

# LE CONTROLE DE LA NUTRITION MINÉRALE DU COTONNIER PAR ANALYSES FOLIAIRES

par

**M. BRAUD\***

## RÉSUMÉ

La détermination des déficiences minérales est possible par les analyses foliaires pour les éléments N, S, P et K en tenant compte du développement général du plant du cotonnier (facteur de dilution), de l'âge physiologique de la feuille et du plant et des interactions éventuelles entre éléments minéraux.

Des fonctions de production sont déterminées pour préciser l'importance relative de chaque déficience minérale, comme dans le cas des essais soustractifs aux champs et utilisées pour établir des lois permettant de calculer les niveaux critiques pour chaque élément compte tenu des interactions éventuelles.

Des indices de nutrition, rapport entre la teneur d'un élément donné et le niveau critique correspondant, permettent d'analyser de façon précise les conditions de nutrition minérale du cotonnier dans une région donnée et d'établir un diagnostic sur l'efficacité des formules d'engrais proposées à la vulgarisation.

Le développement de la fertilisation minérale en culture cotonnière dans les pays en voie de développement passe par une détermination aussi bonne que possible des déficiences minérales actuelles et futures, compte tenu des solutions plus ou moins complètes proposées à la vulgarisation.

En 1963, nous avons montré une approche possible de la solution de ce problème grâce aux résultats d'analyses foliaires pour les éléments, soufre, phosphore et potassium.

L'objet de cette étude est double :

- préciser l'interprétation que l'on peut faire des résultats d'analyses foliaires ou pétiolaires pour la détermination des déficiences minérales concernant les éléments azote, soufre, phosphore et potassium ;
- proposer une méthode de contrôle de l'efficacité des formules d'engrais vulgarisées.

## 1. — DÉTERMINATION DES DÉFICIENCES MINÉRALES

La détermination de ces déficiences a représenté, au cours de ces dernières années, une de nos préoccupations les plus importantes en matière d'étude de la fertilisation minérale.

### Méthode expérimentale par voie soustractive aux champs

Le problème consiste à déterminer les déficiences minérales présentes et à hiérarchiser leur importance pour un type de sol donné ayant une certaine fertilité naturelle.

La méthode expérimentale utilisée aux champs consiste à mettre en place un essai permettant de déterminer simultanément :

- le niveau de production naturelle pour un objet sans engrais ;
- le niveau de production potentielle pour un objet constitué par une fumure apportant les principaux éléments : NSPKB. La dose de chacun de ces éléments est fixée de telle sorte qu'aucun d'entre eux ne soit un facteur limitant. Elle tient compte de l'expérience acquise. Pour N, P et K elle est souvent voisine de 50 kg/ha. La dose de S est comprise entre 10 et 15 kg/ha, tandis que celle de B est de l'ordre de 1 kg de  $B_2O_3$  à l'hectare ;
- puis le niveau de production des formules d'engrais dont, successivement, l'un de ces éléments a été retiré.

Un essai soustractif complet comporte ainsi les objets suivants :

(\*) Agronome à l'I.R.C.T. Paris.

- 1 - Témoin sans engrais ;
- 2 - Formule complète NSPKB ;
- 3 - Formule NSPK, objet (-B) ;
- 4 - Formule NSP.B, objet (-K) ;
- 5 - Formule NS.KB, objet (-P) ;
- 6 - Formule N.PKB, objet (-S) ;
- 7 - Formule .SPKB, objet (-N).

La formule complète (objet 2) sert de référence dans l'expression des résultats dont un exemple est illustré par le tableau 1.

Tableau 1. — Exemple de résultats de production de coton-graine d'un essai soustractif.

| Objets                       | kg/ha | %   |
|------------------------------|-------|-----|
| Témoin .....                 | 1 800 | 60  |
| Formule complète .....       | 3 000 | 100 |
| (-B) .....                   | 2 850 | 95  |
| (-K) .....                   | 2 940 | 98  |
| (-P) .....                   | 2 250 | 75  |
| (-S) .....                   | 2 550 | 85  |
| (-N) .....                   | 2 100 | 70  |
| <i>d.s. à P = 0,05</i> ..... | 240   | 8   |

Note. — Un objet soustractif peut conduire à un rendement supérieur à celui de la formule complète s'il est déjà présent en excès dans le sol.

En passant par l'intermédiaire de cette formule d'engrais aussi complète que possible, on a donc

précisé l'importance relative et la valeur absolue des déficiences minérales du milieu naturel de départ. Une expérience particulière acquise au Tchad a permis de vérifier que ces résultats varient peu en fonction de la dose de la formule complète dans la mesure où cette dose reste à un niveau raisonnable. Cette observation montre que ces résultats sont principalement fonction du milieu de départ.

### La diversité du milieu expérimental

Les premiers essais de ce type ont été réalisés en 1965 (R.C.A., Sénégal et Togo). Depuis cette date, plus de 300 essais ont été réalisés en utilisant un dispositif plus ou moins complet selon les objectifs visés et l'état des connaissances acquises antérieurement.

La diversité des milieux écologiques recouvrant la zone intertropicale africaine est très grande. Les principales classes de sols étudiés ont été les sols ferrugineux tropicaux, les sols ferrallitiques et leurs dérivés, sans pour autant négliger les sols alluviaux, les vertisols et parfois les sols hydromorphes. La pluviosité de ces différents milieux est très variable tant par son intensité (500 à 1 800 mm par an) que par sa repartition (une ou deux saisons des pluies). La diversité des résultats obtenus (illustrée par le tableau n° 2) est le reflet de la diversité de ce milieu expérimental.

Cette diversité de résultats, image de la diversité du milieu expérimental, permet d'accorder une valeur assez générale aux conclusions qui peuvent se dégager de cette étude.

Tableau 2. — Déficiences minérales observées de 1965 à 1971 sur l'ensemble du réseau expérimental de l'I.R.C.T.

| Importance relative des déficiences exprimées en % de la formule complète | Déficiência azotée | Déficiência soufrée | Déficiência phosphatée | Déficiência potassique |
|---|--------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| Classe 1: 11 à 20 % .....   | —                  | —                   | —                      | 4                      |
| 2: 21 à 30 .....  | —                  | —                   | 9                      | 2                      |
| 3: 31 à 40 .....  | 2                  | 1                   | 6                      | 5                      |
| 4: 41 à 50 .....  | 12                 | 2                   | 15                     | 4                      |
| 5: 51 à 60 .....  | 34                 | 6                   | 20                     | 9                      |
| 6: 61 à 70 .....  | 32                 | 19                  | 20                     | 13                     |
| 7: 71 à 80 .....  | 39                 | 27                  | 31                     | 16                     |
| 8: 81 à 90 .....  | 24                 | 49                  | 51                     | 22                     |
| 9: 91 à 100 .....   | 28                 | 75                  | 51                     | 107                    |
| 10: 101 à 110 .....   | 13                 | 39                  | 25                     | 47                     |
| 11: 111 à 120 .....   | 4                  | 8                   | 3                      | 5                      |
| 12: 121 à 130 .....   | 2                  | 3                   | 2                      | 2                      |
| 13: sup. à 131 .....  | 1                  | 1                   | —                      | 1                      |

## 2. — LES ANALYSES FOLIAIRES, MOYEN DE DÉTERMINATION DES DÉFICIENCES MINÉRALES

Le nombre relativement important d'essais soustractifs réalisés sur l'ensemble du réseau de l'I.R.C.T. peut faire illusion quant à la facilité de réalisation.

En fait, il intéresse une zone très vaste qui peut être estimée à 750 000 ha. La représentativité de ces essais est donc toute relative. Comme tout essai au

champ, leur réussite suppose la réunion de beaucoup de conditions. On ne peut donc envisager de les multiplier de façon considérable. Pour ces raisons on a cherché un moyen de multiplier les informations concernant les déficiences minérales grâce aux résultats d'analyses foliaires.

### Difficultés d'interprétation des résultats d'analyses foliaires

D'après LUNDEGARDH (1954), l'interprétation des résultats d'analyses foliaires doit tenir compte à la fois du processus d'absorption puis de distribution des éléments dans la plante et de la relation quantitative entre les éléments absorbés et la croissance. De nombreux auteurs ont étudié la relation entre la concentration d'un élément et la croissance. La courbe classique matérialisant cette relation comporte successivement des zones de carence, de déficience, de consommation de luxe et de toxicité. Les résultats obtenus avec le cotonnier sont parfaitement conformes à cette loi générale, comme le montrent les résultats du tableau 3.

Tableau 3. — Relation entre la teneur en azote d'une formule d'engrais, les teneurs en azote des feuilles et le rendement en coton-graine des cotonniers (I.R.C.T., Dahomey, 1966).

| Dosage de N dans la fumure kg/ha | Teneurs en N des feuilles % matière sèche | Production de coton-graine kg/ha |
|----------------------------------|---|----------------------------------|
| 0                                | 3,44                                      | 670                              |
| 12                               | 3,00                                      | 1 245                            |
| 20                               | 2,95                                      | 1 282                            |
| 40                               | 3,09                                      | 1 667                            |
| 60                               | 3,52                                      | 1 887                            |
| 80                               | 3,93                                      | 2 011                            |

L'effet des premières doses de fumure azotée est de réduire sensiblement la teneur des feuilles en cet élément, tout en ayant une influence nette sur la production de coton-graine. Il s'agit d'un effet de dilution (PIÉVOT et OLLAGNIER, 1955, 1956).

Les mouvements et la redistribution des éléments minéraux dans les plantes ont été largement étudiés, particulièrement en ce qui concerne l'azote. La composition des feuilles est très fortement influencée par leur âge. Pendant les premiers jours de la croissance de la feuille, la teneur en azote augmente, puis, ensuite, diminue. La vie de la feuille se termine par une période de sénescence pendant laquelle la teneur en éléments minéraux est minimale. Cette loi est assez générale pour tous les éléments mobiles (N, P, K, S). Par contre, pour les éléments peu mobiles (Ca, Mg, B), la teneur augmente généralement avec l'âge de la feuille.

Mais à ces variations en fonction de l'âge de la feuille se superposent les variations en fonction de l'âge du cotonnier (BRAUD, 1968).

Un résultat d'analyses foliaires pour certains éléments (N minéral et K en particulier) ne peut être valablement interprété que s'il se réfère à la fois à un stade physiologique bien déterminé de la feuille et à un âge physiologique du plant également bien précis. Cet âge physiologique du cotonnier est défini par le niveau de floraison. Ce niveau de floraison représente la moyenne des numéros d'ordre des branches fructifères sur lesquelles on observe une fleur ouverte sur le premier nœud le jour du prélèvement foliaire. (La branche fructifère n° 1 est à la base du plant.) Enfin, les interactions entre ions ont été souvent mises en évidence grâce au diagnostic foliaire. Par exemple, les teneurs en azote baissent lorsque la nutrition en phosphore est améliorée (BRAUD, 1964).

Dans cette étude nous avons tenté de tenir compte pour chaque élément de ces trois types d'interférences :

- croissance générale du plant, matérialisée par le poids d'un échantillon standard de feuilles ;
- âge physiologique de la feuille (feuille prélevée à l'aisselle d'une fleur ouverte le jour du prélèvement) et du plant ;
- interactions avec les autres éléments.

### Détermination des fonctions de production à partir des résultats d'analyses foliaires

La détermination des déficiences minérales d'un sol donné par la méthode soustractive suppose le passage par une formule d'engrais complète puis une succession de formules incomplètes. Le but de cette étude est de montrer que des résultats d'analyses foliaires obtenus à partir d'échantillons foliaires prélevés sur les parcelles sans engrais qui définissent le milieu naturel peuvent permettre également une détermination des déficiences minérales conduisant à des résultats analogues aux résultats agronomiques issus des essais soustractifs. Le problème est ainsi ramené à trouver pour chaque déficience la relation existant entre ces deux séries de résultats et à préciser sa signification.

Cette relation est une fonction de production qui exprime, pour chaque déficience, le résultat agronomique tel qu'il a été défini précédemment en fonction des résultats d'analyses foliaires pour les éléments N, S, P et K (afin de tenir compte des interactions éventuelles de l'âge physiologique (défini par le niveau de floraison moyen) et du poids de l'échantillon foliaire, ramené à un échantillon standard de 30 feuilles séchées à 70°C. Le calcul est fait selon la méthode de la *step-wise regression*.

L'azote total, le soufre et le phosphore sont dosés à partir d'un échantillon de limbes. Le potassium est dosé à partir d'un échantillon de pétioles.

247 essais soustractifs plus ou moins complets ont été retenus pour cette étude. La variabilité des situations est précisée par le tableau 2 qui montre que toutes les intensités de déficiences sont représentées, avec des fréquences variables.

La répartition géographique de ces essais était la suivante :

|               |           |                          |
|---------------|-----------|--------------------------|
| Cameroun      | 44 essais | (1966 à 1971)            |
| Côte d'Ivoire | 75        | (1966 à 1970)            |
| Dahomey       | 52        | (1966 à 1971)            |
| Haute-Volta   | 19        | (1965 à 1969)            |
| R.C.A.        | 16        | (1965 à 1969)            |
| Tchad         | 16        | (1967 à 1969)            |
| Togo          | 20        | (1965, 1967, 1969, 1970) |

Pour chaque déficience et pour chaque élément, les ajustements linéaires et hyperboliques ont été comparés. Le meilleur a été retenu. On a vérifié, auparavant, que les ajustements hyperboliques et logarithmiques conduisaient toujours à des résultats de même qualité. Les premiers ont été retenus par simplification.

#### Cas de l'azote

195 essais ont été retenus pour cette étude. L'analyse des résultats et leur signification sont résumées ci-dessous, la variable dépendante étant le rendement de l'objet (—N) exprimé en % du rendement de la formule complète.

Tableau 4. — Analyse de la variance du rendement de l'objet (—N).

| Variable indépendante | % de variance expliquées | F        | Coefficient corrélation |
|-----------------------|--------------------------|----------|-------------------------|
| N                     | 28,4                     | 76,623** | 0,533                   |
| 1/P                   | 8,5                      | 25,750** | 0,292                   |
| p                     | 8,1                      | 28,295** | 0,285                   |
| Corrélation multiple  | 45,0                     | 52,148** | 0,671                   |

N et P : teneur en N et P en % de matière sèche des limbes prélevés sur les parcelles sans engrais des essais soustractifs ;

p : poids sec (70°C) de l'échantillon analysé, ramené à 30 feuilles.

\* : significatif à P = 0,051.

\*\* : significatif à P = 0,01.

La fonction de production définie à partir de ces résultats est la suivante :

$$\text{Rdt} (-N) = -1,65 + 14,55 \times N + \frac{3,84}{P} + 1,32 \times p$$

#### Cas du soufre

235 essais ont été retenus pour cette étude. La variable dépendante est le rendement de l'objet (—S) toujours exprimé en % du rendement de la formule complète. Le tableau ci-dessous résume les résultats :

Tableau 5. — Analyse de la variance du rendement de l'objet (—S).

| Variable indépendante | % de variance expliquée | F        | Coefficient corrélation |
|-----------------------|-------------------------|----------|-------------------------|
| 1/S                   | 27,1                    | 86,813** | 0,521                   |
| 1/P                   | 1,9                     | 6,344*   | 0,138                   |
| F                     | 1,3                     | 4,449*   | 0,114                   |
| Corrélation multiple  | 30,4                    | 33,671** | 0,552                   |

S et P : teneur en S et P exprimée en % de matière sèche des limbes prélevés sur les parcelles sans engrais des essais soustractifs.

F : niveau de floraison moyen.

\* : significatif à P = 0,05.

\*\* : significatif à P = 0,01.

La fonction de production définie à partir de ces résultats est la suivante :

$$\text{Rdt} (-S) = 99,60 - \frac{6,58}{S} + \frac{1,13}{P} + 1,24 \times F$$

#### Cas du phosphore

238 essais ont été utilisés pour cette étude. Le tableau ci-dessous résume les résultats, la variable dépendante étant le rendement de l'objet (—P).

Tableau 6. — Analyse de la variance du rendement de l'objet (—P).

| Variable indépendante | % de variance expliquée | F        | Coefficient corrélation |
|-----------------------|-------------------------|----------|-------------------------|
| 1/P                   | 27,7                    | 90,448** | 0,526                   |
| p                     | 10,6                    | 40,248** | 0,326                   |
| S                     | 0,9                     | 3,489*   | 0,095                   |
| Corrélation multiple  | 39,2                    | 50,257** | 0,626                   |

S et P : teneur en S et P exprimée en % de matière sèche des limbes prélevés sur les parcelles sans engrais des essais soustractifs.

p : poids sec (70°C) de l'échantillon analysé ramené à 30 feuilles.

\* : significatif à P = 0,05.

\*\* : significatif à P = 0,01.

La fonction de production correspondante est la suivante :

$$\text{Rdt} (-P) = 82,89 - \frac{5,87}{P} + 1,45 \times p + 12,45 \times S$$

#### Cas du potassium

Cette étude est réalisée à partir de 242 essais. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous, la variable dépendante étant le rendement de l'objet (—K).

Tableau 7. — Analyse de la variance du rendement de l'objet (—K).

| Variable indépendante      | % de variance expliquée | F         | Coefficient de corrélation |
|----------------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|
| 1/K .....                  | 43,2                    | 812,321** | 0,657                      |
| F .....                    | 4,1                     | 18,545**  | 0,202                      |
| 1/S .....                  | 1,6                     | 7,545**   | 0,126                      |
| Corrélation multiple ..... | 48,9                    | 75,868**  | 0,699                      |

K et S : teneur entre K et S exprimée en % de matière sèche des pétioles des feuilles prélevées sur les parcelles sans engrais.

F : niveau de floraison moyen.

\*\* : significatif à P = 0,01.

La fonction de production correspondante est :

$$\text{Rdt (—K)} = 93,11 - \frac{71,08}{K} + 2,99 \times F + \frac{2,25}{S}$$

#### Valeur générale de ces fonctions de production

Cette étude a été faite en regroupant 242 essais répartis sur sept pays de l'Afrique tropicale pendant une période allant de 1965 à 1971. Dans ces conditions, les fonctions qui viennent d'être définies ont-elles une valeur générale? Il semble important d'étudier leur représentativité géographique et annuelle.

La méthode utilisée consiste à déterminer pour chaque pays la moyenne ( $y - \hat{y}$ ) assortie de son erreur type. Dans le cas particulier de la Côte

d'Ivoire, compte tenu du nombre relativement important d'essais réalisés, cette moyenne ( $y - \hat{y}$ ) a été déterminée par campagne.

Cet ensemble de résultats figure dans le tableau 8.

Ces résidus sont d'une façon générale relativement faibles. A titre de comparaison, la moyenne de la plus petite différence significative (P = 0,05) est de 10%. Il semble que la variabilité annuelle soit plus importante que la variabilité géographique, particulièrement pour le phosphore.

La précision de ces fonctions peut dépendre de nombreux facteurs :

- la signification propre de la liaison entre les résultats agronomiques et les résultats d'analyses foliaires, mais également ;
- la précision des résultats agronomiques, fonction de nombreux facteurs dont le contrôle phytosanitaire et son interaction avec la nutrition minérale n'est pas le moindre ;
- l'interaction de facteurs écologiques insuffisamment restituée par le poids de l'échantillon foliaire ;
- la qualité des observations annexes (niveau de floraison par exemple).

La même étude réalisée à l'échelle d'un pays lorsque l'on dispose d'un nombre de résultats suffisant (Côte d'Ivoire par exemple) conduit à une précision bien supérieure, comme le montre le tableau 9.

Néanmoins, à défaut de pouvoir réaliser dans chaque situation une étude particulière, l'ensemble des résultats présentés dans le tableau 9 nous autorise à penser que les fonctions de production définies plus haut sont d'application générale.

Tableau 8. — Résidus ( $y - \hat{y}$ ) pour les fonctions de production concernant les rendements (—N), (—S), (—P) et (—K).

| Pays ou campagne    | Moyenne des résidus ( $y - \hat{y}$ ) |                |                |                |
|---------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                     | Rendement (—N)                        | Rendement (—S) | Rendement (—P) | Rendement (—K) |
| Cameroun .....      | -4,0 ± 10,4                           | -0,6 ± 3,4     | -2,6 ± 3,4     | 7,1 ± 3,5      |
| Côte d'Ivoire ..... | 0,5 ± 2,2                             | -2,6 ± 2,5     | -2,6 ± 3,2     | -4,5 ± 2,0     |
| Dahomey .....       | -2,3 ± 5,2                            | -3,7 ± 4,3     | -2,7 ± 4,4     | -6,0 ± 3,4     |
| Haute-Volta .....   | 6,0 ± 9,0                             | 7,2 ± 5,0      | 7,1 ± 8,9      | 6,9 ± 8,4      |
| R.C.A. ....         | 3,2 ± 6,7                             | 3,7 ± 5,9      | 6,4 ± 6,6      | 2,3 ± 1,7      |
| Tchad .....         | -4,5 ± 5,8                            | 3,6 ± 5,8      | 5,5 ± 4,4      | 3,4 ± 5,2      |
| Togo .....          | 2,9 ± 6,9                             | 7,6 ± 6,5      | -0,7 ± 5,2     | 6,2 ± 6,7      |
| Côte d'Ivoire :     |                                       |                |                |                |
| 1966 .....          | 4,6 ± 7,7                             | -2,8 ± 5,4     | 2,7 ± 6,2      | -1,3 ± 3,7     |
| 1967 .....          | -2,8 ± 3,2                            | -1,0 ± 3,9     | 2,3 ± 6,6      | -7,3 ± 2,0     |
| 1968 .....          | -0,1 ± 6,1                            | 1,1 ± 6,2      | -10,7 ± 8,1    | -2,1 ± 5,6     |
| 1969 .....          | 1,4 ± 5,7                             | -4,4 ± 6,1     | -5,7 ± 7,4     | -3,6 ± 2,2     |
| 1970 .....          | 1,2 ± 4,3                             | -7,2 ± 3,3     | -4,0 ± 5,3     | -6,7 ± 7,0     |

Tableau 9. — Comparaison entre les résultats de l'étude des fonctions de production de l'étude générale et ceux de l'étude faite en Côte d'Ivoire ; pourcentage de variance expliqué, variables indépendantes.

| Variables dépendantes | Etude générale         |                         | Côte d'Ivoire          |                         |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
|                       | % de variance expliqué | variables indépendantes | % de variance expliqué | variables indépendantes |
| Rendement (-N) .....  | 45,0                   | N, 1/P, p               | 76,7                   | p, N, 1/P               |
| Rendement (-S) .....  | 30,4                   | 1/S, 1/P, F             | 60,2                   | 1/S, p, F, 1/N          |
| Rendement (-P) .....  | 39,2                   | 1/P, p, 1/S             | 69,3                   | 1/P, p, F, 1/K, 1/S     |
| Rendement (-K) .....  | 48,9                   | 1/K, F, 1/S             | 72,7                   | 1/K, p, F, 1/P, 1/S     |

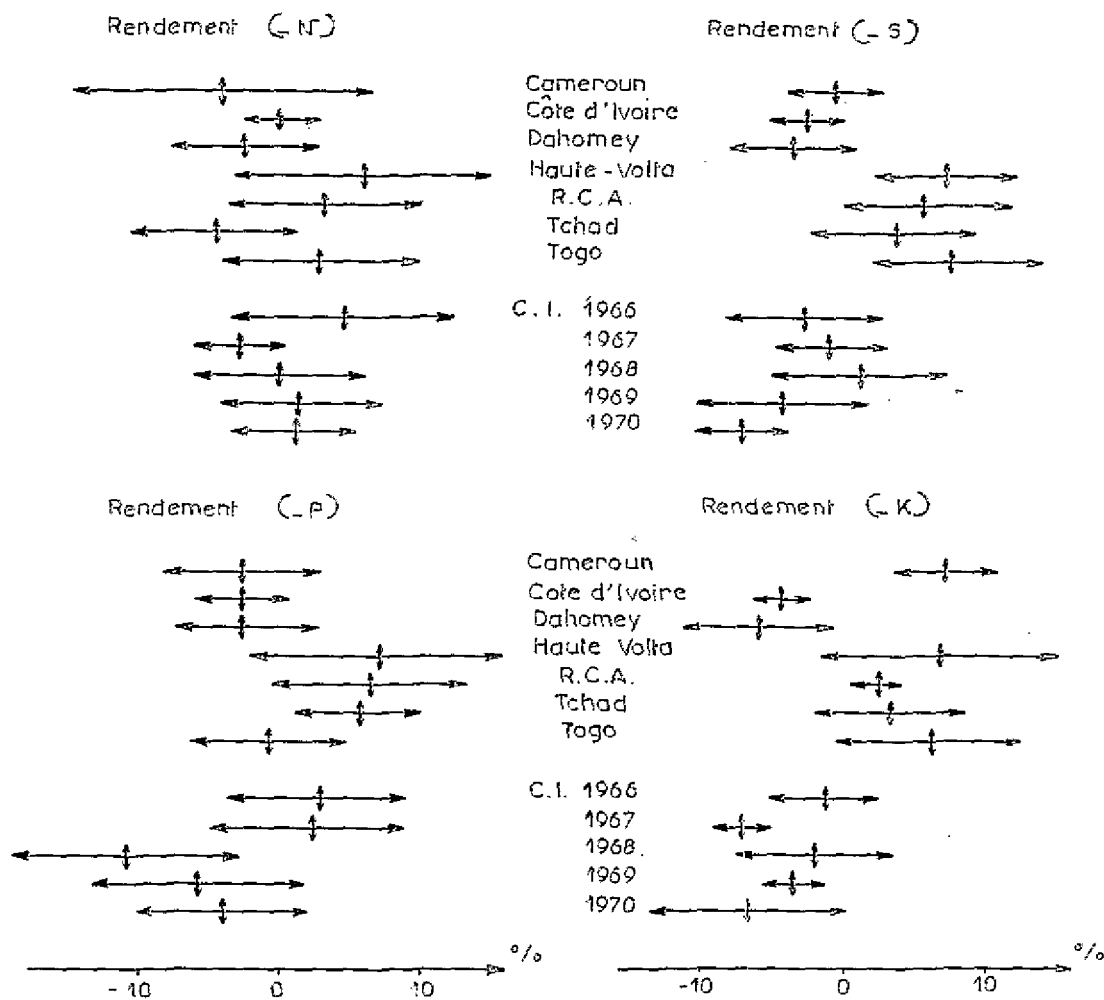


Fig. 1. — Moyenne des résidus ( $y - \hat{y}$ ) pour les fonctions de production pour l'estimation des rendements (-N), (-S), (-P), (-K).



### 3. — DÉTERMINATION DES NIVEAUX CRITIQUES

Nous reprenons la définition du niveau critique la plus généralement admise. Le niveau critique correspond à la teneur en un élément au-dessous de laquelle on observe une réponse positive à un apport de cet élément dans une fumure minérale.

#### Etablissement des niveaux critiques

La moyenne des plus petites différences significatives pour l'ensemble des 242 essais ayant été retenue pour cette étude est de 10 %. On est en droit d'attendre un effet positif d'un élément X si le rendement ( $-X$ ) dans un essai soustractif est inférieur à 90 % de celui de la formule complète. C'est donc ce seuil que nous adoptons pour déterminer le niveau critique pour chaque élément en remplaçant dans chaque cas Rdt ( $-X$ ) par 90. On en déduit alors la valeur de  $X_c$ , niveau critique pour l'élément X, qui peut varier en fonction des autres facteurs intervenant dans la fonction de production.

Niveau critique pour l'azote :

$$N_c = \frac{91,65 - \frac{3,84}{P} - 1,32 \times p}{14,55}$$

Niveau critique pour le soufre :

$$S_c = \frac{6,58}{9,6 + \frac{1,27}{p} + 1,24 \times F}$$

Niveau critique pour le phosphore :

$$P_c = \frac{5,87}{1,45 \times p + 12,45 \times S - 7,11}$$

Niveau critique pour le potassium :

$$K_c = \frac{71,08}{3,11 + 2,99 \times F + \frac{2,25}{S}}$$

Ces relations permettant de construire les abaques illustrées par les figures 2 à 5 qui les mettent à la portée des vulgarisateurs en les rendant d'utilisation plus pratique.

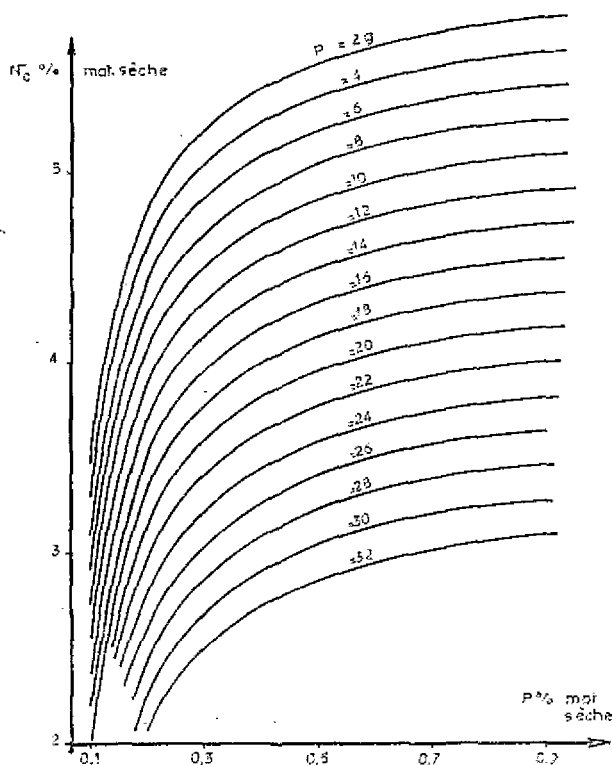


Fig. 2. — Niveaux critiques azote.

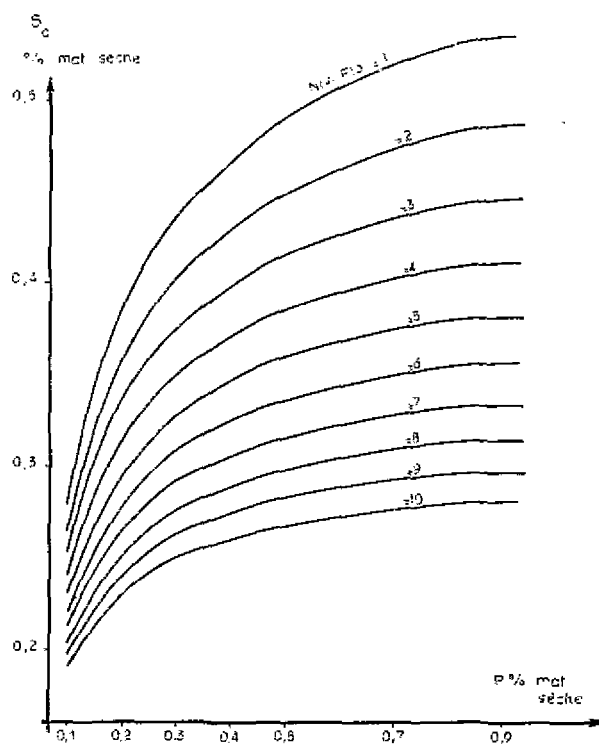


Fig. 3. — Niveaux critiques soufre.

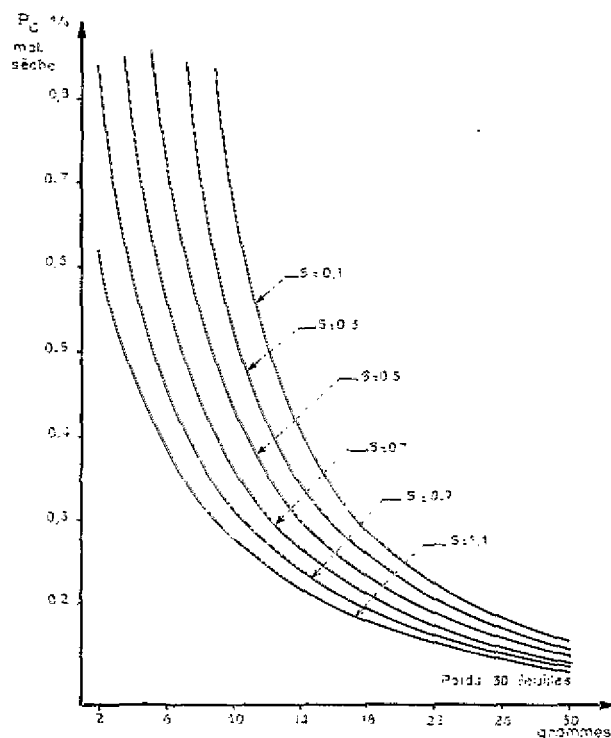


Fig. 4. — Niveaux critiques phosphore.

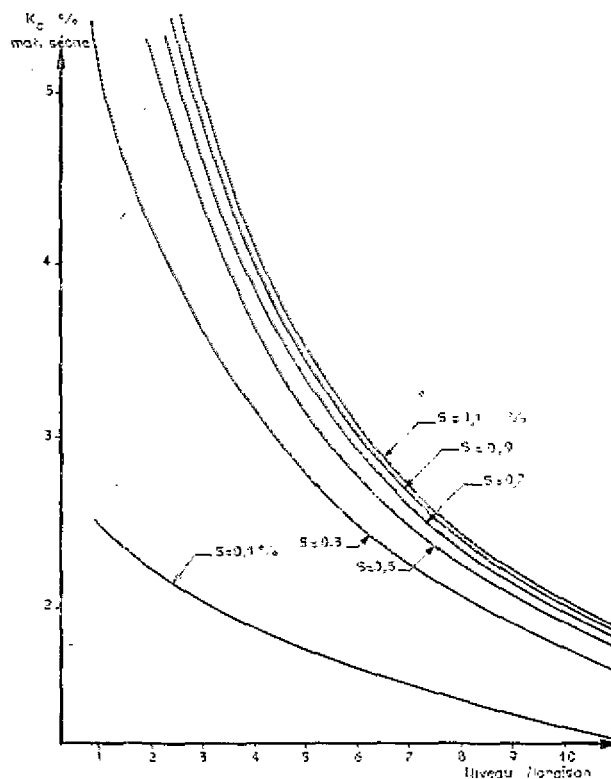


Fig. 5. — Niveaux critiques potassium.

#### 4. — UTILISATION PRATIQUE DES NIVEAUX CRITIQUES

Les analyses foliaires obtenues à partir d'échantillons permettent de remplacer avantageusement les essais soustractifs aux champs pour la détermination des déficiences minérales lorsque, pour chaque élément, on tient compte d'un facteur de dilution dépendant des conditions de culture.

Ce premier objectif considéré comme atteint nous autorise, à l'échelle d'une région ou d'un pays, à avoir des informations plus nombreuses sur les problèmes de nutrition minérale, à les hiérarchiser et à développer une expérimentation programmée en fonction des urgences dégagées de cette première étude exploratoire.

La vulgarisation de la fertilisation minérale dans les pays de l'Afrique tropicale au cours de ces dernières années nous amène à envisager des méthodes de contrôle de l'efficacité des formules d'engrais proposées. Quelle aide peuvent nous apporter les niveaux critiques définis plus haut pour atteindre ce deuxième objectif ?

Nous allons examiner successivement ces deux applications.

#### Définition des indices de nutrition

Un résultat d'analyse foliaire isolé de son contexte n'a pas beaucoup de signification. Une meilleure approche du problème est possible lorsque l'on peut le rapprocher du niveau critique correspondant. Mais ces deux données peuvent varier dans des limites non négligeables, ce qui rend difficile la comparaison de séries de couples de résultats. Pour ces raisons, nous définissons pour chaque élément nutritif X un indice de nutrition de la façon suivante :

$$\text{Indice } X = \frac{X_o}{X_c} \times 100$$

$X_o$  = teneur observée de l'élément X ;

$X_c$  = niveau critique de l'élément X calculé à partir des relations précédentes.

#### Détermination et hiérarchisation des problèmes de fumure minérale

Nous pouvons nous trouver face à deux situations possibles :



Tableau 10. — *Indices de nutrition observés au Paraguay (1971)  
et au nord-ouest de Madagascar (1970 et 1971).  
Fréquences d'observations en % du nombre du total d'observations.*

| Classes des indices | Paraguay |          |          |          | Madagascar (N.W.) |          |          |          |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|
|                     | Indice N | Indice S | Indice P | Indice K | Indice N          | Indice S | Indice P | Indice K |
| 25 .....            |          |          | 5        |          |                   |          |          |          |
| 26 à 50 .....       |          |          | 5        | 5        |                   |          | 1        |          |
| 51 à 75 .....       |          |          | 10       | 29       | 2                 | 5        | 4        | 2        |
| 76 à 100 .....      |          |          | 24       | 24       | 4                 | 5        | 7        | 34       |
| 101 à 125 .....     | 48       | 10       | 29       | 43       | 28                | 5        | 17       | 33       |
| 126 à 150 .....     | 38       | 43       | 19       |          | 50                | 16       | 15       | 16       |
| 151 à 200 .....     | 5        | 29       | 5        |          | 6                 | 28       | 42       | 16       |
| 201 à 300 .....     | 5        | 19       | 5        |          |                   | 35       | 15       |          |
| 301 à 500 .....     | 5        |          |          |          |                   | 7        |          |          |

— les informations sur les conditions de nutrition minérale du cotonnier dans une région sont insuffisantes ou inexistantes pour permettre l'élaboration d'un programme d'expérimentation agronomique ;

— des solutions partielles ont été élaborées, mais on n'est pas certain d'avoir résolu tous les problèmes de fertilisation actuels ou futurs.

Nous avons rencontré récemment ces deux situations, respectivement, au Paraguay et dans le nord-ouest de Madagascar. L'ensemble des résultats intéressant ces deux pays est illustré par le tableau 10.

Au Paraguay, si les nutriments azotés et soufrés ne semblent pas poser de problèmes immédiats, par contre, le phosphore et le potassium semblent particulièrement déficients. Le programme expérimental a donc été orienté en ce sens en le limitant à ces deux éléments.

Dans la région nord-ouest de Madagascar les conditions actuelles de fertilisation font que les problèmes azote et soufre sont résolus ou en voie de l'être. Les situations déficientes en phosphore sont peu nombreuses (12 %). Par contre, on note 36 % de situations plus ou moins déficientes en potassium, élément qui doit retenir notre attention dans l'orientation du programme d'expérimentation agronomique à moyen terme.

Ces deux situations sont particulièrement intéressantes car, d'une part, l'analyse qui est faite à partir des indices de nutrition coïncide parfaitement avec les observations plus ou moins empiriques déjà faites (symptômes foliaires par exemple) et avec les premiers résultats agronomiques expérimentaux et, d'autre part, l'environnement de ces situations est différent de celui de l'Afrique tropicale qui a servi de cadre à l'étude générale.

### Contrôle de l'efficacité des formules d'engrais vulgarisées

De nombreux essais de formules d'engrais vulgarisables ont été réalisés sur l'ensemble de l'Afrique

tropicale. Des prélèvements foliaires ont été effectués et analysés. La comparaison des résultats agricoles (production de coton-graine en kg/ha) et des résultats analytiques (analyses foliaires ou indices de nutrition) est possible dans chaque cas. Ce travail a été réalisé pour un certain nombre de zones et par campagne pour éliminer l'action de facteurs qui n'ont qu'un lointain rapport avec la nutrition minérale, comme le plus ou moins bon contrôle du parasitisme.

Ces comparaisons ont consisté à établir des fonctions de production exprimant la production de coton-graine soit en fonction des résultats d'analyses foliaires, soit en fonction des indices de nutrition. Le pourcentage de variance expliquée dans chaque situation permet de situer la valeur relative de chaque méthode d'estimation de la production. Ces résultats sont résumés dans le tableau 11.

Ces seize situations ont été analysées à partir de résultats totalement indépendants de ceux ayant servi à la définition des niveaux critiques. Il s'agit donc à la fois d'une extrapolation de la signification des indices de nutrition et d'une vérification de leur intérêt.

Le tableau 11 montre que :

- la qualité de la relation exprimant la production de coton-graine est constamment améliorée lorsque l'on passe des analyses foliaires aux indices de nutrition. Dans certaines situations, les coefficients des équations de régression sont ainsi rendus statistiquement significatifs ;
- dans 4 cas seulement sur 16, le pourcentage d'explication de la variance des rendements de coton-graine est inférieur à 50 %.

Dans ces quatre situations ce manque de précision peut signifier que des facteurs autres que la nutrition minérale agissent sur les rendements. Les autres cas illustrent le fait que la nutrition minérale est un facteur important de la production de coton-

Tableau 11. — Pourcentage de variance expliquée et erreur-type de l'estimation de la production de coton-graine à partir de fonction de productions faisant intervenir soit les analyses foliaires, soit les indices de nutrition.

| Situations               | Types de variables indépendantes |          |                              |                        |           |                              |
|--------------------------|----------------------------------|----------|------------------------------|------------------------|-----------|------------------------------|
|                          | Analyses foliaires               |          |                              | Indices de nutrition   |           |                              |
|                          | % de variance expliqué           | F        | Erreur-type estimation kg/ha | % de variance expliqué | F         | Erreur-type estimation kg/ha |
| Dahomey, Sud, 1969       | 64,7                             | 18,354** | 359                          | 72,0                   | 25,767**  | 319                          |
| Dahomey, Sud, 1970       | 34,0                             | 43,716** | 433                          | 44,6                   | 68,551**  | 396                          |
| Dahomey, Sud, 1971       | 6,7                              | 2,001    | n.s.                         | 37,1                   | 7,969**   | 589                          |
| Dahomey, Zou, 1970       | 16,4                             | 8,806**  | 378                          | 23,6                   | 13,910    | 361                          |
| Dahomey, Nord, 1969      | 12,2                             | 3,045    | n.s.                         | 38,3                   | 6,531**   | 273                          |
| Dahomey, Nord, 1970      | 51,1                             | 56,467** | 420                          | 65,0                   | 100,272** | 355                          |
| Dahomey, Nord, 1971      | 47,3                             | 15,243** | 445                          | 66,2                   | 15,639**  | 367                          |
| Haute-Volta, Ouest, 1970 | 45,4                             | 19,917** | 371                          | 81,6                   | 51,017**  | 220                          |
| Haute-Volta, Ouest, 1971 | 73,2                             | 26,245** | 239                          | 85,3                   | 78,461**  | 180                          |
| Haute-Volta, Est, 1970   | 21,1                             | 5,866*   | 463                          | 51,4                   | 11,114**  | 372                          |
| Haute-Volta, Est, 1971   | 43,5                             | 5,776*   | 320                          | 75,7                   | 15,312**  | 218                          |
| Madagascar, 1970 et 1971 | 34,5                             | 40,347** | 741                          | 58,6                   | 53,882**  | 592                          |
| Mali, 1970               | 59,7                             | 41,524** | 367                          | 68,8                   | 29,748**  | 329                          |
| Mali, 1971               | 57,9                             | 17,855** | 262                          | 71,5                   | 32,634**  | 216                          |
| Togo, 1969               | 30,7                             | 17,687** | 423                          | 38,9                   | 12,405**  | 402                          |
| Togo, 1970               | 42,3                             | 12,118   | 324                          | 59,2                   | 23,979    | 272                          |

\*, \*\*: significatif à P = 0,05 ou P = 0,01, respectivement.

graine en Afrique tropicale, parfois très largement prépondérant comme dans l'ouest de la Haute-Volta, où plus de 80 % de la variance sont expliqués par les indices de nutrition.

A titre d'exemple, nous donnons la fonction de production correspondant à la zone ouest de la Haute-Volta pour la campagne 1971 :

$$Y = 54 + 11,328 \times P + 2,649 \times K;$$

où Y = Production de coton-graine, en kg/ha :

P = Indice de nutrition pour le phosphore ;

K = Indice de nutrition pour le potassium.

Les rendements estimés à partir de cette relation figurent dans le tableau 12.

Ces résultats illustrent le fait que les indices P et K permettent d'expliquer respectivement 38,7 et 6,6 % de la variance.

Tableau 12. — Estimation de la production de coton-graine (kg/ha) à partir des indices de nutrition P et K en Haute-Volta, région ouest (campagne 1971).

| Indices de nutrition pour le potassium | Indices de nutrition pour le phosphore |     |       |       |       |       |
|--|--|-----|-------|-------|-------|-------|
|  | 20                                     | 40  | 60    | 80    | 100   | 120   |
| 40                                     | 387                                    | 613 | 840   | 1 066 | 1 292 | 1 519 |
| 60                                     | 439                                    | 666 | 892   | 1 119 | 1 345 | 1 572 |
| 80                                     | 492                                    | 719 | 946   | 1 172 | 1 399 | 1 626 |
| 100                                    | 545                                    | 772 | 998   | 1 225 | 1 452 | 1 678 |
| 120                                    | 598                                    | 825 | 1 052 | 1 278 | 1 505 | 1 731 |

## 5. — CONCLUSION

Les informations concernant les déficiences minérales peuvent être multipliées grâce à une interprétation améliorée des résultats d'analyses foliaires. Il devient possible de classer les différents problèmes de nutrition minérale et d'en suivre l'évolution. L'élaboration d'un programme d'expérimentation agronomique portant sur la fertilisation minérale s'en trouve à la fois simplifiée et précisée. Les études de l'influence d'un certain nombre de facteurs, comme le type de sol, l'écologie et surtout les

systemes de culture, sont rendues beaucoup plus faciles.

Nous définissons actuellement les formules d'engrais minéraux à vulgariser à partir d'un faisceau d'observations plus ou moins convergentes. L'empirisme apparent de cette technique est largement compensé par la possibilité qui nous est offerte de dresser un diagnostic foliaire et d'ajuster ces formules par approximations successives.

### SUMMARY

*Mineral deficiencies can be determined by foliar analyses for N, S, P, K elements, taking in account the general development of the cotton plant (factor of dilution), of the physiological age of the leaf and plant and of the eventual interactions between the mineral elements.*

*Production functions are determined to define the relative importance of every mineral deficiency as in the case of the subtractive field trials to be used*

*in view of establishing laws permitting to work out the critical levels for each element, making allowance for the eventual interactions.*

*Nutrition indexes, ratio between the content of a given element and the corresponding critical level permit to analyse precisely the circumstances of cotton mineral nutrition in a given region and to establish a diagnosis on the efficiency of the fertilizers formulas proposed for extension.*

### RESUMEN

*La determinación de las deficiencias minerales es posible por los análisis foliares para los elementos N, S, P y K, teniendo en cuenta el desarrollo general de la planta del algodón (factor de dilución), la edad fisiológica de la hoja y de la planta y las interacciones eventuales entre elementos minerales.*

*Se determinan las funciones de producción para precisar la importancia relativa de cada deficiencia mineral, como en el caso de ensayos subtractivos en los campos, y se utilizan para establecer leyes*

*que permitan calcular los niveles críticos para cada elemento teniendo en cuenta interacciones eventuales.*

*Indices de nutrición, definidos como la relación entre el contenido de un elemento dado y el nivel crítico correspondiente, permiten analizar de manera precisa las condiciones de nutrición mineral del algodón en una región dada y de establecer un diagnóstico sobre la eficacia de las fórmulas de abonos propuestas a la vulgarización.*