH A. and ASHRAF M., 1991

Interaction of ^{15}N -labelled ammonium nitrogen with native soil nitrogen during incubation and growth of maize (*Zea mays* L.).
Soil Biol. Biochem, **23**, n° 5, 473-477.

BHOGAL A., YOUNG S.D. and SYLVESTER-BRADLEY R., 1997

Straw incorporation and immobilisation of spring-applied nitrogen.
Soil Use and Management, **13**, 111-116.

BLOOM T.M., SYLVESTER-BRADLEY R., VAIDYANATHAN L.V., MURRAY , 1988

Apparent recovery of fertilizer nitrogen by winter wheat.
In "Nitrogen efficiency in agricultural soil", D.S. Jenkinson, K.A. Smith Eds, Elsevier Applied Sci., London- New York, 27-37.

BOIFFIN J. et SEBILLOTTE M., 1982

Fertilité, potentialité, aptitudes culturales. Signification actuelle pour l'agronomie.
BTI n° 370-372, 345-352.

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., MEYNARD J.M., SEBILLOTTE M. et CANELL J., 1982

Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse.
III Influence des variations pédologiques ; conséquences pour la conduite de la culture.
Agronomie, **2**, 5, 417-428.

BOON R., 1981

Nitrogen fertilizer recommendations for winter cereals and sugar beet on deep Loam and sandy Loam on the basis of soil analysis (in Dutch)
Pedologie, **21**, 347-363.

BOUCHARD C., 1997

Influence de dynamiques variables de nutrition azotée sur la croissance et l'élaboration du rendement d'une culture de blé tendre d'hiver.
Mémoire Ingénieur ITIA, 67 p. + annexes.

BOURZEIX A., 1994

Construction d'itinéraires techniques ajustés aux hétérogénéités parcellaires et adaptés aux contraintes de l'exploitation agricole (Etude sur le blé d'hiver en Lorraine).
Mémoire d'Ingénierie Agronomique, 51 p. + annexes.

BRADBURY N.J., WHITMORE A.P., HART P.B.S., JENKINSON D.S., 1993

Modelling the fate of nitrogen in crop and soil in the years following application of ^{15}N -labelled fertilizer to winter wheat.

J. Agric. Sci. Cambridge, **212**, 363-379.

BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M.H., RUJET F., NICOULLAUD B., GATE B., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DÜRR C., RICHARD F., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J.M., MEYNARD J.M., DELECOLLE R., 1998

STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn.

Agronomie, **18**, 311-346.

BROADBENT F.E., 1965

Effect of fertilizer nitrogen on the release of soil nitrogen.

Soil Sci. Soc. Proc., 692-696.

BROADBENT F.E., NAKASHIMA T., 1971

Effect of added salts of nitrogen mineralization in three californian soils.

Soil Science Society of America, Proceedings, **35**, 457-460.

BRUAND A., DUVAL O., GAILLARD H., CARTHOUT R. et JAMAGNE M., 1996

Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente.

Etude et gestion des sols, **3**, 1, 27-40.

BURNS Y.G., 1976

Equation to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a know depth or uniformly distributed throughout a soil profile.

Journal of Agriculture Science, **86**, 305-313.

CAMBELL C.A., LAFOND G.P., LEYSHON A.J., ZENTNER R.P. et JANZEN H.H., 1991

Effect of cropping practices on the initial potentiel rate of mineralization in a thin black chernozem.

Can. J. Soil Sci., **71**, 43-53.

CANNEL R.Q. et al., 1985

Effects of waterlogging on soil aeration and on root and shoot growth and yield of winter oats.

Plant and soil, **85**, 361-373.

CANNELL R.Q., BELFORD R.K., 1982

Crop growth after transit waterlogging.

Advance in Drainage, 163-170.

CANNELL R.Q., BELFORD R.K., GALES K., DENIS C.W. et DREW R.D., 1980

Effect of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of winter wheat.

J. Sci. Food Agric., **51**, 117-132.

CARLOTTI B., 1992

Recueil des bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures.
Document CORPEN, 120 p. + annexes.

CARTER J.N., JENSEN M.E. and BOSMA S.M., 1974

Determining nitrogen fertilizer needs for sugar beets from residual soil nitrate and mineralizable nitrogen.
Agron. J., **66**, 319-323.

CARTER J.N., WESTERMANN O.T. and JENSEN M.E., 1976

Sugar beet yield and quality as affected by nitrogen level.
Agron. J., **68**, 49-55.

CATTIN G., 1989

Analyse des composantes du rendement du blé tendre d'hiver. Potentiel et principaux facteurs limitants. Exemple sur la Beauce pour les variétés FIDEL et FESTIVAL.
Mémoire Relance de l'Agronomie, 112 p. + annexes.

CELLIER B., GERMON J.C., HENAULT C. et GERMONT F., 1996

Les émissions d'ammoniac (NH_3) et d'oxydes d'azote (NO_x et N_2O) par les sols cultivés : mécanismes de production et quantification des flux.
In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", G. Lemaire et B. Nicollardot Eds, Série les Colloques de l'INRA Editions, Paris, 25-37.

CHANEY K., 1989

Effect of nitrogen fertilizer rate on soil nitrogen content after harvesting winter wheat.
Journal of Agricultural Science, **114**, 171-176.

COÏC Y., 1956

La nutrition et la fertilisation azotée du blé d'hiver. I. Les besoins en azote du blé d'hiver, conséquences agronomiques.
Ann. Agron., **1**, 115-131.

DE WITT C.T., VAN LAAR H.H., VAN KEULEN H., 1979

Physiological potentiel of crop prediction.
Plant breeding perspect. Ed., Sneep J., Hendriksen A.J.F., P.U. doc Wageningen, 47-82.

DELPHIN A., 1986

Conduite de la fertilisation azotée du blé d'hiver en Aunis et conséquences sur le rendement et ses composantes.
Mémoire Relance de l'Agronomie, 112 p. + annexes.

DELPHIN J.E., 1986

Evaluation du pouvoir minéralisateur de sols agricoles en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques.
Agronomie, **6** (5), 453-458.

DOUSSINAULT G., 1989

Sélection variétale et potentiel de rendement.
ITCF, Caryopse, Avril, 2-4.

FISCHER R.A. and STOCKMAN Y.M., 1980

Kernel number per spike in wheat (*Triticum aestivum* L.) : responses to preanthesis shading.
Aust. J. Plant Physiol., **7**, 169-180.

FISCHER R.A., 1985

Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature.
J. Agri. Sci. Camb., **105**, 447-461.

FLEURY A., LIMAUX F., 1987

Comment la comparaison globale de nombreux essais a pu conduire à des références régionales pour le blé en Lorraine.
B.T.I., 417, 95-110.

FLORENTIN L., 1991

Typologie des sols et appréciation des variations de rendement pour les grandes cultures (blé, colza).
Mémoire Relance de l'Agronomie, 135 p. + annexes.

GASSMANN K.G., MUNN D.N., 1980

Nitrogen mineralisation as affected by soil moisture, temperature and depth.
Soil Microbiology and biochemistry, 1233-1237.

GATE P., 1995

Ecophysiologie du blé.
Ed. Lavoisier, Tech. and Doc.

GIRARD A.L., 1997

Modélisation de l'accumulation de biomasse et d'azote dans les grains de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) : simulation de la teneur en protéines à la récolte.
Thèse INAPG, 96 p. + annexes.

GOSSE G., VARLET-GRANDHER C., BOHNOMME R., CHARTIER M., ALLIRAND J.M. and LEMAIRE G., 1986

Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal.
Agronomie, **6**, 47-56.

GREENWOOD E.A.N., 1976

Nitrogen stress in plants.
Adv. Agron., **28**, 1-35.

GREENWOOD D.J. and DRAYCOTT A., 1988

Recovery of fertiliser N by diverse vegetable crops : processes and models.
In "Nitrogen efficiency in agricultural soils", D.S. Jenkinson, K.A. Smith Eds, Elsevier applied Sci., London-New York, 46-61.

GREENWOOD D.J., GASTAL F., LEMAIRE G., DRAYCOTT A., MILLARD P., NEETESON J.J., 1991

Grow rate and N % of field grown crops : theory and experiments.
Annals of Botany, **67**, 181-190.

GREENWOOD D.J., KUBO K.I., BURNS I.G. and DRAYCOTT A., 1989

Apparent recovery of fertilizer N by vegetable crops.
Soil Sci. Plant Nutr., **35** (3), 367-381.

GRILLS J.P., WEBB J. and DYER C.J., 1997

Seasonal variation in response of winter cereals to nitrogen fertilization and apparent recovery of fertilizer nitrogen on chalk soils in Southern England.
Journal of Agriculture Science, Cambridge, **128**, 251-262.

GRINDLAY D.J.C., SYLVESTER-BRADLEY R. et SCOTT R.K., 1995
The relationship between canopy green area and nitrogen in the shoot.
In "Diagnostic procedures for crop N management", G. Lemaire, I.G. Burns Eds, série
les Colloques de l'INRA.

GROOT J.J.R. et de WILLIGEN P.D., 1991
Simulations of the nitrogen balance in the soil and a winter wheat crop.
Fert. Res., **27**, 261-272.

GUYOT et PRIOUL, 1985
Correction par la fertilisation minérale des effets de l'engorgement sur le blé d'hiver.
1) Expérimentation sur sol.
Agronomie, **5**, 8, 751-759.

HALL D.G., REEVE J.M., THOMASSON A.J. et WRIGHT V.F., 1977
Water retention porosity and density of field soils. Technical monograph n° 9.
Soil Survey of England and Wales. Harpenden.

HANSEN S., JENSEN H.E., NIELSEN N.E. and SWENDSEN H., 1991
Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the
Danish simulation model daisy.
Fert. Res., **27**, 245-259.

HART P.B.S., RAYNER J.H. et JENKINSON D.S., 1986
Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiments with ^{15}N .
Journal of Soil Science, **37**, 389-403.

HAUCK R.D. AND BREMNER J.M., 1976
Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research.
Advances in Agronomy, **28**, 219-266.

HEBERT J., 1957
Les problèmes de l'humus dans les régions de culture industrielle du Nord de la France.
C.R. Acad. Agric. Fr., **43**, 427-431.

HEBERT J., 1969
La fumure azotée du blé tendre d'hiver.
Bull. Tech. Inf., **244**, 755-766.

HENIN S., DUPUIS M., 1945
Essai de bilan de la matière organique des sols.
Ann. Agron., **15**, 161-175.

HOUBEN V., 1995
Analyse des interactions sol-climat-plante. Construction et spatialisation d'un modèle en
composantes du rendement en Bretagne.
Thèse ENSAR, 168 p. + annexes.

JACQUIN F., 1963
Notions récentes concernant le bilan humique d'un sol. Destruction de l'humus.
Bull. A.F.E.S., B11, **492-529**.

JENKINSON D.S., 1988
Determination of microbial biomass, carbon and nitrogen in soil.
In "Advances in nitrogen cycling agricultural ecosystems", J.R. Wilson, Ed., C.A.B.
International. Wallingford, 338-380.

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

Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - The so-called 'priming' effect.
J. Soil and Sci., **36**, 425-444.

JEUFFROY M.H., et MEYNARD J.M., 1998

Azote : Production agricole et environnement.

In : "assimilation de l'azote chez les plantes"

J.F. Morot-Gaudry eds., 369-380.

JEUFFROY M.H. et RECOUS S., 1998

Azodyn : a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization.

Eur. J. Agron., **10**(2), 129-144.

JUSTES E., 1993

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

Thèse INAPG, 227 p. + annexes.

JUSTES E., MARY B., MEYNARD J.M., MACHET J.M. and THELIER-HUCHE L., 1994

Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops.

Annals of Botany, **74**, 397-407.

LAFOLIE F., NEEL C., 1996

Migration du nitrate dans la zone non saturée et impacts sur la qualité des eaux.

In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", G. Lemaire et B. Nicollardot Eds, Série les Colloques de l'INRA Editions, Paris,

LE GALL A., 1997

Evaluation et amélioration du logiciel PC Azote en Champagne Berrichone.

Mémoire d'Ingénierie Agronomique, 106 p. + annexes.

LEMAIRE G. ET GASTAL F., 1997

N uptake and distribution in plant canopies.

In "Diagnosis of nitrogen status in crops", G. Lemaire (Ed.), springer-Verlag, Heidelberg

LEMAIRE G., GASTAL F. et PLENET D., 1995

Dynamics of N uptake and N distribution in plant canopies.

In "Diagnostic procedures for crop N management", G. Lemaire et I.G. Burn Eds, Série les Colloques de l'INRA, INRA éditions, Paris, 15-30.

LEMAIRE G., GASTAL F., PLENET D., LE BOT J., 1996

Le prélèvement d'azote par les peuplements végétaux et la production des cultures.

In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", G. Lemaire et B. Nicollardot Eds, Série les Colloques de l'INRA Editions, Paris, 121-139.

LEMAIRE G., SALETTE J., 1984

Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu.

Agronomie, **4**, 423-430.

LIMAUX F., 1985

Les facteurs de variation du rendement du blé en Lorraine.

Mémoire Relance de l'Agronomie, 96 p. + annexes.

LIMAUX F., 1994

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.

Diplôme de thèse INPL, 109 p. + annexes.

LIMAUX F., BENOIT M., JACQUIN F. et RECOUS S., 1998

Le devenir des fertilisants azotés : utilisation par la plante, immobilisation, lixiviation et pertes par voies gazeuses.

C.R. Acad. Agric. Fr., **84**, 5, 95-117.

LINDEN B., 1985

Mineral nitrogen present in the root zone in early spring and nitrogen mineralized during the growing season. Their contribution to the nitrogen supply of crops.

Assessment of nitrogen fertilizer requirement (J.J. Neeteson and K. Dilz, eds),
Institute for Soil Fertility, Haren, 37-49.

MacDONALD A.J., POULTON P.R., POWLSON D.S. et JENKINSON D.S., 1997

Effects of season, soil type and cropping on recoveries residues and losses of ^{15}N labelled fertilizer applied to arable crop in spring.

J. Agric. Sci. Cambridge, **129**, 125-154.

MACHET J.M., DUBRULLE P., LOUIS P., 1990

Azobil : a computer program for fertilizer N recommendations based on predictive balance sheet method.

In "Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy", S2-21.

MACHET J.M., MARY B., 1990

Effet des différentes successions culturales sur les risques de pertes en nitrates en région de grande culture.

In "Nitrates, Agriculture, Eau", R. Calvet Ed., inra, Paris, 395-403.

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.

MAKOWSKI D., WALLACH D. et MEYNARD J.M., 1998

Models of yield, grain protein and residual mineral N responses to applied N for winter wheat.

Agron. J. (sous presse)

MANICHON H., 1982

Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique.

Thèse INAPG, 214 p. + annexes.

MARIOTTI A., 1996

Quelques réflexions sur le cycle biogéochimique de l'azote dans les agrosystèmes.

In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", G. Lemaire et B. Nicollardot Eds, Série les Colloques de l'INRA Editions, Paris, 9-22.

MARTIN Ph., MEYNARD J.M., 1997

Systèmes de culture, érosion et pollution par l'ion nitrate.

In "L'eau dans l'espace rural, production végétale et qualité de l'eau", C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu, F. Papy Eds, 303-322.

MARY B., 1987

Effet du précédent cultural sur la disponibilité du sol en azote minéral.
C.R. Acad. Agric. Fr., **73**, 57-69.

MARY B., BEAUDOIN B. et BENOIT M., 1996

Prévention de la pollution nitrique à l'échelle du bassin d'alimentation en eau.
In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", G. Lemaire et B. Nicollardot Eds, Série
les Colloques de l'INRA Editions, Paris,

MARY B., GUERIF J., 1994

Intérêt et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de
l'azote dans le sol.
Cahiers Agriculture, **3**, 247-257.

MARY B., REMY J.C., 1979

Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande
culture. I. Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique
humifiée.
Ann. Agron., **30**, 513-527.

MASLE J., 1985

Elaboration du nombre de grains potentiel d'un peuplement de blé d'hiver.
C.R. Acad. Agri. de France, **71**, n° 8, 857-869.

MASSE J. et CAPY Y., 1988

Excès d'eau et élaboration du rendement des céréales.
Perspectives Agricoles, **126**, 37-47.

MERRIEN A., GRANDIN L., 1990

Comportement hydrique du tournesol. Synthèse des essais "irrigation" 1983-1988.
In "Le tournesol et l'eau : adaptation à la sécheresse, réponse à l'irrigation", Les Points
Sciences du CETIOM, R. Blanchet et A. Merrien Editions, 73-90.

MEYNARD J.M. et LIMAUX F., 1987

Prévision des rendements et conduite de la fertilisation azotée. Cas du blé d'hiver.
C.R. Acad. Agric. Fr., **73**, 3, 117-132.

MEYNARD J.M., 1983

Le raisonnement de la fumure azotée du blé d'hiver par bilan prévisionnel. Perspectives
et limites d'application.
Agro, **II**, 1, 17-33.

MEYNARD J.M., 1985

Les besoins en azote du blé d'hiver jusqu'au début de la montaison.
Agronomie, **5** (7), 579-589.

MEYNARD J.M., 1985

Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver.
Thèse INAPG, Paris, 297 p. + annexes.

MEYNARD J.M., AUBRY C., 1988

Itinéraires techniques pour le blé en conditions d'excès d'eau.
Perspectives Agricoles, **126**, 80-89.

MEYNARD J.M., JUSTES E., MACHET J.M., RECOUS S., 1996

Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ.

Colloque "Gestion de l'azote dans les agrosystèmes", In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", G. Lemaire et B. Nicollardot Eds, Série les Colloques de l'INRA Editions, Paris, 183-199.

MOREL R., 1968

Evaluation de l'azote et du carbone organique au cours d'une expérience de longue durée.

Ann. Agron., **19**, 2, 153-174.

NEETESON J.J., 1989

Assessment of fertilizer nitrogen requirement of potatoes and sugar beet.

Thesis, Agricultural University of Wageningen.

NEETESON J.J., 1995

Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables.

In "Nitrogen fertilization in the environment", P.E. Bacon Ed., Marcel Dekker, Inc New York, 295-323.

NEETESON J.J., WIJNEN G. and ZANDT P.A., 1984

New nitrogen fertilizer recommendations for potatoes (in Dutch).

Bedrijfsontw., **15**, 331-333.

NEY B., DORE T. et SAGAN M., 1997

The nitrogen requirements of major agricultural crops : grain legumes.

In "Dianosis of the nitrogen status in crops", G. Lemaire Ed., Springer Verlag, Edelberg, 107-118.

NICOLLARDOT B., MARY B., HOUOT S. et RECOUS S., 1996

La dynamique de l'azote dans les sols cultivés.

In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", G. Lemaire et B. Nicollardot Eds, Série les Colloques de l'INRA Editions, Paris,

OSTERGAARD H.S., 1982

Predicting nitrogen fertilizer demands in Denmark.

Assessment of the nitrogen status of soils (T. Bartey, K. Vlassak and L.M.J. Verstraeten, eds), University Press, Leuven, 48-53.

OURY F.X., BRABANT P., PLUCHARD P., BERRARD P. et ROUSSET M., 1993

Une étude sur la supériorité des blés hybrides au niveau des capacités de remplissage du grain : résultats d'une expérimentation multilocale.

Agronomie, **13**, 381-393.

PIERSON F., 1986

Potentialités des sols Nivernais et facteurs limitants de la production du blé.

Mémoire Relance de l'Agronomie, 106 p. + annexes.

PILBEAM C.J., 1996

Effect of climate on the recovery in crop and soil of ^{15}N -labelled fertiliser applied to wheat.

Fert. Res., **45**, 209-215.

PLAS D., 1992

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

Thèse UTC Compiègne, 174 p. + annexes.

PLENET D., 1995

Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée : détermination et application d'un indice de nutrition azotée.

Thèse INPL, 215 p. + annexes.

PONS Y., 1988

Incidence de l'abaissement du niveau d'eau hivernal sur le rendement du blé d'hiver dans les marais de l'Ouest. Conditions et effets des excès d'eau en agriculture.

Séminaire, commission d'Agrométéorologie, 405-414.

POWLSON D.S., HART P.B.S., POULTON P.R., JOHNSTON A.E. and JENKINSON D.S., 1992

Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of ^{15}N -labelled fertilizer applied to winter wheat in spring.

J. Agri. Sci., Cambridge, **118**, 83-100.

PUECH J., MARTY J.R., MAERTENS C., 1976

Efficiences de l'eau consommée par divers végétaux et application à la valorisation de l'irrigation.

B.T.I., **306**, 55, 41-53.

RAHN C.R., 1995

Critical N concentration for modelling the growth of crops.

In "Diagnostic procedures for crop N management", G. Lemaire, I.G. Burns Eds, série les Colloques de l'INRA.

RAO A.C.S., SMITH J.L., PARR J.F. and PAPENDICK R.I., 1992

Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods.

Fertilizer Research, **33**, 209-217.

RATLIFF L.F., RITCHIE J.T. et CASSE D.K., 1983

Field measured limits of soil water availability as related to laboratory measured properties.

Soil Sci. Soc. Am. J., **47**, 770-775.

REAU R. et al., 1994

Fertilisation azotée de printemps du colza : mise au point et test d'une méthode de raisonnement.

Document interne CETIOM.

REBIERE B., 1996

Effet d'un excès d'eau sur la croissance d'une culture de blé d'hiver. Identification d'une variable de stress et analyse de la réponse de la culture.

Thèse ULP, 200 p. + annexes.

RECOUS S., 1983

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

Document INRA-ITCF.

RECOUS S., 1988

Dynamique de l'azote du sol cultivé : organisation microbienne des formes ammoniacale et nitrrique ; conséquences sur l'utilisation de l'azote des engrais par une culture de blé.
Thèse Université Claude Bernard Lyon I, 181 p. + annexes.

RECOUS S., 1995

Effet de la température sur la minéralisation d'un résidu végétal (maïs) et de la matière organique du sol.

In "Ecosystèmes naturels et cultivés et changements globaux", Les dossiers de l'environnement de l'INRA, 8, 12-18.

RECOUS S., FRESNEAU C., FAURIE G. and MARY B., 1988

The fate of labelled ^{15}N urea and ammonium nitrate applied to winter wheat crop. I. Nitrogen transformation in the soil.
Plant Soil, **112**, 205-214.

RECOUS S., LOISEAU P., MACHET J.M., MARY B., 1996

Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies.

In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", G. Lemaire et B. Nicollardot Eds, Série les Colloques de l'INRA Editions, Paris, 105-120.

RECOUS S., MACHET B. and MARY B., 1992

Partitioning of fertiliser N between soil microflora and crop : comparison of ammonium and nitrate applications.
Plant Soil, **144**, 101-111.

RECOUS S., MACHET J.M. and MARY B., 1988

The fate of labelled ^{15}N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. I. Nitrogen transformations in the soil
Plant and Soil, **112**, 205-214.

RECOUS S., MACHET J.M. and MARY B., 1988

The fate of labelled ^{15}N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. II. Plante uptake and N efficiency.
Plant and Soil, **112**, 215-224.

RECOUS S., MACHET J.M., 1998

Short term immobilisation and crop uptake of fertilizer nitrogen applied to winter wheat : effect of date of application in spring.
Soumis à Plant and Soil.

REMY J.C., HEBERT J., 1977

Le devenir des engrais azotés dans le sol.
C.R. Acad. Agric. Fr., **11**, 700-714.

REMY J.C., MARIN-LAFLECHE A., 1974

L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique.
Ann. Agron., **25**, 4, 607-632.

RIAMON M.H., 1990

Contribution à l'étude du bilan azoté pour le blé en Côte d'Or.
Mémoire Relance de l'Agronomie, 124 p. + annexes.

ROBERTS T.L. and JANZEN H.H., 1989

Comparison of direct and indirect methods of measuring fertilizer N uptake in winter wheat.

Canadian Journal of Science Soil, contribution n° 3878913, 119-124.

SEBILLOTTE M., 1978

Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique.

C.R. Acad. Agric. Fr., **64**, 11, 906-914.

SEBILLOTTE M., 1985

Rôle de l'azote dans le comportement d'un peuplement de céréales. Réflexions sur les approches de l'agronome.

C.R. Acad. Agric. Fr., **71**, 3, 292-301.

SEBILLOTTE M., 1996

Les secteurs de référence : contribution à un nouveau développement.

C.R. Acad. Agric. Fr., **82**, n° 5, 145-156.

SEBILLOTTE M., MEYNARD J.M., 1990

Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées.

In "Nitrate-Eau-Agriculture", R. Calvet Ed., 289-312.

SOMMER S.G., FRIIS E., BACH A. and SCHJÖRRING J.K., 1997

Ammonia volatilization from pig slurry applied with trail hoses or broadcast to winter wheat : effects of crop developmental stage, microclimate and leaf ammonia absorption.

J. Environ. Qual., **26**, 1153-1160.

SORENSEN L.H., 1982

Mineralization of organically bound nitrogen in soil as influenced by plant growth and fertilization.

Plant and Soil, **65**, 51-61.

THEVENET G., 1986

La variabilité des rendements en blé d'une région. Condition à l'amélioration des référentiels du Thymerais-Drouai.

Mémoire Relance de l'Agronomie, 132 p. + annexes.

THROUGHT et DERW, 1982

Effect of waterlogging on young wheat plants and on soil solutes at different soil temperatures.

Plant and Soil, **69**, 311-326.

VAN KEULEN H. and STOL W., 1991

Quantitative aspects of nitrogen nutrition in crops.

Fert. Res., **27**, 151-160.

WALLACH D., GOFFINET B., 1987

Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomic systems.

Biometrics, **43**, 561-573.

WEHRMANN J. et SCHARPF H., 1979

Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Masstab für den Stickstoffdüngerbedarf (N min Method).

Plant Soil, **52**, 109-126,

WHISLER F.D., ACOCK B., BAKER D.N., FYE R.E., HODGES H.F., LAMBERT J.R., LEMMON H.E., McKINION J.M. and REDDY V.R., 1986

Crop simulation models in agronomic systems.

Adv. Agron., **40**, 141-208.

WHITEHEAD D.C. and RAISTRICK N., 1992

Effects of plant material on ammonia volatilization from simulated livestock urine applied to soil.

Biol. Fertil. Soils, **13**, 92-95.

WHITMORE A., COLEMAN P., BRADBURY N.J., ADISCOTT T.M., 1991

Simulation of nitrogen in soil and winter wheat crops : modelling nitrogen turnover through organic matter.

Fert. Res., **27**, 283-291.

WIBAWA G., 1992

Approche par enquête expérimentale de l'effet de l'état structural du sol sur la nutrition azotée et l'élaboration du rendement de l'orge de brasserie.

Thèse INAPG, 209 p. + annexes.

WICKRAMASINGHE K.N., RODGERS G.A. and JENKINSON D.S., 1985

Transformations of nitrogen fertilizers in soil.

Soil Biol. Biochem., **17**, n° 5, 625-630.

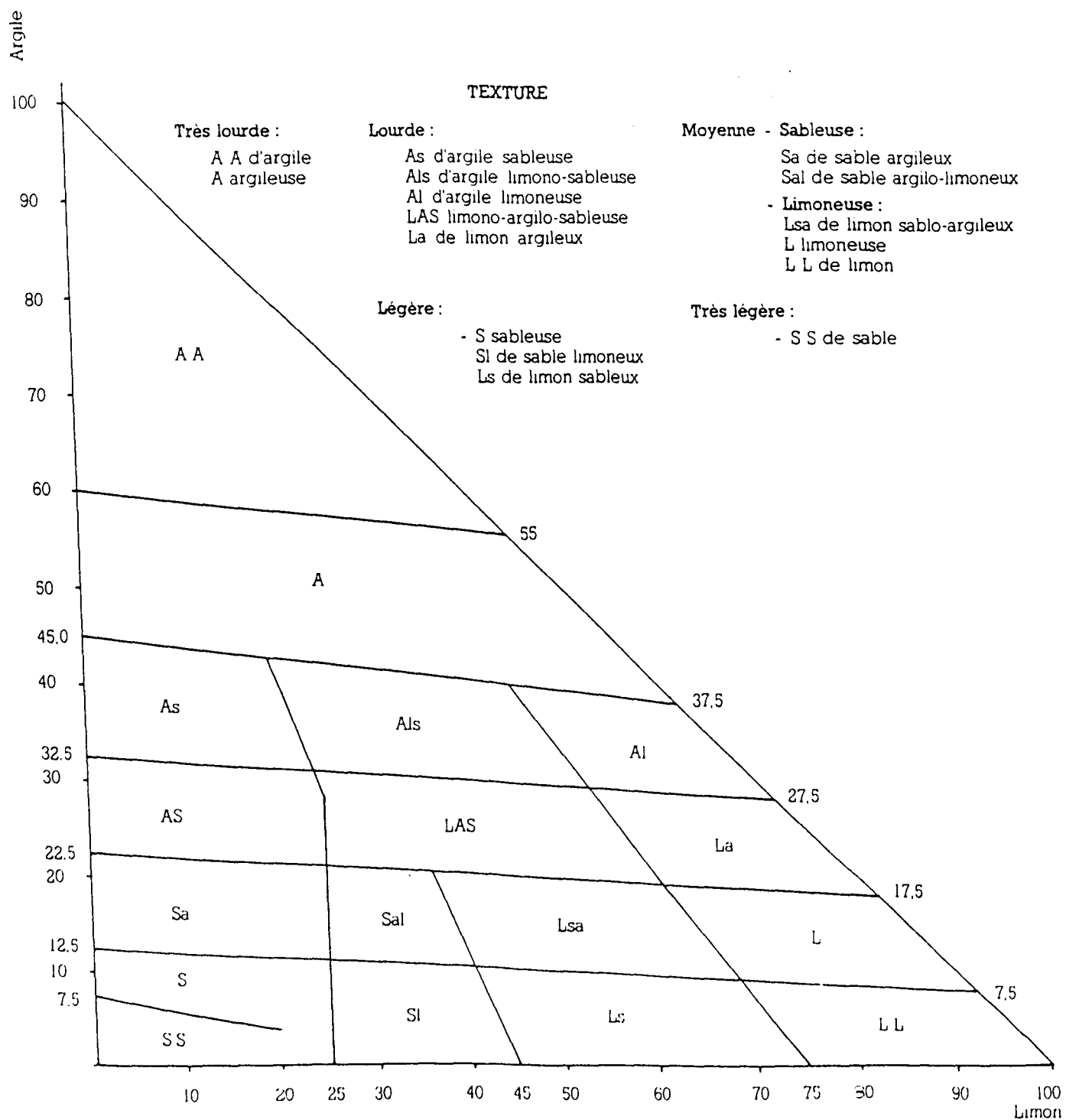
Document consultés

- Les Presses Agronomiques de Gembloux. Le froment d'hiver : conduite de sa culture, 1990.
- Numéro spécial ITCF, caryopse, 1989
- Potentialités agronomiques : Document CRA Lorraine, 1992
- Chambres d'Agriculture, supplément au n° 43, avril 1996 : Méthodes d'étude et domaines d'application.

ANNEXES

Annexe 1	Triangle des textures du GEPPA utilisé pour la codification des sols
Annexe 2	Résultats des essais du réseau ITCF
Annexe 3	Résultats des tests des trois modèles de prévision de l'azote absorbé
Annexe 4	Résultats des tests des trois modèles de prévision de l'azote absorbé
Annexe 5	Valeurs des humidités (en % du sol sec) en fonction du pF, pour les sols mis en incubation
Annexe 6	Exemple de résultats pour le modèle SUNDIAL
Annexe 7	Diagramme des flux entre compartiments pour le modèle SUNDIAL
Annexe 8	Comparaison du dosage DUMAS et INFRA Rouge

Annexe 1 Triangle des textures du GEPPA utilisé pour la codification des sols



Annexe 2 Résultats des essais du réseau ITCF

Année	Site expérimental	Variété	MSG	MSPA	N absorbé
1995	BIGNAN	AMI	94,2	185,3	286
		FORBY	92,2	205,1	333
		SOISSONS	93,5	189,2	342
	LE MAGNEREAU	AMI	81,8	169,5	259
		FORBY	87,1	189,6	312
		SOISSONS	86,9	195	356
	BOULANCOURT	AMI	61,9	131	220
		FORBY	77,7	179,2	300
		SOISSONS	79,3	165,9	276
		QUALITAL	63,1	156,4	301
	CUPERLY	AMI	73,6	143,5	225
		FORBY	80,7	179,8	294
		SOISSONS	80,7	179,2	298
		QUALITAL	70,6	169,7	290
1996	BIGNAN	AMI	111,4	221,6	369
		FORBY	107,2	210	336
		SOISSONS	102,1	205,4	362
	LE MAGNEREAU	AMI	92,9	190,4	298
		FORBY	85,5	165	274
		SOISSONS	91,9	175,6	325
	BOULANCOURT	AMI	75,5	145,7	229
		FORBY	74	143,9	214
		SOISSONS	71,1	145,6	268
		QUALITAL	68,6	148,8	286
	VILLIERS	AMI	104,5	193,1	325
		FORBY	104,2	208,4	362
		SOISSONS	99,5	212,6	385

Annexe 3 Résultats des tests des trois modèles de prévision de l'azote absorbé

Année	Site expérimental	Valeurs mesurées			Valeurs de N absorbé prévues		
		MSG en Q.ha ⁻¹	MSPA en Q.ha ⁻¹	N absorbé en kg.ha ⁻¹	Modèle MSG	Modèle MSPA	Modèle COÏC
1992 LOR	St Hilaire	82,3	140,4	235	292	236	291
	Villancy	84,3	150	259	297	253	298
	Sercheprey haut	35,5	87,5	103	171	146	125
	Sercheprey bas	64,7	117,6	199	246	197	228
	Letricouort bas	74,7	163,6	314	272	276	264
	Letricourt haut	71,0	159,8	297	263	270	251
1993 LOR	Courcelles	65,1	132,2	192	248	222	230
	St Hilaire	62,7	122,4	189	241	206	221
	Crezilles	62,5	106,8	198	241	179	221
	Manonville haut	49,9	104,2	186	208	174	176
	Manonville bas	76,1	150,8	235	276	254	269
1994 LOR	Jovilliers forte MC	69,0	137,4	229	258	231	244
	moy FL	73,8	144,7	256	270	244	261
	moy MC	71,6	147,7	265	264	249	253
	faible MC	70,0	137,3	207	260	231	247
	faible FL	75,3	152,9	260	274	258	266
1995 LOR	Mirecourt D1d1 MC	51,5	112,7	150	212	189	182
	FL	52,9	124,4	194	216	209	187
	D1d2 MC	59,3	132,4	169	233	223	209
	FL	52,7	107,6	157	216	180	186
	D2d1 MC	51,2	114,4	147	212	192	181
	D2d2 MC	52,6	111,0	149	215	186	186
	D3d1 MC	45,1	102,1	143	196	171	159
	FL	47,2	102,0	144	201	171	167
	D3d2 MC	49,2	108,6	162	206	182	174
	FL	49,5	107,1	165	207	180	175
	Lixieres D2d2 MC	60,0	131,5	191	234	221	212
	FL	50,2	106,0	158	209	177	177
	D2d3 MC	53,0	111,2	149	216	186	187
	FL	51,6	113,8	168	213	191	182
	D3d2 MC	60,3	133,0	191	235	224	213
	FL	54,7	116,1	172	221	195	193
	D3d3 FL	59,0	127,5	183	232	214	208
	Jaulung	61,7	140,2	210	239	236	218

LOR	1996	Sercheprey	MC	63,8	122,6	188	244	206	225
			FL	57,5	116,2	167	228	195	203
		Sierck	MC	69,5	118,7	204	259	199	245
			FL	67,1	120,9	204	253	203	237
		Dieulouard	MC	69,5	129,3	231	259	217	245
			FL	67,5	131,2	220	254	221	238
		Bousse	MC	69,5	134,4	223	259	226	245
			FL	58,3	111,3	173	230	187	206
		Meleguy	MC	81,9	154,7	246	291	261	289
			FL	80,7	145,0	235	288	244	285
		Mirecourt d1	MC	77,3	137,8	236	279	232	273
			FL	72,1	132,9	234	266	224	255
		d2	MC	72,8	137,6	222	268	232	257
			FL	69,8	131,9	224	260	222	246
		Jacquemet	1	68,8	128,8	201	257	217	243
			2	79,8	140,4	225	286	236	282
		Lorrain	1	61,0	112,0	201	237	188	215
			2	79,8	154,6	253	286	261	281
		Godart	1	83,7	153,3	237	296	259	215
			2	84,6	164,6	250	298	278	299
			3	69,6	124,6	193	259	202	246
		Cayotte	1	87,7	174,0	279	306	294	310
			2	84,9	168,2	249	299	284	300
			3	70,0	127,4	210	260	214	247
		Picard	1	69,0	141,3	212	259	238	246
			2	83,4	170,1	256	295	287	294
			3	68,9	131,9	205	258	222	243
			4	74,2	152,7	249	271	258	262
		Defloraine	1	67,1	125,4	205	253	211	237
			2	69,6	135,9	243	259	229	246
		Collin	1	81,9	174,5	246	291	295	289
			2	78,4	170,0	239	282	287	277
			3	79,6	170,9	249	285	289	281
P.C.	1993	Dupars		83,1	174,2	277	294	294	293
		Confin		80,7	155,4	246	288	262	285
		Gautreau		83,4	171,2	266	295	289	294
		Proust		75,7	148,7	239	275	251	267
		Rauturier		78,3	153,4	262	282	259	276
		Samson		87,0	166,2	282	304	281	307
		Colas		78,1	163,6	288	281	276	276
		Gendre		79,5	162,6	282	285	275	281
		INRA		69,6	148,7	220	259	251	246
		Dassonct		69,4	137,4	254	259	231	245
P.C.	1994	Indre		56,1	120,2	221	224	202	198
		INRA P.		93,5	191,6	300	321	324	330
		INRA T.		86,4	181,8	302	303	307	305
		Minault		73,0	158,6	255	268	268	258
		Riquet		85,5	175,8	278	301	297	302

Annexe 4 Exemple de résultats pour les modèles Azobil et Azodyn

Mirecourt

n° 14

Les premières lignes servent à saisir les variables d'entrée du modèle
VARIABLES D'ENTREE

P. mille	argile%.	425		
	CaCO3%.	48		
	N%.	1.7		
	dens.app	1.4		
	épai.(dm)	2.7		
Précédent	Mr	0		
Reliquat SH			DATE	Quantité
	reliq		26-Fév	20.5
N non utilisable dans sol				20
DATE de semis			04-Oct	
DATE du stade "épi 1 cm"			27-Mar	
DATE de floraison			11-Jun	
DATE de récolte			23-Jul	
SOMTEMP REL-REC			1717.65	30.2456 0.4542
SOMTEMP FLO-REC			781.7	

semair DATE		METEO				SOL	SOL
	Tmoy hebd °C	Temp corr Mr	Temp corr Mh	Temp cor lab 15°C	SomTemp d-j	N dMh(j) kg/ha/sen	N dMr(j) kg/ha/sem
1	08-Jan	-2.0	0.00	0.00	0.0	0.000	0.000
2	15-Jan	1.0	0.34	0.36	0.20	0.511	0.000
3	22-Jan	3.8	0.47	0.49	0.28	0.704	0.000
4	29-Jan	7.2	0.69	0.72	0.41	1.040	0.000
5	05-Fév	6.8	0.66	0.69	0.39	0.996	0.000
6	12-Fév	6.7	0.65	0.68	0.39	0.982	0.000
7	19-Fév	7.6	0.73	0.76	0.43	1.089	0.000
8	26-Fév	5.9	0.59	0.62	0.35	0.890	0.000
9	05-Mar	4.4	0.50	0.52	0.29	0.749	0.000
10	12-Mar	4.1	0.49	0.51	0.29	0.729	0.000
11	19-Mar	6.3	0.63	0.65	0.37	0.938	0.000
12	26-Mar	5.2	0.55	0.58	0.32	0.825	0.000
13	02-Avr	5.4	0.56	0.59	0.33	0.843	0.000
14	09-Avr	9.1	0.86	0.90	0.51	1.294	0.000

15	16-Avr	7.5	0.72	0.75	0.42	566.8	1.080	0.000
16	23-Avr	7.9	0.75	0.79	0.44	622.3	1.131	0.000
17	30-Avr	10.5	1.01	1.06	0.60	695.8	1.520	0.000
18	07-Mai	13.6	1.45	1.51	0.85	790.9	2.167	0.000
19	14-Mai	12.3	1.25	1.30	0.73	877.0	1.869	0.000
20	21-Mai	9.9	0.95	0.99	0.56	946.3	1.418	0.000
21	28-Mai	14.7	1.64	1.72	0.97	1049.2	2.463	0.000
22	04-Jun	14.0	1.52	1.59	0.90	1147.5	2.282	0.000
23	11-Jun	13.2	1.37	1.44	0.81	1239.5	2.061	0.000
24	18-Jun	14.5	1.60	1.67	0.94	1340.7	2.393	0.000
25	25-Jun	16.7	2.08	2.17	1.22	1457.8	3.113	0.000
26	02-Jul	18.7	2.60	2.71	1.53	1588.6	3.892	0.000
27	09-Jul	20.1	3.04	3.18	1.79	1728.9	4.557	0.000
28	16-Jul	20.7	3.27	3.42	1.92	1873.8	4.907	0.000
29	23-Jul	21.1	3.42	3.57	2.01	2021.2	5.121	0.000
30	30-Jul	21.4	3.53	3.69	2.08	2170.7	5.292	0.000
31	06-Aoû	20.5	3.20	3.34	1.88	2314.1	4.795	0.000
32	13-Aoû	20.2	3.11	3.25	1.83	2455.8	4.659	0.000
33	20-Aoû	20.1	3.06	3.19	1.80	2596.5	4.584	0.000
34	27-Aoû	17.3	2.22	2.32	1.30	2717.6	3.322	0.000
35	03-Sep	15.9	1.89	1.97	1.11	2828.9	2.830	0.000
36	10-Sep	14.1	1.52	1.59	0.90	2927.3	2.286	0.000
37	17-Sep	13.5	1.42	1.49	0.84	3021.4	2.133	0.000
38	24-Sep	11.9	1.18	1.24	0.70	3104.4	1.775	0.000
39	01-Oct	11.4	1.12	1.17	0.66	3183.9	1.678	0.000
40	08-Oct	15.7	1.83	1.92	1.08	3293.5	2.748	0.000
41	15-Oct	14.2	1.55	1.62	0.91	3392.8	2.322	0.000
42	22-Oct	13.1	1.37	1.43	0.81	3484.7	2.056	0.000
43	29-Oct	12.0	1.20	1.25	0.70	3568.4	1.795	0.000
44	05-Nov	6.4	0.63	0.66	0.37	3613.3	0.950	0.000
45	12-Nov	5.0	0.54	0.57	0.32	3648.6	0.811	0.000
46	19-Nov	7.2	0.69	0.72	0.41	3698.6	1.034	0.000
47	26-Nov	6.0	0.60	0.63	0.35	3740.3	0.901	0.000
48	03-Déc	3.6	0.46	0.48	0.27	3765.4	0.686	0.000
49	10-Déc	0.7	0.33	0.34	0.19	3770.3	0.492	0.000
50	17-Déc	-0.6	0.00	0.00	0.00	3770.3	0.000	0.000
51	24-Déc	1.3	0.35	0.37	0.21	3779.0	0.525	0.000
52	31-Déc	2.6	0.41	0.43	0.24	3797.2	0.613	0.000

min Flo-l
23.98

T moy 10.38
annuelle

3.28767

Mh Mr M nette

Min/an 99.9
Min azobil 45.4 0.0 45.4
Drsh-Drécolte

valeur modele azobil

FC = 1.08
Min annuelle 80.6
Min blé 40.3

valeurs dynamiques

Min annuelle 99.9
Min blé 45.4

jours corrigés à 15 °C : Rsh-Récolte

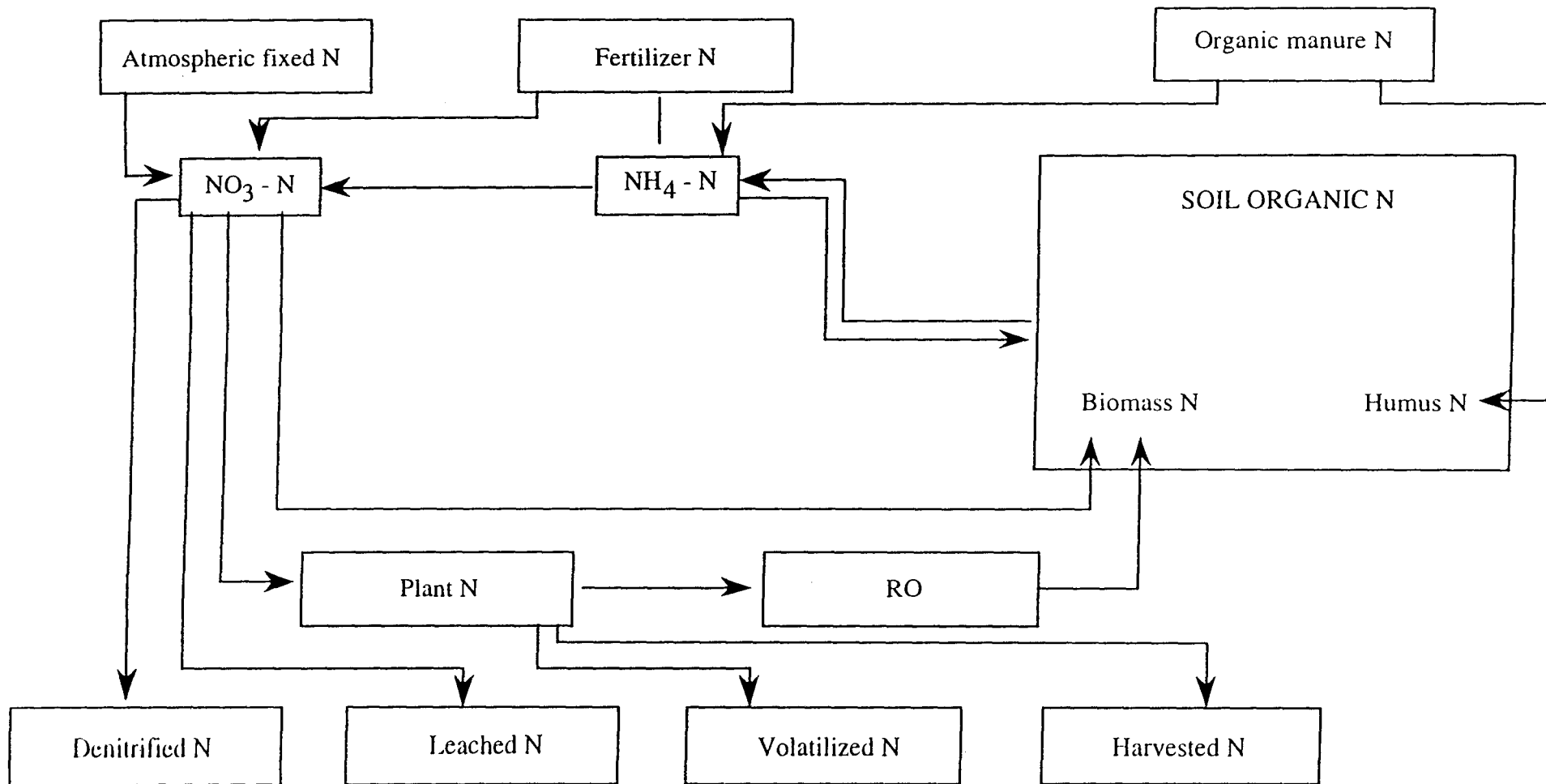
124.5

temp moyenne

11.9

Annexe 5 Valeurs des humidités (en % du sol sec) en fonction du pF, pour les sols
mis en incubation

PF Sol	0 "saturation"	1,5 (0,032 bar)	2,0 (0,100 bar)	2,6 (0,38 bar)	2,7 (0,5 bar)	3,0 (1 bar)	3,7 (5,1 bar)	4,2 (16 bars)
1	81,1	41,02	37,67	33,54	30,9	30,44	24,97	21,89
2	67,8	37,36	35,55	29,63	25,4	27,35	21,24	18,06
3	67,1	36,98	29,88	26,70	24,9	23,92	20,20	18,15
4	72,6	39,71	33,13	30,04	27,7	28,05	23,56	21,72
5	58,3	37,11	30,97	26,61	21,8	21,28	16,24	13,82
6	65,9	37,41	33,66	29,27	24,3	24,34	19,10	17,21
7	70,4	38,08	33,33	29,98	26,7	25,73	20,49	17,72
8	75,2	38,83	30,34	29,47	26,2	24,69	19,10	16,87
9	61,5	35,21	26,80	25,47	20,3	18,99	14,07	11,57
10	71,2	10,08	35,67	30,04	27,1	26,58	19,04	19,02
11	60,1	36,12	28,95	24,63	19,3	18,69	10,98	9,56
12	61,7	33,70	30,16	26,50	21,1	21,29	15,30	13,19
13	71,4	32,76	28,44	25,60	26,4	24,02	17,82	17,71
14	63,4	34,21	32,36	28,65	23,7	24,61	17,54	17,50
15	62,6	37,73	31,79	27,67	24,6	22,19	16,10	13,69
16	77,3	38,54	32,60	28,47	28,4	24,47	17,39	17,16
17	75,3	35,16	31,81	27,56	27,0	24,26	17,17	15,67
18	51,6	31,61	22,18	18,95	19,3	16,52	9,28	9,15



Annexe 6 Diagramme des flux entre compartiments pour le modèle SUNDIAL

Annexe 7 - Exemple de résultats pour le modèle SUNDIAL

Site : MIRECOURT

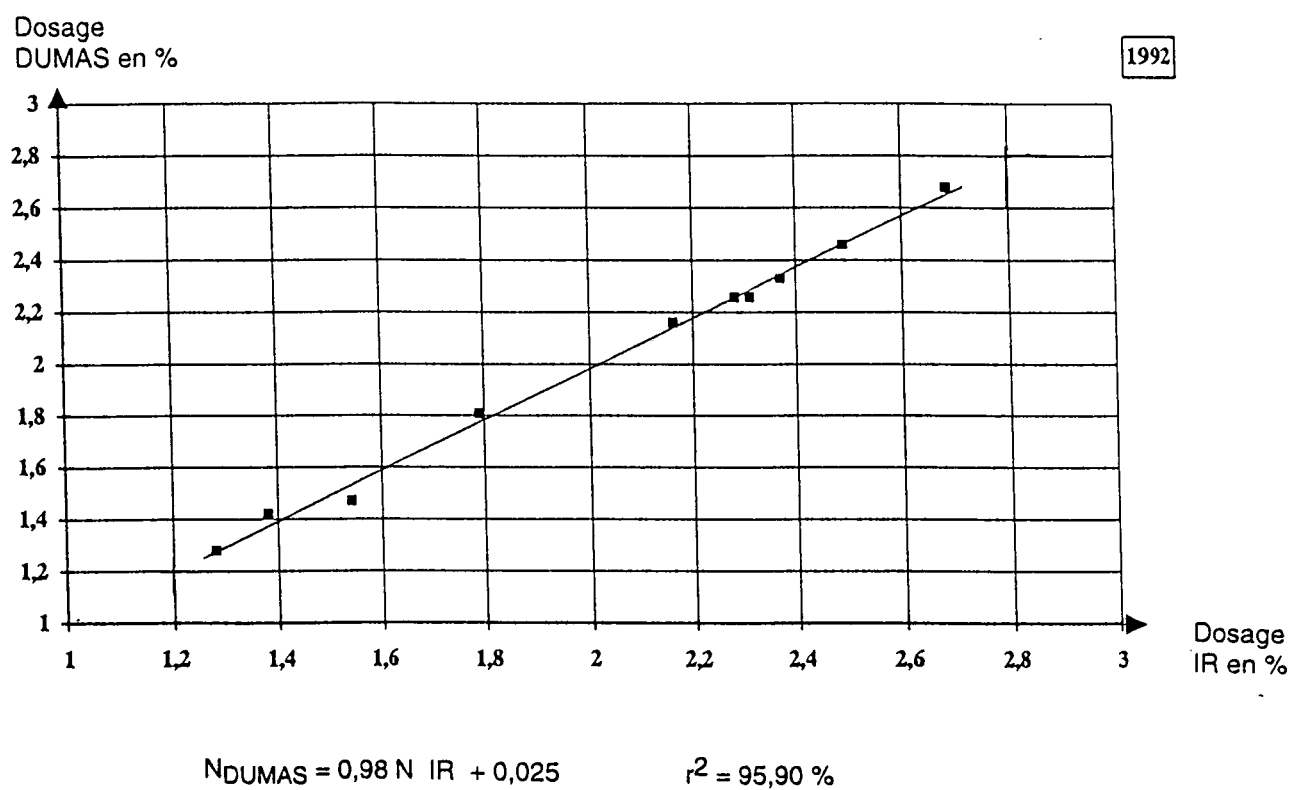
Année : 1995

Période de simulation : année

Modalités de simulation : option "Clay"

Initial soil N (kg/ha)		Final soil N (kg/ha)	
	Total		Total
Humus N	5 190	Humus N	5 147
Plant debris N	12	Plant debris N	10
Nitrate (soil)	55	Nitrate (soil)	53
NH ₄ (soil)	45	NH ₄ (soil)	45
Total	5 302	Total	5 256
INPUTS		LOSSES	
Fertil. N	0	Denit.	23
Straw N	13	Senescence	0
Atmosph + seed N	46	Crop offtake	60
N min.	105	Leaching	22
Total inputs	58	Total losses	105
Grand total	5 361	Grand total	5 361

Annexe 8 Comparaison du dosage DUMAS et INFRA Rouge



**AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur SEBILLOTTE Michel, Professeur, INRA Paris,

**Monsieur FRANCOIS Etienne, Chef Département Recherches, Centre de Recherches
Agronomiques de Gembloux (Belgique).**

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur LIMAUX François

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
LORRAINE, une thèse intitulée :

**"Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de
l'utilisation de l'engrais : Application au raisonnement de la fertilisation
en Lorraine."**

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

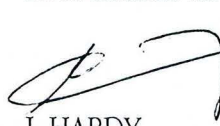
Spécialité : **"SCIENCES AGRONOMIQUES"**

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

Service Commun de la Documentation
INPL Nancy-Brabois
2, avenue de la Forêt de Haye - B.P. 169
54505 VANDŒUVRE CEDEX FRANCE
Tél. 03 83 59 60 00 - Fax 03 83 59 60 23

Fait à Vandoeuvre le, **15 Février 1999**

Le Président de l'I.N.P.L.,


J. HARDY



RÉSUMÉ

Notre objectif consiste à identifier les causes de variation des différents termes de l'équation d'efficacité de l'engrais ($bY = P_0 + CAU.X$) afin d'en améliorer la prévision pour le calcul de la fertilisation azotée du blé d'hiver.

Pour les besoins en azote, nos résultats montrent l'importance de l'objectif de rendement prévisionnel, dont les variations sont expliquées par les caractéristiques des sols et du climat. Les besoins en azote par unité de production (b en kg N/quintal de grain) varient en fonction des variétés et des années. Le ratio B (azote absorbé/matière sèche des parties aériennes) est beaucoup plus stable que b . Sa valeur est d'environ 1,7 kg N.q de matière sèche.

Le test de différents modèles pour prévoir la valeur du terme P_0 (azote absorbé en l'absence de fertilisation) montre que l'élément déterminant est la teneur en azote organique du sol. L'utilisation de modèles de minéralisation dynamique (Azodyn) permet d'améliorer la prévision des quantités d'azote minéral présentes dans le sol à la récolte.

Pour le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU) nos résultats montrent que le facteur principal est la vitesse de croissance instantanée du peuplement au moment de l'apport d'azote. L'utilisation de l'isotope ^{15}N montre que le Coefficient Réel d'Utilisation (CRU) est déterminé par la rapidité d'absorption par la culture après la fertilisation. Les quantités organisées sont stables et indépendantes du fonctionnement du peuplement. Les quantités d'azote minéral de l'engrais dans le sol à la récolte sont nulles, le défaut de bilan étant dû à des pertes par voies gazeuses.

Mots clés :

Besoins en azote, potentialités agronomiques, indice de récolte, minéralisation, fournitures en azote du sol, CAU, vitesse de croissance, CRU, organisation, pertes gazeuses.

Abstract

Our objective is to identify the causes of variation of the different terms of the nitrogen fertilizer efficiency equation ($bY = P_0 + CAU.X$), in order to improve their prediction for calcul of nitrogen fertilization of winter wheat.

For nitrogen needs, our results show the importance of the prevision yield (Y), variable with the soils and climatic characteristics. Nitrogen needs per unit of crop (b) varies whit variety and years. The ratio B ($\frac{N \text{ absorbed}}{\text{dry matter}}$) is much more stable then b . His value is roughly 1,7 kg.N.q_{DM}⁻¹.

The tests of different models to predict the P_0 term (Nitrogen absorbed without fertilizer) show that the determinant parameter is the organic nitrogen level in the soil. The use of dynamic model (Azodyn) improves the prevision of the nitrogen amount after the yield.

For the Apparent Use Coefficient (AUC), we showed that the main factor of variation is the instantaneous growth ratio at the time of fertilization. The use of ^{15}N isotop shows that the final RUC (Real Utilization Coefficient) is determined by the rapidity of the use by the crop after the fertilization. The immobilized quantities are stable and independent of the crop fonctionning. The quantity of nitrogen derived from fertilizer in the soil at the yield period is roughly null. The balance difference is due to gaseous losses.

Key-words : Nitrogen needs, agronomical capabilities, Harvest Index, mineralization soil nitrogen supplies, AUC, growth ratio, RUC, immobilization, gaseous losses.