MODE DE CALCUL POUR L'ÉTUDE DE LA FERTILISATION MINÉRALE DES CAFÉIERS BASÉE SUR L'ANALYSE DU SOL

J. SNOECK, P. JADIN (*)

INTRODUCTION

Un premier programme informatisé pour la détermination des besoins en engrais minéraux pour les caféiers Arabica et Robusta à partir des analyses du sol a été proposé en 1987 et 1988. Ce programme est basé sur l'évaluation de la composition chimique du sol en fonction d'équilibres entre sa texture (argile + limon) et des éléments minéraux majeurs dans le sol (C, N, K, Ca, Mg). Le phosphore total et assimilable, la capacité d'échange, la saturation et le pH ont été considérés comme peu ou non dépendants de la texture. Des seuils ont été proposés, qui tiennent compte d'expérimentations réalisées en champs dans divers pays et par divers organismes de recherche, tant sur caféier Robusta que sur caféier Arabica.

En prenant également en compte les équilibres entre cations, le programme proposait des formules générales :

— soit azote seul, si la capacité d'échange est supérieure à 5 méq % et si la saturation est supérieure à 40 %, pour autant qu'il n'y ait pas de déficit marqué en phosphore et/ou en potassium ;

— soit des formules N-P ou N-K, si la capacité d'échange est supérieure à 5 méq % et si la saturation est supérieure à 40 % et s'il apparaît un déficit en phosphore ou en potassium dans le sol ; soit une formule N-P-K, s'il y a un déficit en phosphore et en potassium ;

— soit une formule complète du type N-P-K-(Mg), si la capacité d'échange est inférieure à 5 méq % ou si la saturation est inférieure à 40 %.

Un chaulage pouvait être conseillé sur sol très acide à forte teneur en aluminium échangeable.

Le programme modulait les équilibres N-P, N-K, N-P-K ou N-P-K-Mg en fonction de l'évaluation qui avait été faite au début et proposait donc diverses formules qui n'étaient pas strictement liées aux teneurs en éléments dans le sol.

Des doses étaient recommandées en se basant sur des expérimentations faites dans des stations de recherche voisines ou jouissant de conditions écologiques similaires.

Il apparaît donc que ce premier programme pouvait être amélioré en calculant les doses d'engrais qui permettent d'atteindre les niveaux considérés comme « normaux » dans la partie du sol qui reçoit les engrais et d'assurer de bonnes productions de café.

(*) Service d'Agronomie, IRCC, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1.

RAPPEL DU MODE D'ÉCHANTILLONNAGE DU SOL

Le système racinaire du caféier est composé essentiellement d'un pivot, de racines latérales profondes d'ancrage portant peu de chevelu et de racines latérales superficielles très ramifiées pour la nutrition minérale. Ces dernières sont les plus nombreuses et forment un abondant chevelu, qui explore l'horizon humifère de surface. La plupart des auteurs qui ont étudié l'enracinement des caféiers estiment que 80 à 90 % des racines se trouvent dans les vingt à trente premiers centimètres du profil.

Nous considérerons donc qu'il faut corriger une épaisseur de 0,20 m de terre et que les échantillons pour analyse doivent être prélevés dans cette couche de terre. Pour réduire la variabilité du sol, il convient de prendre une trentaine de carottes de terre dans le champ à analyser, de les mélanger soigneusement pour en obtenir un échantillon composite.

Les échantillons composites de l'horizon de surface (0 à 20 cm) ne doivent pas être prélevés, comme cela avait été écrit précédemment, que dans la zone fertilisée ; l'idéal est de prélever deux séries d'échantillons, l'une dans la zone fertilisée et l'autre dans la zone située entre les caféiers ne recevant pas d'engrais. En effet, il apparaît que malgré le lessivage des bases échangeables dû aux apports d'azote dans la zone fertilisée, les caféiers répondent aux formules déterminées à partir du sol non fertilisé. L'essai J 11 à Abengourou, en Côte d'Ivoire, reçoit des engrais depuis vingt-huit ans ; les analyses chimiques des couronnes fertilisées indiquent des pertes en cations K, Ca et Mg ; malgré ces pertes, les caféiers continuent de donner les meilleures réponses à l'azote seul. L'analyse des parcelles témoins n'ayant jamais reçu d'engrais indique bien que l'azote seul est l'engrais nécessaire pour ces caféiers cultivés sur un sol bien équilibré et bien pourvu en bases échangeables et en phosphore. Il semble que les caféiers se nourrissent des engrais reçus et prélèvent les cations dans la zone non fertilisée du sol, là où les cations n'ont pas été déplacés par l'azote.

DÉTERMINATION DES DOSES D'ENGRAIS

Surface, volume et poids de terre traités

Surface de sol recevant les engrais

Les engrais sont généralement épandus en couronne sous la jupe des caféiers. Dans le jeune âge, cette couronne est proche du tronc ; elle est représentée par un cercle de 0,3 m de rayon couvrant une surface de 0,282 m^2. En deuxième année, les épandages sont faits sur un cercle de 0,5 m de rayon, d'une surface de 0,785 m^2. Plus tard, lorsque les caféiers entrent en production, l'engrais est épandu sous la jupe, sur une couronne d'un rayon variant de 0,40 à 0,75 m et d'une surface de 1,260 m^2, ou sur une demi-couronne si les caféiers sont plantés sur un terrain en forte pente.

Les épandages peuvent aussi être faits en bandes de part et d'autre des lignes de caféiers. Ce mode d'épandage est surtout pratique dans les plantations à haute densité. Les apports d'engrais sont faits sous les jupes sur des bandes de 0,40 m de largeur, c'est-à-dire entre 0,20 et 0,60 m des troncs de chaque côté des caféiers. La surface de sol couverte par les engrais dépend des écartements dans les lignes de caféiers.

La surface de sol modifiée par les engrais par rapport à la surface totale du champ est proportionnelle à la densité de plantation et au mode d'épandage. Les proportions pour diverses options ont été calculées et figurent dans le tableau I. Dans le programme pour l'ordinateur, il suffira d'introduire la densité de plantation et la surface couverte par les engrais.

TABLEAU I

Surfaces de sol recevant les engrais et calcul des proportions de terre modifiée par les engrais

Soil surfaces receiving fertilizers and proportions of soil modified by the fertilizers

Ecartement	Surface par caféier (m²)	Surfaces recevant l'engrais: Rayon du cercle 0,3 m (m²)	Rayon du cercle 0,5 m (m²)	Rayon de la couronne 0,4-0,75 m (m²)	Largeur des bandes 2 × 0,4 m (m²)	Proportion de sol fertilisé (%)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Caféier Arabica									
1,6 m × 0,8 m	1,28	0,282	—	—	0,64	22,0	—	—	50,0
2,0 m × 1,5 m	3,00	0,282	0,785	1,265	1,20	9,4	26,2	42,2	40,0
2,5 m × 1,5 m	3,75	0,282	0,785	1,265	1,20	7,5	20,9	33,7	32,0
2,0 m × 2,0 m	4,00	0,282	0,785	1,265	1,60	7,0	19,6	31,6	40,0
Caféier Robusta									
3 m × 1,7 m	5,10	0,282	0,785	1,265	1,36	5,5	15,4	24,8	26,7
3 m × 2,0 m	6,00	0,282	0,785	1,265	1,60	4,7	13,1	21,1	26,7
3 m × 2,5 m	7,50	0,282	0,785	1,265	2,00	3,8	10,5	16,9	26,7
Spacing	(m²) Surface per coffee tree	(m²) 0,3 m	(m²) 0,5 m	(m²) 0,4 m-0,75 m	(m²) 2 × 0,4 m	(%) Proportion fertilized soil			
		Circle radius		Crown radius	Strip width				
		Surfaces receiving fertilizers							

Les proportions sont calculées comme suit :

$$\frac{\text{surface de sol recevant les engrais} \times 100}{\text{surface de sol occupée par un caféier}}$$

Volume de sol à modifier par les engrais

Le caféier exploitant principalement l'horizon humifère de surface, nous considérerons qu'il ne faut corriger qu'une épaisseur de terre de 0,20 m. Les volumes à modifier par les apports d'engrais se calculent donc à partir des surfaces du tableau I multipliées par 0,20 m :

V (en m³) = 0,20 m × surface recevant l'engrais.

Rappelons que les analyses de sol sont faites sur des échantillons composites de surface, prélevés de 0 à 20 cm de profondeur.

Poids de la terre modifiée par les engrais

Il est nécessaire de connaître le poids de terre modifiée pour déterminer la quantité d'engrais à apporter. Le poids de la terre est fonction de sa densité. A défaut d'information précise, on peut adopter une valeur moyenne de 1 400 kg par m³ de terre pour un sol moyennement argileux.

Ainsi, sur 1 hectare et 0,20 m de profondeur la terre pèse :

$$(10\,000\ \text{m}^2 \times 0{,}2\ \text{m}) \times 1\,400\ \text{kg/m}^3 = 2\,800\,000\ \text{kg}$$

Le poids du volume de terre recevant des engrais pèse (en kilogramme) :

$$(V \text{ en m}^3) \times 1\,400\ \text{kg/m}^3$$

La dose d'engrais calculée ne sera pas répartie sur tout l'hectare, mais seulement sur une partie de cette surface, correspondant aux cercles, aux couronnes ou aux bandes entourant chaque caféier.

L'ordinateur peut être programmé pour diverses densités de terre et diverses surfaces à corriger.

Calcul des doses de correction

Sauf pour l'azote, les doses d'engrais sont calculées de manière à corriger les déficits existant dans le sol. Les valeurs données par les analyses sont comparées aux normes. S'il y a déficit ou déséquilibre, une certaine quantité d'élément minéral doit être apportée.

La méthode est examinée pour chaque élément.

Azote

Il n'est pas possible de calculer les besoins en azote des caféiers à partir de l'analyse de l'azote total du sol, parce que les apports répétés d'azote ne changent pas toujours les teneurs en azote total dans le sol. Ceci a été montré dans un essai de longue durée sur caféiers Robusta en Côte d'Ivoire. A la station de l'IRCC à Abengourou, dans l'Est de la Côte d'Ivoire, un essai factoriel N, P, K, commencé en 1960, montre qu'après vingt-cinq années d'apports d'engrais azoté (sulfate d'ammoniaque et urée), les teneurs en azote total dans ce sol ferrallitique n'ont pas varié. Les analyses de 1984 donnent :

0,140 % N total pour le témoin,

0,166 % N total dans le cas où l'azote est apporté seul à la dose annuelle de 100 unités N par hectare.

Cet écart n'est pas significatif. Néanmoins, les récoltes de café sont significativement supérieures dans les parcelles recevant de l'azote.

En revanche, pour certains sols du Cameroun, les apports réguliers de sulfate d'ammoniaque ont augmenté significativement les teneurs en azote total du sol après plus de dix années d'épandages (sol ferrallitique à Abong Mbang sous caféiers Robusta et sol dérivé de cendres volcaniques à Foumbot sous caféiers Arabica).

Dans l'état actuel de nos connaissances, il n'est pas possible de proposer des doses d'engrais azoté à partir des analyses de l'azote total du sol. Nos recherches s'orientent vers l'analyse d'autres formes d'azote dans le sol et l'étude de leur évolution.

En conclusion, pour le moment, pour connaître les doses d'azote dont un sol a besoin, il est indispensable de se référer à des essais d'engrais minéraux implantés dans des conditions écologiques voisines de celles de la plantation analysée.

Les expérimentations de l'IRCC ont montré que, sur les sols ferrallitiques et dans les conditions écologiques et économiques de Côte d'Ivoire, les clones sélectionnés de caféiers Robusta donnent les accroissements de production les plus rentables pour 115 unités d'azote par hectare et par an, apportées en deux applications.

Au Cameroun, dans divers essais sur caféiers Arabica, la dose la plus économique est d'environ 240 unités d'azote par hectare et par an.

En revanche, au Burundi, compte tenu du prix élevé de l'urée, la dose la plus économique n'est que de 60 unités d'azote par hectare et par an dans les conditions écologiques suboptimales de grande altitude et de basses températures nocturnes.

La quantité proposée dans le programme informatisé est exprimée en unités d'azote par hectare. Elle doit être divisée par le nombre de caféiers par hectare. Elle ne tient pas compte de la surface corrigée, parce que la dose provient de résultats d'expérimentations avec ces quantités réelles.

Phosphore

Les apports d'engrais phosphatés enrichissent significativement le sol en phosphore total et en phosphore assimilable (méthode Olsen-Dabin). Il est donc possible de calculer la dose d'engrais nécessaire pour atteindre un seuil désiré.

Pour corriger un déficit en phosphore dans un poids de terre correspondant à la partie fertilisée entourant les caféiers sur 0,20 m d'épaisseur, le calcul est le suivant :

La teneur en P assimilable moyenne vaut 45 ppm (Olsen-Dabin) ou 22,5 ppm (Truog ou Bray 2).

Le déficit, en P_2O_5 ‰, est égal à :

$$(45 \text{ ppm} - \text{P assim. sol}) \times 0{,}0022912$$

ou

$$(22{,}5 \text{ ppm} - \text{P assim. sol}) \times 0{,}0022912.$$

Si P total est exprimé en ppm, le niveau normal est de 440 ppm.

Si P total est exprimé en P_2O_5 ‰, le niveau normal est de 1 ‰.

Si le sol est déficitaire en phosphore total et que l'on ne dispose pas d'analyse du phosphore assimilable, on apporte 40 ppm de phosphore ou $(40 \times 0{,}0022912) = 0{,}092$ P_2O_5 ‰.

Le poids d'oxyde élémentaire nécessaire se calcule comme suit :

P_2O_5 (g/plant) =
= (Déficit en P_2O_5 ‰) × (Poids de terre × FU)

où FU est le facteur d'utilisation de l'engrais phosphaté, compte tenu de la nature du sol (1 pour des sols ferrallitiques, 2 pour des sols fixateurs de phosphore).

Le poids d'engrais dépend de la concentration en oxyde de l'engrais choisi :

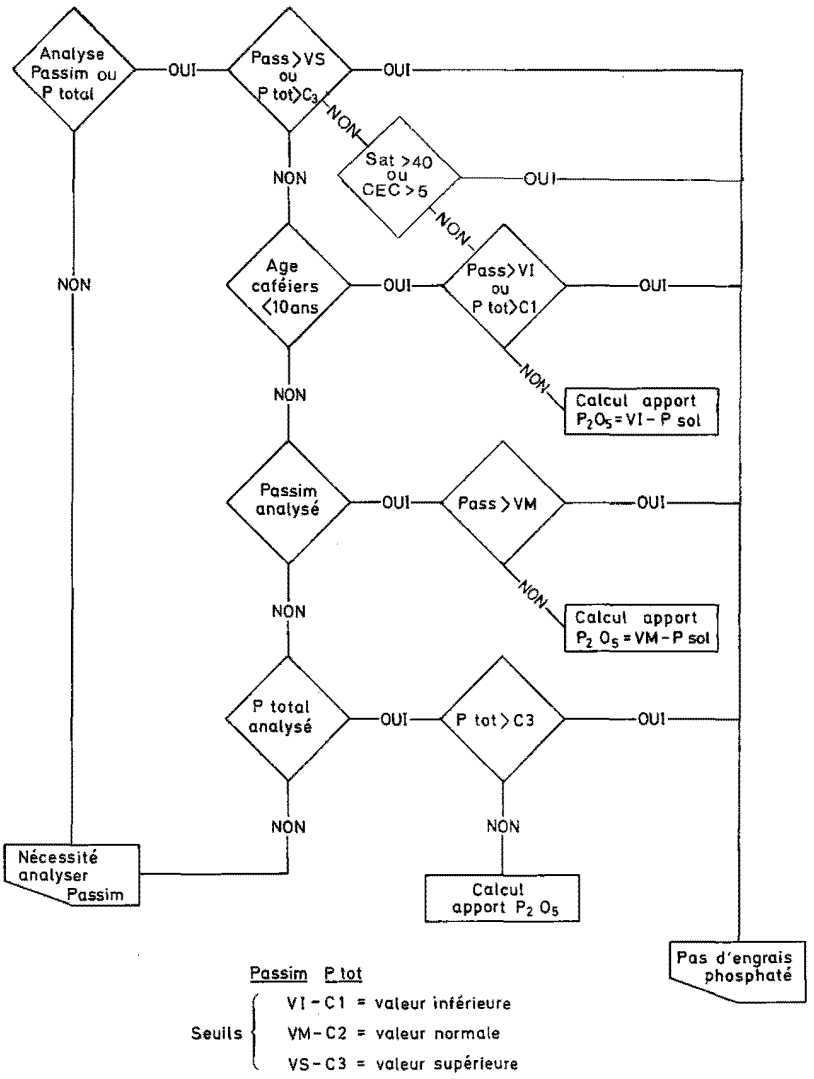
— superphosphate triple : 44 % P_2O_5 et 20 % CaO,

— superphosphate simple : 18 % P_2O_5 et 28 % CaO,

— phosphate naturel : 35 % P_2O_5 et 45 % CaO.

La dose de correction par hectare est calculée en multipliant par le nombre de caféiers par hectare.

Dans un sol pauvre, à faible capacité d'échange (C.E.C. < 5 méq %) ou à faible saturation (V < 40 %), il convient généralement d'apporter du phosphore.



Graphe 1. — Calcul des besoins en phosphore

Calculation of phosphorus requirements

Potassium

Des auteurs hongrois ont trouvé des corrélations très hautement significatives (r = 0,85***) entre les teneurs en potassium échangeable du sol et la production de la vigne. En Chine, certains chercheurs ont établi des seuils de déficiences et de normalité du potassium échangeable du sol en fonction de la réponse du cotonnier aux apports d'engrais potassique.

Pour la production des caféiers, les teneurs favorables dépendent de la texture du sol. La figure 1 rappelle les normes proposées par Forestier.

Le paillis a une très grande influence sur la teneur en potassium du sol. Les apports réguliers accroissent très rapidement les niveaux et induisent des déséquilibres K-Mg, par excès de K. Les engrais potassiques enrichissent également le sol en potassium, mais plus lentement. Les apports simultanés d'azote provoquent un lessivage du potassium.

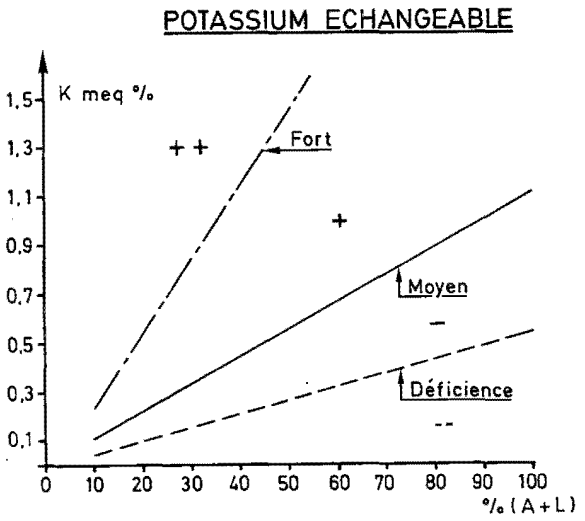


Fig. 1. — Normes proposées par Forestier pour le potassium

Norms proposed by Forestier for potassium

A + L = Argile + Limon ; *Clay + Silt*

Si le potassium, exprimé en méq % ou en % de la somme des bases échangeables, est déficitaire, il est nécessaire d'apporter un engrais potassique.

Le poids d'oxyde élémentaire pour la correction du déficit en potassium du sol autour d'un caféier se calcule comme suit :

$$K_2O \text{ (g/plant)} = \frac{[(\text{K méq \% moyen} - \text{K méq \% sol}) \times (\text{Poids de terre}) \times 47{,}1]}{100} \times 2$$

— diviser par 100 pour transformer des méq % g en mg d'oxydes ;

— 47,1 = nombre de mg d'oxyde (K_2O) contenu dans 1 méq K ;

— 2 est le facteur d'utilisation de l'engrais.

Le facteur d'utilisation de l'engrais potassique est estimé à 2, pour tenir compte des pertes par lessivage, immobilisation et rétrogradation. Il faut donc doubler la quantité d'oxyde calculée ci-dessus. Le lessivage est principalement dû aux apports d'azote, qui appauvrit le sol en potassium et également en calcium et en magnésium.

Le poids d'engrais dépend de la concentration en oxyde de l'engrais choisi :

— chlorure de potassium : 60 % K_2O ;

— sulfate de potassium : 48 % K_2O.

La dose de correction par hectare est calculée en multipliant par le nombre de caféiers par hectare.

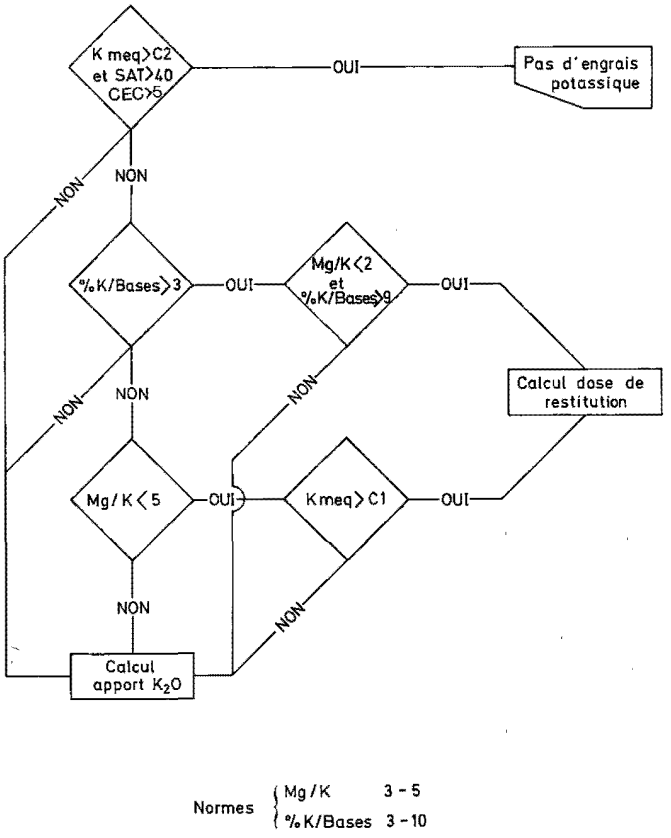
Calcium

Les essais de chaulage ont rarement donné de résultats économiques.

A Madagascar, sur des alluvions fluviatiles de pH = 5,0, les caféiers Robusta et *congusta* n'ont pas réagi à des amendements calcaires, dolomitiques ou de scories.

Sur caféiers Arabica, au Cameroun, dans un sol de pH = 5,0, avec 3,23 méq % de bases échangeables et un taux de saturation de 17 %, les apports de chaux et de kiesérite n'ont donné aucune augmentation de production au cours de neuf récoltes.

En Colombie, G. Valencia A. rapporte l'absence d'effet de diverses doses de chaux éteinte et de carbonate de calcium dans un sol de pH = 5,5. Néanmoins, des augmentations de production ont été enregistrées au Brésil sur des sols des cerrados à faible capacité d'échange ou très désaturés, ne contenant que 1 à 2 méq % de cations. Sur de tels sols, des chaulages ou des apports de dolomie sont efficaces.



Graphe 2. — Calcul des besoins en potassium

Calculation of potassium requirements

Au Burundi, l'ISABU et l'IRCC ont installé des essais d'amendements dolomitiques sur des sols contenant 0,22 méq % de bases échangeables et 2,4 méq % d'aluminium pour une CEC de 4,45 méq % et un pH de 4,5 et cultivés en caféiers Arabica.

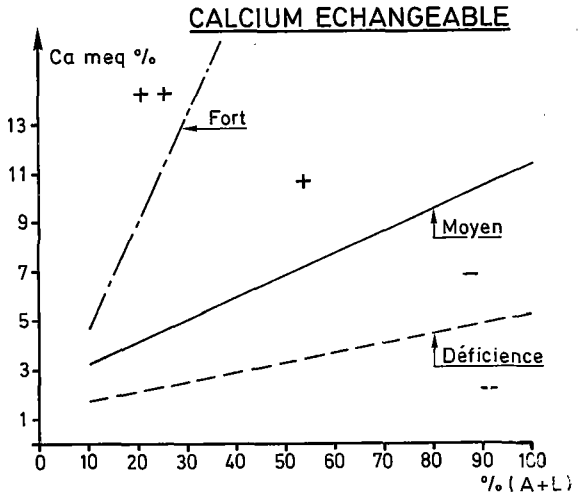


Fig. 2. — Relation établie par Forestier entre la texture du sol et des valeurs de Ca méq % dans le sol

Relationship established by Forestier between soil texture and Ca meq % contents in the soil

A + L = Argile + Limon ; *Clay + Silt*

Les caféiers auraient besoin de chaux s'ils étaient cultivés sur des sols très désaturés, pauvres en bases échangeables et d'un pH inférieur à 4,5. Forestier a établi une relation entre la texture du sol et des valeurs de Ca méq % dans le sol (fig. 2).

Le calcul des besoins en chaux ou en dolomie peut être fait soit en se basant sur la teneur en alumine, soit en remontant le taux de saturation à une valeur de 60 %.

Calcul des besoins en calcium à partir de la teneur en alumine

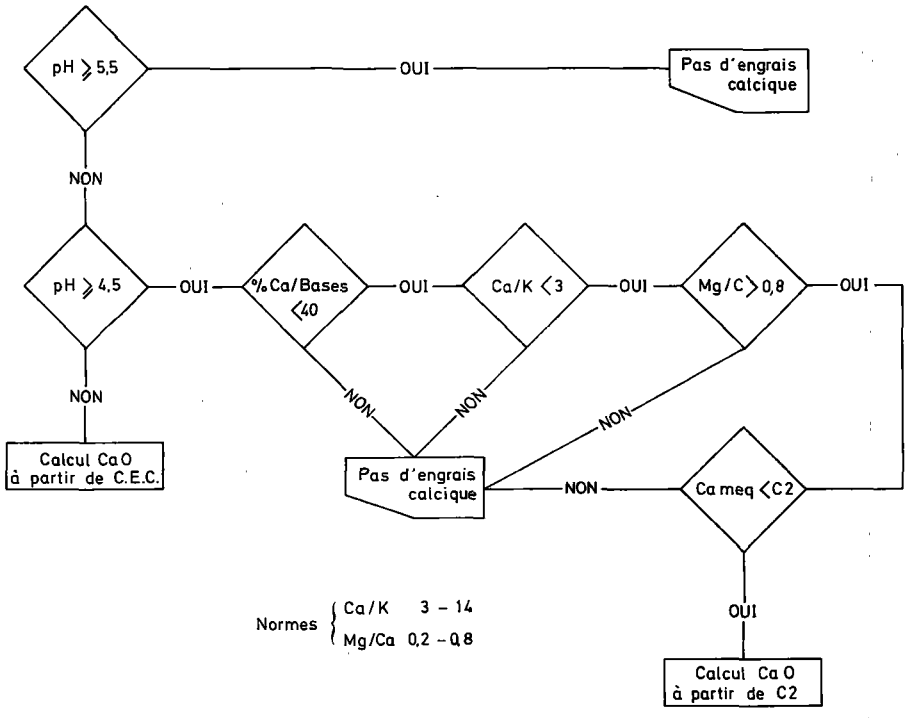
Kamprath propose d'apporter 1,5 méq de Ca par méq d'aluminium, afin de neutraliser 85 à 90 % de l'aluminium échangeable dans un sol contenant entre 2 et 7 % de matière organique. Ceci provoque un accroissement du pH, qui passe à des valeurs supérieures à 5,5.

Ce principe conduit au calcul suivant :

$$CaO\ (kg/ha) = 1{,}5 \times (28{,}1 \times 1{,}4 \times 20) \times Al$$

où : 28,1 = méq % Ca en mg d'oxyde CaO,
1,4 = densité du sol en g par cm^3,
20 = épaisseur du sol à corriger en cm,
Al = méq % d'aluminium échangeable.

L'application de cette formule aux sols du Burundi contenant 2,4 méq % d'aluminium pour



Graphe 3. — Calcul des besoins en calcium

Calculation of calcium requirements

une CEC de 4,45 méq %, conduit à préconiser 2 832 kg de CaO par hectare. Cela correspond à un apport de 3,60 méq pour 100 g de terre. Cet apport est excessif pour un sol à faible capacité d'échange, dont la garniture cationique serait saturée par des ions Ca^{++} au détriment des autres cations. Il semble donc préférable de proposer un autre mode de calcul des besoins en calcium.

Calcul des besoins en calcium en fixant le taux de saturation à 60 %

Pour une saturation de 60 %, la somme des bases doit égaler :

$$(CEC \times 0{,}6)$$

Les équilibres entre les cations ne sont pas encore bien connus. Forestier propose les valeurs moyennes suivantes :

— K = 5 % de la somme,
— Ca = 80 % de la somme,
— Mg = 15 % de la somme.

Dans cette hypothèse, le poids d'oxyde (CaO) nécessaire pour corriger le déficit du sol devient :

$$CaO\ (kg/ha) = [(CEC \times 0{,}6 \times 0{,}8) - Ca\ méq\ \%\ sol] \times 28 \times 28{,}1$$

où : 0,6 = saturation hypothétique,
0,8 = Ca, en % de la somme de bases,
28 = poids de la terre divisée par 100 000 pour transformer les méq % g en mg d'oxydes,
28,1 = mg d'oxyde (CaO) contenus dans 1 méq Ca.

Le poids d'engrais dépend du type de chaux choisi :

— chaux agricole : 67 % CaO,
— dolomie : teneurs en CaO et en MgO variables suivant les gisements.

Dans le cas d'un amendement calcaire, nous considérons qu'il faut enrichir la surface totale de la plantation et non pas uniquement les cercles, les couronnes ou les bandes entourant les caféiers.

Les épandages se feront uniformément à la volée.

Si le sol est très désaturé, de faible pH et pauvre en magnésium, il sera préférable d'utiliser de la dolomie. Cependant, il faut noter que la partie du sol ne recevant pas de potasse (hors des cercles, couronnes ou bandes d'épandage) risque d'être déséquilibrée par déficit de potasse. La correction potassique et le rééquilibrage ne seront faits que sur les surfaces autour des caféiers.

Magnésium

Les symptômes foliaires de carence en magnésium sont souvent observés. Malgré cela, peu de résultats significatifs de réponses aux engrais magnésiens sont mentionnés dans la littérature.

Sur caféiers Arabica recevant régulièrement du paillis, les teneurs en potassium dans le sol augmentent considérablement et induisent des symptômes foliaires de déficit en magnésium chez les caféiers. Dans le sol, le rapport Mg/K devient inférieur à 1, ce qui signifie qu'il y a plus de potassium que de magnésium dans l'horizon de surface.

La figure 3 représente les relations entre la texture du sol et des teneurs moyennes en méq % de Mg, d'après les travaux de Forestier.

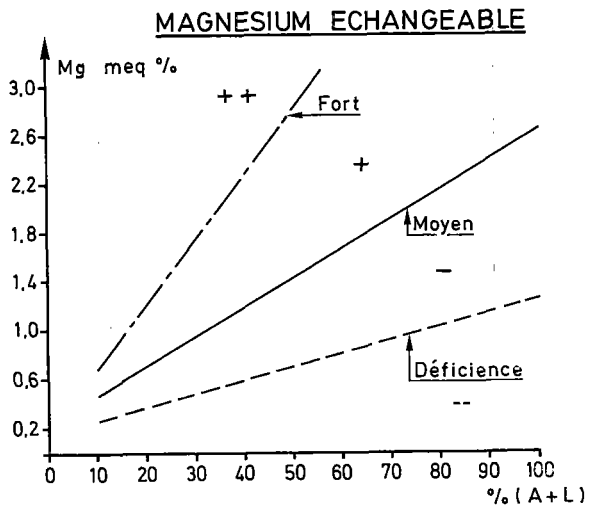


Fig. 3. — Relation établie par Forestier entre la texture du sol et des teneurs moyennes en méq % de Mg

Relationship between soil texture and average levels of magnesium as meq % Mg, according to Forestier

A + L = Argile + Limon ; *Clay + Silt*

Par ailleurs, dans la littérature, il est souvent fait mention de l'importance du rapport Mg/K dans le sol. Ce rapport serait optimal pour des valeurs comprises entre 2 et 5.

Le calcul des besoins en magnésie peut se faire soit à partir de la relation proposée par Forestier, soit à partir de la teneur en potassium. Les résultats devraient être peu différents, car les moyennes de Forestier pour le potassium (fig. 1) et pour le magnésium (fig. 3) sont dans un rapport Mg/K variant entre 3 et 4 pour une même texture du sol.

Si Mg méq % du sol est déficitaire ou si le rapport Mg/K est inférieur à 2, il convient d'apporter un engrais magnésien.

Le poids d'oxyde élémentaire nécessaire pour corriger le déficit ou le déséquilibre du sol se calcule comme suit :

MgO (g/plant) =
= [(Mg méq % moyen − Mg méq % sol) × × (Poids de terre) × 20,16]/100

ou encore :

MgO (g/plant) =
= [(K méq % sol × 3) − Mg méq % sol) × × (Poids de terre) × 20,16]/100

— diviser par 100 pour transformer des méq % g en mg d'oxydes ;

— 20,16 = mg d'oxyde (MgO) contenu dans 1 méq Mg.

Dans les sols très désaturés, à pH bas, qui doivent recevoir un amendement dolomitique, il conviendra de réduire la dose calculée ci-dessus proportionnellement aux apports de magnésie provenant de la dolomie.

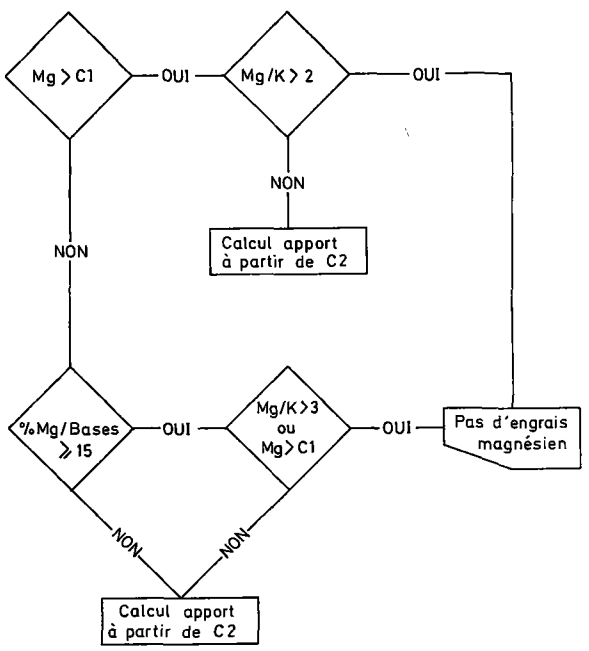
Le poids d'engrais dépend de la concentration en oxyde de l'engrais choisi :

— kiesérite : 27 % MgO,

— dolomie : teneurs en CaO et en MgO variables suivant les gisements.

Lorsque de la chaux ou de la dolomie sont épandues, il convient de recalculer l'équilibre des bases échangeables et le taux de saturation.

La dose de correction par hectare est calculée en multipliant par le nombre de caféiers par hectare.



Graphe 4. — Calcul des besoins en magnésium

Calculation of magnesium requirements

Doses de correction et doses d'entretien

Doses de correction

Les doses calculées ci-dessus, à l'exception des doses d'azote, sont des doses de correction.

La question est de savoir en combien de temps la correction doit être faite pour être efficace et rentable. Des expérimentations devront être mises en place pour y répondre. Ces nouvelles expériences seront conduites suivant la nouvelle méthodologie proposée dans cet article. Quelques essais ont commencé en Côte d'Ivoire et au Togo sur caféiers Robusta et au Burundi sur caféiers Arabica.

En attendant les résultats de ces études, les essais de fertilisation minérale classiques servent de références. On peut suggérer que, sur les sols moyennement désaturés, les doses annuelles de potassium ne devraient pas dépasser les doses d'azote, puisqu'il existe un antagonisme N-K. Sur les sols très désaturés (saturation < 20 %) et/ou pauvres en potassium, le rapport K_2O/N des formules pourrait aller jusqu'à 2. Pour respecter ces équilibres, on module la durée de correction.

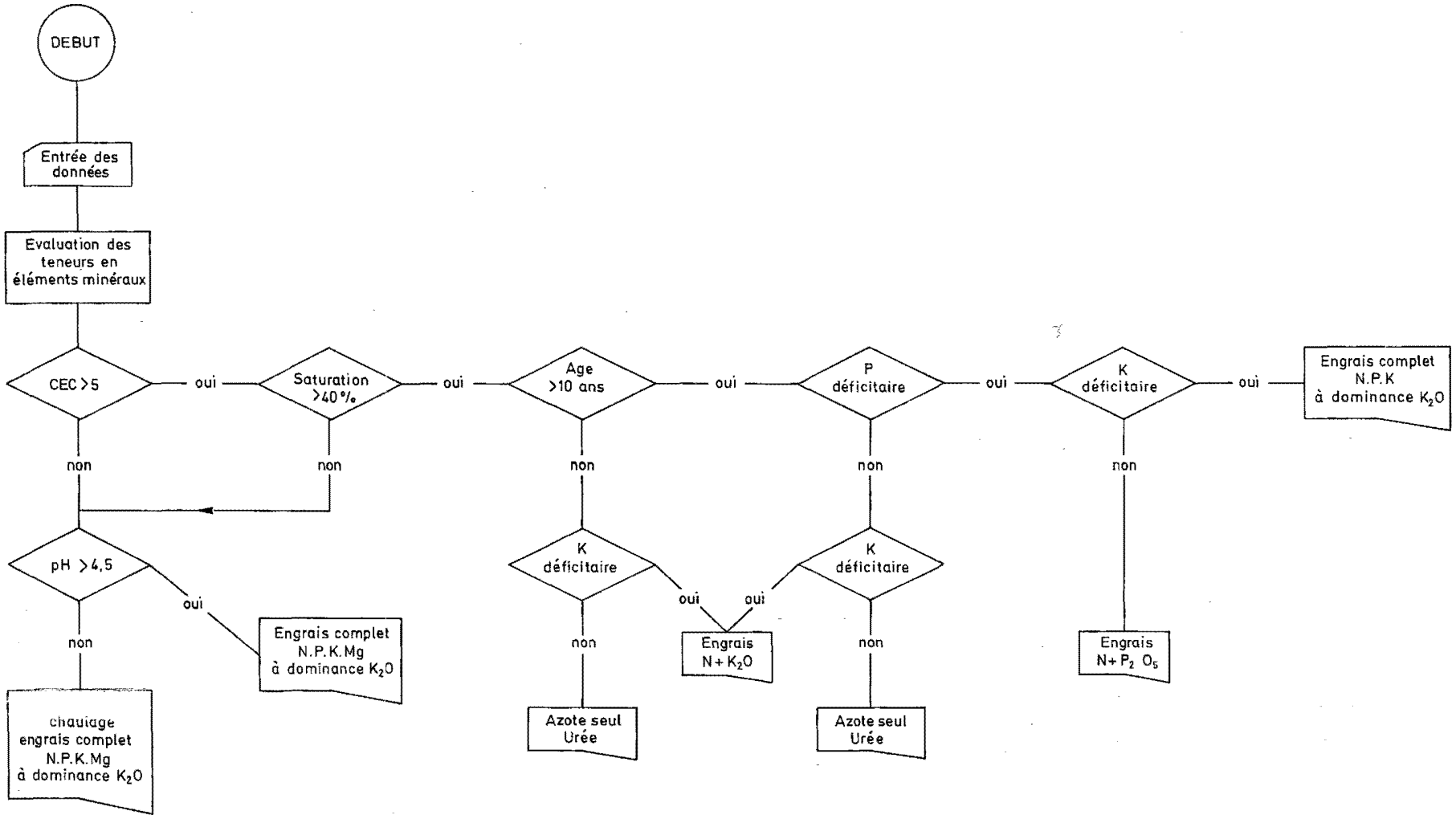
Doses d'entretien

Une fois que la correction en phosphore et en cations est atteinte dans la partie fertilisée du sol, il est probablement inutile de continuer à apporter de fortes doses d'engrais minéraux autres que l'azote. En effet, il y a danger d'accumulation excessive de phosphore, qui pourrait bloquer l'assimilation du zinc et induire des carences en zinc, ou du potassium, qui entraînerait un déséquilibre Mg/K. Il convient donc de faire des analyses de sol dans la partie fertilisée pour en connaître le statut chimique. A partir de ces analyses, on pourra décider s'il est nécessaire de poursuivre la correction ou si l'on peut passer à une formule d'entretien et de restitution.

Ceci n'élimine pas le contrôle de l'évolution chimique du sol entre les caféiers, dans la zone non fertilisée.

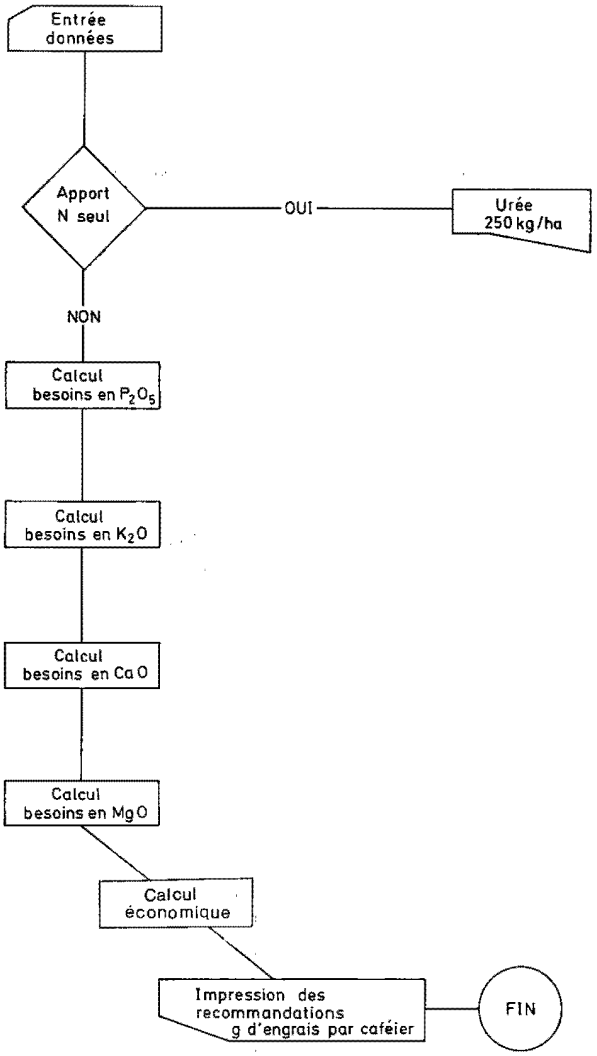
La formule d'entretien servira à compenser le lessivage des éléments minéraux, leur rétrogradation et leur fixation dans le complexe adsorbant. La formule de restitution compensera les exportations en éléments minéraux par les récoltes qui sont, pour 1 000 kg/ha de café marchand :

— 33,4 kg d'azote (N),
— 6,1 kg d'acide phosphorique (P_2O_5),
— 44,0 kg de potasse (K_2O),
— 5,4 kg de chaux (CaO),
— 4,2 kg de magnésie (MgO).



Graphe 5 (a). — Programme diagnostic sol, caféier

Coffee, soil diagnostic programme



Graphe 5 (b). — Programme diagnostic sol, caféier

Coffee, soil diagnostic programme

CONCLUSION

Il a été montré par divers auteurs que l'analyse chimique du sol d'une caféière permet de déterminer les besoins en engrais des caféiers.

Dans un premier temps, nous avions proposé une simple identification des formules d'engrais à partir des analyses du sol. Les doses étaient déduites d'essais réalisés dans des conditions écologiques voisines. Les nouvelles expérimentations mises en place en se basant sur ces recommandations nous ont amenés à tenter de préciser les doses en les calculant à partir du statut chimique du sol.

Pour l'azote, nous n'avons pas jusqu'à présent de données qui permettent de déterminer une dose adéquate. Seuls des essais de doses peuvent indiquer la rentabilité des apports. Pour le phosphore total et assimilable, pour le potassium, le calcium et le magnésium, les normes de Forestier ont été adoptées. Elles permettent de calculer des doses de correction. Une fois le sol corrigé, les doses d'engrais, sauf celles d'azote, peuvent être réduites et ne servir qu'à la seule compensation des pertes diverses par lessivage, rétrogradation, fixation et exportation par les récoltes.

De nouveaux essais ont été installés récemment pour vérifier le bien-fondé de cette méthodologie, qui, si elle s'avère efficace, permettra de simplifier considérablement la conduite des essais de fertilisation minérale sur caféiers et la gestion des apports d'engrais en plantation.

BIBLIOGRAPHIE

BALO (E.) *et al.* — Soil improvement and the use of leaf analysis for forecasting nutrient requirement of grapes. *Potash Review* (Berne), subj. 9, n° 6/1988, 7 p.

FORESTIER (J.). — Relations entre l'alimentation du caféier Robusta et les caractéristiques analytiques des sols. Institut Français du Café et du Cacao (Paris), Bulletin n° 4, 1962, 48 p.

GARCIA (A. W. R.). — Calagem para o cafeeiro. *In* Nutrição e adubação do cafeeiro. Instituto Internacional da Potassa (Berne), janv. 1981, 226 p.

SNOECK (D.), SNOECK (J.). — Programme informatisé pour la détermination des besoins en engrais minéraux pour les caféiers Arabica et Robusta à partir des analyses du sol. *Café Cacao Thé* (Paris), vol. XXXII, n° 3, juil.-sept. 1988, p. 201-218.

SUN XI *et al.* — Potassium nutrition of cotton in relation to soil fertility. *Potash Review* (Berne), subj. 8, n° 6/1988, 6 p.

VALENCIA A. (G.). — Nutrición mineral del cafeto. Interpretación de análisis de suelos para café. *In* Tecnología del cultivo del café. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café (Chinchina), 2e éd., 1988, p. 113-131.

ANNEXE 1

Analyse de sol pour caféiers : J 11, Abengourou

Soil analyses for coffee trees : J 11, Abengourou

Date : 5 décembre 1989

				Classe
Argile + Limon	(%) :		42,000	
Carbone	(%) :		1,539	– –
Azote	(%) :		0,149	– –
P tot.	(ppm) :		391,00	–
P assim.	(ppm) :	Olsen-Dabin	42,000	–
K	(méq %) :		0,378	–
Ca	(méq %) :		4,279	–
Mg	(méq %) :		0,908	–
Somme des Bases	:		5,565	
CEC	(méq %) :		8,946	–
pH	:		5,290	–
Saturation	:		62,21	+
K	(% de la somme) :	6,79		
Ca	(% de la somme) :	76,89		
Mg	(% de la somme) :	16,32		
Rapport Ca/K	:	11,32		
Rapport Mg/K	:	2,40		
Rapport Mg/Ca	:	0,21		

Apports annuels d'engrais			en grammes/caféier
Azote	(%) :	46,00	127,20
Pas besoin de phosphore			
Potasse	(%) :	60,00	13,90
Pas besoin de calcium			
Pas besoin de magnésium			

Correction sur 1 an. Caféiers de 8 ans.

Couronne fertilisée, grand rayon	:	0,75 m
petit rayon	:	0,40 m
Epaisseur du sol	:	0,20 m
Densité apparente du sol	:	1 400,00 kg/m^3
Production estimée	:	1,50 tonne/ha
Nombre de caféiers	:	1 965,00/ha
Rm/Cm	:	3,21

La rentabilité est bonne.

ANNEXE 2

Analyse de sol pour caféiers : Makamba. NPK

Soil analyses for coffee trees : Makamba. NPK

Date : 5 décembre 1989

				Classe
Argile + Limon	(%) :		60,000	
Carbone	(%) :		0,257	– –
Azote	(%) :		0,243	– –
P tot.	(ppm) :		1 578,000	+ +
P assim.	(ppm) :	Olsen-Dabin	57,500	+
K	(méq %) :		0,240	– –
Ca	(méq %) :		2,630	– –
Mg	(méq %) :		1,130	–
Somme des Bases	:		4,000	
CEC	(méq %) :		16,110	+
pH	:		5,750	+
Saturation	:		24,83	–
K	(% de la somme) :	6,00		
Ca	(% de la somme) :	65,75		
Mg	(% de la somme) :	28,25		
Rapport Ca/K	:	10,96		
Rapport Mg/K	:	4,71		
Rapport Mg/Ca	:	0,43		

Apports annuels d'engrais			en grammes/caféier
Azote	(%) :	46,00	78,20
Pas besoin de phosphore			
Potasse	(%) :	60,00	83,80
Pas besoin de calcium			
Kiesérite	(%) :	27,00	46,60

Correction sur 3 ans. Caféiers de 4 ans.

Bandes fertilisées, largeur	:	0,80 m
longueur	:	1,50 m
Epaisseur du sol	:	0,20 m
Densité apparente du sol	:	1 400,00 kg/m^3
Production estimée	:	0,80 tonne/ha
Nombre de caféiers	:	3 333,00/ha
Rm/Cm	:	1,06

La rentabilité est insuffisante.

SNOECK (J.), JADIN (P.). — **Mode de calcul pour l'étude de la fertilisation minérale des caféiers basée sur l'analyse du sol.** *Café Cacao Thé* (Paris), vol. XXXIV, n° 1, janv.-mars 1990, p. 3-16, 1 tabl., 3 fig., 6 graphes, 2 annexes, 6 réf. Traduction en anglais, p. 17-21.

Il a été montré par divers auteurs que l'analyse chimique du sol d'une caféière permet de déterminer les besoins en engrais des caféiers.

Dans un premier temps, nous avions proposé une simple identification des formules d'engrais à partir des analyses du sol. Les doses étaient déduites d'essais réalisés dans des conditions écologiques voisines. Les nouvel-

SNOECK (J.), JADIN (P.). — **Calculation method to study mineral fertilization of coffee trees based on soil analyses.** *Café Cacao Thé* (Paris), vol. XXXIV, n° 1, janv.-mars 1990, p. 3-16, 1 tabl., 3 fig., 6 graphes, 2 annexes, 6 réf. Traduction en anglais, p. 17-21.

Various authors report on the possibility to determine fertilizer requirements for coffee trees through soil analyses.

In a first paper, we had proposed a straightforward identification of formulas working from soil analyses. Doses were deduced from trials planted in regions with similar ecological conditions. New experiments planted

les expérimentations mises en place en se basant sur ces recommandations nous ont amenés à tenter de préciser les doses en les calculant à partir du statut chimique du sol.

Pour l'azote, nous n'avons pas jusqu'à présent de données nous permettant de déterminer une dose adéquate. Seuls des essais de doses peuvent indiquer la rentabilité des apports. Pour le phosphore total et assimilable, pour le potassium, le calcium et le magnésium, les normes de Forestier ont été adoptées. Elles permettent de calculer des doses de correction. Une fois le sol corrigé, on peut diminuer les doses d'engrais, sauf celles d'azote, et seulement compenser ainsi les pertes diverses par lessivage, rétrogradation, fixation et exportation par les récoltes.

De nouveaux essais ont été installés récemment pour vérifier le bien-fondé de cette méthodologie, qui, si elle s'avère efficace, permettra de simplifier considérablement la conduite des essais de fertilisation minérale sur caféiers et la gestion des apports d'engrais dans les plantations.

out according to these recommendations have incited us to try to give more precise doses calculated from the chemical status of the soil.

Up to the present moment, for nitrogen, we have no soil data enabling us to determine adequate doses. Only trials can indicate the economical dose. For total and available phosphorus, for potassium, calcium and magnesium, the norms proposed by Forestier have been adopted. They allow a calculation of correction doses. Once the soil has been corrected, the doses are reduced, except for nitrogen. Afterwards enough fertilizers are applied to compensate for the various losses by leaching, retrogradation, fixation and exportation by harvest.

New trials were planted out recently to verify the accuracy of this methodology, which if proven efficient, will simplify greatly coffee fertilizer trial management and prevision of fertilizer requirements on coffee estates.

SNOECK (J.), JADIN (P.). — **Methode zur Berechnung mineralischer Düngergaben für Kaffeesträucher auf Basis von Bodenanalysen.** *Café Cacao Thé* (Paris), vol. XXXIV, n° 1, janv.-mars 1990, p. 3-16, 1 tabl., 3 fig., 6 graphes, 2 annexes, 6 réf. Traduction en anglais, p. 17-21.

Verschiedene Experten haben den Nachweis erbracht, dass der Mineraldüngerbedarf von Kaffeesträuchern sich anhand der chemischen Bodenanalyse einer Kaffeepflanzung feststellen lässt.

Aufgrund der vorgenommenen Bodenanalysen hatten wir zunächst eine einfache Beschreibung von Düngergaben formuliert. Die einzelnen Dosierungen waren von Versuchen abgeleitet worden, die unter ökologisch ähnlichen Voraussetzungen stattgefunden hatten. Diese Empfehlungen führten zu neuen Experimenten, und wir unternahmen in der Folge eine rechnerische Feinabstimmung der Düngergaben gemäss dem chemischen Bodenstatus.

Bei Stickstoff ermöglichen die uns vorliegenden Daten zur Stunde noch keine adäquate Dosierung. Die Ertragsfähigkeit der Gaben lässt sich nur im Wege von Dosierungsversuchen bestimmen. Im Falle von Gesamtphosphor und assimilierbarem Phosphor, Kali, Kalzium und Magnesium wurde nach den Forestier-Normen gearbeitet. Sie erlauben die Berechnung von Korrekturdosierungen. Nach erfolgter Bodenkorrektur lassen sich die Düngergaben ausser für Stickstoff reduzieren, und nur auf diese Art und Weise können Verluste durch Auswaschung, Rückstufung, Fixierung und Ernteabtragung aufgewogen werden.

In jüngster Zeit wurden erneut Versuche eingeleitet, um die Methode auf ihre Richtigkeit zu erproben. Sollte ihre Effizienz unter Beweis gestellt werden können, dann würden die mineralische Düngung von Kaffeesträuchern und das Monitoring der Düngergaben in den Pflanzungen enorm vereinfacht.

SNOECK (J.), JADIN (P.). — **Modo de cálculo para el estudio de la fertilización mineral de los cafetos, fundada en el análisis del suelo.** *Café Cacao Thé* (Paris), vol. XXXIV, n° 1, janv.-mars 1990, p. 3-16, 1 tabl., 3 fig., 6 graphes, 2 annexes, 6 réf. Traduction en anglais, p. 17-21.

Diversos autores han demostrado que el análisis químico del suelo de un cafetal permite determinar las necesidades de los cafetos en cuanto a fertilizantes.

En una etapa preliminar, hemos propuesto una sencilla identificación de las fórmulas de fertilizantes tomando como punto de partida los análisis del suelo. Las dosis se deducían de las pruebas llevadas a cabo en condiciones ecológicas cercanas. Las nuevas experimentaciones fundadas en estas recomendaciones nos han conducido a intentar precisar las dosis calculándolas a partir del estatuto químico del suelo.

Por lo que se refiere al nitrógeno, no disponemos, hasta la fecha, de datos suficientes que nos permitan determinar una dosis adecuada. Unicamente las pruebas efectuadas con dosis diferentes permitirán indicar la rentabilidad de las aportaciones. Para el fósforo total y asimilable, así como para el potasio, el calcio y el magnesio, se han adoptado las normas de Forestier, que permiten calcular las dosis de corrección. Una vez corregido debidamente el suelo, se pueden disminuir las dosis de fertilizantes, salvo aquellas de nitrógeno, y únicamente compensar, de este modo, las pérdidas diversas por lixiviación, retrogradación, fijación y exportación por las cosechas.

Se han llevado a cabo nuevas pruebas, recientemente, para verificar el perfecto fundamento de esta metodología que, de demonstrarse eficaz, permitirá simplificar considerablemente la ejecución de las pruebas de fertilización mineral en los cafetos y la gestión de las aportaciones de fertilizantes en las plantaciones.

CALCULATION METHOD TO STUDY MINERAL FERTILIZATION OF COFFEE TREES BASED ON SOIL ANALYSES

J. SNOECK, P. JADIN (*)

INTRODUCTION

In two previous papers (1987 and 1988), a computerized programme for the calculation of the fertilizer requirements of Arabica and Robusta coffee trees working from soil analyses was proposed. The programme is based on the evaluation of the chemical status of the soil as a function of balances between its texture (clay + silt) and the major elements in the soil (C, N, K, Ca, Mg). Total and available phosphorus, exchange capacity, base saturation and pH were considered to be little or not dependent of soil texture. Levels were proposed based on field experiments in various countries and by various research institutes, as well on Robusta as on Arabica coffee trees.

Taking into account the balances between cations, the programme proposed general formulas :

— either nitrogen alone, if exchange capacity is over 5 meq % and base saturation is over 40 %, as far as there is no marked deficit in phosphorus and/or potassium ;

— or formulas such as N-P, N-K or N-P-K-(Mg), if the soil presents deficits in phosphorus or potassium, or deficits in phosphorus and potassium and possibly in magnesium.

Liming could be advised on very acid soils with high exchangeable aluminium.

The programme modified the N-P, N-K, N-P-K or N-P-K-Mg balances according to the evaluations it had done and various formulas were proposed which were not strictly bound to the mineral content of the soil.

Doses were recommended based on field experiments implemented in neighbouring research stations or with similar ecological conditions.

It now appears that this first programme could be improved by calculating the fertilizer doses working from the chemical content found in the soil, in order to reach contents that are considered as « normal » in that part of the soil where the fertilizers are applied. This should give high yields of coffee.

REMINDER OF SOIL SAMPLING TECHNIQUE

The rooting system of the coffee tree is essentially made of a taproot, deep lateral roots with little absorbing root hair, and superficial lateral roots very ramified for mineral nutrition. The latter are the more numerous and develop an abundant mat of hair which explores the humus rich surface horizon. Most authors estimate 80 to 90 % of absorbing roots to be in the top 20 to 30 cm of the soil profile.

We shall therefore consider that soil correction should be made to a depth of 20 cm and that soil samples for chemical analysis should be taken in that layer. To minimize soil variations, it is recommended to take about thirty cores in a field, to carefully mix them together in order to have one composite sample.

Composite samples of surface soil (0 to 20 cm) should be taken, not as said before only in the fertilized area of the coffee plantation, but ideally in two series, one in the fertilized area and the other in the area between coffee trees where no fertilizers are applied. Indeed, it appears that in spite of the leaching of exchangeable bases due to the nitrogen fertilizer, coffee trees respond to formulas calculated from soil analysis made on non fertilized soil. A trial in Abengourou, Côte d'Ivoire, got fertilizers for twenty-eight years. Chemical analyses of the fertilized crowns show losses in cations K, Ca and Mg. In spite of these losses, the coffee trees continue to give better responses to nitrogen alone. Analysis of control plots without fertilizers show clearly that nitrogen alone is the required fertilizer for these coffee trees grown on a soil well provided in exchangeable bases and phosphorus. It appears that coffee trees feed on the applied fertilizers and take up the cations in the non fertilized area of the soil, where they have not been displaced by nitrogen.

DETERMINATION OF FERTILIZER DOSES

Surface, volume and weight of soil treated

Surface of soil receiving fertilizers

Fertilizers are generally spread in a crown under the extremities of the branches of coffee trees (skirts). In the first years this crown is near the stem. It corresponds to a circle of 0.3 m radius which covers a surface of

(*) Service d'Agronomie, IRCC, B.P. 5035, 34032 Montpellier Cedex 1.

0.282 m^2. The second year, fertilizers are spread in a 0.5 m radius, surface 0.785 m^2. Later, when trees begin to produce, fertilizer is spread in a crown of approximately 0.4 to 0.75 m radii, the surface of which is 1.260 m^2, or possibly in a half crown on sloping ground.

Applications can also be done in strips either side of coffee rows. This method is more practical in high density plantations. Applications are made under the skirts on 0.4 m wide bands, i.e. 0.2 to 0.6 m on either side of the stems. Soil surface covered by the fertilizers vary with spacing of trees in the rows.

The soil surface modified by the fertilizers as related to the total surface of the field is proportional to planting density and to mode of application. These proportions have been calculated for various options and are presented in table I, p. 5. In the computer programme, only planting density and surface covered by fertilizer need to be introduced.

Proportions are calculated as follows :

$$\frac{\text{Soil surface receiving fertilizers} \times 100}{\text{Soil surface for one coffee tree}}$$

Volume of soil modified by the applied fertilizers

As coffee trees principally feed in the humic surface horizon, we shall consider that only a thickness of 0.20 m of soil must be corrected. Modified volumes are calculated from table I multiplied by 0.20 :

$$V\ (m^3) = 0.20\ m \times \times \text{ surface on which fertilizers are applied.}$$

Let us remember that soil analyses are made on surface composite samples, taken between 0 and 20 cm.

Weight of soil modified by the applied fertilizers

It is necessary to know this weight to determine the amount of fertilizers. Soil weight depends of soil density. If no information is given, one can adopt an average density of 1 400 kg per m^3 for light clayey soils.

Thus, on 1 hectare, the earth weighs :

$$(10\,000\ m^2 \times 0.2\ m) \times 1\,400\ kg/m^3 = 2\,800\,000\ kg$$

and the weight of earth volume which receives the fertilizers is :

$$(V\ (m^3)) \times 1\,400\ kg/m^3.$$

Indeed, the calculated fertilizer dose will not be spread on the whole surface of one hectare, but only on part of the surface corresponding to circles, crowns or strips around each coffee tree.

The computer can be programmed for various soil densities and various to be corrected surfaces.

Calculation of correction doses

Except for nitrogen, fertilizer doses are calculated to correct existing deficits in the soil. Values given by the chemical analyses are compared to the established norms. If a deficit or an imbalance appears, a certain quantity of mineral nutrient must be applied.

The calculation method is considered for each nutrient.

Nitrogen

It is not possible to calculate the nitrogen requirements of coffee trees from the total nitrogen of the soil, because repeated applications of nitrogen do not always change the nitrogen levels in the soil. This has been shown in a long term trial on Robusta coffees in Côte d'Ivoire. At IRCC's research station at Abengourou, East Côte d'Ivoire, a factorial N, P, K trial was started in 1960. After twenty-five years of nitrogen applications, as ammonium sulphate or urea, nitrogen levels in this ferrallitic soil have not changed. The 1984 analyses give :

0.140 % total N for the control,

0.166 % total N for nitrogen alone applied at the annual rate of 100 N units per hectare.

The difference is not significant. However, coffee yields are significantly higher in plots with nitrogen fertilizers.

On the other hand, on certain soils of the Cameroons, regular applications of ammonium sulphate significantly increased nitrogen levels in the soil after more than ten years of applications (ferrallitic soil at Abong Mbang planted with Robusta coffee and soil derived from volcanic ashes at Foumbot planted with Arabica coffee).

According to our present knowledge it is not possible to propose doses of nitrogen fertilizers working from total nitrogen of the soil. Our present research is directed towards analysis of other forms of nitrogen in the soil and their evolution.

For the moment, to know the proper doses of nitrogen a soil is needing it is necessary to refer to fertilizer trials planted in the same ecological conditions as the analysed plantation.

Experiments at IRCC have shown that on ferrallitic soils, in the ecological and economical conditions of Côte d'Ivoire, selected Robusta clones give increases in yield which are most profitable for 115 kg of N per hectare and per year, in two applications.

In the Cameroons, in various Arabica coffee trials, the most economical dose is around 240 N/ha per year.

On the other hand in Burundi as price of urea is very high, optimal economical dose is only 60 N/ha per year, considering the suboptimal ecological conditions in which the trial is situated (high altitude and cold nights).

The recommended quantity proposed by the programme is expressed in nitrogen units per hectare. It must be divided by the number of coffee trees per hectare. No account is taken of the corrected surface, because the dose comes from trial results which are given in N/ha.

Phosphorus

Applications of phosphorous fertilizers increase total and available phosphorus in the soil (Olsen-Dabin method). It is therefore possible to calculate a quantity of fertilizer to reach the required level.

To correct a phosphorus deficit in the weight of earth corresponding to the fertilized area of soil around the coffee tree on 0.20 m depth, calculation is as follows :

available P should be 45 ppm (Olsen-Dabin) or 22.5 ppm (Truog or Bray 2).

P_2O_5 ‰ deficit is :

$$(45 \text{ ppm} - \text{P avail. soil}) \times 0.0022912$$

or

$$(22.5 \text{ ppm} - \text{P avail. soil}) \times 0.0022912$$

If total P is expressed in ppm, the normal level is 440 ppm.

If total P is expressed in P_2O_5 ‰, the normal level is 1 ‰.

If the soil happens to be deficient in total phosphorus and if no analysis for available phosphorus has been made, 40 ppm of phosphorus should be applied or $(40 \times 0.0022912) = 0.092$ P_2O_5 ‰.

The weight of the required elementary oxide is calculated as follows :

$$P_2O_5 \text{ (g/tree)} = (P_2O_5 \text{ ‰ deficit}) \times \times (\text{Weight of earth} \times \text{FU})$$

where FU is a Utilisation Factor of the phosphorous fertilizer, considering nature of the soil (1 for ferrallitic soils, 2 for soils fixing phosphorus).

Weight of fertilizers depends on the oxide concentration in the chosen fertilizer :

— triple superphosphate : 44 % P_2O_5 and 20 % CaO,

— simple superphosphate : 18 % P_2O_5 and 28 % CaO,

— rock phosphate : 35 % P_2O_5 and 45 % CaO.

Correction dose per hectare is calculated by multiplying by number of coffee trees per hectare.

In poor soils, with low exchange capacity (CEC < 5 meq %) or low base saturation (V < 40 %), phosphorus is usually required.

See graph 1, p. 7.

Potassium

Hungarian authors have found very highly significant correlations (r = 0.85***) between soil exchangeable potassium and grape yield in vineyards. In China, researchers have established deficiency and normality levels for soil exchangeable potassium in relation to potassium fertilization of cotton.

For coffee production, favourable contents are functions of soil texture. Figure 1, p. 7, recalls the norms proposed by Forestier.

Mulch has a great influence on soil potassium. Regular mulching rapidly increases potassium levels and induces K-Mg imbalances, due to excess K. Potassium fertilizers also increase soil potassium, but more slowly. Simultaneous applications of nitrogen fertilizer induces leaching of potassium.

If potassium expressed as meq % or as % of the sum of exchangeable bases is deficient, then it is necessary to apply potassium.

Weight of elementary oxide to correct the soil around a coffee tree is calculated as follows :

$$K_2O \text{ (g/tree)} = \frac{[(\text{average K meq \%} - \text{K meq \% soil}) \times (\text{Weight of earth}) \times 47.1]}{100} \times 2$$

— divide by 100 to transform meq % g into mg of oxide ;

— 47.1 = number of mg of oxide (K_2O) in 1 meq K ;

— 2 is the Utilisation Factor of the fertilizer.

Utilisation factor of potassic fertilizer is estimated to be 2, in order to take into account losses by leaching, immobilization and retrogradation. Calculated quantity of oxide must therefore be doubled. Leaching is mainly due to nitrogen applications, which decrease potassium, as well as calcium and magnesium in the soil.

Weight of fertilizer depends on the oxide concentration of the chosen fertilizer :

— potassium chloride or muriate of potassium : 60 % K_2O ;

— sulfate of potassium : 48 % K_2O.

Correction dose per hectare is calculated by multiplying by number of coffee trees per hectare.

See graph 2, p. 8.

Calcium

Liming trials have seldom given economical results.

In Madagascar, on riverine alluvium with pH = 5.0, Robusta or *congusta* coffees gave no response to lime, dolomitic lime or slag enrichment. In the Cameroons, on Arabica coffee, in a pH = 5.0 soil, with only 3.23 meq % of exchangeable bases and a base saturation of 17 %, applications of lime and kieserite gave no yield increase during nine years of observations and harvests.

In Colombia, G. Valencia A. reports on no response to various doses of lime and calcium carbonate on a pH = 5.5 soil. However, substantial increases in yield are reported from Brazil, on cerrado soils, with low exchange capacity or very leached, with only 1 to 2 meq % cations. On such soils, applications of lime or dolomitic lime are efficient.

On Arabica coffee in Burundi, ISABU and IRCC have layed out dolomitic enrichment trials on soils with 0.22 meq % of exchangeable bases and 2.4 meq % exchangeable aluminium for an exchange capacity of 4.45 meq % and pH of 4.5.

It seems that coffee trees need lime if cultivated on very leached soils, low in exchangeable bases, with pH lower than 4.5. Forestier established a relationship between soil texture and Ca meq % contents in the soil (fig. 2, p. 9).

Calculation of lime or dolomitic lime requirement can be made either on aluminium content, or by raising base saturation level to 60 %.

Calculation of calcium requirements based on aluminium content

Kamprath suggests to bring 1.5 meq Ca per meq aluminium, in order to neutralise 85 to 90 % of the exchangeable aluminium in a soil with 2 to 7 % organic matter. This should bring the soil pH to values higher than 5.5.

This principle leads to the following calculations :

$$CaO\ (kg/ha) = 1.5 \times (28.1 \times 1.4 \times 20) \times Al$$

where : 28.1 = mg of oxide CaO in 1 meq % Ca,
1.4 = soil density in g per cm^3,
20 = corrected soil depth in cm,
Al = meq % exchangeable aluminium.

When this formula is worked out for Burundi soils with 2.4 meq % aluminium and 4.45 meq % CEC, CaO application should be 2 832 kg per hectare. This works out as 3.6 meq for 100 g of soil. Such application is excessive for a soil with a low exchange capacity. Its cationic composition would be saturated by Ca^{++} cations, leaving no place for the other cations.

It therefore seems preferable to propose another calculation method for calcium requirements.

Calculation of calcium requirements based on a 60 % base saturation

To reach a base saturation of 60 %, sum of bases must equal :

(Cation Exchange Capacity × 0.60).

Balances between cations are not yet well known and defined. Forestier suggests the following average values :

— K = 5 % of the sum,
— Ca = 80 % of the sum,
— Mg = 15 % of the sum.

If this hypothesis is true, the weight of oxide required to correct the soil deficit becomes :

$$CaO\ (kg/ha) = [(CEC \times 0.6 \times 0.8) - Ca\ meq\ \%\ soil] \times 28 \times 28.1$$

where : 0.6 = hypothetic saturation,
0.8 = Ca as % of sum of bases,
28 = weight of earth divided by 100 000 to transform meq % g into mg of oxide,
28.1 = mg of oxide CaO in 1 meq Ca.

Weight of fertilizer varies according to quality of lime :

— agricultural lime : 67 % CaO,
— dolomitic lime : CaO and MgO contents vary according to sources.

In the case of lime enrichment we would consider that the whole surface of the plantation must be covered and not only the circles, crowns or strips around the coffee trees.

Applications should be broadcast uniformly.

If the soil is very leached, with low pH and poor in magnesium, it will be preferable to use dolomitic lime. It should however be noted that the part of the soil which receives no potassium (outside of the circles, crowns or strips) may be unbalanced because of potassium deficit. Indeed, potassium correction and balancing of cations are only made on the soil surface around the coffee trees.

See graph 3, p. 9.

Magnesium

Foliar symptoms of magnesium deficiencies are often encountered. However, significant responses to magnesium fertilizers are seldom reported in the literature.

On Arabica coffees which are regularly mulched, levels of soil potassium increase considerably and cause foliar symptoms of magnesium deficiencies. In the soil the Mg/K ratio drops to less than 1, showing that there is more potassium than magnesium in the surface horizon.

Figure 3, p. 10, shows the relationship between soil texture and average levels of magnesium as meq % Mg, according to Forestier.

On the other hand, literature often reports on the importance of the Mg/K ratio in the soil. The optimum would be between 2 and 5.

Calculating magnesium requirement can be done either by taking the values proposed by Forestier, or by taking the potassium level in the soil. Results should not be very different, because Forestier's average values for potassium (fig. 1) and for magnesium (fig. 3) are in a ratio varying between 3 and 4 for a same soil texture.

If soil Mg meq % is deficient or if the Mg/K ratio is lower than 2, applications of magnesium fertilizer is required.

Weight of elementary oxide required to correct soil deficit or imbalance is calculated as follows :

$$MgO\ (g/tree) = [(average\ Mg\ meq\ \% - soil\ Mg\ meq\ \%) \times (weight\ of\ earth) \times 20.16]/100$$

or otherwise :

$$MgO\ (g/tree) = [(soil\ K\ meq\ \% \times 3) - soil\ Mg\ meq\ \%) \times (weight\ of\ earth) \times 20.16]/100$$

— divide by 100 to transform meq % g into mg of oxide,
— 20.16 = mg of oxide (MgO) in 1 meq Mg.

In very leached soils, with low pH, which should receive a dolomitic enrichment, it will be necessary to reduce the above calculated dose in proportion with the supply of magnesium coming from the dolomitic lime.

Weight of fertilizer depends on the concentration in oxide of the chosen fertilizer :

— kieserite : 27 % MgO,
— dolomitic lime : CaO and MgO vary according to sources.

If dolomitic lime is utilized, it is appropriate to calculate the accompanying supply of CaO, to transform it into meq % Ca and to calculate again the exchangeable bases balances and the base saturation.

Correction dose per hectare is calculated by multiplying by number of coffee trees per hectare.

See graph 4, p. 11.

Correction and maintenance doses

Correction doses

The calculated doses, except for nitrogen, are correction doses.

The question is to know how long the correction must be applied to be effective and economical. Experiments will have to be layed out to have the answer. These new experiments will have to be implemented according to the

new methodology proposed here. A few trials have started on Robusta coffee in Côte d'Ivoire and in Togo, and on Arabica coffee in Burundi.

In the meantime, we base our recommendations on the classical fertilizer trials. It may be suggested that on average leached soils, the annual doses of potassium should not exceed the doses of nitrogen, because of the N-K antagonism. On very leached soils (base saturation < 20 %) and/or poor in potassium, the K_2O/N balance might be increased to 2. To maintain these balances, correction time is modulated.

Maintenance doses

Once the fertilized area of the soil is corrected for phosphorus and cations, it is probably not necessary to continue applications of high doses of mineral fertilizers other than nitrogen. Indeed, there is a danger of excessive accumulation of phosphorus which might block the uptake of zinc, thereby inducing zinc deficiencies in the trees. The same might happen with an excess of potassium, unbalancing Mg/K. There is therefore need for chemical analyses of the fertilized area of the soil to know its chemical status. Working from these analyses it can be decided if correction must be pursued or if maintenance and restitution formulas are adequate.

This does not mean that it is not necessary to follow up the chemical evolution of the soil between coffee trees, in the non fertilized area.

Maintenance formula shall compensate leaching of chemical nutrients, their retrogradation and fixation by the soil adsorbing complex. Restitution formula must compensate the nutrient exportations by the harvests, which are for 1 000 kg/ha of clean coffee :

— 33.4 kg of nitrogen (N),
— 6.1 kg of phosphoric acid (P_2O_5),
— 44.0 kg of potassium (K_2O),
— 5.4 kg of lime (CaO),
— 4.2 kg of magnesium (MgO).

CONCLUSION

Various authors report on the possibility to determine fertilizer requirements for coffee trees through soil analyses.

In a first paper, we had proposed a straightforward identification of formulas working from soil analyses. Doses were deduced from trials planted in regions with similar ecological conditions. New experiments planted out according to these recommendations have incited us to try to give more precise doses calculated from the chemical status of the soil.

Up to the present moment, for nitrogen, we have no soil data enabling us to determine adequate doses. Only trials can indicate the economical dose. For total and available phosphorus, for potassium, calcium and magnesium, the norms proposed by Forestier have been adopted. They allow a calculation of correction doses. Once the soil has been corrected, the doses are reduced, except for nitrogen. Afterwards enough fertilizers are applied to compensate for the various losses by leaching, retrogradation, fixation and exportation by harvest.

New trials were planted out recently to verify the accuracy of this methodology, which if proven efficient, will simplify greatly coffee fertilizer trial management and prevision of fertilizer requirements on coffee estates.

For graphs 5 (a) and 5 (b), see p. 12-13, appendices, see p. 14-15, references, see, p. 14 and summaries, see p. 15-16.