

# Application de la méthode des variantes systématiques

## à l'étude de fumures minérales

*Résultats et Observations*

# Possibilités d'un diagnostic foliaire du cotonnier

par

**M. BRAUD - M. DAESCHNER - C. MEGIE - L. RICHARD**

Agronomes à I.R.C.T. (1)

## **APPLICATION DE LA MÉTHODE DES VARIANTES SYSTÉMATIQUES A L'ÉTUDE DES FUMURES MINÉRALES**

Dans un précédent numéro de cette revue (2) nous avons proposé une adaptation de la méthode des variantes systématiques du Pr HOMES à l'étude de la nutrition minérale du cotonnier en milieu naturel.

Suivant cette méthode les éléments anioniques N S P ou cationiques K Ca Mg sont expérimentés à somme constante, les concentrations relatives de ces éléments représentent les variables des essais. Pour tenir compte des éléments naturellement présents dans le sol, il est nécessaire d'introduire des traitements supplémentaires à ceux proposés dans la méthode originelle.

(1) BRAUD M. — Ingénieur Agricole. Section d'Agronomie, BAMBARI (République Centrafricaine).

DAESCHNER M. — Ingénieur Agronome. Section d'Agronomie, BEBEDJIA (République du Tchad).

MÉGIE C. — Ingénieur Agronome. Section d'Agronomie, TIKEM (République du Tchad).

RICHARD L. — Ingénieur Agricole. Division d'Agronomie, I.R.C.T. PARIS.

(2) Coton et Fibres Tropicales, vol. XIII, fascicule 2, Octobre 1953, p. 293-328. Problèmes de fumure minérale. RICHARD L.

En coordonnées triangulaires les 9 traitements testés se situent suivant le graphique N° 1.

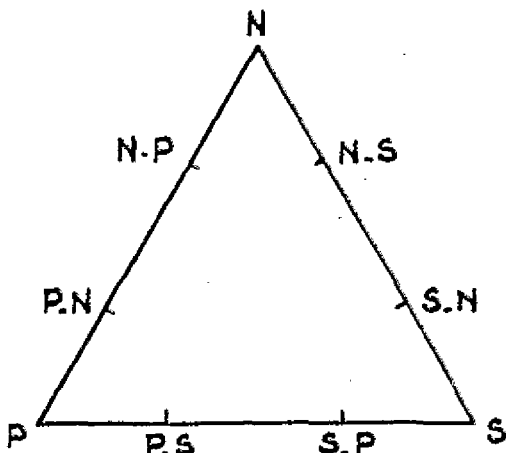


Fig. 1

La base du triangle est égale à la somme des 3 éléments N P S retenue pour l'essai : cette somme est exprimée en équivalents-grammes.

La méthode des variantes systématiques comporte un principe majeur le travail à somme constante ; mais par ailleurs le Pr HOMES préconise la dissociation des ions pour l'étude de leur action et le maintien de la constance du rapport anions/cations à l'ensemble des traitements testés. Ces précautions très utiles et même indispensables à la bonne interprétation d'un essai peuvent être appliquées à tout schéma expérimental et ne constituent pas un caractère propre à la méthode des variantes systématiques.

Nous donnons ci-dessous en exemple l'application de ces deux derniers principes à la comparaison de deux engrais azotés qui pourrait être étudiée sur le terrain suivant la méthode des couples.

#### Comparaison du nitrate de chaux et du sulfate d'ammoniaque à la dose de 3.000 équivalents $\text{NO}_3$ ha. le rapport anions cations étant égal à 1

L'action des ions de chaque corps étant étudiée séparément, il est normal de les exprimer en équivalents-grammes. Le sulfate d'ammoniaque sera estimé en ions  $\text{SO}_4$  et  $\text{NO}_3$  et le nitrate de chaux en ions  $\text{NO}_3$  et Ca. L'Azote qui est assimilé par la plante sous forme nitrique est toujours évalué sous forme anionique même pour le sulfate d'ammoniaque.

Concordance entre unités usuelles et équivalents :

1 kg N	=	71,4	équivalents	$\text{NO}_3$
1 kg $\text{P}_2\text{O}_5$	=	42,2	"	$\text{PO}_4$
1 kg S	=	62,3	"	$\text{SO}_4$
1 kg $\text{K}_2\text{O}$	=	21,2	"	K
1 kg CaO	=	35,7	"	Ca
1 kg MgO	=	50	"	Mg

1<sup>er</sup> Objet : nitrate de chaux

*Composition du traitement*

NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	
3.000 éq ha		3.000	Nitrate de chaux 245 kg/ha
	3.000	3.000	Sulfate de chaux 238 kg/ha
3.000	3.000	6.000	Total A.C. = 1 NO <sub>3</sub> = 3.000

2<sup>e</sup> Objet : Sulfate d'ammoniaque

*Composition du traitement*

NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	
3.000 éq ha	3.000		Sulfate d'ammoniaque 197 kg/ha
		6.000	Chaux Ca (OH) <sup>2</sup> 223 kg/ha
3.000	3.000	6.000	Total A.C. = 1 NO <sub>3</sub> = 3.000

Dans ces conditions les formes nitriques et ammoniacales peuvent être valablement testées sans que les différences de rendement que l'on pourrait constater soient dues à l'origine des ions complémentaires.

L'établissement des formules ne présente pas de difficultés particulières mais la mise en place des essais ne s'en trouve certainement pas simplifiée. Toutefois, ces précautions rappelées par le Pr HOMES aux Agronomes méritent quelques efforts supplémentaires pour interpréter sainement les essais quel que soit le schéma expérimental retenu : Appariement, méthode factorielle ou variantes systématiques.

## MODE D'INTERPRETATION DES RÉSULTATS ET OBSERVATIONS GÉNÉRALES

### Dispositif expérimental

Les 9 traitements et le témoin représentent 10 objets qui peuvent être répétés sur le terrain en blocs Fisher.

Pour une base du triangle N P S nous aurons 4 séries de rendements (fig. 2).

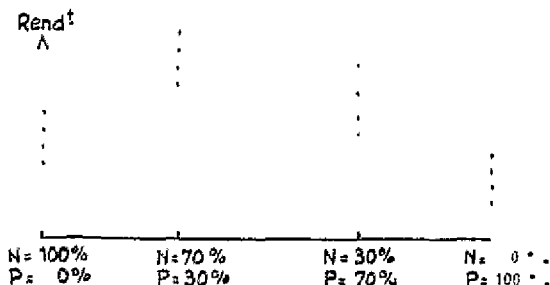


Fig. 2

Nous avons primitivement proposé de considérer la moyenne des rendements de chacun des 4 traitements pour tracer la courbe de rendement du végétal en fonction des variations des concentrations relatives des deux éléments considérés. Cette méthode est certainement valable pour déterminer le maximum de rendement mais ne permet pas de connaître sa précision.

Il nous paraît donc préférable d'estimer la courbe de rendement en fonction des concentrations relatives de N et de P par un calcul de régression : la répartition des rendements conduit à envisager l'ajustement à une courbe du second degré  $Y = a + bx + cx^2$ . La méthode utilisée est celle proposée par SNEDECOR (Statistical Methods p. 379 - chap. 14.3) qui revient à un calcul de régression multiple dans lequel les deux variables indépendantes sont les concentrations relatives  $x$  et leur carré  $x^2$ .

La détermination du maximum de la courbe est immédiate  $M = -\frac{b}{2c}$  l'abscisse de ce point représente la concentration relative optimale à respecter entre les deux éléments.

Il est possible de tester la validité des coefficients de la parabole, mais la précision de son maximum demeure le principal objectif de l'analyse des résultats.

Le calcul de l'erreur commise est toutefois assez délicat car  $M = -\frac{b}{2c}$  est un rapport de deux variables aléatoires et si chacune d'elles est distribuée normalement, il n'en est pas de même de leur rapport, on ne pourra donc faire un test exact, même si l'on connaît l'écart-type du rapport.

M. VESSEREAU, Professeur à l'Institut de Statistique de l'Université de Paris, a établi un calcul de l'erreur en utilisant soit le développement limité au premier degré de ce rapport soit le théorème de FIELLER (Statistical Methods for biological essay - FINNEY p. 27).

Ces deux méthodes ont montré sur des exemples précis que l'erreur commise sur le maximum est assez faible ; si  $M$  égal 4 (soit 40 %  $PO_4$ , 60 %  $NO_3$ ) la vraie valeur de  $M$  se situe généralement entre 3.5 et 4.5, limites très acceptables pour le problème qui nous occupe. Toutefois, les calculs qui conduisent à cette estimation de l'erreur sont assez longs et dans la pratique il est possible d'en obtenir une estimation plus rapide.

Puisque  $M = -\frac{b}{2c}$  nous pouvons fixer ses limites à partir des valeurs extrêmes des coefficients  $b$  et  $c$  facilement accessibles et en tenant compte de la très forte corrélation négative existant entre eux. Nous devons associer la plus forte valeur de  $b$  avec la plus faible valeur de  $c$  et inversement. Cette corrélation négative provient du choix des variables indépendantes qui sont  $x$  et  $x^2$ , si la liaison entre ces deux variables était linéaire le coefficient de corrélation serait égal à 1 mais elle s'en rapproche fortement dans nos conditions d'utilisation.

En définitive, M. VESSEREAU nous propose trois estimations des limites de confiance du rapport  $-\frac{b}{2c}$ , les résultats obtenus sont extrêmement voisins et nous pouvons retenir la dernière d'entre elles pour sa simplicité.

## Représentation graphique des résultats

Lorsqu'une seule dose d'engrais, 10 000 éq. par exemple, a été testée nous avons déterminé sur chaque base du triangle la concentration relative, avec sa marge d'erreur, à respecter entre les deux éléments des sommets adjacents (fig. 3).

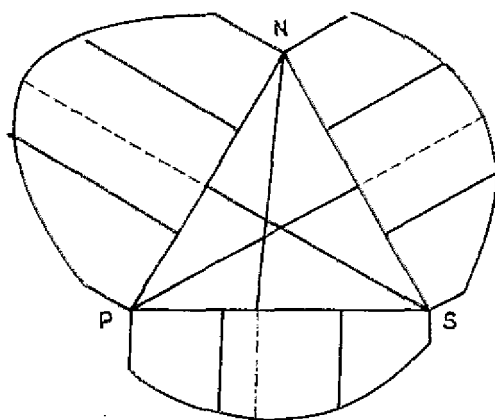


Fig. 3

Selon la méthode du Pr HOMES nous pouvons tracer les cèviennes correspondantes qui déterminent au centre du triangle les concentrations relatives à respecter entre les 3 éléments.

## Relations entre la méthode des variantes systématiques et les lois de la physiologie\*

L'étude de l'action conjuguée de deux éléments, N et P, par exemple, exigerait pour être complète que leurs variations soient indépendantes ; mais cette condition ne peut être retenue en raison de la multitude des formules possibles. Il est donc nécessaire de limiter ces variations en maintenant, soit N ou P constant, soit leur somme  $N + P$ . L'une et l'autre option sont également valables a priori.

Les agronomes expérimentent d'une façon très générale en faisant varier un élément, l'effet des autres éléments étant maintenu constant. La courbe de variation du rendement correspond sensiblement à la loi de MITSCHERLICH,  $dy/dx = (A - y) C$ , forme mathématique de la loi du minimum (fig. 4).

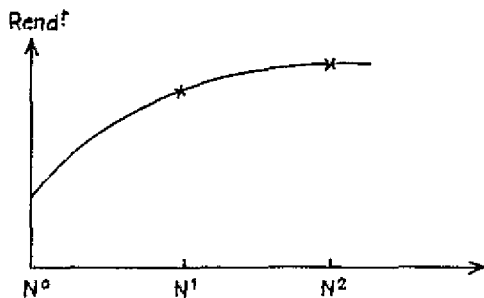


Fig. 4

\* RICHARD L. : Interdépendance des éléments de la nutrition minérale des végétaux. — *Com. Acad. Sciences*, Juin 1959.

Les exemples d'études à somme constante de deux éléments sont assez rares dans la littérature. Les travaux récents du Pr HOMES, de l'Université de Bruxelles, présentent à ce sujet un grand intérêt.

Nous sommes donc en présence de deux types de réaction, courbe de MITSCHERLICH et courbe en cloche correspondant aux deux modes d'investigation.

Toutes les combinaisons existant entre N et P peuvent s'inscrire dans un système de coordonnées N O P. Pour étudier les relations entre ces éléments nous pouvons, comme nous l'avons vu, maintenir l'un de ceux-ci constant. Les différents traitements réalisés seront alors situés sur une parallèle (D) à l'un des axes. Par ailleurs si nous maintenons  $N + P$  constant les traitements seront situés sur une perpendiculaire (d) à la bissectrice de l'angle N O P (fig. 5).

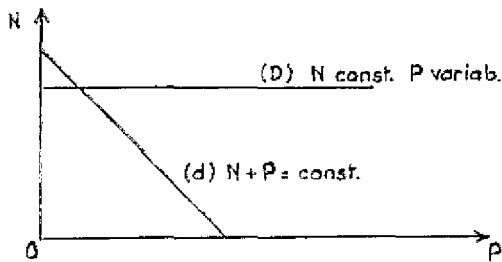


Fig. 5

A chacun des points du plan N O P correspond un rendement particulier qui peut être porté perpendiculairement à ce plan. L'ensemble de ces rendements détermine une surface de réponse qui s'appuie sur les axes O N et O P ; les rendements des points situés sur ces axes étant nuls en raison de l'absence de l'un des deux éléments.

Le rendement maximum constaté, lorsque les concentrations des deux éléments varient à l'intérieur d'une somme constante, se situe sur la ligne de crête de la surface de réponse. Cette ligne de crête est le lieu des rendements maxima lorsque la somme des deux éléments varie. La projection de cette ligne sur le plan N O P détermine les concentrations optimales à respecter entre ces deux éléments (fig. 6).

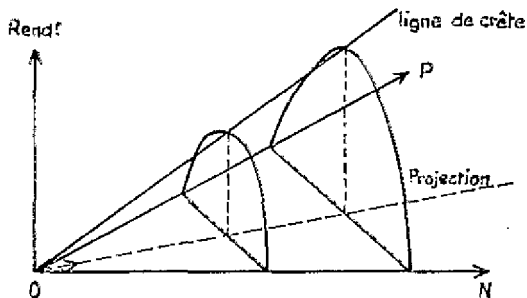


Fig. 6

Lorsque l'on maintient un élément constant, l'autre élément étant variable, c'est-à-dire quand on pratique une coupe dans cette surface de réponse perpendiculairement au plan  $N O P$  et parallèlement à l'un des axes  $ON$  ou  $OP$ , il est bien évident que les rendements seront croissants jusqu'à la rencontre de la ligne de crête et seront ensuite sensiblement constants ; nous retrouvons la courbe de MITSCHERLICH (fig 7).

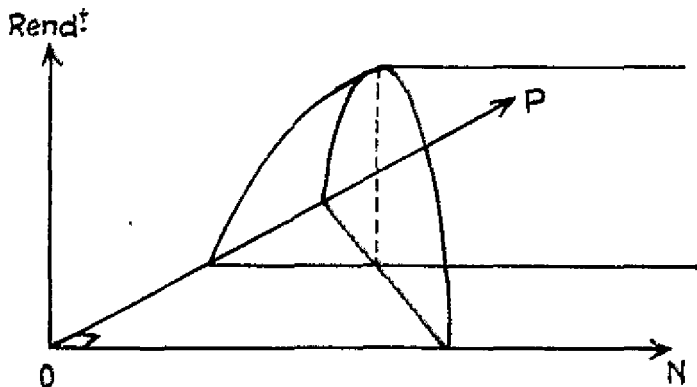


Fig. 7

Il y a donc une correspondance certaine d'une part entre le terme  $A$  de la loi de MITSCHERLICH et le maximum de rendement de la courbe obtenue à somme constante et, d'autre part, entre le point critique de la loi du minimum et la concentration relative optimale.

La détermination du point critique sera plus précise par une coupe à somme constante, celle-ci étant sensiblement orthogonale à la ligne de crête.

L'interdépendance des éléments de la nutrition minérale est un phénomène très général matérialisé par une surface de réponse sur laquelle il est possible d'insérer les réactions du végétal aux traitements des divers modes d'investigation. Cette interdépendance sera d'autant plus étroite que la ligne de crête sera plus prononcée.

### Remarques sur les méthodes factorielles

Les méthodes factorielles appliquent et généralisent implicitement ces lois, dans un essai très simple  $2^2$ ,  $N$  et  $P$  à 3 doses, nous pouvons tracer la courbe de rendement en fonction des variations d'un élément, l'autre étant maintenu constant :  $N_1 P_0$ ,  $N_1 P_1$ ,  $N_1 P_2$ . Il est possible de déterminer un niveau critique pour  $P$  au delà duquel un apport de cet élément ne provoque plus d'accroissement de rendement. Nous avons vu que ce point critique était situé sur la ligne de crête de la surface de réponse  $N-P$  et correspondait au rendement maximum de la courbe de réponse à somme constante.

Toutefois, il nous paraît utile de faire quelques remarques sur l'interprétation des résultats des essais factoriels et notamment sur la notion d'effet principal.

Soit un essai factoriel comprenant 3 doses de Phosphore :  $P_0, P_1, P_2$  et 4 doses d'Azote :  $N_0, N_1, N_2, N_3$ . Les douze combinaisons peuvent être situées dans un système de référence N O P (Fig. 8).

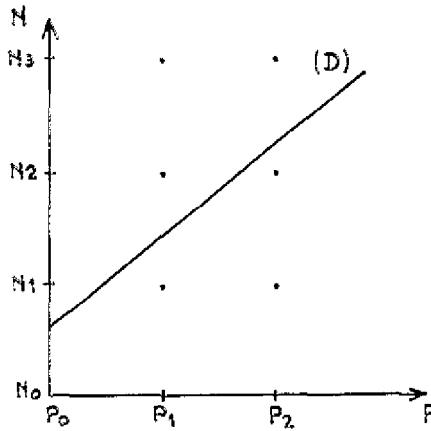


Fig. 8

Soit (D) la projection de la ligne de crête de la surface de réponse Azote-Phosphore. Lorsque nous pratiquons dans cette surface des coupes perpendiculaires au plan N O P et parallèles à l'un des axes les rendements croissent jusqu'à la ligne (D) et demeurent constants au delà, si la coupe ne rencontre pas la ligne de crête les rendements ne varient pas.

Dans ces conditions il est possible de tracer les variations de rendements à chaque niveau N lorsque P varie (Fig. 9).

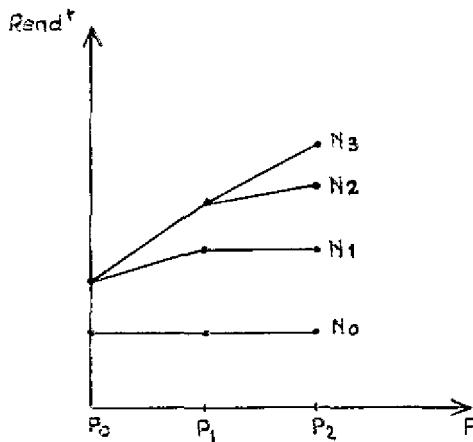


Fig. 9

L'effet principal N sera estimé à partir des moyennes  $N_0, N_1, N_2, N_3$  telles que  $N_0 = 1/3 (N_0 P_0 + N_0 P_1 + N_0 P_2)$ . Il apparaît nettement sur le graphique précédent qu'il est illusoire de comparer entre elles



ces moyennes  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  obtenues dans des conditions très artificielles.

La méthode des variantes systématiques telle que nous l'utilisons se dégage des difficultés d'utilisation et d'interprétation des méthodes factorielles. Seuls les rendements ou moyennes de rendements obtenus par répétition d'un même traitement interviennent dans nos résultats à l'exclusion de toute moyenne plus ou moins valable.

## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

### République Centrafricaine

Station de Bambari

Expérimentation 1957

Equilibre N P S : 10.000 équivalents ha.

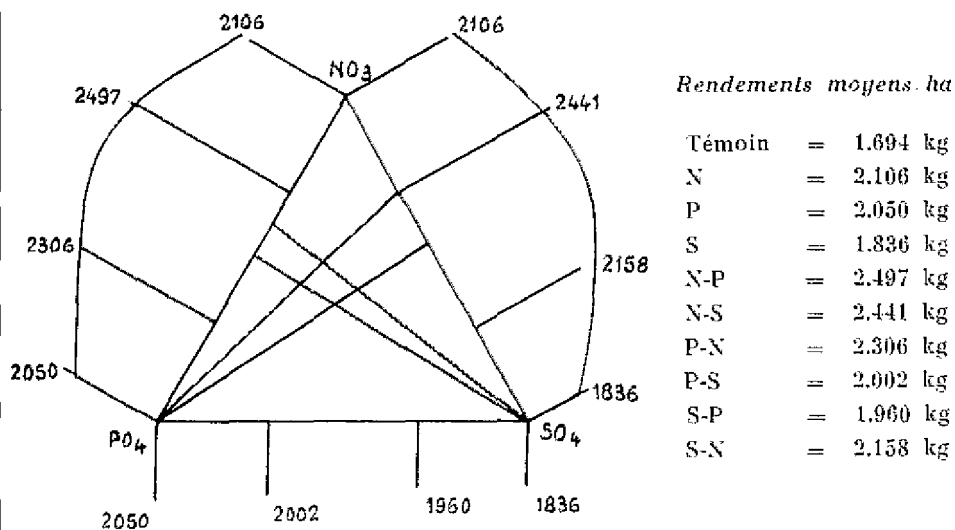


Fig. 10

Courbes de régression :

Equilibre N-P :  $Y = 2.122 + 151,2 x - 16,5 x^2$

Max = 4,6 (4,0 à 4,8) soit  $NO_3 = 5.400$   $PO_4 = 4.600$

Equilibre N-S :  $Y = 2.123 + 131,2 x - 16,3 x^2$

Max = 4,0 (4,4 à 2,9) soit  $NO_3 = 6.000$   $SO_4 = 4.000$

Equilibre S-P : indifférent

Equilibre à respecter pour une fumure de 10.000 éq. ha

$NO_3 = 4.000$   $PO_4 = 3.400$   $SO_4 = 2.600$

N = 56 kg ha  $P_2O_5 = 80$  kg ha S = 40 kg ha.

Expérimentation 1958

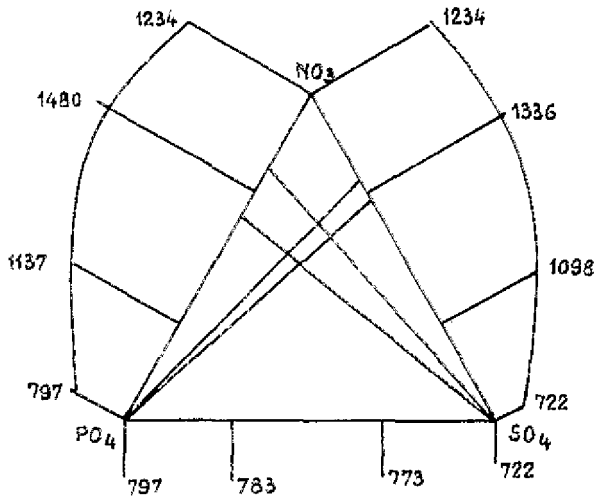
1°) *Équilibre N P S* : 10.000 équivalents/ha.

Fig. 11

*Rendements moyens/ha*

Témoin	=	678 kg
N	=	1.234 kg
P	=	797 kg
S	=	722 kg
N-P	=	1.480 kg
N-S	=	1.336 kg
P-N	=	1.137 kg
P-S	=	783 kg
S-P	=	773 kg
S-N	=	1.098 kg

*Courbes de régression :*Équilibre N-P :  $Y = 1.249 + 96.5 x - 14.4 x^2$ Max = 3,3 (2,3 à 3,8) soit  $NO_3 = 6.700$   $PO_4 = 3.300$ Équilibre N-S :  $Y = 1.235 + 65.3 x - 11.7 x^2$ Max = 2,8 (2,7 à 3,2) soit  $NO_3 = 7.200$   $SO_4 = 2.800$ 

Équilibre S-P : indifférent

Équilibre à respecter pour une fumure de 10.000 éq./ha

 $NO_3 = 5.300$  éq.  $PO_4 = 2.600$  éq.  $SO_4 = 2.100$  éq.soit N = 74 kg/ha  $P_2O_5 = 60$  kg/ha S = 33 kg/ha.

Les résultats obtenus en 1957 et en 1958 sont très comparables. La première année l'Azote avait été apporté sous forme de nitrate d'ammoniaque et la deuxième sous forme d'Urée.

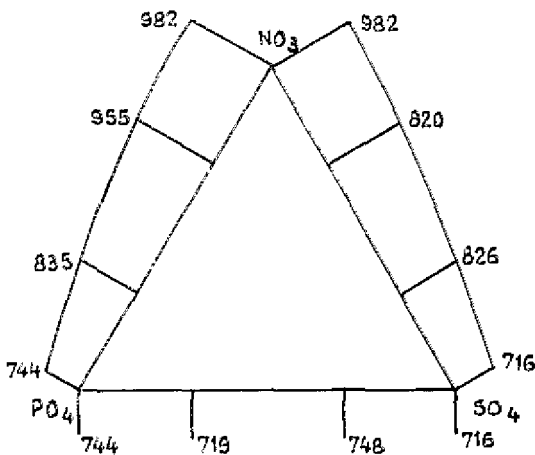
2°) *Équilibre N P S* : 3.000 éq./ha.

Fig. 12

*Rendements moyens/ha*

Témoin	=	719 kg
N	=	982 kg
P	=	744 kg
S	=	716 kg
N-P	=	955 kg
N-S	=	820 kg
P-N	=	835 kg
P-S	=	719 kg
S-P	=	748 kg
S-N	=	826 kg

Les courbes de rendements N-S et N-P sont croissantes vers N. L'analyse statistique révèle que N est supérieur à S-N - S-P - S et P à P 0,61. Pour une dose d'engrais de 3.000 eq./ha l'Azote seul est suffisant. Nous avons donc  $NO_3 = 3.000$ ,  $PO_4 = 0$ ,  $SO_4 = 0$ , soit  $N = 40$  kg/ha.

Une première estimation des projections des lignes de crête des surfaces de réponse N-P et N-S peut être tracée. Ces estimations seront évidemment vérifiées au cours des prochaines expérimentations.

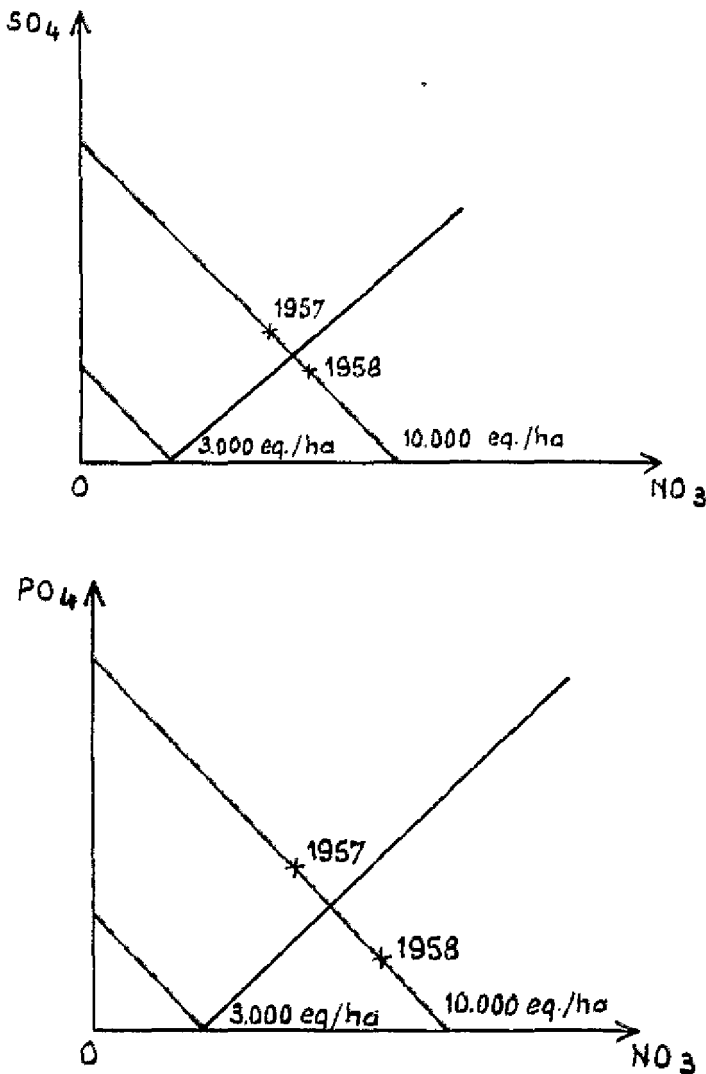


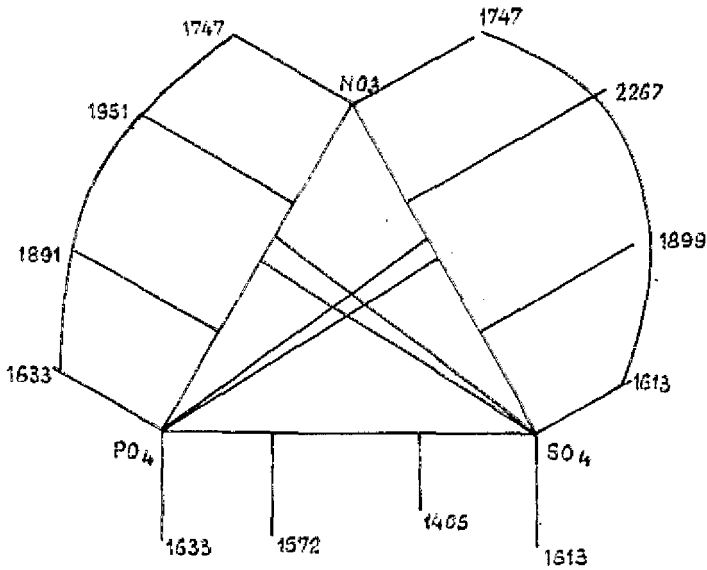
Fig. 13

En deçà de 3.000 eq./ha il paraît théoriquement inutile d'apporter d'autres éléments que l'Azote.

## Station de Bossangoa

Expérimentation 1958

Équilibre N P S : 10.000 éq.



## Rendements moyens

Témoin	=	1.481
N	=	1.747
P	=	1.633
S	=	1.613
N-P	=	1.951
N-S	=	2.267
P-N	=	1.891
P-S	=	1.572
S-P	=	1.405
S-N	=	1.899

Fig. 14

## Courbes de régression :

Équilibre N-P :  $Y = 1.735 + 107x - 12x^2$ Max = 4.5 (4,0 à 4,7)       $\text{NO}_3 = 6.500$  éq.       $\text{PO}_4 = 4.500$  éq.Équilibre N-S :  $Y = 1.795 + 134x - 21x^2$ Max = 4.4 (4,0 à 4,6)       $\text{NO}_2 = 6.600$  éq.       $\text{SO}_4 = 4.400$  éq.

Équilibre S-P : indifférent

Équilibre N P S à respecter pour 10.000 éq./ha

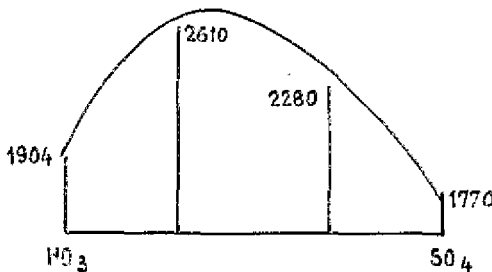
$\text{NO}_3 = 3.800$  éq.       $\text{PO}_4 = 3.200$  éq.       $\text{SO}_4 = 3.000$  éq.  
soit N = 33 kg/ha       $\text{P}_2\text{O}_5 = 76$  kg/ha      S = 48 kg/ha.

## République du Tchad

## Station de Bebedjia

Expérimentation 1958

Seul l'équilibre N-S a été étudié à la dose de 3.000 éq./ha.



## Rendements moyens/ha

N	=	1.904 kg
N-S	=	2.610 kg
S-N	=	2.280 kg
S	=	1.770 kg

Fig. 15

Courbes de régression :

$$Y = 1,927 + 382 x - 30,3 x^2$$

$$\text{Max} = 4,6 \text{ (4,1 à 4,8)}$$

Equilibre à respecter pour 3.000 éq. ha.

$$\text{NO}_3 = 1,620 \text{ éq. ha} \quad \text{SO}_4 = 1,380 \text{ éq.}$$

$$\text{soit N} = 22 \text{ kg ha} \quad \text{S} = 22 \text{ kg ha.}$$

Station de Tikem

Expérimentation 1958

Equilibre N P S : 10.000 éq. ha.

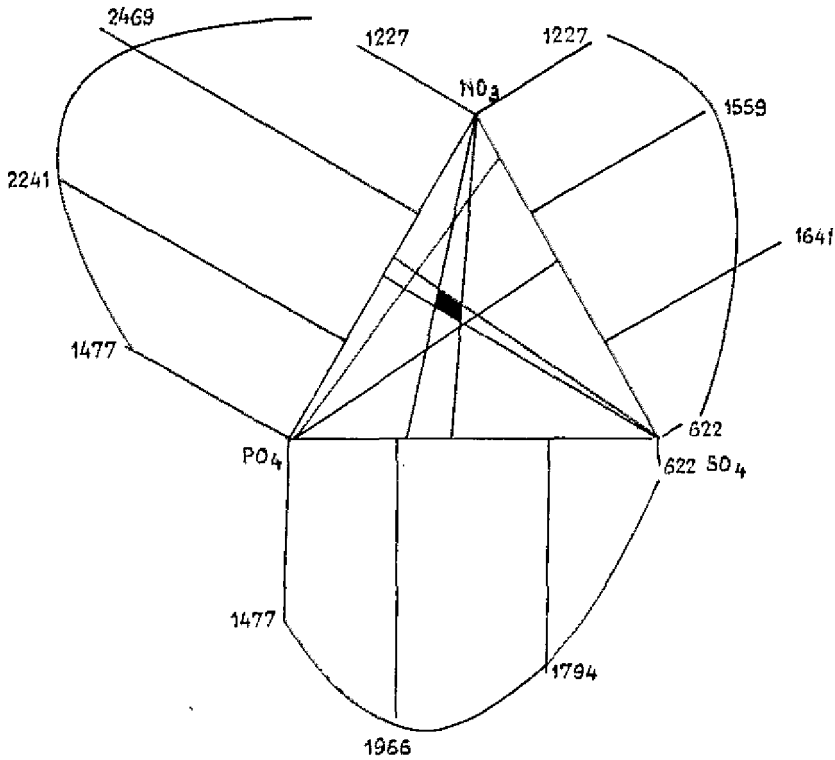


Fig. 16

Rendements moyens ha

Témoin	=	1,145 kg
N	=	1,227 kg
P	=	1,477 kg
S	=	622 kg
N-P	=	2,469 kg
N-S	=	1,559 kg
P-N	=	2,241 kg
P-S	=	1,966 kg
S-P	=	1,794 kg
S-N	=	1,641 kg

*Courbes de regression :*

Equilibre N-P :  $Y = 1.530 + 354 x - 36 x^2$   
 Max = 4,9 (4,5 à 5,0)       $NO_3 = 5.100$  éq./ha       $PO_4 = 4.900$  éq./ha

Equilibre N-S :  $Y = 1.319 + 183 x - 24 x^2$   
 Max = 3,8 (1,3 à 4,4)       $NO_3 = 6.200$  éq./ha       $SO_4 = 3.800$  éq./ha

Equilibre S-P :  $Y = 700 + 455 x - 38 x^2$   
 Max = 6,2 (5,7 à 6,8)       $SO_4 = 3.800$  éq./ha       $PO_4 = 6.200$  éq./ha

Equilibre N P S à respecter pour 10.000 éq.

Compte tenu des erreurs ces 3 rapports sont compatibles, la solution graphique donne les proportions suivantes :

$NO_3 = 3.800$        $PO_4 = 3.800$        $SO_4 = 2.400$   
 soit N = 53 kg/ha       $P_2O_5 = 90$  kg/ha      S = 38 kg/ha.

L'équilibre S-P est bien défini alors qu'à BAMBARI et BOSSANGOA celui-ci était indifférent. Il est intéressant de noter l'action dépressive du Soufre lorsqu'il est utilisé seul. Un essai à 5.000 éq./ha a donné des résultats très voisins, les concentrations relatives optimales ne paraissent par avoir varié, toutefois, à cette dose le Soufre épandu seul a une action positive.

Des essais destinés à étudier les concentrations relatives des cations K - Ca - Mg ont été mis en place sur les mêmes stations. Les réponses furent toujours nulles à l'exception de TIEM où l'association K - Ca paraît donner une augmentation de rendement de l'ordre de 25 %.

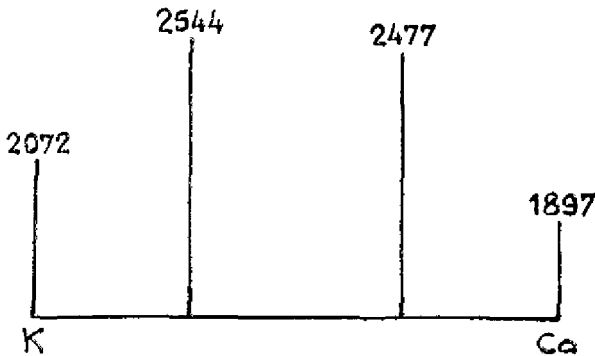


Fig. 17

*Rendements moyens/ha*

K	=	2.072 kg
K-Ca	=	2.544 kg
Ca-K	=	2.477 kg
Ca	=	1.897 kg

Les moyennes ne comprenant que 4 rendements, l'analyse statistique ne nous permet pas de retenir valablement ces résultats. Il sera donc nécessaire de les vérifier ultérieurement.

## POSSIBILITÉS D'UN DIAGNOSTIC FOLIAIRE

Nous avons vu les nombreux obstacles auxquels se heurtent les agronomes dans l'étude de la nutrition minérale, le choix de la méthode et l'interprétation des résultats posent des problèmes complexes qui trouveront une solution d'autant plus exacte que l'agronome se rapprochera des réalités physiologiques en se dégageant des méthodes statistiques qui leur sont étrangères.

L'analyse de la plante est dans ce domaine très séduisante a priori ; la plante intègre les différents facteurs, sol, climat, fumure minérale et leurs interactions ; sa composition devrait permettre d'élucider rapidement quels sont les besoins nutritifs de la plante.

Toutefois les difficultés apparaissent très rapidement dès que l'on aborde l'interprétation des résultats analytiques. Des cultures satisfaisantes implantées dans des régions différentes ont des compositions foliaires très variables et inversement en un même lieu il est très difficile de relier les variations de rendement à celles des analyses. Pour pallier cette variabilité qui masque trop souvent les réactions du végétal peut-être serait-il possible de travailler sur de très grandes séries pour tenter la liaison rendement-composition foliaire ; cette méthode est très onéreuse et aléatoire, il paraît donc préférable de rechercher une méthode plus évoluée. L'étude de la nutrition minérale en culture artificielle, dans cet ordre d'idées, permet de définir la composition optimale mais en négligeant les facteurs sols et climats. Ces études peuvent cependant nous renseigner sur les processus généraux de la nutrition, de ses incidences sur la composition foliaire et guider ainsi très sérieusement les travaux en milieu naturel.

Devant la complexité de l'étude du diagnostic foliaire, il nous a paru préférable d'aborder le problème sur des points bien particuliers. Nous avons observé les réactions de la composition foliaire à l'inter-vention de facteurs contrôlés, apport d'engrais notamment, sans rechercher de prime abord la liaison idéale composition foliaire - rendement.

## ÉCHANTILLONNAGE ET MODE DE PRÉLÈVEMENT

Les échantillons doivent par définition être comparables entre eux, deux facteurs interviennent pour leur réalisation chez le cotonnier : l'emplacement sur le plant et l'âge physiologique de la feuille. Ces deux facteurs sont difficilement compatibles car si l'on veut prélever deux feuilles d'âge physiologique identique à des dates différentes leur emplacement respectif sera obligatoirement dissemblable. Il nous a donc paru préférable de négliger le facteur emplacement pour ne conserver que l'âge de la feuille si plusieurs échantillonnages doivent être effectués dans le cours d'une campagne. La constance de l'âge physiologique est obtenue en prélevant les feuilles à l'aisselle d'une fleur ouverte, l'expérience nous a prouvé que 30 feuilles pour 80 à 100 m<sup>2</sup> étaient un bon échantillonnage.

Actuellement nous prélevons un seul échantillon dans le courant de la végétation, dès le début de la floraison, lorsqu'il est possible de trouver 30 fleurs ouvertes sur 100 m<sup>2</sup>.

## TECHNIQUES D'ANALYSE

Les échantillons foliaires sont desséchés sur place pour éviter des fermentations en cours de transport. Les analyses sont effectuées à la Métropole par le Laboratoire de Diagnostic Foliaire de Montpellier sous la direction de M. LÉVY. Les techniques utilisées sont les suivantes :

- Azote : méthode Kjeldahl avec semi-microdistillation selon BOUAT et DULAC
- Phosphore : photolorimétrie à l'état de complexe Vanado-molybdique
- Soufre : turbidimétrie à l'état de sulfate de baryum
- Potassium : photométrie de flamme
- Calcium : manganimétrie à l'état d'oxalate
- Magnesium : complexométrie au versenate de la somme Ca + Mg

## OBSERVATIONS ET RÉSULTATS

En 1957 des analyses foliaires furent réalisées sur les essais d'engrais des stations du Tchad, d'Oubangui et d'Algérie. Plusieurs prélèvements furent effectués sur chacun des essais à 10 jours d'intervalle. Les résultats de ces prélèvements mirent en évidence pour un même essai des variations importantes dans la composition foliaire entre les différents prélèvements.

Nous donnons ci-contre (fig. 18) à titre d'exemple les courbes des teneurs en N P S K Ca Mg des parcelles témoins des essais de Bebedjia (Tchad).

Les variations brusques constatées nous indiquent dès maintenant quelle précision nous pouvons admettre pour la détermination de niveaux critiques ou de normes quelconques tendant à définir un diagnostic foliaire. Par ailleurs si nous voulons comparer deux traitements différents en un lieu donné sous l'angle composition foliaire, il paraît indispensable de respecter rigoureusement la même date de prélèvement.

À côté de ces résultats peu encourageants nous avons pu cependant, au cours de cette même campagne 1957, établir quelques observations sur l'interaction des éléments de la nutrition sur la composition foliaire. ces observations viennent soutenir la méthodologie adoptée pour l'étude des fumures.

Cette interaction a été observée entre autres principalement avec l'apport d'engrais azotés. Une augmentation de la teneur des feuilles en azote se traduit par une diminution de la teneur en  $P_2O_5$  et S.

Exemples : TIKEM - fumure azotée 40 kg N/ha de l'urée (fig. 19).

BONE (Algérie - Nitrate de chaux 50 kg N/ha (fig. 20).

Sur ces deux exemples nous voyons l'interaction de N sur P et S. A Tikem, où les teneurs en S sont assez médiocres naturellement, un apport d'Azote provoque une carence en S alors qu'à Bone la carence est induite pour le Phosphore ; dans l'un et l'autre cas les rendements ont été déprimés par rapport au témoin.

Dans ces exemples, il est certain que les variations de la composition foliaire sont en rapport avec les rendements ; doit-on introduire dès maintenant la notion de niveau critique pour les éléments considérés ou prendre en considération leur concentrations relatives dans la feuille ? Quelle est la nature de l'interaction et à quel niveau se situe-t-elle ? Ces questions ont orienté nos travaux au cours de la campagne 1958 où nous avons appliqué l'analyse foliaire à l'ensemble de nos essais variantes systématiques.

Le premier essai « variantes systématiques » de Bambari avait déjà fait l'objet de cette étude en 1957, nous avons donc deux séries de résultats pour une même station. Nous les prendrons en exemple pour illus-



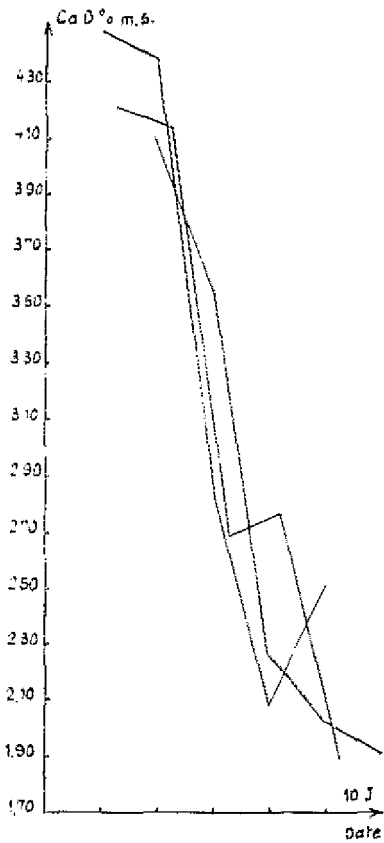
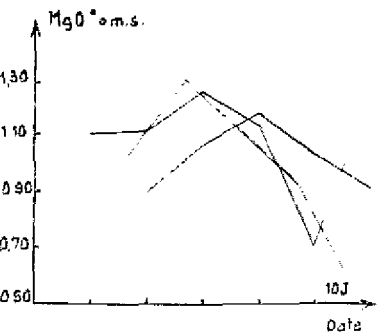
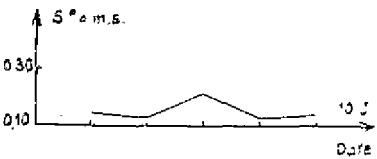
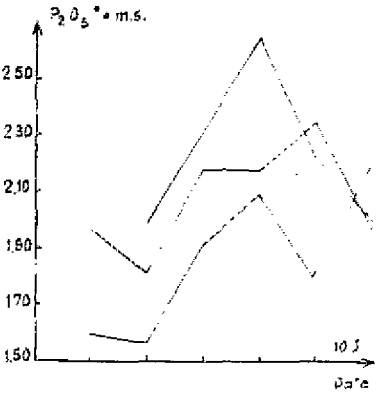
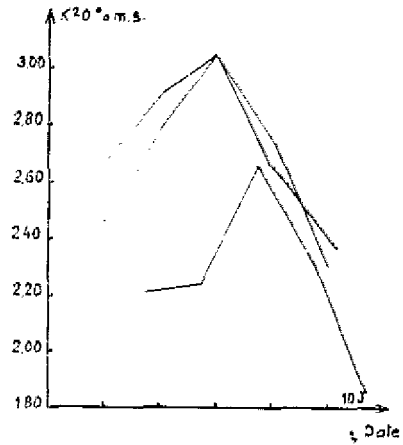
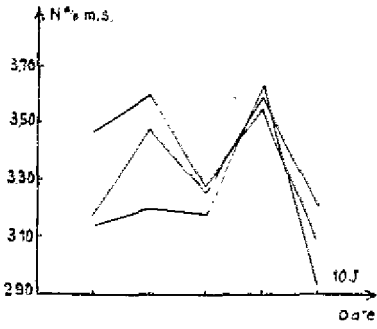


Fig. 18

Bebedija — Parcelles "Témoin"

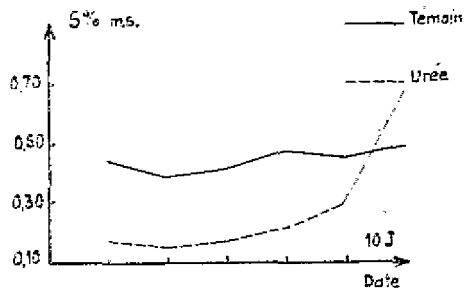
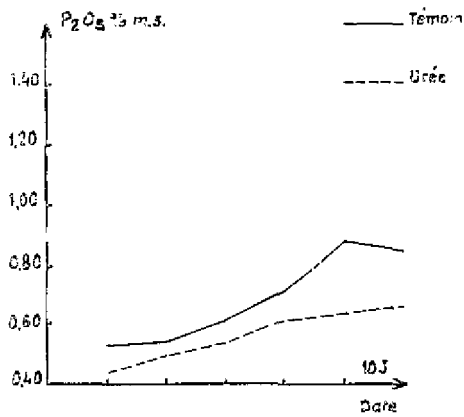
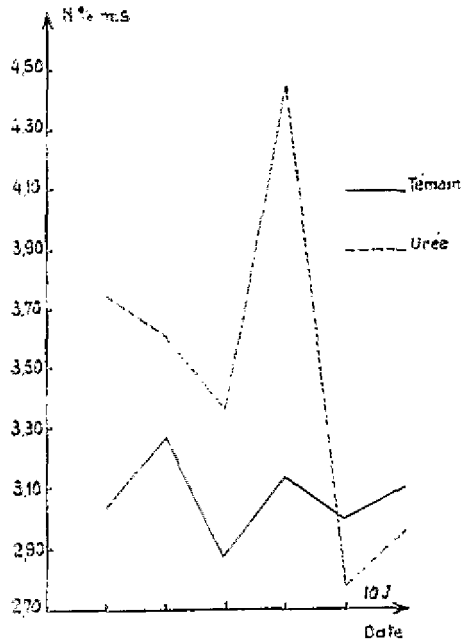


Fig. 19

Tikem (Tchad) — Urée 40 kg N/ha

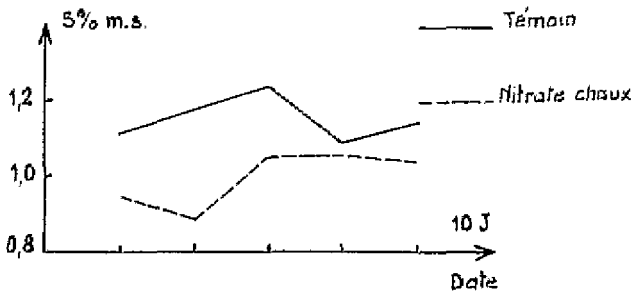
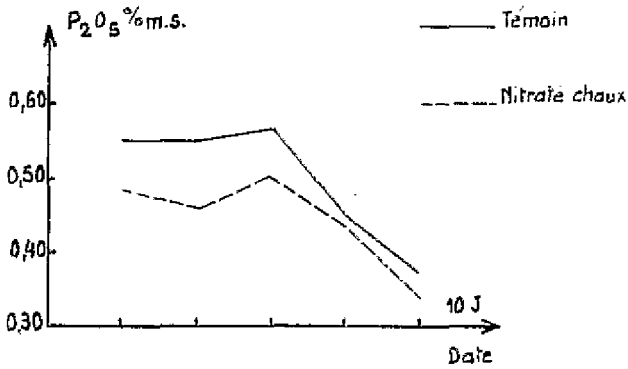
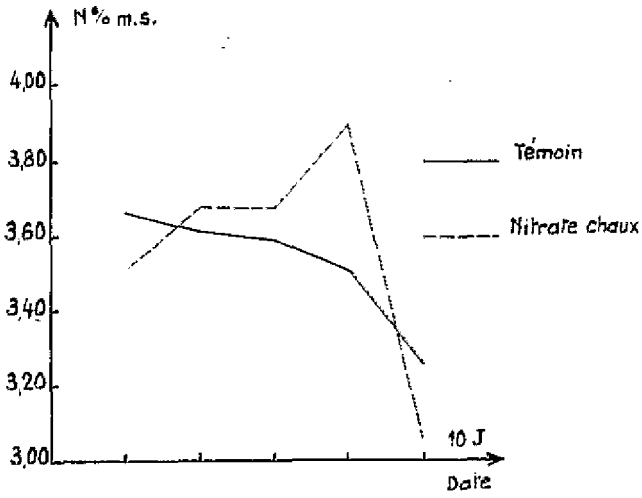


Fig. 20

Bône (Algérie) — Nitrate de chaux 50 kg h N

trer nos investigations dans l'établissement du diagnostic foliaire. La méthode des variantes systématiques permet de tracer une courbe de rendement en fonction de l'apport de deux éléments, les teneurs en éléments des quatre points testés nous permettent par extrapolation de tracer une variation continue de la teneur d'un élément lorsque l'apport des deux éléments considérés varie à l'intérieur d'une somme constante. Nous avons donc trois variations continues, liées entre elles : les concentrations relatives de deux éléments apportés à la culture, le rendement et la composition foliaire de la plante.

Les graphiques suivants ont été établis suivant cette méthode pour les deux essais variantes systématiques 10.000 éq. mis en place à Bambari en 1957 et 1958.

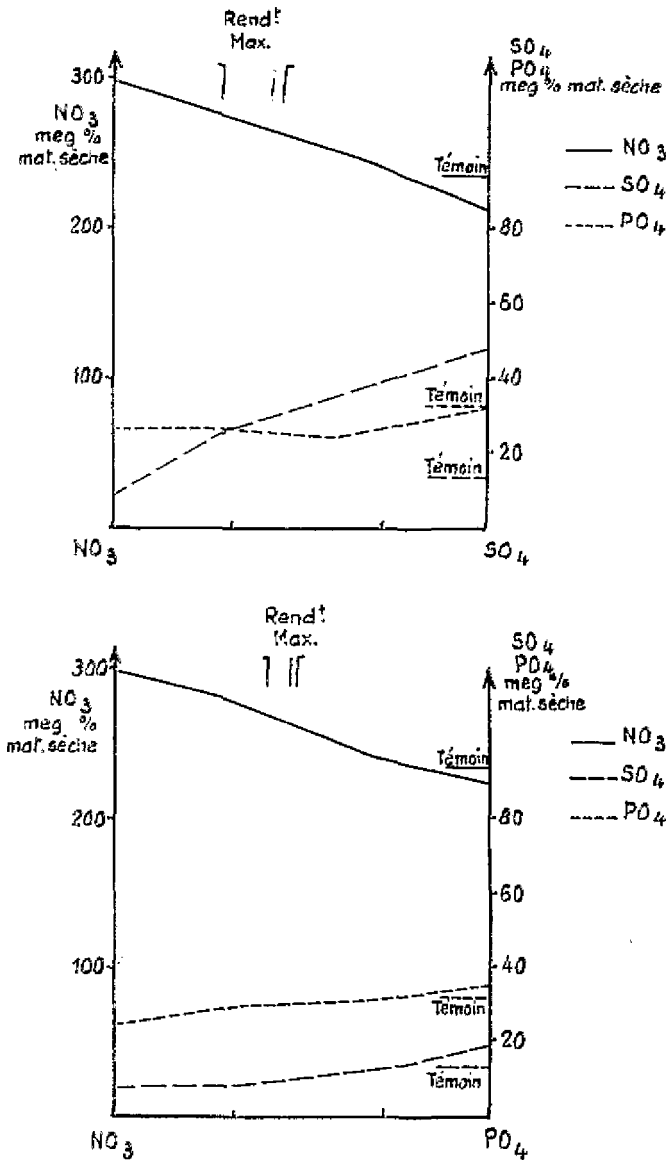


Fig. 21 Bambari 1957

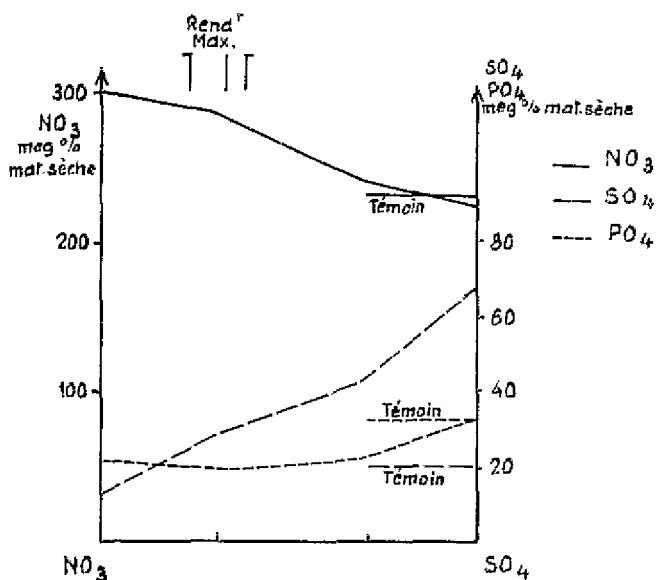
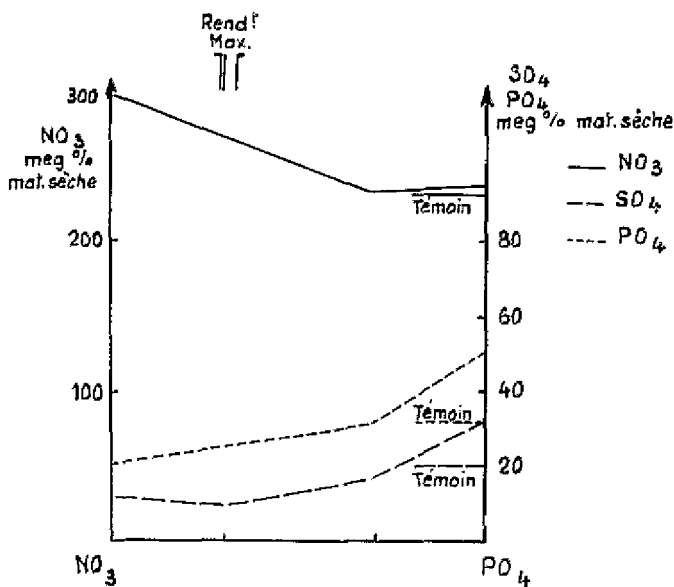


Fig. 22 — Bambari 1958

Les teneurs en Azote, Soufre et Phosphore exprimées en milliéquivants sont représentées en fonction des concentrations relatives des différents traitements.

Sur ces quatre figures on peut remarquer que l'apport d'un élément diminue la teneur des deux autres par rapport au témoin qui ne reçoit aucune fumure. Il serait prématuré d'en déduire une interaction entre ces trois éléments car les dépressions constatées peuvent être dues à des effets de dilution. C'est en fait ce qui a été constaté à Bambari en 1958.

Il existe une corrélation très étroite entre le poids de la feuille et le développement du cotonnier. Si l'on multiplie le poids de l'échantillon foliaire (36 feuilles) par la teneur de celui-ci en  $\text{NO}_3$  -  $\text{PO}_4$  -  $\text{SO}_4$  on obtient un indice de l'absorption de ces éléments indépendamment des effets de dilution.

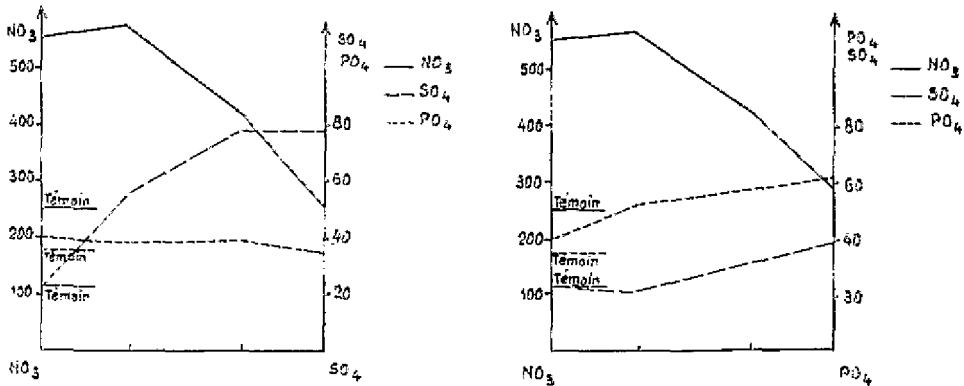


Fig. 23

Bambari 1952 — Indice d'absorption totale

Ces graphiques font disparaître l'interaction négative notée précédemment ; bien au contraire une interaction positive entre le Phosphore et le Soufre est mise en évidence, un apport de Phosphore provoque une augmentation de l'indice Soufre. Cette interaction positive qui se retrouve aussi à Bossangoa explique sur ces deux stations l'indifférence de la réponse du cotonnier aux variations des concentrations relatives de ces deux éléments dans la fumure.

Les influences opposées de l'absorption et de la dilution déterminent une composition particulière de la matière végétale. Nous pensons que les teneurs relatives des trois éléments Azote, Phosphore et Soufre dans la feuille sont en relation avec le rendement qui dépend par ailleurs de l'alimentation globale.

Le graphique n° 24 a été établi en coordonnées triangulaires, chaque base du triangle correspond à la teneur relative de l'un des trois éléments. Un échantillon foliaire ayant les teneurs suivantes  $\text{NO}_3 = 300$ .

$$\text{PO}_4 = 22 \text{ et } \text{SO}_4 = 12 \text{ aura pour coordonnées } \text{NO}_3 = \frac{300 \times 100}{334} = 89.8$$

$$\text{PO}_4 = \frac{22 \times 100}{334} = 6.6 \quad \text{SO}_4 = \frac{12 \times 100}{334} = 3.6.$$

L'ensemble des échantillons foliaires correspondant aux traitements des essais réalisés au Tchad et en Oubangui se situe à l'intérieur du polygone tracé sur ce graphique. Seules ont été notées individuellement les

compositions foliaires des rendements maxima des divers équilibres de chacun des essais, compositions estimées sur des graphiques identiques au n° 24. Leurs positions très groupées mettent en évidence une liaison entre les teneurs relatives et le rendement.

La concentration relative optimale de N-P-S dans la feuille du cotonnier se situerait aux environs de  $\text{NO}_3 = 37$ ,  $\text{PO}_4 = 7$ ,  $\text{SO}_4 = 6$  soit  $\text{N} = 82$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 11$ ,  $\text{S} = 7$ .

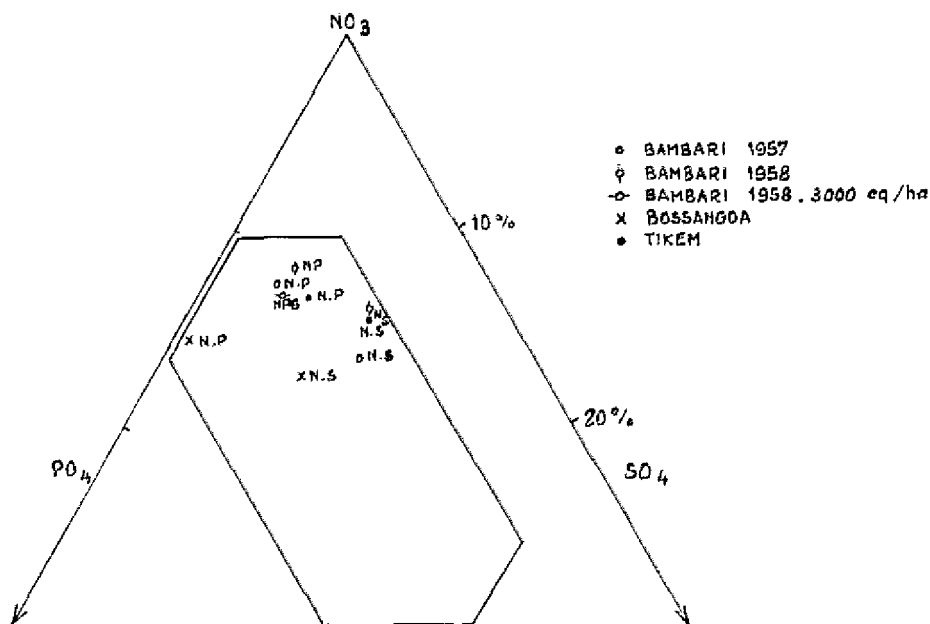


Fig. 24

Cette liaison confirme l'interdépendance des éléments Azote, Phosphore et Soufre et permet de situer celle-ci au delà des phénomènes d'absorption sans pour cela éclairer leur véritable nature.

L'étude du diagnostic foliaire du cotonnier sera poursuivie suivant une méthode comparable à celle adoptée pour la nutrition donnant une importance égale aux teneurs absolues et relatives.

## Résumé

Dans un précédent numéro de cette revue nous avons proposé une adaptation de la méthode des variantes systématiques à l'étude de la nutrition minérale en milieu naturel. Dans cet article les principaux points de cette adaptation sont mis en parallèles avec les méthodes classiques des fumures et les lois générales de la nutrition minérale des végétaux. Nous proposons un mode d'interprétation statistique faisant appel aux calculs de régression curvilineaire. Plusieurs essais ont été réalisés en Oubangui et au Tchad permettant de déterminer les meilleures compositions à respecter dans des fumures comprenant les trois éléments N P et S.

Les analyses foliaires réalisées sur ces essais semblent montrer que les meilleurs rendements sont obtenus pour une valeur bien déterminée des concentrations relatives de ces trois éléments dans la feuille.

## Summary

*In a previous issue, an adaptation of the "systematic variant method" was proposed to study mineral nutrition in natural environment. The main features of this method are compared with conventional methods for studying fertilizer problems and general laws about mineral nutrition of plants. An interpretation is proposed, dealing with curvilinear regression. Several tests have been carried on in Ubangui and Tchad, to determine the best ratios between, N, P and S in a fertilizer.*

*Foliar analysis made in connection with these tests show that the best yields arise from a given value of relative concentration of the three elements in the leaves.*