

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
(O. R. S. T. O. M.)

CENTRE DE FORMATION
DE
PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

MÉTHODES D'ÉTUDE
DES
BESOINS MINÉRAUX DES PLANTES

par

Danielle SCHEIDECKER
Phytophysiologiste

assistée de M^{me} B. HARDY

O. R. S. T. O. M.
20, Rue Monsieur — PARIS (VII^e)
1959

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
(O.R.S.T.O.M.)

CENTRE DE FORMATION
DE
P H Y S I O L O G I E V E G E T A L E

MÉTHODES D'ÉTUDE DES BESOINS MINÉRAUX DES PLANTES

par

Danielle SCHEIDECKER
Phytophysiologiste
assistée de Mme B. HARDY

1959

O.R.S.T.O.M.
20, Rue Monsieur - PARIS VII^e

P L A N

I N T R O D U C T I O N

P L A N

	Page
INTRODUCTION	10
EXPERIMENTATION CULTURALE	12

ANALYSE DU SOL

<u>A - ANALYSE CHIMIQUE DU SOL -</u>	Page
1) Les techniques employées et leur signification ...	16
2) Valeur de la méthode pour l'étude des besoins minéraux des plantes	17
a) Difficultés inhérentes aux techniques de prélèvement des échantillons et aux techniques d'extraction	
b) Limites de la méthode	
3) Teneurs en éléments minéraux dans le sol et dans la plante	19
4) Analyse chimique du sol, analyse chimique de la plante et rendement	19
5) Utilisation des analyses chimiques du sol dans l'étude des besoins minéraux des plantes ..	21
 <u>B - ANALYSE BIOLOGIQUE DU SOL -</u>	
1) Méthode de Neubauer. Autres méthodes utilisant des plantules	22
a) Principe	
b) Méthode de Neubauer proprement dite	
c) Méthodes dérivées de la Méthode de Neubauer. Cultures successives	
2) Méthode de Mitscherlich	26
3) Méthodes utilisant des microorganismes	29
4) Analyse de plantes supérieures particulièrement sensibles	30
5) Analyse de la sève brute	30
 <u>C - BIBLIOGRAPHIE</u>	31

ANALYSE DE LA PLANTE

	Page
Introduction	35
- <u>BASES PHYSIOLOGIQUES DES METHODES D'ETUDE FONDEES SUR</u> <u>L'ANALYSE DE LA PLANTE</u>	
Généralités	36
1) Relation entre la concentration en éléments minéraux dans le milieu extérieur et la concentration dans la plante	38
2) Relation entre la concentration dans le milieu intérieur et le rendement pondéral	40
3) Relation entre concentration dans le milieu extérieur et rendement pondéral	45
Conclusions	47
- <u>CHOIX D'UNE TECHNIQUE</u>	
1) Nécessité des recherches préliminaires. Principes. Exemples	48
2) Choix des plantes sur lesquelles prélever les échantillons	51
3) Choix de l'organe à analyser	52
a) Quelle partie de la plante prélever ?	
b) Nature exacte de l'échantillon	
4) Choix du moment convenable pour l'échantillonnage ...	56
a) Variations au cours de la journée	
b) Variations au cours de la vie de la plante et au cours de l'année	
5) Autres facteurs entrant en jeu	59
a) Conditions climatiques	
b) Maladies	
c) Conditions de sol	
d) Variétés	
e) Fructification	

- <u>EXPRESSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS</u>	Page
A - <u>EXPRESSION DES RESULTATS</u>	63
1) a) En poids	
b) En atomes-grammes ou en équivalents chimiques	
2) a) Résultats exprimés par plante ou par feuille	
b) " " par unité de surface foliaire	
c) " " en fonction du poids frais	
(ou en fonction du volume d'extrait)	
d) " " en fonction du poids sec	
e) " " " " de cendres	
B - <u>INTERPRETATION DES RESULTATS</u>	
1) Eléments de comparaison	65
2) Niveaux critiques. Utilisation des valeurs absolues.	66
3) Interférences et interactions. Utilisation des	
rapports	68
4) Intensité et équilibre	72
5) Assimilation et utilisation	77
6) Qualité des produits récoltés	82
7) Exemples de cas soulevant des difficultés	
d'interprétation	82
8) Conclusions	84
- <u>ROLE ET IMPORTANCE DE CES METHODES</u>	85
- <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	88



	Page
<u>TESTS RAPIDES</u>	
A - PRINCIPE DES METHODES DE TESTS RAPIDES	92
B - <u>TECHNIQUES MISES EN OEUVRE</u>	
1) Choix des organes	93
2) Techniques d'extraction	93
a) Jus de presse	
b) Liquides d'extraction	
c) Procédés d'extraction	
3) Tests chimiques	95
4) Indications techniques pratiques	95
a) Préparation des réactifs	
b) Echelles de référence	
c) Matériel nécessaire ..	
d) Extraction	
e) Exécution des tests ..	
f) Eléments autres que N, P, K, Ca, Mg.	
g) Etude sommaire du sol	
5) Travail sur coupes	104
C - <u>EXPRESSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS. VALEUR</u> <u>DE LA METHODE</u>	106
- <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	107

ETUDE DES SYMPTOMES VISIBLES DE CARENCE OU DE TOXICITE

UTILISATION DES PLANTES INDICATRICES

A - <u>LES SYMPTOMES VISIBLES DE CARENCE (ET DE TOXICITE)</u>	Page
1) Symptômes de carence en Azote	110
2) " " Phosphore	110
3) " " Calcium	111
4) " " Magnésium	111
5) " " Potassium	112
6) " " Sodium	112
7) " " Soufre	112
8) " " Fer	113
9) " " Manganèse	113
10) " " Bore	113
11) " " Zinc, Cuivre et Molybdène ...	114
12) toxicité en Manganèse et en Aluminium ..	114
B - <u>UTILISATION DE LA METHODE SUR LE TERRAIN</u>	115
C - <u>UTILISATION DES PLANTES INDICATRICES</u>	118
D - <u>AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA METHODE</u>	118
- <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	120

INJECTION ET APPLICATION DIRECTE A LA PLANTE DE SOLUTIONS OU DE
PRODUITS MINERAUX.

	Page
- <u>PRINCIPE</u>	125
- <u>TECHNIQUES</u>	
A - <u>INJECTION</u>	
1) Solutions	125
a) Méthode de Roach proprement dite	
b) Techniques simplifiées	
c) Conditions à respecter pour les essais	
d) Préparation et concentration des solutions	
2) Produits solides	130
B - <u>BADIGEONNAGE - PULVERISATION - POUDRAGE</u>	
1) Badigeonnage des feuilles	130
2) Pulvérisation et poudrage	132
- <u>INTERET ET LIMITES DE CES METHODES</u>	133
- <u>APPLICATIONS</u>	
1) Aux différents éléments	134
2) Aux différentes plantes	134
- <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	136

UTILISATION DES RADIOISOTOPES

- Application aux différentes méthodes :	Page
A - Analyse du sol	139
B - Analyse de la plante	141
C - Injection et Application directe à la plante de solutions ou de produits minéraux	142

METHODES DIVERSES

	page
- <u>METHODE DE FILTRISSEMENT D'ARLAND</u>	145
- <u>UTILISATION DES MICROORGANISMES ET DE CERTAINES PLANTES</u> <u>AQUATIQUES</u>	148
- <u>UTILISATION DES CULTURES DE TISSUS</u>	149
- <u>ETUDE DE L'ADSORPTION RADICULAIRE</u>	150

INTRODUCTION

La détermination des besoins en éléments minéraux des plantes présente à la fois un intérêt purement physiologique et un très grand intérêt pratique. D'innombrables études ont été faites sur ce sujet et de nombreuses méthodes d'appréciation essayées et mises au point, car la complexité des problèmes soulevés est apparue très vite. Au début des recherches modernes, quand tout l'intérêt de l'alimentation minérale des végétaux est apparu clairement, Liebig avait pensé d'abord que pour maintenir la fertilité des terres et assurer le bon équilibre minéral des plantes cultivées, il suffirait de restituer au sol l'équivalent des éléments exportés par les récoltes. Cette façon de faire a donné souvent de bons résultats dans la pratique agronomique. Mais on ne pouvait pas en rester là. La méthode ne convenait pas à tous les cas et l'application de ce principe ne permettait pas de résoudre toutes les questions posées.

Actuellement l'agronome ou le physiologiste qui travaille dans ce domaine dispose de tout un choix de méthodes, très différentes dans leur principe, dans leurs possibilités d'application et dans la valeur des résultats qu'on peut obtenir. Ce qui importe, c'est de savoir ce qu'on peut légitimement attendre de chacune d'elles.

En les passant rapidement en revue, il faut envisager d'abord l'expérimentation culturale, fondement de toute recherche de cet ordre, mais qui ne peut constituer à elle seule une méthode complète car elle ne peut nous apprendre ce qui se passe à l'intérieur de la plante. C'est l'analyse du sol et surtout l'analyse chimique de la plante elle-même qui permettent d'avancer plus loin et de comprendre ce dont les plantes ont besoin pour vivre normalement, ce qui peut leur manquer et quelles sont les causes de ces déséquilibres. Toute une série de techniques, allant jusqu'aux tests rapides, sont employées pour ces analyses. D'autres méthodes apportent surtout des indications de diagnostic susceptibles d'orienter les recherches ou de permettre d'apporter des remèdes d'urgence dans certaines situations (observation des signes visibles de carence, injections d'éléments, etc ...)

L'utilisation des éléments marqués permet maintenant certaines recherches plus fines, dans le cadre ou en marge des procédés classiques. Grâce à eux on peut envisager de connaître le sort ou le trajet de certaines éléments mis à la disposition de la plante.

La plupart des chercheurs qui ont abordé ces problèmes et utilisé ces méthodes ont insisté sur certains points importants :

- Il vaut toujours mieux utiliser conjointement plusieurs méthodes, les combiner, recouper les résultats. On y gagne en précision et en étendue d'information.

- Avant de songer à déterminer les besoins minéraux d'une plante donnée, par une méthode quelconque, il faut d'abord, principe élémentaire, bien connaître cette plante, sa morphologie, ses réactions, son développement et sa croissance.

- Il ne faut jamais oublier que tous les facteurs internes et externes qui interviennent dans la vie de la plante influent les uns sur les autres. Aucun d'eux ne peut être isolé de son contexte. La nutrition minérale est liée aux autres facteurs du milieu.

On peut rappeler d'autre part que les critères d'une alimentation minérale satisfaisante ne doivent pas être seulement quantitatifs (rendement pondéral), mais aussi qualitatifs. C'est évident du point de vue pratique de la consommation, bien qu'on ait trop souvent négligé cet aspect de la question. Mais c'est valable aussi du point de vue de la plante.

Ce choix des critères est d'ailleurs un point très délicat. On admet habituellement qu'une plante est déficiente en un certain élément si l'apport de cet élément sous une forme convenable provoque une augmentation de récolte, cet effet étant spécifique de l'élément en question. Mais il n'est pas absolument certain que l'augmentation de récolte traduise toujours le meilleur état de santé de la plante ; on peut concevoir qu'elle puisse s'accompagner dans certains cas d'une diminution de résistance à l'égard de certaines agressions. Il ne faut pas oublier non plus la difficulté qu'il y a parfois à s'assurer qu'il s'agit bien de l'action spécifique de l'élément qu'on apporte ou qu'on fait varier.

*

* *

Des indications générales sur l'ensemble des méthodes se trouvent dans les premiers chapitres des ouvrages suivants :

- D.W. GOODALL - F.G. GREGORY - Chemical composition of plants as an index of their nutritional status. Imp. Bureau Hort. Plant. Corps - Technical commun. N° 17 - East Malling 1947.
 - T. WALLACE - The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms - Londres 1951.
-

EXPERIMENTATION CULTURALE

L'expérimentation culturale scientifiquement conduite peut non seulement donner des réponses pratiques aux problèmes de fumure, elle peut permettre aussi d'étudier les effets et les interactions des éléments sur la croissance, l'aspect et le rendement des plantes. Mais elle ne peut à elle seule constituer une méthode d'étude complète. Les résultats obtenus ne permettent pas à eux seuls de comprendre le comportement et les exigences physiologiques de la plante.

Par contre, l'expérimentation culturale systématique est le seul instrument de base valable, le dispositif de départ sur lequel viennent jouer toutes les autres méthodes et qui permet seul une interprétation solide.

Cette expérimentation culturale, suivant les cas, est réalisée soit en pleine terre, soit en vases ou en cases de végétation, abrités ou non, sur sol, soit dans des conditions de milieu plus ou moins complètement artificielles (aquiculture sensu stricto, cultures sur substrat inerte). Les deux dernières possibilités peuvent être envisagées au niveau des essais agricoles ou au niveau de laboratoire. Quelles que soient les conditions choisies, la conception et la disposition des essais obéissent aux mêmes règles statistiques, qu'il n'y a pas lieu d'exposer ici.

Voir surtout :

- J.A. MASSIBOT - La technique des essais culturaux et des études d'écologie agricole - Ed. Georges frère, Tourcoing, 1946.

Certains auteurs ont imaginé d'autres méthodes pour simplifier ou alléger les dispositifs expérimentaux des essais factoriels classiques.

Voir par exemple pour la "méthode des variantes systématiques" :

- M.V. HOMÈS - L'alimentation minérale des plantes et le problème des engrais chimiques - Masson 1953.
- M.V. HOMÈS - Aspects récents de l'application de la méthode des variantes systématiques à la détermination des besoins alimentaires des végétaux - Bul. Soc. Franç. Physio. Vég., T. I, N° 3, p. 54-66 - 1955.

Pour ce qui est des techniques de culture expérimentale, en particulier des techniques de culture sans sol, il existe des manuels spécialisés, dont l'un, très clair et pratique, en français :

- M.V. HOMÈS - J.R. ANSIAUX - G. VAN SCHOOR - L'Aquiculture, Bruxelles 1953.

Aussi :

- P. CHOUARD - Cultures sans sol - Ed. Maison Rustique 1952.

Beaucoup plus complet et détaillé, envisageant les précautions nécessaires pour les recherches sur les oligoéléments.

- E.J. HEWITT - Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition - Com. Bur. Hort. Plant. Crops - Technical Commun., N° 22 - East Malling 1952.

Il faut se rappeler que les conclusions tirées des résultats obtenus à partir d'essais en pots, et à plus forte raison à partir de cultures sans sol, ne peuvent être appliquées par extrapolation à des cultures normales en champ sans confirmation. Surtout si, comme il arrive pour certaines plantes pérennes, les essais ont été faits sur des plantes jeunes et qui ne fournissent pas encore un véritable effort de production.

ANALYSE DU SOL

ANALYSE DU SOL

Les terres peuvent être analysées par voie chimique ou par voie biologique.

o

o o

A - L'ANALYSE CHIMIQUE DU SOL -

1) Les techniques employées et leur signification.

Quand on parle de la teneur en éléments minéraux d'une plante, il s'agit de la totalité des éléments présents, dosés après destruction complète de la matière organique. Une telle estimation et une telle manière de procéder ne suffisent pas à donner, dans le cas d'un sol, des résultats très intéressants du point de vue de la nutrition végétale. En effet, ce n'est pas la totalité des éléments présents dans une terre qui est à la disposition de la plante, et ce que l'analyse chimique doit tenter d'apprécier c'est la fraction de ces réserves qui est assimilables par la plante. Il vaudrait mieux dire "vraisemblablement" assimilable, car cette détermination repose sur une hypothèse : on substitue à la plante un réactif chimique qui est censé extraire les éléments minéraux du sol de la même manière que les racines. L'approximation est assez grossière. Connaissant le rôle du sol dans la nutrition végétale, l'estimation des éléments immédiatement assimilables et des réserves disponibles pour la plante peut constituer une méthode d'approche pour la connaissance des besoins minéraux des végétaux. (Mais il ne faut pas oublier qu'on s'efforce de choisir dans chaque cas la technique qui donne les résultats correspondant le mieux aux réponses des cultures).

On dose ainsi le phosphore et le potassium après extraction par l'acide citrique à 1 ou 2 %, l'acide nitrique faible (cas des terres calcaires surtout) ou un des nombreux autres réactifs essayés et adaptés à certains cas (acide lactique, acide tartrique, acide acétique, etc) ; on dose aussi les bases dites "échangeables" (CaO, MgO, K₂O, Na₂O) déplacées par l'acétate d'ammonium ou un réactif similaire.

Des méthodes de "tests rapides" ont été mises au point. Nécessitant très peu de matériel, elles sont utilisées pour dégrossir les questions sur le terrain ; elles permettent de savoir si un élément est présent en quantité faible, moyenne ou élevée. Elles occupent parmi

les techniques d'analyse chimique du sol une position similaire à celles des "tests rapides" dans l'analyse des plantes (pour plus de détails voir ce chapitre).

Pour l'azote du sol, sa mise à la disposition de la plante est liée à son évolution biologique, et les déterminations chimiques n'ont guère de valeur dans l'étude de la nutrition minérale des plantes.

2) Valeur de la méthode pour l'étude des besoins minéraux des plantes.

a) Difficultés inhérentes aux techniques de prélèvement des échantillons et aux techniques d'extraction.

De ce point de vue déjà, toute une série de difficultés limitent l'utilisation possible des résultats pour la détermination des besoins minéraux des plantes :

- Les échantillons de sol ne peuvent être prélevés qu'en des points isolés du terrain. Le nombre de prélèvements nécessaires à la constitution d'un échantillon final vraiment représentatif entraîne un travail matériel beaucoup plus considérable en général que celui exigé par les prélèvements correspondants d'échantillons végétaux.

- Ce qui est beaucoup plus grave, c'est qu'il est difficile d'obtenir un échantillon qui représente exactement le sol exploré par le système racinaire. Ceci est vrai en particulier pour des plantes comme les arbres fruitiers ou la vigne dont les racines explorent le terrain jusqu'à une grande profondeur et ont une aire d'expansion considérable.

- Le manque d'homogénéité des sols contribue aussi à compliquer l'interprétation des résultats. Quand on analyse une terre, on élimine d'abord les particules grossières ($> 2 \text{ mm}$). On affecte bien entendu les valeurs analytiques d'un facteur de correction tenant compte de la quantité de particules retirées. Mais cette correction reste très arbitraire du fait qu'on ne peut étudier que quelques points isolés et non le champ ou le terrain dans son ensemble.

Il ne faut pas oublier non plus que la teneur de la solution du sol en éléments immédiatement assimilables subit des variations saisonnières souvent importantes sous l'influence de la température, de l'humidité, des opérations culturales, des fluctuations de l'activité microbologique, etc, et qu'une ou deux analyses par an ne permettent pas de se rendre compte de ce qui peut être à la disposition des plantes. On ne tient souvent pas suffisamment compte de ce fait (échantillons prélevés au printemps ou en automne sur terrains labourés ou en friche). LUNDEGARDH a étudié cette question d'une manière systématique. Il a choisi 3 sols différents (jachère et prairie). Pendant plusieurs mois, des échantillons de terre y ont été

prelevés tous les 15 jours. On y a dosé le phosphore (extraction lactique) et le potassium (extraction par l'acide monochloracétique). Suivant les sols, et pour un ensemble de 14 analyses successives, les déviations standard (σ) sont de $\pm 16.7 \%$ à $\pm 24.2 \%$ pour le phosphore et de $\pm 13 \%$ à $\pm 40.7 \%$ pour le potassium.

- Enfin, non seulement tous les agents d'extraction n'agissent pas d'une façon similaire, mais de petites variations dans les conditions d'extraction (température, temps d'agitation, etc) peuvent aussi avoir une influence sur les résultats.

b) Limites de la méthode.

Même si on admet que les dosages chimiques donnent une estimation valable du contenu d'un sol en éléments biologiquement utilisables, cette notion n'est valable qu'en un instant donné. Les éléments sont continuellement libérés par des processus chimiques et microbiologiques. C'est cette vitesse de libération qu'il conviendrait de mesurer. Or, bien loin de dépendre uniquement de la quantité totale d'éléments présents dans le sol, elle est la résultante d'un grand nombre de facteurs complexes.

La représentation qu'on peut avoir, à partir des résultats de l'analyse chimique, de la capacité d'un sol à céder un ou plusieurs éléments est souvent incomplète ou même erronée. LUNDEGARDH cite l'exemple de terrains paraissant à l'analyse chimique pauvres en phosphore, mais sur lesquels l'analyse foliaire ne révèle pas de carences en Phosphore et qui ne réagissent pas à la fumure phosphorique.

Il ne faut évidemment pas confondre l'expression brute des résultats de l'analyse du sol et leur interprétation, qui doit tenir compte des conditions du milieu et des caractères du profil pédologique. Mais cette interprétation est très délicate, et est loin de pouvoir toujours mener à des conclusions valables du point de vue qui nous occupe. L'hypothèse suivant laquelle il existerait une relation simple, directe entre la concentration en ions assimilables du sol et leur absorption par les plantes n'est pas plus entièrement justifiée que celle qui suppose certains réactifs chimiques capables d'imiter parfaitement les racines dans leurs possibilités d'extraction. Dans les relations entre le sol et la plante il faut tenir compte :

- de la nature du végétal ; chaque espèce, et même chaque variété a sa façon propre de se comporter du point de vue qualitatif (équilibre interne entre les éléments) comme du point de vue quantitatif (exigences) ;
- des antagonismes et des interférences entre les ions ;
- des conditions du milieu : le pH du sol et son pouvoir tampon, qui ont une importance primordiale ; les matières organiques qui ont une action sur les conditions physico-chimiques ; la prolifération microbienne, etc ... ;
- du développement du système racinaire.

Les carences primaires sont rares. Il s'agit presque toujours de carences conditionnées.

3) Teneur en éléments minéraux dans le sol et dans la plante.

LUNDEGARDH, sur la base de données analytiques très étendues (600 échantillons provenant de différentes régions de Suède), a calculé les corrélations entre le contenu en potassium, sodium, phosphore, magnésium, calcium et manganèse assimilables pour le sol et pour les plants d'avoine qui s'y sont développés. C'est pour le potassium, le sodium, le calcium et la magnésium que les corrélations sont les meilleures, la nature de l'agent d'extraction ayant dans ces cas là une influence moins grande sur les résultats. Pour le potassium, la corrélation est simple et presque linéaire entre les valeurs trouvées pour le sol et pour la plante. D'autres auteurs ont confirmé ces résultats. Ce qui ne veut malheureusement pas dire que la méthode d'analyse chimique du sol soit simple à employer dans la pratique dans le but qui nous intéresse, même dans un cas comme celui cité ici pour le potassium. LUNDEGARDH insiste sur le fait que sa courbe est tracée d'après les valeurs moyennes d'un grand nombre de résultats. La dispersion des résultats individuels autour de ces moyennes est considérable. Il faut donc s'attendre à une faible probabilité de l'exactitude de la réponse quand on cherche à estimer dans des cas individuels la corrélation entre le contenu du sol et celui de la plante, surtout pour un élément isolé. Ce qui n'a rien d'étonnant si on se rappelle tous les faits cités ci-dessus et qui entrent en ligne de compte.

4) Analyse chimique du sol, analyse chimique de la plante et rendement

L'expérimentation agronomique, qui a pour but le choix d'une fumure minérale, est toujours pratiquement sanctionnée par l'évolution du rendement de la plante. Acceptant ce critère du rendement dans la recherche de l'équilibre minéral et étudiant les techniques susceptibles d'appuyer utilement l'expérimentation, des physiologistes ont comparé les résultats fournis par l'analyse chimique du sol avec ceux fournis par l'analyse de la plante, en relation avec le rendement et la réponse aux apports d'engrais.

LUNDEGARDH (1941-42), en collaboration avec BURSTRÖM, a fait dans ce but des essais systématiques. Les résultats (exposés en détails dans "Leaf Analysis", p. 156-162) peuvent se résumer schématiquement comme suit (un diagnostic étant considéré comme correct quand il rend compte de l'augmentation ou de la diminution de rendement) : pour des céréales, l'analyse foliaire pour les 3 éléments N, P et K, a donné 104 diagnostics corrects, 59 douteux et 9 faux, et l'analyse du sol pour les 2 éléments P et K, 44 diagnostics corrects, 40 douteux et 26 faux ; pour des plantes de prairies, analyse foliaire pour N, P et K : 90 diagnostics corrects, 57 douteux, 4 faux et analyse du sol pour P et K, 56 diagnostics corrects, 27 douteux et 9 faux. Les analyses de sol indiquent une

déficience plus ou moins marquée pour le phosphore dans 84 % des sols étudiés. Pour les céréales, qui ne donnent que dans 27 % des cas une réponse positive à la fumure phosphorique, l'accord entre analyse du sol et réponse à l'apport d'engrais est mauvais. Avec les plantes de prairie qui donnent une augmentation de récolte nette dans 47 % des cas et douteuse dans 28 % des cas pour le phosphore, l'accord est meilleur. Il en est à peu près de même pour le potassium.

LUNDEGARDH en arrive à la conclusion que l'analyse foliaire est un meilleur instrument que l'analyse du sol pour ces recherches. REUTHER et SMITH (1954) ont repris ces travaux sur arbres fruitiers et aboutissent au même point, ainsi que d'autres auteurs. Il faut prendre garde, dans ce genre de comparaison, aux méthodes d'extraction employées. PREVOT et OLLAGNIER (1956) ont fait des comparaisons de cet ordre sur l'arachide en utilisant 4 méthodes d'extraction différentes pour le phosphore "assimilable" (eau, acide citrique, réactif Barbier-Morgan, acide nitrique à chaud) qui leur ont donné des résultats très différents. Ils concluent ainsi : "Aucun rapport n'a pu être établi entre les données du diagnostic foliaire et ceux de l'analyse du sol pour la potasse totale ou échangeable. Dans ce cas, seul le diagnostic foliaire permet l'interprétation des résultats agronomiques.

Par contre, une assez bonne corrélation a été trouvée entre les résultats du diagnostic foliaire et ceux des analyses de sol en ce qui concerne le P_2O_5 soluble à l'acide citrique et le P_2O_5 total.

L'interprétation de l'action des fumures phosphorées est cependant plus précise par le diagnostic foliaire que par l'analyse du P_2O_5 du sol. De plus, le diagnostic foliaire permet d'étudier les importantes relations entre nutrition phosphorée et azotée ; le degré de déficience en phosphore est déterminé à la fois par les teneurs en phosphore et en azote de la feuille.

Nous confirmerons donc les conclusions de plusieurs auteurs : le diagnostic foliaire rend mieux compte que l'analyse chimique du sol des besoins de la plante en éléments minéraux ; il constitue un guide plus sûr et plus complet dans l'étude du problème des fumures minérales".

Ils donnent de cette supériorité de l'analyse de la plante certaines des explications que nous avons déjà passées en revue ci-dessus et ajoutent : "Cependant, la relation établie pour les terres cultivées en arachide au Sénégal, entre nutrition phosphorée et analyse du P_2O_5 total du sol montre l'intérêt des analyses chimiques de sol qui apportent une confirmation supplémentaire aux résultats des expériences agronomiques et du diagnostic foliaire".

5) Utilisation des analyses chimiques du sol dans l'étude des besoins minéraux des plantes.

C'est dans l'ensemble la conclusion à laquelle aboutissent tous les physiologistes et tous les agronomes qui ont étudié et comparé ces méthodes : l'analyse chimique du sol ne peut rivaliser avec l'analyse de la plante dans les études de nutrition minérale ; employée seule, elle ne pourrait servir qu'à déceler les cas de déficiences ou de toxicités extrêmement marquées ; mais employée conjointement avec d'autres méthodes, elle peut apporter d'utiles compléments d'information et permettre des recoupements.

Ainsi, par exemple, la valeur du rapport Teneur du sol/Teneur de la feuille pour un élément donné sera susceptible de donner des indications sur l'origine ou la nature d'un déséquilibre minéral et les moyens d'y remédier.

Il n'est bien entendu pas question ici des utilisations des analyses chimiques du sol pour la prospection pédologique (vocation des sols) ou certains points de pratique agronomique (détermination de la forme sous laquelle les engrais doivent être apportés, reconstitution du stock d'humus, correction de l'acidité, choix des variétés et des porte-greffes en fonction de l'indice chlorosant, etc, etc..).

Par ailleurs il ne faut pas oublier la grande importance pour la vie des plantes des données apportées par l'analyse physique du sol (mesure de la porosité, de la rétention d'eau, de l'état structural, etc, etc ...).

o

o o

B - ANALYSE BIOLOGIQUE DU SOL -

Les approximations trop grandes des méthodes utilisant pour l'analyse des sols des réactifs d'extraction chimiques ont amené les chercheurs à essayer des moyens d'extraction biologiques. A cette idée peuvent se rattacher plusieurs méthodes, assez différentes les unes des autres, et dont on peut se demander si certaines ont leur place dans ce chapitre plutôt que dans le suivant. Il faut remarquer cependant que les méthodes d'étude des besoins minéraux qui font appel directement à l'analyse chimique de la plante fondent d'une manière générale leurs estimations sur la concentration des éléments dans les tissus de la plante ; dans beaucoup de cas, les plantes fournissant le matériel d'analyse ne sont pas cultivées spécialement dans ce but, mais ne sont qu'une partie d'une culture normale. Dans les techniques d'investigation dont il sera question ici, on s'attachera presque toujours à la quantité totale d'éléments exportés ou au rendement pondéral ; il s'agira toujours de cultures spécialement entreprises, dans des conditions particulières, pour tester un sol donné.

1) Méthode de NEUBAUER. Autres méthodes utilisant des plantules.

a) Principe.

On fait croître des plantules sur une quantité limitée du sol à étudier dans des conditions déterminées. On considère, au bout d'un temps donné, que les éléments minéraux du sol (ceux que l'on étudie tout au moins) ont été épuisés. On détermine la quantité de ces éléments présente dans les plantules. On en déduit les quantités trouvées dans des plantules témoins ayant poussé sur du sable pur. On admet que le résultat représente les quantités de ces éléments présentes sous forme "assimilable" pour la plante dans le poids de sol utilisé.

b) Méthode de Neubauer proprement dite.

Cette méthode, qui présente certaines ressemblances avec celle proposée par Wilfarth dès 1897, a été décrite par Neubauer pour la première fois en 1923. Elle a fait l'objet depuis de nombreuses publications et on a proposé certaines modifications. Elle a été discutée en détail par Stewart (1932) et Behrens (1935). Très répandue en Allemagne et dans certains pays d'Europe, elle a été employée aussi aux U.S.A., mais jamais d'une manière généralisée.

A l'origine, la méthode a été mise au point par Neubauer pour le phosphore et le potassium. Il a montré que, dans des conditions bien déterminées, des plantules de seigle absorbent des quantités de phosphore et de potassium qui sont fonction du sol utilisé et qu'avec une technique standardisée, on arrive à obtenir des valeurs constantes pour un sol donné.

La technique classique est la suivante :

Mise en place des essais. On utilise, comme vases de culture, des cristallisoirs ayant environ 11 à 12 cm de diamètre et 7 cm de hauteur.

On met, au fond du cristallisoir, 100 g. du sol à étudier (pesé après dessiccation à l'air), mélangé à 50 g. de sable quartzeux assez grossier. Cette addition de sable a pour but de permettre un meilleur épuisement du sol par les racines. On humecte avec 20 cc. d'eau distillée. Dans le cas d'addition de sels en solution, on tient compte de l'eau ainsi ajoutée.

On couvre avec 100 g. de sable, humectés de 20 cc. d'eau distillée. Ce qui permet au système racinaire de se localiser de manière à assurer une exploration totale du sol à étudier. On sème 100 grains de seigle dans chaque cristallisoir, en se servant d'un carton perforé de 100 trous équidistants, qui permet de préparer à l'avance les loges pour les graines au moyen d'un agitateur bague de caoutchouc (de manière à ce que tous les trous aient la même profondeur).

On introduit les graines dans les trous avec une pince, pôle germinatif vers le bas.

On termine en recouvrant le tout de 80 g. de sable, humecté de 20 cc. d'eau distillée.

On place au centre du cristallisoir un petit tube pour l'arrosage. On pèse le cristallisoir.

Surveillance des cultures. On maintient constant le poids initial en rajoutant tous les jours de l'eau distillée. Il peut être intéressant de suivre et de noter l'importance du développement racinaire dans chaque cristallisoir et l'aspect de la végétation.

En principe les cultures doivent être maintenues à une température constante de 20°.

Récolte. Au bout de 18 à 21 jours, on dépose l'ensemble. On élimine la terre sous jet d'eau. On élimine l'eau ordinaire par l'eau distillée. On fait sécher 24 heures à l'étuve et on traite la matière sèche suivant les techniques habituelles, après avoir pris note du poids de la récolte.

Des travaux ultérieurs ont montré que la méthode restait valable quand on modifiait certains détails opératoires. Ils ont montré aussi l'importance du rapport sol/semences (100 graines pour 100 g. de terre) qui doit être aussi rigoureusement respecté que le rapport sol/solvant pour l'analyse chimique. Aucune modification du nombre des graines et du poids de terre n'est permise quand la technique est utilisée pour déterminer les éléments assimilables dans le sol (Par contre, des expériences où ce rapport se trouve modifié peuvent dans d'autres cas donner des informations intéressantes). Ceci souligne l'empirisme de la méthode.

Le principal facteur, qui intervient dans le choix de la plante servant aux essais, est l'uniformité ou le manque d'uniformité de la semence. On s'adresse de préférence au seigle dont on peut obtenir assez facilement des lots où les variations d'un individu à l'autre sont réduites au minimum. Mais d'excellents résultats ont aussi été obtenus avec d'autres semences se développant bien dans les conditions de l'essai (des céréales surtout). Il est bien évident cependant qu'on n'obtient pas les mêmes valeurs avec des plantes différentes. Le prélèvement peut être plus fort ou plus faible que celui du seigle. Mais il semblerait que les résultats obtenus sur un grand nombre de sols avec des plantes différentes soient à peu près comparables.

BOISCHOT et Melle LAJON ont attiré l'attention sur un autre point intéressant l'interprétation des résultats de la méthode. Les composés phosphorés des graines - hydrolysés au moment de la germination - libèrent du phosphore dont une partie diffuse dans le milieu et est elle-même partiellement fixée par la terre. Les auteurs concluent que : "En conséquence, la méthode de NEUBAUER mesure non seulement la richesse du sol en P_2O_5 assimilable, mais indirectement le pouvoir de rétention du sol vis à vis de cet élément, du fait qu'il modifie le moment où la plante commence à utiliser le P_2O_5 du sol". Elle utilise d'abord celui des réserves de la graine "Ceci peut dans certains cas, fausser les résultats, si l'on compare entre elles différentes terres ayant la même quantité de P_2O_5 assimilable, mais des pouvoirs de rétention différents".

Tout ceci montre bien que la méthode est empirique. Aussi bien STEWART que WALLACE la considèrent comme tout à fait comparable aux méthodes d'analyse du sol utilisant des réactifs de nature chimique pour l'extraction des éléments "assimilables". Elle nécessite d'autre part des manipulations longues et délicates et de surcroît ne donne pas de résultats cohérents avec certaines catégories de sol (sols à pouvoir de rétention élevé).

c) Méthodes dérivées de la méthode de NEUBAUER.
Cultures successives.

Nous avons vu que d'autres plantes que le seigle pouvaient être utilisés dans des variantes de la méthode de NEUBAUER (plantules d'avoine, etc). On a même utilisé des plantules d'arbres pour les sols forestiers. La méthode de SÜCHTING, avec des plantules d'arbres, s'écarte de celle de NEUBAUER en ce sens que les plantules sont cultivées pendant toute la durée d'une saison et qu'on tient compte non seulement de la quantité totale d'éléments absorbés, mais aussi de la teneur des organes en ces éléments, exprimée en pourcentage de la matière sèche.

D'autres auteurs encore ont cherché des indications plus complètes, en opérant dans des conditions voisines de celles de NEUBAUER, mais en faisant sur chaque échantillon de terre, non pas une culture, mais plusieurs cultures successives. On peut espérer ainsi se faire une meilleure idée des possibilités et des réserves du sol étudié, des quantités d'éléments susceptibles de devenir échangeables, et ceci dans un délai de temps aussi réduit que possible et en opérant sur de petites quantités de terre, ce qui permet de travailler en grande série. GARAUDEAUX, BARRY et QUIDET, étudiant la dynamique de la potasse des sols, proposent la technique suivante (d'autres chercheurs travaillent, suivant le même principe des cultures successives, mais sur des quantités de terre beaucoup plus importantes, dans des conditions qui sont alors celles des cultures en vase de végétation) :

- Choix du ray-grass d'Italie en raison de sa rapidité de végétation et des facilités qu'il offre pour les opérations de réensemencement.
- 50 g. du sol à étudier sont soigneusement mélangés avec 50 g. sable quartzueux pur lavé (diam. de grain = 0.5-1 mm.)
- Placer le mélange en couche uniforme au fond d'un cristalliseur (vol. = 750 cc. et diam. = 120 mm), autour d'un petit tube central d'arrosage en verre.
- Sur ce mélange, répartir aussi uniformément que possible 2 g. de graines de ray-grass d'Italie (inutile de compter et de désinfecter).
- Recouvrir avec 100 g. du même sable que ci-dessus, mais de diamètre de grain 1 à 1.5 mm.
- Humidifier avec 25 cc. d'eau distillée, par le tube central. Peser.
- Recouvrir avec un couvercle de verre jusqu'à la levée.
- Puis peser tous les jours ou tous les deux jours (suivant l'intensité de la transpiration) et rétablir le poids primitif avec de l'eau distillée.
- Récolter 14 jours après le semis. On recueille le gros sable de surface qui se sépare très facilement. On coupe les tiges. Puis on réensemence comme précédemment.
- Faire 2 ou 3 récoltes successives.
- Faire un témoin sur sable pur pour connaître les réserves minérales des graines.

Il est commode de disposer d'une petite serre où on peut maintenir une température de 25° et un état hygrométrique voisin de 75 % (l'évaporation étant réduite, les arrosages peuvent ainsi être espacés).

Après la dernière récolte, on laisse sécher légèrement le contenu des cristalliseurs à la température ambiante. Il est ensuite facile de séparer par tamisage, la terre et le sable d'une part, les graines et les radicelles d'autre part. GARAUDEAUX et ses collaborateurs cherchaient

par exemple à préciser l'influence du niveau d'échange potassique sur l'absorption de potasse des sols par les plantules de ray-grass, ainsi que l'importance et l'intensité des phénomènes de régénération dans les sols, sous l'action de ces cultures. Ils ont déterminé :

- K₂O échangeable des mélanges sol-sable avant culture = (A)
- K₂O prélevé par les récoltes successives de ray grass = (B)
- K₂O échangeable des mélanges sol-sable après culture = (C)

ce qui leur permettait de calculer K₂O échangeable régénéré

$$(\text{= } [B+C] - A)$$

Bien que nous n'envisagions ici les différentes techniques que sous leur aspect général, il est intéressant de noter la conclusion apportée par GARANDEAUX à ses travaux, dans le cas de la potasse :

"Une corrélation existe entre les prélèvements de potasse par plantules et les niveaux de potasse échangeable déterminés avant culture. Cette corrélation paraît justifier les conclusions de nombreux auteurs, estimant que la méthode de NEUBAUER ne donne pas plus de renseignements sur la richesse d'un sol en potasse que la seule détermination des potasses assimilables et échangeables. Il convient même de noter que cette corrélation est parfaite lorsque l'on considère pour un même sol, différents niveaux d'échange.

Toutefois, les bilans de potasse montrent que les phénomènes d'absorption de potasse sont plus complexes que ne le laisse supposer l'existence de cette corrélation ; ces bilans montrent, en effet, que pour certains sols, il y a eu, dans les conditions de culture décrites, des régénérations parfois importantes et qui dans leur ensemble ne sont pas en corrélation étroite avec les niveaux d'échange initiaux".

2) Méthode de MITSCHERLICH.

La méthode est une application de la loi de "décroissance des excédents de rendement" que DEMOLON expose ainsi :

"Si on étudie la variation du rendement en fonction des quantités croissantes d'un facteur isolé x, on obtient, en général, une courbe ... montrant que le rendement n'est pas proportionnel à la quantité apportée.

A des accroissements égaux de x correspondent des excédents y_1, y_2, y_3 , de plus en plus faibles au fur et à mesure que la récolte est plus proche de son maximum. C'est ce qu'on a parfois appelé la loi des excédents moins que proportionnels. Elle traduit ce fait qu'un facteur de croissance exerce une influence d'autant plus marquée sur le rendement que la plante en a moins à sa disposition. Autrement dit, le coefficient d'utilisation d'un engrais, c'est à dire le rapport de l'excédent de

récolte à la quantité apportée, va en décroissant quand les doses appliquées augmentent".

Cette loi peut s'exprimer sous une forme mathématique qui, dans le cas d'un sol renfermant déjà une certaine quantité de l'élément considéré, est la suivante :

A = Rendement maximum susceptible d'être atteint quand on fait croître le facteur x considéré.

b = Quantité de l'élément considéré présente dans la terre.

x = " " " ajoutée à la terre.

y₀ = Rendement obtenu en présence de b seul.

y = " pour une valeur donnée de x.

C = Coefficient d'efficacité spécifique du facteur étudié ; d'après MITSCHERLICH, c serait constant, donc indépendant de la plante et du niveau des autres facteurs de croissance ; les valeurs de c ont été déterminées expérimentalement.

Pour x = 0, on a : $\text{Log } (A - y_0) = \text{Log } A - cb$

Pour une valeur donnée de x : $\text{Log } (A - y) = \text{Log } A - c(x + b)$

La formule peut s'appliquer au cas où plusieurs facteurs x₁ , x₂ , x₃ varient.

Pour faire les essais de sols, on cultive une plante-test, jusqu'à maturité, dans des vases de végétation, où une quantité déterminée de sol est mélangée à du sable en proportion définie pour mieux en assurer l'exploitation par les racines (1 part sol/2 parts sable, en volume). Une étude complète suivant MITSCHERLICH comporte 20 vases (c'est à dire 4 répétitions de 5 essais : un témoin sol seul et 4 essais sol + NPK, NP, NK, PK). Si on considère la récolte du traitement NPK comme le maximum possible, l'expérience permet théoriquement de résoudre deux questions, en prenant comme critère d'appréciation le rendement pondéral:

- 1) Détermination quantitative des réserves du sol
- 2) Accroissement de rendement à attendre d'un apport déterminé d'un élément.

La méthode a été largement utilisée, surtout en Allemagne, où des dizaines de milliers d'expériences ont été poursuivies au cours de longues années sur une douzaine de plantes cultivées dans des conditions diverses et ont permis la vérification de la validité de la formule (qui a d'ailleurs aussi été appliquée à des essais en champ). Mais il faut bien souligner que cette formule n'a pas la signification d'une loi physique. Il s'agit comme le dit DEMOLON, "d'une formule empirique susceptible d'être avantageusement utilisée dans l'expérimentation agronomique, c'est à dire entre les limites déterminées".

De nombreuses et graves critiques ont été formulées à l'égard de cette méthode :

- Comme on pouvait s'y attendre, le coefficient c varie considérablement d'une expérience à une autre en fonction des autres facteurs, et aussi, d'une plante à une autre, contrairement à ce que pensait MITSCHERLICH. (Voir en particulier l'étude de Madame LABOREY sur les variations du coefficient d'action du Mg dans le cas d'*Aspergillus Noger* en fonction des variations des autres constituants du milieu.
- Il faut se rappeler que A ne représente pas un maximum absolu, mais seulement le rendement limite vers lequel tend la courbe quand on fait varier un facteur de croissance donné dans des conditions déterminées. Il dépend des autres facteurs. Pour qu'il prenne sa valeur maxima, il faut que ceux-ci soient tous en même temps à leur optimum.
- Toutes les méthodes de culture en pots pour des essais de sol sont handicapées par le fait que le volume de sol accessible aux racines est généralement beaucoup plus petit que sur le terrain et que la structure du sol également est différente dans les vases. Les plantes ne répondent pas toujours en vase de la même manière que sur le terrain.
- Les résultats diffèrent d'une plante à une autre.

Il n'en reste pas moins que la formule de MITSCHERLICH dans de nombreux cas et aussi pour d'autres facteurs de croissance (lumière, teneur en eau du sol, etc), s'accorde bien avec les faits d'observation. Si son application conduit elle aussi à une méthode empirique d'appréciation de la valeur d'un sol, elle n'en reste pas moins utile dans la pratique pour la détermination de la fumure. Elle est utilisée seulement pour l'azote, le phosphore et le potassium. Pour plus de détails, en langue française, voir Demolon, T. II, p. 403-15 et 446-9.

La méthode a été reprise, modifiée, appliquée par d'autres auteurs avec quelques variantes.

M.A. BALBA et H. BRAY (1956) ont utilisé la formule, non plus pour établir la relation entre le rendement et la quantité d'éléments disponibles, mais pour établir celle entre la teneur du sol en éléments nutritifs et la composition de la plante. Ainsi, dans des expériences comportant des apports croissants de phosphore, la teneur y en phosphore dans la plante et les quantités b et x de phosphore apportées par le sol et par l'engrais ont vérifié la formule. Connaissant b et x , on peut prévoir la composition de la plante, ou, connaissant y et x , déterminer la teneur en phosphore, du sol.

LAVOLLAY (1936) avait déjà montré que la relation existant entre la concentration d'un cation dans la matière vivante et la concentration dans le milieu nutritif pouvait s'exprimer sous une forme mathématique.

Quand la concentration dans le milieu correspond à des conditions physiologiques voisines de la normale, la fixation du cation peut être représentée par une fonction de la forme :

$$y = K x^{\frac{1}{p}}$$

où y = quantité fixée pour 100 g. de substance vivante

x = concentration du milieu nutritif

K = Cte

$\frac{1}{p}$ = Cte < 1

3) Méthodes utilisant des microorganismes.

D'autres méthodes biologiques d'analyse du sol utilisent des microorganismes comme extracteurs des éléments "assimilables" du sol à étudier.

Ces méthodes tirent leur origine des travaux de WINOGRADSKY sur les cultures d'*Azotobacter* sur plaque de sol et des essais de BUTKEWITSCH pour transposer en laboratoire la technique de MITSCHERLICH. Ici aussi les conclusions sont donc fondées avant tout sur l'estimation du taux de croissance et le rendement pondéral.

On estime que les besoins en éléments minéraux de certains microorganismes sont les mêmes en nature - sinon en quantité - que ceux des plantes cultivées et que leurs possibilités d'extraire les éléments du sol sont comparables. Si ces vues sont correctes, ces organismes peuvent servir à tester l'assimilabilité des éléments minéraux pour les plantes supérieures.

Pour faire un essai, on ajoute à un poids connu de terre séchée à l'air un milieu nutritif synthétique qui contient tous les éléments nécessaires à la croissance du microorganisme, à l'exception toutefois de l'élément à tester. Onensemence le milieu ainsi préparé. La culture est maintenue à une température déterminée pendant un temps donné (là aussi bien entendu toutes les conditions de l'expérience doivent être standardisées). A la fin de l'expérience, on récolte la culture et on détermine son poids de matière sèche. On compare avec un témoin cultivé dans les mêmes conditions sur un milieu nutritif complet, assurant un développement optimum. L'importance de la sporulation et la couleur (pour le cuivre notamment) donnent aussi des indications utiles. Les résultats permettent de dire si l'élément testé est présent en faible, moyenne ou grande quantité.

Les chercheurs ont utilisé surtout des champignons (*Azotobacter*, *Aspergillus Niger*, etc.), mais parfois aussi des algues.

L'*Aspergillus Niger* donne des résultats comparables à ceux des analyses chimiques pour le magnésium, le phosphore et le potassium. Mais les conditions de manipulation le rendent surtout intéressant pour les recherches sur les oligoéléments, à l'exception du fer (les travaux de NICHOLAS ont montré qu'il pouvait atteindre sa croissance maxima sur des sols où les plantes cultivées souffraient de déficiences sérieuses) et peut être du bore (on n'a pas encore pu montrer que le bore était indispensable à l'*Aspergillus*). Travaux de MEHLICH, de MULLER, de NICHOLAS et FIELDING, etc, etc

En plus de l'intérêt particulier qu'elles présentent dans le cas des oligoéléments, on a souligné que ces méthodes donnent des résultats en 7 à 8 jours, plus rapidement donc que les autres méthodes d'analyse biologique des sols.

Il ne faut pas oublier cependant que des phénomènes d'interaction peuvent fausser les résultats. D'un sol à l'autre, ou du milieu témoin au sol, il n'y a pas que l'élément à doser qui varie.

4) Analyse de plantes supérieures particulièrement sensibles.

Certaines plantes ont des besoins particuliers ou une sensibilité particulière à l'égard de certains éléments. Quand on les trouve ou qu'il est possible de les cultiver sur des sols dont on desire évaluer les teneurs en ces éléments, l'analyse de ces plantes peut donner des résultats intéressants. Ainsi l'avoine, le trèfle, la vigne, les poiriers et les pommiers pour le cuivre ; les feuilles de noyer blanc pour le bore ; etc, (Voir aussi ce qui est dit des "plantes indicatrices" au chapitre des "Symptômes visibles de carence").

5) Analyse de la sève brute.

Certains chercheurs ont tenté de montrer qu'il existe un rapport assez direct entre la composition du sol et celle de la sève brute. Mais celle-ci subit des variations d'origine climatique très importantes.

*

* *

Dans l'ensemble, les essais comparatifs n'ont pas montré une supériorité marquée des méthodes biologiques d'analyse des sols par rapport aux meilleures méthodes chimiques. Du point de vue qui nous occupe, certains inconvénients sont communs à toutes les méthodes d'analyse du sol, quelles qu'elles soient. Elles sont toutes plus ou moins empiriques et on ne peut pas reproduire les conditions dans lesquelles la plante absorbe les éléments minéraux dans la nature.

- BIBLIOGRAPHIE -

- M.A. BALBA - H. BRAY - The application of the Mitscherlich equation for the calculation of plant composition due to fertilizer increments - Soil Sc. Soc. Amer. Proc. 20, 4, p. 515-18 - Octobre 1956.
- W.U. BEHRENS - Die Methoden zur Bestimmung des Kali-und Phosphorsäurebedarfs landwirtschaftlich genutzter Böden - Verlag Chemie, Berlin, 1935.
- W.U. BEHRENS - Die Fortschritte in der Bestimmung des Kali-und Phosphorsäurebedarfs der Böden - Forschungsdienst, 4 p. 463-477, 1937.
- R. BITTEL - Etude sur la solubilisation des éléments utiles aux végétaux en vue de l'appréciation de la fertilité minérale des sols - Thèse, 1957.
- P. BOISCHOT - J. LAJON - Diffusion du P_2O_5 des graines en germination. Action sur la méthode de Neubauer - Ann. Agro. Série A, 7è Année, N° 6, p. 922-25 - 1956.
- D. COLLIER - Principes de détermination de la fumure par analyse chimique du sol - Bull. Tech. Inf. Ing. Serv. Agric. - N° 81, p. 475-81 - 1953.
- L. CRONENBERGER - Relation entre la teneur en calcium et en phosphates minéraux du sol et de la sève brute et élaborée du Merisier (Prunus Avium) - Bull. Soc. Chim. Bio. T. XXXVII - N° 5-6, p. 655-9 - 1955.
- J. DELMAS - Sol et fertilisation : l'analyse et l'expérimentation - Agriculture 18, N° 167 - p. 107-8 - 1955.
- A. DEMOLON - Principes d'agronomie - T. II - La croissance des végétaux cultivés - 5è édition - Dunod, Paris 1956.
- J. GARAUDBAUX - L. BARRY - P. QUIDLET - Etude sur la dynamique de la potasse des sols par micro-cultures successives de ray-grass d'Italie - VIè Cong. Int. Scien. Sol - Vol. D - p. 131-7 - Paris 1956.
- L.J. GUTSCHY - Uber eine neue Methode zur quantitativen Bestimmung der Pflanzenaufnahme von Nährstoffen im Boden - Soil and Plant, J. Yugoslav. Soc. Soil. Sci, Belgrade, IV, 1-3, p. 158-61 - 1955.

- F. LABOREY - Etudes expérimentales sur les courbes de poids d'*Aspergillus Niger* en fonction de la composition du milieu nutritif. Etude particulière du coefficient d'action du Magnesium - Thèse, Paris 1942.
- R.P. LARSEN, A.L. KENWORTHY; H.K. BELL, S.T. BASS, E.J. BANNING - Nutritional conditions of Concord vineyards in Michigan :
 - I - Nutrient Element content of petioles in relation to production -
 - II - Soil analysis in relation to production -
 - III - Petiole analysis and production in relation to applications of K fertilizers -Michigan State Univ. Agric. Expt. Sta. Quart. Bull., 39 (1), p. 63-70, 71-77, 78-87 - 1956.
- J. LAVOLLAY - Le Magnésium (Etudes sur son intervention dans quelques phénomènes biochimiques et sur les principes de son rôle agronomique) - Ed. Hermann, Paris 1936.
- J. LAVOLLAY - Nutrition Minérale - Cours de Physiologie végétale du 3^è Cycle - Sorbonne 1957.
- H. LUNDEGARDH (tr. R.D. MITCHELL) - Leaf Analysis - Hilger et Walls Ltd, Londres 1951.
- P. MANIL, J.P. CULOT, L.B. BROUWERS - Contribution à l'analyse du sol par voie microbiologique - Bull. Inst. Agron. Sta. Rech. Gembloux, t. 24, N° 2, p. 142 - 1956.
- M.F. MORGAN - The universal soil testing system - Connecticut Agric. Exp. Stat. 392, p. 129, Mars 1937.
- E. NEUBAUER, W. SCHNEIDER - Die Nährstoffaufnahme der Keimpflanzen und ihre Anwendung auf die Bestimmung des Nährstoffgehalts der Böden - Zeits. für Pflanzenernährung und Düngung - A - 2 p. 329-362 - 1923.
- D.J.D. NICHOLAS - The use of fungi for determining trace metals in biological materials - The Analyst, Vol. 77, p. 629, Novembre 1952.
- M. OLLAGNIER, P. PREVOT - Comparaison du diagnostic foliaire et de l'analyse des sols pour la détermination des besoins en engrais de l'arachide - Oleagineux, 11, n° 6, p. 395-400, 1956.

- M.R. PACK, R.S. GOMEZ - Correlation between plant analysis and soil tests in New Mexico - Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20, N° 4, p. 529-31, 1956.
- P.F. PRAH, W.W. JONES, F.T. BINGHAM - Magnesium and potassium content of orange leaves in relation to exchangeable magnesium and potassium in the soil at various depths - Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 70, p. 245-51 - 1957.
- W. REUTHER, P.F. SMITH - Leaf analysis as a guide to the nutritional status of orchard trees - An. des plantes et prob. des engrais minéraux, I.R.H.O., p. 108-121, 1954.
- W. SAUERLANDT - E.S. MITSCHERLICH, - Ein forschersleben für die Landwirtschaft - Landw. Forschung, XI, Heft 2, p. 75-89, 1956.
- J.C. SHICKLUNA, J.F. DAVIS, K. LAWTON - Correlation of soil test, plant tissue tests and yield response of several crops grown on organic soils - Quarterly Bulletin, Vol. 40, N° 4, p. 884-95, 1958.
- R. STEWART - The Mitscherlich, Wiessmann and Neubauer methods of determining the nutrient content of soils. Tech. Commun. Bur. Soil. Sci., Harpenden, 25, p. 1-46; 1932.
- H. SUCHTING - Untersuchungen über die Ernährungsverhältnisse des Waldes IV - Prüfung ausgewählter Waldböden auf Nährstofflieferung durch Vegetationsversuche mit Lärche, Kiefer und Fichte sowie auf Nährstofflöslichkeit durch chemische Untersuchungsmethoden - Bodenk. Pfl. Ernähr. 13, p. 73-117, 1939.
VIII - Zur Methodik der Bestimmung der Nährstoffdynamik in Waldböden - Bodenk. Pfl. Ernähr. 28, p. 340-61, 1942.
- T. WALLACE - Methods of diagnosing the mineral status of plants - An. des plantes et prob. des engrais minéraux, p. 13-22, I.R.H.O., Paris 1956.

ANALYSE DE LA PLANTE

ANALYSE DE LA PLANTE

Dès 1804, de Saussure étudiait la composition minérale des plantes pour connaître leurs besoins qualitatifs et l'application de la "Loi de restitution" de Liebig (1852) exigeait elle aussi une analyse chimique permettant de connaître l'exportation totale.

Partant d'un point de vue différent, Weinhold (1862) semble avoir été le premier à avoir eu l'idée d'utiliser l'analyse de la plante pour apprécier la quantité d'éléments disponibles dans le sol.

A sa suite, de nombreux auteurs ont travaillé dans cette direction, analysant soit la plante entière, soit des organes isolés (souvent les racines), s'adressant soit aux plantes cultivées, soit aux plantes sauvages et aux mauvaises herbes, et essayant, avec plus ou moins de rigueur, un peu toutes les techniques possibles. Il n'est pas inutile de rappeler ces travaux anciens, car beaucoup de publications récentes donnent l'impression que les recherches de ce genre n'ont été abordées que depuis une cinquantaine d'années.

Actuellement beaucoup de chercheurs tendent à abandonner l'analyse des plantes en tant que méthode biologique d'analyse du sol (voir chapitre précédent), mais l'utilisent de plus en plus en se plaçant du point de vue de la plante elle-même. Tenant compte en effet des difficultés qu'il y a à se faire une idée des quantités d'éléments minéraux réellement assimilables présents dans le sol, tenant compte aussi des exigences très diverses des différentes espèces et de tous les autres facteurs qui entrent en jeu, il semble logique de s'adresser directement à la plante pour connaître ses réactions et ses besoins en matière de nutrition minérale, pour rechercher les causes des désordres nutritionnels et pour interpréter les résultats expérimentaux d'engrais. Pour l'interprétation des résultats, c'est en général à la composition de la plante qu'on s'adresse (concentration en éléments minéraux exprimée en pourcentage d'une unité choisie) et non pas aux quantités en valeur absolue d'éléments présents dans les organes récoltés (sauf cas particuliers et recherches fondamentales, où ces données gardent tout leur intérêt.

,

o o

BASES PHYSIOLOGIQUES DES METHODES D'ETUDE FONDEES SUR L'ANALYSE DE LA
PLANTE.

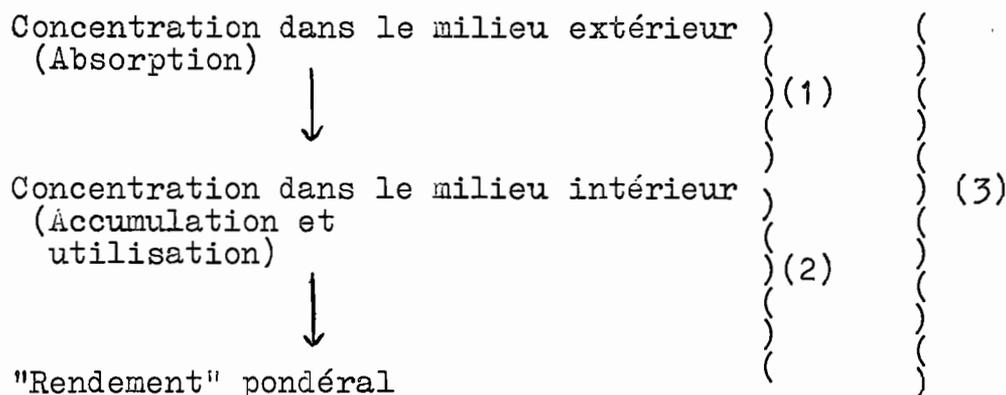
Toutes les observations accumulées montrent que la concentration en éléments minéraux à l'intérieur de la plante dépend de la concentration dans le milieu extérieur et exerce une action de contrôle sur la croissance et le rendement. Tous les physiologistes qui se sont occupés de ces questions ont cherché à préciser ces notions et les relations qui les lient. Les problèmes posés sont particulièrement délicats à débrouiller, tous les facteurs internes de la vie de la plante agissant les uns sur les autres et dépendant de l'ensemble des conditions externes. Les phénomènes qui concernent directement la nutrition minérale ne peuvent être isolés au sein de cet ensemble complexe et traduits par des relations simples que par un jeu d'hypothèses ou de conventions, correspondant plus ou moins à la réalité des conditions expérimentales, et dont il ne faut jamais perdre de vue la nature et la portée, sous peine d'enlever toute signification réelle à l'interprétation des faits.

LUNDEGARDH, cherchant à analyser les fondements scientifiques des méthodes d'analyse foliaire, a longuement étudié aussi bien les modalités de l'absorption des éléments minéraux par les racines, que le rôle qu'ils jouent dans la vie de la plante et particulièrement dans la croissance et le métabolisme des feuilles.

Avec la concentration en CO_2 , l'intensité lumineuse et la teneur du végétal en eau et en chlorophylle, la teneur en sels minéraux est un des facteurs qui déterminent le taux d'assimilation du CO_2 . Et l'action de ce dernier facteur est double. D'une part, les éléments minéraux ont une influence sur la croissance de la feuille, sa taille et sa structure anatomique, et par là sur l'importance de sa surface assimilatrice, l'azote étant l'élément dont le rôle est prépondérant à ce premier point de vue. D'autre part, les éléments minéraux ont une influence qualitative sur la composition chimique de la feuille (teneur en chlorophylle, etc) et par là sur l'intensité de l'assimilation par unité de surface foliaire. Dans l'élaboration des tissus, les deux effets se combinent naturellement et sont en rapport avec la concentration en sels minéraux de la sève. Il peut bien entendu y avoir un développement de surface appréciable sans que l'assimilation soit particulièrement intense (dans le cas, par ex., où, en présence de beaucoup d'azote et de peu de potassium, la "qualité" du protoplasme laisse à désirer), ou un développement de surface restreint avec un taux d'assimilation élevé.

LUNDEGARDH a souligné aussi l'interdépendance des différents organes. Ainsi, d'une part, la croissance des feuilles et la synthèse des protéines sont contrôlées par l'éclairement et l'absorption de NO_3^- par les racines, d'autre part, l'assimilation du CO_2 par les feuilles règle la croissance des racines, mais indirectement aussi l'absorption de NO_3^- (couplage avec la respiration). Ce qui met d'ailleurs finalement en relief l'importance du facteur lumière dans l'absorption.

Toutes ces considérations montrent bien l'importance des facteurs de nutrition minérale pour l'ensemble de la vie de la plante et la réalité physiologique d'un lien entre absorption des éléments minéraux, composition minérale de la plante et croissance. Si on cherche à exprimer avec plus de rigueur ces relations, on se trouve devant des possibilités qui peuvent être schématisées ainsi :



Il était assez difficile de choisir le dernier terme de la série, le terme destiné à traduire le niveau atteint par les activités de synthèse de la plante en fonction de la concentration des éléments minéraux dans le milieu intérieur. Le terme de croissance, souvent employé par les Anglo-Saxons, était trop équivoque, la croissance pouvant être appréciée suivant des critères très différents. Le terme de récolte risquait de prêter à confusion (confusion entre la plante entière et les organes "récoltés" dans la pratique agricole). Au sens propre, le terme de rendement ne convenait pas non plus, le rendement ne désignant pas la masse végétale produite, mais, par exemple, le rapport de cette masse à celle d'un élément fourni à la plante (Le rendement vrai peut diminuer quand on force l'apport d'un élément fertilisant, alors que la récolte continue encore à augmenter. La loi de Mitscherlich exprime le fait que le rendement vrai est constamment décroissant). Finalement, le terme de "rendement" a été choisi, mais pris dans son sens agronomique courant et représentant ici le poids atteint par la plante entière dans les conditions étudiées (ce qui n'est jamais qu'une des façons de mesurer la croissance).

Pour l'étude des besoins minéraux, une interprétation valable des résultats de l'analyse de la plante dépend de l'existence de corrélations positives entre ces données.

1) Relation entre la concentration en éléments minéraux dans le milieu extérieur et la concentration dans la plante.

Il faut d'abord noter que le premier terme de la relation ne peut être connu avec une certaine exactitude que dans le cas de milieux nutritifs artificiels. Si la plante considérée vit dans le sol, on ne pourra faire que des comparaisons fondées sur des données relatives (apports différents d'éléments au sol, interprétation d'analyse du sol, etc..).

Comme nous l'avons vu, l'absorption des éléments dépend de toute une série de facteurs qui intéressent l'ensemble du métabolisme. Les éléments minéraux fournis par le milieu représentent un de ces facteurs, mais pas le seul.

Et ce qui importe ce n'est pas seulement la richesse globale du milieu en éléments minéraux nécessaires, ou sa richesse en l'un ou en plusieurs d'entre eux pris isolément, mais leur assimilabilité, c'est à dire :
- la forme sous laquelle ils sont présents ;
- les rapports quantitatifs qui existent entre eux (antagonismes et interactions).

Finalement la concentration en éléments minéraux dans la plante dépendra :

- de l'absorption des éléments minéraux fournis par le milieu extérieur ;
- de l'utilisation des éléments absorbés, c'est à dire de la vitesse des synthèses et de la croissance ;

absorption et utilisation étant intimement liées et dépendant, à la fois, l'un de l'autre, et de tous les facteurs externes et internes autres que la teneur du milieu en éléments minéraux.

La relation entre concentration dans le milieu extérieur et concentration dans le milieu intérieur n'est donc pas simple, le premier terme n'étant que l'un des nombreux facteurs qui déterminent la valeur du second. Il n'en reste pas moins vrai que, toutes conditions étant égales par ailleurs, quand la teneur du milieu en un élément augmente, la teneur de la plante en cet élément augmente en général aussi, si rien ne vient gêner l'absorption (antagonismes). Dans certains cas particuliers, toutefois, la dilution entraînée par la croissance peut masquer ce phénomène (dans des cas où on apporte à des plantes un élément, l'azote, par exemple, pour lequel elles sont extrêmement déficientes, voir le cas des arachides de la région de Louga, cité par Prévot et Ollagnier, 1956).

Les chercheurs ont souvent raisonné sur le cas où tous les éléments sauf un sont fournis à la plante en quantités importantes ; la teneur pour l'élément au minimum augmentera alors avec l'apport externe. Et la relation pourra se traduire sous une forme mathématique. LAVOLLAY (1936) a montré que :

- a) Généralement, pour des concentrations faibles dans le milieu nutritif, à un léger accroissement de celle-ci correspond une augmentation plus considérable de la quantité fixée de l'élément considéré.

Si y = quantité fixée pour 100 g. de substance vivante
 x = concentration milieu nutritif.

on a, pour des valeurs de x très petites, $y = Kx$ et la courbe est linéaire.

- b) Lorsque x atteint des valeurs correspondant à des conditions physiologiques voisines de la normale, la quantité y fixée est toujours liée à la concentration x mais y ne croît plus aussi rapidement que x .

Il existe un intervalle, dans l'échelle des valeurs de x , à l'intérieur duquel on peut représenter la fonction par une équation de la forme :

$$y = Kx \frac{1}{p} \quad \text{ou} \quad K = \text{Cte} \quad \text{et} \quad \frac{1}{p} = \text{Cte} < 1$$

- c) Lorsque la concentration x dans le milieu nutritif augmente et atteint des valeurs pour lesquelles la toxicité apparaît, les phénomènes sont sans doute plus complexes, mais peuvent être représentés par une courbe d'allure hyperbolique.

Mais le cas considéré est particulièrement simple (variations d'un seul élément dans un milieu par ailleurs abondamment pourvu de tous les autres éléments nécessaires). Même dans un cas de ce genre et surtout s'il s'agit de plantes supérieures, il faut encore songer aux répercussions des variations de l'élément au minimum sur les concentrations des autres éléments. Là, la nature de l'élément au minimum n'est pas indifférente, du fait surtout du rôle différent des éléments dans le fonctionnement des méristèmes. Si c'est l'azote qui se trouve être au minimum, la croissance reste faible et il n'y a pas de formation de méristèmes secondaires ; l'absorption des autres éléments, comme le phosphore et le potassium, ne cessant pas, ceux-ci sont par conséquent présents dans les tissus à une concentration relativement élevée. En cas de déficience phosphorée, les choses se passent à peu près de la même manière. Par contre, une déficience en potassium n'arrête pas d'emblée la croissance et ainsi les concentrations en azote et en phosphore ne s'élèvent pas dans la même proportion.

Il faut en retenir que la concentration relative en éléments nutritifs dans les tissus ne mesure pas le niveau de l'apport d'un élément particulier, mais dépend de la fourniture totale en tous les éléments.

Pour chaque élément pris isolément, la relation n'est donc pas automatiquement et rigoureusement positive. Il en va de même pour la concentration globale.

On peut en donner d'autres exemples. L'action défavorable, par exemple, d'un facteur externe, tel que la température ou l'eau, peut réduire considérablement la croissance. Si le système racinaire n'est pas trop atrophié, la concentration interne tendra alors souvent à augmenter, sans que la concentration dans le milieu extérieur varie, comme dans le cas où le volume des tissus est réduit par une déficience minérale.

D'autre part, la concentration dans les tissus, pour une même concentration dans le milieu externe et pour un même organe, dépendra aussi du stade de développement atteint au moment de l'échantillonnage.

Il faut tenir compte aussi de la nature des tissus analysés. Suivant les organes, ils sont plus ou moins sensibles aux fluctuations de la composition du milieu extérieur (les fruits et les graines étant beaucoup plus stables que les feuilles par exemple).

2) Relation entre la concentration dans le milieu intérieur et le "rendement" pondéral.

Il s'agit évidemment du poids atteint au moment du prélèvement de l'échantillon, les deux termes de la relation coïncidant dans le temps, et non d'une relation entre la concentration interne à un moment donné et le "rendement" pondéral final, trop de facteurs pouvant intervenir entre les deux. Il n'est pas inutile de préciser ce point. Certaines des critiques adressées aux méthodes d'analyse foliaire n'ont pas d'autre origine qu'une conception erronée de cette relation.

D'autre part, ce que nous envisagerons ici - comme il a été précisé plus haut - c'est le "rendement" pondéral de la plante entière, notion physiologique rendant compte du niveau atteint par l'ensemble des phénomènes de synthèse, rendant compte aussi, d'un certain point de vue, de la croissance. Dans la pratique, il est nécessaire de passer de cette notion à celle de "récolte". La relation entre la masse végétale totale obtenue et la masse des organes ou des produits qui seront "récoltés" dépend du végétal étudié et de la nature des parties "récoltées".

Si on ne considère que les caractères de la plante et des organes intéressants au point de vue pratique, elle est assez simple dans certains cas (par exemple pour le palmier à huile : Chaque feuille porte une inflorescence et il n'y a pas de ramification du stipe), plus complexe dans d'autres (par exemple pour l'arachide : toutes les ramifications portent des fleurs, mais la formation de gynophores et la production de gousses utilisables sont localisées presque uniquement sur les noeuds de la base ou pour la canne à sucre où la croissance maxima ne coïncide pas obligatoirement avec le rendement maximum en sucre). Dans les cas les plus simples, les deux notions peuvent être confondues. Dans le cas d'une relation complexe, la courbe qui la traduit peut devenir curvilinéaire.

Mais d'autres facteurs, indépendants de la morphologie de la plante et de son mode de développement normal, peuvent intervenir, dissociant les deux termes de la relation (conditions permettant une croissance normale et ne permettant pas une fécondation convenable des fleurs, etc). De toute façon, pour pouvoir faire une interprétation correcte du point de vue agronomique, il faut préciser la nature de la relation pour chaque plante et chaque cas.

Ces distinctions étant bien précisées, nous pouvons aborder l'étude de la relation entre la concentration dans le milieu intérieur et le "rendement" pondéral, considéré comme un moyen d'appréciation de la croissance.

LAVOLLAY (1936) a montré que la croissance s'exprime en fonction de la concentration du milieu nutritif par une loi de même forme que celle qui régit la fixation du cation et qu'il était donc légitime de penser à l'existence d'une relation directe entre la fixation, c'est à dire la concentration du cation dans l'organisme, et la croissance de celui-ci.

LUNDEGARDH (1942) est arrivé aux conclusions suivantes :

- 1) Il y a toujours pour chaque élément une série de valeurs pour lesquelles une corrélation fortement positive existe entre la teneur dans les tissus et la croissance.
- 2) La croissance est toujours la résultante de tous les facteurs de la nutrition. C'est en agissant sur le facteur au minimum - comme pour la relation (1) - que l'on obtiendra les réponses positives les plus rapides et les plus importantes. Si on exprime la relation par une courbe, cette courbe passera par un palier, la réponse de la croissance n'étant pas proportionnelle à l'augmentation de la concentration interne pour toutes les valeurs de celle-ci. La teneur et la croissance augmentent ensemble aussi longtemps que l'élément qu'on fait varier est au minimum (à l'exclusion de la portion de la courbe où des effets de dilution peuvent, dans certains cas particuliers, entrer en jeu). Quand on en arrive aux teneurs optima, la concentration continue à augmenter, alors que la croissance cesse graduellement.

Matière sèche

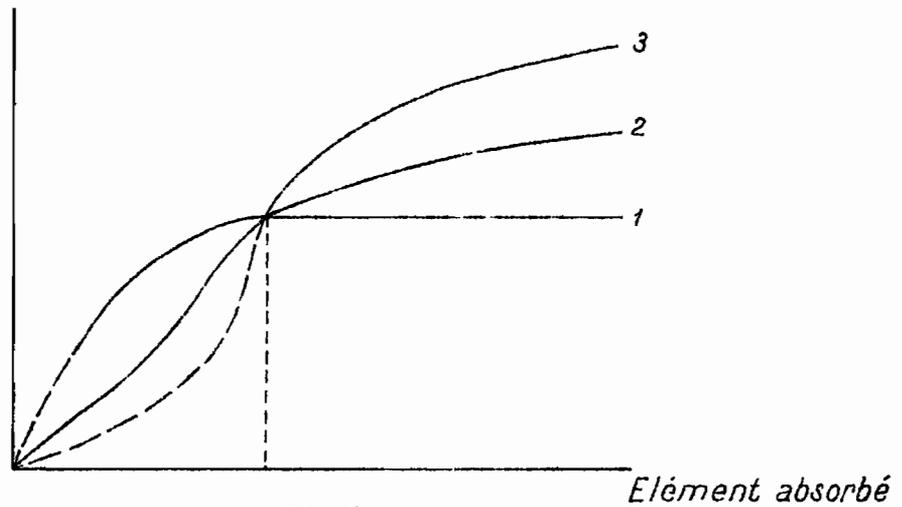


Fig.2

Croissance ou Rendement

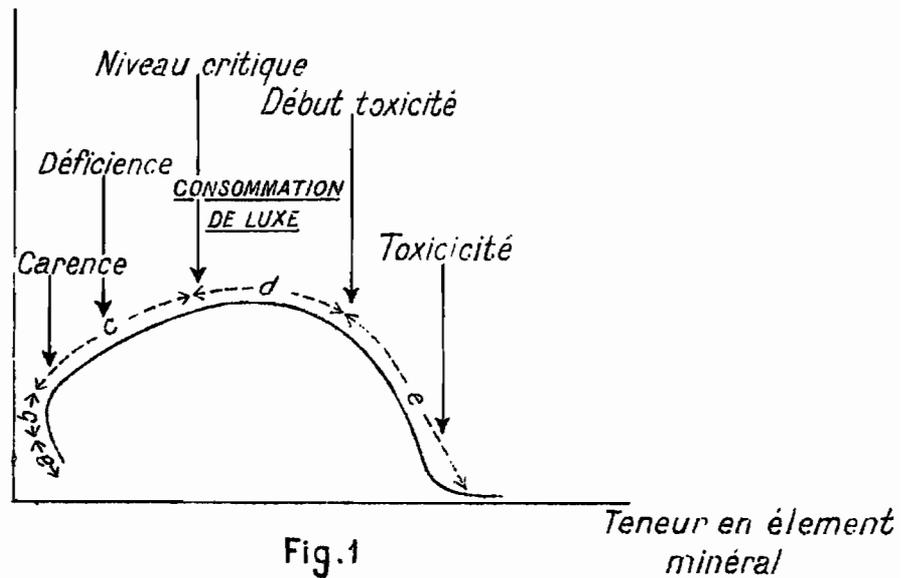


Fig.1

d'après P.Prévot et M.Ollagnier (1956)

Mais les influences des différents facteurs s'équilibrent mutuellement. On peut très bien voir la teneur en un élément situé dans la région "optima" diminuer dans une certaine mesure, sans pour cela que la réponse de la croissance à une forte augmentation d'un élément agissant dans la zone de déficience soit notablement affectée.

3) La corrélation généralement remarquablement positive entre les teneurs en éléments tels que N, P et Ca et la croissance des parties vertes de la plante montre que la production de substances organiques est contrôlée par le principe général d'action de masse. En d'autres termes : la croissance est une fonction de la concentration. Ceci est valable surtout pour les feuilles, laboratoire central de la plante, et, dans une certaine mesure, pour les racines. Là, les matériaux sont directement synthétisés à partir des éléments simples apportés. Ce n'est plus vrai pour les fruits et les graines qui profitent dans une large mesure des matériaux synthétisés et accumulés dans les feuilles.

4) Il faut bien entendu tenir compte dans l'interprétation des résultats de l'intervention des facteurs autres que la nutrition minérale sur la croissance des plantes étudiées.

La figure 1. schématise, d'après Prevot et Ollagnier, la relation générale entre concentration en éléments minéraux dans le milieu intérieur et croissance (ou "rendement"). On suppose que les facteurs autres que la nutrition minérale sont à un niveau tel qu'ils permettent une croissance et un développement normaux.

"L'augmentation de la concentration de la solution en un élément déficient provoque, dans certaines limites, simultanément, une augmentation de la quantité absorbée et de la croissance. L'effet sur le pourcentage en cet élément pourra être négatif, nul ou positif, selon la valeur respective de l'augmentation de la vitesse de croissance et de la vitesse de l'absorption" (Prevot et Ollagnier).

Dans la partie "a" de la courbe, la déficience est accentuée et l'augmentation de croissance ou de "rendement" provoquée par l'adjonction de l'élément déficient est tellement importante que les pourcentages dans les feuilles sont diminués ou restent stationnaires (partie "b"). Dans la partie suivante de la courbe ("c") on en arrive à la zone où les deux termes sont liés par une corrélation positive. On dépasse ensuite l'optimum pour l'élément étudié ("d"), la teneur croit encore alors qu'il n'y a plus d'augmentation de croissance ("consommation de luxe"). Au delà, on en arrive à la zone de toxicité, la croissance devient presque nulle avec une concentration de plus en plus élevée. Prevot et Ollagnier donnent pour chaque partie de la courbe des exemples tirés de leur expérimentation sur arachide.

Cette courbe est une de celles qui montrent le plus clairement comment l'interprétation des résultats pourra varier et être plus ou moins délicate suivant les circonstances.

Il faut noter toutefois que la première partie de cette courbe (portions "a" et "b") ne traduit pas une loi générale, mais rend compte de certains cas particuliers qui se rencontrent lors de carences extrêmement marquées, surtout pour l'azote (c'est d'ailleurs l'exemple d'une carence en azote sur arachide que citent Prévot et Ollagnier - Hewitt (1956) relate des phénomènes analogues dans le cas notamment du manganèse et, d'après Piper (1942), du cuivre).

Toutes ces considérations s'appliquent au cas où un seul élément varie et où la croissance est limitée par cet élément. Si les conditions étudiées s'étendent sur une série importante de combinaisons de facteurs nutritifs, on ne pourra généralement pas établir ainsi une relation valable entre la concentration d'un élément pris individuellement et la croissance ou la récolte. C'est d'ailleurs la question de la valeur de la notion de "niveau critique" - très discutée - qui se pose ici et qui sera envisagée dans le détail plus loin.

Quoi qu'il en soit, LUNDEGÅRDH, après examen des courbes traduisant le rapport entre teneurs en éléments dans la plante et augmentation de "rendement" pondéral, a montré que leur forme était hyperbolique et qu'une équation simple traduisait leur comportement d'une manière satisfaisante.:

$$y + a = \frac{b}{x} \cdot c \cdot Ki$$

x = Teneur interne en l'élément considéré.

y = Augmentation de récolte après apport d'une quantité donnée de l'élément considéré.

a, b, c = Constantes

Ki = Facteur d'interférence rendant compte de l'action d'un autre élément.

LUNDEGÅRDH a montré que les courbes calculées coïncidaient bien avec les données expérimentales dans certaines limites de valeur pour le facteur d'interférence. Ainsi, par exemple, la courbe calculée traduisant la relation entre la teneur en potassium et l'augmentation de récolte rend assez bien compte des résultats expérimentaux si la teneur en phosphore est supérieure à 6.5 et inférieure à 4.5 atome mg. pour 100 g., moins bien si P est compris entre 4.5 et 6.5. Pour l'azote, l'accord est bon si P est compris entre 4.5 et 6.5 ou supérieur à 6.5, moins bien si P est inférieur à 4.5 atome mg. pour 100 g. LUNDEGÅRDH souligne que le facteur d'interférence, (ici le phosphore), joue avec la même intensité relative pour une série complète de variations du facteur principal.

GOODALL et GREGORY donne l'équation de LUNDEGÅRDH sous la forme générale :

$$y = \frac{k}{x_1^{c_1} \cdot x_2^{c_2} \cdot x_3^{c_3}}$$

Quand plusieurs facteurs agissent simultanément, l'augmentation de rendement est proportionnelle au produit des effets des facteurs isolés.

Mais LUNDEGÅRDH rappelle lui-même que, si dans certains cas on obtient avec une formulation rigide une vision plus claire du phénomène "la formulation mathématique d'une loi biologique apporte toujours avec elle le danger de la schématisation. En règle générale, on ne peut inclure dans une formule que les grandes lignes ou la tendance générale d'un groupe de résultats. La représentation graphique est une forme plus modeste, mais plus convaincante de représentation biologique".

3) Relation entre concentration dans le milieu extérieur et rendement pondéral.

Dans cette relation entrent en jeu aussi bien l'absorption des éléments à partir du milieu extérieur que l'utilisation ultérieure de ces éléments. Il est évident qu'elle dépendra de la nature des plantes en cause (annuelles, bisannuelles, vivaces), de l'action des facteurs externes (lumière, température, eau, éléments minéraux, etc) et de celle des facteurs internes (Substances de croissance, etc). Les différents auteurs qui ont cherché à donner à cette relation une expression précise ont supposé pour raisonner que tous les facteurs se trouvent au niveau optimum, sauf un. Dans ce cas, elle est relativement plus simple que la relation (2). Particulièrement importante pour les agronomes, elle a été étudiée très tôt.

Il faut remonter à la loi des facteurs limitants de LIEBIG (1863), montrant que, pour un milieu donné, le rendement dépend du facteur de végétation qui est relativement le plus faible. Pour LIEBIG, ceci se traduisait par une courbe linéaire.

MITSCHERLICH (1909) a précisé cette relation en formulant la loi des accroissements moins que proportionnels (voir ci-dessus, Analyse biologique du sol). L'équation de Mitscherlich, qui s'appuie sur un grand nombre de résultats expérimentaux, est représentée par une hyperbole.

Pour MITSCHERLICH, il s'agissait d'exprimer la variation du poids de la récolte en fonction de la quantité d'engrais ajoutée. Mais on peut utiliser la formule en considérant que le terme x représente une

concentration et non une quantité. Des expériences de culture sur milieu de composition constante ont en effet permis de montrer que le "rendement" pondéral dépendait de la concentration en éléments du milieu et non de la quantité totale présente.

LAVOLLAY (1936), étudiant la croissance des organismes en fonction de la concentration d'un cation indispensable dans le milieu nutritif, a montré qu'on peut traduire les phénomènes de rendement, avec une approximation qui est d'ailleurs du même ordre, soit par la formule de Mitscherlich qui peut s'écrire :

$$P = A (1 - e^{-cx})$$

P = Rendement en poids
A = rendement maximum
c = constante
x = concentration dans le milieu
e étant la base des logarithmes népériens
soit par une formule du type :

$$P = \pi x \frac{1}{q}$$

π et q = constante, avec $1/q < 1$.

L'une et l'autre de ces formules sont applicables dans un certain intervalle de x, le domaine où elles se vérifient étant plus étendu pour l'une ou pour l'autre suivant les cas.

STEENBJERG (1954), sur la base d'une longue série de résultats expérimentaux, a étudié les formes de courbes exprimant la relation entre la quantité absorbée d'un élément au minimum et la production de matière sèche. La figure 2 donne une représentation graphique schématique de trois types de courbes. Les parties des courbes tracées en trait plein rendent compte des résultats expérimentaux, alors que celles en pointillé représentent des intrapolations entre le point zéro et les plus faibles rendements mesurés. Steenbjerg fait coïncider un des points extrêmes de la courbe avec le zéro du système de coordonnées, la production de matière sèche sans absorption d'un élément nécessaire étant aussi inconcevable (la réserve des graines mise à part) que l'absorption sans production de matière sèche. Steenbjerg a analysé les conditions expérimentales qui rendent probable une forme en S de la courbe.

HEWITT (1956) a repris la discussion de la fonction mathématique qui traduit cette relation, toujours dans le cas de l'absorption d'un élément au minimum.

Différents auteurs, à partir de leurs essais expérimentaux, ont recherché les formes mathématiques que prend la relation quand on fait varier plusieurs éléments.

GREGORY (1937) a travaillé sur l'orge, à propos des éléments N, P et K, montrant que :

a) Si tous les éléments sont en excès dans le milieu, sauf un, qui est apporté à doses croissantes, la relation entre le rendement et l'absorption de l'élément au minimum est donnée par la courbe de Mitscherlich.

b) Quand on établit la relation entre l'absorption de l'un des éléments qui ne sont pas au minimum et le rendement, on obtient également une courbe convexe.

c) Quand on apporte deux éléments en quantités croissantes, mais toujours avec le même rapport fixe entre eux, la courbe traduisant la relation rendement - absorption pour chacun des deux éléments devient linéaire.

GREGORY souligne une des conséquences de ces résultats : ce n'est que dans des conditions particulières d'équilibre, ou quand un élément est au minimum, que la quantité totale absorbée par une plante entière peut fournir une estimation directe de la quantité d'un élément isolé disponible dans le milieu.

Bien entendu cette relation elle aussi est affectée par l'ensemble des facteurs externes et internes.

*

* *

Des relations étroites, fondées sur des données physiologiques valables, existent donc entre la concentration en éléments minéraux dans le milieu extérieur, la concentration dans la plante, la croissance et le rendement. Mais de toutes ces relations - qui d'ailleurs s'enchevêtrent étroitement - aucune n'est simple, aucune n'est automatiquement positive. La forme des courbes n'est pas absolument constante. Dans chacune d'entre elles, le second terme dépend toujours d'une "combinaison" de facteurs - l'expression est de Lundegårdh - le premier terme n'étant que l'un d'entre eux. Et même en se limitant plus ou moins artificiellement aux éléments minéraux eux-mêmes, on se trouve encore en face de phénomènes d'apparence d'autant plus complexe que nous ignorons encore beaucoup du rôle biochimique particulier de chacun d'entre eux.

Extrêmement complexes, ces données physiologiques de base sont cependant sûres. L'ensemble des observations et des essais qui ont été faits ont montré que l'analyse de la plante pouvait constituer une méthode d'étude valable des besoins minéraux, non seulement pour les recherches fondamentales sur la nutrition minérale, ce que personne ne conteste, mais pour la pratique agronomique, ce qui a été beaucoup plus discuté, souvent, semble-t-il, parce qu'on cherchait à appliquer avec un certain automatisme des relations simplifiées. Or, leur complexité est telle que toute méthode fondée sur elles exige, pour être légitimement employée, un travail d'interprétation des résultats adapté à chaque plante et à chaque situation, et tenant le plus grand compte des données physiologiques qui entrent en jeu et du dynamisme des éléments dans la plante. C'est ce qui ressort le plus clairement de tout ce qui précède.

*

* *

CHOIX D'UNE TECHNIQUE

1) NECESSITE DES RECHERCHES PRELIMINAIRES - PRINCIPES - EXEMPLES.

Il s'agit de savoir quelles parties de la plante récolter pour l'analyse, sur combien et sur quels individus prélever ces échantillons, à quel moment et dans quelles conditions le faire. Toutes ces données doivent être définies avec rigueur. Il faut que l'échantillon choisi constitue un bon "miroir" de la nutrition minérale de la plante. Il faut aussi que les comparaisons entre les différents traitements ou les différentes situations soient valables.

Il y a évidemment un grand choix de possibilités. Les principes de base qui guident dans ce choix sont les mêmes pour toutes les plantes, mais les applications diffèrent dans chaque cas. Les techniques ne doivent bien entendu pas être choisies à partir de tâtonnements empiriques ou de considérations à priori. Il faut d'abord - comme pour toute recherche de ce genre - bien connaître la plante sur laquelle on travaille, la suivre avant toute application d'engrais et étudier les corrélations entre les résultats fournis par les différentes possibilités expérimentales et les données les plus importantes pour le problème envisagé (croissance, production de fruits, de graines, de sucre, etc). Des études préliminaires complètes sont indispensables quand on aborde une plante pour la première fois avec ces méthodes. Dans ces conditions, il faut beaucoup de temps - plusieurs années - et de travail pour mettre au point une technique

convenable. Quand il ne s'agit que d'adapter à des circonstances données des méthodes qui ont déjà fait leur preuve pour la plante envisagée, le travail se trouve simplifié.

L'emploi des cultures en milieu artificiel, permettant de travailler dans des conditions assez rigoureusement contrôlées, peut être intéressant pour les recherches devant aboutir aux choix d'une technique, à condition de ne pas omettre de tenir compte, au moment où il s'agit d'extrapoler les résultats en vue d'une utilisation agronomique, des différences importantes pour la plante entre ce mode de vie et la culture en pleine terre.

Pour ce qui est de l'application des calculs statistiques à l'étude des corrélations entre la concentration en éléments minéraux dans les échantillons analysés et les données de croissance ou de rendement, Goodall et Gregory rappellent qu'on ne peut adopter sans examen critique les méthodes standard de calcul qui sont faites pour le cas où les deux quantités en jeu dépendent l'une de l'autre suivant une relation linéaire. Or, nous avons vu que la relation entre concentration interne et croissance ou rendement, tout en n'ayant pas toujours la même forme, était curvilineaire.

A l'heure actuelle, ces méthodes ont déjà été très étudiées pour un certain nombre de plantes. Pour les cultures tropicales, et parmi les travaux les plus approfondis, on peut citer :

Canne à sucre (Travaux de CLEMENTS et de ses collaborateurs aux Iles Hawaï, 1940-1952). Cherchant un procédé permettant de suivre la plante tout au long de sa croissance et à l'endroit précis où elle vit, et après l'examen de plusieurs indices internes, ces chercheurs se sont arrêtés à la teneur en sucres (appelé dès lors "indice primaire"), comme traduisant le mieux l'influence de tous les facteurs externes (l'insolation étant ici prépondérante). Ils ont ensuite apprécié, par la méthode statistique, l'action de tous les autres facteurs sur cet indice primaire. La corrélation est positive entre l'indice primaire, la luminosité, la température et parfois l'azote et le phosphore, négative avec la croissance, l'humidité, le potassium, et parfois l'azote et le phosphore. Des "indices secondaires" ont été mis au point pour traduire l'action de ces facteurs. Le grand intérêt de ces travaux est dans l'effort fait pour tenir compte de l'ensemble des conditions de milieu, en mettant bien la nutrition minérale à sa place dans la "constellation" des facteurs.

Hévéa (Travaux de BEAUFILS, Institut du Caoutchouc, Indochine, à partir de 1949). Etude approfondie et statistique permettant l'analyse des relations existant entre les constituants des feuilles, ceux des latex et ceux des graines ; entre les compositions des feuilles, des latex et des graines ; enfin entre la production, la stabilité des latex, la santé des arbres et le métabolisme minéral. Ces travaux ont abouti à la mise au point d'une méthode de "diagnostic physiologique", directement utilisable, qui se perfectionne d'ailleurs encore d'année en année, et apporte un maximum de renseignements sur la nutrition minérale de l'arbre.

Palmier à Huile (Travaux de CHAPMAN et GRAY, 1949, en Malaisie, continués surtout par les chercheurs de l'I.R.H.O.). C'est un bon exemple d'une étude préliminaire détaillée des feuilles. La feuille de palmier ne se prêtant pas à être récoltée entière, Chapman et Gray ont étudié les :

- variations longitudinales dans la composition entre les différentes parties de la même foliole (sections transversales et longitudinales) ;
- variations de la composition des mêmes fractions de la foliole dans les différentes parties d'une même feuille ;
- variations de la composition des mêmes fractions de folioles de même rang pour les différentes feuilles.

Les fig. 3, 4 et 5 donnent une idée de l'ampleur de ces variations. Finalement les coefficients de corrélation entre la production et la teneur en éléments minéraux des différents échantillons de feuilles ont été calculés. Une bonne corrélation positive existe entre la teneur en azote et la production, quel que soit l'âge de la feuille. Mais seuls les deux échantillons de feuilles les plus âgées ont montré une corrélation positive significative pour le phosphore et le potassium. Le choix définitif a alors fait intervenir l'état de santé des feuilles.

Arachide (Etude de PREVOT, 1950, à l'origine des travaux de l'I.R.H.O. sur ce sujet). L'étude publiée par Prévot sur la croissance, le développement et la nutrition minérale de l'arachide constitue, elle, un bon exemple de travaux préliminaires permettant - ce qui est nécessaire avant toutes choses - de connaître à fond la morphologie, l'évolution et la composition de la plante à laquelle on a à faire.

2) CHOIX DES PLANTES SUR LESQUELLES PRELEVER LES ECHANTILLONS.

Pour chaque cas à examiner, il faut disposer de plusieurs échantillons analysés séparément.

Si on a à faire à un essai parcellaire de traitements, sur le terrain, ou à un essai en vases de végétation, comportant des répétitions, on n'aura qu'à prélever un échantillon par parcelle ou par répétition. S'il s'agit par contre d'apprécier l'état de la nutrition dans un champ ou une station donnée, il faudra prélever plusieurs échantillons séparés (le nombre dépend de l'homogénéité de la végétation et des conditions de milieu) et qui pourront représenter :

- soit plusieurs localisations topographiques de la surface en observation ;
- soit différents aspects de la croissance des plantes ;
- soit des lots représentatifs de l'ensemble des plantes, choisis chacun au hasard ou d'une manière systématique, sur l'ensemble de la surface.

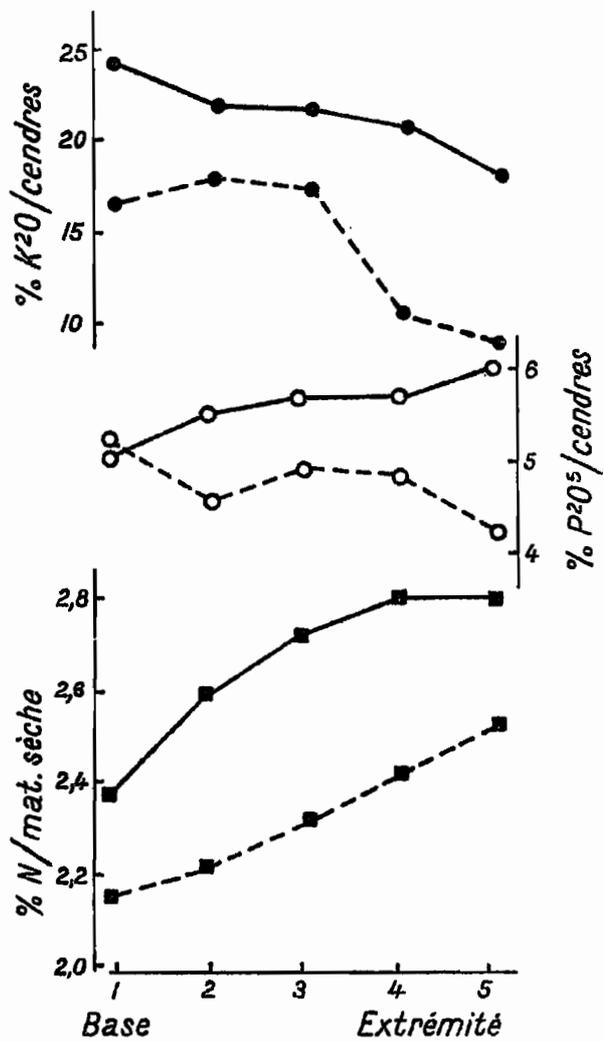


Fig.3. Sections transversales d'une foliole

— feuille 9
 - - - feuille 17

d'après Chapman et Gray (1949)

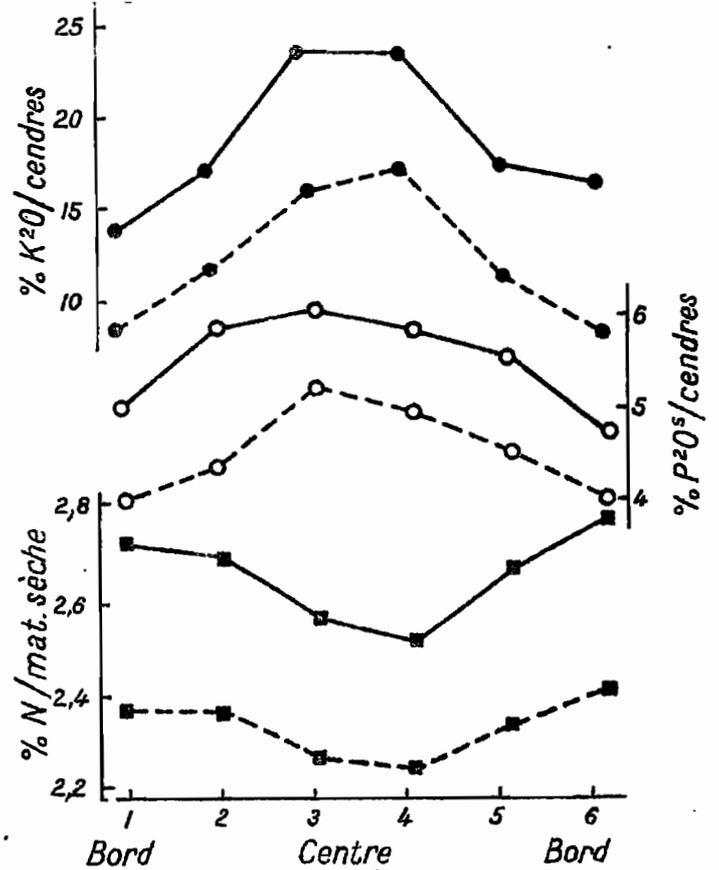


Fig.4. Sections longitudinales d'une foliole

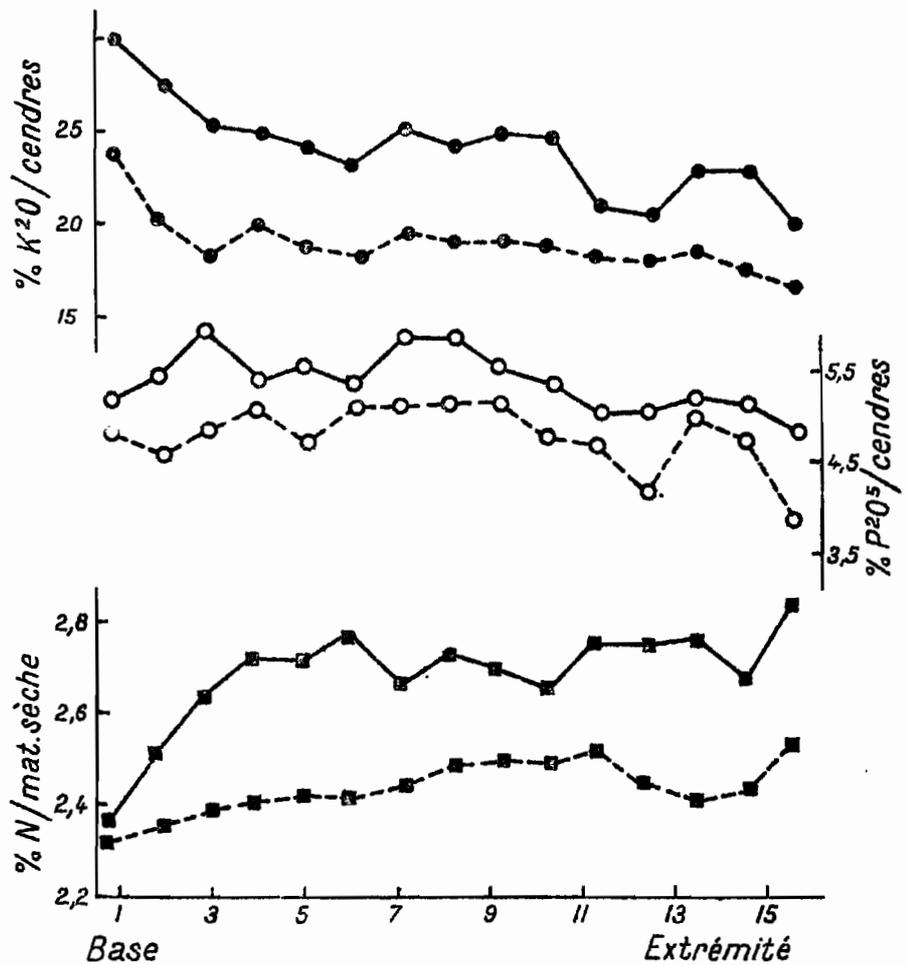


Fig.5. Variations dans la composition des folioles le long d'une même feuille

Même dans le cas simple où chaque échantillon correspond à une parcelle ou à une répétition, la question du choix des plantes se pose. Faut-il prélever sur chaque plante (ce qui ne peut être matériellement concevable que pour certaines plantes ou dans le cas d'essais de laboratoire) ? Faut-il choisir pour l'échantillonnage un certain nombre de plantes prises absolument au hasard ? Faut-il choisir des plantes "typiques", "représentatives", "moyennes" ? Cette dernière solution comporte le danger d'un choix subjectif auquel il faudra porter grande attention si on est amené à l'utiliser. Prendre des plantes au hasard est la meilleure solution dans le cas d'une population assez homogène. Ce n'est généralement plus le cas si certains individus seulement, sur la surface considérée, présentent des symptômes de déficience ou de "consommation de luxe", ou diffèrent notablement par leur productivité, etc.

Mais il faut encore tenir compte des bases sur lesquelles reposent les données de croissance, production, rendement, qui doivent être mises en rapport avec les résultats de l'analyse de l'échantillon prélevé. Les deux choses doivent être comparables. Il ne faut pas introduire dans un terme de la relation des distinctions dont l'autre terme ne tient pas compte.

Les décisions dont dépend le choix des plantes pour la récolte des échantillons ne peuvent être fondées que sur la connaissance de chaque cas particulier. Reste encore à déterminer quel est le nombre minimum de plantes qui permet de constituer un échantillon représentatif. Des calculs statistiques permettent de répondre dans chaque cas à cette question. Mais on peut souvent s'en tenir dans la pratique à des données déjà établies. Dans le cas des arbres fruitiers, des milliers d'analyses en série, dont les résultats ont été statistiquement analysés, ont montré que, sur une grande surface d'allure homogène, un échantillon composé avec les prélèvements faits sur 25 arbres pris au hasard donne une bonne idée de la nutrition minérale de l'ensemble. Dans le cas de céréales, etc, en champ, on estime généralement que 50 plantes peuvent constituer un échantillon valable.

3) CHOIX DE L'ORGANE A ANALYSER.

a) Quelle partie de la plante prélever ?

Il faut choisir le tissu qui sera le meilleur "miroir" de la nutrition, des possibilités et des besoins de la plante, c'est à dire un tissu sensible aux fluctuations du milieu du point de vue minéral et dont la composition montre les meilleures corrélations avec la composition du reste de la plante, sa croissance et sa productivité.

Il faudra d'autre part, dans la pratique, que la partie de la plante choisie soit assez facile à prélever et bien définie.

On a généralement cherché à s'affranchir de l'analyse de la plante entière.

D'une part, à cause de difficultés matérielles évidentes, qui deviennent même des impossibilités quand il s'agit de plantes pérennes. D'autre part, pour éliminer l'effet des différences de composition des organes qui rendent difficile une interprétation rigoureuse. Goodall et Gregory rappellent cependant que la proportion même entre les différents organes dans une plante est affectée par l'état de nutrition. On ne peut rejeter à priori, quand elle est réalisable dans la pratique, la solution qui consiste à analyser la plante entière. Il n'est pas exclu qu'elle fournisse un bon "miroir" de la nutrition. Comme toutes les questions passées en revue ici, celle-ci doit être résolue directement par l'expérimentation.

Si l'analyse de la plante entière est écartée, quel organe choisir ? On peut partir de considérations théoriques. On a pensé, par exemple, que la composition de la sève brute étant en relation directe avec l'absorption des éléments minéraux, les tissus conducteurs seraient susceptibles de fournir le meilleur "miroir" de la nutrition. Ce qui s'est avéré n'être souvent pas vrai. On s'adresse le plus généralement à la feuille, organe d'élaboration et d'accumulation, "laboratoire central de la plante", (voir ci-dessus), et dans bien des cas il se confirme que c'est le meilleur choix. Il y a cependant des plantes et des circonstances pour lesquelles d'autres organes sont des témoins plus sensibles, rendant mieux compte de ce qui se passe pour l'ensemble de la plante : pétioles, tiges, ou même - malgré les difficultés de prélèvement - racines ou radicelles (Reuther signale que l'analyse des radicelles peut avoir un certain avenir dans le cas des arbres fruitiers pour les recherches concernant le sodium ou les métaux lourds). D'autres tissus ont même été utilisés dans certains cas : "lait" des noix de coco, etc ...

Le même organe ne convient pas toujours aussi bien pour tous les éléments. Souvent, par exemple, les variations sont plus importantes dans les tiges pour les cations, dans les feuilles pour les anions. Il peut être utile de faire entrer en jeu ces considérations dans des cas spéciaux, pour des études particulières ou limitées. Autrement, bien entendu, dans la pratique courante et pour l'étude de l'ensemble des éléments, il faudra avoir recours à des compromis.

b) Nature exacte de l'échantillon.

Une fois que le choix s'est fixé sur un organe déterminé - feuille, tige, pétiole, etc - il reste encore à déterminer la nature exacte de l'échantillon. Il n'est pas question de prendre n'importe quelles feuilles, n'importe quelles tiges, etc, au hasard. La composition de ces organes varie dans des limites trop importantes en fonction de l'âge, de la position, etc. Faut-il, par exemple, récolter toutes les feuilles, ce qui est parfois réalisable ? (C'est ce qu'a fait Lundegårdh sur l'avoine et

d'autres céréales, partant du principe qu'en prenant toutes les feuilles de toutes les plantes choisies on avait des chances d'avoir des échantillons tout à fait comparables et que ce procédé était plus facile à mettre en oeuvre, en champ et en grande série, qu'un choix individuel de feuilles) Faut-il n'en prendre que certaines ? Lesquelles ? faut-il prendre des feuilles entières ou des fragments de feuilles ?

Il faut en tout cas ne prélever que des organes bien déterminés et rigoureusement comparables, compte tenu de tous les facteurs de variation.

L'âge d'abord. Au cours de la vie de la feuille, sa composition varie considérablement. En règle générale, à mesure qu'une feuille vieillit, les concentrations en N, P et K baissent, alors qu'elles augmentent toujours nettement pour Ca et parfois pour Mg. Le rôle physiologique des éléments intervient ici, mais aussi leur mobilité. Surtout dans des conditions de déficience, on sait que les éléments les plus mobiles sont repris dans les organes âgés pour subvenir aux besoins des parties jeunes en voie de croissance. C'est le cas surtout de K, élément très mobile, et aussi, mais moins nettement de N et P. Ca, par contre, élément peu mobile, n'est pas repris et continue à s'accumuler dans les organes âgés. Il en est de même du bore. On peut donc penser que, dans des cas de déficience, les feuilles âgées donneront des meilleures indications pour la première série d'éléments et les feuilles jeunes pour le calcium et le bore (ce qui correspond d'ailleurs à l'ordre d'apparition des symptômes de carence).

Dans les cas ordinaires, on s'en tient généralement au prélèvement de feuilles adultes, ayant terminé leur croissance, et ne manifestant encore aucun signe de sénescence. L'âge de ces feuilles correspond d'ailleurs habituellement à un plateau de la courbe retraçant les variations de composition. La composition des feuilles jeunes ou âgées varie trop et trop vite pour qu'il soit possible d'éliminer facilement l'influence de l'âge par un mode de prélèvement standardisé.

Les feuilles (ou les organes) choisis doivent aussi occuper un rang ou une position morphologique bien définis sur la plante; du fait surtout que le fruit qui se développe épuise en partie les réserves des feuilles qui sont les plus proches de lui. De même les feuilles de deux rameaux diffèrent suivant que le rameau est plus ou moins fructifère. On en arrive ainsi à choisir, par exemple :

- chez l'arachide, la première feuille en bon état à la base de la tige principale (Prévot et Ollagnier) ;
- chez la vigne, l'ensemble des deux premières feuilles à la base des rameaux portant deux grappes (Maume) ;
- chez la betterave à sucre, les pétioles des feuilles d'âge moyen (Brown) ;

- chez le palmier à huile, des folioles du tiers central des feuilles adultes ayant acquis leur coloration vert foncé définitive et situées dans la partie médiane de la couronne ; elles sont inclinées par rapport au stipe suivant un angle déterminé assez facile à apprécier à l'oeil (Scheidecker et Prévot). En Malaisie, dans des populations de palmiers plus homogènes, on a pu préciser que c'était la 17^e feuille qui convenait le mieux (Chapman et Gray) ;
- chez les arbres fruitiers, des feuilles moyennes des rameaux de l'année ;
- chez la canne à sucre, les gaines foliaires des zones de croissance (Clements) ;
- chez l'olivier (qui porte des feuilles de 1, 2 et 3 ans), on a montré que les feuilles de même âge ont sensiblement la même composition quelle que soit leur position sur la branche et la position de la branche elle-même ; on suit parallèlement les feuilles des 3 types (Bouat, Renaud et Dulac) ;
- chez la pomme de terre, l'ensemble des 2 premières feuilles prises à la base des rameaux directement issus du tubercule mère (Lagatu et Maume) ;
- chez le blé, les 2^e et 3^e feuilles sous l'épi (Maume et Dulac) ;
- etc, etc.

Les chiffres suivants, pris comme exemple, donnent une idée des variations dans la composition des feuilles en fonction de leur rang chez le blé Vilmorin 27 (Maume et Dulac, 1950)

Rang de la feuille (à partir de l'épi)	Eléments minéraux % Mat. sèche		
	N	P ²⁰⁵	K ²⁰
1er	2.8	0.57	3.9
2ème	2.7	0.55	4.7
3ème	2.0	0.45	4.9
4ème	1.6	0.28	4.2
5ème	1.1	0.18	1.7

On supprime ou non le pétiole de la feuille, sa nervure centrale. Ces détails doivent en tout cas être précisés. Certains chercheurs n'analysent que des fragments de feuilles (disques prélevés à l'emporte pièce sur les feuilles de canne à sucre, tiers central des feuilles de maïs ou des folioles de palmiers, etc). Pour le palmier à huile, on a poussé les choses jusqu'à couper une lanière de 2 mm. sur le bord externe des folioles prélevées. Nightingale ne conserve que la base méristématique des feuilles d'ananas qu'il récolte. Il semble douteux que de tels raffinements aient de la valeur, surtout si une petite variation dans la ligne de délimitation de l'échantillon risque d'altérer les proportions des différents tissus en présence et, par conséquent, de fausser les résultats.

Quand on prélève des disques sur une feuille et qu'on étudie les oligoéléments, il faut aussi se méfier des contaminations possibles par le métal de l'emporte pièce.

4) CHOIX DU MOMENT CONVENABLE POUR L'ECHANTILLONNAGE.

Le prélèvement de l'échantillon étant défini dans l'espace, il convient encore d'en préciser les conditions dans le temps. A quel stade de la vie de la plante, à quelle époque de l'année, à quel moment de la journée, faudra-t-il récolter le matériel destiné à l'analyse ?

a) Variations au cours de la journée.

Chaque fois (hévéea, coton, palmier à huile, tomate, etc, etc) qu'on a approfondi la question, on s'est aperçu que les teneurs en éléments minéraux variaient d'une manière non négligeable au cours de la journée, ce qui est d'ailleurs normal. Il est donc important de récolter les échantillons toujours à la même heure pour que les prélèvements soient comparables entre eux à ce point de vue. Seule une connaissance sérieuse de la plante étudiée et des problèmes posés permet de savoir quel est le moment de la journée qui convient le mieux. Les observations et les techniques des différents auteurs divergent passablement à ce sujet. Si on ne peut entreprendre l'étude de cette question, ce qui est souvent le cas, il importe cependant de standardiser cette condition comme les autres, fut-ce arbitrairement.

b) Variations au cours de la vie de la plante et au cours de l'année

Des feuilles - ou d'autres organes -, même choisis à un âge identique, n'ont pas la même composition tout au long de la vie de la plante et tout au long de la saison de végétation. Il importe donc de préciser à quelles périodes les échantillons doivent être prélevés. Ce problème est compliqué par le fait que deux sortes de facteurs entrent en ligne de compte et interfèrent ; ce sont :

- les variations dues à l'évolution physiologique de la plante : croissance, floraison, fructification, etc ;

- celles dues à l'influence du climat : température, humidité, variations saisonnières dans l'apport d'éléments par le sol, influence qui change d'une année à l'autre.

Il est plus satisfaisant du point de vue physiologique de fonder le choix sur le stade de développement atteint par la plante au moment de l'échantillonnage, plutôt que sur une date. L'expérience a d'ailleurs montré que cette façon de faire est la meilleure. La relation composition/rendement est plus affectée par les facteurs climatiques, dans le cas où l'échantillonnage est fait à date fixe, que dans ceux où il est fait à un stade bien déterminé du développement, sans qu'il soit tenu compte de la date à laquelle ce stade est atteint.

Cette façon de faire n'est malheureusement pas praticable avec certaines plantes qui ont un développement continu, sans stades tranchés, comme par exemple le palmier à huile, qui porte en permanence et en même temps des régimes mâles et femelles à tous les stades, de la formation à la maturité. Dans ce cas il faut se résoudre à récolter les échantillons à une date déterminée, en rapport avec le déroulement des saisons (fin de saison sèche par exemple, pour le palmier à huile).

Le choix de la période d'échantillonnage repose sur deux conditions :

- Il faut que la composition de l'organe choisi traduise à ce moment le mieux possible l'état de la plante au point de vue nutrition minérale, qu'elle ait ou non déjà subi un traitement particulier (en ce dernier cas, bien entendu, il faudra aussi prendre en considération la date du traitement). Il faut d'ailleurs bien savoir ce qu'on veut apprendre. Suivant le genre de réponse cherchée, suivant l'échantillon sur lequel se fixe d'abord l'intérêt, le moment optimum peut différer.

En règle générale, l'époque de la fructification ne convient pas, chez la plupart des plantes et dans la plupart des cas ; les phénomènes de translocation vers les fruits sont trop considérables et masquent tout le reste.

- Il faut aussi s'efforcer de choisir une période pendant laquelle la composition de l'organe récolté est relativement constante pendant un certain temps. Sur le terrain, on ne peut atteindre une précision extrêmement rigoureuse dans la récolte des échantillons ; il se produit inévitablement quelques fluctuations dans l'échantillonnage (choix du moment, choix de l'échantillon lui-même). Il faut choisir un stade où de telles variations ont peu d'effet sur les résultats.

Pour les céréales par exemple, Burström et Lundegårdh ont montré que c'était la période comprise entre l'épiaison et la pollinisation qui convenait le mieux. Ce stade est facile à reconnaître sur le terrain. Les réponses sont bonnes. Et pendant les deux semaines environ qui précèdent la floraison, de même que pendant la pollinisation, la composition

Fig. 6

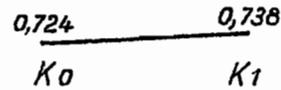
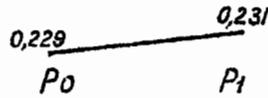
Comparaison de techniques de prélèvements foliaires

d'après P. Prévot et M. Ollagnier (1954)

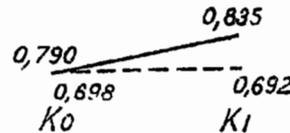
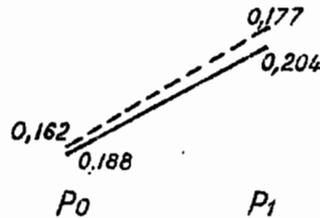
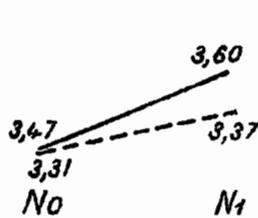
Effet de N sur le contenu en N

Effet de P sur le contenu en P

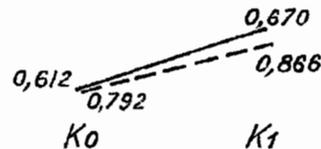
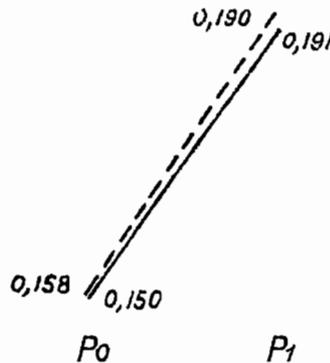
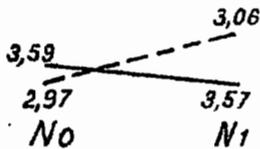
Effet de K sur le contenu en K



Préfloraison



Pleine floraison

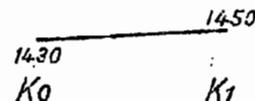
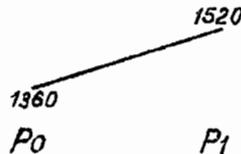
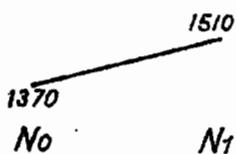


Fructification

Effet de N sur le rendement

Effet de P sur le rendement

Effet de K sur le rendement



Rendements (gousse/ha)

I Unité graphique correspondant à une différence significative de 5%

—— Prélèvement sur la tige principale

----- Prélèvement sur les rameaux cotylédonaire

des feuilles récoltées reste à peu constante ; les teneurs en N, P et K peuvent tout au plus diminuer un peu ; mais cette diminution reste assez faible si elle se produit. Cette période précédant la floraison convient aussi pour la pomme de terre. Pour le trèfle, Lundegardh a trouvé des variations de composition périodiques qu'il n'a pu mettre en rapport avec les stades de développement, ce qui a rendu très difficile l'obtention de résultats reproductibles.

La figure 6 donne un exemple concernant l'arachide (travaux de Prévot et Ollagnier - Sénégal 1953). On a comparé sur un essai d'engrais des prélèvements faits sur les rameaux cotylédonaire et des prélèvements faits sur la tige principale, à la pré-floraison, à la pleine floraison et à la fructification. Les effets des engrais N, P ou K sur la composition de la feuille ont été comparés aux effets de ces engrais sur les rendements. Les prélèvements de la préfloraison sont trop précoces, les engrais n'ont pas encore eu le temps de marquer sur les contenus en éléments. Il n'y a pas de différence entre les prélèvements sur rameaux cotylédonaire ou tige principale. Là aussi, l'époque de la fructification semble trop tardive, car à ce moment les phénomènes de translocation des substances minérales vers les gousses sont considérables. Finalement la pleine floraison est considérée comme une bonne époque pour la récolte des échantillons (40^e jour pour les variétés tardives à cycle de 120 jours et 30^e jour pour les variétés hâtives).

Certains chercheurs font plusieurs prélèvements dans une saison, ce qui réduit les risques et augmente les informations (Ecole de Montpellier, pour la vigne : début et fin de floraison de la 1^{ère} grappe, véraison, maturité - etc). Cléments et ses collaborateurs suivent les cannes à sucre par des prélèvements mensuels.

De toute façon, au départ, il faut étudier l'organe choisi tout au long de la vie de la plante, s'il s'agit d'une plante annuelle ou bisannuelle, ou tout au long de la saison de végétation, s'il s'agit d'une plante pérenne. Et se rappeler que les stades de développement les plus appropriés peuvent ne pas être les mêmes pour des types différents de sols et de climats. Ce qui impose de répéter ces essais dans des situations différentes et plusieurs années de suite.

5) AUTRES FACTEURS ENTRANT EN JEU.

a) Conditions climatiques

Il faut tenir compte de leur influence et des erreurs qu'elles peuvent entraîner.

On a démontré l'action de la lumière sur la teneur en azote chez la betterave et les céréales, sur la teneur en phosphore et en potassium de plantules de pin, etc. Pour les céréales, certains auteurs en sont venus à ne considérer comme valables que les échantillons prélevés par temps lumineux. On a montré également - en dehors de leur action sur l'assimilation des éléments dans le sol - l'action de lessivage que les précipitations importantes peuvent exercer sur le potassium des feuilles. On évite toujours de prélever des échantillons après de grosses pluies (travaux de Craig et Halais sur la canne à sucre, 1944).

D'une année à l'autre, les conditions climatiques ne sont pas les mêmes, ce qui entraîne des variations dans la composition des organes récoltés, variations qui peuvent conduire à des erreurs d'interprétation, si les résultats ne sont pas soumis à une critique suffisamment serrée et si on ne possède pas des renseignements portant sur un nombre d'années suffisant. Ces variations de composition sont probablement dues en partie à l'influence directe des pluies et des autres facteurs climatiques sur la disponibilité des éléments dans le sol et en partie aux effets indirects du temps sur la croissance, le développement et le métabolisme des plantes. Lundegardh a montré par exemple que l'augmentation des teneurs en azote des céréales sous l'influence de la sécheresse était très significative et pouvait entraîner des erreurs d'interprétation au cours d'étés secs.

b) Maladies

Dans le cas où la plante ne manifeste des symptômes de déficience ou de maladie que sur certaines de ses feuilles, la question peut se poser de savoir s'il faut préférer pour l'échantillonnage des feuilles saines ou des feuilles atteintes. Ces dernières donnent peut être une idée plus nette des éléments déficients (ce n'est pas toujours le cas, certaines carences en fer en sont un exemple), mais l'ensemble de leur composition minérale peut être profondément perturbée et la seule solution sûre dans ce cas semble être d'analyser d'une part des feuilles atteintes, d'autre part des feuilles saines, rigoureusement comparables par ailleurs, bien entendu.

De toute façon un échantillonnage normal - sauf cas particuliers et bien définis - doit être fait sur des feuilles saines.

c) Conditions de sol

Il est évident que la nature des différents types de sol a son importance. Pour le choix d'une technique de prélèvement, pour l'interprétation des résultats et pour le choix d'un traitement surtout, on sera amené à en tenir compte. Et là les informations apportées par l'analyse du sol peuvent être précieuses.

Lundegårdh, au début de ses recherches, analysait le sol parallèlement à la plante ("Triple Analyse" : sous-sol, sol, plante). Mais après des contrôles rigoureux, il en est venu à l'abandon de cette méthode au profit de l'analyse de la plante seule. Dans les cas ordinaires, les suppléments d'information apportés par l'analyse du sol ne valent pas le supplément de travail.

d) Variétés

Au sein d'une même espèce, les différentes variétés peuvent différer dans leur composition minérale. Bien que ce ne soit pas toujours le cas, on a cependant mis ces variations en évidence pour de nombreuses plantes. Il semble dans beaucoup de cas qu'il ne s'agit que d'une différence dans les possibilités d'absorption, mais pas de réactions foncièrement différentes à partir d'une composition interne donnée. On peut aussi avoir à faire à des différences provenant de caractéristiques particulières (formation de fruits parthénocarpiques, et). Parfois cependant les différences sont plus profondes, la relation entre la concentration interne et le développement de la plante changeant d'une variété à l'autre ; il faut alors étudier chaque variété à part. Les mêmes considérations sont valables dans le cadre des arbres fruitiers, pour ce qui est de l'influence de porte-greffes différents.

e) Fructification

La formation des fruits et des graines entraîne un drainage important des réserves accumulées dans les feuilles et les autres organes. Des différences dans la fructification conduisent donc à des différences importantes dans la composition des organes végétatifs, surtout dans le cas où l'alimentation de la plante n'est pas très abondante. Ces différences peuvent amener à des interprétations erronées si on compare, par exemple, des échantillons de feuilles prélevés sur des branches très fructifères ou peu fructifères ou des échantillons provenant d'une année de haute productivité ou d'une année de faible productivité.

Le tableau suivant peut donner un exemple de l'ampleur des différences entraînées par les variations de certains facteurs (L. Hirschberg, 1954) : il s'agit des variations de la composition des feuilles d'oranger Shamouti imputables à des facteurs autres que l'alimentation minérale et enregistrées par différents auteurs :

Source de variation	Teneur de la feuille en éléments % Mat. sèche	
	N	P
Age des Feuilles	2.18 - 2.52	0.089 - 0.136
Position des feuilles par rapport aux fruits	1.76 - 2.26	-
Saison	1.90 - 2.55	0.09 - 0.14
Exposition aux radiations solaires	2.30 - 2.78	0.117 - 0.138

Goodall et Gregory donnent dans leur ouvrage (avec les références exactes) des tableaux récapitulant les différents organes et les périodes d'échantillonnage qui ont été choisis par les différents auteurs pour l'étude de l'ensemble des éléments minéraux ou d'éléments isolés chez de nombreuses plantes cultivées. On distingue les différents organes d'après la sensibilité de leur réponse aux modifications du milieu minéral (cette comparaison est, dans la majorité des cas, en faveur de la feuille, plus sensible).

La littérature peut fournir actuellement de nombreuses données sur la composition de différents organes dans différentes conditions et en rapport avec les réponses du rendement aux différents traitements. Ce qui peut aider à prendre des décisions dans le choix d'une technique et d'un schéma d'expérimentation.

*

*

*

EXPRESSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

A - EXPRESSION DES RESULTATS -

1) Les résultats peuvent être calculés et exprimés soit en poids, soit en atomes-grammes ou en équivalents chimiques.

a) En poids.

On calcule le poids en grammes des différents éléments : N, P, S, K, Ca, Mg, etc, qui se trouvent dans l'unité de matière végétale choisie.

Il a longtemps été d'usage en agronomie de représenter les principes nutritifs sous les formes : P_2O_5 , K_2O , CaO et MgO , ce qui n'a aucun sens du point de vue physiologique et doit être abandonné.

Quand on a à faire à des éléments présents en très petite quantité, il peut être commode d'exprimer les résultats en parties par million (= p.p. m = mg. par kg.).

b) En atomes-grammes ou en équivalents chimiques.

L'expression des résultats en poids est loin d'être conforme à la réalité des phénomènes biochimiques en jeu. C'est en effet sous forme d'ions que les substances minérales pénètrent et circulent dans la plante et participent au métabolisme. Les modes d'expression qui en tiennent compte sont plus logiques et plus satisfaisants du point de vue physiologique ; ils permettent de dégager des lois et des corrélations qui autrement restent souvent masquées.

On peut s'exprimer en atomes-grammes ou en atomes-milligrammes d'élément (poids, en grammes ou en milligrammes, de l'élément considéré, divisé par son poids atomique), les atomes grammes représentant valablement les ions correspondants ou en équivalents chimiques.

L'équivalent chimique est défini par la masse de l'ion divisé par sa valence. Exprimé en grammes, on l'appelle équivalent-gramme ; exprimé en milligrammes, on l'appelle milliéquivalent-gramme. Le symbole m.e. représente un milliéquivalent-gramme. Si on se sert des équivalents chimiques, on s'exprime donc directement en ions :

NO_3^- , PO_4^{---} , SO_4^{--} , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , etc.

Il ne faut toutefois pas oublier qu'avec les éléments ayant plusieurs valences, comme N et P, ceci implique un choix qui peut parfois être un peu arbitraire.

2) Enfin, les résultats pourront être exprimés par plante, par feuille, par unité de surface foliaire, de poids frais, de poids sec, de cendres, ou par unité de volume d'extrait. Pas plus ici que pour le choix d'une technique de prélèvement, on ne peut établir de règle générale rigide. Pour chaque problème étudié, il faut chercher ce qui rend le mieux compte des réponses de la plante et ce qui entraîne le moins d'erreurs.

Certaines considérations générales sont cependant valables :

a) Résultats exprimés par plante ou par feuille.

On se sert rarement de ce moyen d'expression, souvent difficile à utiliser, dont les termes ne sont, en fait, pas définis avec précision et qui n'a pas grand intérêt. En matière agronomique, l'exportation par unité de surface de terrain, qui est une forme d'expression équivalente, ne donne pas de très bonnes corrélations avec les réponses du rendement aux traitements.

b) Résultats exprimés par unité de surface foliaire.

Ce mode d'expression suppose évidemment une mesure de surface - longue et souvent délicate - à moins qu'on utilise la technique qui consiste à prélever des rondelles de feuilles au moyen d'emporte-pièces calibrés. Dans ce cas, cette façon de faire peut permettre d'éliminer la pesée de l'échantillon et devenir d'une utilisation commode. Certains auteurs estiment de plus qu'il est susceptible de donner des informations intéressantes. Si une carence affecté l'accumulation des glucides, les différences de composition peuvent varier et même être de signe opposé, suivant qu'on les exprime en fonction de la surface ou du poids.

c) Résultats exprimés en fonction du poids frais (ou en fonction du volume d'extrait).

Cette méthode est utilisée surtout par ceux qui travaillent sur des extraits de tissus frais (Voir Chapitre "Tests rapides"). Goodall et Gregory indiquent qu'il semble y avoir peu de travaux de comparaison systématique faits pour juger de la valeur de ce mode d'expression par rapport aux autres.

En tout cas, il est de règle de déterminer, quand cela est possible (pesée immédiate après la récolte), la teneur en eau du matériel récolté. Il est donc en général facile d'exprimer les résultats aussi bien en % de poids frais que de poids sec. Certains auteurs estiment que la première façon de faire rend mieux compte de la réalité biologique et permet de mettre en évidence parfois certains phénomènes qui sont masqués par l'emploi d'autres moyens d'expression.

d) Résultats exprimés en fonction du poids sec.

C'est la façon de faire la plus courante et la plus généralement utilisée, la plus commode aussi. On obtient avec elle des résultats valables et de bonnes corrélations avec les réponses de la plante.

e) Résultats exprimés en fonction du poids de cendres.

On a longtemps utilisé volontiers ce mode d'expression, mais on tend de plus en plus à l'abandonner. D'une part, la pesée des cendres est une opération délicate et on est assez facilement amené à faire de grosses erreurs en exprimant les résultats ainsi, d'autre part, cette méthode ne donne pas beaucoup d'informations intéressantes et les corrélations qu'elle permet d'obtenir avec les réponses de la plante sont souvent mauvaises.

B - INTERPRETATION DES RESULTATS.

Certains chercheurs ont mis l'accent surtout sur la valeur absolue des pourcentages des éléments dans la feuille, d'autres sur les rapports de ces éléments entre eux ou sur la définition de la composition minérale optimale. Certains ont utilisé presque systématiquement une méthode d'interprétation donnée. Il ne semble cependant pas que ce soit la voie sur laquelle on trouvera le maximum d'informations. Nous avons vu en effet que les phénomènes à analyser étaient extrêmement complexes, souvent mal connus et que suivant les cas l'accent devait être mis sur des facteurs différents. Le rôle de l'interprétation est précisément de chercher à voir clair dans chaque cas particulier et elle devra utiliser pour chaque problème la méthode qui s'y adapte le mieux.

1) Eléments de comparaison

S'il s'agit d'étudier un cas de carence prononcée, le problème est relativement facile à résoudre. L'analyse comparative de plantes ou d'organes sains et de plantes ou d'organes carencés est généralement d'une aide précieuse pour le diagnostic. Encore qu'il y ait des cas complexes, comme certaines carences en fer où il arrive que des plantes carencées aient une teneur en fer anormalement élevée dans certains organes.

L'utilisation de ces méthodes est beaucoup plus délicate lorsqu'il s'agit de déterminer, non pas une carence nette, mais une déficience plus ou moins prononcée et d'arriver à connaître les conditions d'alimentation normales et optimales et les besoins d'une plante donnée dans une situation donnée.

Un premier procédé consiste alors à prendre comme indice de référence la composition de plantes provenant de cultures particulièrement bien réussies dans le milieu étudié. Mais cette façon de faire très empirique ne peut donner que des informations fragmentaires (et parfois erronées, par suite des phénomènes de consommation de luxe).

Il est impossible de savoir avec certitude si les différences de composition sont la cause, l'effet ou l'accompagnement des différences de croissance et d'aspect de la plante.

Pour bien connaître les rapports d'une plante avec son milieu du point de vue minéral, il faut non seulement, comme nous l'avons vu, avoir étudié l'évolution de la croissance, du développement et de la composition de la plante pour une alimentation minérale donnée, mais il faut ensuite disposer des résultats d'une expérimentation systématique permettant d'étudier les effets principaux et les interactions des éléments, simultanément sur la composition de la plante (teneurs en éléments minéraux et éventuellement autres données), la croissance et le rendement, et de les mettre éventuellement en rapport avec toutes autres données utiles (floraison, fécondation, qualité de produits, résistance à la gelée, maladies, etc). Cette expérimentation peut être faite entièrement sur le terrain ou avec le concours de cultures en vases ou en milieu artificiel, permettant un contrôle plus rigoureux des conditions de milieu (mais dont les résultats ne peuvent être directement extrapolés aux conditions de pleine terre). Les essais de type factoriel constituent un moyen de travail efficace pour résoudre ces problèmes. Contrairement aux essais simples qui ne font intervenir qu'un seul facteur de variation et ne conduisent qu'à des résultats très incomplets et souvent assez artificiels, les essais complexes de type factoriel - généralement disposés suivant la méthode des blocs - permettent de mettre en évidence les interactions des divers facteurs de variation, telles qu'elles se manifestent dans le milieu naturel.

Les résultats provenant d'une expérimentation de ce genre sont rigoureusement valables, bien entendu, pour les conditions de milieu où ils ont été obtenus. Pour les situer exactement, il est indispensable de toujours suivre d'une manière aussi complète que possible toutes les circonstances et l'"histoire" de l'expérimentation (Température, Humidité, Luminosité, Structure physique du sol, etc). Mais l'expérience a montré que, dans une certaine mesure, on était autorisé à une certaine généralisation des résultats.

Cette phrase très prudente conduit à la notion de "niveaux critiques" qui est un des aspects les plus controversés des méthodes d'analyse foliaire.

2) Niveaux critiques. Utilisation des valeurs absolues.

D'après Macy (1936), dont les définitions ont été reprises par A. Ulrich, le niveau critique est la concentration au dessous de laquelle le rendement commence à décroître. En dessous du niveau critique, une augmentation du taux de l'élément entraîne une augmentation de rendement. Au dessus, un apport de l'élément considéré ne fera qu'augmenter la teneur en cet élément, il y aura "consommation de luxe".

Prévoit et Ollagnier (1956), donnent la définition suivante du niveau critique : "Pourcentage d'un élément dans une feuille au-dessous duquel l'application de cet élément sous forme de fumure minérale a de fortes chances d'augmenter les rendements".

Indépendamment de tout ce qui fait du "niveau critique" quelque chose d'assez fluctuant, et dont il sera question un peu plus loin, il faut préciser qu'il s'agit là d'une notion utile dans la pratique agronomique, mais qui n'a peut être pas un très grand sens physiologique. Les auteurs mêmes qui s'en servent en soulignent le caractère arbitraire. En particulier le terme de "consommation de luxe" n'a sans doute de sens que du point de vue de l'intérêt matériel du cultivateur. Nous avons vu que la courbe qui traduit le "rendement" pondéral en fonction de la teneur en un élément a une forme hyperbolique. Il n'y a pas de cassures brusques de la pente. On pourrait en somme aussi considérer le "niveau critique" comme le point de la courbe à partir duquel le bénéfice de récolte à escompter ne dépasse pas les erreurs expérimentales. Ceci toujours en se plaçant d'un point de vue pratique bien entendu.

Les auteurs anglo-saxons utilisent la notion de "standards" de référence dont l'esprit est le même. Ils lui donnent un plus grand développement. Reuther et Smith distinguent ainsi, d'un point de vue pratique et agronomique, dans un travail sur l'oranger "Valencia", les catégories suivantes :

Niveau	Signification et conséquences pour la plante
Déficient	- Présence de symptômes pathologiques (carence) - Capacité à fructifier définitivement réduite
Faible	- Incompatible avec une haute productivité - L'augmentation fera croître le rendement ou la qualité des produits de la plante si les autres facteurs ne sont pas sérieusement limitants - En général pas de symptômes pathologiques visibles
Optimum	- Satisfaisant du point de vue de la vigueur, de la productivité, de la qualité de la plante.
Elevé	- Correspond à un milieu très riche ou à un dérangement du métabolisme (carence en un autre élément) - La diminution entraîne de bons effets (ou au moins une économie) - En général pas de symptômes pathologiques visibles
Excès	- Correspond à un sérieux dérangement du métabolisme - Réduction de la productivité - La présence des symptômes pathologiques (toxicité) est habituelle.

Goodall et Gregory donnent dans leur ouvrage un tableau des valeurs "standard" proposées par les différents auteurs pour les différentes plantes (de même que 2 tableaux relatifs aux teneurs correspondant, dans les cas étudiés, à des manifestations de carence ou de toxicité).

Ces "niveaux critiques" et ces "standards", pour avoir quelque valeur, ne peuvent être établis qu'à partir d'une expérimentation étendue et approfondie. La figure 7 donne un exemple de diagramme de corrélation utilisé dans la recherche de la valeur du niveau critique pour un cas donné (il s'agit d'un essai d'application de phosphate bicalcique sur arachide).

Quelle est la valeur de ces références ? Sont-elles utilisables en dehors des conditions exactes où elles ont été obtenues ? Du fait qu'un élément est à un niveau inférieur dans la plante à celui fixé pour l'optimum peut-on en déduire que son apport augmentera la croissance et le rendement ?

On ne peut pas répondre automatiquement par oui ou par non à ces questions. On ne peut pas raisonner automatiquement à partir de ces valeurs erigées en normes rigides. Cela est bien évident. Nous avons vu la complexité des facteurs en jeu qui agissent sur la composition et la croissance de la plante. Nous avons vu surtout que les éléments ne sont pas indépendants les uns des autres. Une teneur x de phosphore, par exemple, n'aura pas la même signification suivant qu'il y aura plus ou moins d'azote dans le tissu considéré. Mais l'expérience a montré - et il y a actuellement une masse considérable d'observations accumulées sur ces questions - que ces valeurs de référence constituaient un instrument de travail, non pas infaillible, mais utilisable et utile.

Si elles ont été obtenues dans des conditions de milieu "normales" pour la plante et à partir d'expériences suffisamment nombreuses et étendues, elles sont susceptibles d'une certaine généralisation, dans des zones raisonnablement comparables. Mais il est certain qu'elles doivent être ajustées dès que les conditions s'écartent vraiment de celles des expériences initiales et, surtout, il est certain qu'il ne faut pas s'attacher trop aux valeurs absolues des éléments en cause, mais aussi aux rapports qui existent entre eux.

3) Interférences et Interactions. Utilisation des Rapports.

En effet, toute variation de la teneur d'un élément minéral à un moment donné entraîne généralement corrélativement une variation, de même sens ou de sens contraire, pour un ou plusieurs autres éléments. On observe ainsi des corrélations entre les teneurs des organes en éléments majeurs et mineurs et la constance pour une plante donnée de certains rapports ou de certaines sommes (somme des cations exprimée en équivalents chimiques, etc). Ces corrélations et ces rapports peuvent varier d'un cas

Variété 24-II (rampante)

Rendement en
gousses kg/ha

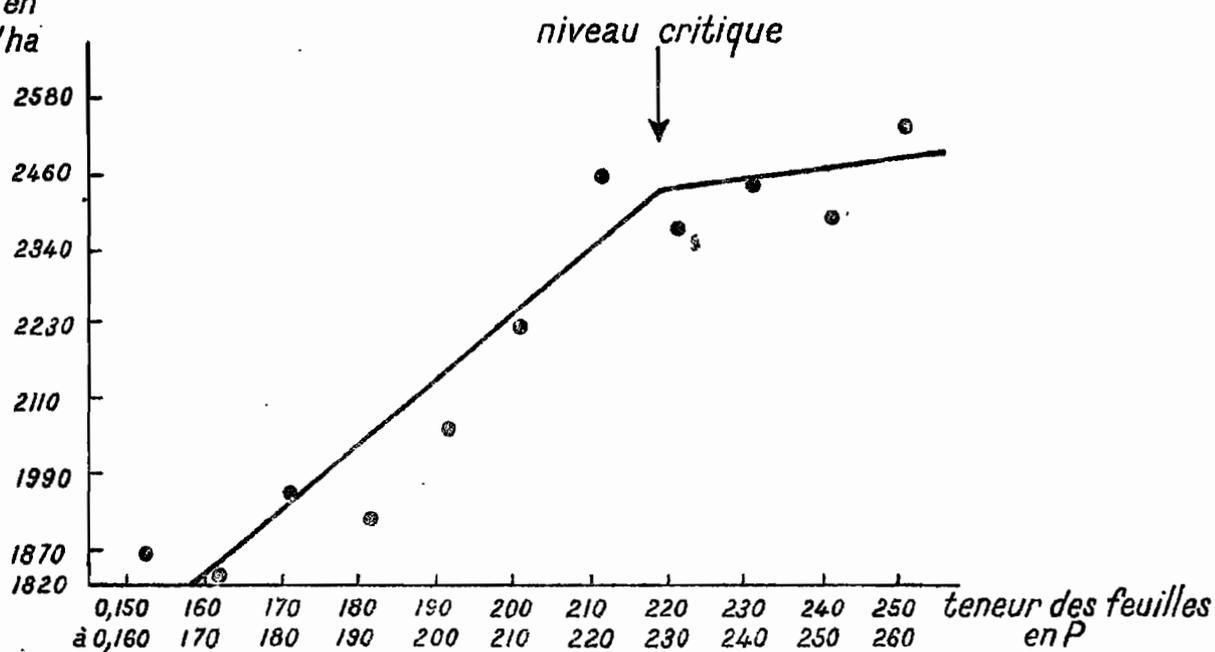


Fig. 7

Teneur en P

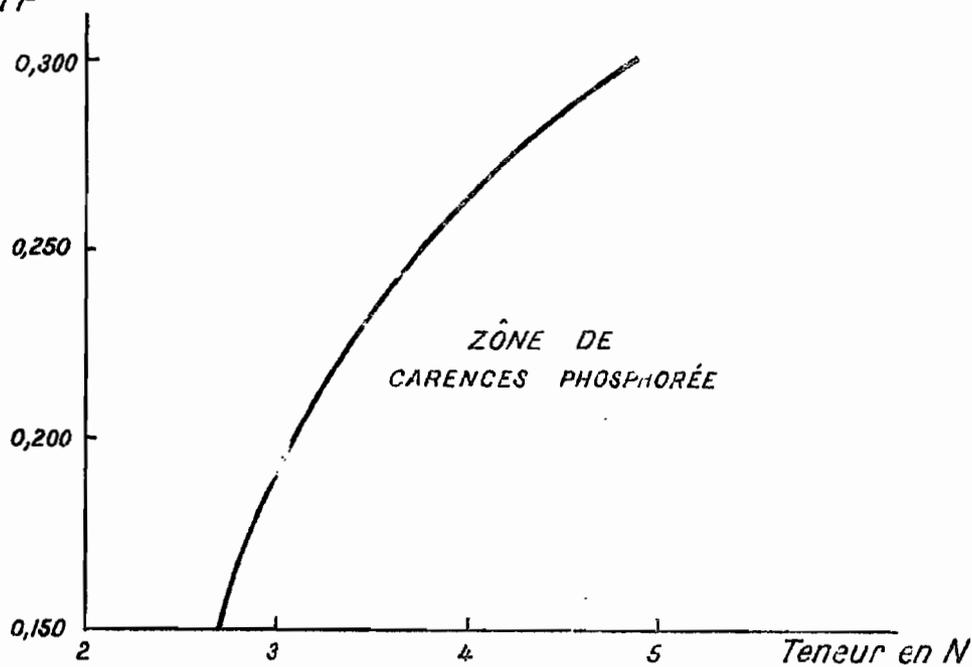


Fig. 8

d'après P. Prévot et M. Ollagnier (1954)

à un autre, mais il s'en dégage quand même des tendances générales qui se retrouvent plus ou moins d'une plante à une autre. Ces interférences traduisent des antagonismes et des synergismes d'ordre réellement physiologiques et inhérents à la plante, antagonismes ou liaisons non seulement au niveau de l'absorption, mais liés au métabolisme. Ils ne peuvent être ramenés à des différences d'absorption dues à des phénomènes d'échange d'ions dans le sol, bien que ceux-ci aient aussi leur importance. L'étude des corrélations dans la plante permet de se rendre compte de la nature des phénomènes en jeu. Ainsi, par exemple, dans le cas très classique de l'antagonisme K/Ca, longuement discuté par Lundegårdh, on voit que si le rapport des concentrations K/Ca est plus petit que 1, l'absorption de Ca est peu influencée par des variations dans les concentrations de K ; c'est l'inverse si ce rapport K/Ca est plus grand que 1. Les mêmes corrélations ont été retrouvées dans ce cas là pour d'autres plantes (palmier à huile, etc). On peut donc supposer qu'il s'agit bien là d'un antagonisme physiologique.

Ces interférences permettent souvent d'interpréter les interactions observées sur les rendements. L'interprétation des résultats de l'analyse foliaire devra en tenir le plus grand compte et, en certains cas, cette notion pourra être intégrée à celle des "niveaux critiques", montrant qu'il n'y a pas une contradiction fondamentale entre les deux points de vue.

Les travaux de Prevot et Ollagnier sur l'azote et le phosphore chez l'arachide en sont un excellent exemple. Pour expliquer des cas d'interférences très caractéristiques entre P et N, ils ont été conduits à proposer pour P des niveaux critiques variant en fonction de la teneur en azote :

Pour N inférieur à 3 % dans la feuille,	Niveau critique de P = 0.175 %
" " compris entre 3 et 4 %	" " " " = 0.200 %
" " supérieur à 4 %	" " " " = 0.225 %

A la suite de ces recherches, des diagrammes ont été tracés :

- a) Figure 8 : Diagramme permettant de juger si l'alimentation phosphorée est suffisante, compte tenu de l'alimentation azotée.
- b) Figure 9 : Diagramme permettant de prévoir l'intensité moyenne de la réponse moyenne à l'application de phosphate bicalcique en fonction du niveau de phosphore et du niveau d'azote dans la feuille.

Lundegårdh a établi des réseaux de courbes semblables pour l'étude des réponses du rendement à l'augmentation des teneurs en K en fonction des valeurs de P, ou à des teneurs en P en fonction des valeurs de N.

- c) Figure 10 : Ce diagramme complète, avec plus de détails, celui de la figure 8.

Goodall et Gregory donnent un tableau des valeurs des rapports entre éléments majeurs, chez un certain nombre de plantes, d'après divers auteurs, en les classant en mauvais, optimum, normal, etc.

Reuther et Smith, passant en revue toutes les interférences rencontrées dans le cas des Citrus, ont insisté sur l'intérêt qu'il y a souvent à avoir une analyse incluant les oligoéléments pour permettre une interprétation complète des résultats, comprenant les corrélations entre oligoéléments et éléments majeurs (Carences en Zn sur des Citrus où la teneur en Ca est anormalement basse, etc). On a noté aussi, par exemple, que, dans le cas du tabac, la déficience en Bore dépendrait plus du rapport Ca/B que de la teneur en Bore elle-même. Lundegardh a montré le rapport existant entre la valeur de K/Ca et la déficience en Mn chez les céréales. Etc.

En plus des corrélations qui lient les éléments majeurs entre eux, ou les éléments majeurs et les éléments mineurs dans un même organe, il peut être important aussi de tenir compte des corrélations entre ces éléments et d'autres constituants de la plante, entre la composition de différents organes, entre la nutrition minérale et d'autres facteurs du milieu, et de les faire entrer dans le cadre de l'interprétation.

4) Intensité et Equilibre.

A cette notion de l'importance des rapports pour la compréhension et l'interprétation des résultats de l'analyse de la plante, on peut rattacher la méthode d'interprétation proposée par l'école du "Diagnostic foliaire" de Montpellier, née des travaux de Lagatu et Maume.

Elle fait bien la distinction entre, d'une part, l'intensité de la nutrition et, d'autre part, son équilibre.

Maume, étudiant le cas de la vigne, remarque d'abord que :

- 1) N, P et K sont normalement en décroissance, en % de matière sèche, à mesure que la feuille vieillit ;
- 2) Ca et Mg, au contraire, sont normalement en croissance.

Il en déduit qu'il n'est pas logique de bloquer les deux groupes d'éléments dans le même raisonnement. De plus, seuls N, P et K jouent un rôle directement "fertilisants" dans le cas considéré. L'interprétation se limitera donc au "Diagnostic foliaire N-P-K".

Si on choisit un exemple où $N = 3.32$, $P^{205} = 0,60$, $K^{20} = 1.04$, nous pourrions tirer de ces nombres deux notions distinctes :

% d'augmentation
de rendement

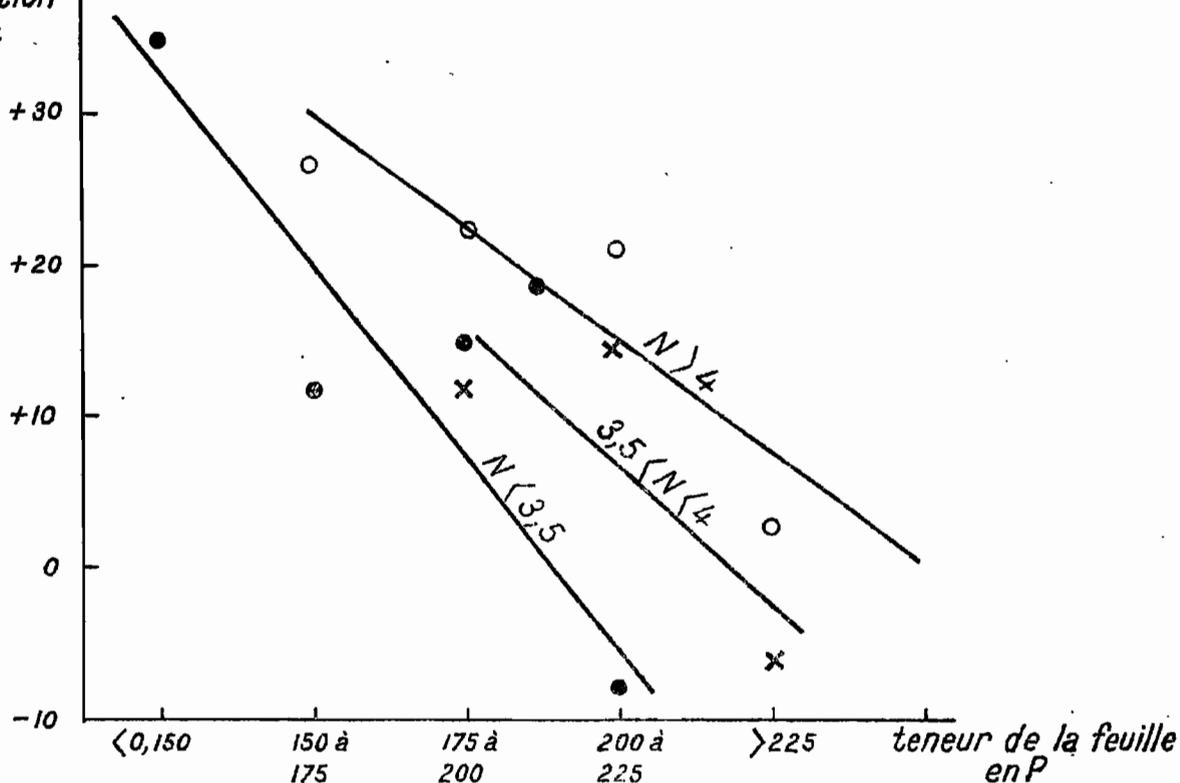


Fig. 9

Teneur en P de la feuille
en % de matière sèche

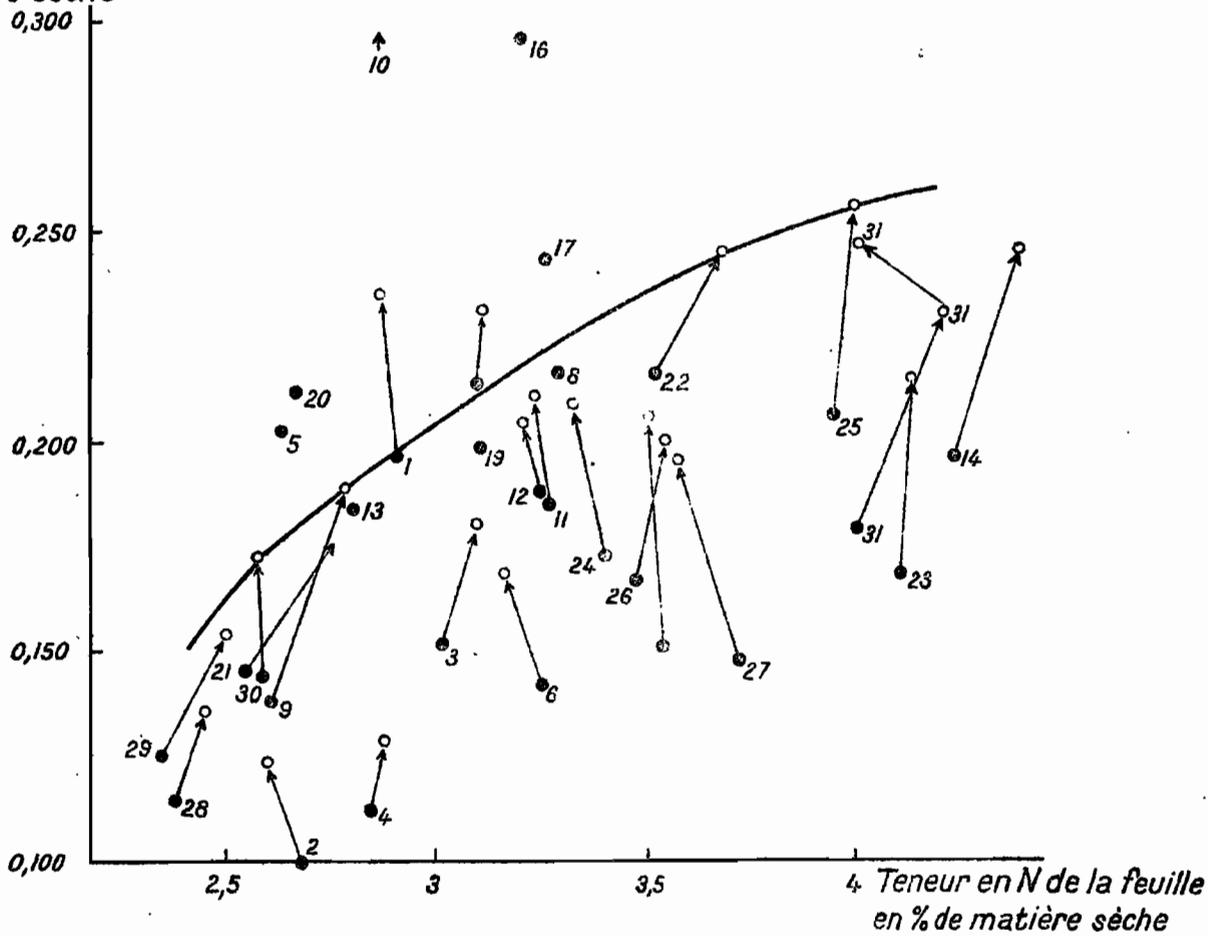


Fig. 10

d'après P. Prévot et M. Ollagnier (1954-1956)

a) Intensité de nutrition et alimentation globale N-P-K :

- L'intensité est donnée par la quantité de N, de P²O⁵ et de K²O % de matière sèche contenue dans la feuille au moment de l'échantillonnage.
- L'alimentation globale N-P-K est la somme des trois teneurs. Ici $3.32 + 0.60 + 1.04 = 4.96 =$ coefficient de l'alimentation globale (indépendant de la nature de l'alimentation N-P-K).

b) L'équilibre N-P-K. Pour l'exprimer, on ramène le coefficient 4.96 à 100 et on calcule la quote-part pour 100 de chacun des trois éléments. Ce qui donne ici :

$$\begin{aligned} N &= 66.94 \\ P^{2}O^{5} &= 12.09 \\ K^{2}O &= 20.97 \end{aligned}$$

Cet équilibre N-P-K est graphiquement exprimé suivant le système de représentation des coordonnées trilineaires : un point marqué à l'intérieur de la surface du triangle équilatéral de côté 100 détermine trois longueurs divergentes comptées parallèlement aux trois côtés jusqu'à la rencontre de ces côtés (Figure 11).

Il s'agissait ensuite d'avoir une idée de la valeur physiologique et agronomique de ces données quantitatives et pour cela, de pouvoir comparer l'emplacement du point représentant l'équilibre N-P-K d'une vigne donnée, une année donnée (moyenne de 4 prélèvements annuels), à un témoin de référence. De nombreuses analyses, faites sur "bons" et "mauvais" vignobles, ont permis d'établir, pour chaque région, un optimum expérimental et de tracer sur le graphique une "zone de bons vignobles", groupant les équilibres des cultures saines et de bonne production, et servant de valeur de référence (Figure 12). Dans chaque cas, on étudie bien entendu pendant plusieurs années le déplacement du point d'équilibre annuel sur le graphique en fonction des traitements et des variations climatiques. La position du point indique la nature des corrections à apporter à l'alimentation de la culture.

Il faut noter que, parallèlement à ce travail d'interprétation fondé sur les rapports entre éléments, l'école de Montpellier a étudié l'alimentation globale et les valeurs absolues individuelles des teneurs en N, P²O⁵ et K²O au cours de la végétation et fixé les teneurs correspondant à une alimentation suffisante, chiffres rejoignant la notion de "niveau critique". Mais ces valeurs n'ont été établies que par la comparaison entre bonnes et mauvaises cultures et à partir d'essais d'engrais fragmentaires. Elles ne reposent pas sur une expérimentation systématique.

Pour rendre compte de la tripartition N-P-K, on préfère le triangle équilatéral, plus parlant, car il rassemble moins les points. Mais les chercheurs de Montpellier se sont servis aussi du triangle rectangle isocèle pour étudier, dans certains cas particuliers, l'équilibre entre N, P_2O_5 et la somme des bases $K_2O + CaO + MgO$ (+ Na_2O dans les terrains salés).

On a reproché malgré tout à la représentation triangulaire de la tripartition N-P-K de ne pas donner beaucoup d'informations dans certains cas, par exemple, quand les fluctuations de P ont une grande importance (comme dans le cas de l'arachide au Sénégal) : les valeurs de N et P sont trop différentes : N étant beaucoup plus grand que P, les fluctuations de P peuvent être masquées par celles de N.

D'autres chercheurs ont insisté aussi dans leur interprétation sur la distinction entre intensité et équilibre, cherchant dans leurs expériences à respecter un équilibre optimum en faisant varier l'intensité. Ce qui n'est guère réalisable que dans des conditions de culture artificielles.

Goodall et Gregory font remarquer que, dans les conditions de culture normales, un bon équilibre des éléments dans la plante pour une intensité d'alimentation trop faible doit en général conduire à penser à un facteur limitant autre que la nutrition minérale.

L'emploi du système des coordonnées trilineaires peut être utile pour l'étude d'autres rapports que celui de l'équilibre N-P-K. Les sommes des cations et des anions sont des données intéressantes dont l'équilibre interne peut s'exprimer ainsi. En effet, Cl et Na (sauf dans les terres salées) peuvent en général être négligés ; on a donc à faire à des sommes de trois termes $N + P + S$ (S a été longtemps négligé, mais les travaux récents ont montré son importance) et $K + Ca + Mg$.

Prévot et Ollagnier (1954) ont étudié ainsi la somme des cations et l'équilibre des éléments à l'intérieur de cette somme pour le palmier à huile. La représentation trilineaire était particulièrement indiquée ici du fait que pour l'Elaéis la somme $K + Ca + Mg$ est en général très constante et voisine de 2 % pour les traitements efficaces. La figure 12 montre la qualité de l'équilibre K-Ca-Mg pour des échantillons provenant de régions très variées. Côte d'Ivoire, Dahomey, Moyen-Congo, Sumatra, Malaisie. Les flèches indiquent l'évolution des rapports sous l'effet des traitements favorables :

1) Les points représentant les équilibres "possibles" ne se répartissent pas au hasard. Aussi, bien avant le rétablissement de l'équilibre qu'après, ils sont localisés à l'intérieur d'une zone étroite, allongée, incurvée, en forme de banane. Pour des situations écologiques extrêmement différentes, les variations ne sont donc pas anarchiques. On peut même relever que les points obtenus ultérieurement par Broeshart au Congo Belge rentrent bien dans cette figure.

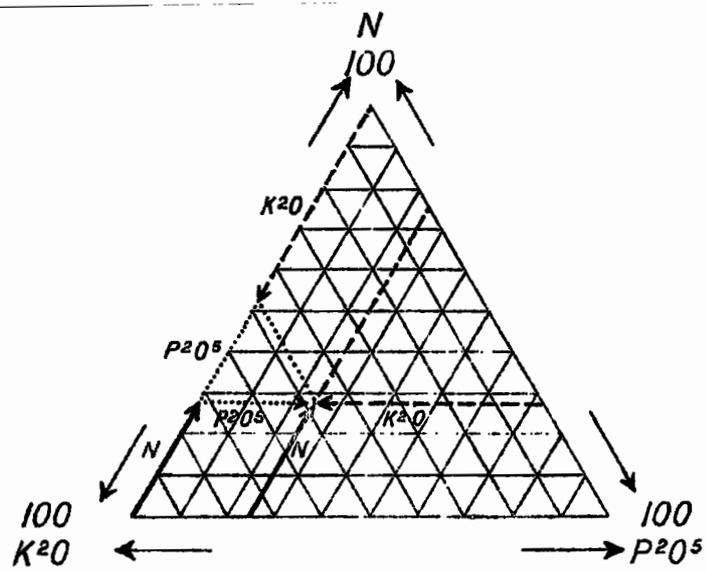


Fig. 11

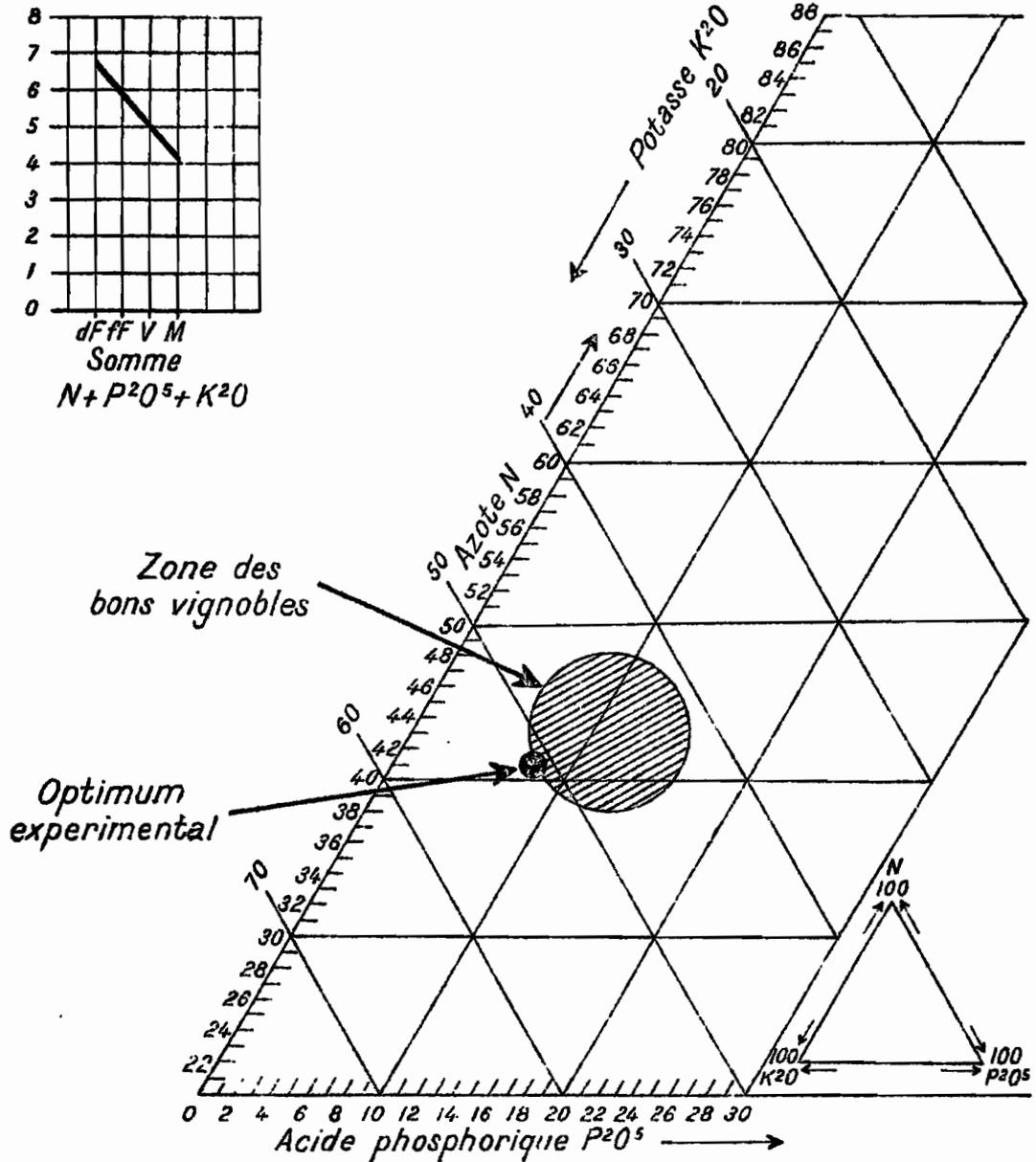


Fig. 12

d'après L. Maume (1951)

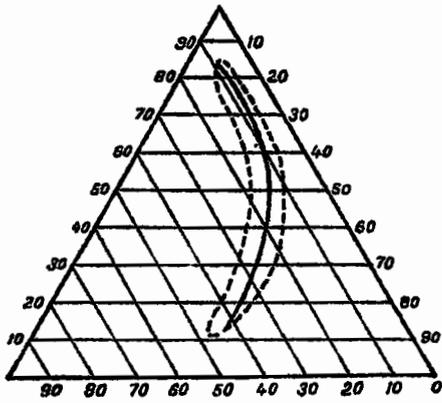
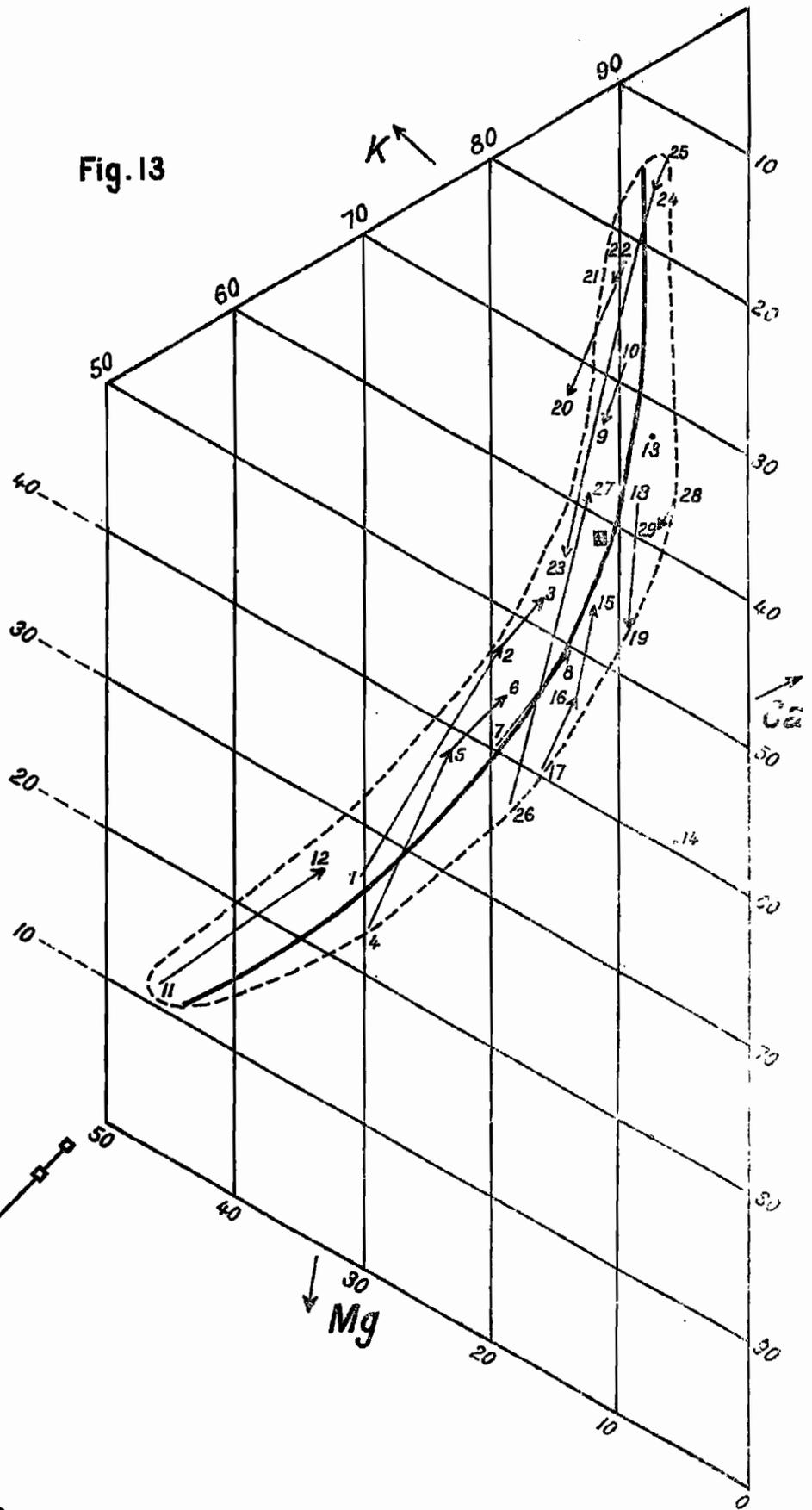


Fig. 13



d'après P. Prévot et M. Ollagnier (1954)

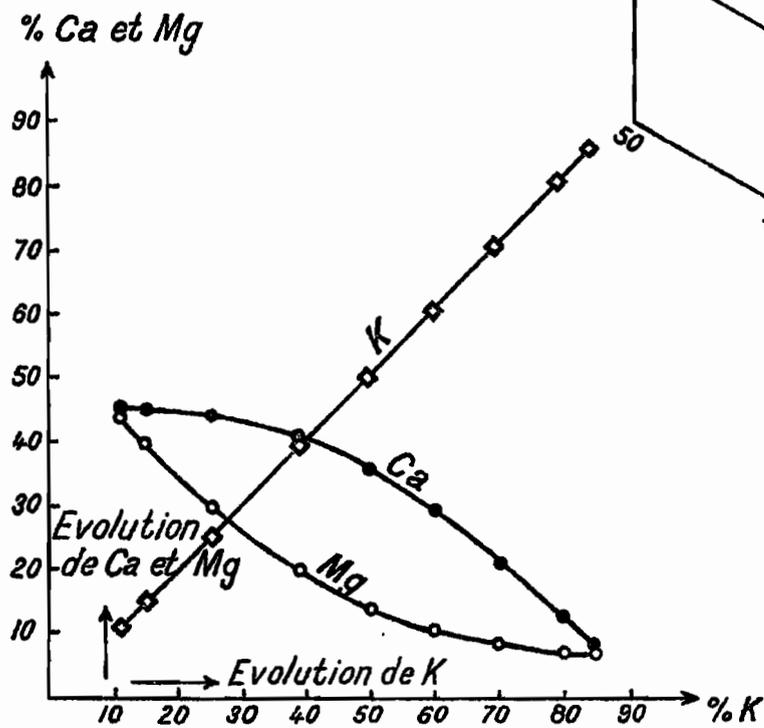


Fig. 14

2) Les résultats expérimentaux ont été ajustés à une courbe du 2^e degré; et, d'après les données de cette courbe d'ajustement, on a traduit la "qualité" de la nutrition en N, P et K par le diagramme de la figure 13.

Trois courbes, une pour K, une pour Ca, une pour Mg, représentent les variations simultanées de Ca ou Mg, lorsque K varie et lorsqu'on se déplace sur la courbe représentée dans la figure 13. On constate que, dans les zones de déficience potassique, lorsque K augmente, il le fait principalement au détriment du magnésium, le calcium restant sensiblement constant.

Les zones de déficience potassique sont des zones d'antagonismes $K \rightleftharpoons Mg$
Les zones d'excès potassique sont des zones d'antagonismes $K \rightleftharpoons Ca$. Dans la zone intermédiaire, il y aurait les antagonismes $K \rightleftharpoons Ca$, $K \rightleftharpoons Mg$ et une liaison Ca - Mg.

3) Les traitements favorables à la production ainsi qu'à l'amélioration de l'état sanitaire font converger la nutrition vers une zone d'équilibres favorables pour laquelle :

	K est compris entre	55 et 66 %
Ca	" " "	23 et 32 %
Mg	" " "	9 et 14 %

L'optimum semble être aux environs de 58 % de K, 12 % de Mg et 30 % de Ca.

Etant donné la grande constance de la somme $K + Ca + Mg$, voisine de 2 %, ces pourcentages optima correspondent, pour des palmiers adultes, à des teneurs de :

K	=	1.15 %	mat. sèche
Ca	=	0.60 %	" "
Mg	=	0.24 %	" "

qui sont en bon accord avec celles que les essais tendent à faire adopter comme niveaux critiques.

5) Assimilation et Utilisation.

Un autre exemple très poussé d'interprétation fondé essentiellement sur l'étude des rapports est celui qui est apporté par la méthode de "diagnostic physiologique", mise a point par E.R. Beauvils pour l'Hévéa, et dont il définit ainsi le principe (1958) :

"Le principe du diagnostic physiologique consiste en l'étude comparative et complémentaire pour un même individu (ou population d'individus) de l'ensemble des équilibres chimiques reflétant son assimilation minérale avec l'ensemble des équilibres chimiques reflétant l'état d'utilisation des éléments absorbés dans le cadre des lois physiologiques qui régissent son métabolisme".

Dans le cas de l'hévéa, l'analyse des feuilles permet l'étude de l'assimilation minérale ; celle des latex et éventuellement des graines l'étude de l'utilisation des éléments minéraux assimilés.

Le fait de fonder la méthode sur cette comparaison lui permet d'être directe et générale ; directe, car on supprime ainsi la nécessité de la référence à un témoin ; générale, car elle peut s'appliquer à n'importe quel moment au "diagnostic" de n'importe quel hévéa. Le "diagnostic physiologique" n'est pas lié à l'expérimentation a priori, mais s'appuie sur les lois qui régissent l'ensemble du métabolisme.

De ses travaux préliminaires, Beaufils a dégagé un certain nombre de données physiologiques qui ont constitué la base de départ pour l'établissement de la méthode.

Ainsi, par exemple, les relations suivantes établies entre les constituants des feuilles (Beaufils, 1956).

" - Toute variation de la teneur d'un élément minéral à un moment donné entraîne corrélativement une variation de même sens ou de sens contraire pour un ou plusieurs autres éléments, quelles que soient leurs importances pondérales relatives.

- Le rapport des deux éléments antagonistes K et Ca peut être considéré comme reflétant, dans une certaine mesure, l'ensemble des équilibres chimiques au niveau des feuilles puisque les variations de l'azote, du soufre, du phosphore, du fer et du cuivre sont rattachées à celles de K et que les variations du Magnésium, du manganèse et du sodium sont rattachées à celles de Ca.

Les éléments du premier groupe cité sont rattachés au système aqueux des feuilles, les éléments du second groupe l'étant à la matière sèche.

- Les variations du rapport K/Ca sont en corrélation inverse hautement significative avec les variations du rapport Mn/Cu à l'échelon oligo-éléments. Cette constatation constitue l'un des critères sur lesquels repose le diagnostic (Critère C₁).

- La rigueur des relations qui se manifestent entre les éléments dans un même groupe ou d'un groupe à l'autre varie au cours de l'année ; ces corrélations apparaissent le plus nettement en Mars (juste après la refo- liation) et en Décembre (juste avant l'hivernage) ; elles ont été trouvées plus irrégulières en Juin et dans des cas de carences minérales.

- Les éléments du "groupe potassium", pondéralement les plus importants lors de la croissance (refoliation), ont ensuite tendance à "migrier", au fur et à mesure que les éléments du "groupe calcium" s'accumulent jus- qu'à l'hivernage. Le cas du magnésium, qui entre en partie dans la consti- tution de la chlorophylle, est ici un peu spécial, car il existe également dans les feuilles sous une forme ionisée susceptible de migrer.

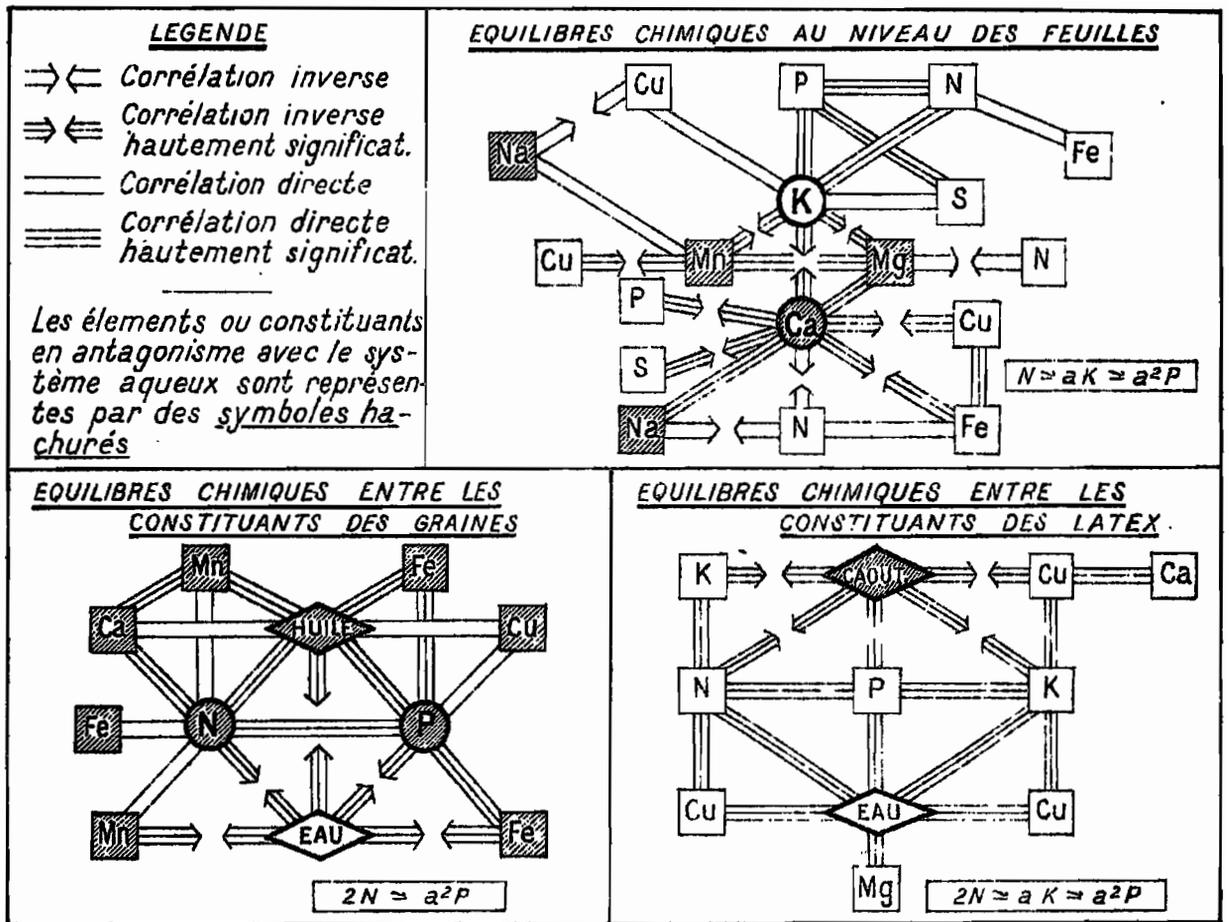


Fig.15 d'après E.-R. Beaufigs (1956)

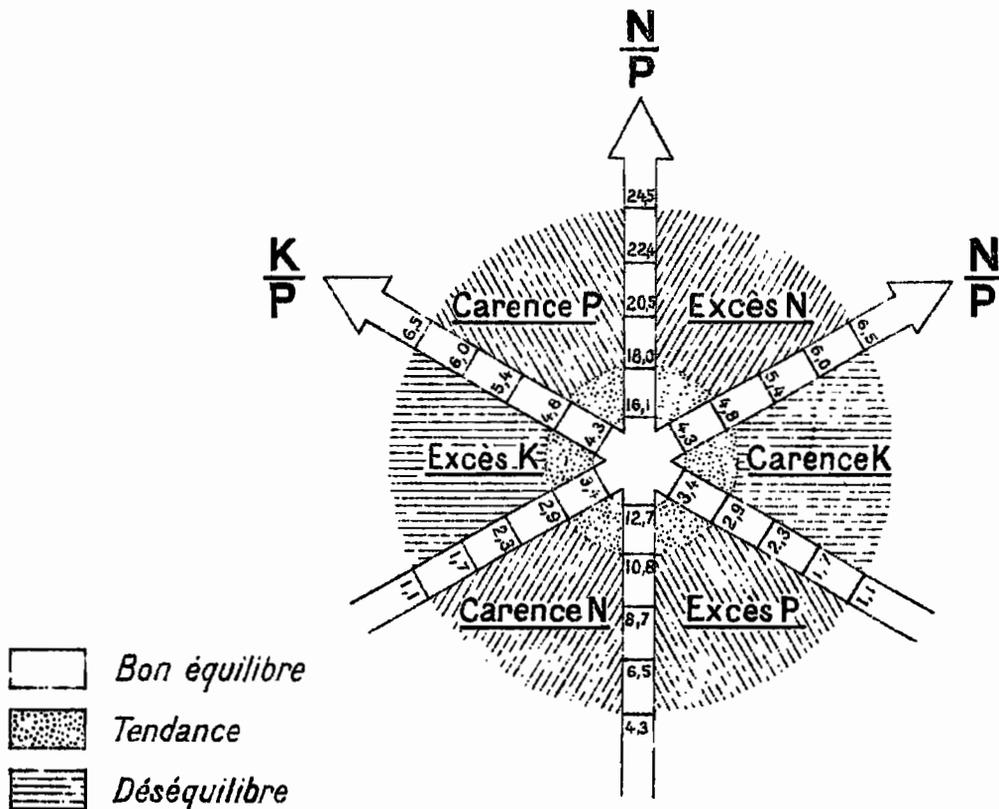


Fig.16 d'après E.-R. Beaufigs (1956)

Notre hypothèse est que cette partie ionisée est déplacée progressivement par l'ion Ca^{++} au fur et à mesure de l'assimilation de ce dernier donnant lieu en particulier à la formation d'un oxalate de Ca plus insoluble donc plus stable que celui de Mg.

- Les éléments N, P et K des feuilles ont pu être reliés entre eux par une formule générale applicable à tous les hévéas quels qu'ils soient à condition que le sol, indépendamment de son origine, puisse répondre à leurs besoins.

On a la relation générale :

$$\boxed{N \simeq a K \simeq a^2 P}$$

formule dans laquelle le coefficient d'assimilation "a" admet une certaine possibilité de variation entre des limites allant grosso modo de $\frac{3}{4}$ à $\frac{4}{3}$.

Cette valeur du coefficient "a" ne varie dans de larges limites que dans les cas de carences minérales ou de déséquilibres physiologiques provoqués par une exploitation particulièrement intense, déséquilibre pouvant être passager ou permanent selon les ressources minérales du sol.

- Le rapport du soufre au phosphore dans les feuilles doit être sensiblement de l'ordre de l'unité :

$$\boxed{S \simeq P} \quad \text{ou} \quad \boxed{S/P \simeq 1.} \quad "$$

D'autres relations du même ordre ont été établies entre les constituants des latex et ceux des graines. Toutes ces données peuvent se résumer par la figure 15.

On peut en tirer les relations suivantes entre les compositions des feuilles, des latex et des graines.

" - Les variations du rapport K/Ca, reflet dans certaines conditions des équilibres minéraux au niveau des feuilles, sont en corrélation inverse hautement significative pour une époque donnée avec les teneurs en Mg des latex (Critères C_2).

- Les variations du rapport K/Ca sont également en corrélation hautement significative mais directe avec les teneurs en caoutchouc des latex (Critère C_3). Les rapports des éléments N, P, K entre feuilles et latex sont assez variables selon les cas, mais ces variations s'effectuent normalement dans le même sens et dans les mêmes proportions réciproques pour

chacun des 3 éléments. Ceci fait que dans des conditions normales de production et de végétation (ni carence, ni stimulation, ni apport d'engrais inconsideré), les valeurs de K feuilles/K latex sont égales à celles de P feuilles/P latex et ont une valeur de moitié inférieure à celles de N feuilles/N latex.

On a la relation suivante :

$$\frac{N \text{ feuilles}}{2 N \text{ latex}} \sim \frac{K \text{ feuilles}}{K \text{ latex}} \sim \frac{P \text{ feuilles}}{P \text{ latex}}$$

Cette relation indique nettement que l'assimilation et l'utilisation normales d'un des éléments N, P ou K est conditionnée par l'assimilation des deux autres dans des rapports reciproques bien déterminés.

Ces rapports prennent des valeurs fortement divergentes entre elles dans des cas de carences minerales ou d'exploitation intensifiée, ce qui est logique puisque ces cas sont à l'origine de tout déséquilibre du métabolisme mineral.

- Les variations des teneurs en caoutchouc des latex et des teneurs en huile des graines sont en corrélation directe hautement significative. Ceci laisse entendre qu'il existe un antagonisme général entre les éléments minéraux des latex variant à l'inverse des teneurs en caoutchouc et ces mêmes éléments minéraux des graines variant dans le même sens que les teneurs en huile. Autrement dit, on peut prévoir une concurrence équilibrée des besoins en éléments minéraux pour l'élaboration du latex d'une part, des graines d'autre part".

Enfin les variations du métabolisme mineral ont pu être mises étroitement en rapport avec la production, la stabilité des latex et la santé des arbres. On peut aussi déceler les déséquilibres et les facteurs limitants pour la production et la qualité du latex, compte tenu de l'influence des facteurs naturels et des conditions de l'exploitation. Et apprecier la nature, l'ampleur et la rapidité des réponses aux traitements correctifs en fonction des stades de développement, des saisons, de la nature des produits utiles, etc. L'utilisation de la méthode dont nous avons vu les principes de base repose essentiellement sur l'établissement d'un certain nombre de rapports traduisant les relations importantes. Les valeurs absolues ne sont données que pour K, qui fixe le niveau des rapports étudiés par la suite. Des schémas du type de la figure 16 sont établis, permettant d'évaluer par lecture directe l'équilibre N-P-K des feuilles et sa signification pour la plante.

Beaufils conclut en disant qu'"Il n'est pas impossible de penser que des méthodes similaires basées sur ces mêmes principes "d'assimilation et d'utilisation comparée" puissent être établies pour d'autres cultures que l'hévéa, en étudiant le métabolisme minéral des feuilles et en le comparant à celui du (ou des) produit final résultant des processus de translocation des éléments minéraux à partir des feuilles". Ce qui revient à proclamer la nécessité de recherches de physiologie de plus en plus poussées sur le réseau complexe de facteurs qui relie le rendement à la composition minérale de la plante, pour que l'utilisation de l'analyse foliaire puisse être de plus en plus étendue et surtout de plus en plus rigoureuse.

6) Qualité des produits récoltés.

Les recherches de Beaufils sont aussi un excellent exemple des travaux prenant en considération et intégrant dans les relations envisagées, non seulement le rendement pondéral, mais aussi la qualité des produits végétaux récoltés. Ce qui a été trop souvent un aspect négligé de la question, tout simplement parce qu'il n'avait souvent pas d'incidence économique immédiate (ce qui n'est évidemment pas le cas de l'hévéa). Mais il semble qu'on devrait s'y appesantir à l'avenir, non seulement par intérêt pour le métabolisme de la plante elle-même, mais du point de vue pratique de la qualité de l'alimentation de l'homme et des animaux.

Certains travaux ont déjà été faits qui tiennent compte, parallèlement à d'autres données, des modifications qualitatives de certains fruits ou de certains légumes par exemple. Il faut penser au rôle des éléments minéraux dans l'élaboration des enzymes, des acides aminés, des vitamines, etc. Des recherches approfondies de cet ordre sont menées entre autres par le professeur SCHUPHAN, à l'Institut de Geisenheim (Bundesanstalt für Qualitätsforschung pflanzlicher Erzeugnisse, Geisenheim, Rheingau).

7) Exemples de cas soulevant des difficultés d'interprétation.

L'interprétation des relations entre la teneur en N et le rendement paraît souvent être assez délicate. On a reproché d'ailleurs aux méthodes d'analyse foliaire de ne pas être capables de rendre compte convenablement des rapports entre la nutrition azotée et le rendement. Or, il semble que ce manque de corrélation apparent puisse - dans certains cas tout au moins - être expliqué d'après la courbe théorique de la figure 2 (Effet de dilution entraîné par une augmentation de croissance importante) et que ces cas puissent faire l'objet d'un mode d'expression particulier capable de mettre en évidence la véritable signification de ces données.

Prévoit et Ollagnier (1956) en ont montré un exemple, toujours à propos de l'arachide. Dans de très nombreuses expériences, l'augmentation de rendement due à la fumure azotée ne s'accompagnait pas d'une augmentation des teneurs en N de la feuille exprimée en % de matière sèche,

souvent même il y ait une diminution. Dans certains cas aussi il y avait augmentation de croissance de la partie végétative, sans augmentation de rendement. Les auteurs ont pensé : que ces expériences se situaient dans les parties "a" et "b" de la courbe théorique de la figure 2. De toute façon l'apport d'azote a souvent une action importante sur la croissance végétative et il fallait intégrer ce facteur dans l'interprétation. Au lieu d'établir la courbe rendement - concentration en N dans la feuille, on a donc tracé la courbe rendement - contenu en N des échantillons de feuilles (= teneur N % mat. sèche x poids sec de l'échantillon). La figure 17 montre l'allure de la courbe obtenue. Le nombre d'échantillons ayant servi à l'établissement des valeurs moyennes est indiqué près de chaque point. Partant de cette relation générale, Prevot et Ollagnier ont tracé la courbe traduisant la relation concentration en N % - contenu en N des échantillons (Fig.18). On peut séparer sur cette courbe une zone de nutrition azotée excédentaire et une zone de nutrition azotée déficitaire. Les auteurs donnent l'exemple suivant et pensent pouvoir affirmer, avec peu de chances d'erreur, que si, par exemple, le pourcentage de N est de 3,30 %, la nutrition azotée sera déficitaire si l'indice total de N de la feuille est de 8 g., excédentaire s'il est de 14 g. et de nouveau déficitaire s'il est de 20 g. (Indice total = Poids sec en grammes de 50 feuilles x teneur en N en % du poids sec).

Il est bien évident que dans des expériences de type agronomique où N est apporté sous forme de sulfate de NH_4 , un accroissement de rendement sans grand effet sur la teneur en N doit parfois faire penser à la correction d'une carence en S.

Il arrive cependant que, pour une plante donnée, des rendements très différents correspondent à des compositions identiques. Ce qui n'a rien de surprenant étant donné le nombre et la complexité des facteurs en jeu. Il faut à ce moment chercher - si les renseignements dont on dispose le permettent - une clef d'interprétation dans l'étude des facteurs autres que la nutrition minérale.

8) Conclusions.

Tous ces exemples ont essayé de donner une idée des ressources et des possibilités dont l'interprétation dispose pour "coller aux faits". La complexité des phénomènes et des relations fondamentales sur lesquelles reposent la validité de ces méthodes, et l'ignorance où nous sommes encore sur bien des points, n'autorisent pas l'application d'un système d'interprétation simple et universel. On ne peut songer à tenir compte exclusivement des valeurs absolues ou exclusivement de certains rapports, etc. Tous les physiologistes qui ont étudié ces questions ont insisté sur ce point : l'interprétation ne peut, en aucun cas, être uniformément simple et se faire automatiquement. Il semble que les reproches les plus graves faits à ces méthodes, non pas du point de vue des recherches de physiologie, mais du point de vue de leur utilisation agronomique, (valeur de la notion de "niveaux critiques", interférence des divers facteurs,

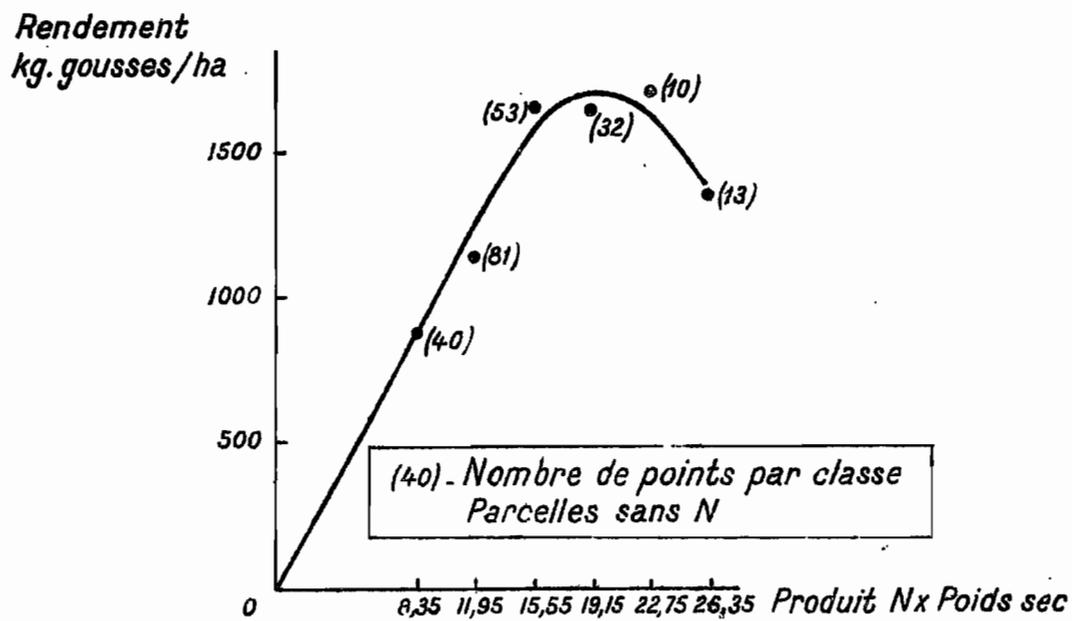


Fig.17

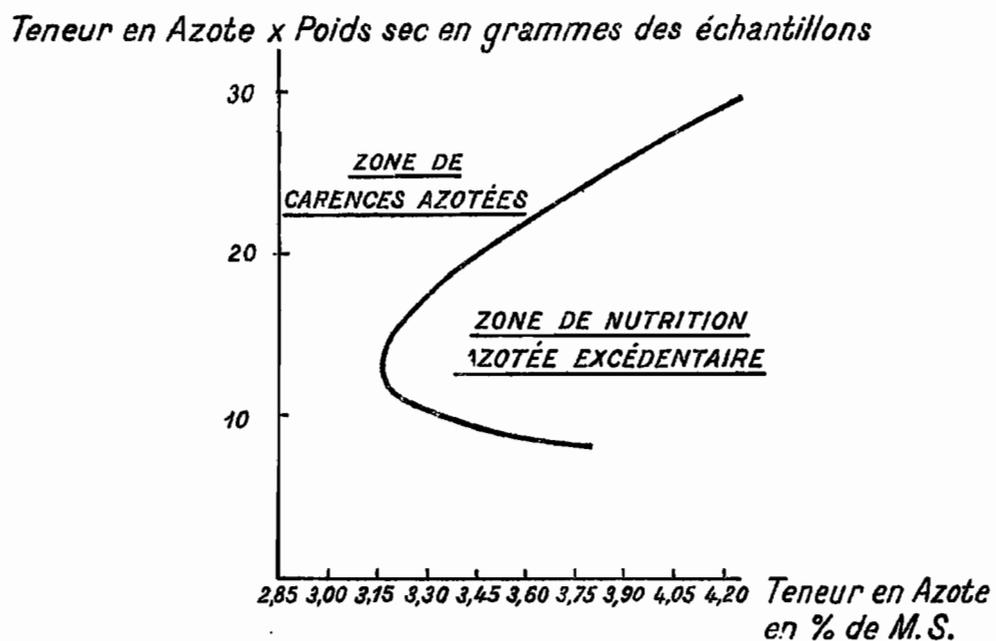


Fig.18

d'après P. Prévot et M. Ollagnier (1956)

difficultés d'interprétation comme dans le cas de la nutrition azotée, etc), proviennent de tentatives d'interprétation trop rigides, axées dans une seule direction. Les résultats obtenus avec des méthodes souples, adaptées à chaque problème et ne perdant pas de vue la signification physiologique des résultats expérimentaux et analytiques, montrent les possibilités de ces méthodes aussi bien pour la compréhension des besoins et du métabolisme de la plante que pour les applications agronomiques.

Il existe cependant des cas impossibles à interpréter d'une manière cohérente avec les informations dont on dispose ou même, tout simplement, dans l'état actuel de nos connaissances. Ils ne paraissent pas suffisamment nombreux pour infirmer l'utilité de ces méthodes.

*

* * .

ROLE ET IMPORTANCE DE CES METHODES

Il est difficile de ranger toutes ces méthodes sous une même dénomination. Lundegardh, à l'origine de ses travaux, utilisait le terme de "Triple analyse", quand l'analyse était faite parallèlement sur le sol, le sous-sol et la plante. Puis il lui substitua celui d'"Analyse foliaire" (Blattanalyse, Leaf Analysis). Lagatu et Maume désignent leur méthode sous le nom de "Diagnostic foliaire". Cette expression, qui au début paraissait donc réservée à l'étude de l'intensité et de l'équilibre de la nutrition N-P-K par une technique particulière (Goodall et Gregory l'emploient encore dans ce sens dans leur ouvrage de 1947), semble s'être généralisée et être actuellement en usage, dans les publications françaises, avec la même signification que le terme "Analyse foliaire", pour désigner tous les travaux de ce genre. Beauvils, dont les recherches sur l'hévéa dépasse le cadre de la feuille et de son assimilation, se sert du terme "Diagnostic physiologique".

Quoi qu'il en soit, ces méthodes, qui recourent à l'analyse chimique de la plante pour en connaître les besoins minéraux, sont loin d'exclure les autres méthodes d'appréciation, qui la complètent ou qu'elles complètent. Tous les auteurs ont insisté sur le danger de l'utilisation universelle d'une méthode unique. Il semble quand même que ce soient ces techniques d'analyse de la plante qui offrent les possibilités d'investigation, sinon toujours les plus rapides et les plus simples, tout au moins les plus générales et les plus sûres, surtout avec les autres techniques pour les épauler. Ce qui paraît souvent vrai, non seulement dans les recherches sur la nutrition minérale, mais dans la pratique agronomique.

De ce point de vue, les essais d'engrais sur le terrain représentent évidemment le test ultime. Mais à vouloir les utiliser seuls, et comme méthode de diagnostic, on rencontre un certain nombre de difficultés. Sous leur forme traditionnelle, ils ne donnent pas de résultats utilisables dans l'année même (ce qui peut être possible avec l'analyse de la plante). Pour pallier à cet inconvénient, on a proposé des techniques d'observations morphologiques faites à des stades précoces et reposant sur les corrélations entre certains caractères de la plante (taux de croissance de la tige, etc.) et le rendement final. On voit tout de suite quelles questions et quelles incertitudes soulèvent la validité de ces corrélations. Elles ne peuvent en tout cas pas être plus sûres que celles que met en jeu l'analyse de la plante. Enfin, les essais sur le terrain représentent une grosse dépense de travail et d'argent.

Une expérimentation sur le terrain, étendue et approfondie, est indispensable, nous l'avons vu, pour mettre au point une technique de diagnostic. Mais, ce travail accompli, il semble que les autres méthodes soient souvent plus appropriées et plus souples pour résoudre les problèmes courants.

Pour ce qui est de la rapidité des réponses à attendre, les essais d'engrais et les méthodes d'analyse de la plante ont souvent les mêmes inconvénients quand il s'agit de plantes annuelles. Pour les plantes pérennes, la supériorité de l'analyse de la plante à ce point de vue est beaucoup plus nette, bien qu'il soit plus difficile et plus coûteux de mettre une technique au point pour des plantes vivaces que pour des plantes annuelles (difficultés pour la constitution d'échantillons valables, influence de toute l'histoire antérieure de la plante qui est plus ou moins bien connue, etc).

Quant à l'analyse du sol, elle est appelée, dans ce genre de recherches, à compléter et à corriger éventuellement les résultats de l'analyse de la plante qui ne peut renseigner sur la nature et l'évolution de la structure des sols dont dépendent aussi les réponses de la plante. L'analyse du sol fournira aussi des données sur la forme sous laquelle les éléments doivent être apportés, etc.

Enfin l'analyse de la plante est, avec les techniques d'injection et d'application directe, le complément normal des méthodes de diagnostic utilisant les symptômes visuels et qui ont, elles, l'avantage de la rapidité et de la simplicité des moyens.

*

*

*

BIBLIOGRAPHIE

- D.R. BEAUFILS - Recherche d'une exploitation rationnelle de l'hévéa d'après un diagnostic physiologique reposant sur l'analyse minérale de diverses parties de la plante - Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales, p. 360-76 - I.R.H.O. - 1956.
- D.R. BEAUFILS - Le Diagnostic Physiologique -
- 1) Sa composition comme méthode d'estimation des besoins des plantes en éléments nutritifs.
Rev. Gén. du Caoutchouc, N° 6, p. 769-74, 1958
 - 2) Conception des recherches et méthodologie. Etablissement de la méthode dans les plantations.
Rev. Gén. du Caoutchouc, N° 7, p. 922-8, 1958.
- A. BOUAT - La fumure de l'olivier. La solution apportée par le diagnostic foliaire - Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales, p. 311-321 - I.R.H.O. - 1956.
- C. BOULD - Recent work on foliar diagnosis in relation to the nutrition of some deciduous trees and soft fruit crops - Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales - p. 299-310 - I.R.H.O. - 1956.
- J.C. CAIN - Some Problems of Foliar Diagnosis for orchard fertilizer recommendations - Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales - p. 23-31 - I.R.H.O. - 1956. .
- CHAPMAN et GRAY - Leaf Analysis and the nutrition of the oil palm - Annals of Botany - 13 - 52 - p. 415-433 - 1949.
- H.F. CLEMENTS - G. SHIGCURA - D.K. AKAMINC - Factors affecting the growth of the Sugar cane - Univ. Hawai Ag. Expt. Stat. Technical Bull - N° 18 - p. 1-90 - 1952.
- M. FERRAND - L'analyse des plantes et la pratique agricole - Analyse des plantes et problèmes des engrais minéraux - p. 169-76 - I.R.H.O. - 1954.
- M. FERRAND - Sur l'utilisation actuelle du diagnostic foliaire en Afrique - C.R. Ac. Agri. - N° 16 - p. 767-72 - 1956.

- D.W. GOODALL - F.G. GREGORY - Chemical composition of plants as an index of their nutritional status - Imp. Bureau of Horticulture and Plantation crops - Techn. Com. N° 17 - 1947.
- P. GOUNY - Observations sur les relations entre la composition minérale de la plante et le rendement - Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales - p. 87-103 - I.R.H.O. - 1956.
- L. HERSCHBERG - Leaf composition in relation to nitrogen and phosphorus requirements of citrus trees in Israël - Analyse des plantes et problèmes des engrais minéraux - p. 67-77 - I.R.H.O. - 1954
- E.J. HEWITT - Some aspects of the relationships of nutrient supply to nutrient uptake and growth of plants as revealed from nutrient culture experiments - Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales - p. 104-18 - I.R.H.O. - 1956.
- F. LABOUY - Etudes expérimentales sur les courbes de poids d'Aspergillus Niger en fonction de la composition du milieu nutritif. Etude particulière du coefficient d'action du magnésium - Thèse, Paris 1942.
- LAGATU et MAUME - Diagnostic de l'alimentation du végétal par l'évolution chimique d'une feuille convenablement choisie - C.R. Ac. Sci. T. 182 - p. 653 - 1926.
- J. LAVOLLAY - Le Magnésium (Etudes sur son intervention dans quelques phénomènes biochimiques et sur les principes de son rôle agronomique) - Ed. Hermann, Paris - 1936.
- H. LUNDEGÅRDH - Leaf analysis - (Trad. R. L. Mitchell) - Hilger et Watts Ltd. London, 1951.
- P. MACY - The quantitative mineral nutrient requirements of plants - Plant Physiol. - 11 - p. 749-64 - 1936.
- L. MAUME - J. DULAC - Sur quelques principes de biochimie et leur application à l'estimation de la valeur alimentaire d'un milieu cultivé pour une plante donnée - C.R. Ac. Sc. T. 231 - p. 915-6 - 1950.
- L. MAUME - Le contrôle biochimique de l'alimentation de la vigne : diagnostic foliaire - Bull. Techn. Inf. des Ingénieurs des Services Agricoles - N° 56 - 1951.

- L. MAULÉ - Sur le contrôle biochimique de la nutrition des plantes cultivées - Bull. Tech. Inf. des Ingénieurs des Services Agricoles - N° 81 - p. 487-94 - 1955.
- P. PREVOT - Croissance, développement et nutrition minérale de l'arachide - I.R.H.O. - Série scientifique N° 4 - 1950.
- P. PREVOT - M. OLLAGNIER - Diagnostic foliaire du palmier à huile et de l'arachide - Analyse des plantes et problèmes des engrais minéraux - p. 239 - I.R.H.O. - 1954.
- P. PREVOT - M. OLLAGNIER - Méthode d'utilisation du diagnostic foliaire - Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales - p. 177-92 - I.R.H.O. - 1956.
- W. REUTHER - P.F. SMITH - Leaf analysis as a guide to the nutritional status of orchard trees - Analyse des plantes et problèmes des engrais minéraux - p. 108-19 - I.R.H.O. - 1954.
- D. SCHEIDECKER - P. PREVOT - Nutrition minérale du palmier à huile à Pobé - Oléagineux, 9è An., N° 1, Fasc. 81, p. 13-19 - 1954.
- W. SCHUPHAN - Gemüsebau auf Ernährungswissenschaftlicher Grundlage - Ed. Keune, Hambourg, 1948.
- F. STEENBJERG - Manuring and plant production - Analyse des plantes et problèmes des engrais minéraux - p. 138-40 - I.R.H.O. - 1954.
- C.O. TAMM - A study of forest nutrition by means of foliar analysis - Analyse des plantes et problèmes des engrais minéraux - p.165-68 I.R.H.O. - 1954 -
- W. THOMAS - W.B. MACK - Misconceptions relative to the method of foliar diagnosis - Proceeding of the Amer. Soc. for Hort. Science - Vol. 44 - p. 355-61 - 1944 -
- A. ULRICH - Plant analysis as diagnostic procedure - Soil Sci., 55, p. 102, 1943 -

*

* *

Pour la bibliographie détaillée, par plante, des publications relatives aux travaux d'"analyse foliaire" - au sens large - voir brochure spéciale.

TESTS RAPIDES

L'analyse chimique complète du matériel végétal nécessite des manipulations longues et délicates. Il s'écoule obligatoirement un temps assez long entre la récolte de l'échantillon d'une part, l'interprétation et l'utilisation des résultats d'autre part. On a essayé de réduire au maximum ce délai, ce qui est d'un intérêt évident dans bien des cas, notamment pour la pratique agronomique.

D'une part les techniques modernes ont apporté des méthodes d'analyse de plus en plus rapides pour l'analyse complète de la plante (spectrographie, etc ...).

D'autre part les chercheurs ont étudié des méthodes de tests chimiques rapides. Les travaux les plus anciens sur ce sujet sont des travaux américains remontant aux environs de 1925 (travaux de la Purdue University). Morgan (1935) a mis au point une méthode de tests rapides pour les sols, devenue classique, et qu'il a appliquée ensuite aux extraits végétaux. Ces recherches ont été reprises par de nombreux auteurs, entre autres, d'une manière systématique et approfondie, à Long Ashton, par Nicholas.

o

o o

A - PRINCIPE DES METHODES DE TESTS RAPIDES -

L'analyse chimique complète des échantillons végétaux, telle que nous l'avons envisagée dans le chapitre précédent, permet d'apprécier avec précision la quantité totale des éléments présents dans les organes analysés. Les tests chimiques rapides ne visent, eux, qu'à déterminer certaines fractions des éléments minéraux totaux sur le matériel végétal frais. Dans des conditions strictement standardisées, les données ainsi obtenues sont reproductibles et peuvent refléter d'une façon valable l'état minéral de la plante. Mais les résultats, comparables à l'intérieur d'une même espèce, ne peuvent avoir qu'une valeur qualitative ou très grossièrement quantitative.

Bien entendu ces procédés ne constituent qu'un cas particulier à l'intérieur des méthodes fondées sur l'analyse de la plante. Ils posent donc les mêmes problèmes fondamentaux (corrélation avec la croissance et le rendement, etc) et exigent les mêmes recherches et

les mêmes précautions lors de leur mise au point, pour une plante donnée et dans une situation donnée (choix des organes à prélever, choix des époques de récolte, etc).

Suivant les techniques choisies, les opérations requises par les tests rapides peuvent être toutes faites sur le terrain ou nécessitent certaines manipulations en laboratoire.

o

o o

B - TECHNIQUES MISES EN OEUVRE -

1) Choix des organes.

Toutes les considérations du chapitre précédent sont valables. Dans le cas des tests rapides, on choisit cependant le plus souvent des pétioles, des portions de tiges, et parfois des nervures centrales. Certains auteurs ont émis l'hypothèse qu'il y aurait dans ces organes de translocation plus d'éléments non assimilés que dans les limbes et qu'ils seraient de ce fait de meilleurs "miroirs" de la nutrition minérale de la plante. Nous avons vu que cette opinion, sauf dans certains cas, n'était souvent pas confirmée par les faits (en partie sans doute à cause des variations de composition importantes de la sève brute sous l'influence des conditions météorologiques). Il n'en reste pas moins que les corrélations entre la teneur de ces organes en éléments minéraux et l'ensemble du comportement de la plante sont généralement suffisamment bonnes pour qu'ils soient utilisables à des fins de diagnostic. Ce qui fait qu'on les emploie, de préférence aux limbes foliaires, dans la pratique des tests rapides, quand l'extraction est faite directement sur le terrain ; en effet, ils contiennent d'habitude moins de pigments que les limbes et donnent des extraits plus faciles à traiter. Si on fait l'extraction par macération dans un broyeur électrique au laboratoire, la faveur revient de nouveau généralement aux limbes, comme pour l'analyse complète. Par contre, si on travaille sur coupes, la préférence va aussi, pour des raisons de manipulations, aux tiges et pétioles.

2) Techniques d'extraction.

a) Jus de presse.

Dans certaines méthodes de tests rapides, on conseille de broyer le matériel frais dans une presse à main et de travailler sur le jus de presse ainsi obtenu et filtré à travers une mousseline ou une soie

à bluter. La composition du jus est affectée par la valeur de la pression mise en jeu et les variations dans le temps nécessaire pour atteindre cette pression. On augmente la reproductibilité en tuant au préalable les tissus par congélation, traitement à l'éther, etc (ce qui complique gravement les opérations dans une méthode qui par définition doit être rapide). Malgré tout il est difficile de standardiser les conditions de manière à obtenir des jus de presse vraiment comparables. Nicholas (1956) estime qu'aucun de ces procédés n'a donné de résultats vraiment dignes de confiance.

On a étudié aussi, sans plus de succès, des écoulements de sève "naturels" (tiges sectionnées, etc).

b) Liquides d'extraction.

On utilise généralement des extraits préparés à partir du matériel végétal frais traité par un liquide d'extraction approprié :

- L'eau froide, et surtout l'eau bouillante ont donné de bons résultats dans certains cas.
- Les acides organiques aussi. Beaucoup d'auteurs, à la suite d'Emmert, ont utilisé l'acide acétique en solution à 2 %.
- Les acides minéraux dilués ont été employés aussi. Nicholas signale qu'on se sert à Long Ashton de l'acide chlorhydrique redistillé 6 N pour l'extraction des métaux lourds quand ils sont présents en grande quantité.
- D'autres solvants ont été essayés (alcool éthylique, etc)
- Les solutions tamponnées fournissent de très bons agents d'extraction.

La solution mise au point par Morgan, en 1935, pour les sols : acide acétique-acétate de soude (pH = 4.8) est classique. Elle convient tout aussi bien au traitement du matériel végétal.

Des comparaisons statistiques ont été faites à Long Ashton entre les résultats obtenus à partir d'échantillons traités par des solutions tampons diverses pour l'extraction de N nitrique, P, K, Mg et Ca (acétate, citrate, succinate, malonate). C'est à partir des extraits donnés par la solution de Morgan qu'on a trouvé les résultats concordant le mieux avec les données du rendement, de l'analyse complète de la plante et des symptômes visuels.

- Certains auteurs, en particulier les chercheurs de la Purdue University (Thornton, etc), ont pris comme liquide d'extraction les réactifs servant à la détection des éléments (cobaltinitrite pour K, molybdate d'ammonium pour P, diphénylamine + acide sulfurique pour N nitrique, etc).

c) Procédés d'extraction.

Ils sont de deux types :

- Diffusion des éléments facilement solubles dans le liquide d'extraction à partir du matériel frais finement divisé à la main ;
- Macération dans le liquide d'extraction du matériel divisé par un broyeur électrique du type "Mixer".

Seul le premier procédé est utilisable sur le terrain.

Nicholas a publié les résultats de comparaisons systématiques entre les différents procédés d'extraction pour différentes plantes.

3) Tests chimiques.

Toutes les réactions utilisées aboutissent à des mesures colorimétriques ou turbidimétriques. L'utilisation sur le terrain exige que les manipulations soient simples et les réactions autant que possible spécifiques, pour éviter toute opération de séparation. Le fait que les extraits sur lesquels on travaille ne contiennent que de petites fractions des éléments présents et sont assez dilués, facilite les choses en réduisant les risques d'interférence entre éléments.

Les réactions colorées ou turbidimétriques peuvent être appréciées sur le terrain, à l'oeil, par comparaison avec des échelles de teintes ou par des tests de transparence (système utilisé par Morgan). On peut aussi, sur le terrain ou au laboratoire, se servir de certains modèles de comparateurs ; ou enfin, au laboratoire seulement d'appareils permettant des mesures colorimétriques ou turbidimétriques plus précises.

Nicholas estime que les déterminations sur le terrain faites à Long Ashton sont précises et reproductibles à 10 % près. Au laboratoire, avec extraction dans un "Mixer", etc, la précision des tests rapides est bien entendu meilleure.

Morgan souligne qu'on ne peut utiliser les échelles de référence que pour des comparaisons à l'intérieur d'une même espèce, les résultats des tests variant avec les caractéristiques chimiques propres à chaque plante.

4) Indications techniques pratiques.

Les indications qui suivent sont tirées essentiellement des travaux de Morgan et de ceux de Nicholas, ainsi que de la mise au point technique faite par l'I.R.H.O. Elles ne sont prévues que pour l'utilisation sur le terrain, avec un minimum de matériel.

a) Préparation des réactifs.

- Réactif d'extraction de Morgan : 100 g. Acetate de sodium p.p.a
500 cc Eau distillée
30 cc Acide acétique cristallisable
q.s. 1 litre, eau distillée.
- Dosage de l'azote nitrique : 40 mg. Diphénylamine pure
100 cc Acide sulfurique p.p.a

- Opérer la dissolution à une température n'excédant pas 24°.
- La solution obtenue ne doit présenter aucune trace de coloration bleue et donner des "blancs" incolores si on ajoute 5 gouttes de réactif à de l'eau distillée. Si l'acide sulfurique contenait des traces de nitrates, on s'en débarrasserait par chauffage avec 5 % de chlorure de potassium.
- Le réactif ne se conserve pas longtemps (action de la lumière, contaminations accidentelles, etc). Faire des essais à blanc.
- Il ne doit évidemment pas entrer en contact avec du caoutchouc ou du liège.

- Dosage de l'azote ammoniacal (Réactif de Nessler). Faire dissoudre 5 g. d'iode de potassium dans 15 cc. d'eau distillée, à chaud, au bain-marie. Ajouter une solution saturée de chlorure mercurique jusqu'à formation d'un léger précipité. Ajouter 40 cc. d'une solution de potasse à 50 %. Amener à 50 cc. Laisser reposer pendant une semaine. Décanter. Conserver en flacon brun. Deux gouttes de ce réactif ajoutées à 5 gouttes de solution d'extraction doivent donner un mélange incolore.

- Dosage du phosphore : Réactif A - (a) Faire dissoudre 12 g.5 de molybdate de sodium p.p.a dans 100 cc d'eau distillée en chauffant doucement.
 - (b) Mélanger 50 cc d'acide acétique cristallisable et 350 cc d'eau distillée dans un bécher de 600 cc.
 - Verser (a) dans (b), doucement et en agitant constamment.
 - Conserver en bouteille brune.

Réactif B - Broyer dans un mortier : 1 partie de chlorure stanneux p.p.a
4 " " " de potassium
p.p.a

- Le réactif lui-même doit être préparé frais chaque jour en mettant 100 mg. du mélange précédent dans 10 cc. de réactif d'extraction de Morgan.

- Dosage du potassium : Réactif A - (1) Dissoudre 5 g. de Nitrate de Cobalt et 30 g. de Nitrite de sodium dans 50 cc. d'eau distillée additionnée de 2 cc.5 d'acide acétique cristallisable. Amener à 100 cc. avec de l'eau distillée. Laisser reposer 24 heures. Filtrer. Conserver en bouteille brune.

Ce réactif se conserve mal. Il doit être utilisé dans les 3 semaines suivant sa préparation, aéré avant usage et gardé au réfrigérateur.

- (2) On peut aussi : -Broyer dans un mortier

1 partie de Cobaltinitrite de sodium p.p.a
1 " " Nitrite " "

Au moment de l'emploi, prélever 2 g. de ce mélange et amener à 10 cc. avec du réactif d'extraction de Morgan.

Réactif B : 90 cc. Alcool isopropylique
10 cc. Formol neutralisé

- Dosage du Calcium : Solution saturée d'oxalate de sodium p.p.a

- Dosage du Magnésium : Deux procédés :

(1) - Réactif A₁ : Dissoudre 100 mg. de para-nitrobenzène-azo-résorcinol dans 2 cc. de NaOH 1 %. Amener à 200 cc.

- Réactif A₂ : Dissoudre 150 mg. de jaune de titane dans un mélange de 50 cc d'alcool méthylique et de 50 cc d'eau distillée. Ne pas conserver plus de 3 à 5 mois.

La qualité du jaune de titane livrée par le commerce est variable. Il peut être nécessaire de le recristalliser. Il faut vérifier souvent, avec des solutions titrées de magnésium et des quantités convenables de réactif, les échelles de teintes de référence.

- Réactif B : Dissoudre 15 g. de soude dans 100 cc. d'eau distillée.

(2) - Réactif a : 80 mg de thiazol
75 cc alcool éthylique
25 cc eau distillée

- Réactif b : 15 g. Soude en pastilles p.p.a
100 cc Eau distillée

b) Echelles de Référence.

Des échelles de référence ont été mises au point et publiées : échelles de teintes pour les réactions colorées et grilles de lignes plus ou moins fines à examiner par transparence à travers le liquide pour les réactions turbidimétriques. Les secondes sont faciles à reproduire d'après un modèle. Ce travail est plus délicat pour les premières qui doivent d'ailleurs être conservées à l'abri de la lumière et de l'humidité. Chaque teinte peut évidemment en principe être repérée par son numéro dans un code universel des couleurs. Mais la seule méthode sûre consistera souvent - si on ne dispose pas d'échelles de teintes toutes prêtes, parfaites et en bon état - à refaire ces échelles à partir des réactifs utilisés et de solutions titrées des éléments. De toute façon, Morgan conseille aux opérateurs de travailler d'abord sur des solutions témoins pour se familiariser avec les teintes et les turbidités correspondant aux différentes teneurs. Il recommande de préparer les solutions témoins suivantes :

Azote nitrique : 0 g.607 de nitrate de sodium p.p.a dilués à 100 cc
avec le réactif d'extraction

Azote ammoniacal : 1 g.180 de sulfate d'ammonium p.p.a " " "
" " "

Phosphore : 0 g.045 de phosphate monosodique p.p.a $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ "
" " "

Potassium : 0 g.764 de chlorure de potassium p.p.a " " "
" " "

Calcium : 8 g.808 d'acétate de calcium p.p.a $\text{Ca} (\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)^2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ " "
" " "

Magnésium : 1 g.766 d'acétate de magnésium p.p.a $\text{Mg} (\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)^2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ "
" " "

Il faut amener les volumes suivants de ces solutions témoins à 200 cc avec du réactif d'extraction pour obtenir, en les essayant comme des extraits de plante, les réactions correspondant aux classes de teneur en éléments suivantes :

	Quantité de solution témoin pour obtenir les réactions correspondant aux teneurs.		
	Fortes	Moyennes	Faibles
Azote Nitrique	2 cc	0,6 cc	0,2 cc
Azote Ammoniacal	2	0,6	0,2
Phosphore	2	0,6	0,2
Potassium	2	1	0,6
Calcium	4	2	1
Magnésium	2	0,6	0,2

c) Matériel nécessaire.

En plus des réactifs et des échelles de référence, un nécessaire pour faire des tests rapides sur le terrain devra comprendre :

- 1 paire de ciseaux, 1 canif et 1 crayon à verre ;
- du papier filtre sans cendres ;
- 2 plaques de porcelaine à 8 ou 12 cavités de 20 mm. env. de diamètre ;
- des petits entonnoirs de 4 cm de diamètre (qui peuvent être en matière plastique) ;
- des compte-gouttes calibrés ;
- des petits agitateurs ;
- 1 éprouvette graduée de 10 cc ;
- 1 bloc porte-tubes et des tubes à essai de 60 mm x 10 et de 60-70 mm x 20 ;
- des bouchons s'adaptant à ces tubes ;
- 1 mesure calibrée pour le prélèvement des échantillons, d'une contenance de 3 cc environ (en matière plastique ou en porcelaine).

d) Extraction.

On découpe l'échantillon le plus finement possible, par petits fragments de 2 - 3 mm de côté. On homogénéise. On remplit à ras le petit creuset qui sert de mesure. Morgan opère sur un volume de 2 - 3 cc. de fragments de tissus, Nicholas sur 4 g. Morgan met l'échantillon dans un tube à essai bouché avec 10 cc du réactif d'extraction, agite vigoureusement pendant une minute, puis filtre et homogénéise le filtre. Nicholas immerge l'échantillon pendant 15 minutes dans le réactif d'extraction et procède ensuite de la même manière. L'essentiel est d'opérer toujours dans des conditions rigoureusement standardisées et de ne comparer entre eux que des résultats obtenus par des moyens rigoureusement semblables.

L'extrait est d'habitude clair, mais il peut arriver qu'il soit coloré par des pigments, des tannins, etc. Nicholas indique qu'on peut alors le décolorer en utilisant 200 mg. d'un charbon spécialement purifié pour 25 cc. d'extrait. On agite avec une baguette de verre pendant 30 secondes, puis on filtre. Pour préparer du charbon purifié, on le fait bouillir avec de l'acide chlorhydrique 5 N et on rince ensuite avec de l'eau distillée chaude jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de trace de chlore dans l'eau de lavage. L'addition de chlorure de sodium facilite l'élimination des phosphates du charbon. Après séchage, on peut analyser le charbon pour déterminer les traces d'éléments qui peuvent encore s'y trouver.

e) Exécution des Tests.

Azote nitrique : Dans une cavité de la plaque de porcelaine, mettre dans l'ordre :

- 1 goutte d'extrait végétal
- 4 gouttes du réactif approprié
- Laisser reposer 2 minutes
- Remuer avec un agitateur de verre et faire la lecture avec l'échelle de teintes. Il n'est pas recommandé d'agiter tout de suite après l'addition du réactif, la couleur bleue se développant très rapidement dans la zone de contact entre le réactif et l'extrait. On peut avoir des teintes plus accentuées en attendant plus de 2 minutes, mais normalement l'échelle de référence est établie sur cette base de 2 minutes d'attente.

Azote ammoniacal : Dans une cavité de la plaque de porcelaine, mettre dans l'ordre :

- 5 gouttes d'extrait végétal
- 2 gouttes du réactif approprié
- Laisser reposer 1 minute
- Remuer avec un agitateur de verre et faire la lecture avec l'échelle de teintes. Il faut 2 gouttes de réactif pour assurer la neutralisation de l'acidité de l'extrait, ce qui permet à une coloration stable de se développer.

Phosphore : Dans une cavité de la plaque de porcelaine, mettre dans l'ordre :

- 10 gouttes d'extrait végétal
- 1 goutte de réactif A
- 2 gouttes de réactif B
- Laisser reposer 1 minute
- Remuer avec un agitateur de verre et faire la lecture avec l'échelle de teintes. Si on ajoute plus d'une goutte de réactif A, le test donne des résultats anormalement forts. Si on utilise plus de 2 gouttes du réactif B ou si ce réactif contient plus de chlorure stanneux qu'il n'est prévu, on obtient un bleu sale et verdâtre.

Le délai d'une minute doit être respecté. Au delà, après un temps de repos plus long, même le réactif d'extraction seul donne une coloration bleue.

La présence de fongicides organo-mercuriques ou d'arsenic fausse le test ou gêne la réaction.

Il ne doit pas y avoir de précipité dans le réactif A.

Potassium : Mettre successivement dans un petit tube à essai (60 mm x 10) :

- 10 gouttes d'extrait végétal
- 1 goutte de réactif A
- 12 gouttes de réactif B (8, d'après Morgan)
- Attendre 1 minute
- Agiter. Pour que les résultats soient homogènes, l'agitation du tube doit être faite avec un mouvement de pendule et pendant une minute, dans des conditions standardisées.
- On compare les troubles orangés produits. Pour cela, on tient le tube verticalement, le fond posé sur la carte et, plaçant l'oeil au-dessus du tube, on observe les différents groupes de lignes jusqu'à ce qu'on trouve celles qui sont à peine perceptibles. Celles-ci indiquent le résultat.

Calcium : Dans un petit tube à essai (60 mm x 10), mettre dans l'ordre :

- 10 gouttes d'extrait végétal
- 1 goutte du réactif approprié
- Agiter énergiquement.
- Attendre 5 minutes et faire la lecture. On évalue le trouble blanc en suivant la même technique que pour le potassium.

Magnésium : Dans une cavité de la plaque de porcelaine, mettre dans l'ordre :

- 10 gouttes d'extrait végétal
- 1 goutte de réactif A₂ ou a
- 3 gouttes de réactif B ou b
- Agiter
- Attendre 1 minute et faire la lecture avec l'échelle de teintes.

Le réactif A₁ (à employer comme A₂) convient pour les valeurs fortes de Mg. De toute façon, il arrive, pour le magnésium comme pour les autres éléments, qu'on se trouve en dehors des limites de validité des tests. Dans le cas où l'extrait est trop concentré, on le dilue avec un certain nombre de gouttes du réactif d'extraction.

D'une manière générale, il faut vérifier de temps à autre, le bon état des réactifs. Il faut également nettoyer les godets et les tubes immédiatement après emploi avec de l'eau distillée. Il est parfois nécessaire de le faire avec de l'acide chlorhydrique. Ne pas faire sécher à l'étuve les blocs de porcelaine.

f) Eléments autres que N, P, K, Ca, Mg.

Des tests rapides ont été mis au point pour le Chlore (Nitrate d'argent titré en présence d'un papier indicateur au bichromate de potassium), l'azote nitreux, le soufre des sulfates, le manganèse (dans ce cas il faut se servir d'un réactif d'extraction purifié et le test, mis au point par Nicholas, exige des conditions d'exactitude qui le rendent irréalisable sur le terrain). D'autres ont été proposés pour les différents oligoéléments. Mais ces méthodes rapides ne sont pas suffisamment précises pour donner de bons résultats dans le cas des microéléments.

g) Etude sommaire du sol.

Il peut être commode de compléter la trousse pour tests rapides sur le terrain par une plaque de porcelaine du modèle décrit sur la figure 1 et par les quelques réactifs suivants :

Mesure du pH des sols -

- | | |
|-------------------------|--|
| - <u>pH : 3,8 - 5,4</u> | {
<u>(Vert de Bromocrésol)</u>
40 mgr. Colorant
1,3 cm ³ Soude N/20
(Broyer dans un mortier
Ajouter eau distillée récemment bouillie q.s.
100 cm ³) |
| - <u>pH : 6,0 - 7,6</u> | {
<u>(Bleu de Bromothymol)</u>
40 mgr. Colorant
1,4 cm ³ Soude N/20
(Broyer dans un mortier
100 gr. Eau distillée récemment bouillie.) |
| - <u>pH : 6,6 - 8,2</u> | {
<u>(Rouge de Phenol)</u>
20 mgr. Colorant
1,25 cm ³ Soude N/20
(Q.s. 100 cm ³ Eau distillée) |

- <u>pH : 5,0 - 6,6</u>	(<u>Rouge de Chlorophénol</u>
	40 mgr. Colorant
	2,1 cm ³ Soude N/20
	{ q.s. 100 cm ³ Eau distillée
<u>Calcaire et Humus</u>	(<u>Acide sulfurique</u>
	20 cm ³ Acide sulfurique concentré
	100 q.s Eau distillée
	{ (<u>Permanganate de potassium</u>
	700 mgr. Permanganate cristallisé
	100 cm ³ Eau distillée

Avec un nécessaire ainsi équipé, il est possible non seulement de faire des déterminations très approximatives des éléments dans le sol (on traite les échantillons comme pour les plantes - l'extrait est souvent jaune et le test du phosphore donne des teintes verdâtres qui nécessite l'emploi d'une échelle de référence spéciale), mais aussi d'apprécier le pH des terres et leur teneur en calcaire et en humus, en utilisant les techniques suivantes :

Calcaire et Humus

Mettre dans un gros tube à essai (60x20) une mesure rase de terre pulvérisée (même creuset que pour le tissu végétal). Mesurer un plein tube (60 x 10) d'acide sulfurique (flacon 30 cm³ capsule noire) et le verser sur la terre.

En présence de calcaire il se produit une effervescence. On ajoute alors du permanganate (un plein tube de 60 x 10) et agite. On laisse déposer et observe la coloration du liquide surnageant.

En présence de matières organiques le permanganate se décolore.

pH des terres.

On utilise le bloc spécial en porcelaine à 3 cavités sur un plan incliné.

Placer de la terre, sans la tasser en C, en remplissant complètement cette cavité jusqu'à l'entrée du canal.

Faire tomber lentement et goutte à goutte, du réactif pour pH (choisir celui qui convient) dans la cavité A.

Il passe à travers les trous de la cloison, filtre au travers de la terre et se rassemble en B. On imbibera complètement la terre jusqu'à l'apparition de liquide dans le canal : l'excès de réactif présent dans la terre s'écoule lentement dans B.

On compare la coloration en B avec l'échelle spéciale correspondant au réactif utilisé.

S'il est incolore (la terre ayant adsorbé le colorant), on ajoute une petite goutte d'indicateur, directement en B et effectue la comparaison comme ci-dessus.

5) Travail sur Coupes.

Certains chercheurs, dans certains cas, ont préféré travailler directement sur des coupes plutôt que sur des jus de presse ou des extraits. Pour les nitrates, la réaction à la diphenylamine peut être utilisée dans ces conditions.

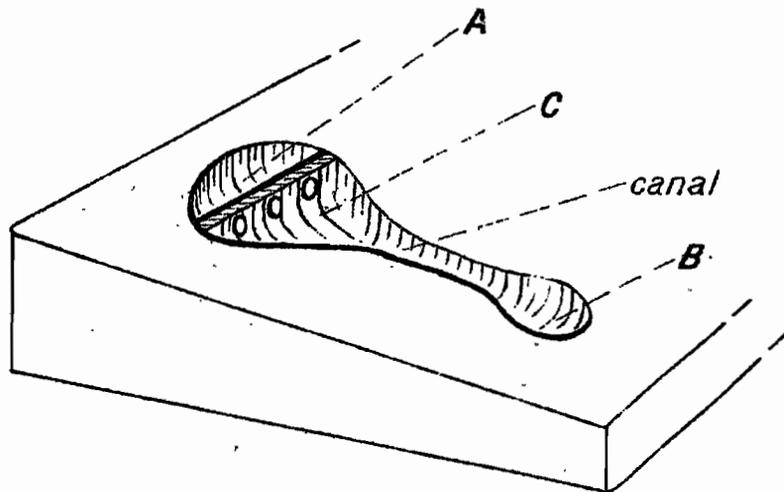
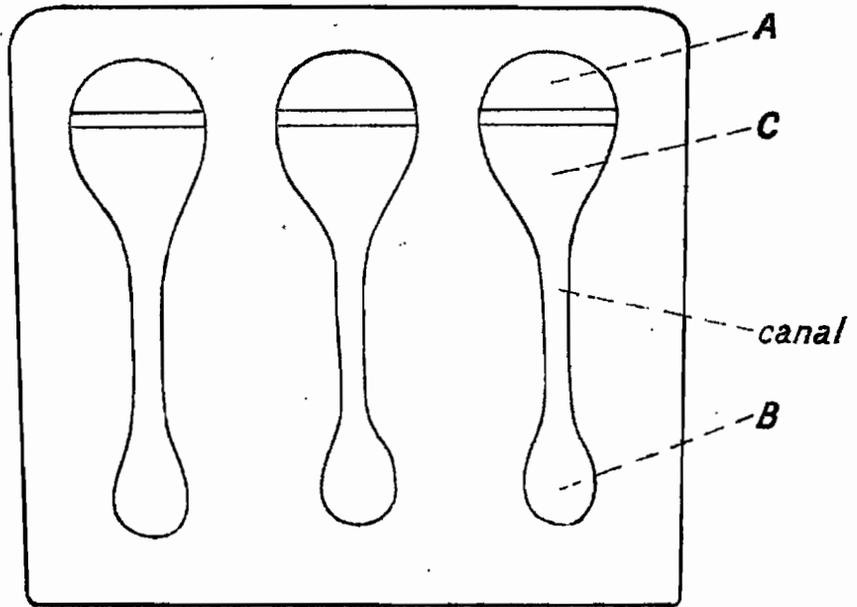
Madame Tserling, par exemple, a proposé aussi des techniques permettant l'appréciation des concentrations en P ou en K à partir de coupes.

Pour le phosphore, on se sert de papier filtre préalablement imprégné de molybdate d'ammonium et séché. Contre le papier ainsi préparé, on presse pendant 1 ou 2 minutes une coupe transversale de tige ou de pétiole. Après avoir enlevé la coupe, on applique à sa place sur le papier une goutte de benzidine à 5 % dans l'acide acétique. Puis, après séchage, une goutte de solution aqueuse saturée d'acétate de soude. On peut alors apprécier l'intensité de la coloration bleue de la tache obtenue avec celle d'une échelle de référence. Mais on peut aussi, lorsque l'opération est faite avec soin, avoir une bonne empreinte de la répartition des composés phosphorés inorganiques dans les tissus de l'organe considéré, et c'est là le principal intérêt du procédé. Madame Tserling estime d'autre part que l'emploi du papier filtre donne des réactions colorées plus nettes que les autres techniques et augmente la précision.

Pour le Potassium, on place la coupe sur le papier, on la traite par une goutte de dipicrylamine de magnésium à 2 %, puis, 1 ou 2 minutes après, par une goutte d'acide chlorhydrique 2 N, qui dissout l'excès de réactif mais respecte le sel de potassium de la dipicrylamine. On compare alors l'intensité de la teinte de la tache rouge orangé obtenue à celles d'une échelle de référence.

o

o o



C - EXPRESSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS - VALEUR DE LA METHODE

On a exprimé des résultats de tests rapides en χ d'éléments extraits par unité de temps et par gramme de tissus frais. Ce mode d'expression ne peut guère être admis que pour des techniques exigeant déjà le laboratoire. Les tests praticables sur le terrain - tels que nous les avons surtout envisagés, car c'est sous cette forme qu'ils semblent devoir rendre le plus de services - ne donnent que des évaluations assez grossières, relatives, qui permettent de classer les échantillons d'après leur teneur à l'intérieur d'une même espèce. Il s'agit en somme d'une méthode semi-quantitative. On distingue généralement pour chaque élément des teneurs faibles, moyennes et fortes, chaque catégorie pouvant encore être affectée du signe + ou -. Il semble possible, à partir d'études suivies sur des expérimentations à long terme, d'établir certains "standards" en comparant des plantes carencées et des plantes saines.

Il ne faut pas oublier que les tests chimiques rapides ne permettent pas d'apprécier la teneur en azote total.

L'intérêt de ces méthodes - qui ne conviennent que pour les éléments majeurs et peut-être pour certains métaux lourds - est surtout de permettre de déceler très rapidement les manifestations de carence ou de toxicité, à un stade précoce, avant l'apparition de symptômes visibles, et aussi, après l'apparition de ces symptômes, de confirmer le diagnostic, tout aussi rapidement.

Nicholas a publié les résultats de comparaisons systématiques et très approfondies faites à Long Ashton entre les techniques de tests rapides et les autres méthodes de diagnostic. Les coefficients de variation comparés ont été étudiés ainsi que les relations existant entre les résultats des tests rapides et ceux des analyses totales. L'accord est bon pour les teneurs couvrant la zone allant de la carence à l'optimum. Au delà, quand il y a consommation de luxe, la corrélation est souvent mauvaise (Sans doute l'extraction n'est elle pas assez poussée pour faire des distinctions entre ces valeurs élevées ; on peut supposer aussi qu'au delà d'une certaine valeur la proportion en matériel moins facilement soluble croit rapidement, ou, plus simplement, que les teintes et les différences d'opacité sont plus difficiles à apprécier). Quoi qu'il en soit, et comme on cherche surtout à déceler des carences, ce point n'a pas une importance capitale.

L'accord est bon également entre les résultats des tests rapides et ceux des méthodes de diagnose visuelle. Les tests rapides, dans certaines conditions, peuvent permettre de fixer les limites au delà desquelles les symptômes de carence apparaissent.

BIBLIOGRAPHIE

- GOODALL et GREGORY - Chemical composition of plants as an index of their nutritional status - Imp. Bureau of Hort. and Plant. Crops. - Techn. Com. N° 17-1947.
(P. 42-44 : Références des principaux travaux faits par ses méthodes. Résultats obtenus).
- I. R. H. O. - Trousse spéciale pour tests rapides (Brochure ronéotypée).
- MAGNITSKI - Communication personnelle - 1956.
- MORGAN - The universal soil testing system. - Connecticut Agric. Exp. Sta. Bul. - 392, P. 129 - 1937.
- D.J.D. NICHOLAS - The application of rapid chemical tests to the diagnosis of mineral deficiencies in horticultural crops.
 - I - Crops grown on a manurial trial - et II : Journ. of Hort. Science, Vol. XXIV, N° 2, P. 72 1948.
 - III - Comparisons of tissue tests and total analyses for K, Mg, Ca, P and N in potato and cauliflower. Ibid., Vol. XXX, N° 4, P. 260-7 - 1955.
 - IV - A comparison between the total nutrients and those extracted by buffer solutions from potato leaves. Ibid., Vol. XXXI, N° 2, P. 134- 43 - 1956.
- D.J.D. NICHOLAS - An appraisal of the use of chemical tissue test for determining the mineral status of crop plants - An. Plantes et Problèmes des fumures minérales - P. 119 - 139 - I.R.H.O. - 1956 (avec nombreuses références bibliographiques).
- V. TSERLING - Le diagnostic du besoin des plantes en engrais - An. Plantes et Problèmes des fumures minérales - P. 140-2 - I.R.H.O. - 1956.

ETUDE DES SYMPTOMES VISIBLES
DE CARENCE OU DE TOXICITE.
UTILISATION DES PLANTES INDICATRICES

ETUDE DES SYMPTOMES VISIBLES DE CARENCE OU DE TOXICITE.

UTILISATION DES PLANTES INDICATRICES

(d'après T. Wallace, The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms).

Les carences (ou les toxicités) minérales peuvent être détectées et identifiées par l'observation des symptômes visibles et spécifiques présentés par les plantes.

*

*

*

A - LES SYMPTOMES VISIBLES DE CARENCE (ET DE TOXICITE).

Avant toute chose, pour pouvoir utiliser cette méthode, il faut connaître les symptômes particuliers à chaque carence et à chaque espèce de plante. Pour cela, on cultive les plantes sur sable ou en aquiculture sensu stricto, dans des conditions contrôlées. Les solutions nutritives sont préparées à partir de produits rigoureusement purs. On supprime dans le milieu l'élément dont on veut provoquer la carence et on note les symptômes apparus. Ces observations sont, par la suite, comparées, pour vérification, avec celles faites dans les conditions naturelles, et dans des cas de déficiences identifiées avec certitude.

Les symptômes visibles de carence peuvent se manifester dans tous les organes de la plante : feuilles, tiges, fleurs, fruits, graines et racines, et on les utilise tous quand on se sert de cette méthode, mais ce sont quand même en général les symptômes foliaires qui sont le plus couramment et le plus fréquemment observés.

Certaines manifestations sont communes à plusieurs déficiences différentes. Ainsi les signes de carence en azote, en phosphore et en magnésium, apparaissent toujours d'abord sur les feuilles âgées, à la base de la plante, et s'étendent en remontant vers l'extrémité en voie de croissance ; c'est le contraire qui se produit pour les carences en calcium et en bore, visibles d'abord sur les parties jeunes de la plante et ne gagnant qu'ensuite les parties plus âgées.

1 - Symptômes de carence en Azote.

Habituellement et sur toutes les plantes, la croissance des tiges et des racines est réduite ; elle se fait verticalement et suivant l'axe. Les pousses sont courtes et minces. Les feuilles sont petites, généralement pâles et d'un vert jaune dans les premiers stades de leur développement ; plus tard apparaissent des colorations prononcées jaunes, oranges, rouges et parfois pourpres ; ces colorations anormales atteignent d'abord les feuilles âgées et gagnent ensuite les plus jeunes ; cette pigmentation peut s'étendre aux pétioles. La défoliation est prématurée et commence par les feuilles les plus âgées. Les pousses latérales sont peu nombreuses et les bourgeons latéraux meurent ou restent dormants. Dans les cas graves, la floraison est très réduite (ce qui entraîne évidemment une diminution importante des récoltes de fruits et de graines).

La petite taille des feuilles, la défoliation précoce et la suppression de la croissance latérale donnent à ces plantes un aspect malingre et dépouillé. Au printemps, le débourrement, l'épanouissement des feuilles et des fleurs sont retardés.

2 - Symptômes de carence en Phosphore.

Ils sont en bien des points semblables aux symptômes de carence en azote : la croissance des tiges et des racines est très réduite ; elle se fait verticalement et dans l'axe ; les pousses sont courtes et minces ; les feuilles sont petites ; la défoliation est prématurée et commence par les feuilles âgées ; les pousses latérales sont réduites en nombre et les bourgeons latéraux meurent ou restent dormants ; la floraison est très réduite, et, par conséquent, les récoltes de fruits et de graines très diminuées ; au printemps, le débourrement, l'épanouissement des feuilles et des fleurs sont retardés. Tous ces signes se retrouvent pour les déficiences en azote aussi bien qu'en phosphore.

Mais il y a des différences. Dans le cas du phosphore, les feuilles sont généralement ternes, d'un vert bleuâtre, et les colorations anormales qui apparaissent tirent plutôt vers le pourpre que vers le jaune ou le rouge. Les feuilles peuvent aussi prendre un aspect bronzé terne avec des taches pourpres ou brunes (Ex. Cassis). Il peut y avoir des nécroses brunes sur les bords des feuilles (Ex. Pomme de terre). Il n'en reste pas moins, que même pour les caractères de coloration des feuilles, il est difficile, dans certaines conditions et pour certaines plantes, de distinguer les manifestations des déficiences en phosphore de celles des déficiences en azote. Et, bien que la coloration pourpre du feuillage soit courante en cas de carence en phosphore, ce symptôme ne doit être interprété qu'avec une grande prudence ; en effet, il n'est pas constant et apparaît ou n'apparaît pas suivant les conditions et les variétés considérées.

3 - Symptômes de carence en Calcium.

Ce sont les feuilles jeunes et les extrémités en voie de croissance des tiges et des racines qui présentent habituellement les symptômes les plus nets. Les feuilles jeunes sont sérieusement déformées, crochues, avec des bords enroulés vers le haut ou vers le bas ; les bords sont souvent irréguliers et déchiquetés, marqués de brûlures ou de taches brunes ; il peut aussi y avoir une mince bande marginale chlorotique. Ces symptômes foliaires sont communs à beaucoup de plantes à grandes feuilles. Il s'y ajoute souvent de sérieux affaissements du mésophylle. Ces affaissements des tissus atteignent aussi les pétioles et les pédicelles, comme dans le lin, le trèfle et beaucoup de plantules. Il arrive souvent que les meristèmes meurent, ce qui entraîne des effets spectaculaires (Ex. tomate, céleri).

Dans la nature, les carences en calcium apparaissent le plus souvent sur des terres très acides. Mais les symptômes peuvent alors être très complexes et traduire une combinaison de carence en calcium et de toxicité du manganèse et de l'aluminium, avec parfois carence en magnésium, ou même en azote, en phosphore, en potassium et toxicité des ions hydrogène et des métaux lourds. Tous ces facteurs interfèrent (En culture sur sable, par exemple, les symptômes de toxicité du Manganèse sont très atténués par un apport de Calcium). Dans la pratique, on ne fait pas une grande erreur en considérant ces plantes de sol acide comme des plantes déficientes en calcium et en choisissant les traitements curatifs en conséquence.

4 - Symptômes de carence en Magnésium.

Ils sont surtout marqués sur le feuillage et atteignent toujours d'abord les feuilles les plus âgées, pour s'étendre ensuite seulement aux feuilles plus jeunes. Il y a généralement de la chlorose (ce qui n'a rien d'étonnant si on se rappelle que le magnésium est un constituant de la chlorophylle), mais fréquemment aussi des colorations anormales vives et brillantes. Cette carence se manifeste surtout en fin de saison, mais il arrive qu'elle apparaisse même chez des plantules (spécialement pendant des périodes de pluie). Les feuilles gravement touchées se dessèchent et tombent, ou tombent sans s'être desséchées, simplement flétries. La defoliation peut être extrêmement sévère. On peut voir ainsi, en Août ou en Septembre, des pommiers chargés de fruits, entièrement dépouillés de leurs feuilles (sauf au bout des pousses) et incapables d'amener leur récolte à maturité. Dans des cas de ce genre, chez des plantes vivaces, une carence prolongée se traduit par le rabougrissement et même l'improductivité. Chez les plantes annuelles où la déficience ne se manifeste qu'en fin de végétation, il n'y a par contre pas de réduction appréciable de la récolte.

Mais, malgré l'existence de grandes lignes communes, les effets de la carence en magnésium sur le feuillage diffèrent beaucoup d'une espèce à l'autre, ce qui implique la nécessité de connaître les symptômes propres à chaque plante.

5 - Symptômes de carence en Potassium.

Ils peuvent varier avec l'importance de la déficience, allant d'une diminution de croissance des pousses, qui sont généralement effilées, à la mort de ces pousses, de branches entières et de la plante elle-même. Les symptômes foliaires, bien qu'un peu variables, sont généralement caractéristiques. Les feuilles peuvent acquérir une teinte vert bleuâtre. Il peut y avoir un peu de chlorose (surtout entre les nervures). Mais ce qu'on voit toujours ce sont les brûlures des extrémités et des bords des feuilles, les taches brunes, surtout près des bords. Ces signes se montrent d'abord sur les feuilles âgées. Chez beaucoup de plantes à feuilles larges, le limbe tend à se recourber vers la face inférieure ou à s'enrouler vers la face supérieure, parallèlement à la nervure médiane.

La carence potassique entraîne généralement un rabougrissement considérable. Les entre noeuds de la tige sont courts, la production de graines et de fruits est très diminuée et le système racinaire souvent très peu fourni (les arbres peuvent se mettre à balloter dans le sol).

Quand on voit des brûlures marginales sur des feuilles, on doit toujours penser à une carence potassique, mais sans oublier que ce symptôme peut être provoqué par bien d'autres causes (carences en Ca et P, toxicité de B et Cl, sécheresse, etc, etc).

6 - Symptômes de carence en Sodium.

Les seules plantes sur lesquelles on puisse affirmer avoir vu des symptômes de carence en sodium sont les plantes qui ont une affinité particulière pour cet élément comme les betteraves à sucre, les betteraves fourragères et les navets. Là où il y a trop peu de sodium pour ces plantes, les feuilles sont d'un vert foncé plutôt terne, se fanent vite sous l'action de la sécheresse et tendent souvent à se placer horizontalement par rapport à la couronne. Il y a parfois des brûlures marginales des feuilles.

7 - Symptômes de carence en Soufre.

Les cultures sur sable ont montré que les carences en soufre produisaient des effets voisins de ceux des carences en azote. Il y a donc, comme on pouvait s'y attendre, une parenté étroite entre les conséquences visibles des déficiences des trois éléments plastiques : azote, phosphore et soufre.

Dans le cas de carence en soufre, il y a diminution de la croissance (bien que moins prononcée que dans le cas de l'azote) ; les tiges sont minces, raides, ligneuses ; la plante croît en hauteur ; les feuilles jaunissent ou se colorent de manière anormale (teintes brillantes oranges et rouges chez le pommier, le groseillier à maquereau, le fraisier, le coton, etc). La maladie du théier, connue sous le nom de "Tea Yellow", est une carence aiguë en soufre (diminution de la croissance, de la taille des feuilles ; enroulement des feuilles devenues cassantes ; chlorose et jaunissement ; défoliation sévère ; les bourgeons terminaux et des branches entières peuvent mourir).

8 - Symptômes de carence en Fer.

La carence en fer est beaucoup plus courante chez les plantes fruitières que chez les légumes ou les plantes de grande culture. Le principal symptôme est toujours une chlorose grave des feuilles. La croissance des plantes jeunes est toujours sérieusement compromise. Dans certains cas, les feuilles sont presque entièrement blanches, dans d'autres, elles sont panachées. La nécrose des bords et de l'extrémité des feuilles n'apparaît que dans les cas extrêmes.

9 - Symptômes de carence en Manganèse.

La carence en manganèse se traduit le plus couramment par une chlorose du feuillage, mais, dans le détail, les symptômes sont variables.

Souvent on trouve les signes de carence en fer et en manganèse en même temps sur les mêmes plantes.

C'est le cas en particulier dans les cultures fruitières, où souvent les signes de carence en fer sont visibles sur les feuilles jeunes et ceux de carence en manganèse sur les feuilles plus âgées (chez les pommiers, pruniers, pêcheurs, cerisiers, framboisiers). Quand plusieurs espèces fruitières sont cultivées sur un même terrain, il arrive souvent que chez certaines se manifestent des signes de déficience en fer (poirier, fraisier) alors que chez d'autres apparaissent des symptômes de carence en manganèse (certains cerisiers, pommiers) et que d'autres encore montrent les deux à la fois (surtout les framboisiers). Les différentes variétés d'une même espèce peuvent aussi avoir un comportement de ce genre vis-à-vis de ces carences.

10 - Symptômes de carence en Bore.

Un grand nombre de "maladies" sont imputables à la carence en bore (Pourriture du cœur de la betterave, Liège des pommes, Durcissement des fruits de Citrus, etc). La liste seule de ces maladies montre la grande diversité des symptômes.

Chez beaucoup de plantes, les méristèmes sont sévèrement touchés et peuvent mourir. Les feuilles et les tiges sont considérablement déformées. Si l'épiderme et la moelle sont atteints en même temps, les tiges sont creuses et rugueuses. Souvent les feuilles sont nécrosées et ondulées ; il arrive qu'elles présentent des taches ou des colorations anormales. Quand les fruits sont touchés, ils sont très déformés et inutilisables.

Les céréales paraissent avoir des besoins réduits en bore ; la carence n'est pas connue pour elles sur le terrain.

11 - Symptômes de carence en zinc, cuivre et molybdène.

Dans les conditions naturelles, les carences en cuivre ont été observées et étudiées surtout pour les céréales (où ce sont surtout les feuilles jeunes qui sont atteintes), les pois, les arbres fruitiers l'hévéa, etc. (Les effets de toxicité du cuivre sont bien connus aussi et ont une importance pratique particulière du fait de l'emploi du cuivre dans de nombreux produits anticryptogamiques). Les carences en molybdène se rencontrent chez les plantes fourragères, les légumes, les agrumes, etc.

La carence en zinc se traduit par la chlorose et la pigmentation anormale du feuillage, souvent accompagnées de nécroses ; il peut y avoir réduction des dimensions et maformation des feuilles. Un symptôme caractéristique de cette carence est le raccourcissement des entre noeuds entraînant un port en rosette. Les effets de cette déficience sur le feuillage suggèrent une corrélation étroite entre le rôle du zinc et la formation de la chlorophylle.

12 - Symptômes de toxicité en Manganèse et en Aluminium.

La toxicité du manganèse est un des points importants des problèmes posés par les cultures sur sols acides. Elle se traduit le plus souvent par des chloroses et des nécroses foliaires. Il ne faut pas oublier non plus qu'elle peut induire une carence en fer.

Les effets de la toxicité de l'aluminium sont voisins de ceux provoqués par le manganèse. Les feuilles et les jeunes pousses présentent des symptômes qui rappellent ceux de la déficience en phosphore. La croissance des racines est affectée, elles sont réduites à un moignon et manquent de tissus de soutien.

Ces indications n'ont qu'une valeur très générale. En plus des nombreuses publications particulières traitant des symptômes visibles de carence ou de toxicité relatifs à une catégorie limitée de plantes ou d'éléments, des ouvrages d'ensemble donnent des descriptions et des listes de symptômes pour chaque espèce, accompagnées de planches en couleur. L'ouvrage de Wallace traite des plantes de grande culture,

des légumes et des cultures fruitières des pays tempérés ; celui publié par un groupe d'agronomes américains du tabac, des céréales, de la pomme de terre, du coton, des légumes, des cultures fruitières (avec tout un chapitre sur les Citrus) et des légumineuses (y compris l'arachide).

Le manuel de Klotz et Fawatt sur les maladies des Citrus étudie aussi les troubles entraînés par les excès et les carences minérales.

o

o o

B - UTILISATION DE LA METHODE SUR LE TERRAIN.

Si on se propose d'étudier par cette méthode les plantes d'un terrain où se manifestent des symptômes de carence, il importe de prendre certaines précautions. Il ne suffit pas de connaître parfaitement les symptômes que peuvent présenter les espèces en jeu, il faut encore tenir compte de tous les facteurs qui interfèrent avec les conditions de nutrition minérale pour donner aux plantes un aspect anormal.

Se rappeler que :

- L'aspect général de l'emplacement et du sol peut déjà donner des indications utiles. C'est surtout le pH du sol qu'il est important de connaître.
- Dans les cas les plus simples, il est possible de reconnaître immédiatement et avec certitude la nature d'un déséquilibre minéral grâce aux symptômes qui le caractérisent. Il s'agit alors généralement de plantes pouvant être considérées comme "indicatrices" pour une déficience donnée (voir ci-dessous). Si la plante que l'on étudie particulièrement ne montre pas de symptômes nets et décisifs, il est parfois possible de formuler un diagnostic plus précis grâce à l'examen des autres végétaux poussant sur le même terrain. Si on rencontre par exemple des pommiers dont les feuilles ont des bords nécrosés, bruns, il peut s'agir aussi bien d'une carence en potassium que d'une carence en magnésium ; mais si des groseilliers à maquereau ou des cassissiers se trouvent dans le voisinage, dans les mêmes conditions, le diagnostic pourra être précisé sans hésitation ; pour ces deux espèces la carence potassique se traduit par des brûlures des bords des feuilles, mais la carence en magnésium provoque l'apparition, chez le groseillier à maquereau, d'une large bande rouge au pourtour de la feuille, et chez le cassissier, d'une coloration rouge éclatante au centre de la feuille (dont les bords restent verts).

- Dans les cas plus compliqués, l'examen des symptômes visuels ne permet pas de conclure avec certitude. Il faut alors faire appel à d'autres méthodes. Bien des facteurs interviennent pour brouiller les effets extérieurs des déséquilibres minéraux. Ces facteurs peuvent produire des symptômes similaires à ceux occasionnés par les déficiences minérales ; ils peuvent les masquer par d'autres symptômes plus marqués ; ils peuvent enfin s'opposer à leur apparition. Ces complications et ces interférences peuvent provenir de :

1) Conditions météorologiques.

Ex. - Le gel et les températures basses peuvent entraîner la formation de pigments rouges ou pourpres, provoquer des brûlures des feuilles.

- La sécheresse, le vent, peuvent être à l'origine de brûlures du feuillage.
- La sécheresse peut arrêter la croissance de telle sorte que les symptômes de déficience minérale n'apparaissent pas.
- Elle peut être responsable de colorations anormales.

2) Sol

Ex. - Le manque d'eau dans le sol peut agir comme la sécheresse atmosphérique.

- L'excès d'eau a une action sur la coloration de la plante et peut causer des nécroses.
- Il en est de même de certains défauts dans la constitution physique du sol.

3) Conditions culturales.

4) Maladies.

5) Domages mécaniques (Pulvérisation, Lésions diverses, etc).

6) Il faut tenir compte enfin des interférences des éléments minéraux les uns avec les autres dans les troubles visibles du développement et de la morphologie de la plante. Un excès en un élément peut induire une carence en un autre élément et les symptômes s'additionner et se mélanger (Excès de potassium et carence en magnésium, excès de P et carence en Fe, excès de Mn, Cu, Zn et carence en fer, etc. etc). Certaines carences et certaines toxicités se traduisent par des manifestations voisines ou similaires (Toxicité en Bore et carences en potassium ou en magnésium ; toxicité en aluminium et carence en phosphore ; toxicité et carence en manganèse, qu'on distingue en déterminant le pH du sol, etc. etc.).

La nature et la composition d'un sol peuvent être telles qu'il risque d'y apparaître à la fois plusieurs carences ou toxicités ; il en est par exemple ainsi dans les sols acides pauvres pour les carences en calcium, magnésium, phosphore, potassium et azote et les toxicités en manganèse et aluminium. Dans ces cas là :

- a) Les signes de plusieurs déséquilibres peuvent être réunis chez une même plante :

Ex. - Carences en Calcium et Magnésium et toxicité du manganèse dans le cas des sols acides ;

Autres combinaisons classiques :

- Carences en Fer et Manganèse sur cultures fruitières ;
- Carences en Fer ou Manganèse avec potassium et magnésium sur arbres fruitiers et tomates ;
- Carences en bore et en potassium sur betteraves dans les sols calcaires.

- b) Des plantes différentes peuvent extérioriser sur un même terrain des déficiences différentes, suivant leur degré de sensibilité.

Ex. Sur un sol où les plantes disposent de peu de bore, de manganèse et de magnésium, la carence en bore sera grave sur toutes les espèces de betteraves, la carence en manganèse ne se manifesterà que sur certaines betteraves et un peu sur la pomme de terre ; et la pomme de terre, le lin, le chou frisé par ex. présenteront des symptômes de carence en magnésium.

Sur ce genre de terrain, il peut être intéressant de faire des essais où les différentes parcelles portent des plantes présentant des degrés de sensibilité bien différents à l'égard des déficiences ou des toxicités possibles.

o

o o

C - UTILISATION DES PLANTES INDICATRICES.

L'observation des symptômes visibles de carence ou de toxicité sur un grand nombre d'espèces montre que certaines plantes sont particulièrement aptes à révéler l'existence ou la possibilité de certains déséquilibres. Il s'agit de plantes particulièrement sensibles à une déficience bien définie, et la manifestant par des symptômes bien distincts, caractéristiques et prononcés. Ces plantes peuvent servir d'"indicateurs" pour la recherche ou la caractérisation de cette déficience.

A l'intérieur d'une espèce "indicatrice", comme la pomme de terre par exemple pour le potassium, il faut préférer certaines variétés à d'autres. Et ce n'est pas toujours la sensibilité qui décide. Il faut aussi que les symptômes soient aussi clairs que possible.

Il peut aussi être intéressant d'utiliser des plantes indicatrices en essais parcellaires.

Wallace donne dans son ouvrage une liste de plantes cultivées pouvant servir d'"indicateurs" et leurs possibilités. mais bien des plantes sauvages, des "mauvaises herbes" peuvent être précieuses dans ce rôle, dans la nature. Au laboratoire, certaines espèces se révèlent d'excellents indicateurs, même pour des carences différentes (ainsi la fougère aquatique *Regnellidium Diphylum*).

o

o o

D - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA METHODE.

Cette méthode exige une très grande expérience et une très grande prudence de la part de l'expérimentateur. En effet, comme il ressort des faits envisagés ci-dessus :

- Pour un même déséquilibre minéral, les symptômes visibles varient d'une espèce à l'autre, et même d'une variété à l'autre.
- Des déséquilibres différents peuvent se traduire par des symptômes identiques. Certains symptômes en particulier se retrouvent dans de nombreux cas (nécroses et brûlures du feuillage, etc).
- De nombreux facteurs interviennent pour compliquer, brouiller ou supprimer les manifestations visibles des déséquilibres minéraux (facteurs météorologiques, agents pathogènes, etc).

- Les symptômes visibles n'apparaissent que très tard, quand la déficience est déjà grave. A ce point de vue, la méthode manque de sensibilité.
- Certains groupes de plantes, comme les céréales, se prêtent mal à l'utilisation de ces techniques de diagnostic.

Il faut donc souligner que cette méthode, plus que d'autres sans doute, est faite pour être employée non pas isolément, mais en combinaison avec les autres méthodes. Elle se prête particulièrement, dans certains cas, à servir de moyen d'attaque d'un problème, les autres méthodes jouant un rôle de confirmation. Elle a le grand avantage, quand les circonstances permettent de l'utiliser efficacement, d'être très rapide et de n'exiger aucun matériel.

o

o o

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages généraux avec planches en couleurs

- **Hunger Signs in Crops**, ouvrage collectif publié par The American Society of Agronomy et the National Fertilizer Association, 1949.
- T. WALLACE, The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms, Londres, 1951.

*

* *

Parmi les publications générales

- E.J. HEWITT - Experiments in mineral nutrition
 - I - The visual symptoms of mineral deficiencies in vegetables and cereals grown in sand cultures. A.R. Long Ashton Agric. Hort. Res. Sta. 1943, p. 33 1944.
 - II - The visual symptoms of mineral deficiencies in crop plants grown in sand cultures. A.R. Long Ashton Agric. hort. Res. Sta. 1944, p. 50, 1945.
 - III - The visual symptoms of mineral deficiencies in crop plants grown in sand cultures. A.R. Long Ashton Agric. hort. Res. Sta. 1945, p. 44, 1946.
- R.L. COOK - C.E. MILLAR - Plant nutrient deficiencies diagnosed by plant symptoms, tissue tests, soil tests - Michigan St. College, Agric. Exp. Sta. Spec. Bull. N° 353, Juillet 1953.
- F.G. VIETS jr - L.C. BOAWN - L.C. CRAWFORD - Zinc contents and deficiency symptoms of 26 crops grown on zinc deficient soil. Soil Science, 78, N° 4, P. 305-16 - 1954.

- F.E. COWIE - Manganèse deficiencies in plants, their occurrence, recognition and control - 8è Congrès int. bot., Rapports sect. 11 et 12, p. 98-99, Paris 1954.
- D. STENUIT - R. PIOT - Symptômes de carence en magnésie chez les plantes agricoles et horticoles. Service pédologique de Belgique, 1954.
- A. JACOB - Magnesia, der fünfte Pflanzenhaupt nährstoff. Ed. F. Enke Stuttgart - 1955. (comprend un chapitre avec photographies sur les symptômes de déficience en Magnésium).
- E.J. HEWITT - Molybdenum deficiency symptoms in plants - Soil Science 81, p. 159-171, 1956.
- D.J.D. NICHOLAS - Pathological symptoms produced by mineral micronutrient disorders in crop plants - 8. Sonderheft zur Zeitung "Landwirtschaftliche Forschung" : Pflanzenqualität Nahrungsgrundlage - 1956

*

* *

Parmi les publications qui concernent les agrumes et les plantes tropicales qui ne sont pas étudiées dans les deux ouvrages généraux (Wallace et "Hunger Signs in Crops").

Agrumes - J. DUMAS - Les maladies de carence chez les Citrus de Floride et les remèdes qu'on y apporte - Fruits d'Outre-Mer, Vol. 2, N° 3, p. 80-84 - 1947.

- J. KLOTZ - H.S. FAWCETT - Manuel en couleurs des maladies des Citrus. (Traduction française) - Soc. d'éd. tech. Coloniales - 1952.

Caféier - H. MOWRY - Minor element deficiencies in coffee in Cesta-Ricu - Foreign Agriculture, Washington, p. 93-6, Mai 1953 et World crops, Vol. 5, N° 11, p. 455-6 - Novembre 1953 -

- A. LOUE - Studies on the inorganic nutrition of the coffee tree in the Ivory Coast - Int. Potash Inst. Berne - 1957 (avec planches en couleurs).

Cacaoyer - K.C.W. VENEMA - Potash deficiency symptoms with cocoa - Potash Review. Inst. Intern. Potasse, Berne - Dec. 1952.

- M. GREENWOOD - R.K. DJOKOTO - Symptoms of mineral deficiency in Cacao - J. Hort. Sc. 27, n° 4, p. 223-36, 1952
- E.J. MASKELL - H. EVANS - D.B. MURRAY - The symptoms of nutritional deficiencies in cacao produced in sand and water cultures. Imp. Coll. Trop. Agric. Rep. Cacao Res. 1945-51, p. 53-64 - 1953.
- H. EVANS - D.B. MURRAY - A colour illustrated guide to the diagnosis of mineral deficiencies in cacao. Imp. Coll. Trop. Agric. Rep. Cacao Res. 1945-51, p. 65-66 - 1953.

Manguier - P.F. SMITH - G.K. SCUDDER jr. - Some Studies of mineral deficiency symptoms in mango.

Palmier à huile -

- R.A. BULL - Techniques for the visual diagnosis of mineral disorders and their application to the oil palm. C.R. Conf. franco brit. sur le palmier à huile, Min. France O.M., O.R.S.T.O.M., Bul. Agro. N° 14, p. 139-149 - 1957.
- H. BROESHART - J.D. FERWERDA - W.G. KOVACHICH - Mineral deficiency symptoms of the oil palm - Plant and Soil, 8, N° 4, p.289-300 - 1957.

Riz - - A. FUJIWARA - M. TSUTSUMI - The deficiency symptoms of micro-éléments on rice plant. Soil pl. Fd., Japan 1, N° 1, p. 41-2 - 1955.

- R.G. LOCKARD - The foliar symptoms of deficiencies of the major elements in rice. Malay. agric. J., 39, N° 4, p. 268-76 - 1956.

Enfin une publication récente à propos de l'Arachide :

- P. H. REID - E.T. YORK Jr. - Effect of Nutrient deficiencies on growth and fruiting characteristics of peanuts in sand cultures - Agronomy Journ., Vol. 50, N° 2, p. 63-67 - 1958.

*

* *

Parmi les publications qui concernent les plantes indicatrices.

- W. PLANT - An analysis of the acid soil complex by the use of indicator plants - Plant and Soil, La Haye, Vol. 5, N° 1, p. 54-66 - 1953.
- P.D. VOTH - Demonstrating mineral nutrient deficiencies with *Regnellidium diphyllum* - Trans. Illinois State Acad. Sci. - 48 - p. 37-41 - 1956.
- K. SCHIPSTRA - Onkruiden als indicatoren voor voedingszickten - (Les mauvaises herbes en tant qu'indicateur des maladies de la nutrition) - T. Plantenzick. Nederl. 63, N° 1, p. 15-18 - 1957.

INJECTION ET APPLICATION DIRECTE
A LA PLANTE
DE SOLUTIONS OU DE PRODUITS MINERAUX

INJECTION ET APPLICATION DIRECTE A LA PLANTE DE SOLUTIONS OU DE PRODUITS
MINERAUX

PRINCIPE

Il s'agit de fournir directement, par injection ou par application locale, à des tissus ou à des organes qu'on presume carences, les éléments dont on suppose qu'ils manquent, sans passer par l'intermédiaire du sol ou du milieu de culture. Selon les cas, la réponse se manifeste par la coloration ou la croissance des feuilles.

*

* *

TECHNIQUES

Les différents éléments minéraux peuvent être utilisés sous forme liquide ou solide et être appliqués à la plante par injection, badigeonnage ou pulvérisation.

A) INJECTION -

1) Solutions.

Ce sont les injections d'un ou de plusieurs éléments minéraux, en solution dans l'eau qui sont le plus couramment employées quand on cherche à déterminer la nature des carences par ce genre de méthode. Toute une série de techniques ont été essayées et mises au point, en particulier par le Professeur Roach et ses collaborateurs, à East Malling.

a) Méthode de Roach proprement dite, comportant l'emploi de petits "réservoirs" pour la solution.

L'injection peut être pratiquée dans le limbe foliaire, entre les nervures.

On utilise pour cela le petit appareillage suivant (Fig. 1) :

- Petits tubes fabriqués à partir de "pailles" à boire en cellophane. Longueur des tubes : 15 mm. env. Paraffiner une extrémité en la trempant dans de la paraffine fondue. Introduire dans ce petit tuyau une languette de papier filtre de 30 mm de long environ, dont une extrémité (celle qui est en dehors du tube) a été enduite d'un mélange de colle cellulosique et d'acétone. On peut remplacer la languette par une mèche de coton à repriser. Boucher l'extrémité inférieure (celle qui n'est pas paraffinée) avec de la colle cellulosique (qui en séchant fixe aussi la languette au tube).
- Petits scalpels faits à l'aide de deux lamelles de bois très plates de 0.5 cm de largeur et de 7 à 8 cm de longueur. Insérer entre ces deux baguettes, à une extrémité, un fragment de lame de rasoir mécanique (ou un éclat de verre, dans le cas de recherches avec des solutions contenant du fer). Coller le tout, en pressant fortement jusqu'au séchage complet (avec des pinces de dessinateur par ex.).

On opère de la manière suivante :

- Introduire alors par le dessous de la feuille la partie de la languette solidifiée par le mélange colle-acétone. Saisir cette extrémité par le dessus et tirer pour amener l'extrémité paraffinée du tube au contact du limbe. Opérer sur feuilles n'ayant pas achevé leur croissance. Faire les fentes d'injection à égale distance des deux nervures secondaires et assez près de la nervure principale.
- Remplir le petit tube de la solution à essayer. Avec le scalpel, inciser entre deux nervures secondaires le limbe de la feuille sur toute son épaisseur. L'entaille aura la dimension de la largeur de la languette de papier filtre.

L'injection peut se faire aussi par le pétiole, après ablation de la feuille, dans les conditions suivantes : (Fig. 2)

Matériel : - Les mêmes scalpels que ci-dessus

- Petits tubes de verre de 1,5 cm de long et 2 à 3 mm de diamètre. Paraffiner les bords du tube et fixer le long du tube un fil de plomb à l'aide d'un ruban de sparadrap très étroit.

On opère de la manière suivante :

- Choisir une feuille située en bas d'un rameau de l'année. Couper transversalement la nervure centrale au niveau du milieu du limbe. Couper ensuite le limbe parallèlement à la nervure centrale et très près de celle-ci

en se dirigeant vers le pétiole. Après l'opération il ne doit rester que le pétiole et la moitié inférieure de la nervure centrale légèrement bordée de chaque côté d'un peu de limbe.

- Introduire alors ce pétiole coupé dans le petit tube rempli de la solution à essayer. Grâce au fil de plomb, on pourra attacher le tube au rameau. La verticalité du tube n'est pas à rechercher, le revêtement de paraffine du bord du tube empêchant tout écoulement de liquide. Il faut par contre prendre grand soin de donner au tube une position qui ne risque pas d'entraîner la cassure du pétiole.

On peut aussi utiliser des dispositifs où c'est l'extrémité sectionnée d'une foliole qui plonge dans le liquide. Certains auteurs ont opéré par immersion de feuilles (Anderssen).

b) Techniques simplifiées : Un collaborateur de Roach, Roberts, a tenté de simplifier la méthode en évitant l'emploi des petits tubes formant réservoirs (Fig. 3).

- Procédé du fil : (utilisables uniquement dans le cas de pétioles assez gros). On emploie du coton blanc à reposer, à 5 ou 6 brins, détordu, trempé dans la solution à essayer et séché à l'abri des poussières (on peut le préparer à l'avance et le conserver dans des tubes de verre bouchés). La substance se dépose sur le fil à l'état de particules solides (Il s'agit en somme déjà là d'injection "solide" en miniature). Au moment de l'utilisation, le fil est enfilé sur une longue aiguille à reposer fine et passé dans la région choisie du limbe, du pétiole ou de la tige d'une jeune pousse. Il faut opérer avec beaucoup de précaution pour éviter des lésions trop importantes des tissus. On coupe le fil un peu au-dessus et un peu au-dessous du point de passage. La substance qui l'imprègne diffuse dans l'organe traité.
- Procédé du tampon de coton : On prend du coton hydrophyle qui est trempé dans la solution, séché et conservé comme précédemment. On opère en sectionnant le pétiole d'une feuille au ras de la tige (il faut choisir une pousse jeune). On applique sur la blessure un petit tampon de coton imprégné, qu'on maintient en place avec du papier adhésif ou du sparadrap.

c) Conditions à respecter pour les essais.

- Comme toujours, pour pouvoir interpréter les réponses, il convient d'abord de bien connaître la plante sur laquelle on travaille et ses réactions. Pour chaque plante et pour chaque méthode, il faut étudier le mode de distribution des substances injectées. On se sert pour cela d'un colorant non toxique (généralement de fuchsine acide), à des

concentrations variant de 1 % à 1 ‰, et on en observe le cheminement et la répartition. Dans le cas d'une injection dans le limbe, l'absorption se fait d'abord autour de la coupure, puis s'étend généralement entre les deux nervures secondaires vers la périphérie du limbe. Dans le cas d'une injection dans le pétiole ou la tige d'une jeune pousse, la distribution de la solution dépend de la phyllotaxie et de l'organisation vasculaire de la plante traitée. La connaissance exacte des voies de translocation est nécessaire pour pouvoir valablement comparer les organes ou les fragments d'organes atteints par le traitement avec les parties correspondantes non traitées de la plante. Ces méthodes ne peuvent être appliquées à certaines espèces. Si, chez le pommier, par exemple, on peut prévoir dans des limites étroites la distribution d'un liquide injecté, il y a tous les intermédiaires entre ce type de matériel et l'aubergine, par exemple, où le mode de répartition varie tellement qu'on ne peut utiliser ce moyen de diagnostic.

Dans chaque cas, on élimine les individus chez lesquels la disposition des feuilles ou des rameaux paraît anormale.

Il semble qu'on obtienne des distributions à peu près identiques avec les différentes techniques.

Pour chaque plante, il faut connaître également les possibilités de variation naturelle dans la coloration et la taille des feuilles. Là aussi les différences spécifiques sont considérables. Au sein d'une espèce donnée, le degré de variabilité de ces caractères dépend en grande partie de l'homogénéité du terrain.

- La seconde condition à respecter est de toujours s'adresser à des feuilles jeunes ou à de jeunes pousses en pleine croissance. Les feuilles adultes répondent rarement et difficilement. Beaucoup d'échecs dans l'emploi de ces méthodes n'ont pas d'autre cause que le choix de feuilles trop âgées.
- Il faut aussi bien entendu que la plante elle-même soit en période de croissance et de vie active.
- Enfin il faut procéder à des essais avec les substances minérales pour fixer les concentrations qui conviennent. Chaque essai est répété plusieurs fois, sur plantes saines et sur plantes malades. On peut aussi faire des témoins où la plante n'absorbera que de l'eau distillée.

d) Préparation et concentration des solutions. On n'utilise bien entendu que des produits chimiques très purs. La concentration et la nature des solutions dépendent de la plante étudiée. Roach indique les concentrations suivantes comme couramment utilisées pour les espèces sur lesquelles il a travaillé (il semble qu'il faille assez souvent avoir recours à des solutions plus diluées).

N	1 % Urée		
P	0,5 % Phosphate monosodique		
K	1 % Chlorure de potassium		
Ca	1 % Chlorure de calcium		
Mg	0,5 % Sulfate de Magnésium		
Fe	0,025 % Sulfate de fer + 0,025 % (en volume) d'acide sulfurique		
Mn	0,025 % Sulfate de manganèse +	- id -	
Zn	0,025 % Sulfate de zinc +	- id -	
Cu	0,025 % Sulfate de cuivre +	- id -	
Ni	0,025 % Sulfate de nickel +	- id -	
B	0,1 % d'acide borique.		

On ajoute SO_4H^2 pour maintenir le sel en solution et éviter qu'il ne précipite (ce qui est nécessaire surtout dans le cas du sulfate ferreux).

2) Produits Solides.

Alors que les injections de solutions sont rarement employées dans un but curatif (Roach - 1945 - indique cependant un dispositif qui peut convenir), l'introduction de substances minérales à l'état solide dans le tronc ou les branches des arbres est utilisée dans la pratique pour remédier à certaines carences (en particulier, traitement par SO_4Fe des arbres fruitiers et traitements par SO_4Cu de l'hévéa). Les sels minéraux peuvent être sous forme de poudre ou de comprimés. La question du dosage est ici particulièrement délicate, l'application de quantités trop fortes de produits pouvant entraîner de graves dommages pour l'arbre. Bennett et Duggan (voir référence) donnent des indications quantitatives pour Fe et Mn (pour B, Zn et Cu, les quantités doivent être plus faibles).

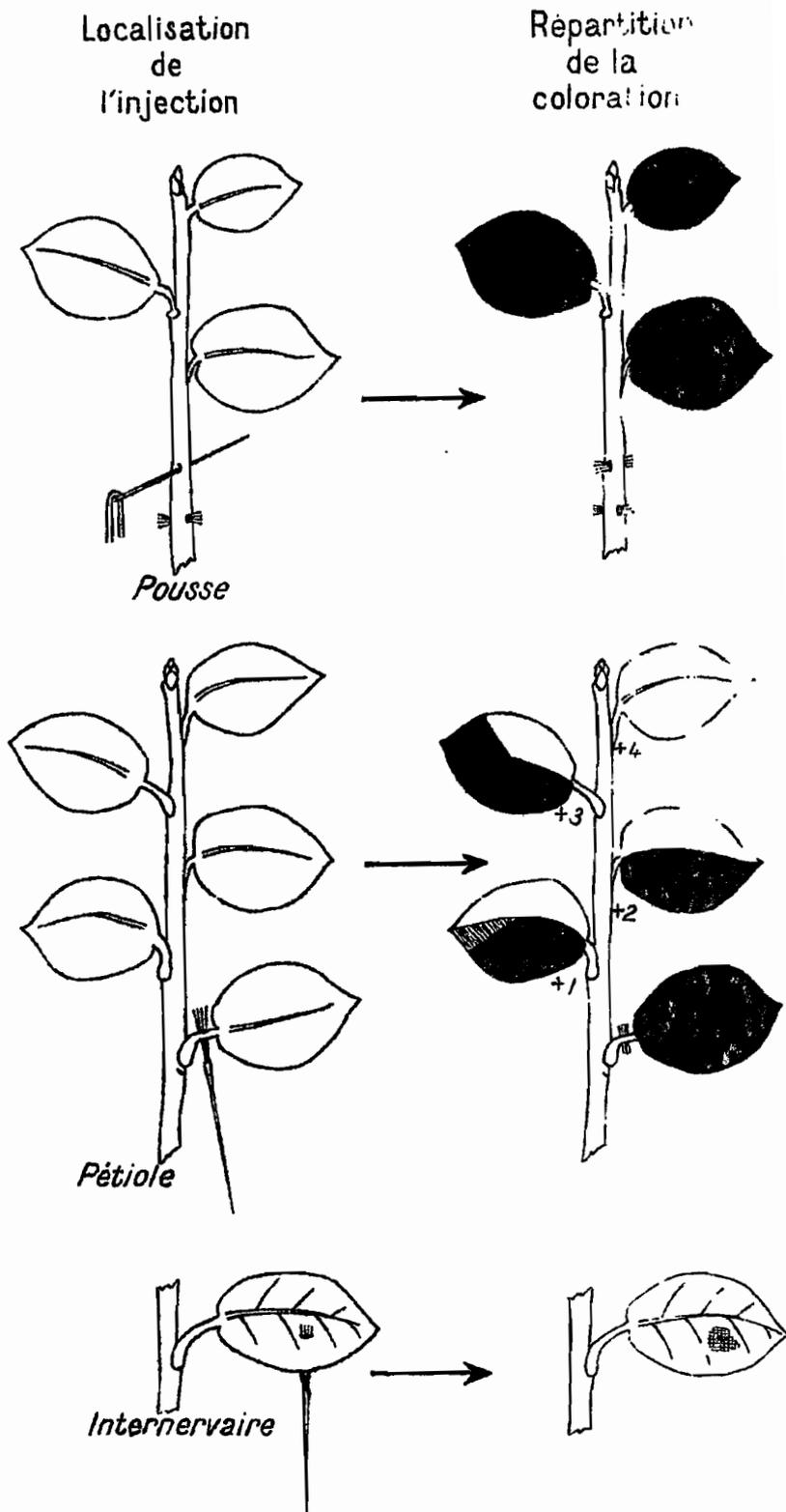
La meilleure époque pour ce genre d'opération est la fin de la période de repos végétatif, juste avant l'éclatement des bourgeons.

B - BADIGEONNAGE - PULVERISATION - POUDRAGE -

1) Badigeonnage des feuilles.

Certains arbres fruitiers, comme les cerisiers et les pruniers, ont des feuilles qui n'absorbent que très lentement les solutions qu'on leur injecte.

Roberts a obtenu de meilleurs résultats en étalant simplement les solutions sur la face supérieure et inférieure du limbe. En dehors du diagnostic des carences, ce procédé convient bien aussi pour fixer les concentrations convenables pour des pulvérisations curatives.



Résultats de l'injection de fuchsine par la méthode du fil dans des pousses, des pétioles et des limbes chez le pommier Bramley Seedling

d'après Roberts (1946)

Fig.3

2) Pulvérisation et Poudrage.

Les pulvérisations de solutions minérales sur l'ensemble du feuillage, comme les injections de produits solides, sont surtout utilisées dans des buts curatifs (l'emploi des poudrages est exceptionnel), mais on peut y avoir recours aussi pour le diagnostic des carences. Wallace souligne l'intérêt de cette méthode pour confirmer dans certains cas les indications données par les symptômes visuels. Elle a le mérite d'une grande simplicité de réalisation, tout au moins en ce qui concerne le mode d'application (du pulvérisateur au bassinage à l'arrosoir à pomme fine).

La détermination des doses à employer est lui aussi d'importance capitale, les dommages causés le cas échéant au feuillage étant obligatoirement très étendus. On estime en général que la concentration peut aller de 0.1 à 1 % pour les oligoéléments et de 1 à 4 % pour les éléments majeurs en solution. Pour les plantes dont le feuillage est difficile à mouiller, comme les choux, les oignons ou les poireaux par exemple, on ajoute à la solution un mouillant. On diminue beaucoup dans certains cas les risques de brûlure du feuillage en additionnant les solutions de chaux éteinte, ou, dans le cas de l'urée, de sulfate de magnésium ou de sucre.

Là aussi, pour avoir de bonnes réponses, il faut s'adresser à des feuilles jeunes, au premier stade de leur développement, et à des plantes assez jeunes, en période de vie active (parfois cependant des plantes plus âgées peuvent réagir de manière satisfaisante, en particulier, quand il s'agit de carences en Mn ou en B).

Les conditions météorologiques jouent un rôle important dans les opérations de pulvérisation. Il vaut mieux les faire à un moment où il y a peu de pluies. D'autre part, si l'insolation est trop forte, les risques de lésions par brûlure sont accrus.

L'effet des pulvérisations est rapide, mais peu durable, du fait de l'obligation d'utiliser des produits très dilués (Dans des buts curatifs, il est parfois recommandé d'opérer en hiver sur des arbres dépouillés de leur feuillage ; on peut alors utiliser des solutions assez concentrées sans danger de lésions graves ; sur les arbres fruitiers, d'excellents résultats ont été obtenus par des pulvérisations sur les écorces).

Il existe actuellement une très abondante documentation bibliographique pour tout ce qui touche aux pulvérisations de solutions minérales sur le feuillage, mais peu d'études semblent avoir été faites sur les cultures proprement tropicales.

*

* *

INTERET ET LIMITES DE CES METHODES

Prises dans leur ensemble, ces méthodes sont intéressantes surtout à deux points de vue :

- On a la certitude que l'élément appliqué atteint les organes ou les tissus déficients, ce qui n'est pas toujours le cas quand on l'incorpore au sol où il peut être immobilisé, insolubilisé ou rendu inassimilable à la plante.

Et la certitude que la réponse est bien un effet direct du traitement alors que quand on ajoute l'élément au milieu nutritif, il est toujours possible que les effets soient indirects (modification du pH ou du potentiel redox, dissimulation d'une substance toxique, interaction avec un autre constituant du milieu).

- La réponse de la plante est rapide, une à deux semaines, parfois moins, pour presque toutes les techniques envisagées. C'est l'injection d'une solution dans le limbe des feuilles qui donne la réponse la plus rapide, au bout de deux jours dans certains cas. Ce qui peut permettre éventuellement un traitement curatif immédiat.

Mais l'emploi de ces méthodes paraît limité à des déficiences graves, se traduisant par des symptômes marqués, et surtout aux différentes chloroses, où la réponse au traitement se manifeste dans la coloration du feuillage. L'interprétation des résultats tend en effet à devenir beaucoup trop difficile quand il s'agit de la croissance de la feuille.

D'autre part, on a déjà vu ci-dessus que certaines plantes étaient réfractaires à certains de ces modes d'investigation, soit parce que le cheminement des produits introduits était sujet à de trop grandes variations, soit parce que l'absorption se faisait mal.

Les techniques de Roach proprement dites (solutions liquides et "petits réservoirs") exigent beaucoup d'habitude et d'habileté de la part de l'opérateur. Le vent, la pluie, etc. créent des complications supplémentaires. Les modifications apportées par Roberts ne remédient que partiellement à ces inconvénients. Il semble très difficile d'obtenir des résultats avec le procédé du fil. La méthode du tampon de coton, au contraire, paraît devoir être recommandée (en prenant certaines précautions quant aux matériaux servant à la fixation du tampon).

D'après Roach lui-même, la technique la plus courante serait celle de l'injection par le pétiole sectionnée.

*

* *

APPLICATIONS

1) Aux différents éléments.

Roach a expérimenté avec N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni et B.

Roberts donne les résultats de ses essais pour Fe et Mn.

Les pulvérisations donnent de bons résultats pour N, P, K, Fe, Mn, B, Cu, Zn, et Mo. D'après Wallace, on obtiendrait difficilement des réponses convenables avec Mg.

2) Aux différentes plantes.

Pour ce qui est des techniques d'injection de solutions, on peut trouver des renseignements sur les plantes suivantes (en particulier sur leurs réactions et les voies de cheminement des substances injectées) dans les publications citées ci-dessous (pour les références complètes, voir en fin de chapitre) :

Abricotier	:	Roach et Roberts - 1945.
Aubergine	:	" " - " .
Caféier	:	Roach - 1938 et 1939.
Citrus	:	Roach et Roberts - 1945.
Fève	:	Hill et Roach - 1940.
Fraisier	:	Roach - 1938 et 1939.
Framboisier	:	Roach et Roberts - 1945.
Goyavier	:	" " - " .
Groseillier à grappe	:	Roach - 1938 et 1939.
Groseillier à maquereau	:	" " "

Hortensia .	:	Roberts - 1946.
Houblon	:	Roach et Roberts - 1945.
Lupin	:	" " "
Pêcher	:	" " "
Poirier	:	" " " - et Roberts - 1946.
Pomme de terre	:	Roach et Roberts - 1945 - et Hill et Roach - 1940.
Pommier	:	Roach - 1938 et 1939 - et Roach et Roberts - 1945.
Prunier	:	Roach et Roberts - 1945.
Rosier	:	Roach et Roberts - 1945.
Soja	:	Lal - 1945.
Tabac	:	Lal - 1945.
Théier	:	Storey et Leach - 1933.
Tomate	:	Hill et Roach - 1940.

C'est Bennett (1931) qui a mis au point la technique d'injection des sels de fer sous forme solide dans le tronc et les branches des arbres fruitiers.

Duggan (1943) l'a appliquée aux sels de Mn sur cerisier. Roach et ses collaborateurs ont employé aussi ces procédés. On les a utilisés également pour le Cu sur Hévéa, etc, etc.

Pour ce qui est des pulvérisations sur le feuillage, la documentation bibliographique actuelle est extrêmement abondante.

De toute façon, les quelques références données ici ne le sont qu'à titre indicatif et n'ont pas la prétention de constituer une bibliographie complète du sujet.

BIBLIOGRAPHIE

- A bibliography on the application of plant nutrients by leaf spraying -
Soils and Fertilizers, T. 16, N° 4, P. 246-62 - 1953.
- F.G. ANDERSSSEN - Chlorosis of deciduous fruit trees due to a copper
deficiency - J. Pomol., 10, P. 130-146 - 1932.
- J.P. BENNETT - The treatment of lime induced chlorosis with iron salts -
Univ. of California Agric. Expt. Sta. Cir. 321 - 1931.
- M.J. BUKOVAC, S.H. WITWER - The absorption and mobility of foliar
applied nutrients - Plant Physiol. 32, Supl. XXXIX -
1957.
- J.B. DUGGAN - A promising attempt to cure chlorosis due to manganese
deficiency, in a commercial cherry orchard - J. Pomol. 20,
P. 69-78 - 1943.
- H. HILL - W.A. ROACH - Injection for the diagnosis of mineral deficien-
cies in the tomato, the potato, and the broad bean -
Ann. Bot. N.S. 4, P. 505-522 - 1940.
- B.N. LAL - Plant injection methods for the diagnosis of mineral défi-
ciencies in tobacco and soya bean - Annals of Botany -
1945.
- J. LAVOLLAY - Trois aspects de la nutrition minerale - Bul. Soc. Fr.
Phys. Vég. T. I - N° 3 - P. 67-74 - 1955.
- E. MIDGE - La fumure et le traitement des plantes par pulvérisation
foliaire - J. Agric. Trop. Bot. Appl., Vol. 3, N° 1-2,
P. 1-31 et N° 3-4, P. 163-199 - 1956.
- P. PREVOT - Diagnose rapide des maladies de carence par la methode de
Roach - Oléagineux, N° 7, P. 435-6 - 1950.
- W.A. ROACH - Plant injection for diagnostic and curative purposes -
Imp. Bur. of Hort. and Plant Crops - Tech. Comm. N° 10 -
1938.
- W.A. ROACH - Plant injection as a physiological method - Ann. Bot. N.S.
3, P. 155-226 - 1939.

- W.A. ROACH - Diagnosis of mineral deficiencies and excesses by systematic leaf injection and analysis - East Malling Res. Sta. Ann. Rep. for 1939 - P. 51-58 - 1940.
 - W.A. ROACH - Preliminary diagnosis of mineral deficiencies by plant analysis and plant injection - Trans. Int. Soc. Soil Sci. Comm II et IV, Vol. 1, P. 240-1 - 1952.
 - W.A. ROACH - W.O. ROBERTS - Further work on plant injection for diagnostic and curative purposes - Jour. Pomol. and Hort. Sci., XXI, P. 108-119 - 1945.
 - W.O. ROBERTS - Leaf painting as a method of diagnosis of mineral deficiency - Ann. Rep. East Malling 1943 - P. 67 - 1944.
 - W.O. ROBERTS - Simplification of the Roach Method of diagnostic plant injection - J. of. Pomol. and Hort. Sci. - XXII, N° 3 et 4, P. 184-8 - 1946.
 - W. STILES - Trace elements in plants and animals - Cambridge University Press - 1951.
 - H.H. STOREY - R. LEACH - A sulphur deficiency disease of the tea bush - Ann. Appl. Biol. 20, P. 23-56 - 1933.
-

UTILISATION DES RADIOISOTOPES

UTILISATION DES RADIOISOTOPES

Du point de vue limité qui nous occupe ici - méthodes d'étude des besoins minéraux des plantes - l'emploi des radioisotopes ne constitue pas en lui même une méthode nouvelle et distincte. Il a seulement permis de tirer un meilleur parti des techniques existantes, de mieux contrôler leur portée et de mieux comprendre et interpréter les résultats obtenus.

Dans le domaine des études proprement physiologiques, les radioisotopes ont en effet ouvert des possibilités considérables pour les recherches sur l'absorption, le transport et la localisation dans la plante des éléments minéraux. Pour ce qui est des applications agronomiques, c'est surtout en ce qui concerne les traitements curatifs et les apports d'éléments, après détermination des besoins, que les moyens nouveaux ont permis des progrès importants (utilisation rationnelle des engrais, etc). Mais ceci est déjà en marge du but que nous nous sommes fixés ici.

En passant en revue les différentes méthodes dont il a été question jusqu'à présent, on verra pour chacune d'entre elles les perfectionnements que peut y apporter l'emploi des "traceurs".

*

* *

A - ANALYSE DU SOL.

Les techniques isotopiques ont fourni toute une série d'outils nouveaux pour l'analyse des sols :

- ^{32}P , ^{45}Ca , ^{42}K ont permis des recherches sur la mobilité des ions dans les sols.
- Les radioisotopes ^{14}C , ^{32}P et l'isotope stable ^{15}N peuvent servir à étudier les formes et le comportement de l'azote et de la matière organique (L'utilisation de ^{15}N est cependant limitée par la nécessité du recours à un spectrographe de masse très coûteux).
- ^{45}Ca et surtout ^{32}P apportent de nouveaux moyens d'appréciation de la portion de ces éléments qui sont réellement disponibles pour la plante dans le sol.

Les travaux ont été poussés surtout en ce qui concerne ^{32}P , du fait qu'il s'agit d'un isotope facile à obtenir et à manipuler et du fait de l'intérêt de tout ce qui se rapporte aux phosphates. On dispose de deux procédés :

- a) La détermination du phosphate isotopiquement échangeable dans les sols.
- b) La détermination de ce qu'on a appelé la valeur Larsen ou valeur "A".

Cette deuxième manière d'opérer n'est en somme qu'une méthode d'analyse biologique du sol, fondée sur les réactions des plantes supérieures. Mise au point par Larsen (1952), elle consiste à mélanger intimement au sol à étudier une quantité connue de ^{31}P et de ^{32}P . On cultive ensuite des plantes, en pots, sur ce sol. Au bout d'un certain temps, quand l'équilibre isotopique est établi dans la plante et dans le sol, on récolte et on analyse la matière végétale. On peut alors calculer la valeur de L, c'est à dire du phosphore disponible dans le sol, d'après la formule :

$$L = \frac{Y_b (X_p - D)}{Y_p} - X_b$$

où X_b et Y_b = quantités de P^{31} et de P^{32} ajoutées au sol

X_p et Y_p = " " " présentes dans la plante

D = " " P apportées par la graine.

La valeur trouvée pour L serait indépendante de la quantité de ^{31}P et ^{32}P ajoutée, mais varierait suivant l'espèce de plante choisie. Cette méthode est évidemment plus longue et plus délicate que la détermination directe du phosphore isotopiquement échangeable du sol par agitation en présence d'une solution contenant du ^{32}P , mais elle aurait l'avantage d'être plus générale et de donner dans l'ensemble des cas possibles une idée plus juste du P réellement disponible, le fait de passer par l'intermédiaire de la plante elle-même faisant automatiquement intervenir aussi la vitesse de passage en solution du phosphore.

*

* *

B - ANALYSE DE LA PLANTE -

L'emploi des "traceurs" n'a ici qu'un intérêt indirect et complémentaire, ce qui ne veut d'ailleurs pas dire négligeable.

Le fait de pouvoir suivre "à la trace" les radioisotopes mis à la disposition des plantes autorise des recherches qui sont en rapport, surtout à deux points de vue, avec les méthodes d'analyse de la plante que nous avons étudiées :

1) Elles permettent de préciser le choix de l'organe à prélever et les conditions de récolte des échantillons :

- en donnant la possibilité de suivre la distribution et la localisation des éléments à l'intérieur de la plante ;
- en montrant l'influence exacte de certains facteurs externes sur la composition chimique des échantillons (études faites avec ^{32}P et ^{42}K sur les pertes par lessivage à partir des feuilles sous l'action de la pluie, etc).

2) Elles sont surtout susceptibles d'aider à une meilleure compréhension et à une meilleure interprétation des résultats :

- en apportant des données plus précises sur les interactions entre éléments, les antagonismes d'absorption, les questions relatives aux "transporteurs", etc ;
- en contribuant à la connaissance du rôle joué par les conditions du milieu (effets de la température du sol sur l'absorption, etc) ;
- en fournissant une technique très élégante pour l'appréciation du développement du système racinaire et l'étude de sa répartition dans le sol (en introduisant des éléments marqués, à différents niveaux, dans le sol, il est relativement facile de connaître le moment où les racines atteignent certaines zones ou simplement leur répartition dans les différentes couches de terrain, et ceci sans mutiler la plante, en mesurant seulement l'apparition de la radioactivité dans les feuilles).

*

* *

C - INJECTION ET APPLICATION DIRECTE A LA PLANTE DE SOLUTIONS OU DE
PRODUITS MINERAUX.

Dans ce domaine, on dispose grâce aux radioisotopes d'un excellent test d'efficacité des techniques. De nombreux travaux ont déjà été faits pour étudier la pénétration des éléments à travers les écorces dans le cas des arbres et surtout la pénétration des éléments appliqués ou pulvérisés sur les feuilles (^{32}P , ^{42}K , ^{45}Ca , etc). On a déjà un certain nombre de données sur les facteurs affectant la pénétration de ces éléments et sur leur distribution dans la plante suivant qu'ils ont été absorbés par les racines ou par d'autres organes. Les techniques d'autoradiographie, fondées sur l'action des radiations ionisantes sur les émulsions photographiques (noircissement proportionnel à la quantité de radiations absorbée dans l'émulsion), rendent ici les plus grands services pour les recherches sur la localisation des substances radioactives. Elles ont le grand avantage de pouvoir être utilisées par des chercheurs non spécialisés en radiobiologie.

*

* *

BIBLIOGRAPHIE

- A.F. BILQUEZ - Développement de l'emploi des radiations ionisantes dans les recherches relatives à l'agriculture - J. Agric. Tropi. Bota. Appliquée - Vol. IV - N° 9-10 - P. 445-52 - 1957.
 - P. PREVOT - Conférence internationale sur l'utilisation des radio-isotopes dans la recherche scientifique - Oléagineux, N° 11, P. 665-8 - 1957.
 - Dans "Proceedings of the International Conference on the peaceful uses of Atomic energy" Genève 1955, Vol. 12 (New-York, Un. Nations 1956) :
 - Kursanov - Radioisotopes in Biology and Agriculture - P.3-9
 - Spinks - Use of Radioisotopes in Agriculture - P. 75-86
 - Mitsui - Plant Nutrition, Fertilizer and Soil - P. 87-88.
 - Dans "Progress in nuclear energy, Séries VI, Biological Sciences, Vol. 1. (Londres, 1956) - Chap. 5 - The use of radioactive isotopes in the study of plant nutrition.
 - R. SCOTT RUSSELL - I. The mechanism of ionic accumulation by plants.
II. Plant Soil Relationships - P. 87-106
 - H.B. TUKEY-S.H. WITTEBER - III. The entry of nutrients into plants through stem, leaf, and fruit, as indicated by the radioactive isotopes - P. 106-114.
-

METHODES DIVERSES

Les chapitres précédents étudient dans le détail les méthodes dont l'emploi est le plus général ou le plus classique. Il en existe d'autres dont l'utilisation est plus restreinte ou plus particulière, ou repose sur des fondements plus incertains.

Il y a d'abord les méthodes qui cherchent à apprécier les besoins minéraux des plantes, plus ou moins indirectement, par l'intermédiaire d'un indice ou d'un phénomène physiologique plus ou moins étroitement lié aux fluctuations de l'alimentation minérale. Ainsi la baisse de la teneur en chlorophylle chez les plantes carencées en azote a suggéré à certains auteurs l'idée de fonder une méthode de détermination des besoins en azote sur le dosage de la chlorophylle (Gassner et Goeze 1936; Boynton et Compton 1945, etc). On peut sans doute rattacher à ce groupe la "méthode de flétrissement" (Anwelkemethode) du professeur Arland, de Leipzig.

METHODE DE FLETRISSEMENT D'ARLAND -

Les recherches d'Arland sur l'intensité de la transpiration des plantes cultivées dans les conditions les plus diverses l'ont amené à mettre en évidence une corrélation inverse entre cette intensité et le rendement exprimé en poids de matière sèche produite. Les plantes étant comparées dans des circonstances données identiques, plus l'intensité de transpiration est faible, plus le rendement en matière sèche est élevé. Des études théoriques restent encore à faire pour donner une interprétation physiologique complète de ces faits. Mais on sait en tout cas que plus une plante est riche en protéines, plus son pouvoir de rétention vis à vis de l'eau est grand et plus l'intensité de sa transpiration est faible (ce qui fait que ces plantes à intensité transpiratoire faible sont aussi souvent les plus intéressantes du point de vue des qualités alimentaires). D'autres phénomènes peuvent entrer en jeu (rôle des équilibres glucidiques dans l'ouverture des stomates).

Partant de ces considérations, Arland a mis au point une méthode destinée à permettre la détermination rapide de la valeur relative de plusieurs formules de fumure mises en comparaison, de l'action comparée de façons culturales diversement appliquées et de la valeur relative de diverses variétés d'une même espèce pour une situation donnée. Les expériences poursuivies sur des sols différents, aussi bien au laboratoire que sur le terrain et sur des essais culturaux à long terme, ont montré que les variations de ces facteurs agissaient sur l'intensité transpiratoire et que celle-ci y répondait de manière cohérente. Plus le traitement est favorable, plus l'intensité transpiratoire est réduite (par rapport au poids de matière fraîche, à la "masse transpirante").

Les courbes rendant compte de cette intensité et de la production de matière sèche changent de pente en même temps (ce qui peut donner des indications sur les consommations de luxe et les limites d'utilisation économique des éléments.

Arland mesure ce qu'il appelle la transpiration relative, c'est à dire la quantité d'eau perdue par une plante ou une fraction de plante en un temps donné, exprimée en pour 100 de la matière fraîche.

La technique est applicable aussi bien à des plantules entières qu'à des rameaux dont on paraffine la section, aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire (où on travaille en vases, le sol étant humidifié à 60 % du contenu en eau à saturation). On pèse les échantillons immédiatement après la récolte. Puis on les laisse se "flétrir", en général pendant 30 minutes ; mais ce délai peut varier suivant les climats et suivant les espèces. On pèse alors une 2^e fois. La différence entre les deux pesées représente l'eau transpirée.

L'espace de temps qui doit s'écouler entre les deux pesées n'est pas fixé arbitrairement. Il correspond à la période où la transpiration stomatique domine. Après un certain temps, les mécanismes de régulation de la plante entraînent la fermeture des stomates. Seule la transpiration cuticulaire reste alors en jeu, les différences entre les échantillons s'estompent et disparaissent, et les courbes se recourent. Des mesures faites trop tardivement n'auraient donc plus aucun sens du point de vue qui nous occupe.

Arland a conçu une balance particulièrement adaptée à ce genre de travail et permettant, ce qui est essentiel, des pesées en série précises et surtout très rapides, même sur le terrain (pas de manipulations de poids, plateaux spéciaux pour la fixation des échantillons, etc). Bien entendu toutes les précautions habituelles sont de rigueur (échantillons rigoureusement comparables, répétitions, etc). De plus, l'intensité transpiratoire ayant une valeur éminemment variable en fonction des conditions externes et des facteurs internes, les mesures doivent non seulement être aussi rigoureusement standardisées que possible dans le temps et l'espace, mais il faut aussi enregistrer quantitativement les variations possibles des facteurs externes en vue de l'interprétation d'éventuelles anomalies.

La méthode est applicable dans les limites des conditions de milieu permettant le jeu normal des fonctions physiologiques. Elle ne l'est plus dans des conditions extrêmes de température ou d'humidité.

Elle fait partie des techniques d'observation qui cherchent à obtenir un diagnostic précoce. D'après Arland, des déterminations variables peuvent être faites, suivant les espèces, déjà 14 à 20 jours après la levée.

Les travaux d'Arland ont porté sur des plantes très diverses : céréales, pommes de terre, plantes fourragères, digitales, espèces forestières.

Cette étude de la transpiration ne peut évidemment donner que des réponses très simples (plus ou moins "bien" - plus ou moins "mal"), et n'ayant leur intérêt sauf pour le choix d'espèces adaptées à une situation donnée - que dans les cas où les conditions de milieu sont connues et définies (essais de traitement et d'engrais). Elle serait alors utile et économique pour établir rapidement par exemple les doses d'éléments le plus convenables à apporter pour corriger des carences connues, dans une situation particulière donnée. Son intérêt est donc surtout pratique. On ne peut en attendre des indications complètes et précises, permettant de mieux comprendre ce qui se passe dans la plante.

On a critiqué les mesures d'Arland en se plaçant du point de vue du bilan d'eau de la plante. Il est évident que cette notion de quantité d'eau transpirée par rapport à la "masse transpirante", au poids de matière fraîche, ne rend pas compte de la quantité d'eau exportée par plante ou par hectare de plantes en culture. Entre autres, interviennent des questions de développement de surface par rapport aux poids. Il ne semble pas que ces critiques enlèvent leur signification à ces mesures quand elles sont destinées à apprécier certaines propriétés des tissus liées à la production de matière sèche, puisque c'est de cela qu'il s'agit ici :

Mais ce qu'on peut penser c'est que :

- la transpiration relative dépend vraiment très étroitement des conditions extérieures du moment et des conditions extérieures en général, ce qui augmente les difficultés d'une méthode qui la choisit comme critère ;

- les conclusions à tirer de l'étude de plantes très jeunes semblent délicates ;

- il faudrait avoir une connaissance plus systématique et plus approfondie des corrélations entre intensité transpiratoire, composition de la plante et rendement en matière sèche, dans les différentes conditions pour pouvoir se faire vraiment une idée sur les fondements de la méthode ; beaucoup de recherches restent encore à faire dans ce domaine. Suivant les carences, ce ne sont sans doute pas toujours les mêmes facteurs internes qui agissent sur la transpiration pour la modifier.

- BIBLIOGRAPHIE -

- A. ARLAND - Die Transpiration intensität der Pflanzen als Grundlage bei der Ermittlung optimaler Acker - und Pflanzenbaulicher Kulturmassnahmen unter besonderer Berücksichtigung von Pflanzenanalysen - An. des plantes et problèmes des engrais minéraux - P. 1-8 - IRHO - 1954.
- A. ARLAND - Bodenkunde im Blickfelde der Transpirationintensität der Kulturpflanzen - VIè Cong. Int. Sci. Sol, Paris, Vol. D, p. 81-4, 1956.
- A. ARLAND - J. ENZMANN - (Über die Beziehungen zwischen Nährstoffzustand und Transpirationintensität) - Zeit. für Acker - und Pflanzenbau - Bd. 101 - Heft 1/2 - P. 5-21 - 1956.
 - Die Anwelkemethode im Dienste des Landbaues - (Ouvrage collectif) - Inst. für Acker - und Pflanzenbau der Karl-Marx Universität, Leipzig - 1955.
- M. FERRAND - Die Anwelkemethode im Dienste des Landbaues, Compte-rendu d'ouvrage - C.R. Ac. Agri. T. 42, N° 8, P. 428-31 - 1956.

*

* *

Si on quitte le domaine des méthodes plus ou moins directement applicables dans la pratique agronomique, on voit les chercheurs qui ont étudié les besoins minéraux des plantes tenter de s'affranchir des servitudes qu'entraîne la culture des plantes supérieures et essayer de résoudre certains problèmes avec l'aide de microorganismes, d'organes ou de fragments d'organes isolés (disques découpés dans des limbes foliaires et immergés dans des solutions minérales, cultures de racines isolées, etc) ou de cultures de tissus proprement dites.

UTILISATION DES MICROORGANISMES ET DE CERTAINES PLANTES AQUATIQUES.

En raison des difficultés qu'il y a à purifier les milieux de culture, en raison des réserves assez considérables qu'apportent les graines de la plupart des plantes supérieures, en raison aussi de la rapidité des réponses et d'un encombrement réduit, les microorganismes et certaines plantes aquatiques de dimension très réduite (Ex. Lemna, Travaux du laboratoire du Professeur Lavollay) ont constitué le matériel de choix pour beaucoup de recherches sur le rôle des oligoéléments (caractère de nécessité des éléments, etc), sur la nature de certaines interactions, etc.

UTILISATION DES CULTURES DE TISSUS.

Plus récemment, on a cherché à utiliser les cultures de tissus pour des études de nutrition minérale (travaux de Heller). Cette technique présentait en effet elle aussi certains avantages intéressants : possibilité d'une large expérimentation en série, facilité relative de contrôle rigoureux du milieu.

Pour ce qui est de la détermination quantitative des besoins minéraux, les résultats obtenus ne peuvent pas dépasser le cadre des cultures de tissus. Il semble qu'il en soit de même pour les questions d'absorption proprement dites. D'autre part, la méthode ne semble pas se prêter à l'étude des interactions, sauf dans des cas particuliers (K/Na, Ca/Mg) ; Heller a émis plusieurs hypothèses à ce propos (cellules en prolifération active peu sensibles à ces phénomènes ; épuisement et modification en cours de culture du milieu qu'il est actuellement techniquement impossible de renouveler dans des expériences en série).

Mais elle peut permettre d'obtenir des données qualitatives d'ordre général et susceptibles d'orienter des recherches ultérieures sur plantes entières à propos :

- du rôle des éléments et de leur caractère de nécessité pour la vie cellulaire, des possibilités de remplacement des éléments les uns par les autres, etc. Des réserves sont à faire (il s'agit de tissus vivant dans des conditions d'hétérotrophie, en présence de sucre, de tissus fragiles, dont la réactivité peut être exagérée ou déformée). Cependant l'accord entre les résultats obtenus et les données classiques de la physiologie est très généralement bon.
- de la localisation des éléments dans certaines catégories de tissus (avec emploi d'éléments radioactifs).
- de l'influence des différentes déficiences sur les caractères histologiques (travaux de Melle Tören), cytologiques et cytochimiques (apparition de pigments, etc).

- BIBLIOGRAPHIE -

- R. HELLER - Recherches sur la nutrition minérale des tissus végétaux cultivés in vitro - Paris, Masson 1953.
- R. HELLER - Utilisation de la culture des tissus dans les problèmes de la nutrition minérale - Bul. Soc. Franç. Physio. Vég. - I, N° 3, p. 42-6 - 1955.

- J. TÖREN - Effets des carences minérales sur l'anatomie des tissus végétaux cultivés in vitro - Rev. Gén. Bota., 62, N° 737, P. 392-421 - 1955.

*

* *

ETUDE DE L'ADSORPTION RADICULAIRE.

Enfin, certains chercheurs ont été amenés, pour mieux comprendre les besoins de certaines plantes, à étudier les propriétés d'échange des membranes radiculaires. En effet, c'est sans doute au niveau du premier stade de l'absorption des cations, c'est à dire au niveau de l'adsorption, qu'il faut chercher, dans certains cas, l'explication du comportement différent d'espèces différentes à l'égard de milieux identiques.

Pour ces recherches et pour celles relatives plus généralement aux questions soulevées par les phénomènes d'échange entre colloïdes du sol, solution du sol et racines, différentes techniques ont été proposées :

1) Mesure de la capacité d'échange par saturation des racines avec une solution d'un sel neutre et mesure de la quantité de cations fixés par échange avec une solution acide de "remplacement".

Les conditions opératoires doivent être rigoureusement définies si on veut obtenir des résultats reproductibles (l'action de la solution acide permet difficilement de faire la distinction entre les ions superficiels adsorbés et les ions déjà absorbés).

2) Titrages potentiométriques : on mesure l'hydrogène échangeable présent à la surface de la racine par addition d'eau de chaux jusqu'à pH 7. On répète la même mesure après électrodialyse des racines, ce qui permet de déterminer leur capacité totale d'échange.

3) Mesure de l'activité cationique dans les systèmes radiculaires au moyen d'une électrode à membrane d'argile.

- BIBLIOGRAPHIE -

- D. BLANC-AICARD - Etudes préliminaires sur l'adsorption radiculaire des cations - An. Agro. Série A, N° 4, p. 615-33 - 1955. (Avec revue bibliographique et indications techniques).
- R.L. SMITH - A. WALLACE - Cation exchange capacity of roots and its relation to Ca and K content of plants - Soil Sci. 81, p. 97-109 - 1956.

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

20, Rue Monsieur - PARIS 7°

N° 6 RON

2ème Trimestre 1959
