



Fertilisation du caféier Arabica au Cameroun

P. Bouharmont

Fertilisation du caféier Arabica au Cameroun

P. Bouharmont

Fertilisation du caféier Arabica au Cameroun

P. Bouharmont

Résumé

Huit essais de fertilisation minérale de caféiers Arabica en production ont été réalisés, au Cameroun, dans des plantations en plein soleil. Les quatre premiers essais sont situés sur un sol fertile d'origine volcanique récente, en zone de basse altitude (1 000 m) : un essai de doses croissantes d'azote avec la variété Java et un deuxième avec la variété Caturra, un essai factoriel NPK avec la variété Java et un autre avec la variété Caturra. Les quatre autres essais, réalisés avec la variété Java, sont situés en zone de haute altitude (1 800 m), sur un sol fortement désaturé d'origine volcanique ancienne : un essai de doses croissantes d'azote, un essai factoriel NPK, un essai d'oligo-éléments et un essai factoriel NKZnB.

Dans la plupart des essais, l'évolution des propriétés chimiques du sol a été analysée. Parmi les engrais utilisés, le sulfate d'ammoniaque modifie le plus les caractéristiques du sol. L'analyse d'échantillons foliaires montre que l'alimentation des caféiers est fortement modifiée par l'apport de sulfate d'ammoniaque. Les autres engrais entraînent un accroissement dans les feuilles des teneurs en éléments nutritifs qu'ils contiennent et, parfois, une modification de la teneur de quelques autres éléments.

Sur les sols fertiles, riches en bases échangeables, le sulfate d'ammoniaque améliore fortement les rendements dès la deuxième année d'application. Pendant la période qui s'étend de la deuxième à la huitième année d'épandage, le maximum de production est obtenu pour un apport de 391 kg de N/ha/an pour le Java et de 459 kg pour le Caturra. L'effet de l'azote se poursuit pendant au moins trois ans lorsque l'apport d'engrais est interrompu. Sur les sols fortement désaturés, le sulfate d'ammoniaque réduit les productions lorsqu'il est appliqué en l'absence de tout autre élément. En revanche, l'apport de potassium entraîne une augmentation des productions (plus 59 %) surtout pendant les premières années. L'application de borax au sol accroît le rendement de 67 % et l'application de sulfate de zinc en pulvérisations foliaires de 22 %.

La rentabilité de la fertilisation a été calculée pour différents prix de vente du café.

Dans l'expérimentation réalisée sur les sols fertiles, l'influence des engrais sur la croissance des rejets après recépage des vieilles tiges a également été analysée. L'alimentation des caféiers Java et Caturra y est aussi comparée, ainsi que la réaction respective des deux variétés aux apports d'engrais, en ce qui concerne la nutrition minérale et la production.

Ces divers essais confortent l'utilité du diagnostic du sol pour déterminer les besoins en phosphore et en cations et pour mieux comprendre les réactions des caféiers aux apports de diverses formules d'engrais. Ils mettent également en évidence l'intérêt du diagnostic foliaire pour identifier les déficiences en oligo-éléments, préjudiciables à la productivité des caféiers.

Mots clés : caféier, Arabica, fertilisation, rendement, rentabilité, Cameroun.

Arabica coffee fertilization in Cameroon

P. Bouharmont

Abstract

Eight mineral fertilization trials were carried out on bearing coffee trees in Cameroon, in full sunlight. The first four trials were on a fertile soil of recent volcanic origin, in a lowland area (1 000 m above sea level): a trial of increasing nitrogen rates with the Java variety and another with the Caturra variety, an NPK factorial trial with the Java variety and another with the Caturra variety. The other four trials were carried out with the Java variety in an upland area (1 800 m above sea level), on a highly desaturated soil of ancient volcanic origin: one testing increasing nitrogen rates, an NPK factorial trial, a trace element trial and an NKZnB factorial trial.

The changes in soil chemical properties were analysed in most of the trials. Of the fertilizers used, ammonium sulphate was the one that most modified the soil characteristics. A leaf analysis revealed that coffee tree nutrition was substantially modified by applying ammonium sulphate. The other fertilizers resulted in an increase in leaf contents of the corresponding nutrients, and sometimes modified the levels of other elements.

On fertile soils, rich in exchangeable bases, ammonium sulphate substantially improved yields from the second year of applications. From application years 2 to 8, maximum yields were obtained by applying 391 kg of N/ha/year for Java and 459 kg for Caturra. The effect of nitrogen was maintained for at least three years after halting applications. On highly desaturated soils, ammonium sulphate reduced yields when applied without any other nutrients. However, applying potassium led to increased yields (+ 59%), particularly for the first few years. Applying borax as a top dressing led to a 67% increase in yields, while leaf spraying with zinc sulphate resulted in a 22% increase.

The cost-effectiveness of fertilization was calculated for different coffee sales prices.

In the trials on fertile soil, the effect of fertilizers on shoot growth after pruning the old stems was also analysed. Java and Caturra coffee tree nutrition was also compared, as were the respective reactions of the two varieties to fertilizer applications, in terms of mineral nutrition and yields.

These various trials confirmed the merits of soil diagnosis for determining phosphorus and cation requirements and for providing a clearer understanding of how coffee trees react to different fertilizer formulas. They also demonstrated the utility of leaf analysis in identifying trace element deficiencies, which adversely affect coffee tree productivity.

Key words: coffee tree, Arabica, fertilization, yields, cost-effectiveness, Cameroon.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
1. Les types de sol de la zone de culture du caféier Arabica	5
2. Considérations générales	5
3. Remarques sur les graphiques	6
SOLS FERTILES PEU EVOLUES D'ORIGINE VOLCANIQUE	7
1. Conditions édapho-climatiques	7
2. Essais d'engrais sur caféiers de la variété Java	8
3. Essais d'engrais sur caféiers de la variété Caturra	27
4. Comparaison des variétés Java et Caturra	33
SOLS FORTEMENT DESATURES	37
1. Essai de doses d'azote	38
2. Essai d'engrais NPK	41
3. Essai d'apport d'oligo-éléments	47
4. Essai d'engrais NKZnB	51
DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS	55
1. Productions	55
2. Diagnostic foliaire	56
3. Diagnostic sol	57
4. Relations production-analyses foliaires-analyses de sol	58
5. Recommandations	59
BIBLIOGRAPHIE	61
PLANCHES	65

INTRODUCTION

1. Les types de sol de la zone de culture du caféier Arabica

Au Cameroun, les plantations de caféiers Arabica occupent une superficie d'environ 150 000 ha. Elles sont situées sur des types de sol divers, aux caractéristiques physiques et chimiques variées (Bouharmont, 1994).

Les formules d'engrais à appliquer aux caféiers doivent être adaptées aux conditions édaphiques et climatiques locales, et aux pratiques culturales en vigueur.

Les études pédologiques réalisées dans le passé ont fourni des renseignements sur l'origine, l'évolution et les caractéristiques actuelles des sols, sur leur fertilité, ainsi que sur les niveaux et les équilibres existant entre les éléments chimiques qu'ils contiennent.

Les types de sol de la zone de culture de l'Arabica peuvent être classés en une dizaine de catégories qui, elles-mêmes, peuvent être regroupées dans quatre grands groupes de fertilité. Ce sont :

- le groupe des sols chimiquement fertiles, d'origine volcanique récente ou enrichis par des apports volcaniques éoliens récents ;
- le groupe des sols ferrallitiques moyennement désaturés, modaux, sur basalte, de fertilité moyenne, variable selon le degré atteint par la désaturation ;
- le groupe des sols rouges et brun-jaune, sur roches métamorphiques, de fertilité assez faible ;
- le groupe des sols humifères noirs, sur basalte, situés en zone de haute altitude, à fertilité variable, souvent assez faible, à teneurs en humus et en matière organique élevées.

2. Considérations générales

Au début des essais, les caféiers étaient âgés de trois ou quatre ans. Pendant leur jeune âge, ils ont reçu une dose uniforme d'engrais azoté. L'ensemble de l'expérimentation porte sur huit essais. Quatre essais sont situés à Foubot : un essai de doses d'azote et un essai factoriel NPK dans un champ de caféiers Java, et deux essais semblables dans un champ de caféiers Caturra. Quatre essais sont situés à Santa : un essai de doses d'azote, un essai factoriel NPK, un essai d'oligo-éléments et un essai factoriel NKZnB, tous quatre réalisés dans des champs de caféiers Java. Le Java est un caféier sélectionné, d'architecture normale, planté à une densité classique de 1 666 pieds/ha (3 m x 2 m) à Foubot et à une densité de 2 222 pieds/ha (3 m x 1,5 m) ou de 1 666 pieds/ha (3 m x 2 m) à Santa. Le Caturra est une variété naine, plantée à une densité double (3 333 pieds/ha, 2 m x 1,5 m). Les doses d'engrais appliquées à l'hectare sont identiques pour les deux variétés. Chaque caféier Caturra reçoit donc deux fois moins d'engrais qu'un caféier Java.

Les résultats des essais réalisés avec le Java sont destinés à être utilisés dans les champs de caféiers plantés avec cette variété sélectionnée, ainsi que dans les champs de caféiers locaux, de type Jamaïque, qui ont une architecture semblable et qui couvrent actuellement au Cameroun une superficie totale avoisinant 150 000 ha.

Le Caturra ne peut pas être vulgarisé au Cameroun, à cause de sa forte sensibilité à la rouille orangée et à l'antracnose des baies. Un des objectifs de la sélection consiste à transférer à cette variété de port nain des gènes de résistance à ces maladies, en vue de l'obtention et de la diffusion de variétés sélectionnées de format nain, à haut potentiel de production, résistantes vis-à-vis des maladies cryptogamiques (variétés Colombia, Catimor, Sarchimor, Ruiru 11...), susceptibles d'être plantées à haute densité. Les résultats des essais réalisés avec le Caturra sont destinés à être utilisés pour ces variétés lorsqu'elles seront disponibles. Dans les essais, les caféiers Caturra ont été traités chimiquement contre la rouille et contre l'antracnose des baies, afin d'en éviter l'incidence tout comme elle sera évitée sur les variétés sélectionnées résistantes.

3. Remarques sur les graphiques

Les graphiques des analyses de sols et de feuilles de caféiers présentés dans cette étude ont les caractéristiques suivantes :

- sur un même graphique sont représentées ensemble les variations des teneurs de plusieurs éléments dont les valeurs sont d'un ordre de grandeur nettement différent ; pour les rendre parlants, nous avons adopté comme échelle, pour chaque élément, son évolution en pourcentage de sa valeur dans la parcelle témoin, en sorte que l'étalement dans le sens vertical soit comparable ;
- l'évolution des paramètres est exprimée en pourcentage de la valeur du paramètre dans la parcelle témoin ;
- afin de rendre les graphiques plus lisibles, les points d'origine des lignes, correspondant à 100 % (valeur chez le témoin) ont été dissociés sur l'axe des Y ;
- les valeurs exprimées en unités de mesure sont inscrites aux deux extrémités des lignes (valeurs calculées dans le cas des lignes de régression significatives).
- * lignes reliant les valeurs réellement observées (régressions non significatives) ;
- ** lignes de régressions linéaires, seules significatives ;
- *** lignes de régressions curvilinéaires significatives ;
- **** lignes de régressions logarithmiques significativement plus représentatives que les régressions linéaires ou curvilinéaires.

PREMIERE PARTIE

SOLS FERTILES PEU EVOLUES D'ORIGINE VOLCANIQUE

1. Conditions édapho-climatiques

L'expérimentation a été réalisée à la station de Foubot, située dans le département du Noun, à une altitude de 1 000 m par 5°30' de latitude nord.

Le climat comporte une seule saison de pluies et une seule saison sèche, de novembre à février, dont la durée s'étend sur trois à quatre mois (tableau 1 et figure 1) (Bouharmont, 1994).

Tableau 1. Quelques caractéristiques climatiques de la région.

mois	pluies (mm) (1)	températures (°C) (2)	insolation (h) (3)	humidité de l'air (4)	évaporation (mm) (5)
J	8	22,1	8,30	27,3	172,5
F	27	22,9	8,57	23,3	204,6
M	96	23,0	6,91	36,5	178,6
A	142	22,3	6,57	55,0	158,4
M	164	21,6	6,83	60,1	146,9
J	172	20,7	5,83	63,8	124,7
J	224	20,3	4,07	67,1	99,9
A	252	20,3	3,93	66,9	99,2
S	305	20,4	4,44	65,5	117,4
O	250	21,7	7,87	61,4	152,0
N	67	21,2	7,78	45,2	149,8
D	12	21,5	8,63	32,7	162,3
année	1 719 *	21,4 **	6,47 **	50,4 **	1 766,3 *

(1), pluies moyennes mensuelles, calculées sur trente-quatre ans ;

(2), moyennes mensuelles des températures moyennes journalières, calculées sur dix-huit ans ;

(3), moyennes mensuelles de la durée journalière de l'insolation, calculées sur dix-sept ans, et exprimées en heures et centièmes d'heure ;

(4), moyennes mensuelles de l'humidité relative minimale journalière, calculées sur quatorze ans ;

(5), évaporation totale mensuelle d'une nappe d'eau libre, exprimée en mm, calculée sur trois ans (bac classe A, non enterré) ;

*, total ;

**, moyenne.

Les essais ont été menés sur un sol d'apport éolien, peu évolué, sur cendres volcaniques, dont la teneur en argile est de 15 %, celle en limon de 8 % et celle en sable de 74 %.

Dans la province de l'Ouest, on peut distinguer quatre types de sol utilisés en caféiculture, dont les caractéristiques chimiques sont semblables à celles de la station de Foubot :

- les sols d'apport éolien, peu évolués, sur cendres volcaniques ;
- les sols d'érosion, peu évolués, noirs ou bruns, sur roches basiques, avec ou sans couverture cendreuse ;
- les sols pénévulés jeunes, avec ou sans recouvrement cendreux ;

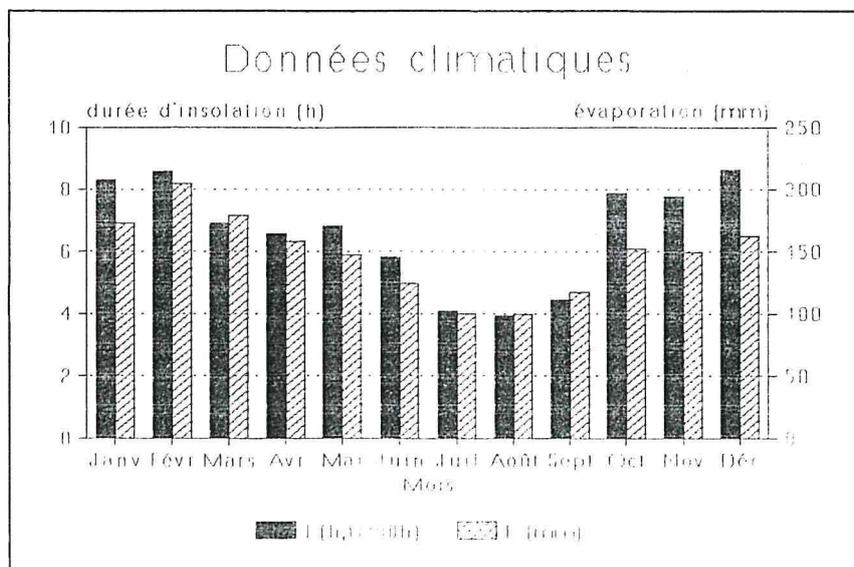
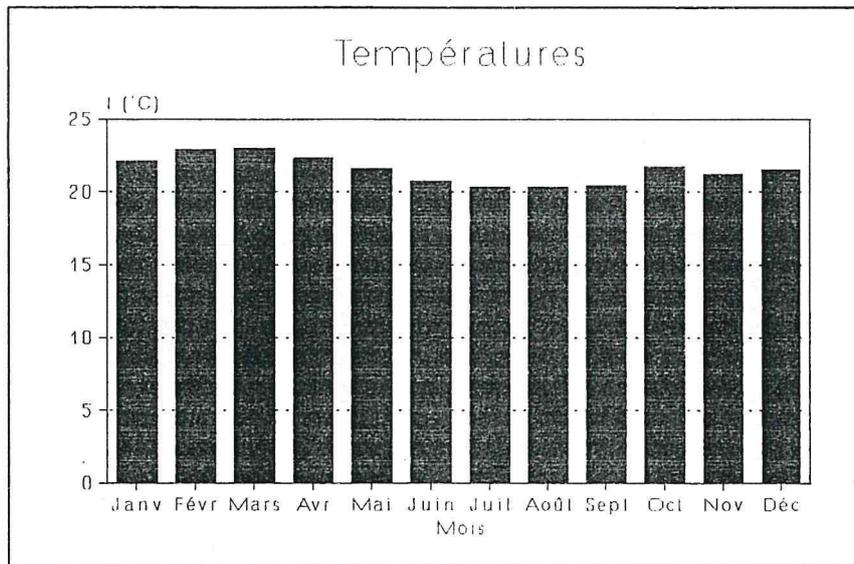
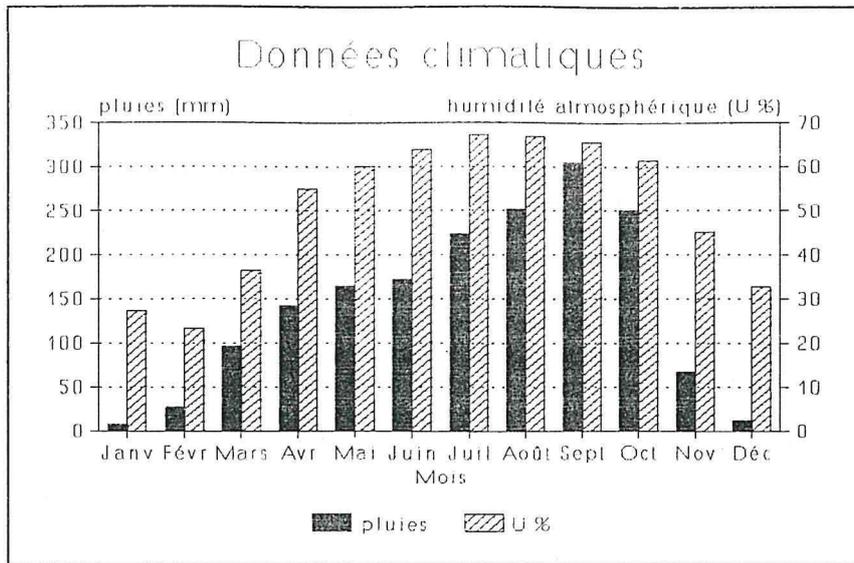


Figure 1. Données climatiques du département du Noun.

- les sols pénévulés rouges, sur roches métamorphiques ou sur basalte, à recouvrement cendreux ou enrichis superficiellement par des apports cendreux éoliens.

Les caféières situées sur ces sols fertiles couvrent une superficie de près de 30 000 ha. Etant donné leur similitude en ce qui concerne les propriétés chimiques, les résultats des essais réalisés à la station de Foubot peuvent être extrapolés à l'ensemble de ces sites.

2. Essais d'engrais sur caféiers de la variété Java

L'étude consiste à observer l'influence de l'apport d'engrais sur les productions, sur l'évolution chimique du sol et sur l'alimentation minérale des caféiers.

Les essais contiennent des parcelles utiles (90 m²) de 15 caféiers plantés sans ombrage à un écartement de 3 m x 2 m (1 666 caféiers/ha), taillés en tiges écimées (quatre tiges). Les engrais sont appliqués sur le sol, sans enfouissement, sous la jupe des caféiers.

2.1. Essai de doses d'azote

2.1.1. Matériel et méthodes

L'essai est établi suivant un dispositif en blocs randomisés à huit répétitions. Il comporte six traitements qui correspondent aux six doses d'engrais appliquées (sulfate d'ammoniaque à 21 % d'azote).

traitement	azote kg /ha/an	sulfate d'ammoniaque kg/ha/an
N0	0,0	0
N1	52,5	250
N2	105,0	500
N3	210,0	1000
N4	420,0	2000
N5	630,0	3000

2.1.2. Résultats

2.1.2.1. Evolution chimique du sol en dehors de la zone d'épandage

Après quatre années d'épandage d'engrais, des échantillons de sol ont été prélevés de 0 à 20 cm de profondeur, à mi-distance entre les caféiers de la ligne, soit à 1 m des troncs. Ils ont été analysés par le laboratoire de l'IRA (Institut de recherche agronomique) à Ekona (tableau 2).

Tableau 2. Caractéristiques du sol situé en dehors de la zone d'application de l'engrais.

traitement	N total ‰	pH	P assimilable ppm	K méq %	Ca méq %	Mg méq %	S méq %	C.E.C. méq %	Mg/K	M.O. %
N0	5,1	6,2	30	0,68	14,1	3,21	18,0	37	4,7	10,5
N1	4,8	6,3	36	0,72	14,4	3,26	18,4	37	4,5	10,4
N2	5,1	6,2	35	0,60	13,7	3,25	17,6	37	5,4	10,6
N3	5,2	6,1	41	0,65	13,5	3,42	17,5	37	5,3	10,4
N4	5,0	6,0	38	0,67	13,6	2,88	17,2	36	4,3	10,4
N5	4,9	6,0	31	0,69	14,0	2,92	17,7	38	4,2	10,7

N.B. : P assimilable, méthode Kurtz-Bray.

D'après les chiffres cités par différents auteurs, on peut estimer que le niveau des éléments dans le sol est normal lorsqu'il est compris entre les limites suivantes :

N total ‰	2,0 à 4,9
P ass. ppm (Kurtz-Bray)	7 à 20
P ass. ppm (Olsen-Dabin)	20 à 40
pH	5,3 à 6,5
CEC méq %	11 à 25
K méq %	0,20 à 0,59
Ca méq %	5,0 à 9,9
Mg méq %	0,60 à 0,90
S méq %	5,8 à 11,4
Saturation %	20 à 60
Matière organique %	6,9 à 17,1
Zn ppm	3 à 5
B ppm	1 à 2

On constate que les caractéristiques du sol de l'essai n'ont jamais de valeurs inférieures à celles qui sont considérées comme normales en culture caféière. La plupart d'entre elles (N, P, CEC, K, Ca, Mg) sont plus élevées que ces normes et caractérisent un sol fertile.

Le sol n'a pas évolué sous l'influence des traitements ; l'analyse statistique ne révèle aucun effet significatif des apports d'engrais.

2.1.2.2. Evolution chimique du sol dans la zone d'épandage

Après huit années d'apport de l'engrais, des échantillons de sol (0-20 cm) ont été prélevés sous la jupe des caféiers, dans la zone où l'engrais a été appliqué. Un échantillon composite de chaque traitement a été analysé par le laboratoire du CIRAD à Montpellier (tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques du sol situé dans la zone d'application de l'engrais.

traitement	N tot. ‰	pH	P ass. ppm	K méq %	Ca méq %	Mg méq %	S méq %	CEC méq %	Mg/K	Zn ppm
N0	3,81	6,30	270	0,60	15,00	3,90	19,5	20,3	6,4	2,48
N1	5,09	6,15	262	0,55	14,10	3,48	18,1	18,8	6,4	2,38
N2	5,53	5,90	263	0,45	12,91	2,82	16,2	17,1	6,2	2,22
N3	6,01	5,65	278	0,36	10,95	2,27	13,6	14,4	6,2	2,06
N4	6,70	5,20	274	0,26	7,05	1,22	8,5	9,5	4,6	1,90
N5	6,77	5,00	270	0,20	6,14	1,29	7,6	9,0	6,5	1,74
lin.	+	--	0	--	--	--	--	--	0	--
curv.	+	--	0	--	--	--	--	--	0	--

N.B. : - P assimilable, méthode Olsen-Dabin ;

- bases échangeables, extraction à l'acétate d'ammonium à pH 7 ;

- Zn, extraction à l'EDTA ;

- lin., niveau de signification de la régression linéaire (+, - : P = 0,05 ; ++, -- : P = 0,01) ;

- curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire (+, - : P = 0,05 ; ++, -- : P = 0,01).

L'analyse de la variance des résultats n'est donc pas possible (une seule répétition), mais la régression significative des teneurs de certains éléments chimiques du sol sur les doses d'azote décrit l'évolution chimique du sol.

On constate que, dans la zone d'application de l'engrais, la chimie du sol est fortement modifiée. L'apport de sulfate d'ammoniaque enrichit le sol en azote ; cet enrichissement n'est pas proportionnel aux doses appliquées et va en décroissant aux doses élevées. En revanche, le sol s'appauvrit en cations K, Ca et Mg, sans que, généralement, ne soient modifiés les rapports entre eux. Le pH décroît de 6,3 chez le témoin sans engrais à 5,0 dans les parcelles les plus fertilisées. L'apport de sulfate d'ammoniaque provoque également une diminution de la teneur du sol en zinc et de la capacité d'échange. Les régressions linéaire et curvilinéaire des éléments chimiques du sol N, K, Ca, Mg, Zn, de la somme des bases échangeables et du pH, sur les doses d'azote, sont significatives ou hautement significatives (figure 2). Pour les caractéristiques K, Mg, S, CEC et pH, la régression curvilinéaire est significativement plus précise que la régression linéaire. Seuls la teneur en phosphore assimilable du sol et le rapport Mg/K ne sont pas influencés par les traitements.

Lorsqu'on compare ces données aux normes signalées plus haut, on observe que :

- malgré le déplacement des cations, toutes les valeurs restent dans les normes, sauf le pH et la capacité d'échange qui se dégradent aux doses élevées N4 et N5 ;
- la teneur en zinc est faible dans tous les traitements.

Pour les doses maximale et optimale d'engrais azoté calculées pour les productions (tableau 4), les caractéristiques du sol, sauf la teneur en zinc, restent situées dans les normes ou sont supérieures à celles-ci. Elles peuvent donc être utilisées sans risque pour les sols, pendant une durée bien supérieure à celle de l'essai (huit ans), d'autant plus que celui-ci ne se dégrade pas, ou très faiblement, à l'extérieur des zones d'application.

Tableau 4. Caractéristiques du sol dans la zone d'épandage, calculées pour les doses d'azote maximale et optimale.

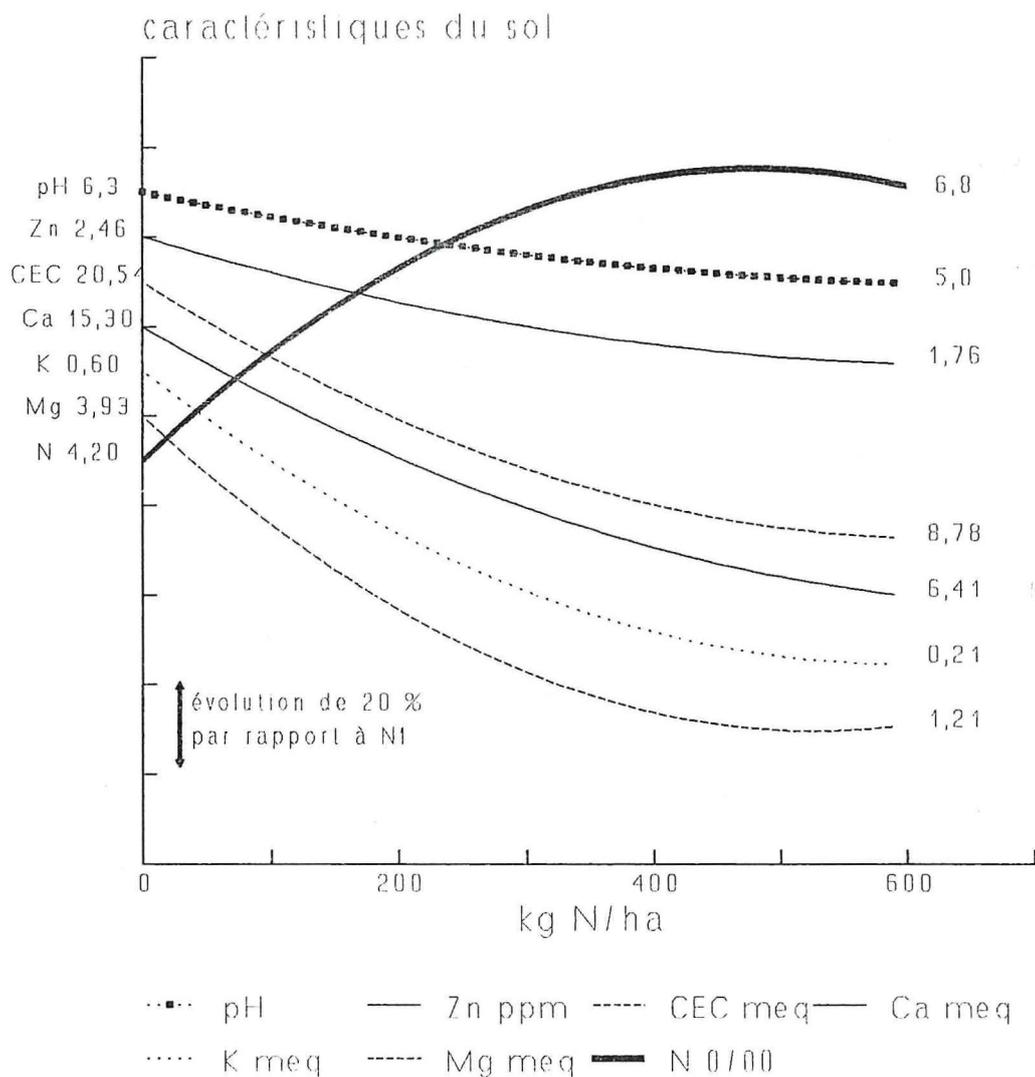
doses N kg/ha	pH	K		Ca		Mg		Zn		CEC	
		még %	% té	még %	% té	még %	% té	ppm	% té	%	% té
0	6,3	0,60	100	15,3	100	3,93	100	2,46	100	20,6	100
250	5,5	0,34	57	9,9	65	1,93	49	2,03	83	13,0	63
350	5,3	0,27	46	8,4	55	1,48	38	1,91	77	11,1	54
391	5,3	0,25	42	7,9	51	1,35	34	1,88	76	10,4	51

N.B. : - N 250 kg/ha, dose optimale pour un prix de vente du café marchand de 200 F CFA le kilo ;
 - N 350 kg/ha, dose optimale pour un prix de vente du café marchand de 400 F CFA le kilo ;
 - N 391 kg/ha, dose maximale (maximum de la courbe de régression).

2.1.2.3. Analyses foliaires

Des échantillons de feuilles de caféiers ont été prélevés pour analyse, six, sept et huit ans après la mise en place de l'essai, environ deux mois après la floraison, à une période de l'année où les teneurs en N, P, K et Ca sont voisines de leur maximum (Bénac, 1966 et 1967). Ils ont été analysés par le laboratoire du CIRAD à Montpellier. Les résultats figurent dans le tableau 5 et sur les figures 3 et 4.

Analyses sol (effets du sulfate d'ammoniaque)



Java

Figure 2. Evolution des caractéristiques du sol en pourcentage du témoin.
Niveau de signification *** : toutes les lignes.

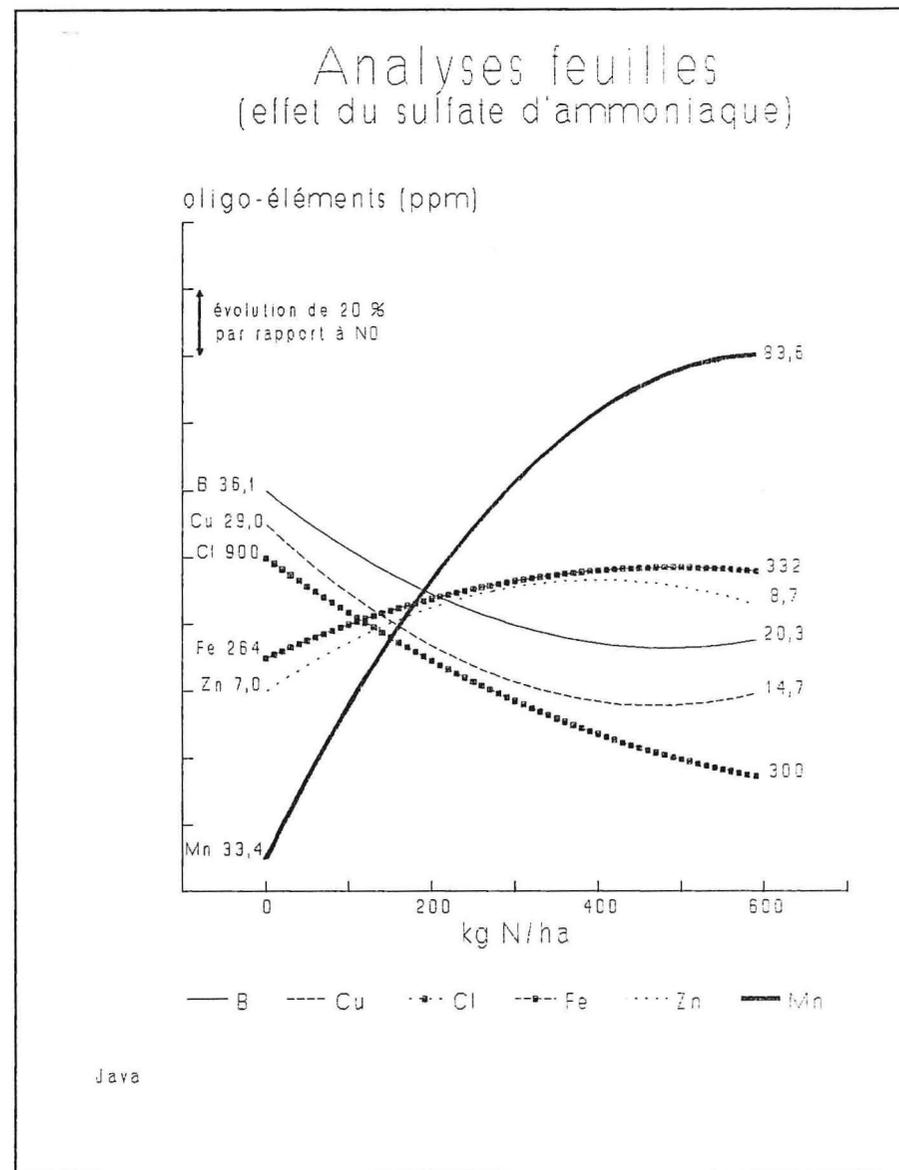
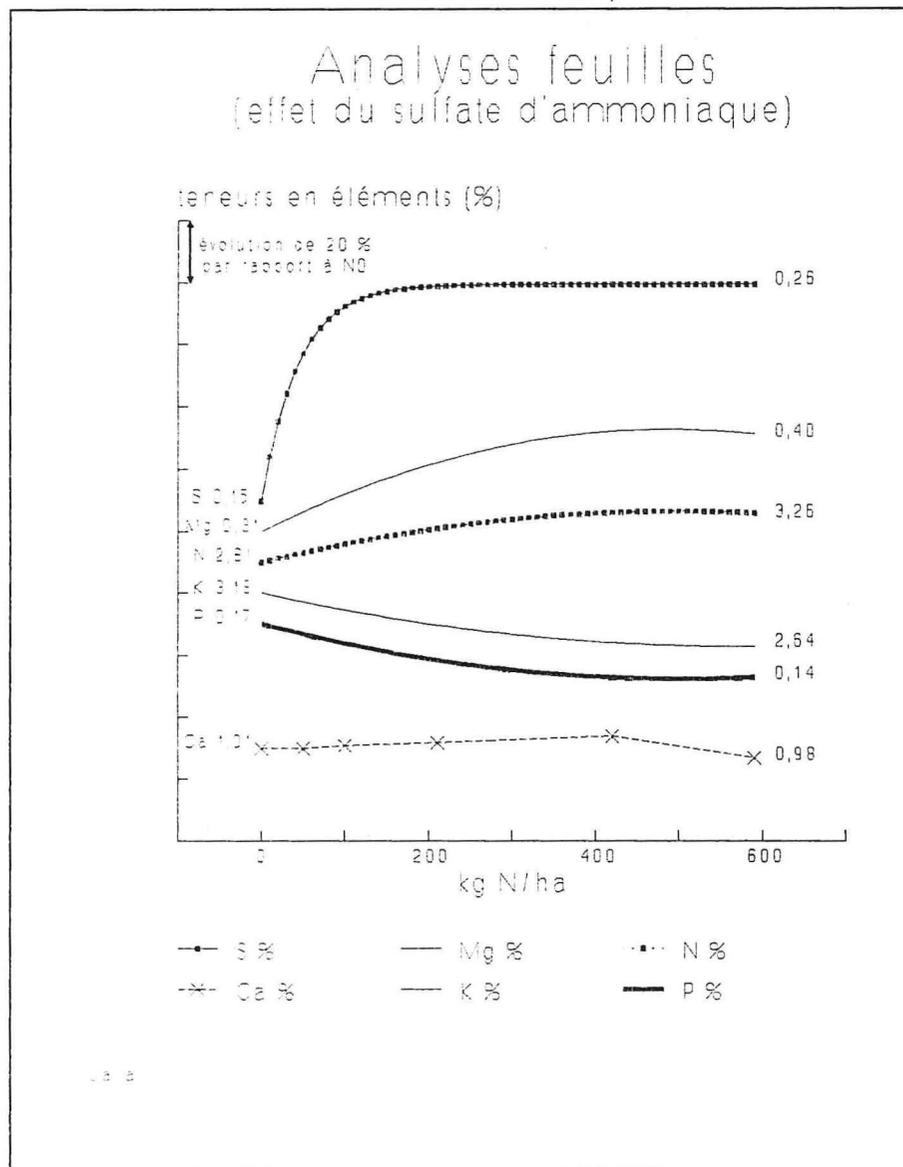
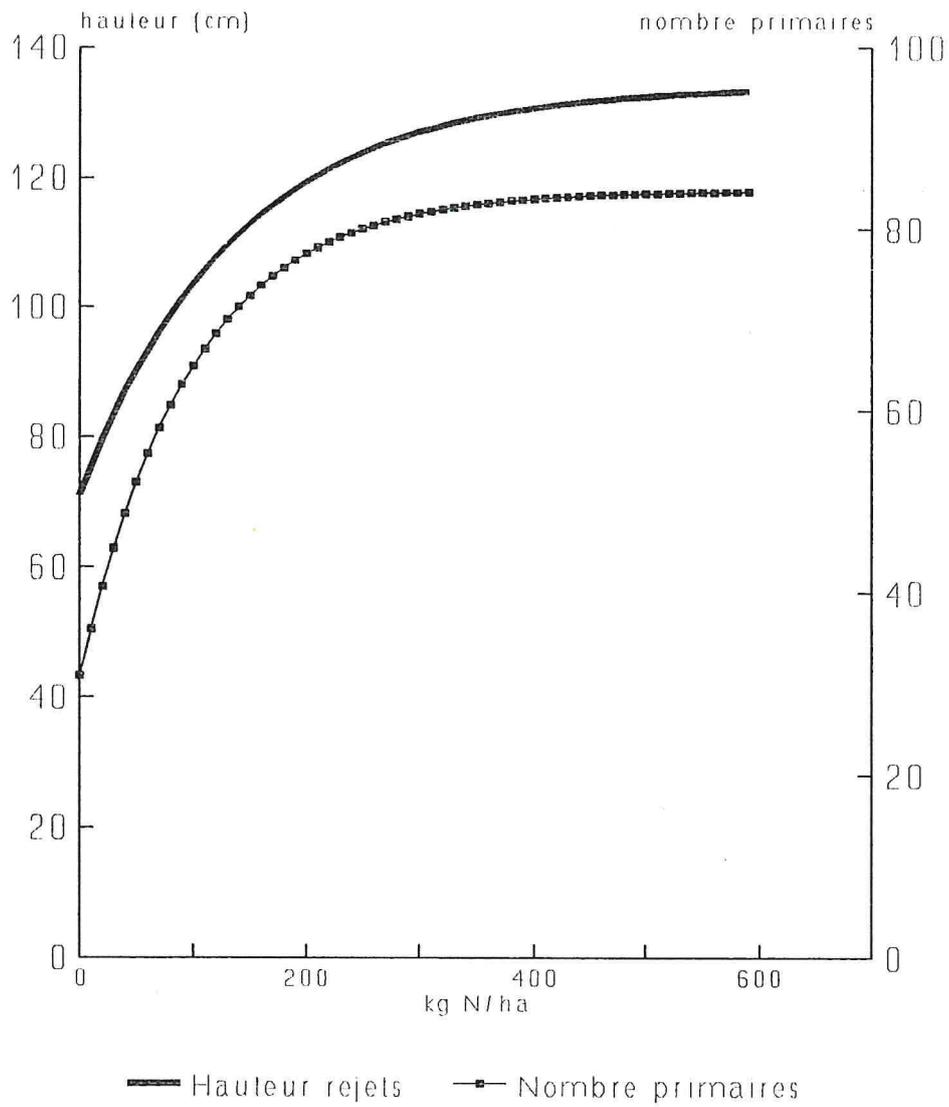


Figure 3. Evolution de la teneur des éléments dans les feuilles.
Niveau de signification *** : toutes les lignes.

Croissance des rejets



Java

Figure 4. Croissance des rejets après recépage.

Tableau 5. Résultats des analyses foliaires (moyenne des trois prélèvements).

traitement	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	B ppm	Cl ppm	Cu ppm
N0	2,781 d	0,170 a	3,221 a	1,005	0,303 e	0,153 d	274,1 b	28,3 f	7,3 c	37,3 a	900 a	31,1 a
N1	2,935 c	0,160 b	3,078 b	1,007	0,326 d	0,228 c	261,8 b	42,7 e	7,0 c	32,3 b	800 a	24,0 b
N2	3,005 c	0,156 b	2,942 c	1,016	0,355 c	0,247 b	296,1 ab	55,7 d	8,0 bc	29,0 c	740 a	21,3 bc
N3	3,137 b	0,146 c	2,834 d	1,032	0,378 b	0,261 a	317,3 a	63,6 c	9,3 a	22,6 d	670 a	18,5 cd
N4	3,241 a	0,142 c	2,718 d	1,048	0,398 a	0,264 a	333,6 a	73,5 b	9,1 ab	21,7 d	370 b	14,5 d
N5	3,257 a	0,139 c	2,625 e	0,983	0,401 a	0,253 ab	330,6 a	85,6 a	8,6 ab	19,9 d	320 b	14,6 d
sign.	xx	xx	xx	0	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
CV %	3	4	3	5	4	5	10	6	11	8	34	19
lin.	xx	xx	xx	0	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
curv.	xx	xx	xx	0	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
log.						xx						

NB : - test de Keuls-Newman ; les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification de l'analyse de la variance ;

- lin., niveau de signification de la régression linéaire ;

- curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;

- log., régression logarithmique significativement supérieure aux autres régressions (x ou xx) ;

- niveau xx : P = 0,01

Au Kenya (Clarke *et al.*, 1985) et au Kivu (Martin-Prével, 1984), le niveau des différents éléments dans les feuilles est estimé normal lorsqu'il est compris entre les limites suivantes (en pourcentage de la matière sèche ou en ppm) :

	Kenya	Kivu
N %	2,5 à 3,0	2,9
P %	0,15 à 0,30	0,16
K %	2,2 à 3,0	2,35
Ca %	1,0 à 2,0	1,10
Mg %	0,25 à 0,40	0,30 à 0,35
S %	0,10 à 0,30	-
Fe ppm	50 à 200	100 à 125
Mn ppm	50 à 200	80 à 200
Zn ppm	10 à 30	30
B ppm	40 à 100	30 à 50
Cu ppm	20 à ?	8 à 12

L'influence de l'apport d'azote sur la teneur des éléments dans les feuilles est le plus souvent conforme aux informations de la littérature. L'apport de sulfate d'ammoniaque a influencé la nutrition des arbres (photos 1, 2 et 3). On met en évidence une corrélation hautement significative entre la teneur de chacun des éléments dans les feuilles et les doses d'azote, positive pour les éléments N, Mg, S, Fe, Mn, Zn, négative pour les éléments P, K, B, Cl et Cu ; seule la teneur de l'élément Ca dans les feuilles n'est pas significativement influencée par l'apport d'azote. La régression curvilinéaire (figures 3 et 4) est significativement supérieure à la régression linéaire pour les éléments N, S, Mn et B dans les feuilles. Pour les autres éléments, les deux régressions sont statistiquement équivalentes, mais le coefficient de régression de la courbe est plus élevé que celui de la droite.

E. Malavolta (1972) signale lui aussi l'effet favorable des engrais azotés sur la teneur de cet élément dans les feuilles. R. Bénac (1966) observe que les caféiers qui reçoivent du sulfate d'ammoniaque sont significativement plus riches en azote surtout aux époques de l'année où les teneurs sont à leur maximum, c'est-à-dire un à deux mois après la floraison

et pendant la période de mûrissement des fruits.

On remarque donc que, sous l'influence de l'engrais azoté, la teneur en azote augmente et la teneur en potassium diminue dans les feuilles des caféiers comme dans le sol (zone d'application). En revanche, la teneur en magnésium augmente dans les feuilles tandis qu'elle diminue dans le sol. On retrouve ici une manifestation de l'antagonisme bien connu entre le potassium et le magnésium dans la nutrition de la plante, l'assimilation du magnésium augmentant, malgré l'appauvrissement du sol, lorsque l'assimilation du potassium diminue. La teneur en zinc augmente également dans les feuilles de caféiers (accroissement significatif pour les trois doses les plus fortes d'azote) à la suite de l'apport de sulfate d'ammoniaque, alors qu'elle diminue dans le sol. Ceci résulte sans doute de l'amélioration de la solubilité et de l'assimilabilité du zinc induite par l'acidification du sol provoquée par l'apport de sulfate d'ammoniaque. A. Loué (1986) signale aussi l'influence de l'apport d'azote, négative sur l'absorption du bore, positive sur l'absorption du zinc. D'après cet auteur, le pH du sol le plus favorable à l'assimilation du zinc est de 4. D'après H.P. Haag *et al.* (1967), l'assimilation du zinc serait maximale pour un pH égal à 5. Dans l'essai de Foubot, la teneur des feuilles en zinc est maximale pour un apport de 400 kg de N/ha, traitement où le pH est de 5,4.

L'apport d'engrais azoté n'a pas influencé la teneur du phosphore dans le sol mais l'a diminuée dans les feuilles ; il a diminué la teneur du calcium dans le sol, sans l'influencer de façon significative dans les feuilles des caféiers.

Par rapport aux normes du Kenya et du Kivu, les teneurs sont pratiquement toujours normales ou élevées, sauf pour le manganèse chez le témoin et pour le zinc et le bore dans tous les traitements.

2.1.2.4. Productions

Dans le tableau 6 sont inscrites les récoltes des différents traitements.

Tableau 6. Productions de café marchand en kg/ha/an.

traitement	année								années 2 à 8	
	1	2	3	4	5	6	7	8	moyenne	% de N0
N0	871	555 c	248 c	53 d	268 d	93 c	10 f	583 c	259 d	100
N1	844	1 061 ab	563 c	277 c	524 cd	599 b	121 e	1 330 b	639 c	247
N2	867	1 287 a	1 190 b	869 b	959 ab	1 418 a	272 d	2 573 a	1 224 b	473
N3	909	1 210 a	1 682 a	1 872 a	1 100 a	1 734 a	555 a	2 828 a	1 569 a	606
N4	1 049	1 150 ab	1 784 a	1 884 a	845 abc	1 699 a	483 b	2 426 a	1 467 a	566
N5	872	825 bc	1 504 ab	1 821 a	640 bcd	1 493 a	375 c	2 551 a	1 316 b	508
CV %		33	29	20	43	22	38	27	14	

N.B. : test de Keuls-Newman, les lettres différent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant).

La première année n'a pas été prise en compte pour le calcul des productions moyennes ; l'épandage d'engrais a en effet été exécuté après la période de floraison. L'analyse statistique des rendements moyens de sept années montre que tous les traitements sont significativement supérieurs au témoin sans engrais. Ce résultat s'observe dès la deuxième année d'épandage (à l'exception du traitement N5) et, ensuite, pour tous les

cumuls des années ultérieures.

Pour les sept récoltes, la courbe de réponse aux doses d'azote (N en kg/ha) a été calculée ; elle est hautement significative. La formule de la courbe est :

$$Y = 383 + 6,801 X - 0,0087 X^2$$

Bien que le sol soit naturellement bien pourvu en azote total, l'absence de fertilisation azotée se traduit par des récoltes médiocres et par la disparition progressive et rapide d'un nombre d'arbres important. Dans les conditions de l'essai, et notamment pour une caféière exposée au plein ensoleillement, la courbe donne une production moyenne annuelle calculée de 383 kg de café marchand/ha sans engrais azoté. La dose d'azote qui entraîne le rendement maximal est importante : 391 kg d'azote/ha (1 862 kg de sulfate d'ammoniaque ou 850 kg d'urée) et porte la production à 1 712 kg de café marchand/ha/an.

Des doses d'azote d'un niveau semblable ont été calculées par plusieurs auteurs. V.H.E. Aguilera (3) cite un rendement maximal pour 390 kg d'azote dans un essai réalisé au Salvador.

2.1.2.5. Calcul de rentabilité

Lors de l'étude de la rentabilité des engrais, il faut tenir compte du prix de vente du café, du prix d'achat de l'engrais, des frais de main-d'oeuvre (épandage de l'engrais, récolte du surplus de production), et d'usinage. Pour les valeurs données ci-après, le prix de l'azote a été fixé à 175 F/kg (80 500 F/t d'urée ; F = F CFA ; 1000 F CFA = 20 FF = 4 US \$) et le coût de l'épandage à 5 F par kilo d'azote, les frais de cueillette et de traitement du café respectivement à 100 F et 25 F/kg de café marchand. L'analyse économique a été faite à partir des formules suivantes, données par J. Snoeck (1978).

Bénéfice dû à l'engrais : $(PY - PR)dy - PX.dx - K$

Rapport recette marginale/coût marginal :

$$Rm/Cm = (PY - PR)dy/PX.dx$$

où PY : prix de vente du café marchand ;

PR : prix de la récolte et de l'usinage ;

dy : supplément de récolte dû à l'engrais ;

PX : prix de l'engrais, comprenant les frais de transport et d'épandage ;

dx : quantité d'engrais apportée ;

K : frais fixes représentant l'amortissement des engrais épandus dans le jeune âge, avant l'entrée en production des caféiers.

Doses optimales pour un prix de vente (PY) du kilo de café à 200 ou à 400 F CFA :

	200 F CFA	400 F CFA
N kg/ha/an	250	350
urée kg/ha/an	543	760
sulfate d'ammoniaque kg/ha/an	1 190	1 665
production optimale, café marchand kg/ha	1 548	1 700
bénéfice annuel F CFA/ha	42 000	300 000

Des doses d'azote d'un niveau semblable sont préconisées dans plusieurs pays. P.K. Mathew (1971) cite notamment des doses qui se chiffrent à 240 kg de N/ha en Tanzanie, 412 kg en Hawaï et 360 kg au Porto Rico. Ailleurs, P. Mathew (1971) et J.G. Geus (1969) citent des doses de 100 à 150 kg de N/ha dans divers pays.

Sur le type de sol de Foubot et dans les conditions d'ensoleillement qui y règnent, l'apport d'engrais azoté est absolument indispensable. En l'absence de toute fertilisation, non seulement les productions sont très faibles (383 kg de café marchand/ha/an), mais on observe également un taux important de mortalité des arbres (36 % après 10 ans dans les parcelles sans engrais, 6 % dans les parcelles avec 52,5 kg d'azote, 4 ou 5 % dans les parcelles qui ont reçu des doses plus élevées).

Bien que l'essai ait été réalisé en utilisant le sulfate d'ammoniaque comme source d'azote, l'urée doit lui être préférée, le coût de l'unité d'azote et de son transport étant moins élevé. Par ailleurs, l'urée acidifie moins rapidement le sol que le sulfate d'ammoniaque.

2.1.3. Arrière-effet de l'engrais

Après huit années de fertilisation, tout apport d'engrais a été arrêté. Les caféiers ont alors été recépés à blanc. Quelques observations ont été effectuées au cours des années suivantes.

2.1.3.1. Analyses de sol

Des échantillons de sol ont été prélevés après quatre années d'absence de fertilisation, pour les seuls traitements N1, N2 et N3, dans la zone où les caféiers avaient été fertilisés (sous la jupe des caféiers) et en dehors de cette zone (au milieu des interlignes). Les échantillons ont été regroupés en un seul échantillon composite par zone de prélèvement et par traitement. Aucune analyse statistique des données n'est donc possible. L'analyse des échantillons a été faite par le laboratoire du CIRAD à Montpellier (tableau 7).

Tableau 7. Caractéristiques chimiques du sol dans les parcelles des traitements N1, N2 et N3.

	traitement	N ‰	pH	K még %	Ca még %	Mg még %	S még %	Mg/K	Zn ppm	Mn ppm	Cu ppm	Fe ppm	B ppm
(1)	N1 : 52,5	5,09	6,15	0,55	14,10	3,48	18,1	6,4	2,38				
	N2 : 105	5,53	5,90	0,45	12,91	2,82	16,2	6,2	2,22				
	N3 : 210	6,01	5,65	0,36	10,95	2,27	13,6	6,2	2,06				
(2)	N1 : 52,5	4,61	6,70	0,79	18,04	4,82	23,8	6,1	4,10	7,15	6,02	80	0,31
	N2 : 105	4,59	6,00	0,36	13,49	2,83	16,8	7,9	2,74	8,10	4,62	101	0,21
	N3 : 210	4,98	5,50	0,30	8,64	1,86	11,0	6,2	2,64	9,95	3,99	148	0,22
(3)	N1 : 52,5	4,38	6,50	0,75	15,09	3,60	19,6	4,8	4,37	10,36	5,76	93	0,28
	N2 : 105	4,58	6,40	0,57	16,81	4,32	21,8	7,6	4,27	5,89	5,52	79	0,18
	N3 : 210	4,19	6,30	0,61	16,66	4,33	21,7	7,1	3,80	6,43	3,92	91	0,23

(1) zone d'épandage, après huit années d'épandage ;

(2) zone d'épandage, quatre années après l'arrêt de la fertilisation ;

(3) hors zone d'épandage, quatre années après l'arrêt de la fertilisation.

Après quatre années sans fertilisation, la teneur du sol en azote a diminué dans la zone d'épandage, mais elle reste légèrement supérieure à celle observée dans les interlignes. En ce qui concerne les bases échangeables, elles ont quelque peu augmenté dans le traitement à dose faible d'azote (N1), et sont même supérieures aux niveaux observés dans les interlignes. Elles n'ont guère évolué dans le traitement intermédiaire, mais elles

y sont inférieures aux niveaux des interlignes. Elles ont en revanche continué à diminuer et sont parfois inférieures aux niveaux des interlignes dans le traitement qui avait reçu la dose d'azote la plus élevée (N3).

Après quatre années sans épandage, la teneur du sol en zinc et en cuivre est d'autant plus faible que l'apport d'azote fut important. Ceci s'observe dans les interlignes, mais surtout dans la zone d'épandage. La teneur du sol en bore est également plus faible pour les deux doses fortes d'azote que pour la dose faible, dans les interlignes comme dans la zone d'épandage. La teneur du sol en fer a augmenté en fonction des doses d'azote, mais ceci ne s'observe que dans la zone d'épandage.

2.1.3.2. Croissance des rejets

Des observations ont été faites pour étudier l'influence de la fertilisation azotée antérieure sur les résultats de la régénération. Les souches des caféiers ont été observées dix mois après le recépage, soit un an après le dernier apport d'engrais.

Tableau 8. Données d'observation des rejets âgés de 10 mois.

traitement	pour-cent caféiers sans rejet	nombre rejets / parcelle	nombre moyen rejets / caféier vivant	hauteur moyenne (cm) des rejets	nombre de primaires / caféier vivant
N0	36,0 a	33,8 b	3,40 b	69 e	29,3 d
N1	6,0 b	57,6 a	3,99 a	95 d	56,5 c
N2	4,0 b	58,5 a	3,97 a	105 c	66,5 b
N3	5,3 b	58,1 a	3,99 a	118 b	72,8 b
N4	4,0 b	58,0 a	3,97 a	129 a	82,5 a
N5	4,0 b	59,0 a	4,00 a	136 a	87,9 a
sign.	--	++ ---	++	++	++
CV %	40	10	6	8	13

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
- sign., niveau de signification de l'analyse de variance (++, -- : P = 0,01).

Les caféiers sans rejet incluent les caféiers morts au cours des douze années qui se sont écoulées entre la plantation et le recépage. Seules les parcelles qui n'ont jamais été fertilisées ont un nombre important de caféiers disparus (36 %). Après la régénération, les quatre tiges de remplacement sélectionnées parmi les rejets ont facilement été obtenues dans toutes les parcelles antérieurement fertilisées. Dans les parcelles témoins en revanche, bon nombre de souches en vie ont donné naissance à moins de quatre rejets.

Dix mois après le recépage, la croissance et la vigueur des tiges de remplacement (hauteur des jeunes tiges, nombre de rejets par parcelle ou par caféier vivant, nombre de primaires par caféier vivant) sont, dans les parcelles antérieurement fertilisées à l'azote, significativement supérieures à celles des parcelles témoins (tableau 8). Il existe une régression curvilinéaire de la hauteur et du nombre de primaires des jeunes tiges sur les doses d'azote antérieures (figure 4). Il existe donc un arrière-effet de l'apport d'azote dû soit à une teneur en azote plus élevée dans le sol (tableau 3) soit à une plus grande vigueur des souches des caféiers ou à un meilleur développement du système racinaire.

2.1.3.3. Productions

L'essai s'est poursuivi pendant trois ans sans fertilisation à partir du recépage des caféiers. Aucune récolte n'a été produite la première année. Une petite récolte a été enregistrée l'année suivante et une forte récolte en troisième année. Les productions sont inscrites dans le tableau 9.

Tableau 9. Production après deux et trois ans sans fertilisation.

traitement	café marchand en kg/ha				cerises en kg/caféier moyenne 3 ans
	2 ^e année	3 ^e année	moyenne 2 ans	moyenne 3 ans	
N0	8 d	253 e	130 e	87 e	0,670 e
N1	120 c	1 265 d	693 d	462 d	2,433 d
N2	194 bc	1 753 c	974 c	649 c	3,348 c
N3	270 b	2 300 b	1 285 b	857 b	4,478 b
N4	287 b	2 430 b	1 359 b	906 b	4,672 b
N5	434 a	2 944 a	1 690 a	1 127 a	5,809 a
sign.	++	++	++	++	++
lin.	++	++	++	++	++
curv.	++	++	++	++	++
CV %	50	23	23	23	23

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
 - sign., niveau de signification de l'analyse de variance ;
 - lin., niveau de signification de la régression linéaire ;
 - curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;
 - niveau ++ : P = 0,01.

L'arrière-effet des doses d'azote reste très marqué et hautement significatif trois ans après l'arrêt des épandages. En quatrième année, la récolte a été insignifiante. Pour la production moyenne des deux années, tous les traitements sont significativement supérieurs au témoin et la réponse des caféiers aux doses d'azote antérieures est de type curvilinéaire ($r = 0,86$, hautement significatif). La formule de réponse est la suivante :
 Production (café marchand kg/ha) = $230 + 3,3089 (\text{kg N/ha}) - 0,0031 (\text{kg N/ha})^2$.

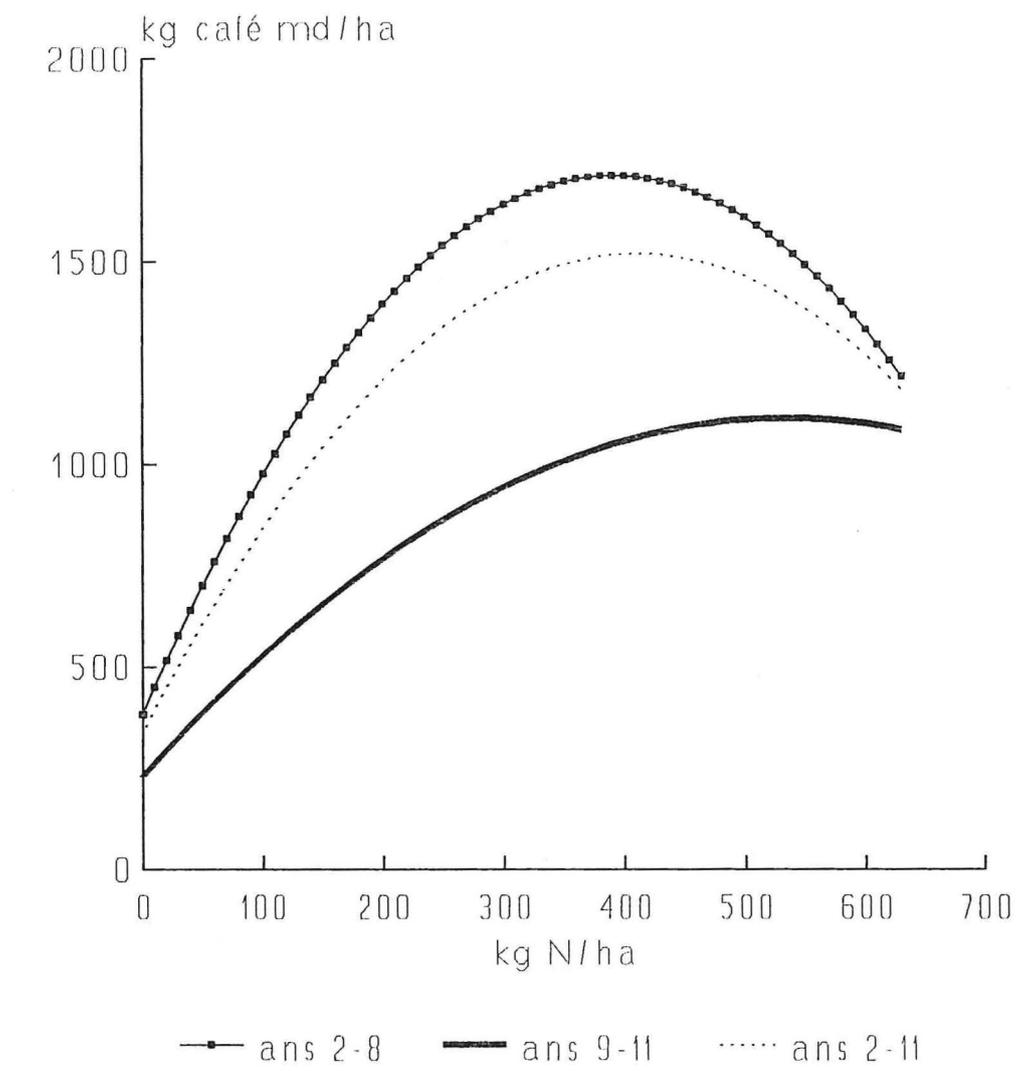
Le maximum de production (1 113 kg) est obtenu pour une dose antérieure de 534 kg d'azote/ha/an. On remarque que, pour l'arrière-effet, le sommet de la courbe de réponse (pour 534 kg de N) est décalée vers une dose plus forte que pour l'effet en période d'épandage (pour 391 kg de N), (figure 5). Ceci est certainement dû à la diminution progressive de l'azote dans le sol, les teneurs trop élevées en période d'épandage (pour des doses supérieures à 391 kg de N) s'abaissant progressivement aux niveaux les plus favorables.

Il existe une corrélation hautement significative ($r = 0,93$) entre la hauteur des jeunes tiges âgées de dix mois et les trois premières récoltes, ainsi qu'entre leur nombre de primaires et ces récoltes ($r = 0,91$).

Des résultats semblables sont obtenus lorsqu'on s'intéresse aux productions des seuls caféiers en vie. L'arrière-effet de l'azote se manifeste donc non seulement sur la production à l'unité de surface, mais aussi sur celle de chaque caféier.

Si l'apport d'azote est interrompu, on doit s'attendre à une chute presque complète des

Productions (effet du sulfate d'ammoniaque)



Java

Figure 5. Courbes des productions en fonction des doses d'azote.

rendements après trois années de production, ou dès qu'une forte récolte aura épuisé les arbres, entraînant leur dégénérescence irrémédiable.

2.1.4. Productions pendant la période de dix ans

Tableau 10. Production de café marchand en kg/ha/an.

traitement	2 ^e à 8 ^e année (7 ans)		9 ^e à 11 ^e année (3 ans)	moyenne 10 ans
	engrais		sans engrais	
	production		production	production
N0	259 d		87 e	207. d
N1	639 c		462 d	586 c
N2	1 224 b		649 c	1 052 b
N3	1 569 a		857 b	1 355 a
N4	1 467 a		906 b	1 299 a
N5	1 316 b		1 127 a	1 259 a
sign.	++		++	++
lin.	++		++	++
curv.	++		++	++
CV %				12

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification de l'analyse de variance ;
- lin., niveau de signification de la régression linéaire ;
- curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;
- niveau ++ : P = 0,01.

L'analyse statistique des rendements moyens des dix années montre que tous les traitements sont significativement supérieurs au témoin sans engrais (tableau 10). La courbe de réponse aux doses d'azote a été calculée ; elle est hautement significative ($r = 0,88$). La formule de la courbe (figure 5) est la suivante :

$$\text{Production (café marchand kg/ha)} = 337 + 5,7533 (\text{kg N/ha}) - 0,0070 (\text{kg N/ha})^2.$$

La production moyenne annuelle calculée est de 337 kg de café marchand/ha en l'absence d'engrais azoté. La dose d'azote qui, appliquée pendant huit ans, a entraîné le rendement moyen maximal au cours des dix années est de 411 kg d'azote/ha (1 957 kg de sulfate d'ammoniaque ou 893 kg d'urée) ; elle a porté la production à 1 519 kg de café marchand/ha/an au cours des dix années.

2.2. Essai de doses NPK

2.2.1. Matériel et méthodes

Les parcelles de cet essai sont identiques à celles de l'essai précédent et les caféiers sont conduits de la même façon. L'essai est établi suivant un dispositif factoriel 3^3 à deux répétitions. L'azote est apporté sous forme de sulfate d'ammoniaque (21 % N), le phosphore sous forme de phosphate bicalcique (38 % P_2O_5 et 30 % CaO) et le potassium sous forme de chlorure de potassium (60 % K_2O). Les traitements sont constitués par toutes les combinaisons (27) entre les trois éléments, chacun d'eux étant présent à trois niveaux. Les engrais sont apportés quatre fois par an. Les doses d'engrais par hectare/an sont les suivantes :

élément kg/ha/an				
	dose 1	dose 2	dose 3	
N	105	210	630	(N)
P	0	100	200	(P ₂ O ₅)
K	0	100	200	(K ₂ O)

engrais kg/ha/an				
	dose 1	dose 2	dose 3	
N	500	1000	3000	(sulfate d'ammoniaque)
P	0	250	500	(phosphate bicalcique)
K	0	166,7	333,5	(chlorure de potassium)

Les observations sont les mêmes que celles de l'essai précédent.

2.2.2. Résultats

2.2.2.1. Evolution chimique du sol en dehors de la zone d'épandage

Après quatre années d'épandage d'engrais, des échantillons de sol ont été prélevés (0 - 20 cm de profondeur) à mi-distance entre les caféiers, dans la ligne, soit à 1 m des troncs. Ils ont été analysés par le laboratoire de l'IRA à Ekona.

Tableau 11. Caractéristiques du sol situé en dehors de la zone d'application des engrais.

traitement	N tot ‰	pH	P ass. ppm	K még %	Ca még %	Mg még %	S még %	CEC még %	Mg/K	M.O. %
N1	4,9	6,0	35	0,88	17,4	4,16	22,4	29	4,7	10,9
N2	4,8	5,9	37	0,96	18,2	4,63	23,8	29	4,8	11,0
N3	4,8	5,9	40	0,99	17,3	4,22	23,5	30	4,3	10,7
P0	4,9	5,9	33	0,90	18,0	4,37	23,4	30	4,9	10,9
P1	4,6	5,9	39	0,98	16,8	4,41	22,2	29	4,5	10,9
P2	5,1	6,0	39	0,95	18,1	4,23	23,3	28	4,5	10,8
K0	4,8	6,0	37	0,78	17,5	4,38	22,7	30	5,6	10,8
K1	5,1	5,9	37	1,05	18,1	4,36	23,5	29	4,2	10,8
K2	4,6	5,9	37	1,00	17,3	4,27	22,6	28	4,3	11,0

N.B. : P assimilable, méthode Kurtz-Bray.

Comme dans l'essai précédent, on constate que les caractéristiques du sol n'ont jamais de valeurs inférieures à celles qui sont considérées comme normales en culture caféière (tableau 11). La plupart d'entre elles (P, CEC, K, Ca, Mg) sont plus élevées que ces normes et caractérisent un sol fertile.

Aux emplacements des prélèvements, le sol n'a guère évolué sous l'influence des traitements ; l'analyse statistique ne révèle aucun effet significatif. L'apport de chlorure de potassium diminue cependant de façon hautement significative le rapport Mg/K qui se maintient toutefois à un très bon niveau. La teneur en potassium a tendance à augmenter ($P = 0,06$) sous l'influence de l'apport de chlorure de potassium. La teneur en phosphore a tendance à augmenter ($P = 0,09$) sous l'influence de l'apport de phosphate bicalcique.

2.2.2.2. Evolution chimique du sol dans la zone d'épandage

Après huit années d'apport des engrais, des échantillons de sol ont été prélevés sous la jupe des caféiers, dans la zone où l'engrais a été appliqué. Un échantillon de sol de chaque parcelle a été analysé par le laboratoire du CIRAD à Montpellier.

Tableau 12. Caractéristiques du sol situé dans la zone d'application de l'engrais.

traitement	N tot. ‰	pH	P ass. ppm	K méq %	Ca méq %	Mg méq %	S méq %	Mg/K
N1	5,50	6,21 a	437	1,46 a	17,75 a	3,38 a	22,7 a	2,32 a
N2	5,65	5,76 b	469	1,16 b	14,99 b	2,77 b	19,0 b	2,38 a
N3	5,61	5,21 c	469	0,84 c	7,86 c	1,68 c	10,5 c	2,00 b
sign.	0	--	0	--	--	--	--	0
lin.	0	--	0	--	--	--	--	0
curv.	0	--	0	--	--	--	--	0
P0	5,58	5,58 b	353 b	1,12	11,61 b	2,53	15,3 b	2,26
P1	5,44	5,71 b	486 a	1,15	13,72 ab	2,61	17,6 ab	2,27
P2	5,74	5,89 a	536 a	1,20	15,27 a	2,69	19,2 a	2,24
sign.	0	++	++	0	++	0	++	0
lin.	0	++	++	0	+	0	++	0
curv.	0	0	++	0	0	0	0	0
K0	5,58	5,70	451	1,01 b	13,77	2,81	17,7	2,78 a
K1	5,61	5,77	448	1,17 a	13,96	2,69	17,9	2,30 b
K2	5,57	5,70	475	1,29 a	12,88	2,34	16,6	1,81 c
sign.	0	0	0	++	0	0	0	--
lin.	0	0	0	+	0	0	0	--
curv.	0	0	0	0	0	0	0	--
CV %	19	4	19	16	23	30	22	32
inter.	0	NP x	0	NK x	0	0	0	0

N.B. : - P assimilable, méthode Olsen-Dabin ;

- bases échangeables extraites à l'acétate d'ammonium ;
- test de Keuls-Newman, les lettres différent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;
- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;
- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;
- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;
- niveaux +, -, x : P = 0,05 ; ++, --, xx : P = 0,01.

Les caractéristiques du sol sont assez semblables à celles du champ du premier essai, avec cependant des teneurs en éléments encore plus importantes (tableau 12 et figure 6). Le rapport Mg/K est moins élevé.

Par rapport aux niveaux observés dans le traitement à la dose faible, les doses fortes de sulfate d'ammoniaque ont entraîné une diminution hautement significative du pH du sol, de sa teneur en potassium, en calcium et en magnésium et de la somme des bases échangeables. L'interaction NP indique que la différence entre le pH des traitements N2 et N3 n'est pas significative en présence de la dose forte de phosphate bicalcique. L'interaction NK indique que l'effet dépressif de l'apport d'azote sur la teneur du sol en potassium n'atteint un niveau significatif qu'en présence d'un apport de chlorure de potassium.

Interaction NP (pH sol)

	P0	P1	P2
N1	6,18	6,25	6,19
N2	5,64	5,80	5,83
N3	4,93	5,07	5,64

Interaction NK (K sol)

	K0	K1	K2
N1	1,21	1,45	1,74
N2	1,00	1,15	1,31
N3	0,81	0,91	0,81

L'apport de phosphate bicalcique a entraîné une augmentation hautement significative de la teneur du sol en phosphore et en calcium. La dose forte de phosphate bicalcique a augmenté le pH, mais cet effet n'est significatif que pour le traitement P2 vis-à-vis de P1 et de P0, et seulement en présence de la dose forte d'azote (interaction NP).

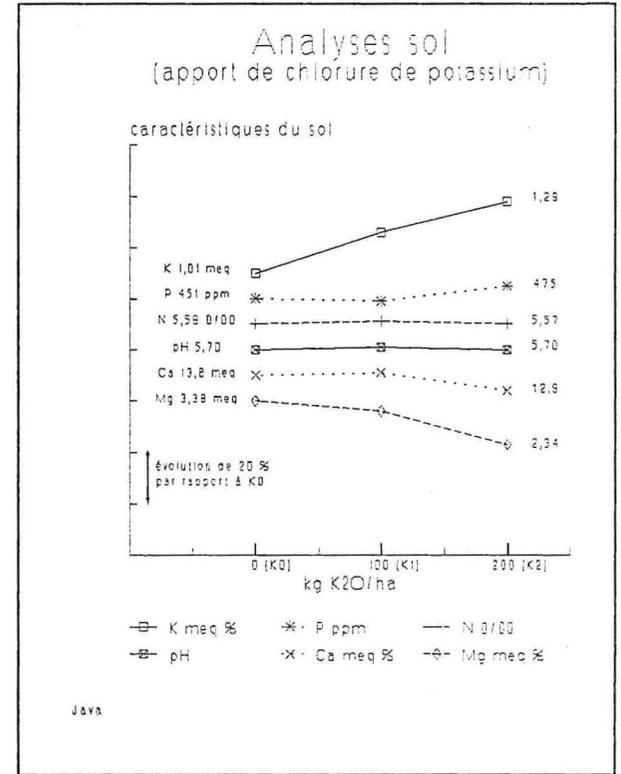
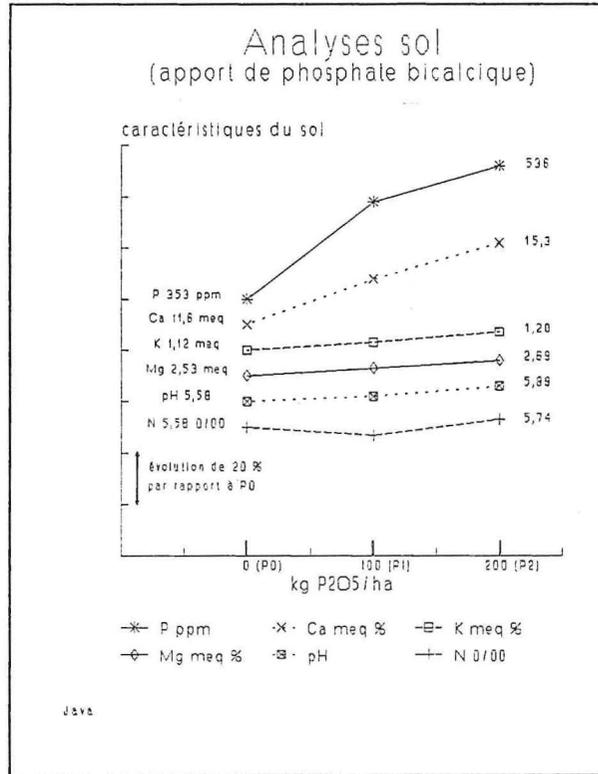
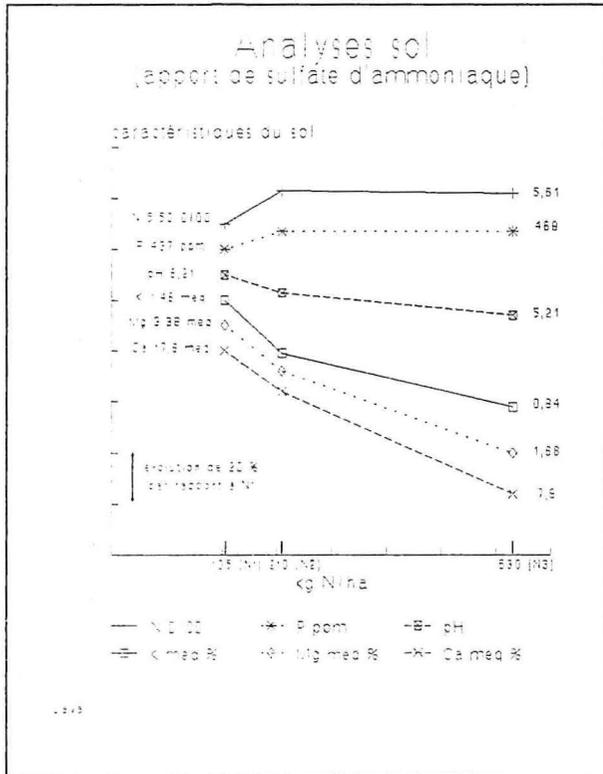


Figure 6. Evolution des caractéristiques du sol en pourcentage des témoins N1, P0, K0.
Niveau de signification * : toutes les lignes.

L'apport de chlorure de potassium a entraîné une augmentation hautement significative de la teneur du sol en potassium ; l'interaction NK indique toutefois que cet effet n'est significatif qu'en l'absence d'apport d'azote dont l'action atténuée fortement celle de l'engrais potassique. On y observe une diminution de la teneur en magnésium (-4,3 % et -16,7 %), mais elle n'est pas significative. Le rapport Mg/K diminue de façon hautement significative et linéaire lorsqu'on augmente les doses d'engrais ; il est de 2,78 chez le témoin, de 2,30 pour la première dose et de 1,81 pour la deuxième. Les autres caractéristiques du sol n'ont pas été significativement modifiées par l'apport de chlorure de potassium.

Quand on compare ces données aux normes signalées plus haut, on observe que tous les éléments chimiques sont présents dans tous les traitements à des niveaux plus que satisfaisants. Seul le pH est légèrement inférieur à la normale dans le traitement N3. La teneur en matière organique est normale.

2.2.2.3. Analyses foliaires

Des échantillons de feuilles de caféiers ont été prélevés pour analyse, à différents stades phénologiques, six, sept et huit ans après la mise en place de l'essai. Ils ont été analysés par le laboratoire du CIRAD. Les résultats (moyenne des trois prélèvements) figurent dans le tableau 13.

Tableau 13. Résultats des analyses foliaires.

traitement	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	B ppm	Cl ppm	Cu ppm
N1	2,973 c	0,163 a	2,960 a	1,095 a	0,350 c	0,226 b	290	60,4 b	8,6 b	27,9 a	2850 a	16,3 a
N2	3,084 b	0,157 b	2,831 b	1,051 b	0,378 b	0,234 b	297	65,2 b	10,1 a	22,9 b	1790 b	10,1 b
N3	3,211 a	0,149 c	2,691 c	0,995 c	0,399 a	0,245 a	307	84,1 a	9,2 b	19,9 c	930 c	9,6 b
sign.	xx	xx	xx	xx	xx	xx	0	xx	xx	xx	xx	xx
lin.	xx	xx	xx	xx	xx	xx	0	xx	0	xx	xx	xx
curv.	xx	xx	xx	xx	xx	xx	0	xx	xx	xx	xx	xx
P0	3,097	0,152 b	2,784	1,013 b	0,383	0,235	315	69,2	9,2	23,8	1740 b	12,4
P1	3,093	0,158 a	2,861	1,048 a	0,372	0,239	288	69,4	9,4	23,4	1850 ab	11,8
P2	3,078	0,159 a	2,837	1,079 a	0,372	0,230	292	71,2	9,2	23,4	1990 a	11,8
sign.	0	xx	0	xx	0	0	0	0	0	0	x	0
lin.	0	xx	0	xx	0	0	x	0	0	0	0	0
curv.	0	x	0	x	0	0	x	0	0	0	0	0
K0	3,065	0,157	2,720 b	1,089 a	0,398 a	0,240	286	66,7	9,3	23,7	650 c	12,2
K	3,101	0,156	2,853 a	1,022 b	0,366 b	0,231	302	71,1	9,1	23,3	2220 b	12,5
K2	3,102	0,156	2,909 a	1,030 b	0,363 b	0,233	306	71,9	9,4	23,6	2700 a	11,3
sign.	0	0	xx	xx	xx	0	0	0	0	0	xx	0
lin.	0	0	xx	x	xx	0	0	0	0	0	xx	0
curv.	0	0	xx	x	xx	0	0	0	0	0	xx	0
inter.	0	NP x	0	NK x	0	NK x	0	0	NK xx	0		
CV %	3	3	4	5	6	5	12	10	13	10	16	22

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;

- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;

- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;

- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;

- niveau x : P = 0,05 ; xx : P = 0,01.

L'influence des engrais se manifeste de façon hautement significative sur les niveaux de différents éléments dans les feuilles (figure 7).

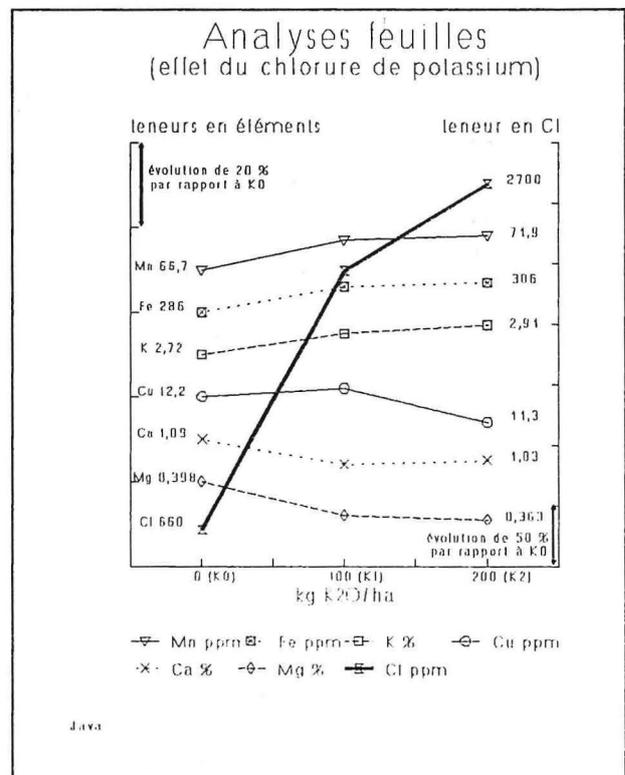
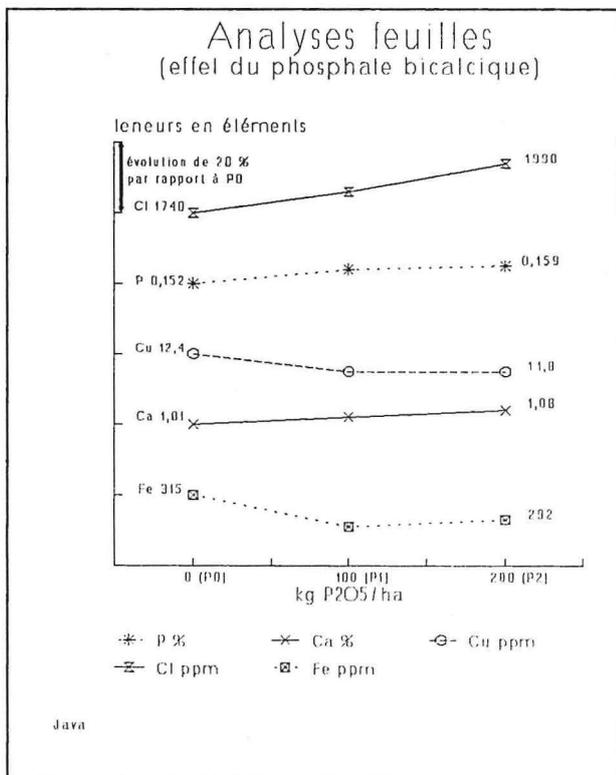
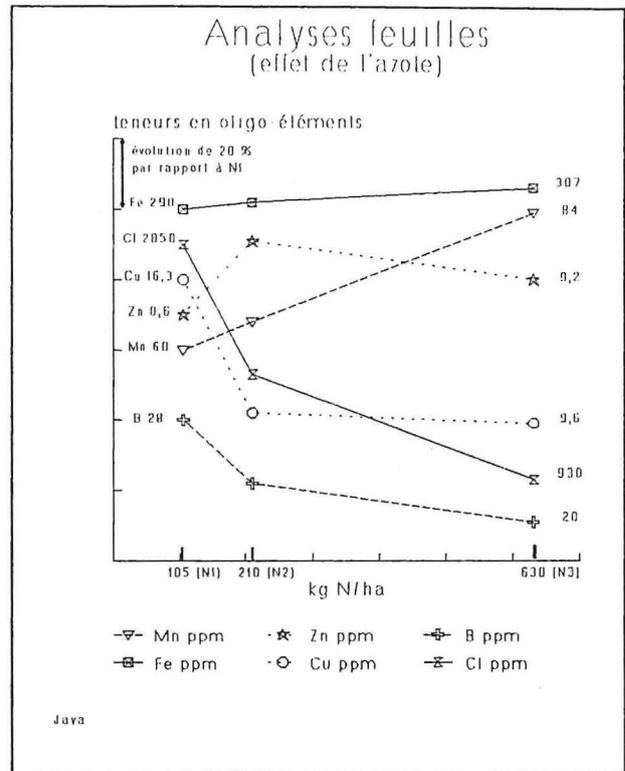
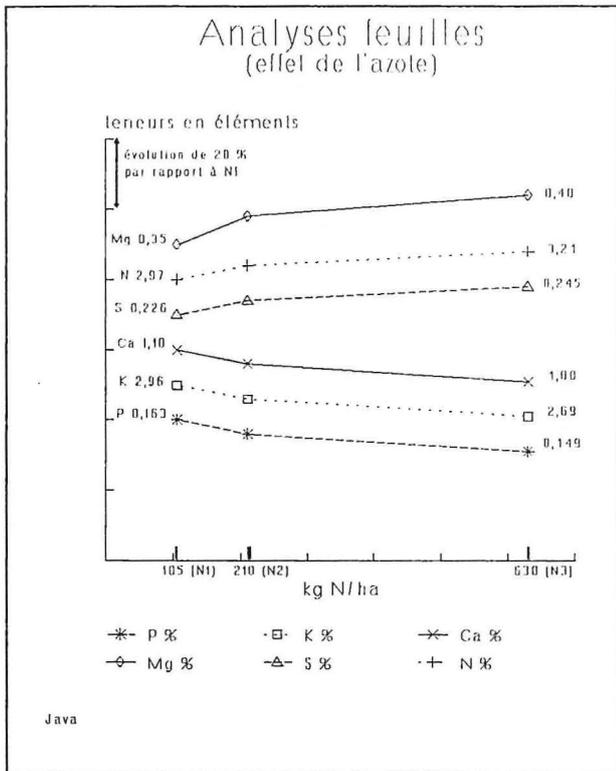


Figure 7. Evolution de la teneur des éléments dans les feuilles en pourcentage des témoins N1, P0, K0. Niveau de signification * : toutes les lignes.

Les doses fortes de sulfate d'ammoniaque entraînent une augmentation de l'azote, du magnésium, du soufre et du manganèse, et une diminution du phosphore, du potassium, du calcium, du bore, du cuivre et surtout du chlore dans les feuilles, par rapport aux valeurs observées dans le traitement avec la dose faible de sulfate d'ammoniaque. Ces observations confirment celles de l'essai précédent. Il existe une interaction significative entre les effets du sulfate d'ammoniaque et du phosphate bicalcique pour la teneur des feuilles en phosphore, et entre l'azote et le potassium pour les teneurs des feuilles en calcium, en soufre et en chlore.

L'apport de phosphate bicalcique entraîne une augmentation du phosphore, du calcium et du chlore. E. Malavolta (1964), au Brésil, avait lui aussi observé l'influence positive de l'apport d'engrais phosphaté sur la teneur des feuilles en phosphore, alors que P.A. Jones (1961), H.C. Pereira (1955), et J.B.D. Robinson (1969), au Kenya, et P. Hiroce (1975), au Brésil, n'avaient pas mis cet effet en évidence. R. Bénac (1966), au Cameroun, signale que la teneur en phosphore des feuilles est plus influencée (négativement) par l'apport d'engrais azoté que (positivement) par celui d'engrais phosphaté. Ces effets opposés sont également vérifiés dans cet essai.

L'apport de chlorure de potassium entraîne une augmentation du potassium et surtout du chlore, et une diminution du calcium et du magnésium. R. Bénac (1967) avait aussi observé l'influence positive de l'apport de potasse sur la teneur en potassium des feuilles et son influence négative sur la teneur en calcium et en magnésium. L'effet positif sur la teneur en potassium avait également été mis en évidence par P. Hiroce (1975) et par E. Malavolta (1964) au Brésil, mais pas par M.A. Gonzales (1977) au Costa Rica. Pour des apports de chlorure de potassium équivalents à ceux des traitements K1 et K2 de l'essai, R.A. Catani (1969) avait observé au Brésil des teneurs foliaires de 4 476 et 4 812 ppm de chlore, alors qu'elles sont de 2 222 et 2 700 ppm dans l'essai de Foubot. A.M.C. Furlani (1976), au Brésil, estime qu'un niveau de 9 400 ppm de chlore dans les feuilles des caféiers n'entraîne pas de symptôme de toxicité.

Interaction NP (P feuilles)				Interaction NK (Ca feuilles)			
	P0	P1	P2		K0	K1	K2
N1	0,16	0,17	0,17	N1	1,14	1,11	1,04
N2	0,15	0,16	0,16	N2	1,09	1,01	1,06
N3	0,15	0,15	0,15	N3	1,04	0,94	1,00

Interaction NK (S feuilles)				Interaction NK (Cl feuilles)			
	K0	K1	K2		K0	K1	K2
N1	0,24	0,22	0,22	N1	900	3500	4100
N2	0,24	0,23	0,23	N2	600	2200	2600
N3	0,25	0,23	0,25	N3	500	1000	1300

Les interactions NP et NK sont peu marquées pour les teneurs des feuilles en phosphore, en calcium et en soufre. Pour la teneur en chlore, l'interaction NK indique que les différences sont relativement moins marquées lorsque le niveau du chlore dans les feuilles est faible, c'est-à-dire entre les trois traitements azotés sans apport de chlorure de potassium, ou entre les trois traitements chlorés avec fort apport de sulfate d'ammoniaque.

Par rapport aux normes habituellement citées dans la littérature, la teneur des différents éléments dans les feuilles est toujours normale ou élevée, sauf pour les oligo-éléments zinc et bore qui, comme dans l'essai précédent, sont toujours déficients.

Dans le champ d'essai, cette déficience ne se manifeste cependant pas par l'apparition de signes de carences ou de déséquilibre dans la croissance végétative des arbres.

2.2.2.4. Productions

Les chiffres de récolte pour les traitements principaux sont rapportés dans le tableau 14.

Tableau 14. Traitements principaux et récoltes de café marchand en kg/ha/an.

traitement	année								années 2 à 8	
	1	2	3	4	5	6	7	8	moy.	% té
N1	1 175	1 252	1 066	574	561	1 408	258	2 903	1 146 b	100
N2	1 225	1 100	1 918	1 372	682	1 366	346	2 707	1 356 a	118
N3	1 119	879	1 755	1 433	555	887	424	2 006	1 134 b	99
sign.		x	xx	xx	0	xx	x	xx	xx	
P0	1 225	942	1 675	1 183	680	1 12	412	2 649	1 250	100
P1	1 096	1 221	1 460	1 170	552	1 246	313	2 590	1 222	98
P2	1 197	1 067	1 605	1 027	566	1 203	303	2 377	1 164	93
sign.		0	0	0	0	0	0	0	0	
K0	1 210	1 140	1 578	1 088	587	1 294	342	2 901	1 276	100
K1	1 169	1 006	1 672	1 180	642	1 186	322	2 396	1 201	94
K2	1 139	1 084	1 489	1 112	569	1 181	364	2 319	1 160	91
sign.		0	0	0	0	0	0	x	0	
inter.		0	0	0	0	0	0	0	0	
CV %		34	35	34	28	33	56	27	17	

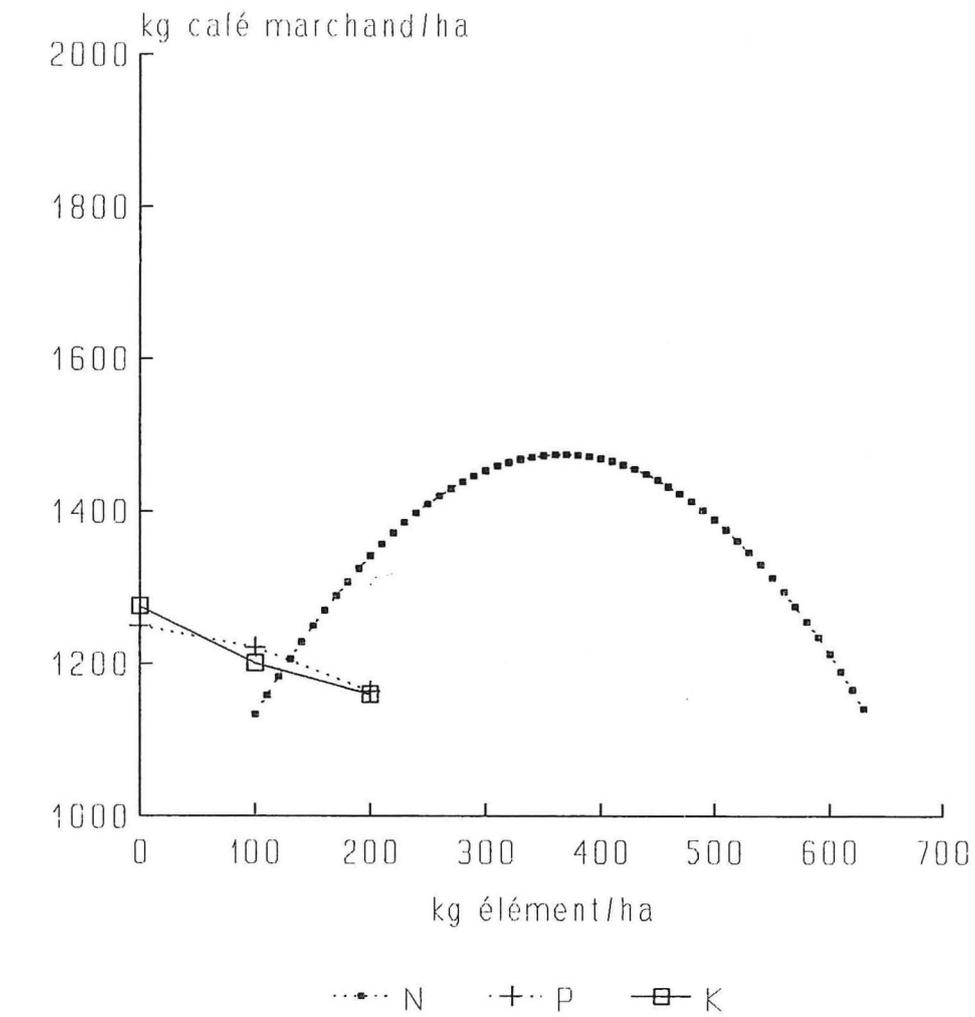
N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
 - sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;
 - inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;
 - niveau x : P = 0,05 ; xx : P = 0,01.

Les récoltes ont été analysées statistiquement. Pour les raisons signalées dans l'étude du premier essai, la première année n'a pas été prise en compte et les chiffres donnés correspondent à la production moyenne de sept années. On observe que l'apport d'azote a un effet significatif sur le rendement. La courbe de régression (figure 8) de la production sur les doses d'azote est significative ; elle montre que le maximum de rendement (1 475 kg de café marchand/ha/an) est obtenu pour une dose de 366 kg d'azote/ha (1 743 kg de sulfate d'ammoniaque).

Lorsqu'on compare les courbes de régression calculées, pour les deux essais (doses d'azote et NPK, figure 11), avec les trois doses d'azote qui leur sont communes, on obtient des résultats assez semblables. Le maximum de rendement est atteint pour une dose de 379 kg d'azote dans le premier essai et pour une dose de 366 kg dans le second. La production du second essai est cependant moins élevée que celle du premier (en moyenne 1 212 kg de café marchand/ha/an, contre 1 370 kg pour les trois doses étudiées), et l'efficacité de l'engrais y est moindre (augmentation de rendement de 18 % contre 28 % entre les doses de 105 kg et de 210 kg d'azote). Cela est peut-être dû aux combinaisons avec P et K.

L'apport de phosphore et de potassium est sans effet significatif sur la production

Productions (effet de N,P,K)



Java

Figure 8. Production en fonction des doses d'engrais.

(figure 10). Les rendements des parcelles fertilisées avec ces éléments sont toutefois légèrement inférieurs à ceux des parcelles à dose nulle, et l'apport de chlorure de potassium a même eu un effet significatif dépressif au cours de la huitième année. Dans d'autres essais de fertilisation sur jeunes caféiers situés dans les mêmes conditions, l'apport de phosphate bicalcique et de chlorure de potassium était également dépressif, parfois de façon significative (1994).

2.2.3. Arrière-effet de l'engrais

Après huit années de fertilisation, tout apport d'engrais a été arrêté. Les caféiers ont alors été recépés à blanc. Quelques observations ont été effectuées au cours des années suivantes.

2.2.3.1. Croissance des rejets

Des observations ont été faites pour étudier l'influence des engrais sur les résultats de la régénération. Les souches des caféiers ont été observées 10 et 22 mois après le recépage, soit un et deux ans après le dernier apport d'engrais (tableau 15).

Tableau 15. Données d'observation des rejets âgés de 10 mois et de 22 mois.

traitement	10 mois		22 mois
	hauteur moyenne des rejets (cm)	hauteur moyenne des rejets (cm)	nombre de primaires /caféier vivant
N1	61 b	145 b	122 b
N2	68 a	157 a	136 a
N3	71 a	161 a	145 a
sign.	xx	x	xx
régr. sign.	curvil. xx	curvil. xx	curvil. xx
P0	71	161	141
P1	64	153	131
P2	65	150	130
sign.	0	0	0
régr. sign.	0	linéaire x	0
K0	66	156	135
K1	68	156	134
K2	67	151	133
sign.	0	0	0
régr. sign.	0	0	0
inter.	0	0	0
CV %	13	10	12

N.B.: - test de Keuls-Newman, les lettres différent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
 - sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;
 - inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;
 - niveau x : P = 0,05 ; xx : P = 0,01.

L'apport antérieur de 210 kg et 630 kg d'azote/ha a amélioré significativement la croissance des rejets (hauteur et nombre de primaires) par rapport à celle des parcelles qui n'ont reçu que 105 kg d'azote/ha. La réponse aux doses d'azote est de type curvilinéaire (figure 9). Le calcul de la régression montre que l'apport de phosphate bicalcique a diminué significativement la hauteur des rejets âgés de 22 mois ; la réponse est de type linéaire (figure 9). L'apport de chlorure de potassium n'a pas eu d'influence sur

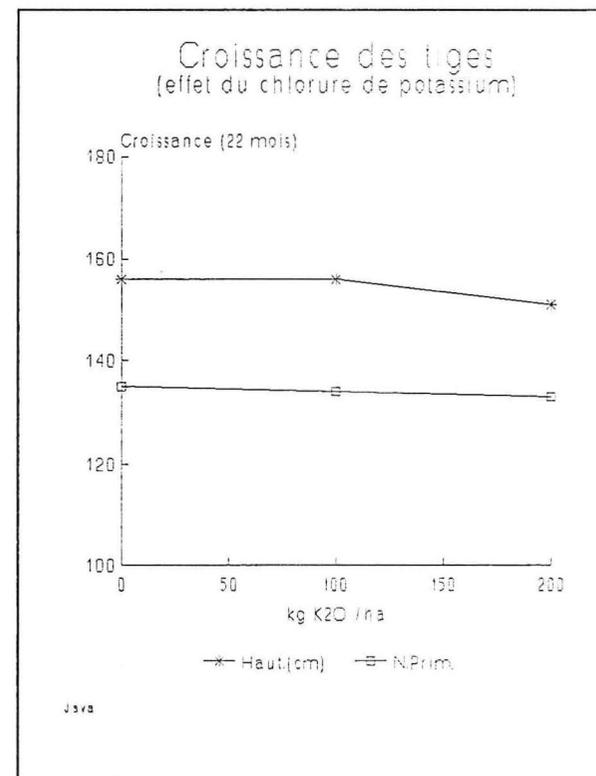
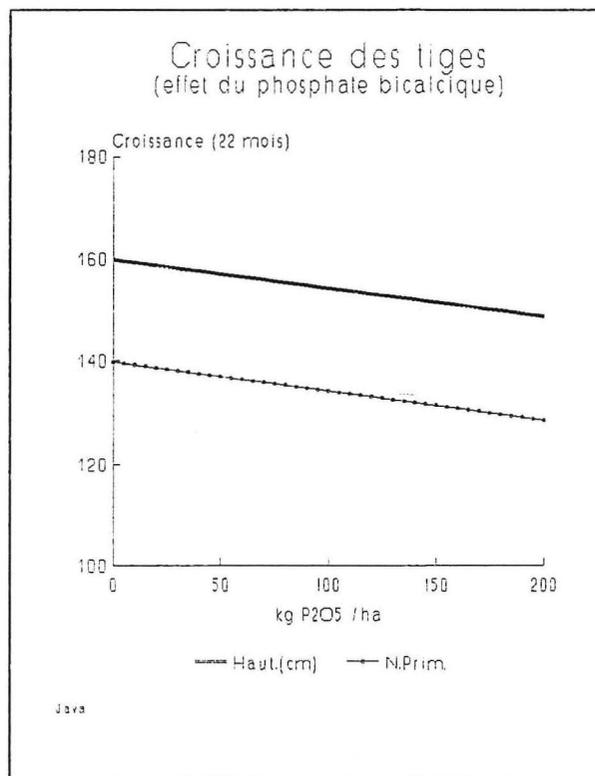
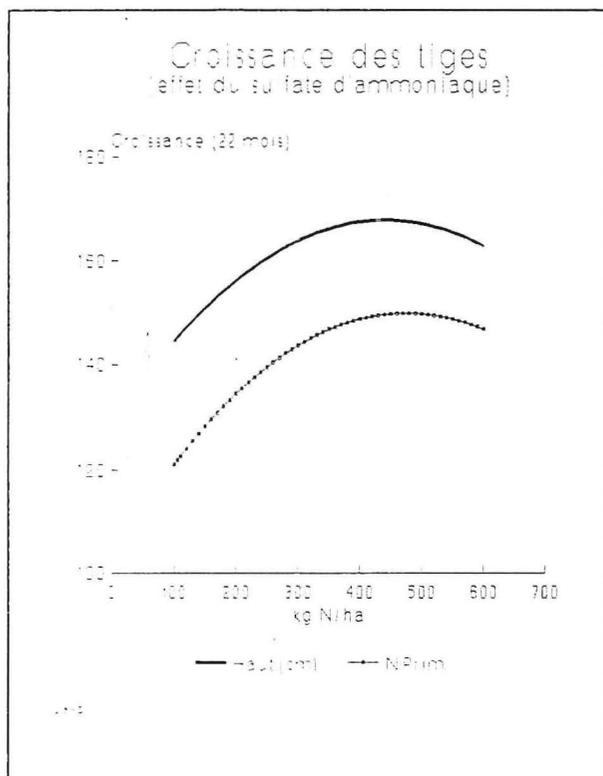


Figure 9. Influence des engrais sur la croissance des tiges.

la croissance des rejets (figure 9). Le pourcentage de caféiers morts est semblable pour tous les traitements ; il est en moyenne de 4 % dans le champ d'essai, quatorze ans après la plantation.

2.2.3.2. Productions après régénération et arrêt des épandages d'engrais

Tableau 16. Productions de café marchand en kg/ha/an après régénération et arrêt des apports d'engrais.

traitement	production essai NPK						prod. e. doses N	prod. e. NPK jeunes caféiers
	année 2	année 3	année 4	années 2 et 3	années 2 à 4	années 1 à 4	années 2 et 3	2 ans
N1	1 289	1 105	349	1 197	914	686	974 c	6 c
N2	1 721	1 144	594	1 432	1 153	865	1 285 b	79 b
N3	1 658	1 402	577	1 530	1 212	911	1 690 a	239 a
sign.	0	0	0	0	0	0	xx	xx
lin.	0	x	0	x	x	x	xx	xx
curv.	0	x	0	0	x	x	xx	xx
P0	1 862	1 178	443	1 520	1 161	871		129
P1	1 422	1 298	619	1 360	1 113	835		96
P2	1 384	1 182	457	1 283	1 008	756		99
sign.	0	0	0	0	0	0		0
lin.	x	0	0	0	0	0		0
curv.	0	0	0	0	0	0		0
K0	1 685	1 378	539	1 531	1 200	900		130 a
K1	1 568	1 233	502	1 400	1 101	826		118 a
K2	1 416	1 047	479	1 231	981	736		76 a
sign.	0	0	0	0	0	0		x
lin.	0	x	0	x	0	0		0
curv.	0	x	0	0	0	0		0
inter.	0	0	0	0	0	0		NP NK
CV %	49	33	77	35	37	37		30

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;
- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;
- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;
- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;
- niveau x : P = 0,05 ; xx : P = 0,01.

Pendant la première année d'interruption des apports d'engrais, la récolte a été nulle suite au recépage intégral des caféiers. Au cours des trois années suivantes, la production dans les traitements qui avaient reçu les deux doses fortes d'azote est plus importante que dans le traitement à dose faible. Dans le test de Keuls, les différences n'apparaissent significatives que pour un seuil de probabilité de 0,10, mais le calcul des régressions montre qu'il existe une régression linéaire ou curvilinéaire significative des productions de la troisième année et des années cumulées sur les doses d'azote. Par ailleurs, lorsqu'on analyse, pour les deuxième et troisième années d'interruption de l'apport d'engrais, les récoltes des traitements de l'essai de doses d'azote qui sont identiques à ceux de l'essai NPK (traitements N2, N3 et N5 de l'essai de doses d'azote), on obtient des résultats semblables, avec des différences de productions plus élevées et hautement significatives.

Au cours des trois premières années sans engrais, les caféiers sont encore en état de produire des récoltes valables. En quatrième année, les tiges sont fortement défoliées, les arbres souffrent de *die-back*, la production diminue de façon drastique. Une interruption

de l'apport d'azote pendant plus de deux ans nuit fortement non seulement aux productions ultérieures, mais elle compromet aussi la survie des caféiers. Un résultat semblable avait déjà été observé au début de l'essai de doses d'azote (tableau 6, parcelles témoins N0 sans engrais azoté).

Pendant la période d'interruption de la fertilisation, on observe un arrière-effet dépressif des anciens apports de phosphate bicalcique sur la production, que la régression linéaire révèle significatif pour la deuxième année seulement. L'arrière-effet dépressif du chlorure de potassium se montre quant à lui significatif pour la troisième année et pour le cumul des deuxième et troisième années, lorsqu'on calcule la régression de ces productions sur les doses de chlorure de potassium. Pendant les années d'épandage, les parcelles fertilisées au phosphate bicalcique ou au chlorure de potassium produisaient également des récoltes légèrement inférieures à celles des parcelles non fertilisées, mais ces différences n'étaient pas significatives. Un essai de fertilisation de jeunes caféiers réalisé sur le même type de sol (Bouharmont, 1994) avait également montré un effet défavorable de cette fertilisation phosphatée sur la croissance des rejets, et de cette fertilisation potassique sur la production des jeunes caféiers fertilisés simultanément avec du sulfate d'ammoniaque (dernière colonne du tableau 16).

Il existe une corrélation hautement significative entre la vigueur des jeunes tiges après le recépage des anciens caféiers (hauteur des tiges après 10 mois, hauteur des tiges après 22 mois, nombre de primaires après 22 mois) et les productions ultérieures. Les coefficients de corrélations sont respectivement de 0,60, 0,81 et 0,75 pour 54 couples de valeurs.

2.2.4. Productions pendant les différentes périodes de l'essai

L'analyse des rendements moyens au cours des onze années par le test de Keuls montre que la dose de 210 kg/ha/an d'azote est significativement plus efficace que la dose de 105 kg/ha/an (tableau 17). La courbe de réponse aux doses d'azote (figure 10) a été calculée ; elle est significative ($r = 0,40$). La formule de la courbe est la suivante :
 Production (café marchand kg/ha) = $722 + 3,0140 \text{ (kg N/ha)} - 0,0039 \text{ (kg N/ha)}^2$.

Le sommet de la courbe est atteint pour une dose d'azote de 386 kg, voisine de celle obtenue pour les sept années de récolte analysées précédemment (366 kg).

Le calcul de la régression de la production moyenne des onze années sur les doses de potassium montre que celui-ci a un effet significatif dépressif linéaire (figure 10). La droite de réponse est la suivante :

$$\text{Production (café marchand kg/ha)} = 1\ 143 - 0,6425 \text{ (kg K}_2\text{O/ha)}$$

Ce résultat confirme l'effet dépressif du potassium observé dans les tableaux précédents où il était cependant rarement significatif.

Pour la période globale des onze années, les parcelles fertilisées avec du phosphate bicalcique ont une production inférieure à celle des parcelles non fertilisées (figure 10), mais les différences n'ont été significatives qu'au cours de la dixième année.

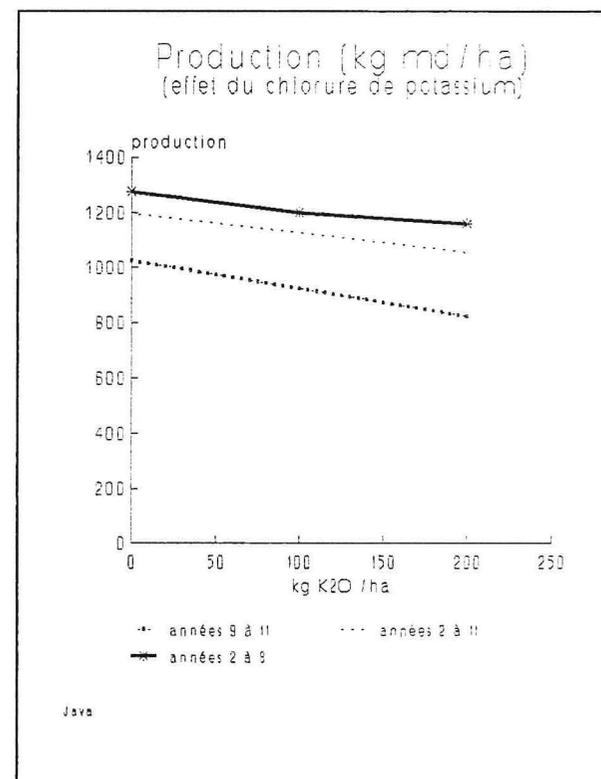
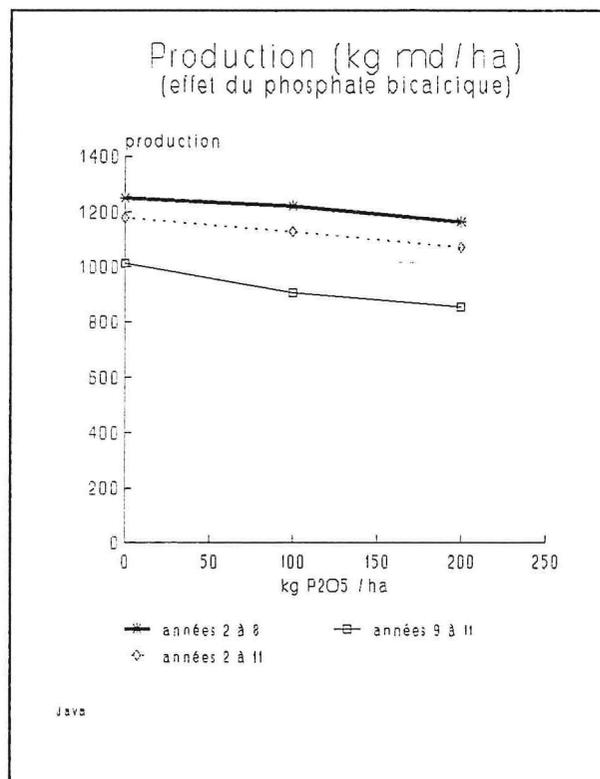
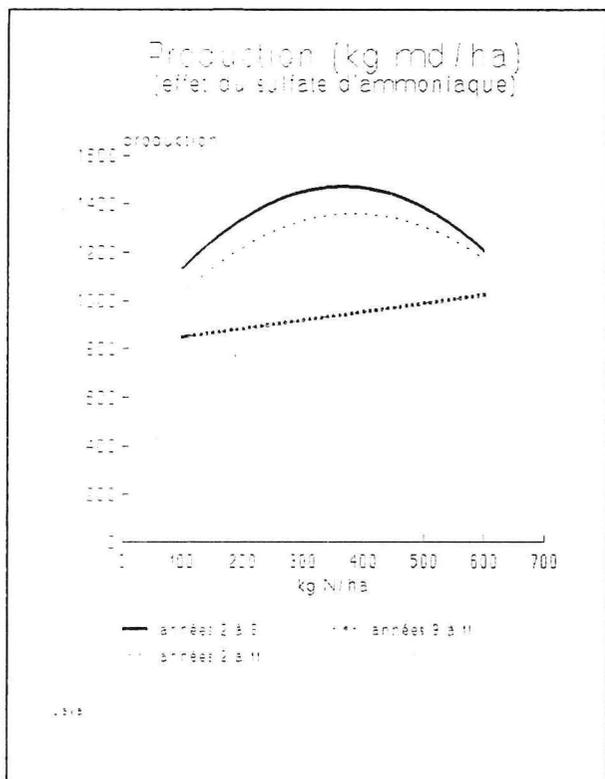


Figure 10. Productions pendant les différentes périodes de l'essai.

Tableau 17. Productions de café marchand en kg/ha/an.

traitement		années 2 à 8	années 9 à 12	moyenne 11 ans
		engrais	sans engrais	
		production	production	production
N1	105	1 146	686	979 b
N2	210	1 356	865	1 177 a
N3	630	1 134	911	1 053 ab
sign.		xx	0	x
lin.		0	x	0
curv.		xx	x	x
P0	0	1 250	871	1 112
P1	100	1 222	835	1 081
P2	200	1 164	756	1 016
sign.		0	0	0
lin.		0	0	0
curv.		0	0	0
K0	0	1 276	900	1 139
K1	100	1 201	826	1 065
K2	200	1 160	736	1 006
sign.		0	0	0
lin.		0	0	x
curv.		0	0	0
inter.		0	0	0
CV %				17

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;
- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;
- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;
- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;
- niveau x : P = 0,05 ; xx : P = 0,001.

2.2.5. Comparaison des productions des essais de doses d'azote et NPK

Les formules des droites et des courbes de régression significatives ont été calculées pour certaines périodes de récolte, à partir des données de l'essai NPK et de celles de l'essai de doses d'azote où ne sont prises en compte que les trois doses identiques à celles de l'essai NPK.

Tableau 18. Courbes de régression (réponses à l'apport d'azote).

essai	formule	X maximum	Y maximum
2 ^e à 8 ^e années			
doses N NPK	Y = 717 + 5,6025 X - 0,0074 X ²	379	1 777
	Y = 830 + 3,5180 X - 0,0048 X ²	366	1 475
arrière-effet (4 ans)			
doses N NPK	Y = 385 + 2,7796 X - 0,0025 X ²	556	1 158
	Y = 440 + 2,6621 X - 0,0030 X ²	444	1 031
période complète (10 et 11 ans)			
doses N NPK	Y = 688 + 4,7576 X - 0,0058 X ²	410	1 664
	Y = 722 + 3,0140 X - 0,0039 X ²	386	1 304

Les productions (Y) sont exprimées en kilos de café marchand/ha/an et les doses d'engrais (X) en kilos de N/ha/an. Les courbes de régression sont présentées tableau 18.

Pour la première période et pour la période complète, le maximum de la courbe se situe dans une zone voisine de fertilisation, semblable dans les deux essais. Les rendements de l'essai de doses d'azote sont plus élevés que ceux de l'essai NPK ; le sommet des courbes y est également plus élevé (figure 11).

3. Essais d'engrais sur caféiers de la variété Caturra

L'étude concerne l'influence de l'apport d'engrais sur l'évolution chimique du sol, sur l'alimentation minérale des caféiers et sur les productions. Les essais contiennent des parcelles utiles (90 m²) de 30 caféiers plantés à un écartement de 2 m x 1,50 m (3 333 caféiers/ha), taillés en tiges multiples (quatre tiges) à croissance libre et exposés au plein ensoleillement. Les engrais sont appliqués sur le sol, sans enfouissement, sous la jupe des caféiers.

3.1. Essai de doses d'azote

3.1.1. Matériel et méthodes

L'essai est établi suivant un dispositif en blocs randomisés à six répétitions. Il comporte six traitements qui correspondent aux six doses d'engrais appliquées (sulfate d'ammoniaque à 21 % d'azote). Les doses à l'hectare sont les mêmes que celles de l'essai de doses d'azote avec la variété Java.

traitement	N kg/ha/an	engrais kg /ha/an
N0	0,0	0
N1	52,5	250
N2	105,0	500
N3	210,0	1000
N4	420,0	2000
N5	630,0	3000

3.1.2. Résultats

3.1. 2.1. Evolution chimique du sol en dehors de la zone d'épandage

Après quatre années d'épandage d'engrais, des échantillons de sol ont été prélevés (0-20 cm de profondeur) au milieu des interlignes, soit à 1 m des troncs.

Tableau 19. Caractéristiques du sol situé en dehors de la zone d'application de l'engrais.

traitement	N tot. ‰	pH	P ass. ppm	K még %	Ca még %	Mg még %	S még %	Sat. %	CEC még %	Mg/K	M.O. %
N0	4,4	6,4	36	1,25	18,0	3,95	23,1	100	23	3,2	10,4
N1	4,1	6,3	37	1,24	19,7	4,31	25,2	100	23	3,5	10,4
N2	4,1	6,3	41	0,98	15,1	3,65	20,7	100	19	3,7	10,1
N3	4,5	6,2	48	0,99	18,6	3,97	23,5	100	21	4,0	10,3
N4	4,3	6,1	39	1,05	17,2	3,76	22,0	100	21	3,6	10,4
N5	3,7	6,1	37	0,82	15,4	3,12	19,3	99	20	3,8	10,1

N.B. : P assimilable, méthode Kurtz-Bray.

Ils ont été analysés par le laboratoire de l'IRA à Ekona.

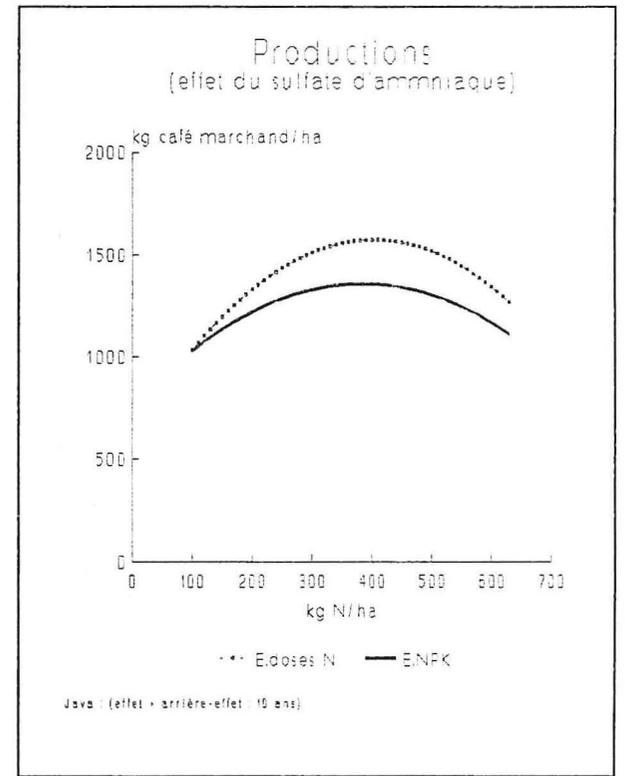
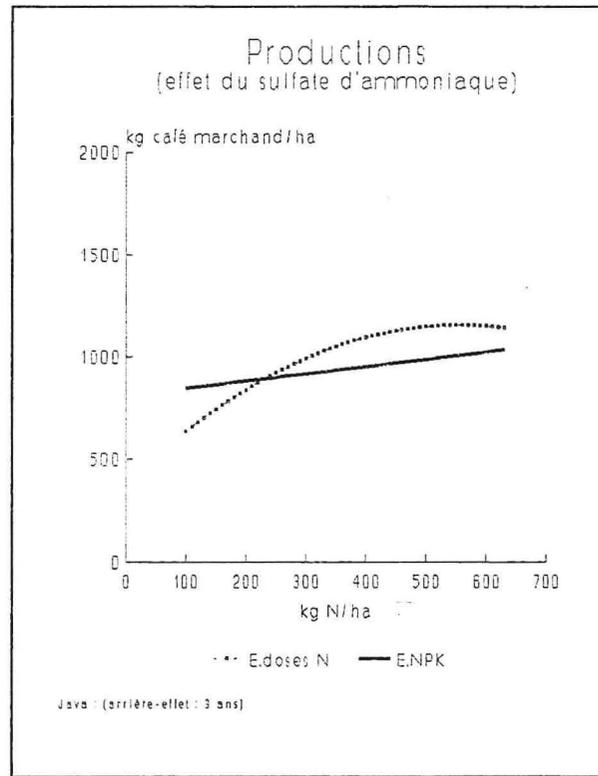
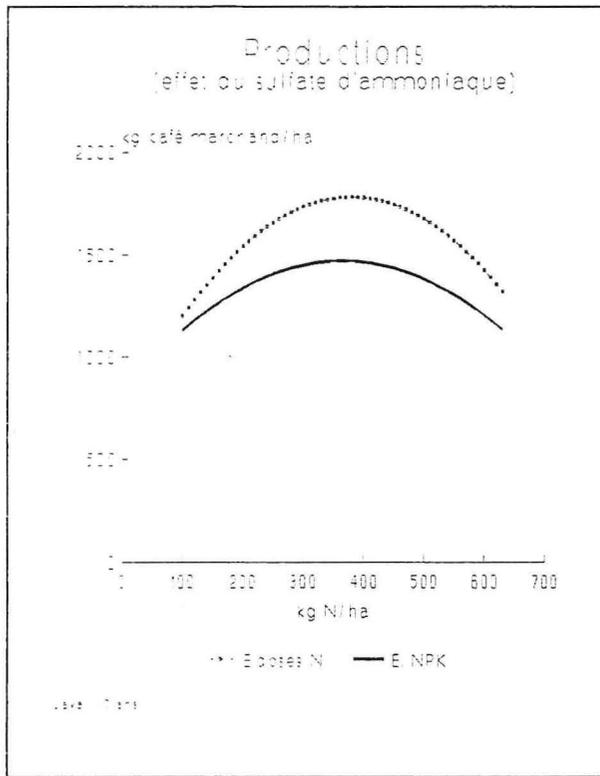


Figure 11. Production en fonction des doses d'azote.

Les teneurs normales des éléments dans le sol ont été données dans l'étude de l'essai de doses d'azote réalisé avec la variété Java. Ici aussi, on constate que les caractéristiques du sol n'ont jamais de valeurs inférieures à celles qui sont considérées comme normales en culture caféière (tableau 19). La plupart d'entre elles (P, K, Ca, Mg) sont plus élevées que ces normes et caractérisent un sol fertile. Le sol n'a pas évolué de façon significative sous l'influence des traitements, sauf en ce qui concerne le pH qui a diminué significativement de 6,4 à 6,1.

3.1.2.2. Analyses foliaires

Des échantillons de feuilles de caféiers ont été prélevés pour analyse, six et sept ans après la mise en place de l'essai. Ils ont été analysés par le laboratoire du CIRAD. Les résultats figurent dans le tableau 20 et la figure 12.

Tableau 20. Résultats des analyses foliaires (moyenne des deux prélèvements).

traitement	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	B ppm	Cl ppm	Cu ppm
N0	2,572 e	0,172 a	2,699 a	1,015 c	0,309 d	0,18 b	169	24 e	8,6	41,0 a	840 a	40,2 a
N1	2,720 d	0,164 a	2,707 a	1,071 bc	0,326 d	0,26 a	177	47 d	9,2	39,2 ab	860 a	34,2 ab
N2	2,899 c	0,153 b	2,633 ab	1,115 ab	0,359 c	0,26 a	191	68 c	9,6	34,7 b	900 a	38,3 ab
N3	2,973 bc	0,149 b	2,538 c	1,180 a	0,391 b	0,25 a	208	81 b	9,1	27,4 c	660 b	36,0 ab
N4	3,073 ab	0,137 c	2,570 ab	1,195 a	0,421 a	0,25 a	215	86 ab	9,0	23,0 c	430 c	32,7 ab
N5	3,107 a	0,135 c	2,628 ab	1,162 ab	0,408 ab	0,26 a	223	94 a	8,9	23,8 c	390 c	27,3 b
sign.	xx	xx	xx	xx	xx	xx	0	xx	0	xx	xx	x
CV %	3	5	3	6	6	5	17	6	16	12	12	20
lin.	xx	xx	0	xx	xx	x	xx	xx	0	xx	xx	xx
curv.	xx	xx	x	xx	xx	xx	x	xx	0	xx	xx	xx
log.						xx		xx				

NB : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
 - sign., niveau de signification (analyse de variance) ;
 - lin., niveau de signification des régressions linéaires ;
 - curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;
 - log., régression logarithmique significativement supérieure aux autres régressions ;
 - niveau x : P = 0,05 ; xx : P = 0,01.

L'apport de sulfate d'ammoniaque a influencé la nutrition des arbres (photo 4). On met en évidence une corrélation hautement significative entre la teneur de chacun des éléments (sauf Zn) dans les feuilles et les doses d'azote appliquées. La corrélation est positive pour les éléments N, Ca, Mg, S, Fe, Mn, négative pour les éléments P, K, B, Cl et Cu. Ces résultats sont tout à fait semblables à ceux de l'essai réalisé avec la variété Java, sauf qu'ici l'augmentation de Ca dans les feuilles est significative et que la variation de Zn, bien qu'évoluant dans le même sens, n'est pas significative. La régression curvilinéaire est significativement supérieure à la régression linéaire pour les éléments K, Mg et Mn dans les feuilles. Pour les autres éléments, les deux régressions sont statistiquement équivalentes, mais le coefficient de régression de la courbe est plus élevé que celui de la droite.

Par rapport aux normes du Kenya et du Kivu, les teneurs des éléments dans les feuilles restent généralement normales ou élevées dans beaucoup de traitements. Les teneurs en azote, calcium et magnésium sont assez faibles en dessous de la dose de 105 kg d'azote, et les teneurs en phosphore et en bore au-dessus de cette dose. La teneur en zinc est faible dans tous les traitements y compris le témoin. Néanmoins, aucun symptôme visible de déficience ne se manifeste.

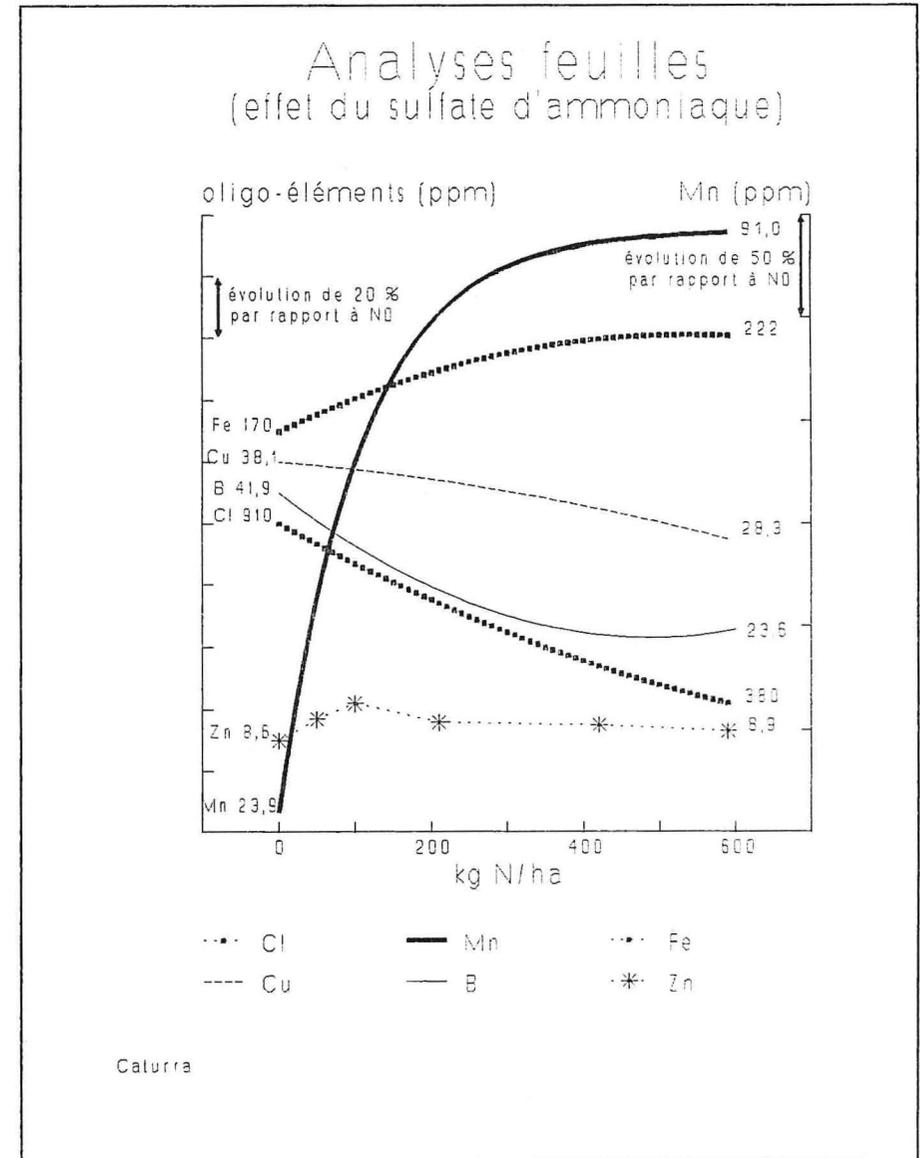
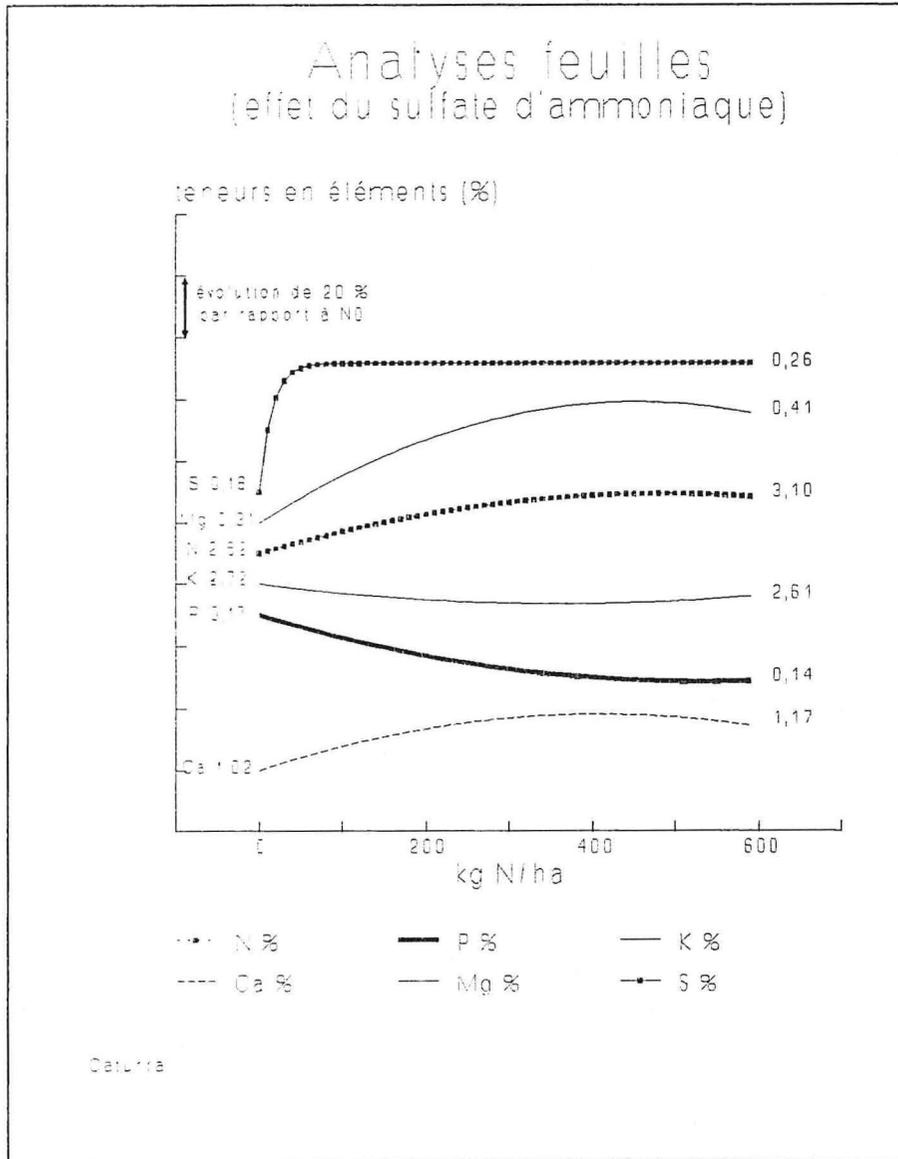


Figure 12. Evolution des éléments dans les feuilles.
Niveau de signification * : Zn ; **** : S ; *** : toutes les autres lignes.

3.1.2.3. Productions

Dans le tableau 21 sont inscrits les chiffres de récolte des différents traitements.

Tableau 21. Production de café marchand en kg/ha/an.

traitement	1	2	3	4	année			8	années 2 à 8	
					5	6	7		moyenne	% de N0
N0	384	347 c	260 d	155 c	367 c	154 d	148 b	852 b	326 c	100
N1	472	635 bc	662 cd	691 b	1 057 b	460 c	751 b	1 236 a	785 b	241
N2	347	747 ab	949 cd	804 b	1 328 b	779 a	646 b	1 404 a	951 b	292
N3	460	1 062 a	1 374 bc	1 420 a	2 516 a	711 ab	1 647 a	1 310 a	1 434 a	440
N4	1 420	1 025 a	2 045 ab	1 103 ab	2 507 a	622 b	1 679 a	1 249 a	1 461 a	448
N5	561	1 136 a	2 689 a	862 b	2 686 a	340 c	1 911 a	1 185 a	1 544 a	474
CV %		36	47	50	24	57	48	22	20	

N.B. : test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant).

Pour les raisons données dans l'étude du premier essai, la première année n'a pas été prise en compte pour le calcul des productions moyennes. L'analyse statistique des rendements moyens de sept années montre que tous les traitements sont significativement supérieurs au témoin sans engrais.

La courbe de réponse aux doses d'azote (kilos de N/ha) a été calculée (figure 13) ; elle est hautement significative, mais ne diffère significativement de la droite de régression que pour un seuil de probabilité de 0,07.

La formule de la courbe est : $Y = 447 + 5,2317 X - 0,0057 X^2$.

Comme dans l'essai de doses d'azote réalisé avec la variété Java, l'absence de fertilisation azotée se traduit par l'obtention de récoltes médiocres (photos 5 et 6). Dans les conditions de l'essai, la production moyenne annuelle calculée est de 447 kg de café marchand/ha en l'absence d'engrais azoté. La dose d'azote qui entraîne le rendement maximal est importante et plus élevée que pour la variété Java ; elle se chiffre à 459 kg d'azote/ha (2 186 kg de sulfate d'ammoniaque ou 998 kg d'urée) et porte la production à 1 647 kg de café marchand/ha/an.

3.1.2.4. Calcul de rentabilité

Pour un prix de vente du café égal à 200 F CFA/kg, la dose d'azote optimale — la plus rentable — est de 248 kg d'azote/ha/an (1 181 kg de sulfate d'ammoniaque ou 539 kg d'urée) ; la production obtenue est alors de 1 394 kg et le bénéfice annuel par rapport aux champs non fertilisés se chiffre à 26 385 F CFA. Ce bénéfice s'accroît évidemment, de même que la dose à apporter, lorsque le prix du café s'améliore.

Pour un prix de vente du café égal à 400 F CFA, la dose d'azote optimale serait de 401 kg (1 910 kg de sulfate d'ammoniaque ou 872 kg d'urée), la production de 1 628 kg et le bénéfice de 252 600 F CFA.

Les conclusions tirées à la suite de l'essai de doses d'azote réalisé avec la variété Java concernant la nécessité de l'apport d'azote aux caféiers sont également valables pour la variété Caturra.

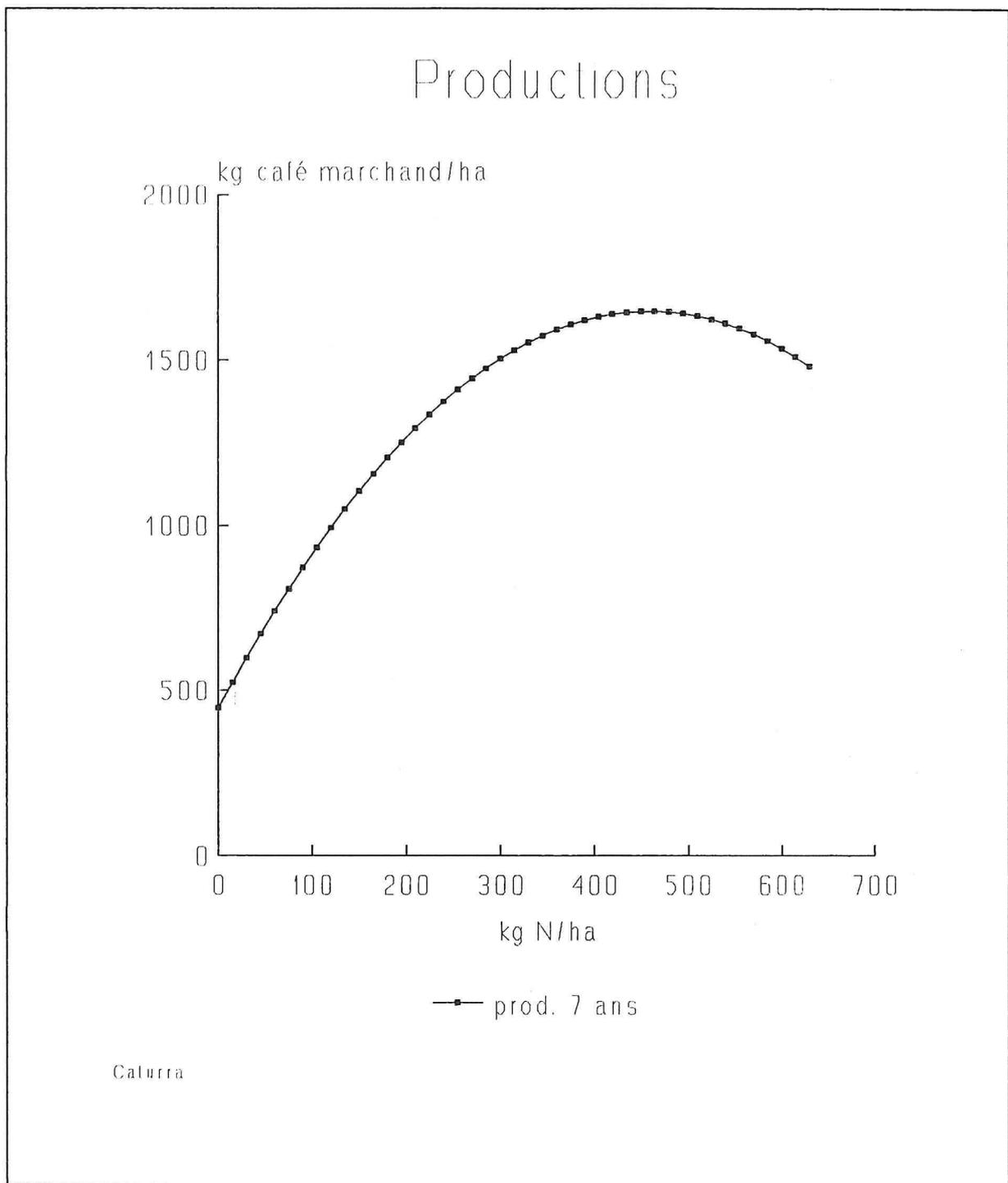


Figure 13. Courbes des productions en fonction des doses d'azote.

3.2. Essai d'engrais NPK

3.2.1. Matériel et méthodes

Les parcelles sont identiques à celles de l'essai précédent et les caféiers sont conduits de la même façon. L'essai est établi suivant un dispositif factoriel 3³ à une seule répétition. L'azote est apporté sous forme de sulfate d'ammoniaque (21 % N), le phosphore sous forme de phosphate bicalcique (38 % P₂O₅ et 30 % CaO) et le potassium sous forme de chlorure de potassium (60 % K₂O). Les traitements sont constitués par toutes les combinaisons (27) entre les trois éléments, chacun d'eux étant présent à trois niveaux. Les engrais sont apportés quatre fois par an. Les doses d'engrais par hectare et par an sont les suivantes :

	élément kg/ha/an			
	dose 1	dose 2	dose 3	
N	105	210	630	(N)
P	0	100	200	(P ₂ O ₅)
K	0	100	200	(K ₂ O)

	engrais kg/ha/an			
	dose 1	dose 2	dose 3	
N	500	1000	3000	(sulfate d'ammoniaque)
P	0	250	500	(phosphate bicalcique)
K	0	166,7	333,5	(chlorure de potassium)

Les observations sont les mêmes que celles de l'essai précédent.

3.2.2. Résultats

3.2.2.1. Evolution chimique du sol en dehors de la zone d'épandage

Après quatre années d'épandage d'engrais, des échantillons de sol ont été prélevés (0-20 cm de profondeur) au milieu des interlignes, soit à 1 m des troncs. Ils ont été analysés par le laboratoire de l'IRA à Ekona.

Tableau 22. Caractéristiques du sol situé en dehors de la zone d'application des engrais.

traitement	N tot. ‰	pH	P ass. ppm	K még %	Ca még %	Mg még %	S még %	Sat.	CEC	Mg/K	M.O. %
N1	4,0	5,9	46	0,98	17,4	3,56	21,9	100	21	3,6	10,6
N2	4,3	6,0	45	1,06	16,1	3,52	20,7	100	21	3,3	10,4
N3	4,3	5,8	50	0,82	14,4	2,99	18,2	95	19	3,6	10,3
P0	3,7	5,9	48	0,94	15,9	3,43	20,3	100	20	3,6	10,1
P1	4,9	5,9	44	1,00	16,0	3,45	20,4	95	21	3,5	10,7
P2	4,1	5,9	48	0,92	16,0	3,21	20,1	99	20	3,5	10,5
K0	4,1	6,0	50	0,86	16,1	3,46	20,5	100	20	4,0	10,5
K1	4,6	5,8	44	0,94	14,8	3,24	19,0	95	20	3,4	10,5
K2	3,9	6,0	46	1,05	16,9	3,43	21,4	98	22	3,3	10,3

N.B. : P assimilable, méthode Kurtz-Bray.

Comme dans les essais précédents, on constate que les caractéristiques du sol n'ont jamais de valeurs inférieures à celles qui sont considérées comme normales en culture caféière (tableau 22). Plusieurs d'entre elles (P, K, Ca, Mg) sont plus élevées que ces normes et caractérisent un sol fertile.

Aux emplacements des prélèvements, le sol n'a pas évolué de façon significative sous l'influence des traitements.

3.2.2.2. Analyses foliaires

Des échantillons de feuilles de caféiers ont été prélevés pour analyse, six ans et sept ans après la mise en place de l'essai. Ils ont été analysés par le laboratoire du CIRAD. Les résultats (moyennes des deux prélèvements) figurent dans le tableau 23.

Tableau 23. Résultats des analyses foliaires.

traitement	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	B ppm	Cl ppm	Cu ppm
N1	2,943 b	0,166 a	2,822	1,139	0,318 b	0,26	171 b	67 b	7,78	30,0 a	2660 a	34,4
N2	3,075 ab	0,162 a	2,787	1,155	0,360 a	0,24	173 b	82 ab	8,50	23,3 b	1830 b	30,4
N3	3,163 a	0,148 b	2,715	1,113	0,373 a	0,24	208 a	95 a	8,83	22,7 b	820 c	34,4
sign.	x	xx	0	0	xx	0	x	x	0	xx	xx	0
lin.	xx	xx	x	0	xx	xx	xx	xx	0	xx	xx	0
curv.	xx	xx	0	0	xx	x	xx	xx	0	xx	xx	0
P0	3,102	0,153 b	2,775	1,136 ab	0,354	0,24	182	72	8,50	23,7	1710	28,8
P1	3,001	0,163 a	2,780	1,105 b	0,348	0,25	176	81	8,33	27,2	1700	34,1
P2	3,078	0,161 a	2,769	1,166 a	0,348	0,25	195	91	8,28	25,2	1900	36,4
sign.	0	xx	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0
lin.	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	x
curv.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K0	3,057	0,158	2,688 b	1,151	0,363 a	0,25	188	80	8,28	26,2	810 b	33,6
K1	3,074	0,159	2,804 a	1,111	0,349 ab	0,24	172	81	8,61	23,8	2030 a	32,2
K2	3,050	0,158	2,832 a	1,146	0,338 b	0,24	192	83	8,22	26,1	2470 a	33,6
sign.	0	0	x	0	x	0	0	0	0	0	xx	0
lin.	0	0	xx	0	0	0	0	0	0	0	xx	0
curv.	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	xx	0
CV %	5	3	4	4	4	7	13	20	18	11	36	22
inter.	0	0	0	0	NP x	0	0	0	0	0	0	0

NB : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification (analyse de variance) ;
- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;
- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;
- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;
- niveau x : P = 0,05 ; xx : P = 0,01.

L'influence des engrais sur le niveau des différents éléments dans les feuilles se manifeste le plus souvent de façon semblable à celle observée dans l'essai réalisé avec la variété Java (figure 14).

La dose forte d'azote entraîne une augmentation significative de l'azote, du magnésium, du manganèse et du fer, et une diminution significative du phosphore, du bore et du chlore dans les feuilles, par rapport aux valeurs observées dans le traitement avec la dose faible d'azote.

L'apport de phosphate bicalcique entraîne une augmentation significative du phosphore et du calcium. Il existe une interaction NP significative pour la teneur des feuilles en magnésium, mais elle est peu marquée.

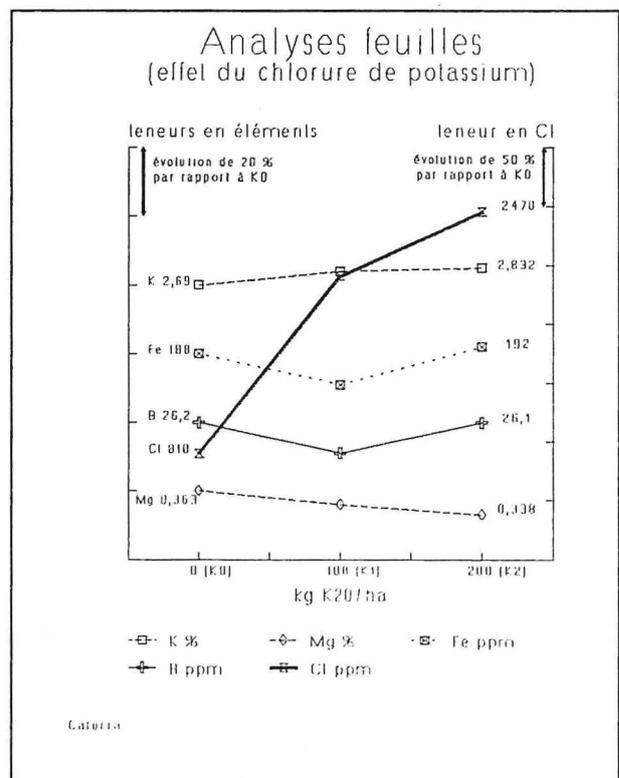
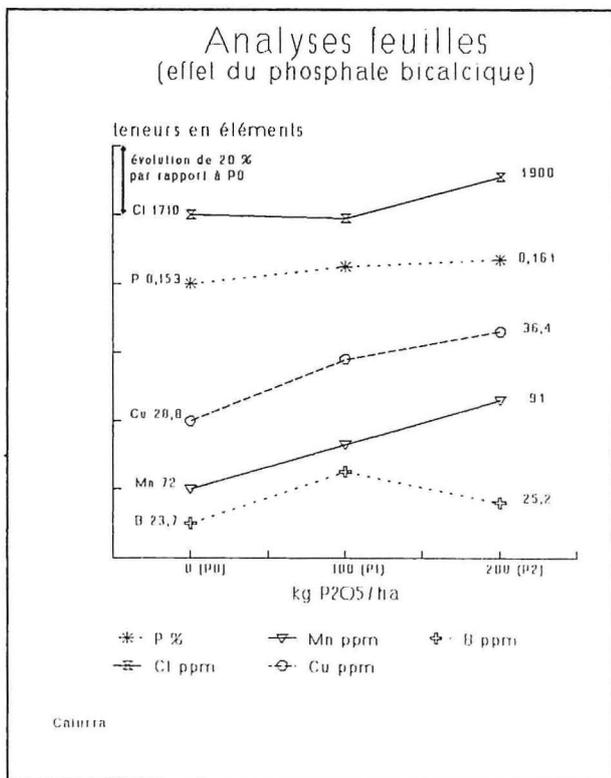
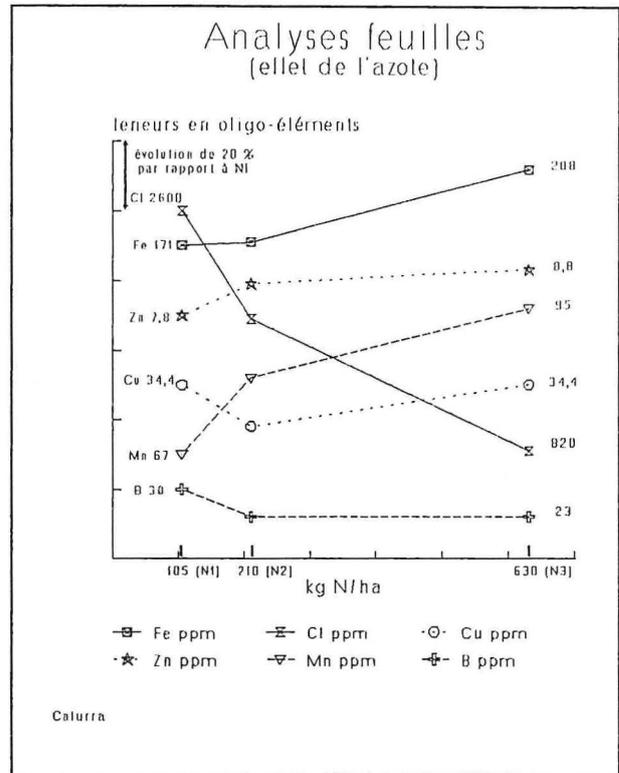
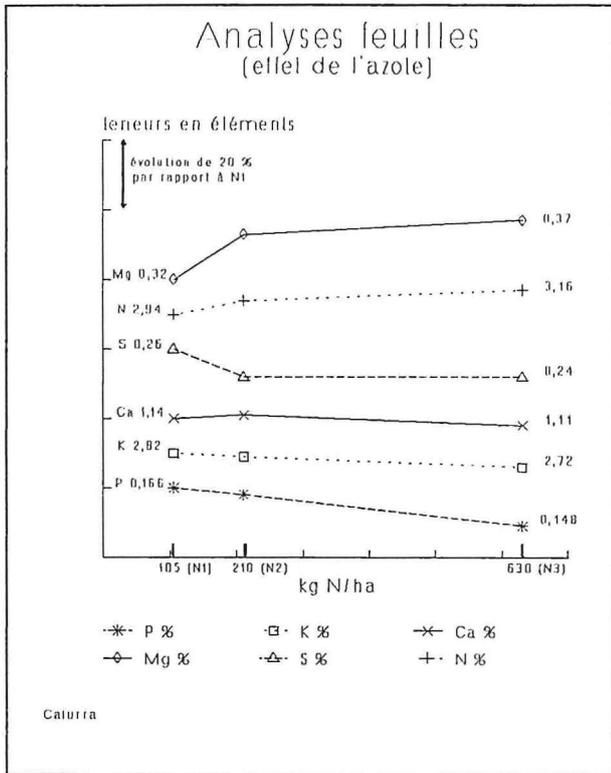


Figure 14. Evolution des éléments dans les feuilles en pourcentage des témoins N1, P0, K0.

Interaction NP (Mg) :	P0	P1	P2
N1	0,33	0,32	0,30
N2	0,37	0,35	0,35
N3	0,36	0,37	0,39

L'apport de chlorure de potassium entraîne une augmentation significative du potassium et du chlore, et une diminution significative du magnésium.

Par rapport aux normes habituellement citées dans la littérature, la teneur des différents éléments dans les feuilles est toujours normale ou élevée, sauf pour les oligo-éléments zinc et bore qui, comme dans les essais précédents, sont toujours théoriquement déficients, sans que n'en apparaissent les symptômes.

La teneur de la plupart des éléments dans les feuilles des caféiers Caturra est voisine de celle observée chez le caféier Java. Seule la teneur en fer est nettement inférieure chez le Caturra (184 ppm, en moyenne, contre 298 ppm). La teneur en cuivre y est beaucoup plus élevée (33,1 ppm, en moyenne, contre 12,0 ppm) par suite des traitements cupriques exigés par la forte sensibilité du Caturra à la rouille orangée.

3.2.2.3. Productions

Les récoltes pour les traitements principaux sont indiquées dans le tableau 24 et représentées dans les figures 15 et 16.

Tableau 24. Traitements principaux et productions de café marchand en kg/ha/an.

traitement.	année								années 2 à 8	
	1	2	3	4	5	6	7	8	moy.	% té
N1	503	886	1 901	769	1 744	577	854	805	1 077 b	100
N2	504	879	2 964	750	2 665	487	1 365	759	1 410 a	131
N3	511	707	2 868	531	2 371	492	1 682	761	1 344 a	125
sign.		0	x	0	xx	0	x	0	xx	
P0	533	884	2 809	661	2 282	470	1 401	707	1 316	100
P1	497	890	2 368	712	2 291	517	1 303	795	1 268	96
P2	488	698	2 556	676	2 207	568	1 198	823	1 247	95
sign.		0	0	0	0	0	0	0	0	
K0	634	802	2 735	596	2 555	389	1 696	894	1 381	100
K1	308	942	2 312	740	2 012	613	810	695	1 161	84
K2	576	728	2 686	713	2 213	553	1 394	736	1 289	93
sign.		0	0	0	0	x	x	0	0	
inter.		0	0	0	0	NP x	NPx NKx	0	NK x	
CV %		40	24	59	19	27	34	30	14	

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;

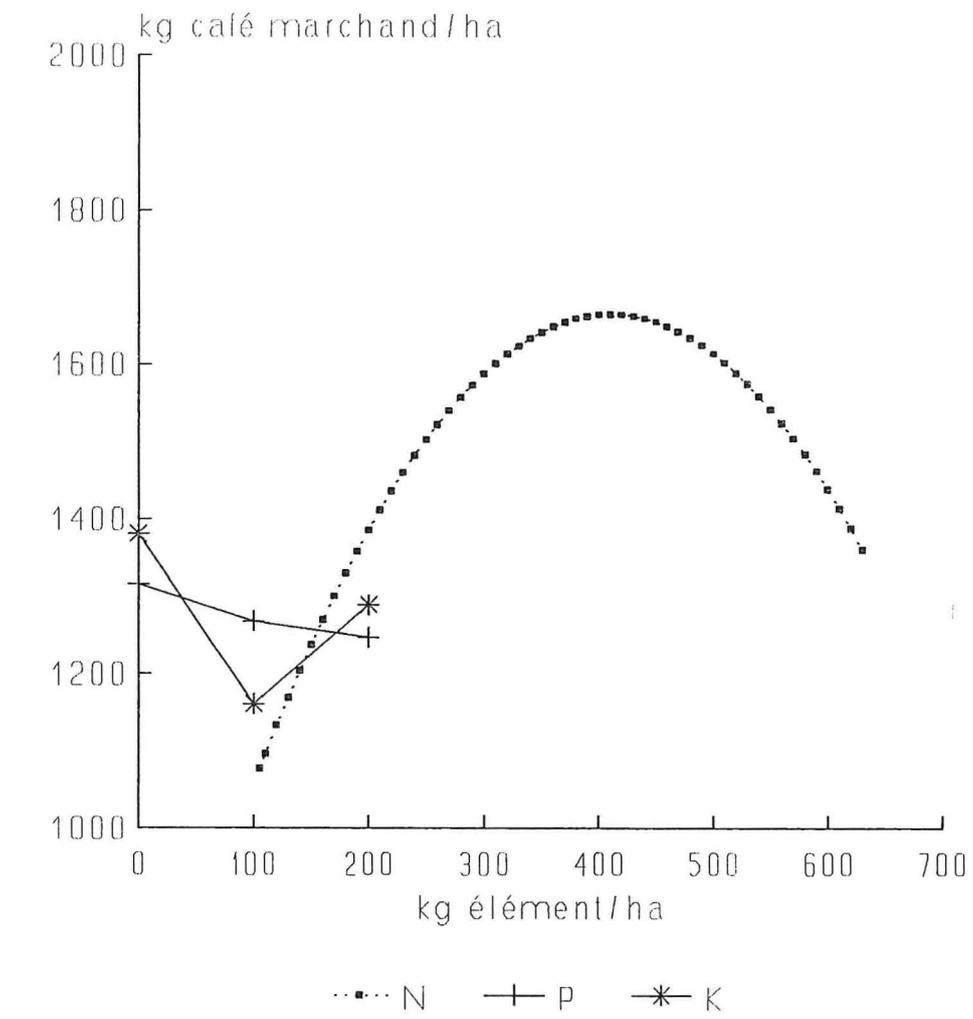
- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;

- niveau x : P = 0,05 ; xx : P = 0,01.

Les chiffres de récolte ont été analysés statistiquement.

Les deux doses fortes d'azote ont un effet significatif favorable sur le rendement par rapport à la dose faible. Cependant, l'examen du tableau des interactions NK montre que le meilleur traitement est N2K0. Celui-ci est significativement plus favorable que toutes les autres combinaisons NK sauf N2K1, N3K0 et N3K2. La courbe de régression de la production sur les doses d'azote est significative ; le maximum de rendement (1 665 kg de

Productions (effet de N,P,K)



Calurra

Figure 15. Production en fonction des doses d'engrais.

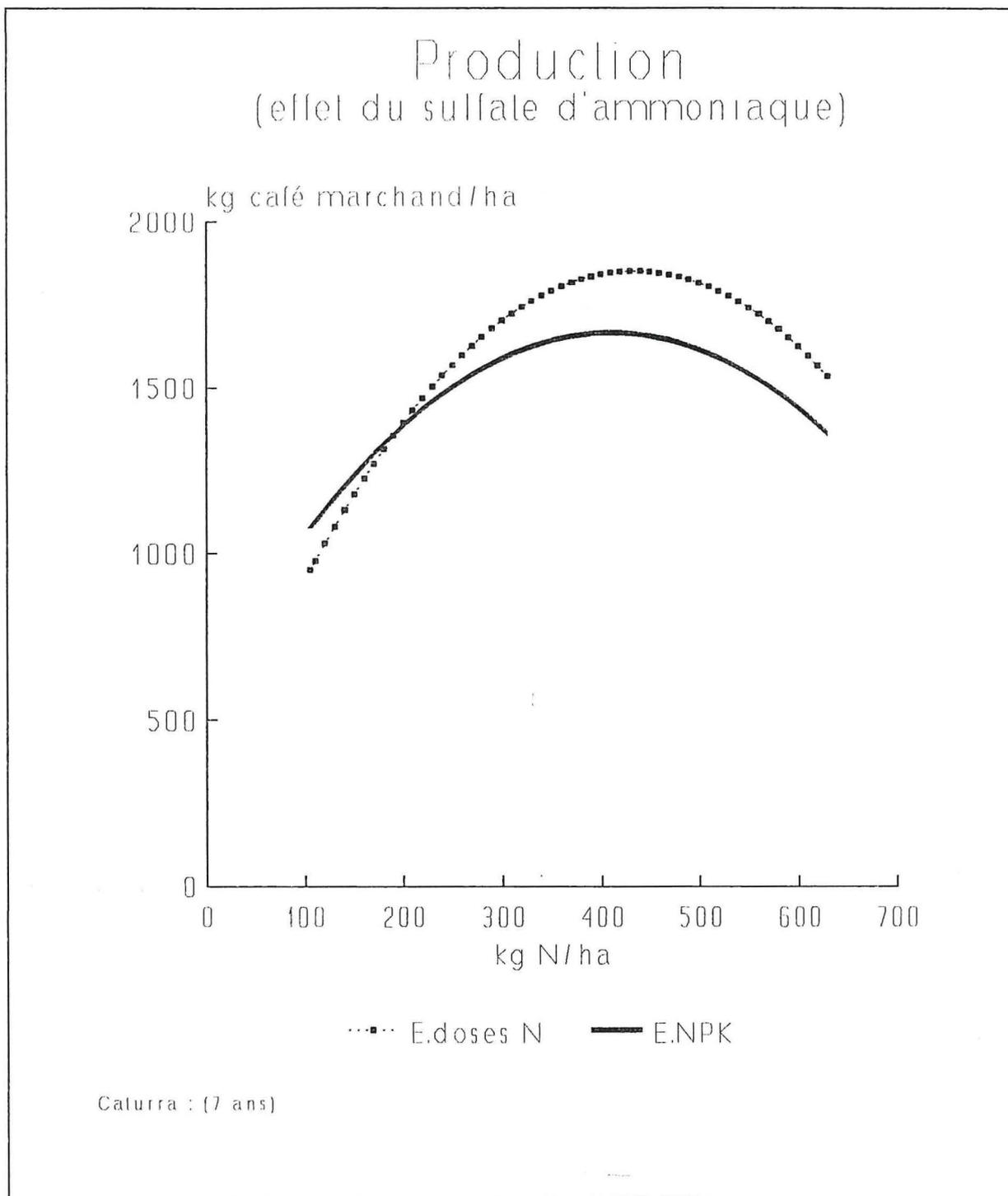


Figure 16. Production en fonction des doses d'azote.

café marchand/ha/an) est obtenu pour une dose de 410 kg d'azote/ha (1 952 kg de sulfate d'ammoniaque). L'interaction NK (production) est la suivante :

	K0	K1	K2
N1	1 021	1 041	1 168
N2	1 722	1 340	1 167
N3	1 399	1 101	1 533

Lorsqu'on compare les courbes de régression calculées, pour les deux essais réalisés avec la variété Caturra (essai de doses d'azote et essai NPK), avec les trois doses d'engrais qui leur sont communes, on obtient des résultats assez voisins. Le maximum de rendement est atteint pour une dose de 434 kg d'azote dans le premier essai et pour une dose de 410 kg dans le second. L'efficacité de l'azote est un peu moins importante dans le second essai que dans le premier (augmentation de rendement de 31 % contre 51 % entre les doses de 105 kg et de 210 kg d'azote). Cela est dû aux interactions NK et NP. Des différences du même ordre avaient également été obtenues dans les essais réalisés avec la variété Java.

Les effets principaux du phosphore et du potassium ne sont pas significatifs. Les rendements des parcelles fertilisées par ces éléments sont toutefois légèrement inférieurs à ceux des parcelles à dose nulle ; la dose intermédiaire de potassium est même significativement dépressive pour un seuil de probabilité de 8 %, et l'apport de chlorure de potassium est significativement dépressif ($P = 0,05$) en présence de la dose intermédiaire d'azote (interaction NK).

4. Comparaison des variétés Java et Caturra

4.1. Teneur des éléments dans les feuilles

4.1.1. Evolution sous l'influence des apports de sulfate d'ammoniaque

La comparaison des deux variétés se fait de la façon la plus précise à partir des deux essais de doses d'azote (tableau 25).

Tableau 25. Teneur des éléments dans les feuilles de Java et de Caturra (moyennes pour l'ensemble des traitements).

essai	variété	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn	B	Cl	Cu
doses N	Java	3,059	0,152	2,903	1,015	0,360	0,234	302	58,2	8,22	27,1	633	20,7
	Caturra	2,724	0,152	2,629	1,123	0,369	0,243	197	66,7	9,07	31,5	680	34,8
NPK	Java	3,089	0,156	2,827	1,047	0,376	0,235	298	69,9	9,27	23,5	1 857	12,0
	Caturra	3,060	0,158	2,775	1,136	0,350	0,243	184	81,3	8,37	25,4	1 770	33,1

Les courbes de réponse ont été comparées (figures 17 et 18).

Azote : la teneur en azote est semblable chez les deux variétés (Caturra = 95 à 93 % de Java) et elle s'accroît de façon quasi identique.

Phosphore : la teneur en phosphore est pratiquement identique chez les deux variétés

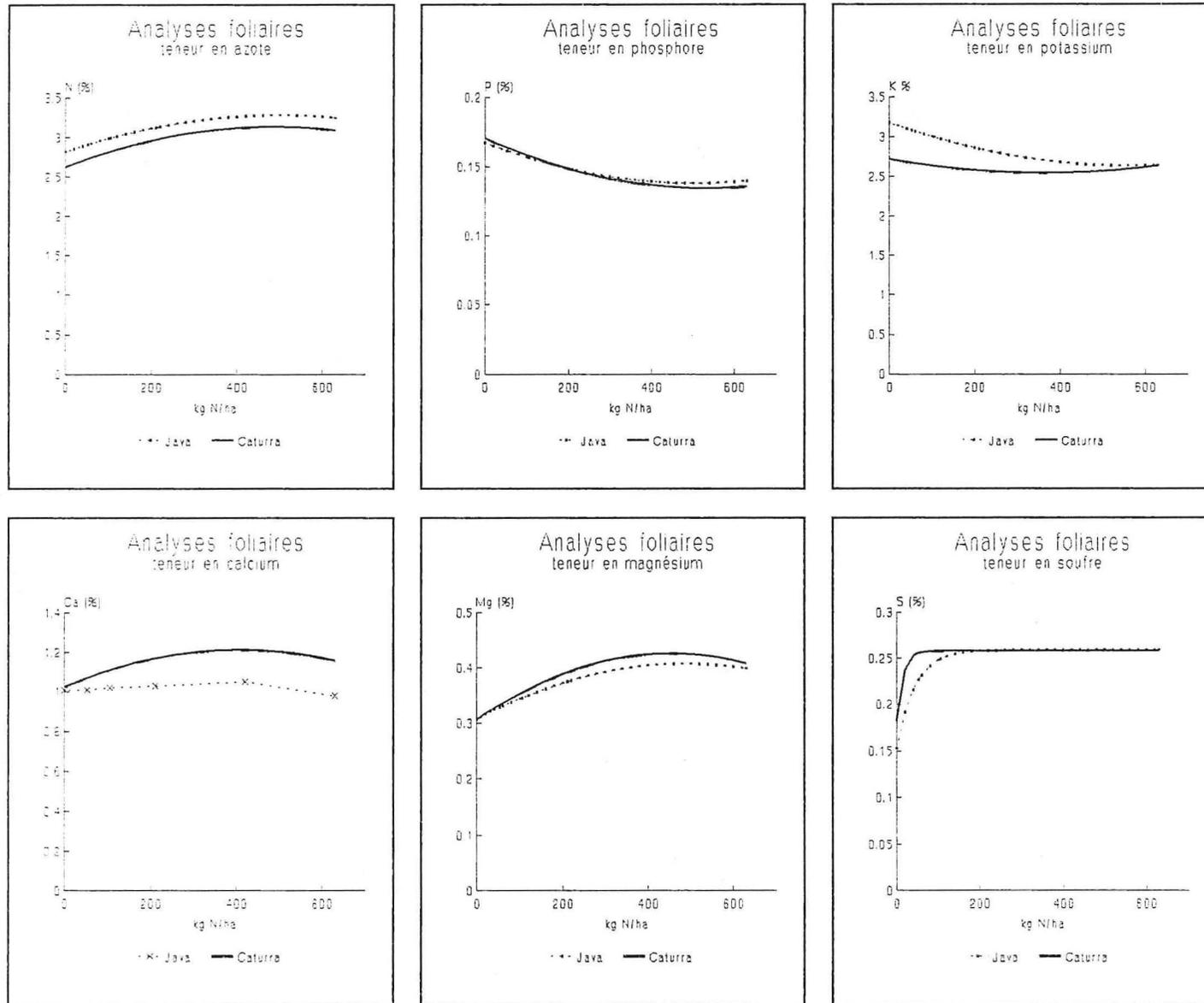


Figure 17. Analyses foliaires du Java et du Caturra des essais de doses d'azote (éléments).

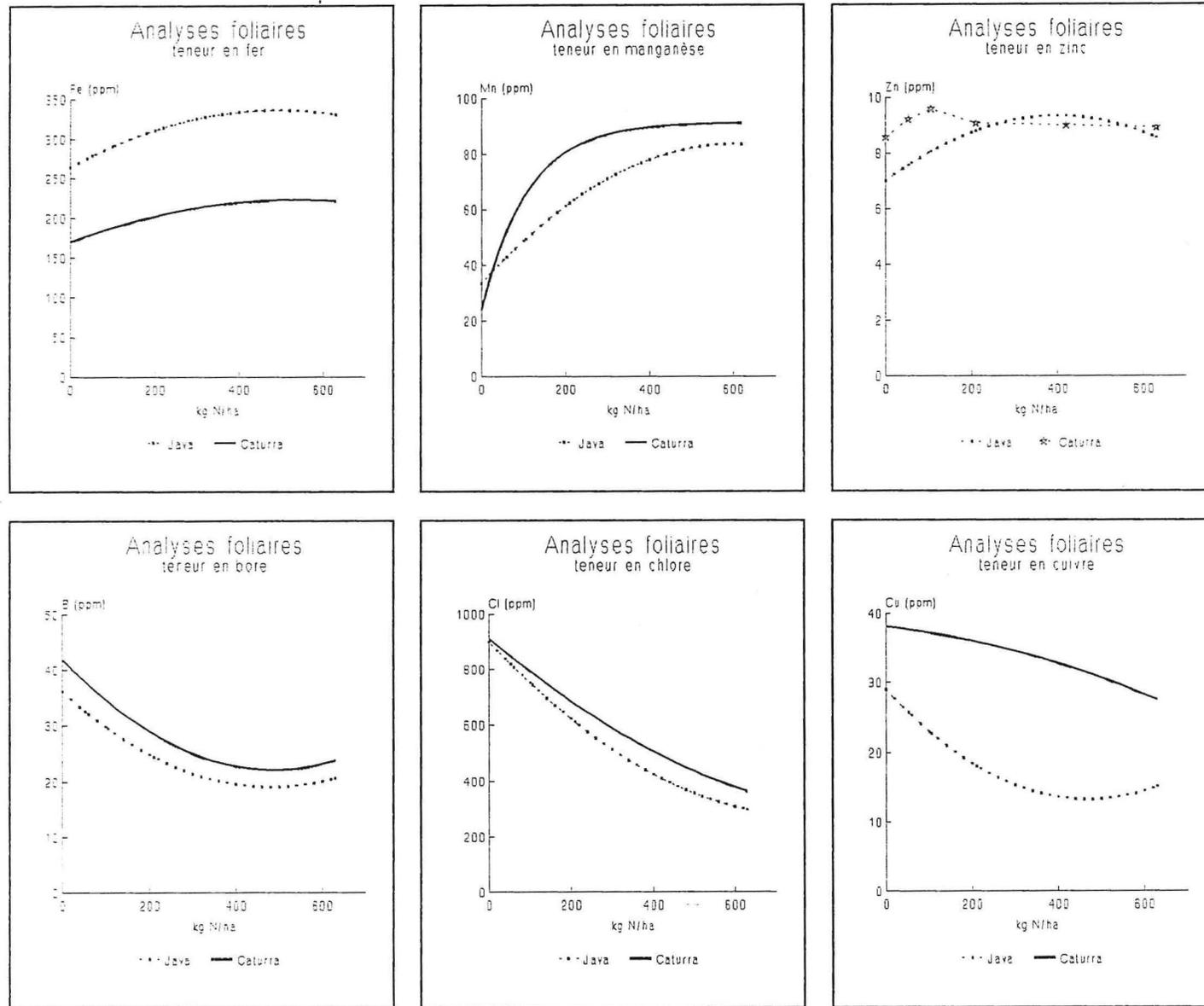


Figure 18. Analyses foliaires du Java et du Caturra des essais de doses d'azote (oligo-éléments).

(Caturra = 102 à 97 % de Java) et elle décroît de façon pratiquement identique.

Potassium : la teneur en potassium est plus faible chez le Caturra (85 % de Java) en N0 ; elle décroît moins vite avec les apports d'azote et les teneurs sont identiques en N5.

Calcium : la teneur en calcium est la même chez les deux variétés en N0 ; elle s'accroît plus vite chez le Caturra que chez le Java, où l'évolution n'est pas significative (Caturra = 118 % de Java en N5).

Magnésium : la teneur en magnésium est voisine chez les deux variétés et elle augmente de façon semblable (Caturra = 100 % de Java en N0, 105 % en N4 et 102 % en N5).

Soufre : la teneur en soufre est plus élevée (Caturra = 120 % de Java) chez le Caturra en N0 ; l'augmentation y est plus rapide pour les doses faibles d'azote, mais les deux courbes se rejoignent pour la dose de 200 kg et les teneurs restent ensuite identiques pour les doses élevées.

Fer : la teneur en fer est moins élevée chez le Caturra (Caturra = 64 % de Java en N0) ; elle augmente suivant des courbes semblables pour les deux variétés.

Manganèse : la teneur en manganèse est pratiquement la même pour les deux variétés en N0 ; elle évolue (positivement, puis négativement) plus vite chez le Caturra que chez le Java (Caturra = 98 % de Java en N0, 125 % pour 280 kg d'azote, 108 % en N5).

Zinc : la teneur en zinc est plus élevée chez le Caturra que chez le Java en N1 (Caturra = 123 % de Java). Chez le Java, elle s'accroît pour les premières doses d'azote et décroît en N5. Chez le Caturra, l'évolution de la teneur en zinc est moins régulière et elle n'est pas significative.

Bore : la teneur en bore est plus élevée chez le Caturra ; l'évolution est semblable chez les deux variétés (Caturra = 116 % de Java en N0 et 115 % en N5).

Chlore : la teneur en chlore est semblable chez les deux variétés en N0 ; elle décroît moins rapidement chez le Caturra que chez le Java (Caturra = 101 % de Java en N0 et 123 % en N5).

Cuivre : la teneur en cuivre est toujours plus élevée chez le Caturra que chez le Java (Caturra = 131 % de Java en N0, 241 % en N4 et 182 % en N5). Les teneurs décroissent suivant deux courbes d'allure différente sous l'effet des apports d'azote. La teneur du cuivre dans les feuilles et son évolution, chez le Caturra, sont évidemment influencées par les traitements cupriques effectués pour lutter contre les attaques de rouille. Dans l'expérimentation, il n'a pas été possible de distinguer la part du cuivre absorbé par les feuilles de celle des traces éventuellement restées sur le limbe.

Remarque : les doses d'azote apportées à chaque caféier étant deux fois moins élevées chez le Caturra que chez le Java, on aurait pu s'attendre à une évolution moins rapide de la teneur des éléments dans les feuilles chez la première variété que chez la seconde.

Ceci ne s'observe que pour le potassium, le soufre et le chlore. L'inverse se manifeste pour le calcium et le manganèse. L'évolution est semblable chez les deux variétés pour les autres éléments.

Pour la plupart des éléments, les différences observées entre le Java et le Caturra dans les essais de doses d'azote se trouvent confirmées dans les essais d'engrais NPK. Dans les deux cas, les éléments N, K et Fe sont mieux représentés dans la variété Java, les éléments Ca, S, Mn, B et Cu sont mieux représentés dans la variété Caturra et le niveau de P est pratiquement identique chez les deux variétés. Les résultats sont inversés pour les éléments Mg, Zn et Cl, et le niveau du magnésium est particulièrement faible dans les feuilles du Caturra de l'essai NPK.

4.1.2. Evolution sous l'influence des apports de phosphate bicalcique

La comparaison des deux variétés peut se faire à partir des deux essais NPK (figure 19). Seuls les éléments qui ont évolué significativement dans l'un ou l'autre ou dans les deux essais (régression linéaire ou curvilinéaire, ou analyse de variance) sont pris en considération.

Les éléments P, Ca et Cl n'évoluent guère de façon différente chez les deux variétés, sous l'influence des apports de phosphate bicalcique (figure 19). En revanche, le fer diminue et le manganèse et le cuivre augmentent significativement chez le Caturra, alors qu'ils n'évoluent pas significativement chez le Java. Selon les doses d'engrais, la teneur chez le Caturra varie entre 100 et 104 % de celle du Java pour le phosphore, 106 et 112 % pour le calcium, 92 et 98 % pour le chlore, 104 et 127 % pour le manganèse, 58 et 67 % pour le fer, 236 et 317 % pour le cuivre.

4.1.3. Evolution sous l'influence des apports de chlorure de potassium

La comparaison des deux variétés a été faite selon les mêmes critères que pour le phosphate bicalcique (figure 20).

Les éléments K, Ca et Mg évoluent de façon fort semblable chez les deux variétés, bien que cette évolution ne soit pas significative pour Ca et Mg chez le Caturra (figure 20). Le chlore, quant à lui, augmente de façon plus importante chez le Java que chez le Caturra. Selon les doses d'engrais, la teneur chez le Caturra varie entre 97 et 99 % de celle du Java pour le potassium, 106 et 111 % pour le calcium, 91 et 95 % pour le magnésium, 91 et 124 % pour le chlore.

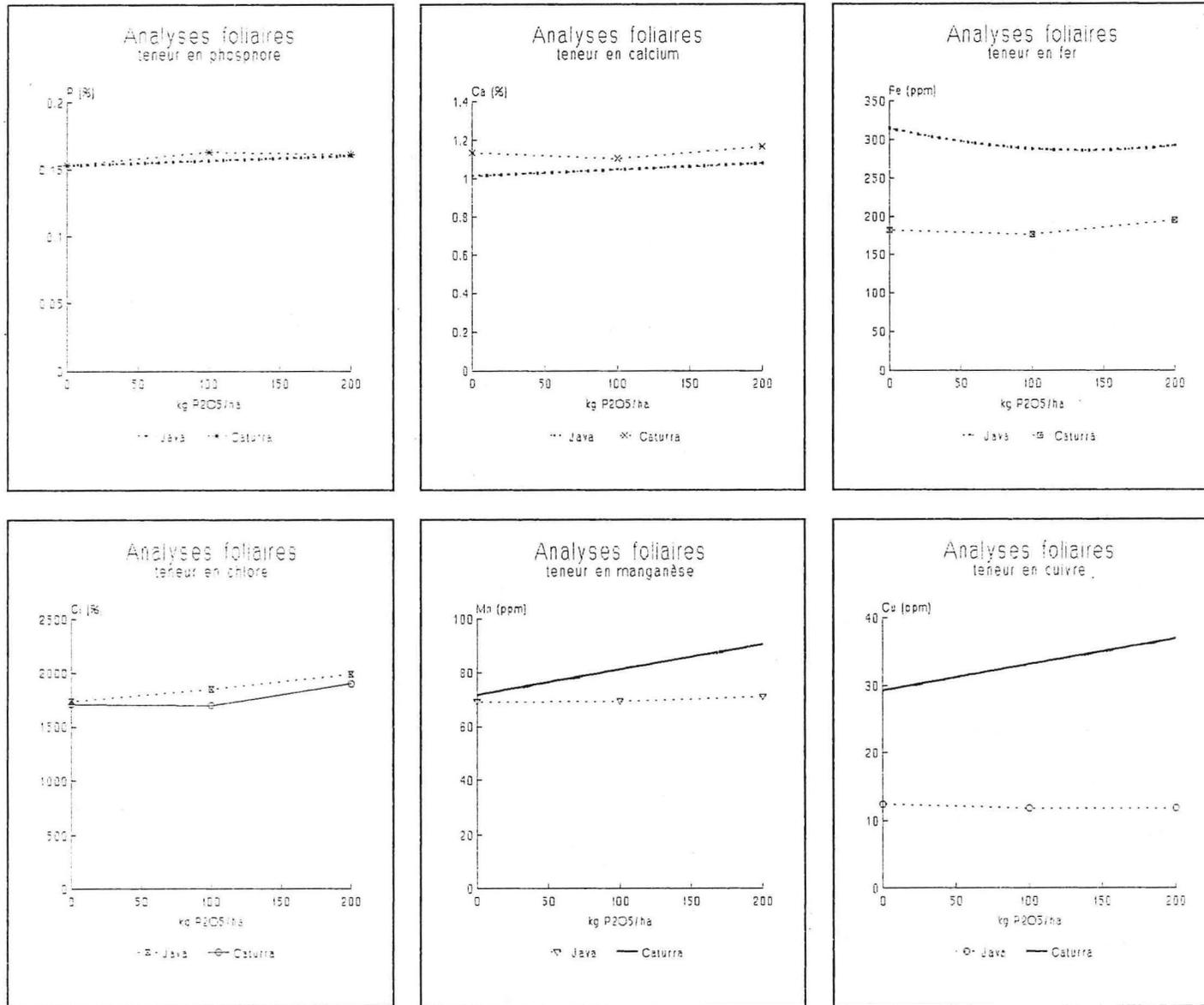


Figure 19. Analyses foliaires du Java et du Caturra des essais NPK ; effet du phosphate bicalcique.

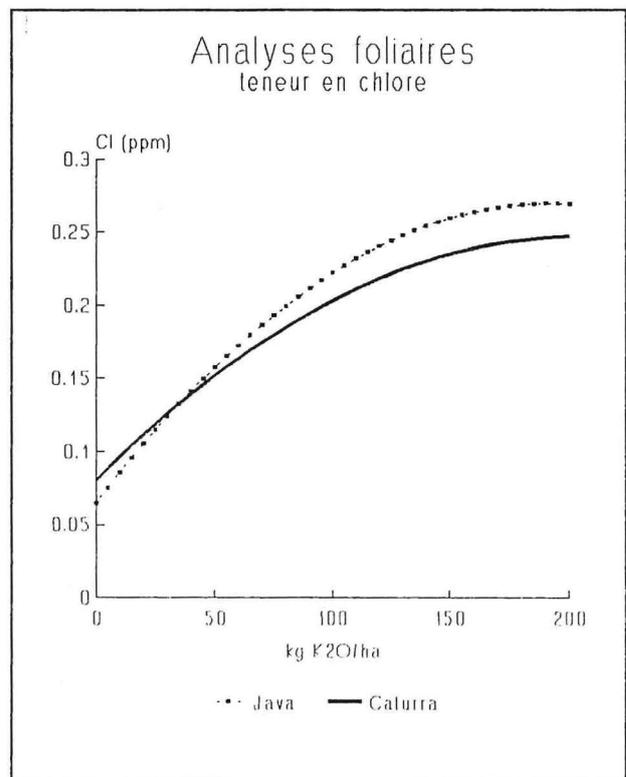
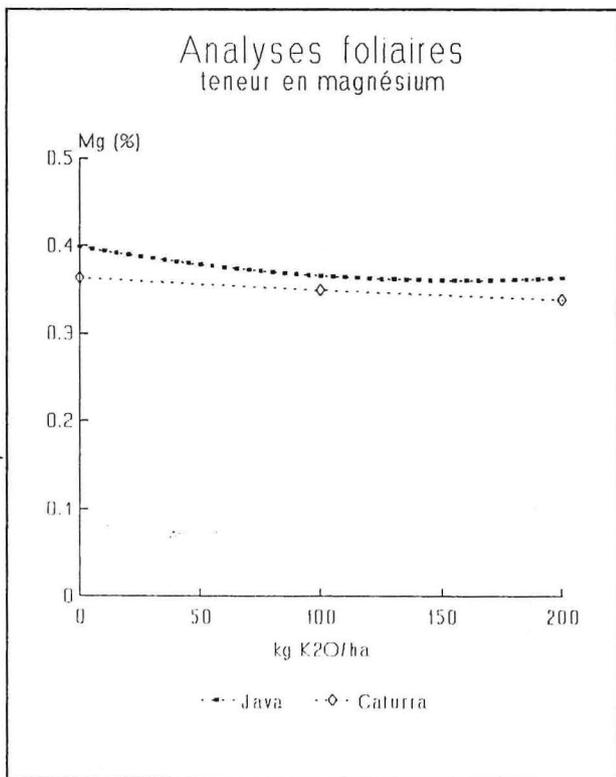
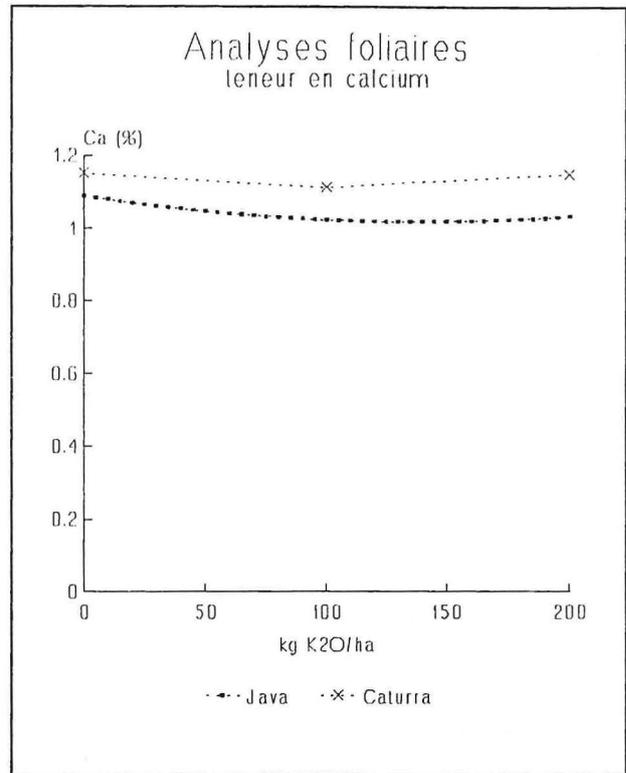
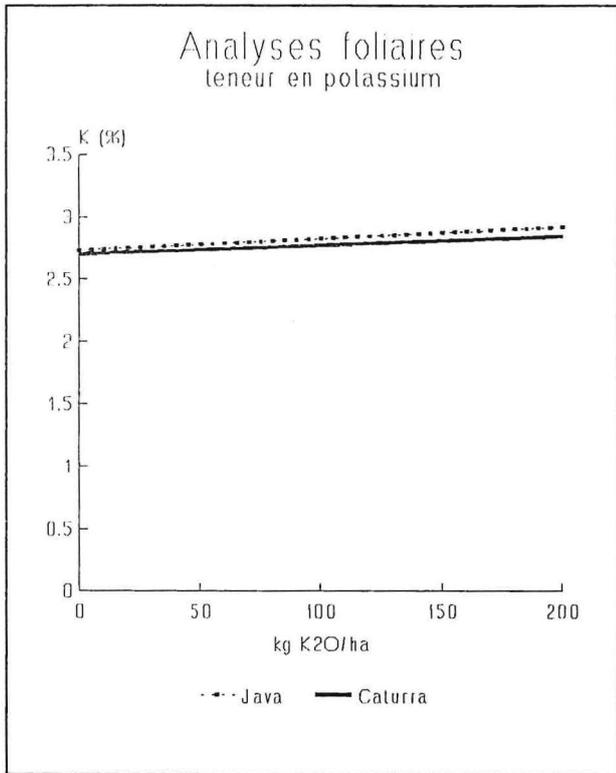


Figure 20. Analyses foliaires du Java et du Caturra des essais NPK ; effet du chlorure de potassium.

4.2. Productions

Tableau 26. Doses d'azote et productions.

variété	densité de plantation	maximum de la courbe				dose de N optimale pour prix café = 400 F CFA			
		N kg		café marchand kg		N kg		café marchand kg	
		/ha	/caféier	/ha	/caféier	/ha	/caféier	/ha	/caféier
Java (Ja)	1 666	391	0,235	1 712	1,028	350	0,210	1 700	1,020
Caturra (Ca)	3 333	459	0,138	1 647	0,494	401	0,120	1 628	0,488
% Ca/Ja	200	117	59	96	48	115	57	96	48

Dans les essais de doses d'azote, où la présence d'un témoin sans engrais et le nombre de doses testées (six) permettent la meilleure étude de l'influence de l'apport d'azote sur la production, on observe (tableau 26, figure 21) que les productions à l'hectare sont du même ordre de grandeur pour les deux variétés (Ca = 96 % de Ja pour la dose maximale ou optimale d'azote) et que la production par caféier chez le Caturra est proche de la moitié de celle du Java (48 %). Les doses maximales d'azote sont également voisines (Ca = 117 % de Ja pour la dose maximale et 115 % pour la dose optimale) lorsqu'elles sont exprimées en doses par hectare et donc, lorsqu'elles sont exprimées en doses par caféier, près de deux fois inférieures pour le Caturra par rapport au Java (59 % et 57 %). En ce qui concerne la fertilisation azotée, et bien que les essais aient été réalisés avec deux variétés différentes, lorsqu'une dose est préconisée à la suite des résultats d'une expérimentation, il est logique de préconiser pour des champs plantés à des densités différentes et dont le potentiel de production est équivalent, une dose du même ordre de grandeur par unité de surface et non par caféier, cette dose pouvant être augmentée de 17 % lorsque la densité de plantation est doublée (tableau 26), et donc de 1,7 % pour une augmentation de densité de plantation de 10 %.

Il est intéressant de constater que la différence entre les doses optimales pour le Java et pour le Caturra diminue en même temps que l'optimum lui-même. Elle s'annule lorsque le prix du café est de 200 F CFA. En revanche, cette différence augmente en fonction des prix de vente du café. La plus grande différence (17 %) se situe au point maximal de la courbe.

Dans les essais NPK (figure 22), entre les trois doses effectives d'azote, les deux courbes de production sont assez semblables, avec une dose maximale d'azote un peu plus importante (+ 12 %) chez le Caturra.

Le phosphate bicalcique et le chlorure de potassium sont sans effet sur la production du Java comme sur celle du Caturra.

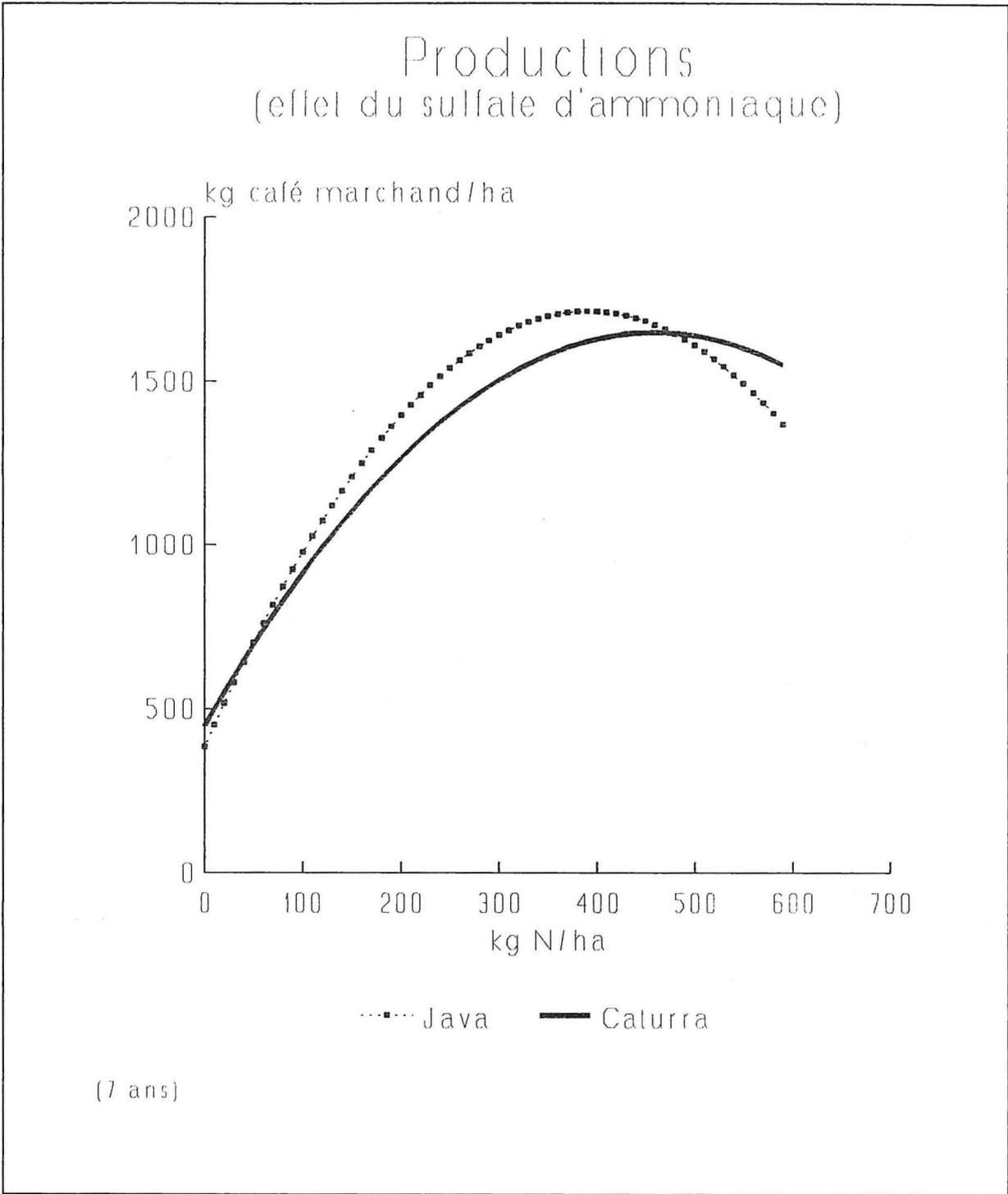


Figure 21. Productions du Java et du Caturra dans les essais de doses d'azote.

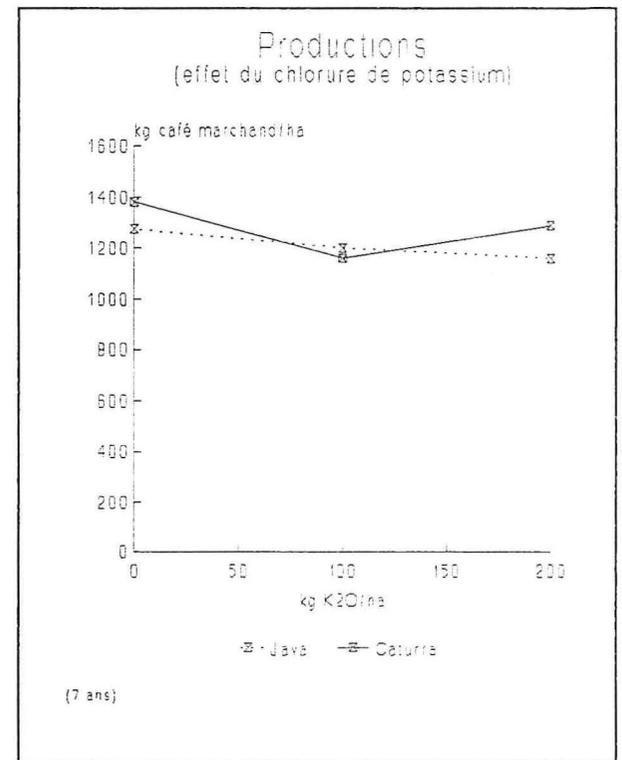
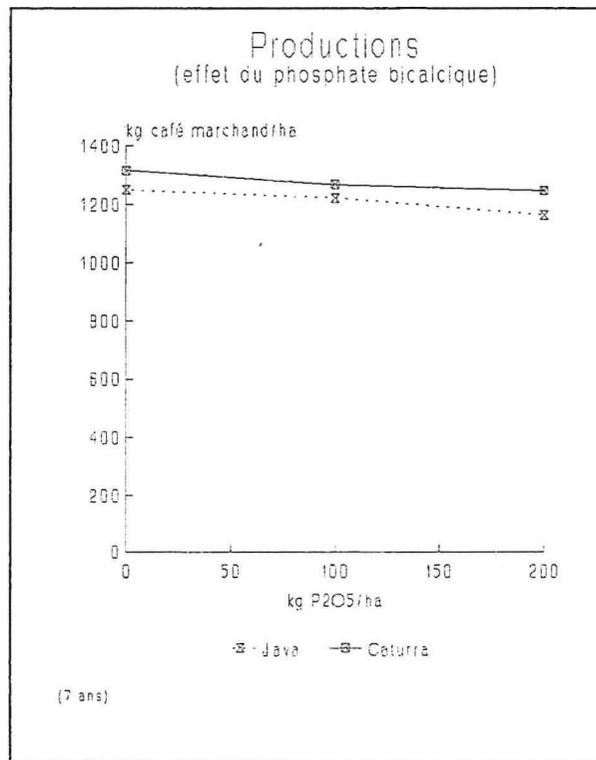
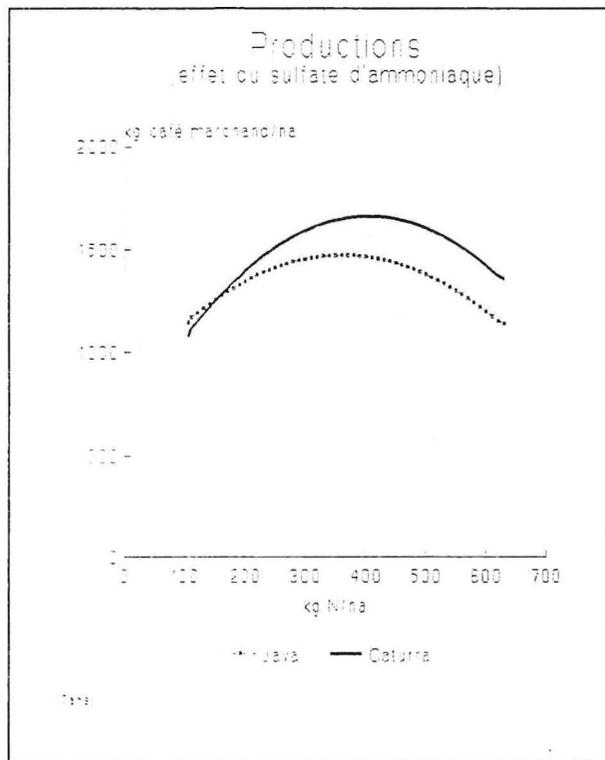


Figure 22. Productions du Java et du Caturra dans les essais NPK.

DEUXIEME PARTIE

SOLS FORTEMENT DESATURES

La station de Santa (photo 7) où ont été réalisés les essais est située dans la zone des sols humifères noirs, sur basalte. Ceux-ci ont le plus souvent un potentiel chimique assez faible et des teneurs en humus et en matière organique élevées. Ils occupent les régions de haute altitude, au-dessus de 1 500 m, en une bande qui suit les lignes de crêtes des provinces de l'Ouest et du Nord-Ouest, et qui s'étend sur une longueur de 180 km et une largeur de 10 à 30 km. On y dénombre 35 000 ha de caféières.

Le sol de la station de Santa est pauvre, fortement désaturé ; sa teneur en matière organique est inférieure à celle qu'on observe habituellement dans cette zone (tableau 27).

Tableau 27. Caractéristiques du sol dans le secteur des essais de Santa.

argile %	22	K méq %	0,16
limon %	8	Ca méq %	0,71
sable %	65	Mg méq %	0,22
C %	5,3	somme méq %	1,09
matière organique %	9,1	CEC méq %	31,1
N ‰	4,6	saturation %	3,5
C/N	11,5	Ca/Mg	3,23
P ass. ppm (Olsen-Dabin)	75	Mg/K	1,38
pH	5,1	B ppm	0,28

La station de Santa est située dans le département de la Mézam, à une altitude de 1 800 m par 5°48' de latitude nord. Le climat comporte une seule saison de pluies et une seule saison sèche (de novembre à février), dont la durée s'étend sur trois mois (tableau 28).

Tableau 28. Quelques caractéristiques climatiques de la région de Santa.

mois	pluies (mm) (1)	t (°C) (2)	insolation (h) (3)
J	10	17,9	7,40
F	35	19,5	6,63
M	148	19,7	4,88
A	204	18,0	4,59
M	233	17,8	5,44
J	289	16,3	5,16
J	269	16,2	2,99
A	254	16,6	2,39
S	332	17,2	3,51
O	310	17,6	5,21
N	67	17,1	7,52
D	16	16,9	7,52
année	2 167	17,6	5,27

(1) pluies moyennes mensuelles, calculées sur dix ans ;

(2) moyennes mensuelles des températures moyennes journalières, calculées sur trois ans ;

(3) moyennes mensuelles de la durée journalière de l'insolation, calculées sur un an, et exprimées en heures et centièmes d'heure ;

* , total ;

** , moyenne.

Les caractéristiques des facteurs climatiques sont représentées sur la figure 23.

1. Essai de doses d'azote

1.1. Matériel et méthodes

L'essai étudie l'influence de l'apport de doses d'azote sur les productions, sur l'évolution chimique du sol et sur l'alimentation minérale des caféiers. Ceux-ci appartiennent à la variété sélectionnée Java. Au début des essais, les caféiers sont âgés de quatre ans. Pendant leur jeune âge, ils ont reçu une dose uniforme d'engrais azoté.

L'essai est établi suivant un dispositif en blocs randomisés à cinq répétitions. Il comporte six traitements qui correspondent aux six doses d'engrais appliquées (sulfate d'ammoniaque à 21 % d'azote). Il contient des parcelles utiles (90 m²) de 20 caféiers plantés sans ombrage à un écartement de 3 m x 1,5 m (2 222 caféiers/ha), taillés en tige unique écimée. Les engrais sont appliqués sur le sol, sans enfouissement, sous la jupe des caféiers.

traitements	N kg/ha/an	Sulfate d'ammoniaque kg/ha/an
N0	0,0	0
N1	52,5	250
N2	105,0	500
N3	210,0	1000
N4	420,0	2000
N5	630,0	3000

1.2. Résultats

1.2.1. Evolution chimique du sol en dehors de la zone d'épandage

Après sept années d'épandage d'engrais, des échantillons de sol ont été prélevés (0-20 cm de profondeur) à mi-distance entre les caféiers de la ligne, soit à 1 m des troncs. Ils ont été analysés par le laboratoire de l'IRA à Ekona.

Tableau 29. Caractéristiques du sol situé en dehors de la zone d'application de l'engrais.

traitement	N tot. %	pH ppm	P ass. még %	K még %	Ca még %	Mg még %	S még %	CEC	Mg/K	M.O. %
N0	4,5	4,9 a	4,4 b	0,21	0,98	0,95	2,14	40	4,5	9,6
N1	4,5	4,6 ab	4,8 b	0,23	0,79	0,81	1,83	40	3,5	9,7
N2	4,4	4,7 ab	5,4 b	0,19	0,90	0,78	1,87	40	4,1	10,0
N3	4,8	4,5 b	7,4 a	0,23	0,52	0,84	1,59	41	4,7	9,6
N4	4,8	4,2 c	8,2 a	0,16	0,56	0,82	1,54	41	5,1	9,8
N5	4,5	4,1 c	7,6 a	0,23	0,39	0,88	1,50	40	3,8	10,0
sign.	0	--	++	0	0	0	0	0	0	0
CV (%)	7	4	20	38	44	16	23	4	30	4
lin.	0	--	++	0	--	0	-	0	0	0
curv.	0	xx	xx	0	x	0	x	0	0	0

N.B. :- P assimilable, méthode Kurtz-Bray ;

- test de Keuls-Newman, les lettres différent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification de l'analyse de variance ;

- lin., niveau de signification de la régression linéaire ;

- curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;

- niveaux -, +, x (P = 0,05) ; --, ++, xx (P = 0,01).

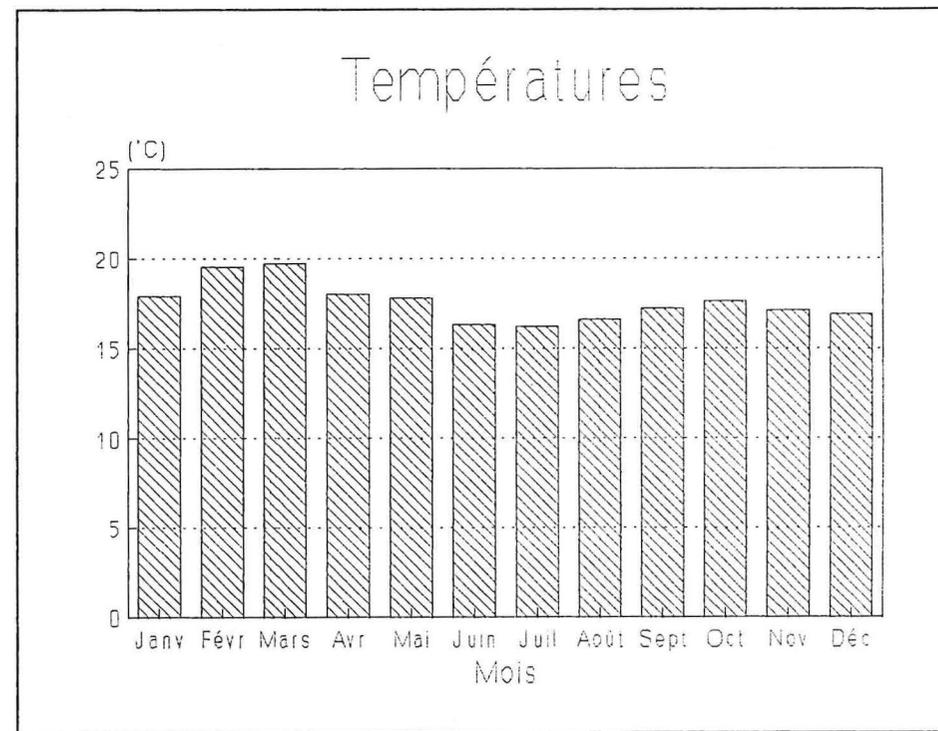
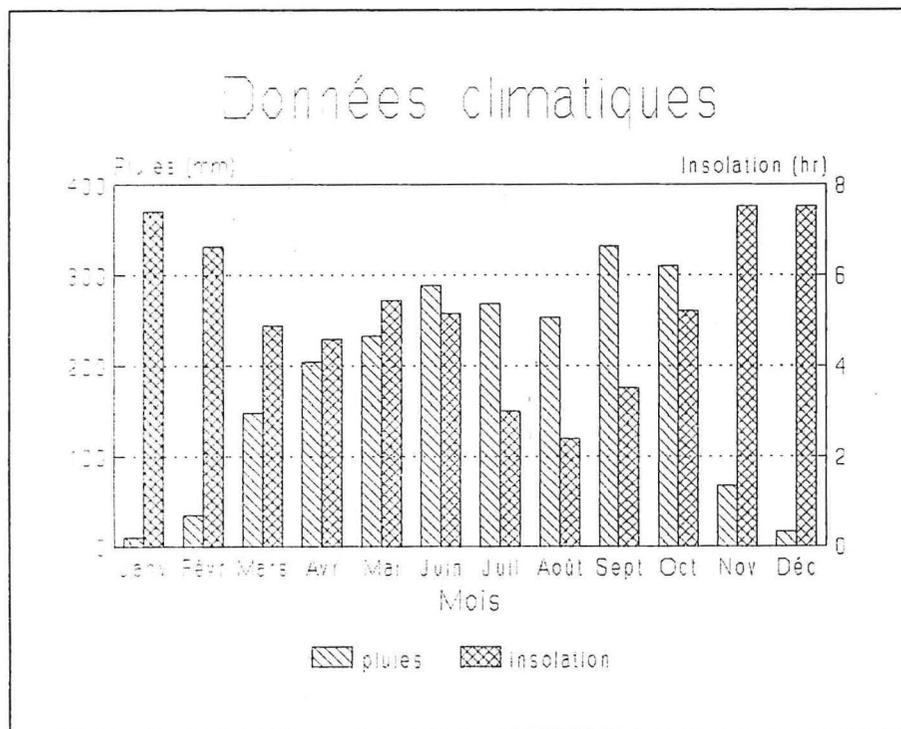


Figure 23. Données climatiques : pluies et températures moyennes mensuelles ; insolation journalière moyenne mensuelle.

On constate que le pH est très faible de même que la teneur en calcium et la somme des bases échangeables (tableau 29). Les teneurs en phosphore assimilable et en potassium sont faibles. L'analyse de la variance montre que l'apport de sulfate d'ammoniaque diminue significativement le pH du sol et augmente significativement sa teneur en phosphore assimilable. Le calcul de la régression des teneurs des éléments dans le sol sur les doses d'engrais montre qu'il diminue aussi la teneur en calcium et la somme des bases échangeables.

1.2.2. Evolution chimique du sol dans la zone d'épandage

Après huit années d'apport d'azote, des échantillons de sol (0-20 cm) ont été prélevés sous la jupe des caféiers, dans la zone où l'engrais a été appliqué. Un échantillon de sol de chaque parcelle a été analysé par le laboratoire du CIRAD à Montpellier (tableau 30).

Tableau 30. Caractéristiques du sol situé dans la zone d'application de l'engrais.

traitement	N tot . ‰	pH	K mécq %	Ca mécq %	Mg mécq %	S mécq %	Mg/K
N0	4,72	5,03	0,14	0,43	0,16	0,73	1,14
N1	5,07	4,80	0,14	0,25	0,12	0,51	0,86
N2	5,15	4,75	0,13	0,27	0,12	0,52	0,92
N3	4,97	4,76	0,14	0,22	0,10	0,46	0,71
N4	5,27	4,56	0,14	0,21	0,10	0,45	0,71
N5	5,36	4,59	0,15	0,20	0,10	0,45	0,67
sign.	0	0	0	0	0	0	0
CV (%)	4	6	13	52	31	32	30
lin.	+	-	0	0	-	0	-
curv.	0	x	0	0	x	0	x

N.B. : - bases échangeables extraites à l'acétate d'ammonium ;
 - test de Keuls-Newman, les lettres différent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
 - sign., niveau de signification de l'analyse de variance ;
 - lin., niveau de signification de la régression linéaire ;
 - curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;
 - niveaux -, +, x (P = 0,05) ; -, ++, xx (P = 0,01).

Lorsqu'on compare ces données aux normes habituellement citées, on observe que le pH du sol est très faible, de même que les teneurs en bases échangeables. L'équilibre Mg/K est également déficient. L'azote est en revanche bien représenté.

L'analyse de la variance ne révèle aucun effet significatif de l'application du sulfate d'ammoniaque sur la teneur des différents éléments dans le sol. L'analyse des régressions des différentes teneurs sur les doses appliquées montre cependant que l'apport de sulfate d'ammoniaque entraîne une augmentation linéaire de la teneur en azote et une diminution linéaire ou curvilinéaire du pH et de certains éléments, significative au seuil de probabilité de 5 % pour le magnésium, significative au seuil de probabilité de 7 % pour le calcium et pour la somme des bases échangeables. Il diminue également le rapport Mg/K, déjà très faible chez le témoin. L'influence des apports d'azote est beaucoup moins marquée que sur les sols fertiles. Les teneurs en bases échangeables, très faibles au départ de l'essai, ne peuvent être fortement diminuées par les traitements. La figure 24 représente l'évolution des caractéristiques du sol en pourcentage du témoin.

Analyses sol (effet du sulfate d'ammoniaque)

teneur en éléments

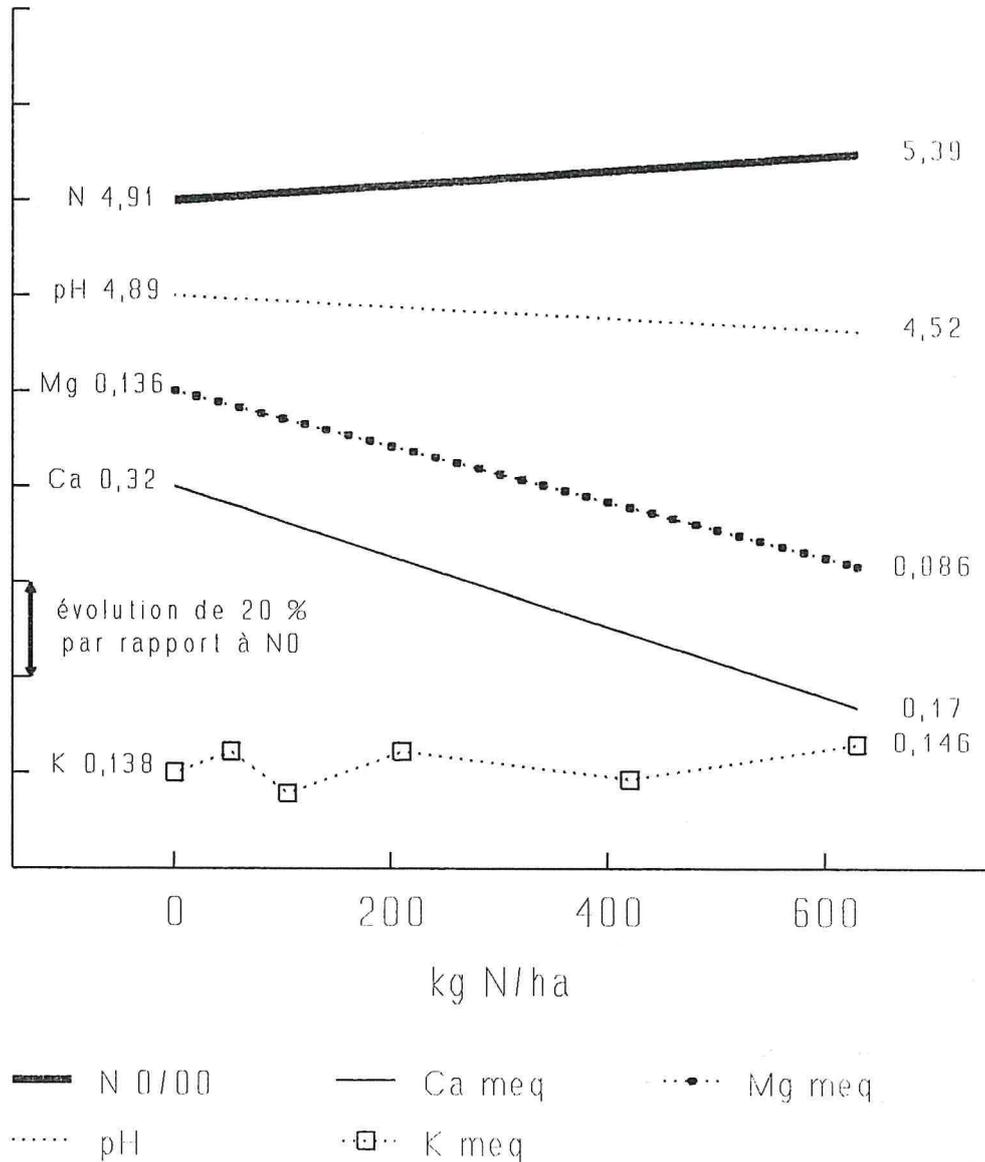


Figure 24. Evolution des caractéristiques du sol en pourcentage du témoin (zone d'épandage). Niveau de signification * : K ; ** : N, Ca, Mg, pH.

1.2.3. Analyses foliaires

Des échantillons de feuilles de caféiers ont été prélevés pour analyse, six et huit ans après la mise en place de l'essai, environ trois mois après la floraison. Ils ont été analysés par le laboratoire du CIRAD à Montpellier. Les résultats figurent dans le tableau 31 et sur la figure 25.

Tableau 31. Résultats des analyses foliaires (moyenne des deux prélèvements).

traitement	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	B (ppm)	Cl (ppm)	Cu (ppm)
N0	2,62 b	0,16 a	1,11 a	1,02 a	0,50	165	390 c	8,8 a	18,2 a	1704 a	30,6 a
N1	3,25 a	0,14 b	0,86 b	0,92 ab	0,44	167	607 bc	8,6 ab	13,6 b	1224 b	27,4 ab
N2	3,29 a	0,14 b	0,73 b	0,89 ab	0,49	179	590 bc	7,4 b	11,4 bc	1148 b	29,0 ab
N3	3,34 a	0,14 b	0,76 b	0,84 b	0,37	155	758 ab	8,2 ab	10,2 bc	1082 b	26,6 ab
N4	3,41 a	0,14 b	0,70 b	0,82 b	0,42	168	747 ab	8,6 ab	8,2 c	866 b	25,2 ab
N5	3,45 a	0,14 b	0,72 b	0,75 b	0,37	170	866 a	9,4 a	8,0 c	808 b	24,0 c
sign.	++	--	--	--	0	0	++	xx	--	--	-
CV (%)	4	7	18	11	25	14	21	9	20	25	11
lin.	++	-	-	--	0	0	++	0	--	--	--
curv.	xx	xx	xx	xx	0	0	xx	0	xx	xx	xx
log.	xx										

NB : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant).

- sign., niveau de signification de l'analyse de la variance ;
- lin., niveau de signification de la régression linéaire ;
- curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;
- log., régression logarithmique significativement supérieure aux autres régressions ;
- niveaux -, +, x (P = 0,05) ; --, ++, xx (P = 0,01).

L'apport de sulfate d'ammoniaque a influencé la nutrition des arbres (figure 25). On met en évidence une corrélation hautement significative entre la teneur de plusieurs éléments dans les feuilles et les doses d'azote, positive pour les éléments N et Mn, négative pour les éléments P, K, Ca, B, Cl et Cu. La plupart de ces résultats avaient également été obtenus dans les essais réalisés sur sol fertile. Les régressions curvilinéaires et linéaires ne sont pas significativement différentes.

Par rapport aux normes du Kenya et du Kivu, les teneurs foliaires sont faibles ou très faibles pour le phosphore, le potassium, le calcium, le zinc et le bore. Elles sont normales pour le fer et le cuivre, elles sont assez fortes pour le magnésium et très fortes pour le manganèse. La teneur en azote est normale chez le témoin non fertilisé et élevée dans tous les traitements fertilisés. Ces résultats peuvent être comparés à ceux qui sont signalés dans la littérature et qui ont été cités dans l'étude de l'essai de doses d'azote réalisé avec la variété Java sur sol fertile.

1.2.4. Productions

Dans le tableau 32 sont inscrites les récoltes des différents traitements.

L'analyse statistique (analyse de la variance) des rendements moyens de neuf années départage les traitements en deux groupes homogènes où seule la dose d'azote la plus forte est significativement dépressive par rapport au témoin sans engrais. On peut calculer que ce résultat se manifeste pour les cumuls des productions dès la deuxième année d'épandage.

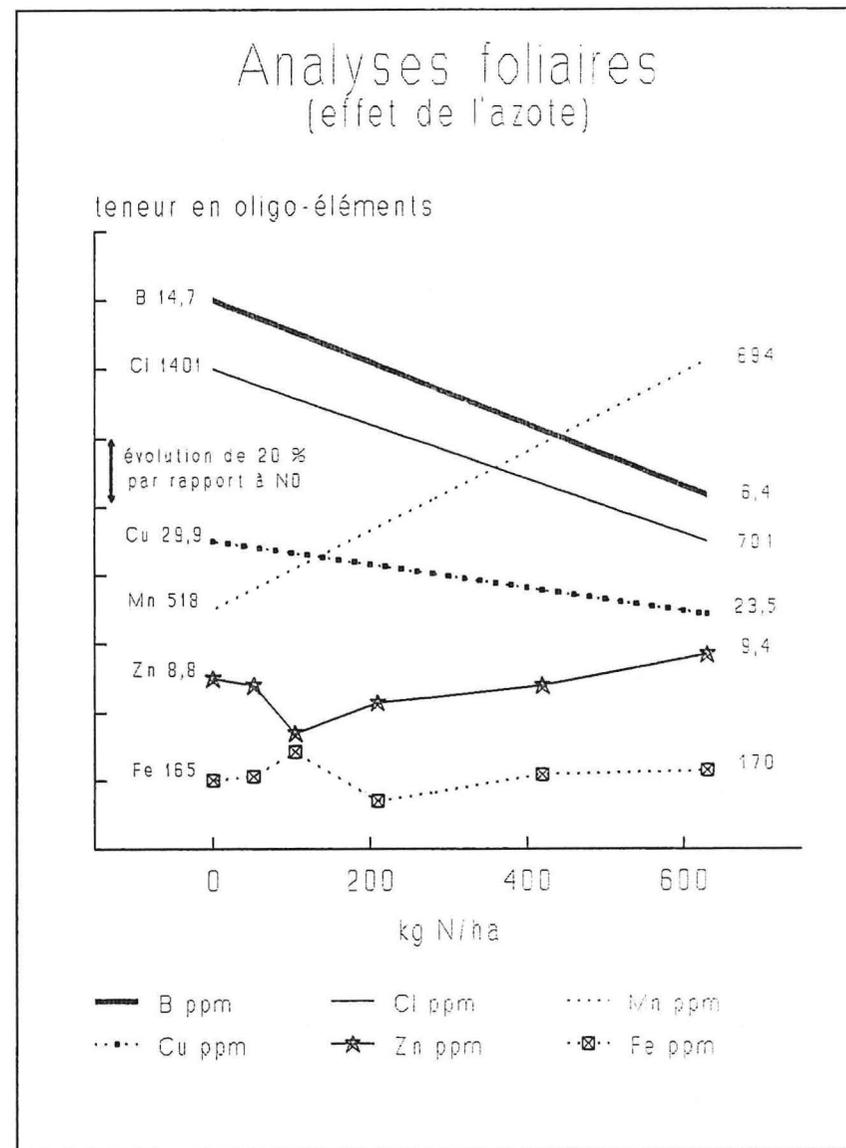
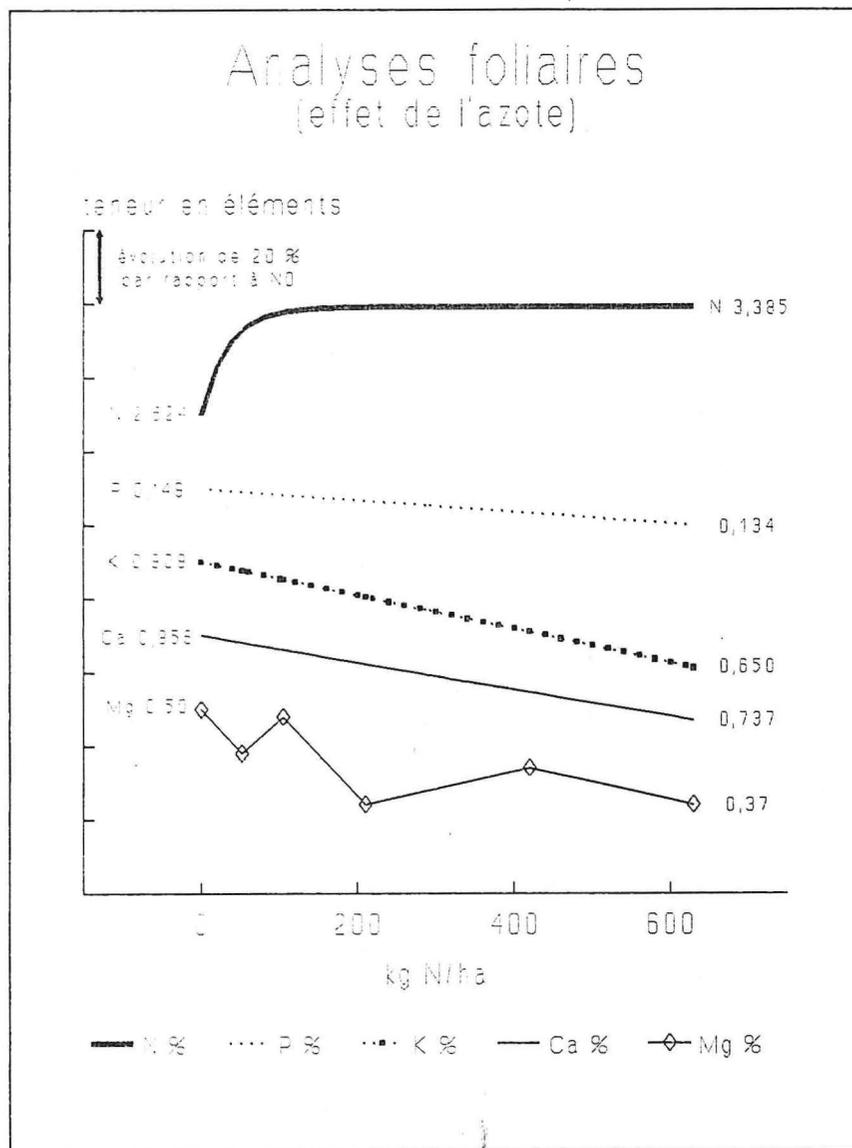


Figure 25. Evolution de la teneur des éléments dans les feuilles (pourcentage du témoin). Niveau de signification * : Mg, Zn, Fe ; ** : P, K, Ca, B ; **** : N.

Tableau 32. Productions de café marchand en kg /ha/an.

traitement	année									moyenne 9 ans	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	prod.	% de N0
N0	644 a	1042	1103 ab	601	348	217	1045 a	271 a	366	626 a	100
N1	592 ab	801	1236 a	552	388	328	869 ab	292 a	406	607 ab	97
N2	529 ab	821	995 ab	477	370	282	713 ab	267 a	296	528 ab	84
N3	444 ab	764	878 ab	491	371	294	733 ab	285 a	291	506 ab	81
N4	376 ab	816	924 ab	434	301	331	645 b	179 b	253	473 ab	76
N5	336 b	718	737 b	432	509	298	560 b	245 ab	233	452 b	72
sign.	-	0	-	0	0	0	--	0	0	-	
CV (%)	32	24	24	22	31	35	25	20	40	16	
lin.							--				
curv.							xx				

NB : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification de l'analyse de la variance ;
- lin., niveau de signification de la régression linéaire ;
- curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;
- niveau - : P = 0,05 ; --, xx : P = 0,01.

Pour les neuf récoltes, la régression de la production sur les doses d'azote a été calculée. Les régressions linéaire et curvilinéaire sont toutes deux hautement significatives (figure 26). Elles ne diffèrent pas significativement l'une de l'autre. Les formules sont les suivantes :

droite de régression : $Y = 593 - 0,2601 X$

courbe de régression : $Y = 621 - 0,6625 X + 0,0006 X^2$

où X = azote kg/ha/an

Y = production moyenne de café marchand en kg/ha/an

Sur ce sol fortement désaturé, la production décroît de façon linéaire ou quasi-linéaire en fonction des doses d'azote (photo 8). Cela confirme la validité du diagnostic sol qui recommande une correction cationique préalable ou simultanée aux apports d'azote. La chute de rendement est certainement due à un appauvrissement du sol en éléments déjà déficients au départ. Il existe d'ailleurs une corrélation significative entre le pH moyen du sol des différents traitements dans la zone d'épandage et leur production ($r = 0,90$). Cette corrélation est également significative lorsqu'elle est calculée pour l'ensemble des trente parcelles sans tenir compte des traitements.

2. Essai d'engrais NPK

2.1. Matériel et méthodes

Les parcelles sont identiques à celles de l'essai précédent et les caféiers sont conduits de la même façon. L'essai est établi suivant un dispositif factoriel 3^3 à une seule répétition. L'azote est apporté sous forme de sulfate d'ammoniaque (21 % N), le phosphore sous forme de phosphate bicalcique (38 % P_2O_5 et 30 % CaO) et le potassium sous forme de chlorure de potassium (60 % K_2O). Les traitements sont constitués par toutes les combinaisons (27) entre les trois éléments, chacun d'eux étant présent à trois niveaux.

Productions (effet de l'azote)

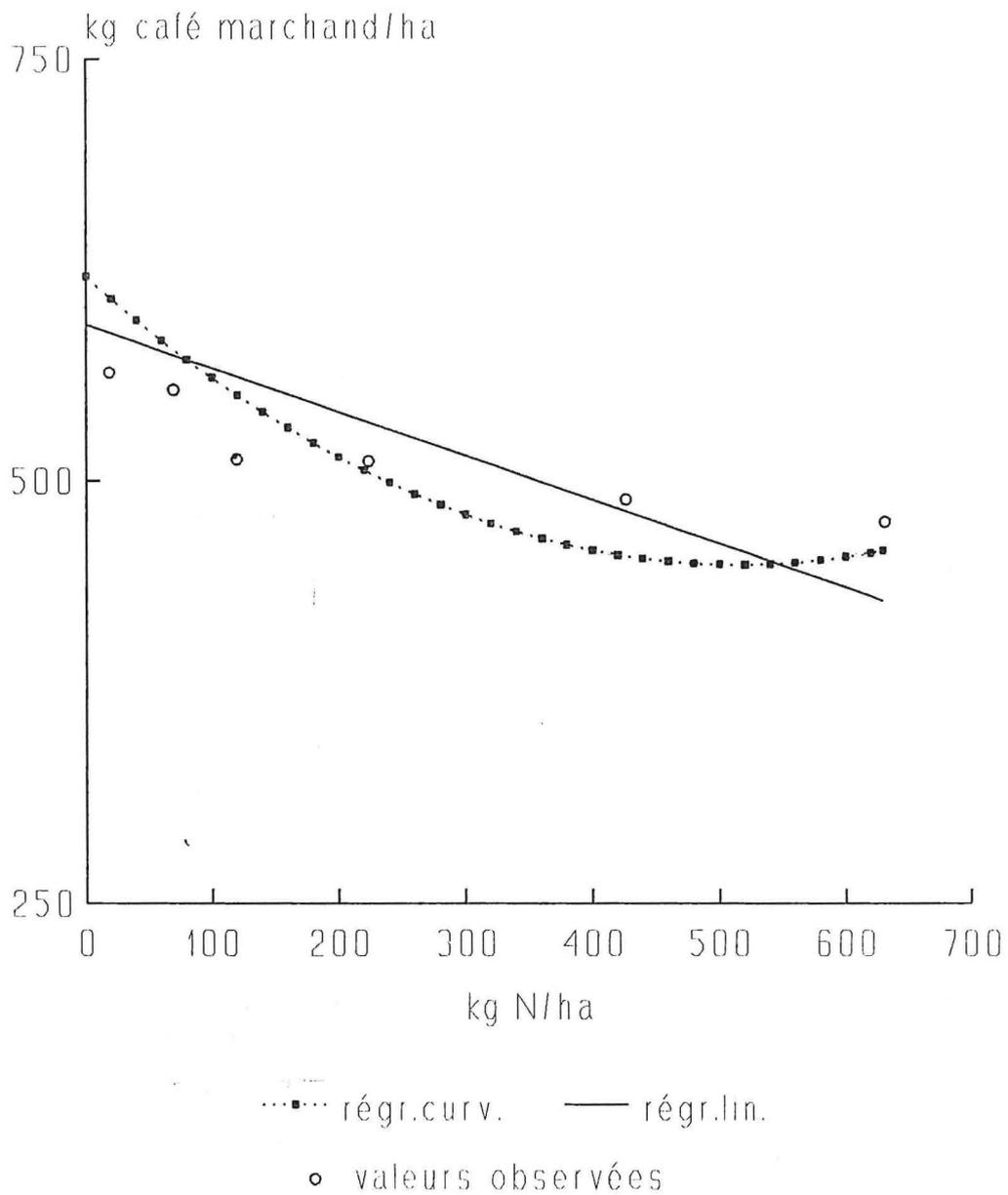


Figure 26. Droite et courbe de production en fonction des doses d'azote.

Les engrais sont apportés quatre fois par an. Les doses d'engrais, par hectare et par an, sont les suivantes :

	élément kg/ha/an			
	dose 1	dose 2	dose 3	
N	105	210	630	(N)
P	0	100	200	(P ₂ O ₅)
K	0	100	200	(K ₂ O)

	engrais kg/ha/an			
	dose 1	dose 2	dose 3	
N	500	1000	3000	(sulfate d'ammoniaque)
P	0	250	500	(phosphate bicalcique)
K	0	166,7	333,5	(chlorure de potassium)

Les observations sont les mêmes que celles de l'essai précédent.

2.2. Résultats

2.2.1. Evolution chimique du sol en dehors de la zone d'épandage

Après quatre années d'épandage d'engrais, des échantillons de sol ont été prélevés (0-20 cm de profondeur) à mi-distance entre les caféiers dans la ligne, soit à 1 m des troncs. Ils ont été analysés par le laboratoire de l'IRA à Ekona (tableau 33).

Tableau 33. Caractéristiques du sol situé en dehors de la zone d'application des engrais.

traitement	N tot. ‰	pH	P ass. ppm	K még %	Ca még %	Mg még %	S még %	CEC még %	Mg/K	M.O. %
N1	4,8	4,7	8,4	0,23	1,07	0,57	1,89	42	2,5	9,9
N2	4,8	4,8	5,9	0,23	1,11	0,92	2,28	44	4,0	9,6
N3	5,2	4,2	8,4	0,24	0,68	0,77	1,90	45	3,2	10,0
lin.	+	--	0	0	0	0	0	+	0	0
quad.	0	0	0	0	0	+	0	0	+	0
P0	4,9	4,5	3,2	0,21	0,56	0,65	1,44	43	3,1	10,0
P1	5,0	4,5	7,3	0,24	1,02	0,77	2,25	44	3,2	9,7
P2	4,9	4,7	12,2	0,25	1,27	0,84	2,39	43	3,4	9,9
lin.	0	+	+	0	0	0	+	0	+	0
quad.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K0	4,9	4,5	6,2	0,15	0,96	0,81	1,93	43	5,4	10,0
K1	4,8	4,7	8,0	0,26	1,01	0,72	2,01	43	2,8	9,8
K2	5,1	4,5	8,6	0,30	0,89	0,84	2,13	45	2,8	9,8
lin.	0	0	0	++	0	0	0	0	--	0
quad.	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0
CV (%)	7	4	105	20	60	31	39	7	32	4

N.B. : - P assimilable, méthode Kurtz-Bray ;

- lin., niveau de signification de l'effet linéaire (analyse de variance) ;

- quad., niveau de signification de l'effet quadratique (analyse de variance) ;

- niveaux -, + (P = 0,05) ; --, ++ (P = 0,01).

Comme dans l'essai précédent, on constate que le pH du sol est très faible, de même que les teneurs en bases échangeables. L'azote est bien représenté. L'essai ne comportant qu'une seule répétition, l'analyse de la variance a été calculée uniquement pour les effets principaux, en incluant la variance des interactions dans la variance résiduelle. On observe, dès la quatrième année, une certaine évolution du sol en dehors de la zone

d'épandage, à mi-chemin entre les caféiers. L'apport d'azote augmente la teneur en azote total et la capacité d'échange du sol de façon linéaire, et la teneur en magnésium et le rapport Mg/K de façon quadratique ; il diminue le pH de façon linéaire. L'apport de phosphate bicalcique augmente la teneur en phosphore assimilable, la somme des bases échangeables, le rapport Mg/K et le pH de façon linéaire. L'apport de chlorure de potassium augmente la teneur en potassium de façon linéaire et le pH de façon quadratique ; il diminue le rapport Mg/K de façon linéaire.

2.2.2. Evolution chimique du sol dans la zone d'épandage

Après huit années d'apports, des échantillons de sol ont été prélevés sous la jupe des caféiers, dans la zone où l'engrais a été appliqué. Un échantillon de sol de chaque parcelle a été analysé par le laboratoire du CIRAD à Montpellier (tableau 34).

Tableau 34. Caractéristiques du sol situé dans la zone d'application de l'engrais.

traitement	N tot. ‰	pH	P ass. ppm	K méq %	Ca méq %	Mg méq %	S méq %	Mg/K	B sol. ppm	Cu ppm	Zn ppm	Mn ppm	Fe ppm
N1	4,87 b	5,24 a	151	0,33 a	1,17 ab	0,18	1,68 a	0,55	0,34	1,49	0,16	38	19,2
N2	5,72 a	5,11 a	171	0,34 a	1,27 a	0,19	1,80 a	0,56	0,37	1,01	0,08	31	15,8
N3	5,78 a	4,59 b	181	0,22 b	0,76 b	0,14	1,12 b	0,64	0,45	0,82	0,16	38	22,1
sign.	0	--	0	--	-	0	-	0					
lin.	+	--	0	-	0	-	-	0					
curv.	++	--	0	0	0	0	0	0					
P0	5,41	4,97	75 c	0,29	0,56 b	0,16	1,01 b	0,55 a					
P1	5,40	5,06	169 b	0,31	1,12 a	0,17	1,60 a	0,55 a					
P2	5,56	4,92	259 a	0,29	1,53 a	0,17	1,99 a	0,59 a					
sign.	0	0	++	0	++	0	++	0					
lin.	0	0	++	0	++	0	++	0					
curv.	0	0	++	0	++	0	++	0					
K0	5,52	4,86 b	194	0,16 c	1,27	0,17	1,60	1,06 a					
K1	5,25	5,07 a	157	0,32 b	0,96	0,15	1,43	0,47 b					
K2	5,60	5,01 a	151	0,41 a	0,98	0,19	1,58	0,46 c					
sign.	0	+	0	++	0	0	0	--					
lin.	0	0	0	++	0	0	0	--					
curv.	0	0	0	++	0	0	0	--					
CV (%)	14	3	43	22	35	30	29	25					
inter.	0	0	0	0	0	0	0	0					

N.B. : - P assimilable, méthode Olsen-Dabin ;

- bases échangeables extraites à l'acétate d'ammonium ;
- test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;
- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;
- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;
- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;
- niveaux +, -, x (P = 0,05) ; ++, --, xx (P = 0,01).

Les données du tableau 34 diffèrent parfois de celles du tableau 33 où figurent les résultats de l'analyse des échantillons de sol prélevés en dehors de la zone d'épandage. Les analyses ont été effectuées dans des laboratoires différents et parfois par des méthodes différentes.

Par rapport aux niveaux observés dans le traitement à la dose faible, les doses fortes de sulfate d'ammoniaque ont entraîné une diminution significative du pH du sol, de sa teneur en potassium, en calcium et en magnésium et de la somme des bases échangeables. Ces modifications sont mises en évidence par l'analyse de la variance ou par le calcul des

régressions (figure 27).

L'apport de phosphate bicalcique a entraîné une augmentation hautement significative de la teneur du sol en phosphore, en calcium et de la somme des bases échangeables.

L'apport de chlorure de potassium a entraîné une augmentation hautement significative de la teneur du sol en potassium. Le rapport Mg/K, déjà faible dans les parcelles sans engrais potassique, diminue de façon hautement significative lorsqu'on apporte cet engrais.

Lorsqu'on compare ces données aux normes citées dans la littérature, on observe que, comme dans l'essai précédent, le pH du sol est très faible, de même que les teneurs en bases échangeables. L'équilibre Mg/K est également déficient. L'azote est en revanche bien représenté.

Les oligo-éléments B, Cu, Zn, Mn et Fe ont été dosés dans une seule parcelle des traitements N1, N2 et N3, qui n'avaient reçu ni phosphore ni potassium. La teneur en bore est assez faible, surtout dans les parcelles qui ont reçu la dose faible d'azote. La teneur en zinc est très faible dans les trois traitements.

2.2.3. Analyses foliaires

Des échantillons de feuilles de caféiers ont été prélevés pour analyse, quatre et six ans après la mise en place de l'essai. Ils ont été analysés par le laboratoire du CIRAD. Les résultats (moyenne des deux prélèvements) figurent dans le tableau 35.

Tableau 35. Résultats des analyses foliaires.

traitement	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	B ppm	Cl ppm	Cu ppm
N1	2,333 c	0,196 a	2,373 a	1,024 a	0,300	190	351 b	9,7	15,4 a	3670 a	27,5 a
N2	2,532 b	0,190 a	2,313 a	1,088 a	0,350	174	368 b	8,4	11,9 b	3700 a	26,1 a
N3	3,470 a	0,162 b	1,653 b	0,924 b	0,343	166	804 a	9,3	6,4 c	1420 b	21,0 b
sign.	++	--	--	--	0	0	++	0	--	--	--
lin.	++	-	0	-	0	0	++	0	--	--	--
curv.	++	0	0	0	0	0	++	0	--	--	--
P0	2,692 a	0,136 c	2,100	0,892 c	0,352	180	515	8,8	13,1 a	2880	27,1 a
P1	2,851 a	0,196 b	2,103	1,026 b	0,322	173	530	9,0	10,0 b	2840	24,4 ab
P2	2,792 a	0,216 a	2,136	1,117 a	0,319	177	478	9,7	10,7 b	3070	23,1 b
sign.	0	++	0	++	0	0	0	0	--	0	-
lin.	0	++	0	++	0	0	0	0	0	0	0
curv.	0	++	0	++	0	0	0	0	0	0	0
K0	3,015 a	0,184	0,815 c	1,089 a	0,491 a	151 b	482	9,1	12,1	1270 b	24,0
K1	2,698 b	0,184	2,604 b	0,988 b	0,260 b	189 a	532	8,8	11,3	3890 a	24,7
K2	2,622 b	0,180	2,919 a	0,958 b	0,242 b	189 a	509	9,6	10,3	3630 a	25,9
sign.	--	0	++	-	--	+	0	0	0	++	0
lin.	0	0	++	0	--	++	0	0	0	++	0
curv.	0	0	++	0	--	++	0	0	0	++	0
inter.	0	0	NPxNKx	0	0	0	0	0	0	0	0
CV (%)	5	5	7	7	19	14	17	14	14	8	11

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;

- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;

- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;

- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;

- niveau x (P = 0,05) ; xx (P = 0,01).

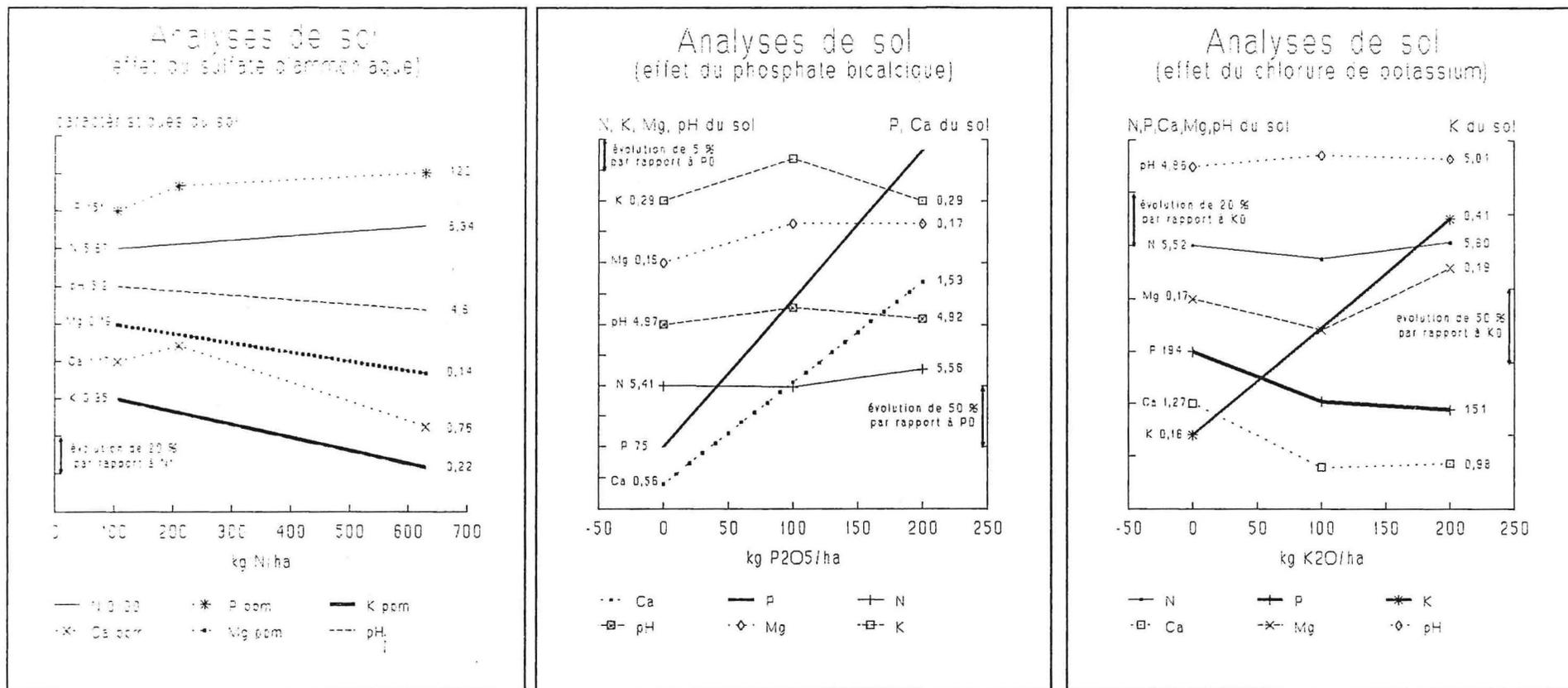


Figure 27. Evolution du sol de la zone d'épandage sous l'influence des engrais (pourcentage du témoin).

Niveau de signification :

- effet de N : * : P, Ca
- ** : N, K, Mg, pH
- effet de P : * : N, K, Mg, pH
- ** : P, Ca
- effet de K : * : N, P, Ca, Mg, pH
- ** : K.

L'influence des engrais se manifeste de façon hautement significative sur les niveaux de différents éléments dans les feuilles (figure 28).

Les doses fortes de sulfate d'ammoniaque entraînent une augmentation significative de l'azote et du manganèse, et une diminution significative du phosphore, du potassium, du calcium, du bore, du cuivre et surtout du chlore dans les feuilles, par rapport aux valeurs observées dans le traitement avec la dose faible de sulfate d'ammoniaque. Ces observations confirment celles de l'essai précédent.

L'apport de phosphate bicalcique entraîne une augmentation significative du phosphore et du calcium.

L'apport de chlorure de potassium entraîne une augmentation significative du potassium, du fer et surtout du chlore, et une diminution significative de l'azote, du calcium et du magnésium.

Ces résultats peuvent être comparés à ceux qui sont signalés dans la littérature et qui sont cités dans l'étude de l'essai NPK réalisé avec la variété Java sur sol fertile.

L'interaction NP est peu marquée pour la teneur des feuilles en potassium. L'analyse de l'interaction NK montre que l'apport de la forte dose d'azote a un effet négatif d'autant plus marqué que la dose de potassium appliquée est importante :

	Interaction NP (K feuilles)				Interaction NK (K feuilles)		
	P0	P1	P2		K0	K1	K2
N1	2,41	2,53	2,18	N1	0,87	2,82	3,43
N2	2,17	2,21	2,56	N2	0,94	2,90	3,10
N3	1,73	1,57	1,66	N3	0,63	2,09	2,23

Par rapport aux normes habituellement citées dans la littérature, la teneur des éléments N, P et K dans les feuilles est trop faible lorsqu'on n'apporte pas ces éléments au sol. Il en est de même pour le calcium lorsqu'on apporte une dose forte de sulfate d'ammoniaque ou de chlorure de potassium et en l'absence d'apport de phosphate bicalcique. Les teneurs en zinc et en bore sont toujours faibles, la teneur en manganèse très élevée et la teneur en cuivre normale.

2.2.4. Productions

Le tableau 36 contient les chiffres de récolte des traitements principaux.

Il n'y a pas de différences significatives entre les productions enregistrées pour les trois doses d'azote ni d'effet significatif de l'apport de phosphate bicalcique.

L'apport de potassium augmente significativement la production (photo 9). Cet effet est important au cours des trois premières années (159 % et 156 %). Il est moins marqué et cesse d'être significatif pour le cumul des six années suivantes (113 % et 121 %). Pour le cumul des neuf années de récolte, l'augmentation de production due à l'apport de potassium (130 % et 134 %) est significative. Pour le cumul des trois premières années comme pour celui de l'ensemble des neuf années, la droite et la courbe de régression de la production sur les doses de potassium sont toutes deux hautement significatives

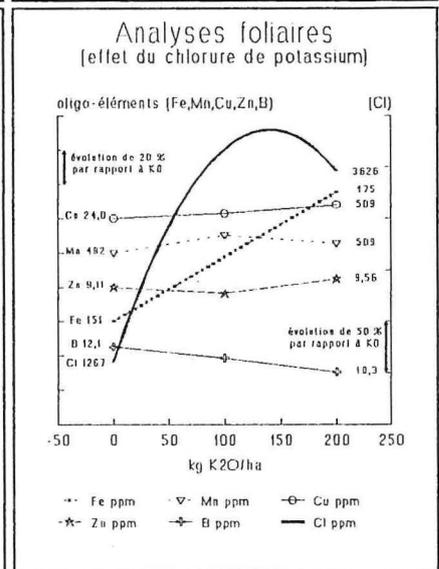
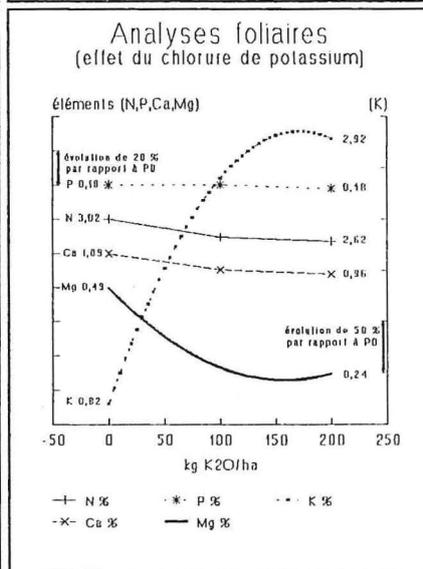
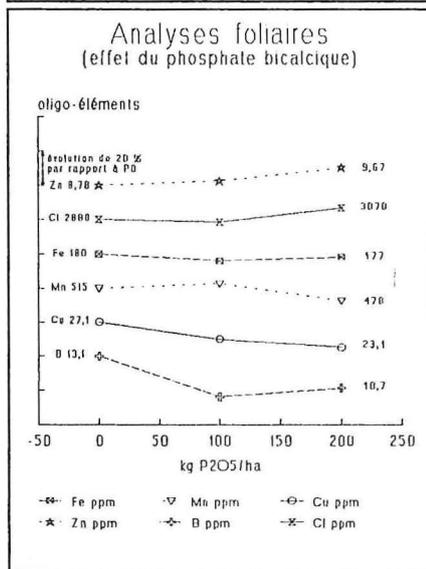
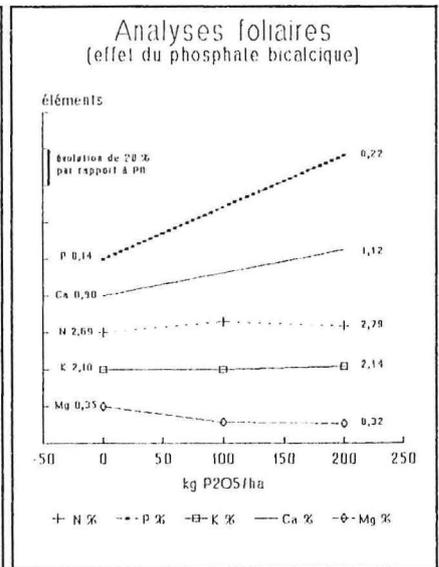
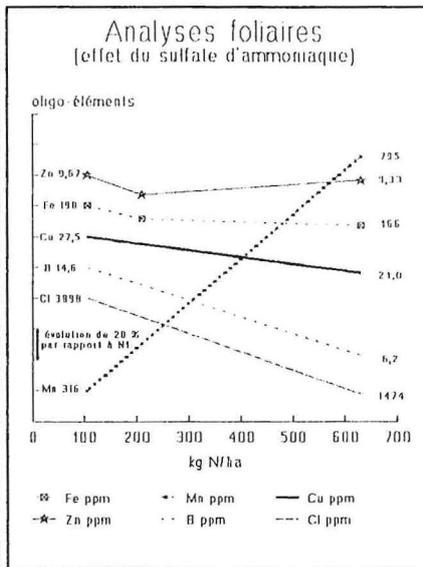
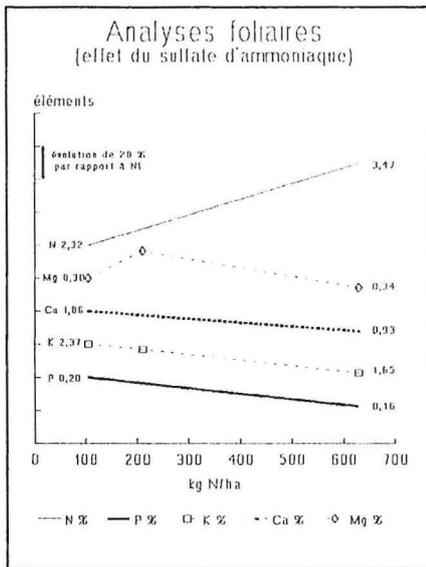


Figure 28. Evolution de la teneur des éléments dans les feuilles en pourcentage des témoins N1, P0, K0. Niveau de signification :

- effet de N : * : Mg, Zn, Fe
 ** : N, P, K, Ca, Cu, B, Cl, Mn
- effet de P : * : N, K, Mg, Zn, Cl, Fe, Mn, Cu, B
 ** : P, Ca
- effet de K : * : N, P, Ca, Cu, Mn, Zn, B
 ** : Fe
 *** : K, Mg, Cl

(figure 29) ; elles ne diffèrent pas significativement l'une de l'autre, mais le coefficient de corrélation de la courbe est plus élevé que celui de la droite.

Tableau 36. Traitements principaux et récoltes de café marchand en kg/ha/an.

traitement	année									années 1-3		années 4-9		années 1-9	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	moy.	% té	moy.	% té	moy.	% té
N1	585	1 134	1 128	914	662	303	1 345	417	491	949	100	689	100	776	100
N2	543	1 162	1 411	1 136	609	342	1 089	691	503	1 039	109	723	105	829	107
N3	445	1 065	1 271	972	575	305	831	355	425	927	98	577	84	694	89
sign.	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0		0		0	
P0	485	1 273	1 147	1 023	661	282	1 292	505	527	968	100	715	100	799	100
P1	539	975	1 387	1 043	620	287	1 014	432	431	967	100	638	89	747	93
P2	550	1 112	1 277	957	565	382	930	526	460	980	101	637	89	751	94
sign.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0	
K0	386	882	840	904	467	410	1 054	413	331	703 b	100	597	100	632 b	100
K1	585	1 369	1 393	1 001	756	231	1 135	416	498	1 116 a	159	673	113	820 a	130
K2	602	1 109	1 576	1 118	622	310	1 047	633	590	1 096 a	156	720	121	845 a	134
sign.	0	0	++	0	++	-	0	0	+	++		0		+	
lin.										++		0		++	
curv.										++		0		++	
inter.	0	0	0	0	PK x	0	0	0	0	0		0		0	
CV (%)	35	31	26	36	23	34	40	40	39	25		25		20	

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;

- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;

- lin., niveau de signification de la régression linéaire ;

- curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;

- niveaux +, -, x (P = 0,05) ; ++ (P = 0,01).

Les formules des courbes sont les suivantes :

$$3 \text{ ans : } Y = 703 + 6,2881 X - 0,0216 X^2$$

$$9 \text{ ans : } Y = 632 + 2,7015 X - 0,0082 X^2$$

où : X = K₂O kg/ha/an

Y = café marchand kg/ha/an

Pour les trois premières années, le maximum de rendement (1 161 kg de café marchand/ha/an) est obtenu pour une dose de 145 kg de K₂O/ha (242 kg de chlorure de potassium) ; pour l'ensemble des neuf années, le maximum de rendement (855 kg de café marchand/ha/an) est obtenu pour une dose de 165 kg de K₂O/ha (275 kg de chlorure de potassium).

L'effet favorable du potassium est certainement dû au relèvement du niveau de cet élément dans le sol (de 0,16 à 0,32 et 0,41 méq % après huit ans) et dans l'alimentation de la plante (de 0,815 à 2,604 et 2,919 % dans les feuilles après quatre à six ans). Mais en même temps, cet apport de potassium accentue de façon excessive le déséquilibre entre les éléments Mg et K (diminution du rapport Mg/K du sol de 1,06 à 0,47 et 0,46 après huit ans, contre un rapport optimal de 3). C'est sans doute la raison de la diminution de l'efficacité de l'engrais potassique au fil des années.

A la lecture des résultats, il semble que l'apport de potassium aux doses et dans les conditions de l'essai doit être arrêté après trois années. On peut penser qu'avec un apport simultané de magnésium, destiné à maintenir et même à améliorer l'équilibre entre

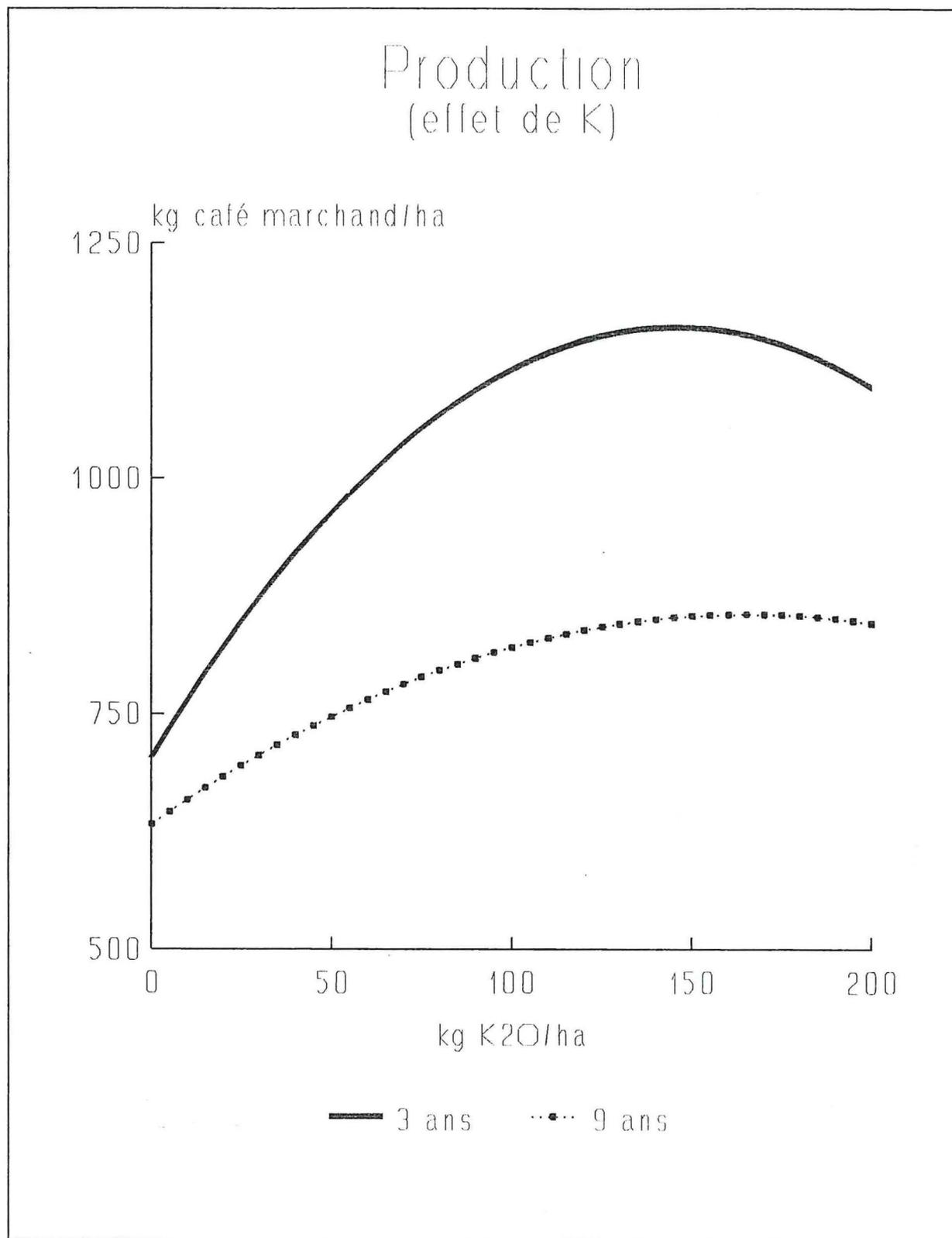


Figure 29. Courbes des productions en fonction des doses d'engrais potassique.

ces deux éléments tout en augmentant la teneur du sol en magnésium, la courbe de réponse tracée pour les trois premières années se prolongerait ou même s'améliorerait au cours des années ultérieures. Si l'on détermine par la méthode du diagnostic sol mis au point par J. Snoeck et P. Jadin la formule d'engrais à appliquer dans ce champ de caféiers, on fait ressortir l'intérêt d'un apport de magnésium. La dose de magnésium à appliquer est légèrement inférieure à celle de potassium (0,8 unité de MgO pour 1 unité de K₂O). De plus, sur ce type de sol très appauvri, les oligo-éléments bore et zinc sont toujours déficients ; ils constituent souvent les facteurs limitants de la production. D'autres essais montreront l'efficacité d'une correction de ces déficiences et l'amélioration de productivité qu'on peut en attendre. Ces interventions devraient accroître la réponse à l'apport de potassium.

2.2.5. Rentabilité

L'étude de la rentabilité de l'apport de potasse a été faite par la méthode signalée dans l'analyse des résultats de l'essai de doses d'azote réalisé avec la variété Java sur sol fertile. Le prix de la potasse (K₂O) a été fixé à 165 F/kg (99 000 F/t de chlorure de potassium).

Pour les trois premières années, la rentabilité est la suivante :

Doses optimales pour un prix de vente (PY) du café de 200 ou de 400 F CFA le kilo :

	200 F CFA	400 F CFA
K ₂ O kg/ha/an	93	131
chlorure de potassium kg/ha/an	155	218
production optimale de café marchand kg/ha	1 100	1 156
bénéfice annuel F CFA/ha	13 965	102 305

Pour les neuf années, la rentabilité est la suivante :

Doses optimales pour un prix de vente (PY) du café de 200 ou de 400 F CFA le kilo :

	200 F CFA	400 F CFA
K ₂ O kg/ha/an	26	127,5
chlorure de potassium kg/ha/an	43	212,5
production optimale de café marchand kg/ha	697	844
bénéfice annuel F CFA/ha	465	36 625

La dose de potasse à apporter doit être calculée en fonction du prix de vente du café.

3. Essai d'apport d'oligo-éléments

3.1. Matériel et méthode

L'essai est réalisé avec la variété Java. Il est établi suivant un dispositif en blocs randomisés à six répétitions, chaque parcelle contenant 16 caféiers utiles. Les caféiers sont âgés de cinq ans et sont plantés à un écartement de 3 m x 2 m. Ils reçoivent une fumure classique annuelle de 50 kg de chlorure de potassium et 167 kg d'engrais complexe 20.10.10 par hectare. Avant la mise en place de l'essai, les caféiers sont fortement carencés en zinc : jeunes feuilles très petites, arquées en forme de faucille, présentant une chlorose jaunâtre du limbe entre les nervures finement dessinées ; la croissance du bois fructifère est fortement ralentie.

Traitements :

Té, pas de fertilisation complémentaire ;

N, nitrophoska foliaire : 10 % N ; 4 % P₂O₅ ; 7 % K₂O ; 0,5 % MgO ; quantités équilibrées de Cu, B, Mn, Zn, Co, Mo ; hormones de croissance (25 l/ha/an en cinq applications par an) ;

F, fétrilon combi : 4 % MgO ; 1,5 % Mn ; 1 % Fe ; 0,5 % Cu ; 0,5 % Zn ; 0,3 % B ; 4,3 % S (25 l/ha/an) ;

Zn, sulfate de zinc (22,1 % Zn) à 1 ‰ (8 kg/ha/an de sulfate de zinc en cinq applications par an) ;

B, borax (11,3 % B) en granulés (25 kg/ha/an de borax en cinq applications par an) ;

ZnB, traitements Zn + B.

NB : Le borax est apporté en cinq applications au sol par an ; les autres fertilisants sont apportés par pulvérisation foliaire, en cinq applications aux dates du programme de traitement fongicide contre l'antracnose (2^e, 7^e, 11^e, 15^e et 16^e semaines après la floraison).

Les traitements ont été appliqués pendant deux années. L'essai a ensuite été interrompu, certaines doses d'éléments s'étant montrées excessives.

3.2. Résultats

3.2.1. Analyses foliaires

Des échantillons de feuilles de caféiers ont été prélevés pour analyse au cours du mois de décembre de la première année de l'essai, et au cours des mois de juillet, août et septembre de la seconde année. Ils ont été analysés par le laboratoire du CIRAD à Montpellier. Les résultats (moyennes des quatre prélèvements) figurent dans le tableau 37.

Tableau 37. Résultats des analyses foliaires.

traitement	N %	P %	K %	Ca %	Mg %	S %	Cl ppm	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	B ppm
Té	2,848 a	0,180 a	2,791 b	1,217 ab	0,338	0,232	2642	169	370 ab	9 b	36 cd
N	2,833 a	0,179 a	2,791 b	1,181 abc	0,323	0,220	2654	167	398 a	9 b	36 cd
F	2,739 a	0,168 b	2,754 b	1,132 bcd	0,295	0,220	2843	185	343 ab	10 b	39 c
Zn	2,704 a	0,164 b	2,964 a	1,063 d	0,293	0,207	2682	167	304 ab	36 a	34 d
B	2,714 a	0,177 a	2,733 b	1,235 a	0,351	0,225	2617	178	394 a	9 b	66 a
ZnB	2,701 a	0,168 b	2,958 a	1,110 cd	0,321	0,219	2912	180	338 b	36 a	60 b
sign.	x	xx	xx	xx	0	0	0	0	x	xx	xx
CV (%)	3,3	2,4	3,2	5,3	14,9	7,7	11,3	6,8	12,7	29,0	6,3

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
- sign., niveau de signification de l'analyse de variance x (P = 0,05) ; xx (P = 0,01).

Le nitrophoska n'influence significativement la teneur d'aucun élément dans les feuilles. Le fétrilon diminue significativement la nutrition phosphorée. Ces deux produits, bien qu'ils contiennent des oligo-éléments, n'augmentent pas significativement la teneur des feuilles en zinc et en bore, deux éléments déficients dans les caféiers de l'essai.

L'effet du zinc et du bore a été étudié par l'analyse des traitements Té, Zn, B et ZnB selon un dispositif factoriel, qui donne les résultats les plus précis. Les données sont inscrites dans le tableau 38.

L'apport de borax améliore significativement la nutrition des caféiers en bore ; la teneur des feuilles est pratiquement doublée. L'apport de sulfate de zinc en pulvérisations foliaires diminue significativement la nutrition des arbres en phosphore, calcium, soufre, manganèse et bore ; il améliore la nutrition en potassium et surtout en zinc ; la teneur en cet élément est rapidement quadruplée.

Tableau 38. Analyses foliaires des traitements sans bore ou avec bore, et sans zinc ou avec zinc.

traitement	N	P	K	Ca	Mg	S	Cl	Fe	Mn	Zn	B
Té + Zn (moy.)	2,776	0,172	2,878	1,140	0,136	0,219	2662	168	337	23	35 b
B + ZnB (moy.)	2,708	0,173	2,845	1,173	0,336	0,222	2764	179	366	22	63 a
sign.(bore)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++
Té + B (moy.)	2,781	0,178 a	2,762 b	1,226 a	0,345	0,228 a	2629	174	382 a	9 b	51 a
Zn + ZnB (moy.)	2,703	0,166 b	2,961 a	1,087 b	0,307	0,213 b	2797	174	321 b	36 a	47 b
sign.(zinc)	0	--	++	--	0	-	0	0	--	++	--
interactions	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CV (%)	3,9	2,4	3,2	4,9	16,5	7,1	12,5	7,9	14,0	29,6	6,2

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification de l'analyse de variance - (P = 0,05) ; --, ++ (P = 0,01) ;

- interactions, niveau de signification des interactions (0 = interaction non significative).

Cette influence entraîne une amélioration de la croissance végétative des caféiers, mais, en première année, une chute importante de leur production. Par rapport aux normes du Kenya et du Kivu, les teneurs foliaires sont normales pour la plupart des éléments dans tous les traitements. La teneur en manganèse est trop élevée dans toutes les parcelles, comme c'est généralement le cas sur les sols fortement acides. La teneur en bore est trop faible sauf dans les parcelles qui ont reçu du borax, où elle se situe dans les normes établies au Kenya, mais au-dessus de celles citées pour le Kivu. La teneur en zinc est trop faible, sauf dans les parcelles traitées au sulfate de zinc, où elle est supérieure aux normes généralement admises.

La teneur des divers éléments dans les feuilles peut varier suivant les périodes. L'interaction a été analysée entre les périodes de prélèvement des échantillons et les différents traitements. Les teneurs en phosphore et en magnésium vont augmentant du premier au quatrième prélèvement ; en revanche, les teneurs en chlore et en fer vont diminuant pendant cette période. La teneur en azote est la plus élevée dans les échantillons du dernier prélèvement, la teneur en bore dans ceux du premier prélèvement, et les teneurs en manganèse et en zinc sont les plus faibles dans les échantillons des premier et dernier prélèvements. L'interaction années-traitements n'est significative que pour les éléments foliaires N, P et Zn ; elle montre que l'effet négatif de l'apport de fétrilon et de sulfate de zinc sur la teneur des feuilles en N et P s'accroît au fil du temps, tout comme l'effet positif de l'apport de sulfate de zinc sur la teneur des feuilles en zinc.

3.2.2. Productions

Dans le tableau 39 sont inscrites les récoltes enregistrées dans les différents traitements.

Au cours de la première année, les deux traitements qui ont reçu du zinc ont subi une chute de production de 44 % et de 48 %, hautement significative. L'origine de cette perte de rendement n'a pas été décelée ; elle provient sans doute d'une chute massive des fruits, puisque les traitements ont été exécutés entre les périodes de la floraison et de la maturation des fruits.

Tableau 39. Productions de café marchand en kg/ha/an.

traitement	année				1 à 4	% té	2 à 4	% té
	1	2	3	4				
Té	1531 bc	60 b	124	550	566	100	245	100
N	1896 ab	63 b	183	689	708	125	312	127
F	1204 ce	209 a	252	864	632	112	442	180
Zn	850 e	74 b	346	602	468	83	341	139
B	1960 a	181 ab	213	714	767	136	369	151
ZnB	790 e	242 a	218	855	526	93	438	179
sign.	xx	xx	0	0	0		0	
CV (%)	25	76	75	61	33		57	

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
- sign., niveau de signification de l'analyse de variance x (P = 0,05) ; xx (P = 0,01).

En revanche, quelques mois après la première intervention, les caféiers traités au zinc ont retrouvé une forte vigueur végétative ; les signes de carence ont pratiquement disparu ; la croissance du bois fructifère a repris un rythme normal. L'augmentation de production enregistrée au cours des années ultérieures, pour les traitements au zinc comme pour les autres traitements, ne se révèle pas significative à l'analyse statistique, le coefficient de variation de l'essai étant excessif. Seuls l'apport de fétrilon et l'apport de bore associé au zinc se montrent significativement favorables au cours de la seule deuxième année, qui s'est par ailleurs caractérisée par une récolte très faible. L'analyse des quatre traitements Té, Zn, B et ZnB selon un dispositif factoriel montre que l'effet significatif du traitement ZnB y est dû au bore et non au zinc (tableau 40).

Tableau 40. Production des traitements sans bore ou avec bore, et sans zinc ou avec zinc (café marchand kg/ha/an).

traitement	année				1 à 4	% té	2 à 4	% té
	1	2	3	4				
Té + Zn (moy.)	1190	67 b	235	576	517	100	293	100
B + ZnB (moy.)	1375	211 a	215	784	646	126	404	138
sign.(bore)	0	++	0	0	0		0	
Té + B (moy.)	1745 a	120	168	632	666 a	100	307	100
Zn + ZnB (moy.)	820 b	158	282	728	497 b	75	389	127
sign.(zinc)	--	0	0	0	-		0	
interactions	0	0	0	0	0		0	
CV (%)	24	82	75	57	30		51	

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
- sign., niveau de signification de l'analyse de variance - (P = 0,05) ; --, ++ (P = 0,01) ;
- interaction, niveau de signification des interactions (0 = interaction non significative).

Les parcelles qui ont reçu du bore ont eu une production supérieure à celle des parcelles qui n'ont pas reçu cet élément. Même si l'effet de cet apport est rarement significatif, la fertilisation borique mérite d'être étudiée dans un nouvel essai. L'apport de zinc a rétabli une croissance équilibrée des arbres. Un nouvel essai doit aussi y être consacré, dans lequel tout excès de dosage doit être évité.

4. Essai d'engrais NKZnB

Cet essai est justifié par les informations recueillies dans les essais antérieurs, réalisés à la station de Santa ou en d'autres lieux. Il est bien connu que l'apport d'azote est toujours efficace lorsque le sol est bien approvisionné et équilibré pour les autres éléments. A Santa, dans l'essai NPK, l'apport de potassium s'est montré utile, tout comme l'apport de bore dans l'essai d'oligo-éléments. Il est manifeste que, dans cette station comme en bien d'autres sites de la région, des carences en zinc sont visibles et qu'elles limitent fortement la croissance du bois fructifère et donc la production.

4.1. Matériel et méthode

L'essai a pour but d'étudier l'influence de l'apport d'azote, de potassium, de zinc et de bore sur l'évolution chimique du sol, sur l'alimentation minérale et sur la production des caféiers, et les interactions entre ces éléments. Au début de l'essai, les caféiers, qui appartiennent à la variété sélectionnée Java, sont âgés de trois ans. L'essai contient des parcelles utiles (67,5 m²) de 15 caféiers plantés à un écartement de 3 m x 1,50 m (2 222 caféiers/ha), taillés en tige unique écimée. Les engrais azoté, potassique et borique sont appliqués sur le sol en deux apports par an, sans enfouissement, sous la jupe des caféiers. Le zinc a été appliqué sur le sol pendant les deux premières années. Le contrôle de l'alimentation des caféiers, réalisé par des analyses foliaires, ayant montré que cet élément n'était pas absorbé par la plante, les apports ultérieurs ont été faits par pulvérisation foliaire de sulfate de zinc. L'essai est établi suivant un dispositif factoriel 3 (N) x 3 (K) x 3 (Zn) x 2 (B) en deux répétitions. L'azote est apporté sous forme d'urée (46 % N), le potassium sous forme de chlorure de potassium (60 % K₂O), le bore sous forme de borax (11,3 % B) et le zinc sous forme de sulfate de zinc (22,1 % Zn). Les apports sont fractionnés en deux épandages annuels. Les doses annuelles à l'hectare sont les suivantes :

	élément en kg/ha/an			engrais en kg/ha/an		
	dose 1	dose 2	dose 3	dose 1	dose 2	dose 3
N	0 (N0)	100 (N1)	200 (N2)	0	217,4	434,8
K	100 (K1)	200 (K2)	300 (K3)	166,7	333,3	500,0
B	0 (B0)	2,26 (B1)		0	20,0	
Zn (1)	0 (Zn0)	4,42 (Zn1)	8,84 (Zn2)	0	20,0	40,0
Zn (2)	0 (Zn0)	0,11 (Zn1)	0,22 (Zn2)	0	0,5	1,0

N.B. : - Zn (1), au sol, pendant les deux premières années ;
 - Zn (2), en pulvérisations foliaires, les années suivantes ;
 - Zn1, trois pulvérisations par an de 330 l/ha de solution à 0,05 % de sulfate de zinc ;
 - Zn2, trois pulvérisations par an de 330 l/ha de solution à 0,1 % de sulfate de zinc.

4.2. Résultats

4.2.1. Evolution chimique du sol

Un échantillon de sol a été prélevé, après quatre années de fertilisation, en dehors et dans la zone d'épandage des engrais, dans une seule parcelle de chaque combinaison des apports azoté, potassique et borique. Les échantillons comprennent six exemplaires de chacun des trois traitements azotés et des trois traitements potassiques, et neuf exemplaires de chacun des deux traitements boriques. Ils peuvent faire l'objet d'analyses statistiques pour chacun des éléments traités indépendamment.

Tableau 41. Caractéristiques du sol.

traitement	N tot. ‰	K még. %	Ca még. %	Mg még. %	pH	B sol. ppm	Mg/K	P ass. még. %
dans la zone d'épandage								
N0	4,43 b	0,60	0,96	0,22	5,13 a	0,26 b	0,39	73,3 b
N1	4,82 a	0,43	0,65	0,19	4,90 b	0,48 a	0,49	87,6 a
N2	4,66 ab	0,29	0,32	0,17	4,77 b	0,37 ab	0,58	82,2 ab
sign.	+	0	0	0	-	+	0	+
CV (%)	5	46	90	36	4	30	28	9
lin.	0	-	-	0	-	0	+	0
curv.	0	0	0	0	0	x	x	0
K1	4,60	0,32 b	0,46	0,18	4,89	0,38	0,58	79,7
K2	4,62	0,39 b	0,43	0,17	4,86	0,41	0,44	82,5
K3	4,70	0,61 a	1,05	0,24	5,05	0,33	0,44	80,9
sign.	0	++	0	0	0	0	0	0
CV (%)	9	31	70	28	4	48	23	12
lin.	0	+	0	0	0	0	-	0
curv.	0	0	0	0	0	0	0	0
B0	4,77	0,49	0,69	0,22	4,99	0,29 b	0,49	82,2
B1	4,51	0,38	0,60	0,17	4,88	0,45 a	0,48	80,0
sign.	0	0	0	0	0	++	0	0
CV (%)	7	55	102	39	5	27	25	11
moyenne	4,64	0,44	0,64	0,20	4,93	0,37	0,49	81,1
en dehors de la zone d'épandage								
N0	4,21 b	0,24	1,14	0,44	5,08	0,34	1,81	
N1	4,31 ab	0,21	1,37	0,45	5,06	0,33	1,95	
N2	4,50 a	0,20	0,94	0,33	5,08	0,28	1,63	
sign.	+	0	0	0	0	0	0	
CV (%)	4	33	67	53	3	41	21	
K1	4,31	0,18	0,83	0,32	5,03	0,32	1,80	
K2	4,28	0,21	1,07	0,37	5,05	0,34	1,77	
K3	4,44	0,27	1,54	0,52	5,13	0,29	1,83	
sign	0	0	0	0	0	0	0	
CV (%)	8	27	52	42	2	47	20	
B0	4,46	0,22	1,33	0,45	5,08	0,27 b	1,94	
B1	4,23	0,21	0,96	0,36	5,07	0,36 a	1,66	
sign.	0	0	0	0	0	++	0	
CV (%)	7	35	66	56	3	36	28	
moyenne	4,34	0,22	1,15	0,40	5,07	0,32	1,80	

N.B. : - P assimilable, méthode Olsen-Dabin ;

- bases échangeables extraites à l'acétate d'ammonium ;

- test de Keuls-Newman, les lettres différent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;

- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;

- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;

- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;

- niveaux +, -, x (P = 0,05) ; ++, --, xx (P = 0,01).

En dehors de la zone d'épandage, les seules modifications significatives sont l'augmentation des teneurs en azote total dans le traitement N2 et en bore dans le traitement B1.

Dans la zone d'épandage, l'apport d'urée a modifié significativement certaines caractéristiques du sol. Les modifications sont inscrites dans le tableau 41 et sur la figure 30. L'azote total, le phosphore et le bore ont augmenté significativement dans le

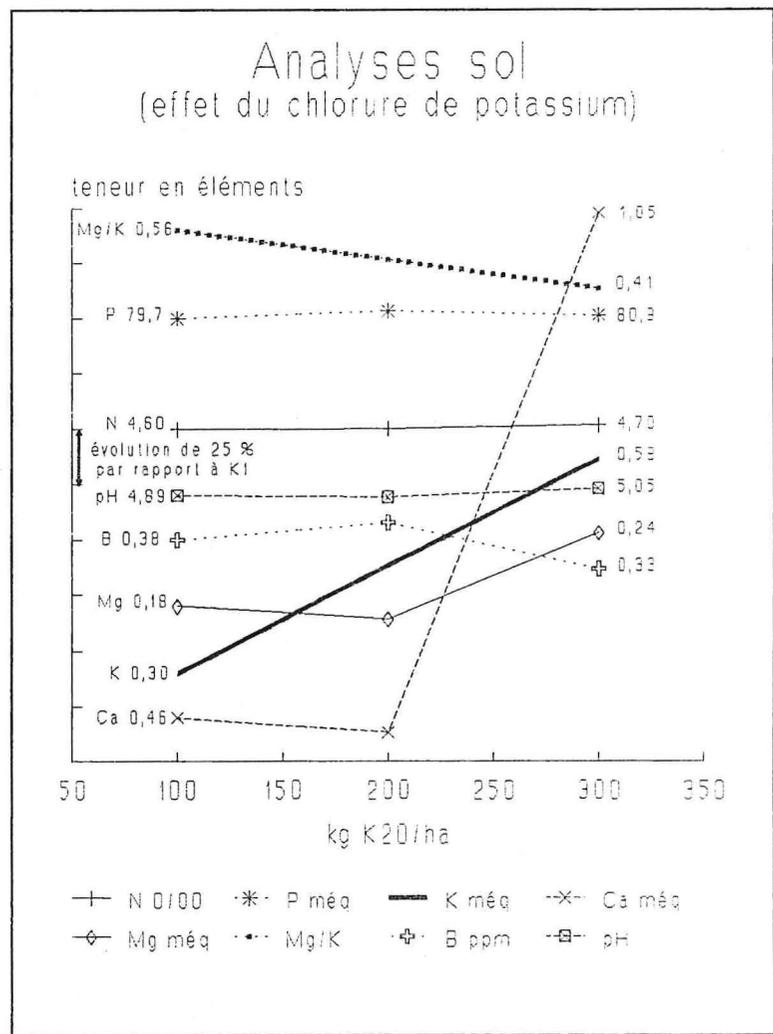
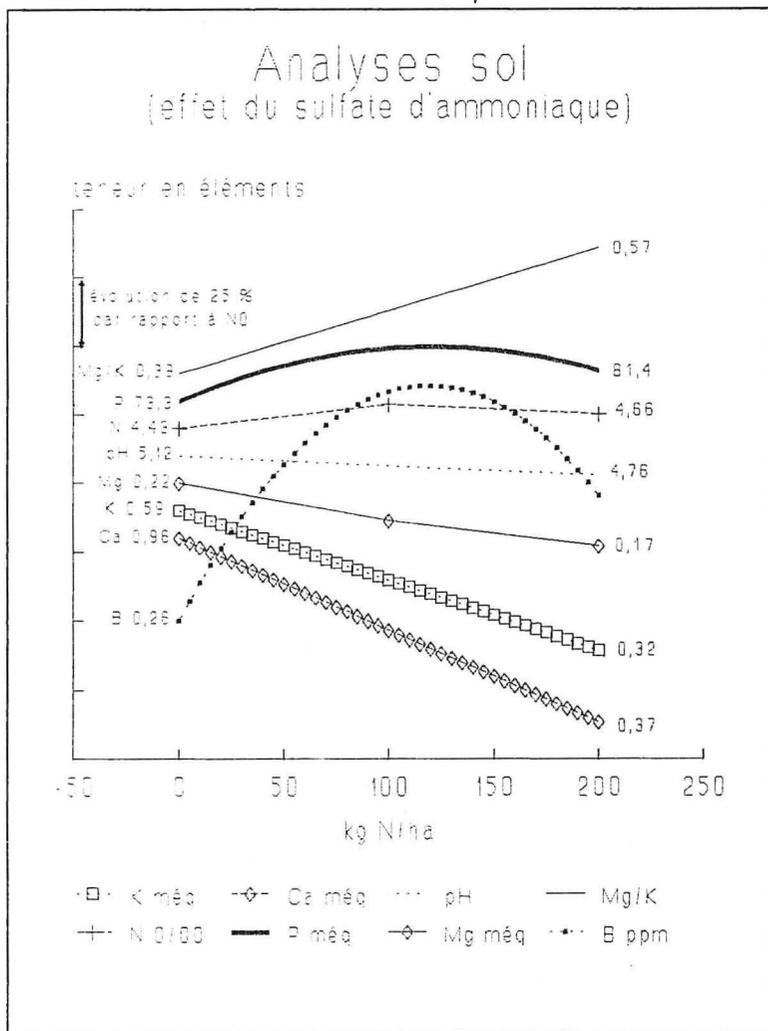


Figure 30. Evolution des caractéristiques du sol dans la zone d'épandage (pourcentage du témoin).

Niveau de signification :

- effet de N : * : N, Mg
- ** : K, Ca, pH, Mg/K
- *** : P, B
- effet de K : * : N, P, Ca, Mg, B, pH
- ** : K, Mg/K.

traitement N1, et le pH a diminué dans les deux traitements qui ont reçu de l'azote. Le potassium a augmenté significativement dans le traitement K3 par rapport aux traitements K1 et K2. Le bore a augmenté significativement dans le traitement qui a reçu du borax.

La comparaison des caractéristiques du sol situé au milieu des interlignes, en dehors de la zone d'épandage des engrais, et de celles du sol situé sous les caféiers, dans la zone d'épandage, montre en revanche que l'ensemble des traitements a induit des modifications profondes. Toutes les caractéristiques du sol diffèrent significativement suivant qu'il est prélevé au milieu de l'interligne ou sous les caféiers des mêmes parcelles. Les teneurs en azote, en potassium et en bore, éléments apportés par les traitements, sont plus élevées sous les caféiers que dans les interlignes ; les teneurs en calcium et en magnésium, le pH et le rapport Mg/K sont plus faibles sous les caféiers qu'au milieu des interlignes.

4.2.2. Analyses foliaires

Des échantillons de feuilles de caféiers ont été prélevés à quatre reprises, après deux et trois années de fertilisation, dans 18 parcelles. Les échantillons comprennent six exemplaires de chacun des trois traitements au zinc et neuf exemplaires de chacun des deux traitements boriques. La teneur en zinc des feuilles a été analysée sur les quatre séries d'échantillons et la teneur en bore sur deux séries. Les teneurs moyennes figurent dans le tableau 42.

Tableau 42. Teneur des feuilles en zinc et en bore.

traitement	Zn (ppm)	traitement	B (ppm)
Zn0	9,1 b	B0	25,1 b
Zn1	10,1 b	B1	54,9 a
Zn2	11,8 a		
sign.	++	++	
CV (%)	11	14	
lin.	0		
curv.	0		

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
 - sign., niveau de signification de l'analyse de variance ;
 - lin., niveau de signification de la régression linéaire ;
 - curv., niveau de signification de la régression curvilinéaire ;
 - niveau ++ (P = 0,01).

L'analyse de la variance des données montre que la dose forte de zinc augmente significativement la teneur de cet élément dans les feuilles par rapport à la dose nulle et à la dose faible. Il faut remarquer toutefois que cette augmentation est très faible et certainement insuffisante pour atteindre son maximum d'efficacité sur les productions. L'apport de borax, en revanche, augmente nettement et significativement la teneur des feuilles en bore.

4.2.3. Productions

Dans le tableau 43 sont inscrits les chiffres de récolte des traitements principaux.

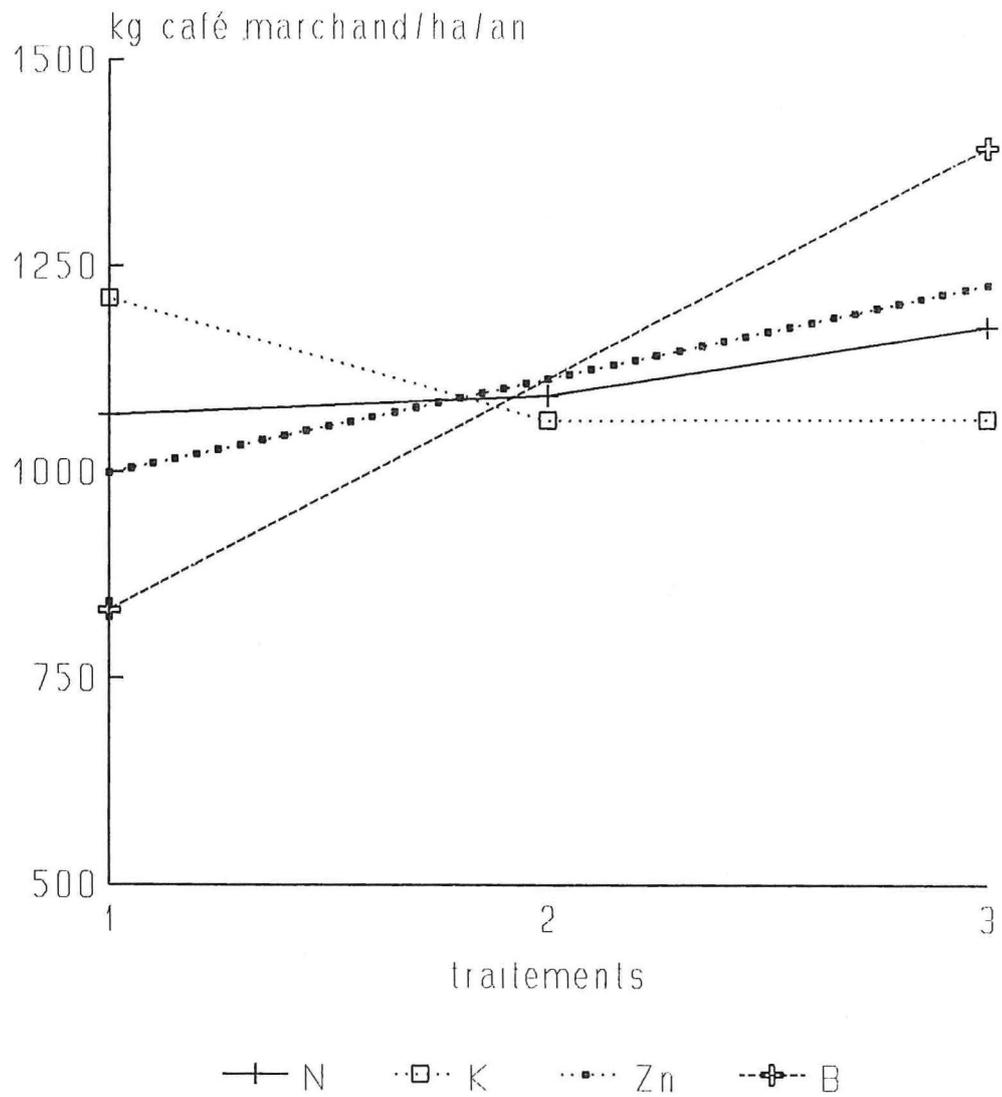
Tableau 43. Traitements principaux et récoltes de café marchand en kg/ha/an (3 ans).

traitement	année			moy.	% té
	1	2	3		
N0	1 271	467	1 472	1 070	100
N1	1 397	521	1 360	1 093	102
N2	1 506	529	1 490	1 175	110
sign.	0	0	0	0	
lin.	0	0	0	0	
curv.	0	0	0	0	
K1	1 449	575	1 610	1 211 a	100
K2	1 306	478	1 404	1 063 b	88
K3	1 419	464	1 308	1 064 b	88
sign.	0	0	0	-	
lin.	0	0	0	0	
curv.	0	0	0	0	
Zn0	1 332	456	1 294	1 027 b	100
Zn1	1 360	476	1 331	1 056 b	103
Zn2	1 482	586	1 697	1 255 a	122
sign.	0	0	+	++	
lin.	0	0	+	+	
curv.	0	0	0	0	
B0	1 244	517	737	833 b	100
B1	1 539	495	2 144	1 393 a	167
sign.	++	0	++	++	
interactions	0	0	x	0	
CV (%)	32	48	46	26	

N.B. : - test de Keuls-Newman, les lettres diffèrent quand les traitements sont significativement différents (ordre décroissant) ;
- sign., niveau de signification des effets principaux (analyse de variance) ;
- inter., niveau de signification des interactions (analyse de variance) ;
- lin., niveau de signification des régressions linéaires ;
- curv., niveau de signification des régressions curvilinéaires ;
- niveaux +, -, x (P = 0,05) ; ++, --, xx (P = 0,01)

L'apport d'urée n'a pas, jusqu'à présent, augmenté significativement la production (tableau 43, figure 31). En ce qui concerne l'apport de potassium, les doses de 200 et 300 unités de potasse diminuent les productions par rapport à la dose de 100 unités. Dans l'essai NPK antérieur, le traitement avec 200 unités de potasse avait eu une production équivalente (-2 %) à celui avec 100 unités. Les trois doses de potassium de l'essai NKZnB (100, 200 et 300 kg de K₂O/ha) ne peuvent ici être comparées à l'absence de fertilisation potassique, traitement qui ne figure pas dans l'essai, l'expérimentation antérieure ayant démontré la nécessité d'un apport de cet élément. Comme dans l'essai précédent, la détermination par la méthode du diagnostic sol de la formule d'engrais à appliquer dans ce champ de caféiers montre que du magnésium devrait être inclus dans la fertilisation (0,6 unité de MgO pour 1 unité de K₂O). Cet apport, en améliorant le rapport Mg/K dans le sol, devrait placer à un niveau plus élevé la dose de potassium la plus efficace. L'apport de sulfate de zinc en pulvérisation foliaire (traitement Zn2) augmente significativement la production de 22 %. Il est probable que des traitements plus intensifs accroîtraient cet effet, car ceux réalisés n'ont que très faiblement amélioré la teneur des feuilles en zinc. L'apport de borax augmente significativement la production de 67 %.

Productions (effet de N,K,Zn,B)



X1 : trait.N0,K1,Zn0,B0
 X2 : trait.N1,K2,Zn1
 X3 : trait.N2,K3,Zn2,B1

Figure 31. Production en fonction des traitements.
 Niveau de signification : * : N, K, B ; ** : Zn

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

1. Productions

1.1. Sols fertiles peu évolués

Le premier essai réalisé à Foubot avec la variété Java montre que la dose optimale d'azote est de 250 kg/ha/an pour un prix de vente du café marchand de 200 F/kg, et de 350 kg/ha/an pour un prix de vente de 400 F/kg. La dose optimale évolue dans le même sens que le prix de vente du café. Théoriquement, tout apport d'azote cesse d'être rentable pour un prix de vente de 150 F/kg de café marchand. Un apport de 50 kg reste cependant indispensable pour sauvegarder la plantation. Si l'apport d'azote est interrompu, l'effet de la fertilisation antérieure perdure presque inchangée pendant quelques années, jusqu'à ce que survienne une forte récolte. Il s'ensuit alors un *die-back* intense et la disparition de bon nombre de caféiers ; la capacité de production future de la plantation est pratiquement réduite à néant. L'essai NPK montre que les apports de P et de K sont inutiles. Ils ont même tendance à diminuer les rendements (- 7 % pour 200 kg de P_2O_5 /ha/an et - 9 % pour 200 kg de K_2O /ha/an). Ces résultats sont loin d'être significatifs pour les productions cumulées, mais l'effet dépressif se marque cependant de manière significative au cours de certaines années après la régénération des arbres et l'interruption de la fertilisation.

Les deux essais réalisés avec la variété Caturra conduisent à des conclusions semblables en ce qui concerne l'effet de la fertilisation sur la production. Les doses optimale et maximale d'azote à l'hectare sont un peu plus élevées.

1.2. Sols désaturés

Sur les sols fortement désaturés de la zone de culture de l'Arabica de haute altitude du Cameroun, une fertilisation potassique est indispensable (essai NPK). La dose maximale est de 145 kg de K_2O /ha/an pendant trois années ; la meilleure rentabilité est obtenue pour une dose comprise entre 90 et 130 kg suivant le prix de vente du café.

L'utilisation du diagnostic sol pour la détermination de la fertilisation à appliquer incite à recommander l'apport de magnésium.

L'apport de sulfate de zinc par trois pulvérisations annuelles de 330 l/ha de solution à 0,1 % de $ZnSO_4$ augmente les productions de 22 %. L'analyse foliaire des caféiers traités laisse à penser qu'une augmentation de la dose de zinc devrait améliorer son efficacité.

L'apport de borax à la dose de 20 kg/ha/an augmente la production de 67 %.

Dans l'essai de doses d'azote où aucun autre élément n'est apporté, la fertilisation azotée provoque une diminution de la production. Elle accentue le déficit du potassium dans le

sol. Dans les essais NPK et NKZnB, l'effet défavorable de l'azote n'apparaît pas. Bien qu'aucune interaction n'y apparaisse significative, le traitement NK le plus productif est celui qui contient la dose de 210 unités d'azote et 100 unités de potasse. On peut penser qu'un apport d'azote deviendra favorable lorsque les teneurs en bases échangeables et l'équilibre entre elles auront été amenés à un niveau adéquat.

2. Diagnostic foliaire

Les normes citées par les auteurs ne concordent pas toujours ; elles s'étalent dans une gamme assez étendue. Le seuil et le plafond en dehors desquels se marque une déficience ou une toxicité varieraient entre les limites inscrites ci-dessous :

	déficience pour une teneur inférieure à	toxicité pour une teneur supérieure à
N	1,5 3,0 %	2,8 3,4 %
P	0,05 ... 0,16 %	0,12 ... 0,20 %
K	0,8 2,2 %	1,8 3,0 %
Ca	0,5 1,0 %	1,3 2,0 %
Mg	0,1 0,25 %	0,35 ... 0,40 %
S	0,05 ... 0,10 %	0,25 %
Fe	50 100 ppm	-
Mn	12 100 ppm	100 700 ppm
Zn	7 10 ppm	20 ppm
B	15 40 ppm	90200 ppm
Cu	5 ppm	20 ppm
Cl	-	9400 ppm

Dans les essais de doses d'azote de Foubot, une carence en azote se manifeste sous l'aspect d'un jaunissement accentué des feuilles dans les traitements N0 et N1, alors que la teneur des feuilles en azote y est de 2,781 et 2,935 % à la période de l'année où l'alimentation est proche de son maximum. Ce phénomène ne concorde pas avec le point de vue de la plupart des auteurs, qui établissent le seuil de déficience à un niveau souvent inférieur à 2,5 %. Dans les conditions de l'essai, le niveau minimal acceptable est d'au moins 3 % d'azote. Il serait même supérieur à 4 % d'après R.Bénac (1967). Aucun autre symptôme de carence — ni aucun symptôme de toxicité — n'apparaît dans aucun des traitements, quel que soit l'élément, bien que dans certains traitements le niveau minimal cité par l'un ou l'autre auteur soit franchi pour N, P, Ca, Mn, Zn et B, et le niveau maximal pour N, P, K, Mg, S et Cu. Ceci démontre bien la difficulté de fixer, pour le contenu chimique des feuilles, des limites définissant une bonne alimentation des caféiers qui puissent être généralisées dans toutes les situations. A plus forte raison, il serait imprudent de préconiser des formules de fertilisation basées sur les seules informations fournies par le diagnostic foliaire. D'autres exemples le confirment. Ainsi, dans l'essai identique réalisé sur le sol fortement désaturé de Santa, de fortes carences en zinc s'observent, avec un ralentissement très marqué de la croissance du bois fructifère, pour une teneur en zinc de 8,9 ppm, alors qu'aucun symptôme n'est visible sur les caféiers de Foubot où la teneur en zinc est la même. A Foubot, la carence en azote est manifeste lorsque la teneur en azote est de 2,98 % (N0) et de 3,04 % (N1), alors qu'à Santa elle n'est pas décelable avec une teneur foliaire de 2,44 % (N0) à la même période de la même année.

3.2. Sols désaturés

L'utilisation du diagnostic du sol pour la détermination de la fertilisation à préconiser à Santa révèle la nécessité d'un apport de magnésium à un niveau de 0,6 à 0,8 unité de MgO pour une unité de K₂O. La réalisation de nouveaux essais ou la reconversion du protocole des essais en place devrait permettre de montrer l'efficacité de cette fertilisation.

4. Relations production-analyses foliaires-analyses de sol

L'alimentation des caféiers, analysée par l'étude des teneurs en éléments chimiques des feuilles, reflète parfois mal le niveau de ces éléments dans le sol. Chez le témoin sans engrais des essais de doses d'azote, la teneur en azote des feuilles est plus faible à Santa qu'à Foumbot, alors que le sol est plus riche en cet élément (tableau 45). La teneur des feuilles en calcium et surtout en magnésium y est plus élevée, alors que ces éléments sont beaucoup moins représentés sous forme échangeable dans le sol. Dans une enquête réalisée par S. Guillobez (1990) dans la province de l'Ouest du Cameroun, une corrélation s'observe entre le rapport Mg/K dans le sol et le rapport Mg/K dans les feuilles. Ce lien ne se vérifie pas dans nos essais. Le rapport Mg/K est beaucoup plus élevé dans les feuilles des caféiers de Santa que dans celles des caféiers de Foumbot, alors que ce rapport y est de beaucoup inférieur dans le sol. La teneur des feuilles en zinc et en cuivre n'est pas plus élevée à Foumbot qu'à Santa, alors que le sol y contient de plus grandes quantités de ces éléments ; la teneur des feuilles en bore est plus faible à Santa, alors que le sol y contient au moins autant de cet élément qu'à Foumbot. E. Schnug *et al.* (1985) en République centrafricaine, sur caféier Robusta, constatent de même qu'aucune corrélation significative n'est établie entre la teneur en éléments minéraux disponibles dans les sols et les résultats des analyses des feuilles des caféiers. J. Forestier (1964) admet aussi, comme beaucoup d'auteurs, qu'il n'existe pas de relation directe simple entre la concentration des ions dans les sols et l'absorption par la plante, d'où l'impossibilité de prendre le diagnostic foliaire comme guide pour établir un programme de fertilisation.

Tableau 45. Contenu du sol et des feuilles de caféiers dans les parcelles N0 des essais de doses d'azote, à Foumbot et à Santa.

élément	Foumbot		Santa	
	sol	feuilles	sol	feuilles
N	3,81 ‰	2,98 % (carences)	4,72 ‰	2,44 % (pas de carence)
K	0,60 méq %	3,59 %	0,14 méq %	1,10 %
Ca	15,0 méq %	0,84 %	0,43 méq %	0,93 %
Mg	3,90 méq %	0,29 %	0,16 méq %	0,49 %
Fe	91,6 ppm	188 ppm	19,0 ppm	126 ppm
Mn	15,1 ppm	23 ppm	35,6 ppm	364 ppm
Zn	2,48 ppm	8,9 ppm (pas de carence)	0,13 ppm	8,9 ppm (carences)
B	0,26 ppm	34,1 ppm	0,34 ppm	18,2 ppm
Cu	2,91 ppm	31,1 ppm	1,11 ppm	31,0 ppm
Cl		670,0 ppm		1704,0 ppm
Mg/K	6,4	0,094	1,1	0,450
pH	6,30			5,03

Dans l'essai de doses d'azote réalisé à Foumbot avec la variété Java, la matrice des corrélations totales des données des analyses foliaires, des analyses de sol et des récoltes montre que les éléments qui ont les liens les plus étroits avec la production sont généralement ceux qui sont les plus influencés par les apports d'azote. On observe aussi que la teneur de chacun des éléments dans le sol est corrélée significativement à celle de

chacun des autres éléments. Il en est de même pour les éléments dans les feuilles des caféiers. Il ne s'agit pas là d'une interaction entre les éléments, mais d'un effet simultané des apports d'azote sur chacun de ceux-ci.

Lorsque, dans cet essai, on étudie la régression progressive de la production sur les teneurs foliaires, ce sont les éléments suivants qui paraissent influencer significativement la production, par ordre d'influence décroissante : S (+), K (-), Zn (+), Cl (-). L'apport d'azote influence simultanément et la production et, positivement ou négativement, la teneur de ces mêmes éléments dans les feuilles ; on ne peut donc conclure que ce sont les niveaux des différents éléments des feuilles eux-mêmes qui influencent la production. Dans un tel essai, il est donc vain de tenter d'utiliser les analyses foliaires pour expliquer les productions. Les mêmes remarques peuvent être faites pour l'essai de doses d'azote réalisé avec la variété Caturra et dans les deux essais NPK. Dans l'essai de doses d'azote avec Caturra, les éléments suivants paraissent influencer significativement la production, par ordre d'influence décroissante : Mn (+), Cu (-), Ca (+). Ils sont corrélés dans le même sens avec les doses d'azote.

Lorsqu'on étudie la régression progressive de la production sur les teneurs du sol, on met en évidence la seule influence significative de la teneur en azote du sol dans l'essai de doses d'azote de Foubot avec la variété Java, et du pH du sol dans les essais de doses d'azote de Foubot avec la variété Caturra et de Santa avec la variété Java. Les coefficients de corrélation partielle des autres éléments sont insignifiants.

5. Recommandations

5.1. Sols fertiles peu évolués

Dans les champs de caféiers adultes situés sur les sols fertiles peu évolués, la dose d'azote à apporter doit être calculée en fonction du prix de vente du café. Elle est de 250 kg de N/ha/an lorsque le prix de vente est de 200 F CFA/kg de café marchand ; elle doit être portée à 350 kg lorsque le prix de vente du café est de 400 F CFA. Aucun autre élément fertilisant ne doit être apporté.

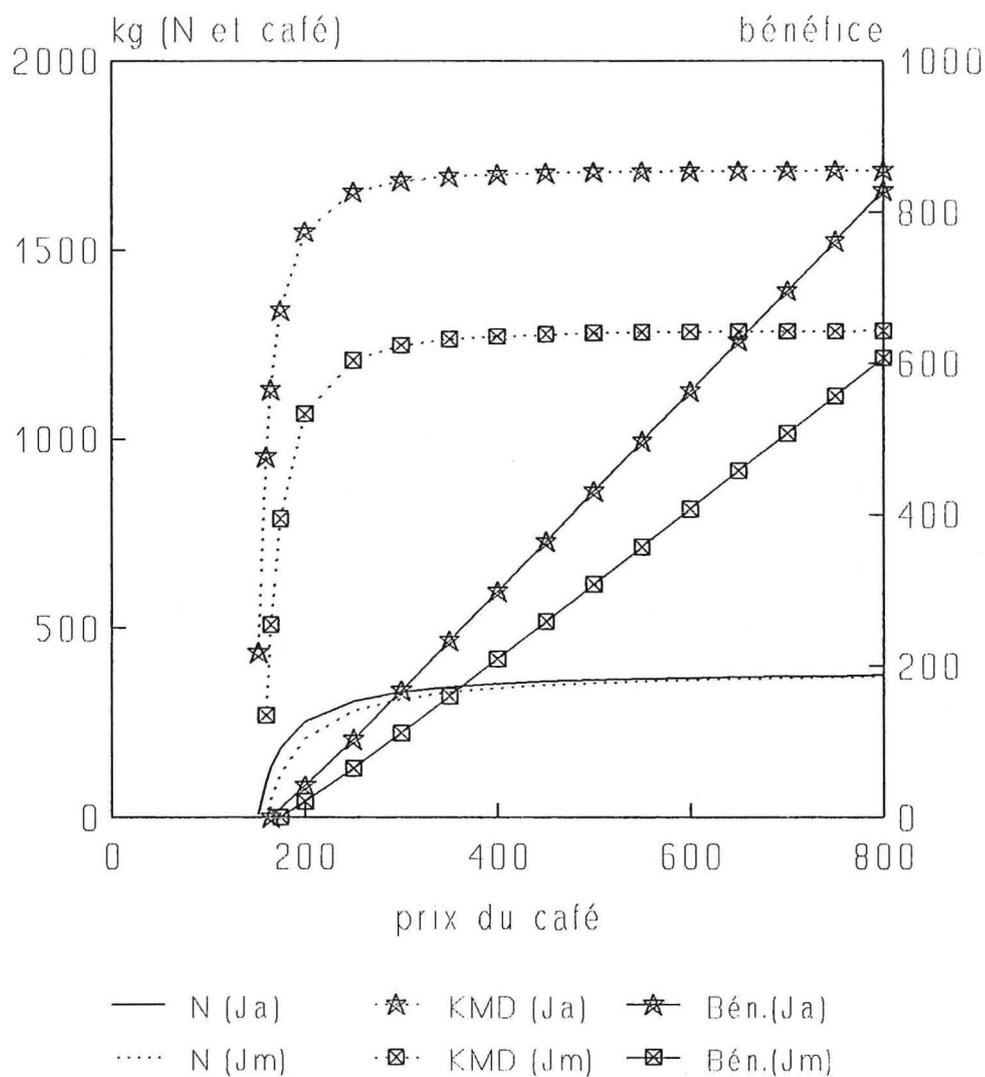
La figure 32 indique l'évolution des doses optimales d'azote, des productions correspondantes et des bénéfices dus à la fertilisation, en fonction du prix de vente du café. Une série de lignes, qui correspondent aux résultats des essais, se rapportent à la variété Java. Une seconde série de lignes ont été tracées pour la variété Jamaïque dont on a estimé la productivité de 25 % inférieure à celle du Java.

5.2. Sols désaturés

Dans les champs de caféiers adultes situés sur les sols fortement désaturés, la formule à préconiser annuellement à l'hectare pendant les premières années peut être la suivante : 120 kg de K_2O , 80 kg de MgO , 2,25 kg de B et 2 kg de Zn. Ceci correspond aux doses d'engrais suivantes : 200 kg de chlorure de potassium, 315 kg de kiésérite (ou 425 kg de dolomie), 20 kg de borax, trois pulvérisations de 330 l de solution à 0,2 % de sulfate de zinc.

Rentabilité de l'engrais azoté

Courbes optimum



Bén.(milliers F CFA)

Figure 32. Rentabilité de l'engrais azoté (essai doses N de Foubot) :

- N, doses optimales d'azote en N kg/ha ;
- KMD, productions optimales de café marchand en kg/ha/an ;
- bén., bénéfice maximal en milliers de F CFA/ha dû à l'apport d'azote en fonction du prix de vente du café exprimé en F CFA par kilo de café marchand
- Ja, variété Java ; Jm, variété Jamaïque.

Une analyse du sol devrait être effectuée après quatre années en vue de réajuster la formule de fertilisation. Elle sera sans doute à base d'azote et de zinc, l'apport des autres éléments étant suspendu ou amené à un niveau inférieur, apte à maintenir leur teneur et leur équilibre dans le sol.

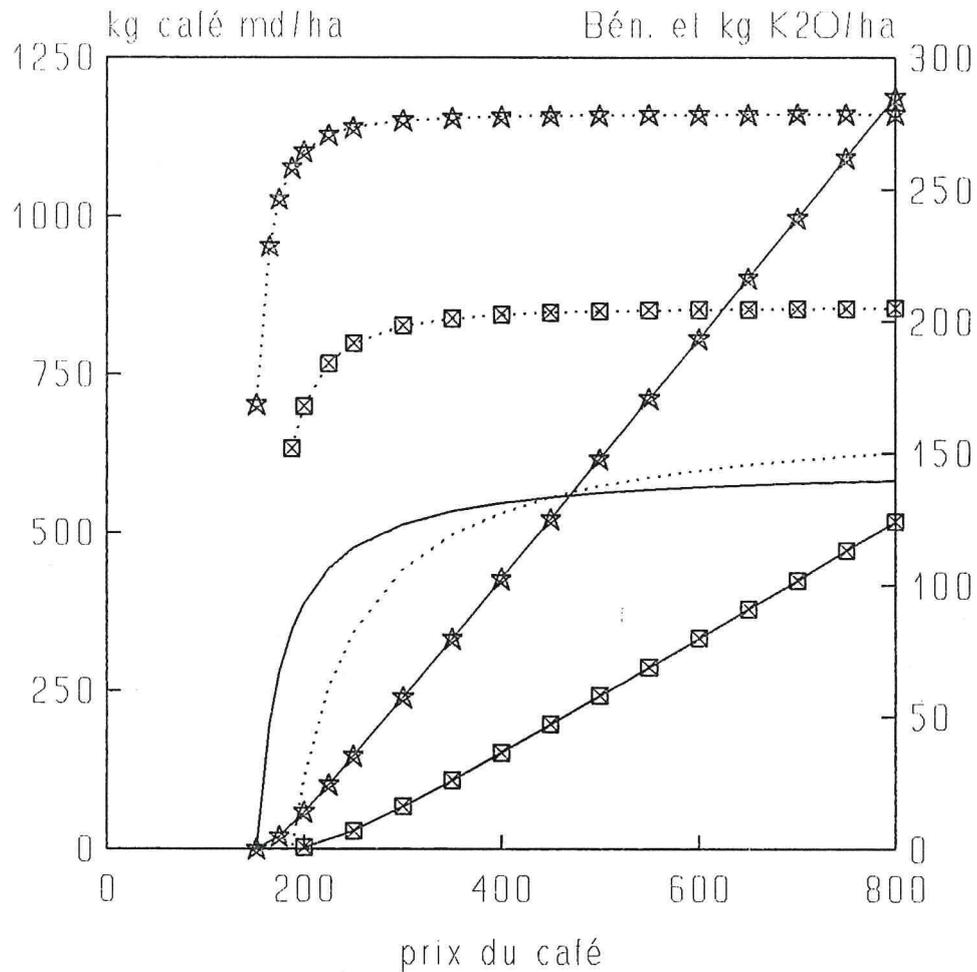
Les figures 33 et 34 indiquent l'évolution des bénéfices dus à l'apport de potassium, de bore et de zinc, en fonction du prix de vente du café.

La figure 33 indique l'évolution des doses optimales de potasse, des productions correspondantes et des bénéfices dus à la fertilisation, en fonction du prix de vente du café. Une série de lignes correspondent aux résultats des trois premières années, une seconde série aux résultats de l'ensemble des neuf années. Comme semblent l'indiquer les recommandations mises en lumière par le diagnostic sol, on peut penser qu'avec un apport simultané de magnésium, destiné à maintenir et même à améliorer l'équilibre entre ces deux éléments tout en augmentant la teneur du sol en magnésium, la courbe de rentabilité tracée pour les trois premières années se prolongerait ou même s'améliorerait au cours des années ultérieures.

La figure 34 indique l'évolution des bénéfices dus à l'apport de bore ou de zinc en fonction du prix de vente du café. Le bénéfice retiré de l'application de 2,26 kg de bore par hectare par an pendant trois années se chiffre à 30 000 F CFA pour un prix de vente de 200 F CFA le kilo de café marchand et s'accroît de 5 600 F pour chaque augmentation de 10 F du kilo de café.

Le bénéfice retiré de l'apport de 220 g de zinc en pulvérisation foliaire se chiffre à 16 000 F pour un prix de vente de 200 F le kilo de café et s'accroît d'environ 2 300 F pour chaque augmentation de 10 F du kilo de café.

Rentabilité de l'engrais potassique Courbes optimum

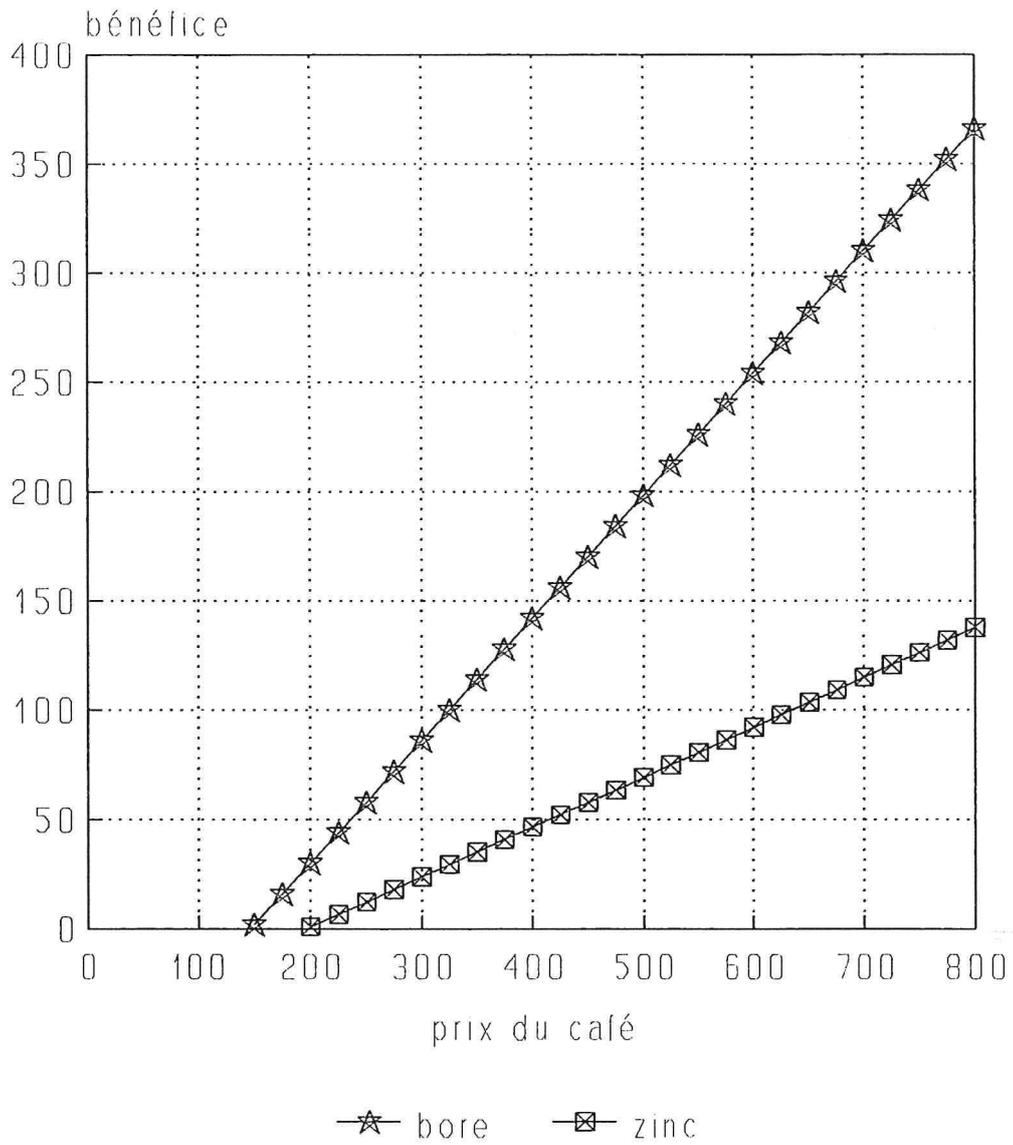


— K₂O (3) ···☆··· KMD (3) —☆— Bén.(3)
 K₂O (9) ···□··· KMD (9) —□— Bén.(9)

Bén.(milliers F CFA)

Figure 33. Rentabilité de l'engrais potassique (essai NPK de Santa) :
 - K, doses optimales de potassium en kg de K₂O/ha/an ;
 - KMD, productions optimales en kg de café marchand/ha/an ;
 - bén., bénéfice maximal en milliers de F CFA/ha/an dû à l'apport de potassium, en fonction du prix de vente du café exprimé en F CFA/kg de café marchand.

Rentabilité du bore et du zinc



Bén.(milliers F CFA)

Figure 34. Rentabilité de l'apport de bore et de zinc (essai NKZnB de Santa). Bénéfice en milliers de F CFA/ha/an dû à l'apport de B et de Zn, en fonction du prix de vente du café exprimé en F CFA/kg de café marchand.

BIBLIOGRAPHIE

ANONYME, 1977. Deteccion y control de deficiencias de elementos esenciales. Seminarios regionales sobre tecnologia del cultivo del café, Intituto Nicaraguense de Tecnologia Agropecuaria, doc. n° 8 : 121-140.

ADUAYI A.E., 1970. Soil plant nutrient relationships in tree crops with special reference to coffee : a review. Turrialba 20 (4) : 463-470.

AGUILERA V.H.E., 1979-1980. Efecto de diferentes niveles de fertilizacion sobre el crecimiento y la produccion del cafeto, en una densidad de poblacion de 10 000 cafetos por hectarea. Resumenes de Investigaciones en Café, ISIC, ano III, 1979-1980 : 89-93.

AGUILERA V.H.E., 1979-1980. Efecto de diferentes fuentes y niveles de fertilizacion nitrogenada en el crecimiento y produccion del cafeto. Resumenes de Investigaciones en Café, ISIC, ano III, 1979-1980 : 93-97.

AGUILERA V.H.E., 1979-1980. Efecto de diferentes niveles de fertilizacion nitrogenada sobre el crecimiento y produccion del cafeto en una densidad de poblacion de 7 143 cafetos por hectarea. Resumenes de Investigaciones en Café, ISIC, ano III, 1979-1980 : 97-101.

AGUILERA V.H.E., 1979-1980. Efecto de diferentes niveles de fertilizacion nitrogenada, sobre el crecimiento y produccion del cafeto en una densidad de poblacion de 4 761 cafetos por hectarea. Resumenes de Investigaciones en Café, ISIC, ano III, 1979-1980 : 101-105.

AMORIM H.V.de *et al.*, 1965. Estudos sobre a alimentaçao mineral do cafeeiro. XIV. Efeito da adubaçao NPK na composiçao quimica do solo, do fruto e na qualidade da bebida. Anais da Escola superior de Agricultura « Luiz de Queiros » (Piracicaba), 22 : 139-152.

BENAC R., 1965. Etude des besoins en éléments majeurs du caféier Arabica en pays Bamoun (Cameroun), 1^{re} partie : réponse des caféiers aux traitements fertilisants. Café Cacao Thé 9 (1) : 3-23.

BENAC R., 1966. Etude des besoins en éléments majeurs du caféier Arabica en pays Bamoun (Cameroun), 2^e partie : analyses foliaires. Café Cacao Thé 10 (4) : 331-335.

BENAC R., 1967. Etude des besoins en éléments majeurs du caféier Arabica en pays Bamoun (Cameroun), 2^e partie : analyses foliaires. Café Cacao Thé 11 (1) : 31-56.

BENAC R., 1967. Etude des besoins en éléments majeurs du caféier Arabica en pays Bamoun (Cameroun), 3^e partie : analyses foliaires et rendements. Café Cacao Thé 11 (3) : 203-219.

BOUHARMONT P., 1993. La fertilisation des pépinières de caféier Arabica dans la région des sols fertiles peu évolués d'origine volcanique au Cameroun. *Café Cacao Thé* 37 (3) : 195-204.

BOUHARMONT P., 1994. La fertilisation des jeunes plantations de caféiers Arabica au Cameroun. *Café Cacao Thé* 38 (1) : 25-40.

BRICENO J.A., CARVAJAL J.F., 1973. El equilibrio entre los metales alcalinos y alcalinoterreos en el sol, asociado con la respuesta del cafeto al potasio. *Turrialba* 23 (1) : 56-71.

CATANI R.A., MORAES F.R.P. de, BERGAMIN H., 1969. A concentração do cloro em folhas de café. *Anais da Escola Superior de Agricultura « Luiz de Queiros »* 26 : 93-98.

CLARKE R.J., MACRAE R., 1988. *Coffee. Volume 4 : Agronomy. Elsevier applied science publishers LTD, Royaume-Uni, 334 p.*

FORESTIER J., 1964. Relations entre l'alimentation du caféier Robusta et les caractéristiques des sols. *Café Cacao Thé* 8 (2) : 89-112.

FRANCO C.M., LAZZARINI W., CONAGIN A., JUNQUEIRA R.A., MORAES F.P., 1965. Mineral fertilizing of coffee. II. Second period (1959-1963), 1st. Sess. FAO Tech. Wkg. Party Coffee Prod. Prot., Rio de Janeiro, Brésil, Ce/65/74, 2 p.

FURLANI A.M.C. *et al.*, 1976. Efeitos da aplicação de cloreto e de sulfato de potássio na nutrição do cafeeiro. *Bragantia* 35, tome 2 (29) : 349-364.

GATHAARA M.P.H., KIARA J.M., 1990. Density and fertilizer requirements of the compact and disease resistant Arabica coffee. *Kenya Coffee* 55 (646) : 907-910.

GEUS J.G.de., 1969. Fertilizer guide for coffee. Part III. Leaf analysis and fertilizer recommendations in Africa. *Kenya Coffee* 34 (403) : 277-285.

GEUS J.G.de., 1969. Fertilizer guide for coffee. Part IV. Leaf analysis and fertilizer recommendations in Africa, Asia and the Western Hemisphere. *Kenya Coffee* 34 (404) : 329-334.

GONZALES M.A., 1997. Efecto de la fuente de potasio en el acumulamiento de cloruros y sulfatos en el cafeto. *Agronomia Costarricense* (1) : 31-37.

GUILLOBEZ S., CASTAING X., SALLEE B., 1990. L'antagonisme potassium-magnésium chez le caféier Arabica dans la région de l'Ouest Cameroun. *Café Cacao Thé* 34 (4) : 265-280.

HAAG H.P., SARRUGE J.R., 1967. Absorption de zinc par des racines détachées de caféier (*Coffea arabica* L. variété Nouveau Monde). *Fertilité* (29) : 13-22.

HIROCE P., 1975. Composição mineral das folhas de cafeeiro (*Coffea arabica* « Mundo Novo ») com referencia a época e a adubação. *Boletim de Divulgação* (20), resúmenes

de teses 1973 : 169-171.

HUERTAS A., 1964-1965. Composition minérale foliaire, fertilisation et production du café. Fertilité (23) : 42-51.

IYENGAR B.R.V., 1971. Fertilizer needs of coffee in India. Indian Coffee 35 (11) : 449-452.

JONES P.A., 1962. Information on the work of research institutions. Part I. The coffee research station, Kenya, Kenya Coffee 27 (324) : 489-492.

JONES P.A., ROBINSON J.B.D., WALLIS J.A.N., 1961. Fertilizers, manure, and mulch in Kenya coffee growing. Kenya Coffee 26 (312) : 441-459.

KABAARA A.M., 1970. Nutritional implications of intensification of coffee production. Kenya Coffee 35 (418) : 354-355.

KRISHNAMURTHY RAO W., 1972. Mineral deficiencies in coffee. Indian Coffee 36, (1) : 27-29.

KRISHNAMURTHY RAO W., 1978. Trace element nutrition of coffee. Indian Coffee 42 (11) : 315-316.

LOUE A., 1986. Les oligo-éléments en agriculture. Agri-Nathan International, France, 339 p.

MALAVOLTA E., 1972. Intensive fertilization of coffee in Brazil. Soils and Fertilizers. 35 (6) : 763.

MALAVOLTA E. *et al.*, 1964. Estudos sobre a alimentação mineral do cafeeiro. XII. Efeito da adubação na composição mineral das folhas. Anais Escola Super. Agr. « Luiz de Queiros » 21 : 73-78.

MALAVOLTA E., 1970. Intensive fertilization of coffee in Brasil. International Potash Institute Sect. 6, 21 p.

MARTIN-PREVEL P., GAGNARD J., GAUTIER P., 1984. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Technique et Documentation, Lavoisier, France, 810 p.

MATHEW P.K., 1971. Manuring alters crop production pattern in coffee. Indian Coffee 35 (11) : 477-480.

MÜLLER L.E., 1959. Algunas deficiencias minerales comunes en el cafeto (*C.arabica* L.). Boletín Técnico, IICA (4) : 41 p.

NAGAI V., IGUE T., HIROCE R., ABRAMIDES E., GALLO J.R., 1974. Relação entre os nutrientes dosados nas folhas de cafeeiro. Bragantia 33 : CXXXI-CXXXIV.

NJOROGE J.M., 1987. Effects of inorganic fertilizers on coffee yields and quality in Kenya.

Kenya Coffee 52 (612) : 189-195.

PEREIRA H.C., JONES P.A., 1955. Field responses by Kenya coffee to fertilizers, manures and mulches. Coffee Board of Kenya, Monthly Bulletin 20 (240) : 324-327.

PONTE A.M.da *et al.*, 1965. Ensaio factorial de adubação NPK em cafezal estabelecido nos solos vermelhos da Chianga, Angola, (resultados preliminares). VI Jornadas silvo-agron. (Nova Lisboa), 6-13 de Dezembro de 1965, 18 p.

RAJU T., DESHPANDE P.B., 1985. Influence of longterm application of N, P and K to coffee on some micronutrient content. Journal of Coffee Research 15 (3-4) : 103-112.

ROBINSON J.B.D., 1957. The influence of fertilizers and manure on the pH reaction of a coffee soil. Coffee Board of Kenya Monthly Bulletin 22 (263) : 305-307.

ROBINSON J.B.D., 1969. Effects of environment and cultural conditions on nitrogen and phosphorus in coffee leaves. Experimental Agriculture 5 (4) : 301-309.

SCHNUG E., ZAHN S., PISSAREK H.P., 1985. Nährstoff-Versorgung von Kaffee-Pflanzungen (*Coffea canephora* var. Robusta). Tropenlandwirt 86 (10) : 129-139.

SNOECK J., DUCEAU P., 1978. Essais d'engrais minéraux sur *Coffea canephora* en Côte d'Ivoire : production et rentabilité. Café Cacao Thé 22 (4) : 285-302.

SNOECK D., SNOECK J., 1988. Programme informatisé pour la détermination des besoins en engrais minéraux pour les caféiers Arabica et Robusta à partir des analyses de sol. Café Cacao Thé 32 (3) : 201-212.

SNOECK J., JADIN P., 1990. Mode de calcul pour l'étude de la fertilisation minérale des caféiers basée sur l'analyse du sol. Café Cacao Thé 34 (1) : 3-21.

TAYLOR M.S., 1968. Coffee fertilization. Is nitrogen enough? Tanganyika Coffee News 8 (4) : 105-107.

VALENCIA A.G., 1988. Nutricion mineral del cafeto. Cenicafé : 113-131.

VICENTE-CHANDLER J., ABRUNA F., BOSQUE-LUGO R., SILVA S., 1969. Intensive coffee culture in Puerto Rico. Part II. Kenya Coffee 34 (398) : 100-104.

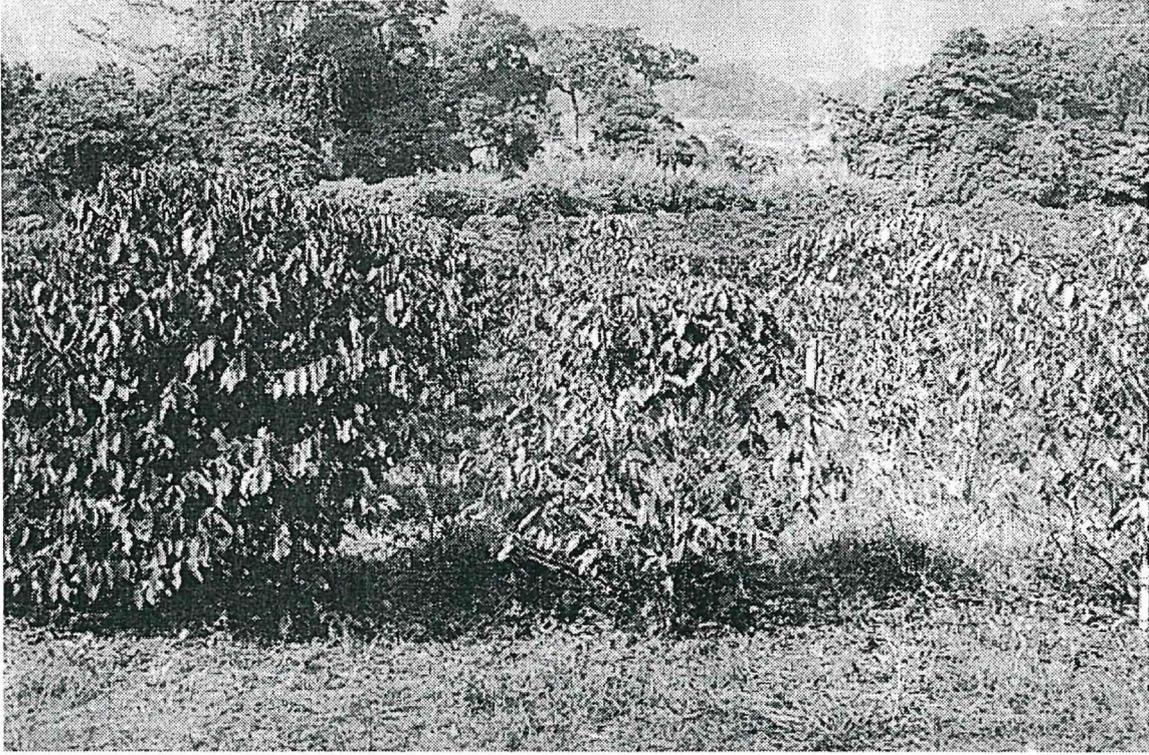


Photo 1 et 2. Essai de doses d'azote pour le caféier Java, à Foubot
- à gauche, traitement N4 (420 kg N/ha) ;
- à droite, traitement NO (sans azote).





Photo 3. Essai de doses d'azote pour le caféier Java, à Fombot
- à gauche, traitement N1 (52,5 kg N/ha) ;
- à droite, traitement N3 (210 kg N/ha).



Photo 4. Essai de doses d'azote pour le caféier Caturra, à Fombot
- avant-plan à gauche, feuilles des caféiers au teint foncé ou pâle ;
- arrière-plan, effets de différentes doses d'azote.



Photo 5. Essai de doses d'azote (Caturra) à Foubot
- avant-plan, traitement N0 (sans azote) ;
- arrière-plan, traitement N5 (630 kg N/ha).



Photo 6. Essai de doses d'azote (Caturra) à Foubot
- avant-plan, traitement N1 (52,5 kg N/ha) ;
- arrière-plan, traitement N5 (630 kg N/ha).



Photo 7. Station de Santa



Photo 8. Essai de doses d'azote : traitement N4 (420 kg N/ha) à Santa



Photo 9. Essai NPK : traitement N3P2K2 (630 kg N, 100 kg P_2O_5 et 100 kg K_2O)
à Santa

