

3. Céréales

3.2. Fertilisation azotée: progrès et perspectives

3.2.1. Avis de fumure azotée

basé sur le dosage de l'azote minéral
présent dans le sol

et sur la détermination d'un indice d'azote
pour les céréales d'hiver

cultivées sur sols limoneux*

R. Boon

Service Pédologique de Belgique
Département Recherches
de Croylaan, 48 B - 3030 Heverlee

*

Recherche subsidiée par l'Institut pour l'Encouragement
de la Recherche scientifique dans l'Industrie et l'Agric-
ulture (I.R.S.I.A.)

Depuis quelques années le Service Pédologique de Belgique effectue un nouveau type d'analyse du sol axé sur la pratique et portant sur l'azote pour les cultures de froment d'hiver, d'escourgeon et aussi de betteraves sucrières.

Cette nouvelle méthode est basée sur des recherches étendues faites dans des champs d'essai situés sur des sols limoneux.

Dans ce type d'analyse des échantillons de sol sont prélevés au mois de février jusqu'à 90 cm de profondeur et au niveau de 3 couches: de 0 à 30 cm, de 30 à 60 cm et de 60 à 90 cm.

La teneur en azote minéral (azote nitrique et azote ammoniacal) de chaque couche de terre est déterminée.

On détermine aussi la teneur en carbone (en humus) de la couche arable (de 0 à 30 cm). En outre sont recueillies les données agronomiques requises.

Pour chaque parcelle est calculé l'indice d'azote. Cet indice d'azote porte sur les éléments suivants: l'azote minéral (de 0 à 90 cm), un facteur azoté humique et un facteur azoté provenant de la fumure organique non encore décomposée (p.ex. des feuilles de betteraves en cas d'une culture de froment d'hiver succédant à une culture de betteraves sucrières) et enfin l'azote déjà absorbé en février par la jeune culture céréalière. Les facteurs: azote humique et azote provenant de la fumure organique ont été déterminés sur base expérimentale. L'azote absorbé par les jeunes plantes au mois de février, est une évaluation déduite d'un tableau d'observations en champs d'essais et de détermination de l'absorption.

Il existe des coefficients de corrélations très élevés entre l'indice d'azote et la fumure azotée à appliquer (dose optimale N).

Ces dernières années les techniques culturales modernes (applications des régulateurs de croissance, utilisation de fongicides dans la lutte contre les maladies des plantes, densité de semis) ont été introduites en champs d'essai, ce qui a permis d'étudier les effets de ces techniques sur les besoins en azote.

En ce qui concerne les céréales d'hiver le fractionnement de la fumure azotée est basé sur la répartition de l'azote minéral à travers le profil, sur la quantité d'azote déjà absorbée au mois de février et sur certaines caractéristiques culturales, comme la capacité de tallage, ainsi que sur les soins culturaux apportés, notamment l'application de régulateurs de

croissance et de fongicides.

Cette nouvelle méthode d'analyse du sol permet de déterminer la quantité d'azote à appliquer et d'ajuster le fractionnement de la fumure azotée à la variété cultivée en tenant compte des techniques culturales mises en œuvre.

1. Recherches réalisées

Au cours des années 1958 à 1976 le Service Pédologique de Belgique a établi un très grand nombre (606) de champs d'essai auxquels étaient appliquées des doses croissantes d'azote.

Les champs d'essai se situaient sur des sols sablonneux et limoneux et étaient emblavés de froment d'hiver, d'escourgeon, de betteraves sucrières, d'avoine, de pommes de terre, de haricots, d'orge de printemps, de witloof, de lin, de maïs pâteux, de seigle, de ray-grass et de navets.

En cette période l'analyse du sol, en ce qui concerne l'azote, portait en général sur la couche arable et sporadiquement sur la couche inférieure. Lors d'un essai pluriannuel sur doses croissantes d'azote, l'échantillonnage du sol en septembre 1976 a permis de distinguer jusqu'à 100 cm quatre horizons ayant une teneur différente en azote. Il ressortait de cette analyse (1976 étant une année de sécheresse) que la balance apports-pertes d'azote était reflétée fidèlement par la teneur en azote minéral du profil et ce jusqu'à une assez grande profondeur (100 cm).

Dès 1977 ont été établis chaque année de nouveaux champs d'essai de fumure azotée dans la région limoneuse lors desquels l'azote minéral du sol était analysé au mois de février jusqu'à une assez grande profondeur. Dès la première année d'essais il s'avérait déjà que l'azote minéral retenu dans le sol présentait au mois de février une étroite corrélation avec un ensemble de critères de fumure azotée sur céréales d'hiver. Il s'avérait qu'outre l'azote minéral présent dans le sol au mois de février, d'autres facteurs jouaient un rôle déterminant le besoin d'azote des cultures, à savoir la teneur en humus du sol, la fumure organique et la quantité d'azote déjà

absorbée en février par la jeune céréale.

Détermination de l'indice d'azote par parcelle

Il ressort alors des analyses effectuées que le besoin d'azote est caractérisé de la meilleure façon par ce qu'on appelle un indice d'azote. Cet indice d'azote porte sur les éléments suivants :

- *L'azote minéral* :
kg de NO_3 - N/ha 0 - 90 cm
kg de NH_4 - N/ha 0 - 90 cm - 15 kg
- *Facteur humus* :
% C 0 - 30 \times 60 en kg/ha.
- *Facteur fumure organique* :
feuilles de betteraves, de haricots, etc. : + 20 à 50 kg d'N/ha.
- Azote déjà absorbé par la jeune culture au mois de février :
froment d'hiver : + 5 à 25 kg
escourgeon : + 10 à 50 kg.
- *un facteur type de sol* :
— 10 à — 20 pour les sols limoneux plus lourds.

2. Résultats des essais sur céréales d'hiver cultivées en sols limoneux

2.1. Base de l'avis pour le froment d'hiver et l'escourgeon

Septante-quatre champs d'essai emblavés en froment d'hiver et 22 en escourgeon établis au cours de la période 1977-1981 ont servi de base à l'avis de fumure azotée de ces céréales présenté en figure 1.

Au froment d'hiver s'applique l'équation suivante liant l'indice d'N (X) à l'optimum physiologique (Y) :

Le coefficient de corrélation élevé est une preuve de la grande fiabilité de l'indice d'azote en tant que base de l'avis de fumure pour le froment d'hiver et pour l'escourgeon.

Une pareille méthode pour déterminer l'avis de fumure azotée en tenant compte de la réserve d'azote minéral

présente dans le sol, ne peut se concevoir que si cette réserve présente au mois de février, produit une action parallèle ou équivalente à celle de l'azote apporté par la fumure. Ce parallélisme est mis en évidence à la figure 2.

En outre ces coefficients de corrélation élevés obtenus au cours des différentes années d'essais montrent nettement que cet indice d'azote constitue le principal facteur déterminant du besoin en azote, même sous différentes conditions climatiques (voir tableau 1).

2.2. Comparaison de l'apport d'azote physiologiquement optimal avec l'apport d'azote économiquement optimal
Les figures 3 et 4 reprennent pour les champs d'essai de fumure azotée de 1981 les droites de corrélations entre l'indice d'azote par rapport à l'optimum physiologique d'une part et, d'autre part par rapport à l'optimum économique. Lors du calcul de l'optimum économique ont été utilisés les prix des céréales de 1982 avec pour le froment d'hiver le prix de base de 835 F les 100 kg et pour l'escourgeon celui de 750 F, tout en tenant compte des poids à l'hectolitre obtenus pour les différentes doses d'azote. Les dépenses consacrées à l'azote ont été fixées à 25 F le kg.

Il ressort de ces figures qu'aux prix actuels des céréales et de l'azote l'op-

timum économique et l'optimum physiologique se rapprochent assez bien l'un de l'autre. Pour le froment d'hiver l'écart moyen entre les deux optima est de 12 kg d'N/ha, pour l'escourgeon il est de 2 à 14 kg d'N/ha.

2.3. Autres facteurs intervenant dans la détermination du besoin d'azote des céréales d'hiver

L'avis de fumure azotée établi par le Service Pédologique de Belgique est calculé pour une culture saine à laquelle est en outre appliqué un régulateur de croissance.

2.3.1. L'application des fongicides

L'effet des fongicides varie évidemment avec la gravité d'atteinte par la maladie. Son effet est soumis à l'influence de toute une série de facteurs. L'utilisation judicieuse de fongicides fait augmenter la production en grain ainsi que la quantité d'azote dont la plante fait un usage utile.

Ceci est illustré par la figure 5 qui indique la production céréalière moyenne de 10 variétés de froment d'hiver soumises à des doses croissantes d'azote sur un bon sol limoneux assez riche en azote (1980).

La production céréalière maximum sans traitement fongicide est de 6.226 kg de grains pour une dose d'azote de 86 kg/ha et avec traitement fongicide elle est de 6.929 kg pour une dose d'azote de 97 kg/ha.

Tableau 1 Equations de régression obtenues pour l'indice N et la dose optimale de N à l'ha

Année	Nombre de champs d'essai	Froment d'hiver		
		Equation	r ²	r
1977	14	Y' = 262,8 — 0,754 X	0,908	— 0,953**
1978	18	Y' = 251,2 — 0,697 X	0,824	— 0,908**
1979	19	Y' = 273,2 — 0,808 X	0,917	— 0,958**
1980	8	Y' = 263,0 — 0,779 X	0,887	— 0,942**
1981	15	Y' = 275,9 — 0,849 X	0,830	— 0,911**
5 années	74	Y' = 264,8 — 0,771 X	0,879	— 0,937**
Escourgeon				
1979 +	8	Y' = 273,8 — 0,873 X	0,924	— 0,961**
1980				
1981	14	Y' = 254,6 — 0,915 X	0,970	— 0,985**
3 années	22	Y' = 262,7 — 0,906 X	0,898	— 0,948**

Un traitement fongicide réduit la verse (fig. 6) et maintient le poids de mille grains à un haut niveau (fig. 7).

En cas d'attaque grave la culture absorbe toujours suffisamment d'azote mais sa répartition entre grain et paille est perturbée suite à une alimentation défectueuse. Un exemple de cette situation est illustré à la figure 8 pour 2 parcelles d'essai sur la même exploitation, emblavées avec la même variété « Gamin ». Il en résulte que pour la même quantité totale d'azote absorbé par ha (grain + paille) les productions de grains peuvent être très dissemblables. La verse ne s'est manifestée dans aucun des 2 cas.

La figure 9 montre pour les deux champs la répartition de l'azote absorbé entre le grain et la paille. Il apparaît que dans l'essai 1105 dont la végétation est malade, des quantités importantes d'azote sont retenues par la paille. Il est aussi caractéristique pour cet essai (1105) dont la production de grains est faible, et le taux d'infection élevé que les poids aux mille grains restent sensiblement inférieurs pour les plus fortes doses d'N.

2.3.2. Application de régulateurs de croissance sur escourgeon

Le traitement aux régulateurs de croissance est une opération céréalière assez courante en culture céréalière intensive. Ces produits permettent de réduire la verse et d'augmenter la production en grain en cas d'un apport supérieur d'azote.

Les figures 10 et 11 montrent l'effet positif des régulateurs de croissance lors d'un seul essai sur escourgeon. Il en ressort que dans la partie du champ ayant bénéficié d'un apport d'azote (fig. 11) le mélange mépiquat + éthéphon avait accru la production de grains de 875 kg/ha et que dans la partie n'ayant pas reçu d'azote (fig. 10) l'éthéphon avait accru la production de 825 kg de grains/ha. Dans ces deux cas il fallait apporter plus d'azote. L'effet positif des régulateurs de croissance se produit par une augmentation du nombre de grains au m² ainsi que par une légère augmentation

du poids aux mille grains.

2.3.3. Augmentation de la densité de semis

Sur les bonnes terres limoneuses normales, aucun effet positif n'a été enregistré dans nos essais ni pour l'escourgeon, ni pour le froment d'hiver pour une plus grande densité de semis.

L'augmentation de la densité de semis produisait bien une augmentation du nombre d'épis au m², il est vrai non proportionnelle, mais le nombre de grains par épi diminuait nettement de sorte que l'on ne pouvait observer aucune ou seulement une faible augmentation du nombre de grains au m². En même temps le poids de mille grains diminuait si bien qu'en moyenne se manifestait une légère baisse de la production.

Dans un essai sur l'escourgeon « Gerbel » des densités de semis allant du simple au double donnaient la production indiquée à la figure 12. Il en ressort qu'une densité de semis doublée entraîne une baisse du besoin en azote ainsi qu'une baisse de la production de grains maximum. Cependant la production est légèrement en augmentation pour les faibles doses d'azote.

2.4. Directives relatives au fractionnement de la fumure azotée

Il ressort de l'analyse faite sur un grand nombre de parcelles que la production maximum de grains peut être obtenue par des procédés assez différents du fractionnement de la fumure azotée.

D'autre part, il est vrai qu'en certains cas on peut observer des différences de rendement assez importantes pour différents fractionnements de doses identiques d'N à l'ha.

Le modèle de fractionnement ci-dessous indiqué se dégage de l'ensemble des données relatives aux champs d'essai :

— le premier apport d'N, début mars est déterminé par les éléments suivants :

1. la quantité d'azote nitrique (N-NO₂) présente dans le sol au mois de février dans le voisinage im-

médiat des racines : couche de 0 à 60 cm et éventuellement celle de 0 à 30 cm.

2. L'azote déjà absorbé par la jeune culture au mois de février (développement de la végétation).
3. La texture du sol, sa structure et sa teneur en humus.
4. La capacité de tallage de la variété observée.
5. Les opérations culturales appliquées : régulateurs de croissance, lutte contre les maladies et désherbage.

La somme des quantités d'azote obtenues aux points 1 et 2 doit être complétée jusqu'à atteindre un niveau déterminé qui est fonction des points 3, 4 et 5.

— *le deuxième apport d'azote* : vers la mi-avril, est déterminé par les facteurs suivants :

1. La quantité d'azote nitrique présente dans la couche de sol de 0 à 90 cm.
2. La quantité d'azote déjà absorbée au mois de février.
3. La texture du sol, sa structure et sa teneur en humus.
4. Le besoin en azote de la variété.
5. Les opérations culturales mises en œuvre.

La somme des points 1 et 2 moins le premier apport d'N doit être complétée jusqu'à un niveau qui est fonction des points 3, 4 et 5.

— *le troisième apport d'azote*, enfin, est déterminé par la dose totale d'N calculée au moyen de la formule de l'indice d'azote de laquelle on déduit les premier et deuxième apports. Cette formule est signalée au 2.1.

2.5. Analyse de l'effet de l'azote

L'effet obtenu par l'azote sur le rendement en grain est surtout fonction de l'indice d'azote du sol, comme on vient de le démontrer. La fumure azotée constitue un très important facteur de production de la céréale.

L'effet de l'azote peut en certains cas donner lieu à une augmentation de la production de plus de 3.000 kg de grain/ha lors d'une utilisation rationnelle de l'azote conformément à l'in-

dice d'azote du sol et sur une culture saine.

Le tableau 2 indique pour 11 champs d'essai emblavés en froment d'hiver et 12 champs d'essai emblavés en escourgeon — en 1981 — respectivement le rendement moyen sans azote et pour la dose optimale d'N et, en même temps les éléments du rendement moyen correspondant.

L'effet positif obtenu au moyen de l'azote est, tant pour le froment d'hiver que pour l'escourgeon, en corrélation très significative avec l'augmentation du nombre de grains au m². Toutes les opérations culturales doivent notamment viser à maintenir un nombre élevé de grains au m² (20 à 22.000 grains/m²) pour un niveau acceptable de poids aux mille grains. Au tableau 3 est présentée une analyse plus détaillée des effets obtenus par la fumure azotée pour différentes classes de teneur du sol en azote.

Il ressort du tableau 3 que pour toutes les catégories de teneur du sol en azote la fumure azotée résulte toujours en une augmentation du nombre d'épis au m², ainsi sur les sols riches en azote qui de par leur nature donnent déjà un grand nombre d'épis au m². L'augmentation du nombre d'épis au m² due à la fumure azotée est d'autant plus importante que le sol est plus pauvre en azote. A partir de la 2^e catégorie de richesse en azote la fumure azotée a pour effet une baisse du nombre de grains par épi et à partir de la 4^e catégorie il en va de même sur le nombre total de grains au m². L'effet de la fumure azotée n'est pratiquement jamais positif ni sur le poids aux mille grains, ni sur le poids à l'hectolitre mais est au contraire toujours négatif pour ces deux facteurs à partir de la même catégorie de teneur en azote.

3. Application dans la pratique de cette nouvelle forme d'analyse du sol quant à l'azote

Dès 1980 le Service Pédologique de Belgique a appliqué dans la pratique cette nouvelle forme d'analyse du sol sur des sols limoneux et des sols sablo-limoneux profonds pour des

Tableau 2 Influence de la fumure azotée sur le rendement et les éléments du rendement et sur le poids à l'hectolitre du froment d'hiver et de l'escourgeon - 1981

Nombre de champs	Froment d'hiver		Relatif	Escourgeon		Relatif
	11	11	ON = 100	12	12	ON = 100
Fumurée azotée	0 N	120 N (1)	120 N (1)	0 N	118 N (1)	118 N (1)
Production de grain	5.217	7.311	140	4.680	6.984	149
Indice de verse	0	0	—	0	2,19	—
Nombre d'épis/m ²	391	552	141	410	521	127
Nombre de grains/épi	33,54	33,49	99,9	28,40	34,42	121
Grains au m ²	13.115	18.485	141	11.645	17.935	154
Poids aux mille grains	39,78	39,55	99,4	40,19	38,94	96,9
Poids hectolitre	75,10	75,24	100,2	71,32	70,15	98,4

(1) Moyenne des apports optimaux d'N

Tableau 3 Effet de la fumure azotée sur le rendement et les éléments du rendement et sur le poids à l'hectolitre chez le froment d'hiver et l'escourgeon en fonction de la teneur du sol en azote

Catégories d'indices d'azote	Apport d'azote	Rendement (2)	Epis au m ²	Grains par épi	Grains au m ² (3)	Poids aux mille grains	Poids hectolitre
1. très pauvre	très élevé (opt.)	+++	++	++	+++	—0	—0 +
2. pauvre	élevé (optimal)	++	++	—	++	—0	—0 +
3. moy. pauvre	moyen (optimal)	+	+	—	+	—0	—0 +
4. riche	moyen (tr. élevé)	—	+	—	—	—	—
5. très riche	moyen (tr. élevé)	—	+	—	—	—	—

(*) +++ très grand effet positif sur le rendement ou sur le facteur en question

++ grand effet positif sur le rendement ou sur le facteur en question

+ effet positif à faible sur le rendement ou sur le facteur en question

0 aucun effet

— effet négatif moyen à faible sur le rendement ou sur le facteur en question

— grand effet négatif sur le rendement ou sur le facteur en question

(2) Rendement : produit des grains au m² × poids de mille grains

(3) Grains au m² : produit des épis/m² × grains/épi

Figure 1 Base d'avis de fumure azotée pour le froment d'hiver et l'escourgeon sur sol limoneux - 1977-1981

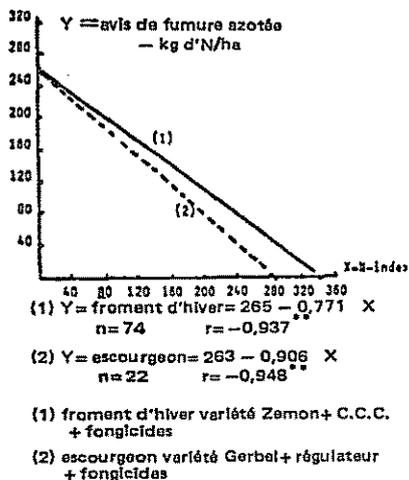


Figure 2 Effet de l'azote nitrrique présent dans le sol (0-90 cm) en février (x_1) sur la production de grains et effet du $\text{NO}_3\text{-N}$ présent dans le sol et de la fumure azotée (x_2) sur la production de grains
 Champ 1176 - 1981 - Var. Fidel

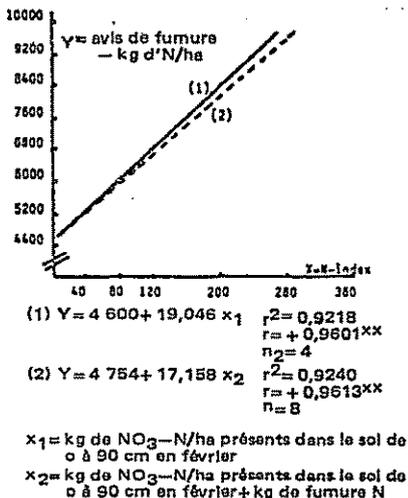


Figure 3 Comparaison des apports d'N physiologiquement et économiquement optimaux pour les champs d'essai de froment d'hiver de 1981 - 15 champs

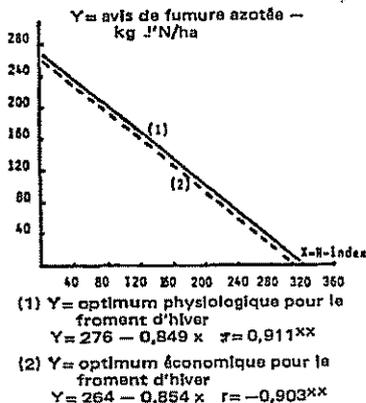


Figure 6 Comparaison des apports d'N physiologiquement et économiquement optimaux pour les champs d'essai d'escourgeon de 1981 - 14 champs

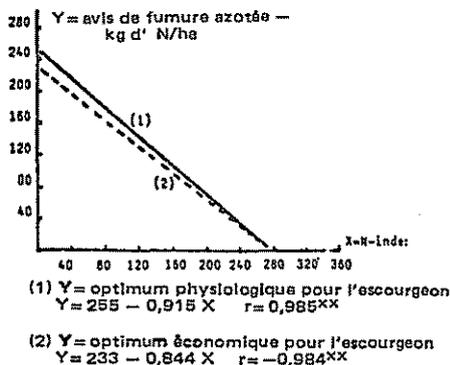


Figure 5 Essais 1166 - Corrélation entre la dose d'N et le rendement en grains avec (+) et sans (-) traitement fongicide (moyenne de 10 var.)

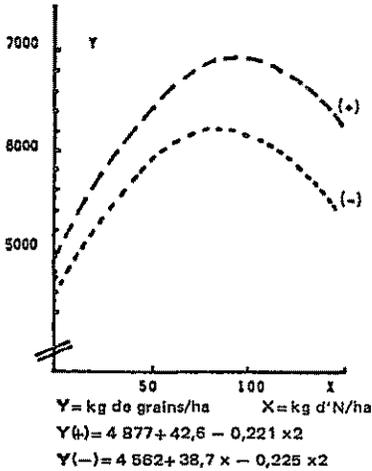


Figure 6 Essai 1166 - Corrélation entre la dose d'N et l'indice de verse avec (+) et sans (-) traitement fongicide (moyenne de 10 var.)

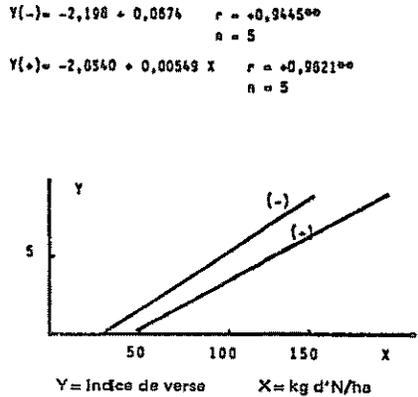


Figure 7 Essai 1166 - Corrélation entre la dose d'N et le poids de mille grains chez le froment d'hiver, avec (+) et sans (-) traitement fongicide (moy. de 10 var.)

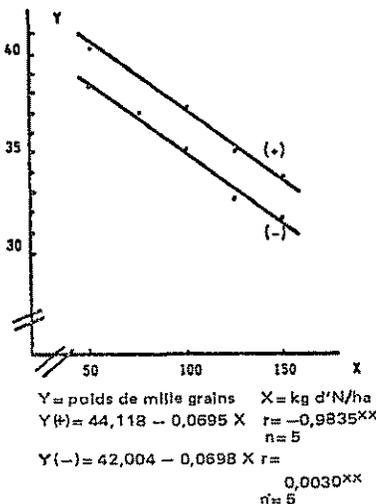


Figure 8 Corrélation entre l'absorption d'N et la production de grains - froment d'hiver Gamlin

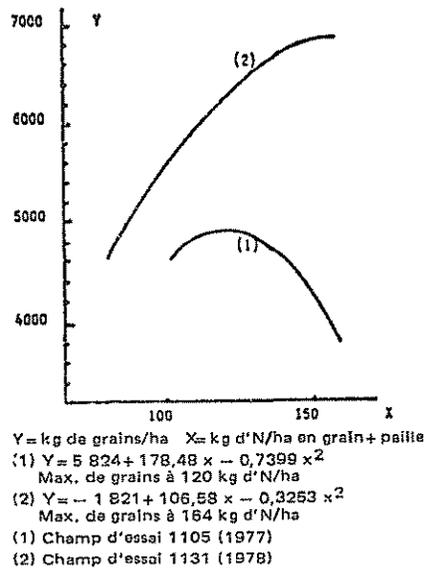
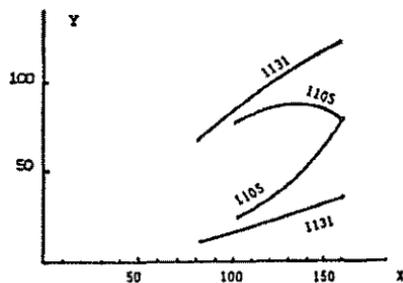


Figure 9 Absorption d'N - Essai 1105 (1977) et 1131 (1978) sur le froment d'hiver «Gamin» - Gouy-lez-Piéton

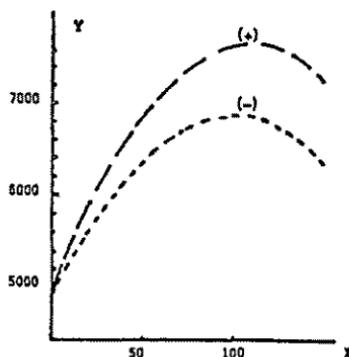


Y = kg d'N/ha (absorption)

X = absorption totale par les grains et par la paille en kg/ha (les courbes supérieures se rapportant à l'absorption par les grains, les courbes inférieures à l'absorption par la paille)

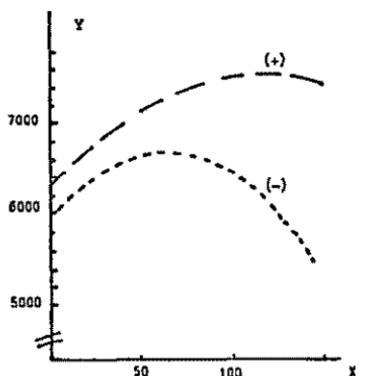
Figure 10 Effet d'N et d'éthéphon sur la production de grains - Essai 1167 escourgeon «Capri» (1980)

Y = kg de grains/ha X = kg d'N/ha



Y(-) = $4\ 863 + 41,0 X - 0,205 X^2$ Opt. = 100 N
 Prod. max. de 6 910 kg de grains/ha
 Y(+) = $4\ 926 + 51,8 X - 0,239 X^2$ Opt. = 108 N
 Prod. max. de 7 735 kg de grains/ha
 (+) avec éthéphon (-) sans éthéphon

Figure 11 Effet d'N et du mélange mépiquat + éthéphon sur la production de grains Essai 1167 + 60 N - escourgeon «Capri» (1980)



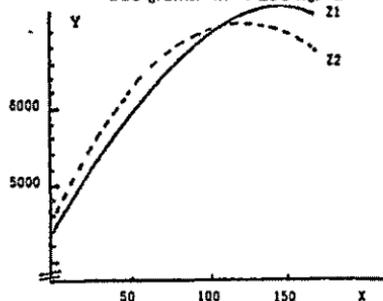
Y = kg de grains/ha X = kg d'N/ha
 Y(-) = $5\ 936 + 23,6 X - 0,182 X^2$ Opt. : 65 N
 Prod. max. 6 702 kg de grains/ha
 Y(+) = $6\ 293 + 21,8 X - 0,093 X^2$ Opt. : 118 N
 Prod. max. 7 576 kg de grains/ha
 (+) avec mépiquat + éthéphon
 (-) sans mépiquat + éthéphon

Figure 12 Essai 1174 (1981) - Mollem - escourgeon «Gerbel»

Y : kg de grains/ha X : kg d'N/ha

Z1 : densité de semis
 300 grains/m² : 130 kg/ha

Z2 : densité de semis
 600 grains/m² : 260 kg/ha



Y = Z1 = $4\ 291 + 40,0 X - 0,1328 X^2$
 Prod. max. de grains : 7 304 kg
 Dose d'N opt. : 150,6 kg/ha
 Y = Z2 = $4\ 524 + 41,44 X - 0,1663 X^2$
 Prod. max. de grains : 7 105 kg
 Dose d'N opt. : 124,6 kg/ha

cultures de froment d'hiver et d'es-courgeon ainsi que de betteraves su-crées.

3.1. Echantillonnage du sol

L'échantillonnage est fait au mois de février par des échantillonneurs agréés. Sur chaque parcelle sont prélevés en 12 à 15 endroits 3 échantillons du sol, soit un échantillon de la couche de 0-30 cm, un de celle de 30 à 60 cm et un de la couche de 60 à 90 cm de profondeur.

Les échantillons sont transportés au plus vite au laboratoire d'Heverlee. Les échantillons sont accompagnés d'une feuille de renseignements indiquant toutes les données nécessaires sur le sol et la culture.

3.2. Analyse des échantillons

Les échantillons sont analysés au plus vite et un avis détaillé de fumure azotée est établi sur base des résultats d'analyse et des données fournies par

l'agriculteur. Cet avis de fumure azotée tient compte de la variété cultivée et des renseignements indiqués sur la feuille de renseignements quant à l'emploi de régulateurs de croissance et de fongicides.

Le Service Pédologique communique les résultats de l'analyse endéans une semaine à compter de la date d'arrivée des échantillons de terre.

Pour chaque parcelle est indiquée la quantité, en kg, d'azote nitrique et d'azote ammoniacal présents dans chacune des 3 couches du sol ainsi que l'acidité et la teneur en humus de la couche supérieure (de 0 à 30 cm de profondeur). En outre est indiqué l'indice d'azote et une appréciation générale de l'état du sol en ce qui concerne l'azote.

Les avis de fumure azotée indiquent aussi bien la dose totale d'azote par hectare que les 3 doses fractionnées de fumure azotée à appliquer.