7 DECE 1973

ANALYSE DU SOL ET DE LA PLANTE POUR LE CONTROLE DE L'EXPERIMENTATION

par A. LOUE
Ingénieur agronome INA
Services Agronomiques de la Société des Potasses et de l'Azote

Introduction

L'expérimentation des engrais au champ conduit surtout à la mesure des *rendements* en fonction des traitements appliqués. Elle se complète souvent de *mesures biométriques* dans le but de procéder à une analyse plus fine des résultats (exemple : 1) détermination des composantes du rendement d'une céréale selon : Rendement = nombre d'épis/m^2 x nombre de grains par épi x poids de 1000 grains x coefficient - exemple 2) influence des traitements sur le peuplement). Il s'y ajoute parfois des mesures de *critères de qualité*, d'appréciation simple. D'autre part, les résultats peuvent être soumis à une *interprétation économique* portant sur la rentabilité des fumures, grâce aux fonctions de production, aux surfaces de réponse et de profit. L'utilisation d'un ordinateur permet de traiter économiquement un grand nombre de résultats expérimentaux. Tout ce qui précède procède du souci de valoriser au maximum la charge que représente l'expérimentation.

L'agronome de la fertilisation, s'il se double d'un spécialiste de la science du sol ou de la nutrition minérale des plantes a l'ambition d'essayer de comprendre et *d'expliquer les résultats*. Pour ce faire il interrogera surtout le sol et la plante. Ainsi l'expérimentation moderne est-elle souvent accompagnée *d'études sur les sols et la nutrition minérale des plantes*. L'expérimentation constitue d'ailleurs le support idéal, pour de telles études en raison des modifications connues imposées expérimentalement au milieu.

La nécessité de l'expérimentation au champ est généralement reconnue mais nombre d'auteurs ont mis l'accent sur ses limites et ses difficultés dans la phase d'extrapolation des résultats. Les contrôles au niveau du sol et de la plante devraient précisément *faciliter l'extrapolation* et la rendre moins hasardeuse.

BIBLIOTHEQUE SCD-2 O.R.S.T.O.M.
O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 28327
Cote : B

.../...

Les deux méthodes de contrôle ont cheminé de concert depuis plusieur dizaines d'années ; le plus souvent leur utilisation est conjointe. Le but de cet exposé est de dresser l'inventaire de leurs possibilités.

1) L'Analyse du sol et le contrôle de l'expérimentation

Il est en premier lieu nécessaire de connaître *la teneur du sol en éléments nutritifs* (soit en état dit de réserve, soit mieux en état dit assimilable). Ensuite grâce surtout aux essais agronomiques et secondairement aux enquêtes sols/rendements, on cherche à établir la *relation* éventuelle *entre teneurs du sol et absorption par la plante et rendements*. Enfin il convient d'y ajouter la recherche des concentrations les meilleures et des *rapports entre les divers éléments fertilisants* en vue de l'obtention des meilleurs rendements.

Comme l'a bien précisé Madame HUGUET la rationalisation de la fertilisation à partir des analyses de sols dépend de deux conditions à remplir par celles-ci : la sécurité des techniques de dosage et les progrès dans l'interprétation des résultats des analyses. La première condition est de nos jours le plus souvent remplie mais comme le souligne cet auteur "l'étalonnage des résultats analytiques vis-à-vis du comportement des plantes progresse lentement et ne couvre pas toutes les cultures". (Mme HUGUET (15)).

Le contrôle des sols des expérimentations vise précisément à améliorer cet étalonnage.

Nous ne passerons pas en revue ici les méthodes de dosage des éléments les plus utiles aux plantes mais nous examinerons les mesures susceptibles d'intervenir sur des essais.

Au cours de la vie d'un essai de fertilisation, l'analyse de sol peut intervenir 1) avant l'implantation ; 2) en cours d'essai ; 3) en fin d'essai.

Des analyses déterminées peuvent également être faites sur des essais plus ou moins nombreux, particulièrement dans un but d'étalonnage de méthode.

11) Analyse avant essai

L'analyse du sol avant essai est une nécessité reconnue par tous sauf dans certains cas d'essais annuels sur des thèmes particuliers.
Il convient en effet de connaître la carte d'identité du sol de l'essai avec le plus de "signes particuliers" possible : squelette du sol, analyse granulométrique, calcaire, matière organique, pH, N total, rapport C/N, P_2O_5 assimilable, bases échangeables (CaO, MgO, K_2O), capacité d'échange.

Le sol de l'essai doit en effet être très représentatif des conditions de milieu dans lesquelles l'expérimentation doit intervenir. Ensuite, cette condition étant remplie, l'échantillonnage des sols de l'essai doit être suffisamment poussé pour s'assurer de l'homogénéité requise par le thème de l'essai et le protocole expérimental. Certaines déterminations spéciales peuvent intervenir.

L'analyse chimique avant essai est indispensable au niveau de la parcelle, si l'expérimentateur cherche à dégager ensuite la signification statistique des résultats analytiques en cours ou en fin d'essai.

Dans la pratique les analyses physiques et de représentativité du sol de l'essai se feront au niveau des blocs ou des répétitions et les analyses chimiques d'homogénéité et d'identité au départ de l'essai se feront au niveau de la parcelle.

12) Analyse en cours ou en fin d'essai

Sur les essais de fertilisation à moyen ou long terme, il est nécessaire de suivre certaines caractéristiques du sol à des intervalles de temps adaptés.

121) Le pH

La mesure du pH peut être intéressante sur des essais de fertilisation de longue durée (LOUE (20)), sur des essais comparatifs de formes d'engrais.
Elle est également indispensable sur les essais faisant intervenir les oligo-éléments, ou étudiant indirectement l'interaction amendements x zinc, par exemple (Mme HUGUET (15)).

Ce contrôle est particulièrement important dans les essais sur amendements calcaires ou calco-magnésiens. Ainsi dans un essai K x Ca x Mg de type 3 x 3 x 3, poursuivi sur maïs pendant six ans en France dans la région de Pau on a obtenu les résultats suivants pour l'effet chaux, selon que les apports se faisaient en doses annuelles ou en doses bloquées tous les trois ans (LOUE (20)).

Tableau 1 : Evolution du pH à Pau Pont Long (Pyrénées)

Dose CaO kg/ha sur 6 ans	Essai doses annuelles 0-20	20-40	40-60	Dose CaO kg/ha sur 6 ans	essai doses bloquées 0-20	20-40	40-60
500	*4,49*	4,42	4,44	1000	*4,86*	4,72	4,64
2025	*4,74*^{xxx}	4,48^{x}	4,51^{x}	2725	*4,98*	4,77	4,73
3550	*5,09*^{xxx}	4,61^{xxx}	4,53^{xx}	4450	*5,25*^{xx}	4,81	4,71
ppds 0,05	0,08	0,06	0,06		0,14	0,11	0,11
ppds 0,01	0,11	0,09	0,09		0,20	-	-

Dans le cas présent d'une terre de défriche mise en culture de maïs et à pH initial de 5,0, une acidification importante a suivi la mise en culture avec les faibles apports de chaux. Le pH initial ne semble pas s'être élevé en six ans avec les apports supérieurs de chaux.

122) Azote

La détermination de l'azote total sur les essais de fertilisation minérale ne donne généralement pas de résultats utilisables. Mais des études ont été conduites sur des essais comportant apports azotés et restitutions organiques (MOREL (22)). Le dosage de N nitrique et N ammoniacal ne semble pratiqué que sur certains thèmes d'essais.

123) Acide phosphorique

En France l'acide phosphorique assimilable se détermine soit par la méthode de Dyer (extraction à l'acide citrique à 2 %) soit par la méthode de Joret-Hébert pour les sols calcaires (extraction à l'oxalate d'ammonium à 0,2 %). Les critiques formulées à l'encontre de ces méthodes portent sur la valeur d'appréciation de la capacité de sols de types différents à alimenter les cultures en phosphore en l'absence de résultats expérimentaux suffisants (problème abordé ci-après en 13). Par contre, sur un même essai, l'extraction selon la méthode adaptée au type de sol permet l'étude de l'évolution de P_2O_5 extrait selon cette méthode en fonction des traitements.

Les applications en expérimentation sont nombreuses telles que :

- *Bilan P_2O_5 du sol en fonction des doses appliquées*
- *Profil de distribution de P_2O_5 avec la profondeur, selon les modes d'apport, en particulier en arboriculture et viticulture.*
- *Comparaison des formes d'engrais phosphatés.*

L'examen sur un essai de l'appauvrissement ou enrichissement avec le temps et les traitements est l'exemple le plus simple mais non le moins parlant. Ainsi, à Pleyben en Bretagne, sur un essai factoriel 3 P x 3 K en liaison avec la Station Agronomique de Quimper, on obtenait l'évolution suivan des teneurs en P_2O_5 assimilable (et K_2O échangeable) pour les effets principaux des traitements.

Tableau 2 : Evolution de P_2O_5 et K_2O à Pleyben (Bretagne)

P_2O_5 ‰	Févri. 1961	Déc. 1963	Nov. 1965	oct. 1967	K_2O ‰	Févri. 1961	Déc. 1963	Nov. 1965	oct. 1967
PO	0,057	0,048	0,049	0,060	KO	0,107	0,055	0,063	0,068
P77	0,087	0,095	0,105	0,128	K94	0,197	0,086	0,148	0,161
P154	0,139	0,184	0,210	0,243	K188	0,215	0,167	0,259	0,292

La teneur en P_2O_5 des parcelles PO a très peu varié depuis 1956 (0,06 °/°°) ; celle des parcelles P1 s'est élevée progressivement pour atteindre 0,13 °/°° et celle des parcelles P2 est montée à 0,24 °/°°. Les écarts P1-PO et P2-P1 sont très hautement significatifs (ppds 0,01 = 0,021 °/°° P_2O_5 en octobre 1967 Il est évident que l'examen des résultats d'un essai (rendements) et celui de l'évolution du sol pour l'élément concerné constituent une base assez sûre de fixation du niveau de fertilisation.

124) Potassium

Ce qui vient d'être dit pour P_2O_5 s'applique à K_2O. La détermination classique porte en France sur le potassium échangeable extrait par l'acétate d'ammonium à pH 7. On sait que cette seule détermination (même complétée par le rapport potassium échangeable/capacité d'échange) ne permet pas de classer correctement tous les sols en fonction de leur réponse à K_2O. Le classement est par contre très amélioré s'il est réalisé par types de sols. Mais surtout cette détermination est très utile pour suivre un essai K ou factoriel incluant K, de moyenne ou longue durée.

Les exemples d'application sont nombreux et à peu près les mêmes que pour P_2O_5 :

- Evolution de K échangeable selon les doses, avec ou sans bilan
- Evolution saisonnière
- Profil de distribution de K_2O, selon les doses, les formes, les types de sols, l'irrigation.

Exemple 1 : évolution de K échangeable selon les doses et le mode de répartition de la fumure potassique sur la rotation

Sur l'essai de Sancourt, dans le Nord de la France est étudiée la réponse de la fumure potassique à long terme et l'influence de la répartition de cette fumure au cours d'une rotation type (betteraves -blé - orge). Des échantillons de sol furent prélevés par parcelle à l'issue des 2ème, 3ème et 4ème rotations triennales. L'évolution de 1959 (avant essai) à 1972 est la suivante pour la potasse échangeable.

Tableau 3 : Evolution de K_2O échangeable à Sancourt (Nord)

kg/ha K_2O	rotation	Mode de répartition			K_2O échangeable (°/°°)			
1959 à 1969	1970 à 1972	Bett.	Blé	Orge	1959	1966	1969	1972
0	0	0	0	0	0,126	0,100	0,090	0,075
200	250	1/3	1/3	1/3	0,125	0,100	0,127^{xx}	0,092
200	250	3/3	0	0	0,120	0,093	0,100	0,090
400	500	1/3	1/3	1/3	0,119	0,123^{x}	0,138^{xx}	0,125^{xx}
400	500	1/2	1/4	1/4	0,126	0,128^{xx}	0,145^{xx}	0,112^{xx}
400	500	3/3	0	0	0,124	0,105	0,107	0,100
		ppds 0,05			NS	0,020	0,027	0,026
		ppds 0,01			-	0,028	0,037	0,035

Bien que les analyses de 1972 aient été effectuées par un laboratoire différent des analyses antérieures, on peut constater la netteté des résultats : le traitement privatif KO poursuit son appauvrissement et surtout, au sein d'une même dose globale sur la rotation on constate depuis 1959 que les apport fractionnés présentent des teneurs en K échangeable supérieures à celles des apports bloqués en tête de rotation. Il est évident que dans le cas de déterminations sur échantillons pris à des dates plus ou moins distantes, et plus encore dans le cas de laboratoires différents, il convient de placer dans les séries des échantillons de référence des prélèvements antérieurs.
L'exemple pris, en dehors des conclusions agronomiques proprement dites, montre ce que l'on peut attendre de tels contrôles, compte tenu des difficulté d'échantillonnage et de la variabilité.

Exemple 2 : les études de bilan K_2O - Il est fait un usage très fréquent de

cette méthode par les Services agronomiques de la SCPA tant sur le réseau d'essais régionaux que sur la Station d'Aspach en Alsace (GARAUDEAUX (10)). On constate en général dans ces contrôles qu'en cas de bilan nettement positif on ne retrouve qu'une fraction plus ou moins grande de l'enrichissement au niveau K_2O échangeable (fixation) et au contraire qu'en cas de bilan négatif on ne retrouve pas la perte ou même que celle-ci est faible du fait de la libération (HEBERT et REMY (14)). Un exemple chiffré de bilan est donné plu loin.

Les études les plus récentes se situent en fait dans le domaine de la recherche d'un diagnostic plus sûr.

13) L'analyse dans un but de diagnostic

La méthode consiste ici à soumettre des échantillons d'essais plus ou moins nombreux, réunis en un ensemble ou répartis en différentes classes selon les types de sols, à des analyses ou des tests nouveaux. *L'analyse du sol, mise en parallèle avec les résultats expérimentaux correspondants devrait permettre un meilleur étalonnage des résultats analytiques et donc une évolution des méthodes en vue d'un meilleur diagnostic.* Il faut dire que les résultats analytiques nouveaux sont apairés, plus à des résultats de cultures en pots qu'à des résultats d'essais au champ. Ce dernier rapprochement semble cependant nécessaire et mérite quelque développement à propos d'exemples portant sur P et K.

131) P_2O_5 "assimilable" et résultats expérimentaux

GACHON a proposé un indice de fertilité phosphorique des sols défini à partir du phosphore labile et du pouvoir fixateur des sols à l'égard des ions phosphoriques (GACHON (7)) :

$$I_L = L \times \frac{L}{L + F} \quad \text{ou} \quad I_E = E \times \frac{E}{E + F}$$

où L représente le phosphore "labile", E, le phosphore "échangeable" et F le phosphore sous forme dissoute, nécessaire pour élever la concentration des extraits $Ca\ Cl_2$, 0,01 M au niveau de 2 mg de P/litre, tous ces termes étant exprimés en ppm du sol. Cet Auteur a montré que ces indices étaient étroitemen liés au phosphore prélevé par le ray-grass cultivé en petits vases. Il a montr ensuite que cette méthode fournissait des éléments d'appréciation de la ferti-

lité phosphorique corroborant assez étroitement les résultats des expérimentations culturales effectuées dans le Massif Central (GACHON (8)), tandis que les méthodes chimiques traditionnelles conduisaient à des interprétations beaucoup plus délicates dépendant du type de sol.

Il a rapproché ses indices I_L et I_E des résultats expérimentaux obtenus à partir de 16 sols du Massif Central, de caractères variés.

Tableau 4 : Relation résultats analytiques / résultats expérimentaux

	Résultats analytiques					Résultats expérimentaux					
	P isotopiquement diluable		Pouvoir fixateur	Indices		P prélevé par ray-grass	Essais en vases sur radis		Essais au champ		
	L	E	F	IL	IE		Ind.	Sign.	Cult.	ind.	Signifi
1	65	51	82	29	19	28	15	+++	orge	83	+
2	92	70	88	47	31	33	11	+++	-	80	++
3	84	71	127	34	26	35	33	+++	-	100	-
4	85	44	75	45	16	37	36	+++	blé	89,91	++ et
5	86	69	135	34	23	39	34	+++	orge	89	++
6	107	59	145	46	17	44	34	+++	-	92	-
7	162	81	360	50	15	52	50	++	-	79	++
8	170	92	140	93	36	76	75	++	diver.	90-100	+ et -
9	175	99	100	111	50	99	-	-	-	90-100	+ et -
10	200	119	138	120	56	101	74	++	-	92-100	+ et -
11	206	143	140	123	72	102	65	+	orge	88	-
12	198	106	50	158	72	104	83	+	diver.	89-92	-
13	200	94	25	178	75	110	91	-	orge	96	-
14	250	120	70	196	76	127	86	+	-	98	-
15	465	237	810	170	54	135	54	++	luzerne	77-89	++ et
16	665	368	900	284	107	172	90	-	orge	91	-

(Les indices indiquent les rendements du témoin PO pour cent du rendement maximum).

Signification :
- \- = non significatif à P = 0,05
- \+ = significatif à P = 0,05
- ++ = hautement significatif à P = 0,01
- +++ = très hautement significatif.

Le tableau précédent rassemble les principaux résultats de cette étude. Les résultats expérimentaux sont les courbes de rendements obtenus en présence de doses croissantes de superphosphate soit au champ, (le plus souvent sur orge de printemps) soit en vases de végétation avec le radis comme plante test, ainsi que le P total prélevé par le ray-grass en culture d'épuisement en petits vases. Les 16 sols du tableau ont été classés en fonction du P prélevé par le ray-grass.

Les indices de rendement relatif obtenus sur radis se classent à peu près dans le même ordre.

.../...

Le phosphore isotopiquement diluable se situe très bien dans l'ordre de classement adopté.
Enfin les résultats analytiques classiques (P citrique méthode Dyer et P extrait par l'oxalate d'ammonium 0,2 N) non rapportés dans le tableau suivraient nettement moins bien l'ordre de classement. Après avoir formulé les réserves qu'il convient en raison du petit nombre de résultats expérimentaux, l'Auteur conclut que les indices I_L et I_E permettent d'apprécier avec une meilleure précision les possibilités de fourniture de P aux cultures.

Par la suite dans le but de tester la méthode proposée sur une gamme plus large de conditions de sols et de climats, l'Auteur l'a appliquée à un lot important d'échantillons prélevés en 67-68 dans les champs d'essais pluriannuels de diverses Stations.

Dans l'ensemble ces nouveaux résultats ont confirmé la valeur des indices de fertilité phosphorique I_E et I_L. Mais l'Auteur propose d'adopter des normes d'interprétation plus sévères pour les cultures les plus exigeantes en disponibilités phosphoriques (GACHON (9)).

132) <u>K_2O extrait au tétraphénylborate de sodium et résultats expérimentaux au champ</u>

Après divers auteurs, CABIBEL a étudié la libération du potassium par les sols au moyen du réactif Na Cl - Na TPB. Son étude a porté sur 34 échantillons de sols différents quant à leur origine ou à l'entretien de leur niveau potassique, mais appartenant tous à des dispositifs expérimentaux de longue durée, dont la réponse aux apports de potasse était connue (CABIBEL (3)).
Pour les échantillons de sols étudiés, la comparaison des quantités de K extraites en présence de Na Cl - Na TPB, pour les divers temps de contact utilisés et des résultats expérimentaux a fait apparaître *une assez bonne concordance entre les quantités de K extraites en 1 heure et la réponse à K_2O des cultures au champ*. La comparaison sur un même essai de la parcelle KO et d'une parcelle enrichie a aussi confirmé l'intérêt d'un temps d'extraction limité. CABIBEL s'est efforcé de classer les sols étudiés en fonction du type de réponse et il a reconnu que cette classification était délicate. Il a distingué trois cas :
1) Sols où la réponse aux apports potassiques est positive pour des cultures peu exigeantes en K : ici K échangeable suffirait à distinguer le groupe.

2) Sols où la réponse aux apports potassiques est positive pour des cultures exigeantes en K et où la réponse est nulle pour des cultures peu exigeantes : sols à réserve en K mobilisable moyenne.
3) Sols où la réponse est nulle : sols à réserve en K mobilisable élevée.

L'Auteur conclut que l'utilisation de NaTPB permet dans les sols étudiés de déplacer, dans les conditions expérimentales choisies, des quantité de K très supérieures à K échangeable. Il estime que les fractions les plus mobilisables sont aussi celles susceptibles d'être le plus facilement utilisée par la plante, les distances de diffusion pour le K étant alors les plus faibles et il conclut que "la fraction de K Na TPB libérée au temps de contact sol / solution d'extraction le plus court pourra constituer, quelles que soien les quantités de K libérées pour des temps de contact plus longs, un facteur d'appréciation des disponibilités en K du sol pour les cultures".

133) K extrait par micro cultures Stanford et résultats expérimentaux au champ

QUEMENER a appliqué la méthode Stanford en la modifiant à l'étude de sols d'essais potassiques du réseau SCPA. Le principe de la méthode et son adaptation au potassium ont été décrits par QUEMENER et ROLLAND (23). Certains résultats ont été publiés dans une note de GARAUDEAUX et QUEMENER (11).

Rappelons seulement ici la définition des mesures.
- *Potassium absorbé* (par les plantules d'orge au cours de la microculture = K exporté par les parties aériennes de plantes placées en contact avec le sol étudié - K exporté par les plantes cultivées sur sable.
- *Potassium échangeable* (contre solution d'acétate d'ammonium normale et neutr avant et après culture de Stanford.
- la variation de K échangeable au cours de la micro culture (DKe = K échangeable après culture - K échangeable avant culture).
Dans une étude non publiée (24) QUEMENER disposait de 49 sols d'essais, classés en quatre catégories, suivant leur réponse à la fumure potassique, déterminée sur l'ensemble des résultats de quatre années consécutives (1963 à 1966) Il a surtout utilisé les résultats concernant les céréales, le maïs et les prairies. Un problème délicat est de qualifier la réponse à K_2O de chaque champ d'essai. A cet égard, les réponses ont été exprimées en % du témoin KO plutôt qu'en valeur absolue. Il n'a pratiquement pas été tenu compte du degré de signification statistique des résultats expérimentaux.

.../...

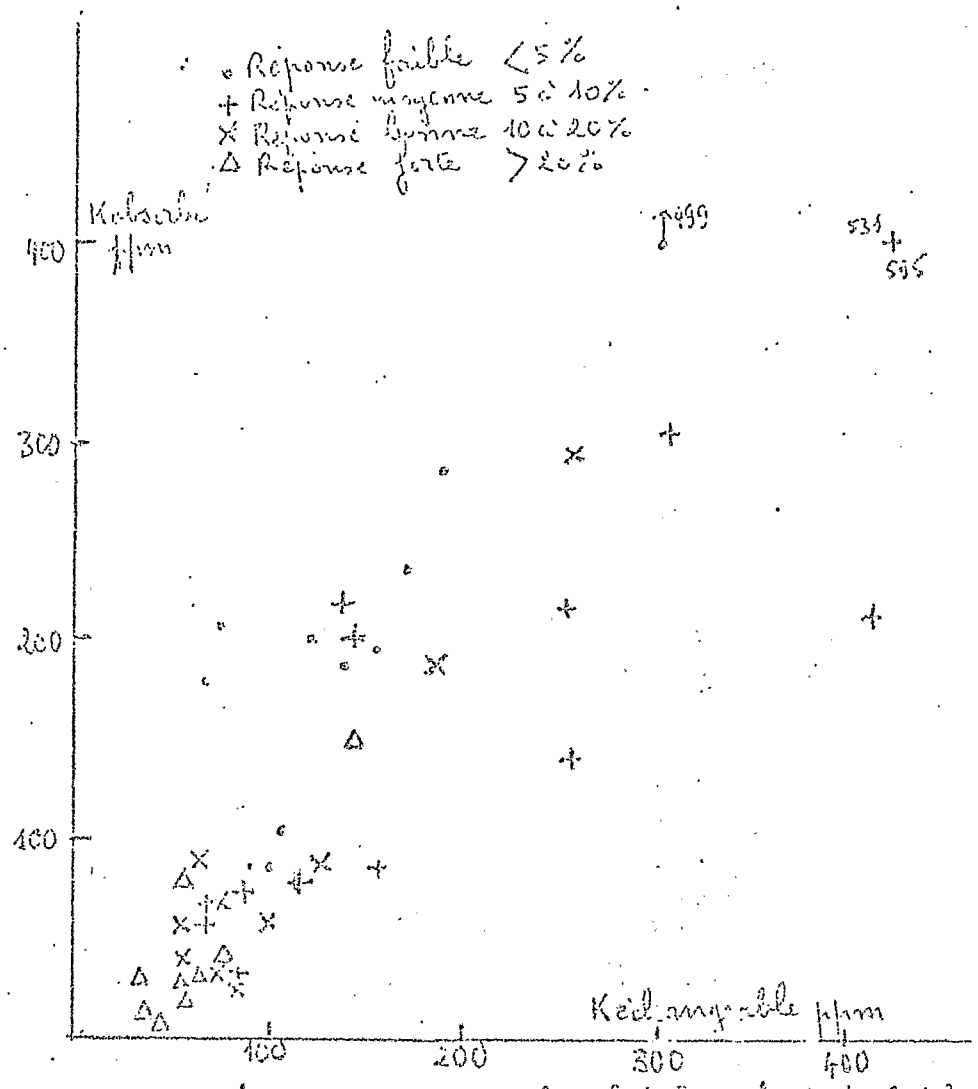

Fig 1 - Liaison entre K absorbé Stanford et K échangeable

L'interprétation des résultats Stanford en fonction de la réponse des essais est faite principalement à partir de deux graphiques.
Le graphique 1 rapporte la liaison entre K absorbé en microculture Stanford et K échangeable, les points étant aussi caractérisés par leur réponse à K_2O dans l'expérimentation au champ. Pour les faibles valeurs de K échangeable (inférieures à 80 ppm), le classement fourni par K absorbé en Stanford est en meilleur accord avec la nature des réponses. Mais on constate aussi que pour une absorption d'environ 200 ppm, la réponse expérimentale peut être très variable. Le K absorbé en Stanford ne pourra donc constituer à lui seul un diagnostic suffisant.

Le graphique 2 rapporte la liaison entre K absorbé en Stanford et la variation de K échangeable au cours de la microculture. Cette représentation associe le prélèvement K effectué par les plantules et la variation du stock de potassium dit assimilable résultante. Dans ce graphique l'Auteur a essayé de

.../...

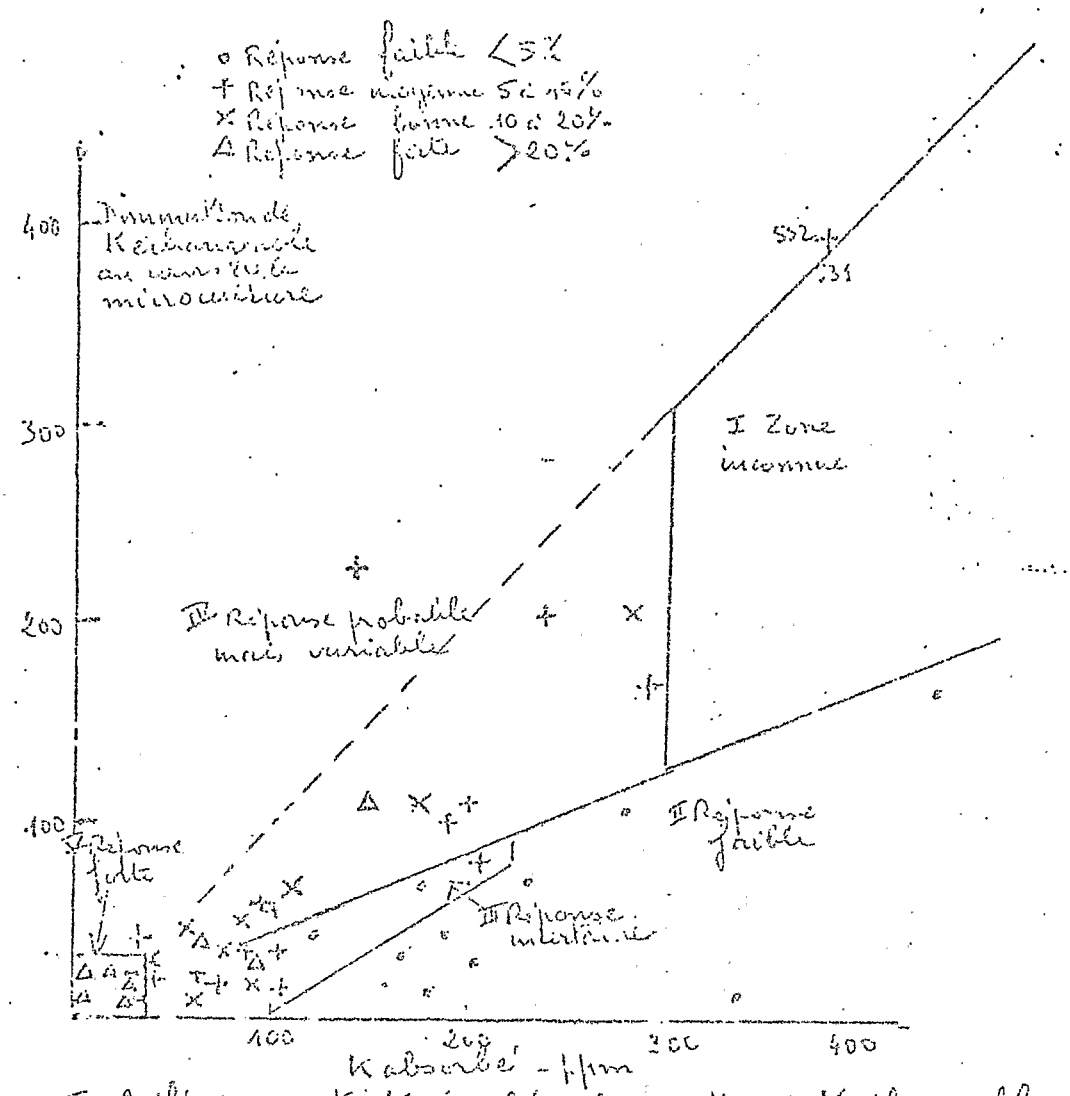

Fig 2: Liaison entre K absorbé et la variation de K échangeable

distinguer cinq zones selon la réponse au champ :
zone I, inconnue - pas de champs d'essais
zone II, essais à réponses faibles ou nulles
zone III, essais à réponses faible, moyenne et bonne
zone IV, essais à réponses variables
zone V, restreinte, essais à forte réponse

Il estime que les sols se trouvent ainsi mieux classés que sur la seule base de K échangeable et que la délimitation des zones devrait se préciser peu à peu avec l'obtention de nouveaux couples de résultats.

La difficulté d'une telle recherche c'est surtout *d'avoir un grand nombre de couples de résultats :* microculture x champs d'essais. C'est ensuite de *bien caractériser la réponse au champ*. Ces contraintes s'appliquent d'ailleurs à toutes les études de diagnostic.
Pour les essais K_2O qui sont presque toujours des essais permanents, il faudrait, dans la caractérisation de la réponse, introduire l'évolution de celle-ci avec le temps et *le délai de réponse*.

.../...

Dans le cas de l'étude Stanford, par exemple, QUEMENER a bien fait remarquer qu'un sol à disponibilités immédiates élevées (K échangeable et K absorbé en Stanford élevés) pouvait néanmoins répondre à la fumure potassique dans un délai plus ou moins long si ses disponibilités ne se renouvellaient que lentement (DKech. important).

Inversement un sol à disponibilités immédiates moyennes, mais à renouvellement rapide (DKech. faible) pourrait présenter des réponses au champ faibles et variables selon les cultures.

En ce qui concerne la caractérisation de la réponse à la potasse sur champs d'essais, une tentative assez élaborée fut faite en 1958 par Strasman et al (26) mais les indices de ces Auteurs n'ont pas été repris par la suite.

En conclusion, les difficultés de l'interprétation, de l'étalonnage des analyses tiennent à un certain nombre de facteurs dont les principaux semblent être :

1) La nature du complexe colloïdal
2) La structure du sol et le régime hydrique qui affectent grandement la diffusion et les mouvements.
3) La quantité de terre explorée par les racines, qui constitue une des principales difficultés pour les cultures perennes, et qui a milité plutôt en faveur des analyses végétales.
4) Les propres capacités d'absorption des systèmes radiculaires des végétaux selon leurs capacités d'échanges.

L'espoir d'une meilleure approche des relations plante-sol se fait jour depuis une dizaine d'années. Il concerne surtout la nutrition cationique. Grâce aux concepts de rapports d'activités cationiques dans des extraits de sols en équilibre, la liaison entre le sol et les teneurs des plantes en cations serait susceptible d'amélioration (BOULD (2)).

Mais des progrès sont surtout à prévoir dans la mesure du potassium du sol réellement assimilable par les plantes par l'amélioration des méthodes d'approche dont il a été cité deux exemples ci-dessus.

2) Analyse de la plante dans le contrôle de l'expérimentation

Ce chapitre constitue un des aspects du problème plus général de l'utilisation des analyses végétales puisqu'il concerne en très majeure partie

.../...

les constituants minéraux en liaison avec la nutrition minérale et les rendements de la plante.
Le perfectionnement des moyens analytiques a considérablement développé ces analyses depuis 20 ans. L'analyse des plantes, en particulier d'échantillons foliaires fait depuis plusieurs année l'objet de colloques internationaux dont les communications publiées constituent la base documentaire la plus précieuse en cette matière : Paris 1954 (28), Paris 1956 (29), Montréal 1959 (30) Bruxelles 1962 (31), Montpellier 1964 (32), Séville 1968 (33), Budapest 1972 (34).

D'assez nombreux articles de synthèse sous l'angle méthodologique figurent dans ces colloques auxquels on ajoutera en particulier les interventions de Madame HUGUET (15) et de ULRICH et HILLS (27) et ALDRICH (1).

En ce qui concerne le contrôle de l'expérimentation proprement dit, il existe une grande diversité d'interventions qui peuvent cependant se classer en grands groupes.

21) L'analyse de la plante entière

Elle ne peut intervenir pratiquement que lorsqu'il s'agit de plantes annuelles ne présentant pas un très grand développement. Des études limitées ont pu intervenir sur quelques cultures pérennes, sur des thèmes particuliers.

L'analyse de la plante entière peut se situer au moment de la récolte ou au cours du cycle.

211) L'analyse de la plante à la récolte

Cette méthode est très pratiquée lorsqu'on prélève des échantillons de coupes de fourrages, de pieds de maïs, de pailles de céréales au moment de la récolte sur des parcelles expérimentales.

Les résultats fournis par l'analyse de la plante entière, constituée d'organes divers, ne peuvent être que de nature statique. En effet, l'analyse du végétal à maturité n'exprime qu'une résultante et ne renseigne pas sur la nutrition au cours du développement. Au cours des semaines précédant la maturité la plante est le siège de migrations, d'accumulations de certains

.../...

éléments (ex. : décroissance de la quantité globale de potassium dans le plante maïs).

Il est fait grand usage par les Services Agronomiques de la SCPA de la méthode des analyses à la récolte pour établir avec précision les exportations, sinon les exigences, exactes des diverses cultures à divers niveaux de rendements et dans des conditions de fertilisation, de sols et de climats, variables (LOUÉ (16)).

La méthode sert aussi à l'établissement de bilans, relativement précis dans le cas des essais.

Le tableau 5 rapporte un exemple de bilan précis sur un essai factoriel 4 N x 2 P x 4 K, dispositif en confounding à Pont St Martin (Loire-Atlantique). Les analyses végétales d'échantillons prélevés à la récolte au

Tableau 5 : Bilans de fertilisation à Pont Saint Martin (Loire Atlantique)

Gains et pertes en kg/ha N, P_2O_5, K_2O

		Prairie temporaire		Choux	Pommes de terre	Blé	Bilan sur 5 cult.		
		1963	1964	1964	1965	1966	Apport	Export	Bil.
N	N1	- 90	- 161	- 58	- 36	+ 2	240	583	- 343
	N2	- 66	- 153	- 41	- 17	+ 35	397	639	- 242
	N3	- 46	- 142	- 6	+ 3	+ 71	553	673	- 120
	N4	- 23	- 118	+ 31	+ 23	+ 109	710	688	+ 22
N opt. K opt.		- 75	- 179	- 9	- 9	+ 105	635	802	- 167
P_2O_5	P1	+ 36	+ 20	+ 28	+ 35	+ 54	375	202	+ 173
	P2	+ 109	+ 94	+ 94	+ 103	+ 131	750	219	+ 531
N opt. P 1,5 K opt.		+ 69	+ 51	+ 56	+ 51	+ 83	562	252	+ 310
K_2O	K0	- 154	- 72	- 43	- 20	- 18	0	307	- 307
	K1	- 101	- 58	- 35	- 43	+ 15	450	672	- 222
	K2	- 50	- 12	- 16	- 26	+ 58	900	946	- 46
	K3	+ 21	+ 22	+ 42	+ 25	+ 105	1350	1135	+ 215
N opt. K opt.		- 12	- 24	- 9	- 4	+ 65	1027	1011	+ 16

niveau de la parcelle élémentaire permettent d'établir les bilans des 32 traitements NPK. Le tableau ne rapporte, pour simplifier, que les effets principaux de N, P, K vis-à-vis de l'élément correspondant ainsi que les résultats pour l'équilibre NK optimum économique. On peut se rendre vite compte de ce qu'une telle méthode peut apporter.

Ainsi, dans le cas présent, bien que le bilan azote soit imprécis du fait de

.../...

la prairie temporaire qui a recyclé de l'azote par la présence de trèfle variable selon les traitements, on constate que les bilans sont très négatifs avec N1, N2 et qu'il y a léger gain avec N4. Le meilleur traitement au point de vue rentabilité (N120) a correspondu à l'équilibre très théorique du bilan.

Pour P_2O_5 l'enrichissement apparaît nettement dès la dose P1 (+ 173 kg/ha P_2O_5 correspondant très théoriquement à une majoration de la teneur du sol de 0,058 °/°° P_2O_5 pour 3000 tonnes de terre par hectare). Au niveau du sol l'enrichissement trouvé fut plus faible (P1 = 0,28 °/°° P_2O_5 et P2 = 0,34 °/°° P_2O_5 pour un taux initial de 0,24 °/°°).

Pour K_2O, le bilan est très négatif avec K0 et K1, légèrement négatif avec K2, nettement positif avec K3. Là aussi, la dose de potasse optimum (K194), en présence de N optimum, au point de vue rentabilité, a correspondu à peu près exactement à l'équilibre du bilan. Au niveau K_2O échangeable du sol, les teneurs correspondant à K0, K1, K2, K3 furent au moment du bilan, de 0,03 - 0,05^{x} - 0,06^{xx} - 0,13^{xxx} °/°°. L'effet des doses était donc positif et hautement significatif. Le niveau d'origine (0,07 °/°°) était à peine maintenu avec la dose K2. Exprimées en kg/ha K_2O, les teneurs correspondraient aux bilans suivants (- 120, - 60, - 30, + 180 de K0 à K3, à comparer au bilan théorique du tableau soit - 307 - 222 - 46 + 215). Le sol a évidemment libéré du K échangeable à partir des réserves et cela fut d'autant plus net que les apports potassiques étaient plus faibles.

212) L'analyse de la plante entière au cours du cycle

L'analyse de la plante entière récoltée au cours des différentes phases de son développement constitue un progrès considérable (courbes de croissance, courbes d'absorption de N, P, K etc). Pour une plante à nutrition rapide comme le maïs, cette méthode est très utile, mais elle exige un travail important et présente des difficultés (échantillons volumineux, perturbations dans les parcelles etc). La méthode ne peut être que limitée à des sujets de recherches. Si elle est pratiquée sur des dispositifs expérimentaux de fertilisation, l'information obtenue sera grande, si les dates de prélèvements sont assez rapprochées (LOUÉ (17)).

Dans un souci de limitation du travail, on pourrait s'en tenir à trois périodes d'échantillonnage (un prélèvement précoce dans la phase de croissance, un prélèvement médian en milieu de saison et un prélèvement tardif en fin de saison avant la récolte (ULRICH (27)).

.../...

22) L'analyse de l'organe végétal utile

L'analyse de l'organe utile ne renseigne généralement pas sur la nutrition du végétal car le plus souvent il s'agit d'un organe d'accumulation de réserves, dont la composition minérale est relativement indépendante des traitements de fertilisation. La fourchette des teneurs étant pour nombre d'organes (graines en particulier) assez étroite, cela a permis d'établir des tables de prélèvements minéraux des diverses cultures utilisées pour calculer les exportations et faire des bilans sommaires sur les fermes avec un risque moyen d'erreur.

L'analyse sur un essai d'engrais des organes utiles se confond avec l'étude des bilans du paragraphe ci-dessus lorsque les autres organes sont restitués au sol (ex : pailles de céréales, jambes de maïs grains, verts de betteraves etc).

Cependant, il existe des cas où il est très utile de contrôler les essais par de telles analyses particulièrement lorsque certains constituants minéraux N, S, P, K, Ca, Mg peuvent interférer sur la *qualité* du produit.

Voici quelques exemples de l'utilité de telles analyses en liaison avec l'expérimentation.

Exemple 1 : Les grains de céréales - On sait que la dose et l'époque d'application des engrais azotés ont un effet marqué sur le rendement en blé et la qualité. Sur certains essais azote il peut donc être utile de procéder aux analyses de grains comme le montre l'exemple ci-après relatif à un essai factoriel étudiant trois doses (N50, N100, N150) et leur mode de répartition entre le stade tallage et le stade montaison (R1 = 3/4 au tallage et 1/4 à la montaison, R2 = 1/2 + 1/2, R3 = 1/4 au tallage et 3/4 à la montaison).

Tableau 6 : N % matière sèche (grains)

-	R1	R2	R3	Effet N
N0	-	-	-	1,78
N50	1,73	1,79	1,81	1,78
N100	1,90	1,95	1,95	1,93^{x}
N150	1,98	2,23	2,27	2,16^{xxx}
Effet R	1,87	1,99^{x}	2,00^{x}	

Dans cet exemple la teneur en azote des grains fut particulièrement influencée par les effets N et R. Les systèmes d'apport R2 et R3 conduisent incontestablement à une plus grande richesse en azote.

Exemple 2 : Les tubercules de pommes de terre - L'auteur a étudié l'influence de la fertilisation sur la composition minérale des tubercules sur une tren-

taine d'essais (Figure 3). La teneur en K des tubercules apparaissant comme très influencée par la fertilisation potassique, il a été amené à étudier

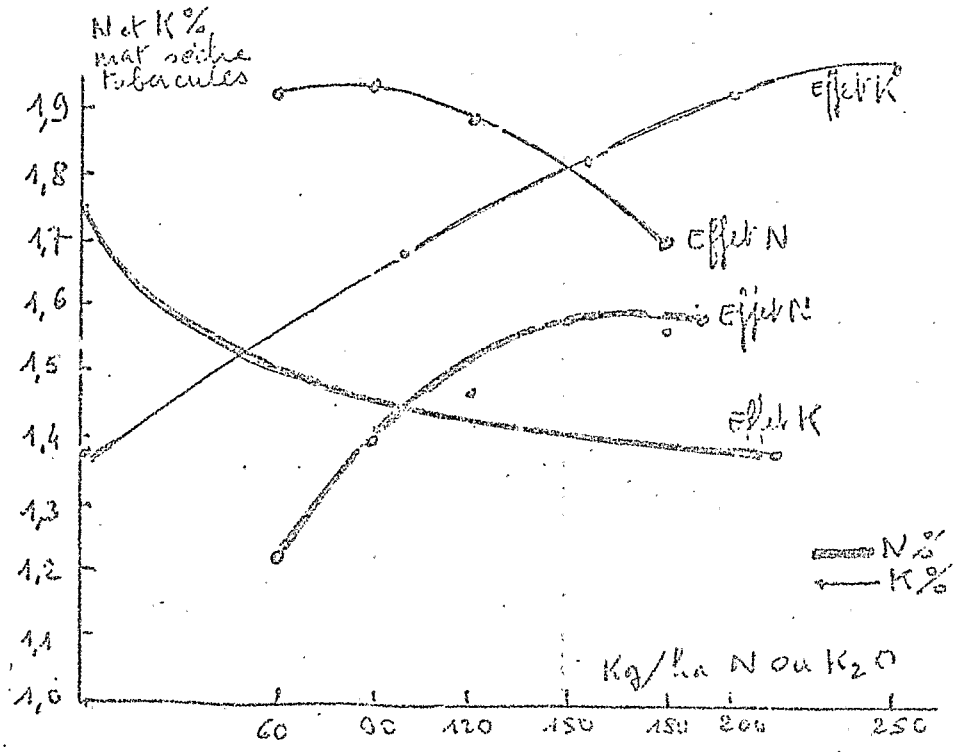

Fig 3 : Influence de la fertilisation N,K sur la teneur en azote et en potassium des tubercules.

la liaison entre les rendements et la teneur en K et a pu proposer dans ce cas particulier un essai de gamme d'interprétation de la nutrition potassique à partir de l'analyse des tubercules (LOUÉ (21)).

Exemple 3 : Le tabac

La composition minérale de la feuille de tabac à la récolte constitue un exemple assez unique de forte liaison entre l'absorption minérale et la qualité. On sait que les éléments K et Cl ont une incidence toute particulière sur la qualité et la combustibilité du tabac. La teneur en Cl doit être la plus basse possible et la nuisance est forte lorsqu'elle atteint 2 % de la matière sèche. D'autre part, une bonne qualité va de pair avec des teneurs en K au moins égales à 5 % de la matière sèche.

Des essais ont été poursuivis pendant plusieurs années dans le Sud-Ouest de la France étudiant trois doses de potasse sous forme sulfate sur tabac (K0, K150, K300) sur des parcelles K0, K1, K2 ayant reçu au cours des années précédentes leur potasse K1 et K2 sous forme de chlorure ou de sulfate. On

.../...

cherchait donc à étudier en particulier l'arrière action des doses et formes de potasse sur la qualité et la combustibilité. Ainsi sur l'essai de 1967, la prime à la qualité et combustibilité fut la suivante pour les cinq traitements

Tableau 7 : incidence de la fertilisation sur la qualité du tabac (Prime en F/kg)

Dose K_2O tabac	K0	K150	K300	Effet forme K ant.
Après chlorure	-	1,32	1,08	1,20
Après sulfate	-	1,44	1,68	1,56
Effet K tabac	1,20	1,38	1,38	

étudiés. Or, l'analyse des feuilles à maturité a bien permis d'expliquer logiquement les résultats obtenus. On constate en effet sur le tableau 8 qu'en ce qui concerne le chlore l'effet de l'antécédent de forme de potasse est très dominant . Après chlorure, les taux de chlore dans les feuilles vont de 1,5 à 1,8 %'(après K1 = K80) et de 2,0 à 2,3 % (après K2 = K160). Les reliquats de chlore de la fumure antérieure ont donc eu une influence prépondérante

Tableau 8 : Essai de Puch d'Agenais (Lot et Garonne) 1967

Teneurs des feuilles de tabac en chlore et potassium

		Cl % matière sèche				K % matière sèche			
K_2O sulfate sur tabac		K0	K150	K300	Effet forme K_2O antérieure	K0	K150	K300	Effet forme K_2O antér.
Feuilles basses	après chlorure	0,98	1,49	1,99	1,74	3,03	4,03	5,15	4,59
	après sulfate		1,09	1,35	1,22^{xxx}		4,21	5,07	4,64
	Effet doses (sans K0)		1,29	1,67^{xx}			4,12	5,11^{xx}	
Feuilles médianes	après chlorure	1,25	1,64	2,13	1,88	3,85	4,39	5,46	4,92
	après sulfate		1,26	1,44	1,35^{xxx}		4,62	5,18	4,90
	Effet doses (sans K0)		1,45	1,78^{xx}			4,51	5,32^{xx}	
Feuilles basses	après chlorure	1,46	1,82	2,27	2,05	4,26	4,60	5,56	5,08
	après sulfate		1,45	1,58	1,52^{xxx}		4,85	5,18	5,02
	Effet doses (sans K0)		1,64	1,93^{xx}			4,73	5,37^{xx}	

.../...

sur le taux de chlore qui a en effet pu atteindre des valeurs susceptibles de nuire à la combustibilité.
Autres exemples : les exemples d'intérêt de procéder sur des expérimentations à l'analyse des organes utiles pourraient être multipliés. Citons simplement les aspects suivants :

- analyses des *racines de betteraves sucrières* en particulier sur essais factoriels N x K (détermination de N nuisible, K, Na ...).
- analyses des *fourrages*, particulièrement sur les essais factoriels N x P x K à doses élevées sur prairies temporaires pour mesurer l'ampleur des besoins et aussi la qualité.

Il va sans dire d'autre part que sur certains essais de fertilisatio les analyses devront concerner certains constituants organiques dont la détermination est nécessaire à la connaissance du rendement effectif (richesse saccharine, teneurs en huiles etc).

23) L'analyse dans un but de diagnostic

Pour étudier la nutrition minérale de la plante on s'adresse à un organe végétatif déterminé, le plus souvent la feuille car le plus susceptible de refléter assez fidèlement le mode d'alimentation du végétal à un moment donné.

231) Le diagnostic foliaire

Le diagnostic foliaire consiste à analyser à des intervalles de temps choisis une feuille de position bien déterminée. Les principes de base de la méthode ont été établis en France par Lagatu et Maume à partir de 1924. Elle fut appliquée ensuite, avant la guerre, à la pomme de terre, au maïs, aux arbres fruitiers etc. Depuis 1945, la méthode s'est développée dans les pays tropicaux dotés à partir de ce moment là d'Instituts de Recherches aux Laboratoires équipés pour les dosages en grandes séries. C'est qu'en effet le diagnostic foliaire nécessite un très grand nombre d'analyses dont les résultats doivent être soumis à l'analyse statistique afin d'en dégager les différences significatives et les corrélations teneurs x rendements.

2311) Echantillonnage en vue du diagnostic foliaire

Le problème de l'échantillonnage nécessite des études préalables délicates pour chaque plante étudiée.
Pour obtenir des données analytiques comparables, l'échantillon doit être constitué de feuilles homologues, c'est-à-dire occupant le même rang sur les tiges (âge physiologique identique) et prélevées en même temps sur un nombre suffisant de plantes ayant végété dans les mêmes conditions.
L'échantillonnage pose donc les problèmes suivants :
1) position de la feuille 2) nombre de feuilles par arbre (plantes pérennes) 3) nombre de plantes à échantillonner par parcelle élémentaire 4) époque de prélèvement (un seul ou plusieurs ?).

Malgré certains progrès dans la standardisation des méthodes il règne encore une grande diversité dans les échantillonnages. Il faut reconnaître aussi que certaines plantes ont été beaucoup plus étudiées que d'autres. Avant d'entreprendre des recherches en ce domaine il est bon de consulter l'ouvrage déjà ancien de Goodall et Gregory (13) et surtout plus près de nous, celui de Chapman (4).

2312) Déterminations analytiques

La méthode du diagnostic foliaire pourrait servir à étudier n'importe quel élément minéral.
En général ce sont surtout les éléments N, P, K qui présentent un intérêt primordial. Pendant longtemps, le diagnostic foliaire n'a pas porté sur Ca et Mg que l'on considérait très accessoirement dans l'étude de la balance des ions. Le diagnostic porte de plus en plus sur N P K Ca Mg.

En l'état actuel des choses les données sur le soufre sont assez minimes, au moins en agronomie car en physiologie de la nutrition, les études englobent souvent cet élément. Quant aux oligo éléments, il n'y a pas d'étude de diagnostic foliaire proprement dite, spécialisée sur Fe, Mn, Zn, B, Cu. Par contre, de nombreuses déterminations sont faites des oligo éléments sur du matériel foliaire. Mais elles concernent généralement des feuilles présentant des symptômes supposés de déficience. La position de ces feuilles peut très bien différer de celle de l'échantillon de diagnostic foliaire. Ce peuvent être de jeunes feuilles (Fe), de très jeunes pousses (B), etc.

2313) L'utilisation pratique du diagnostic foliaire
L'interprétation des résultats expérimentaux

L'abondante documentation expérimentale réunie sur les cultures tempérées et les cultures tropicales prouve largement qu'il y a corrélation entre les résultats de l'analyse foliaire et la nutrition minérale de la plante. En cultivant un végétal dans des conditions déterminées, on peut donc, par le diagnostic foliaire, étudier les répercussions sur la nutrition des genres de fumures appliquées (dose, équilibre, nature, mode de placement, date d'apports etc). Comme toute méthode d'interprétation basée sur des analyses, le diagnostic foliaire nécessite l'établissement préalable de *normes d'interprétation*.

L'établissement de ces normes est long et délicat car il nécessite le diagnostic de nombreuses parcelles d'un *réseau expérimental* plus ou moins vaste et suivant plusieurs années. En rapprochant les rendements parcellaires obtenus des diagnostics foliaires parcellaires, on s'efforce de définir un type nutritif correspondant à l'optimum de rendement dans les conditions données de sol, de climat, de variété.

Parmi les innombrables types nutritifs qu'un végétal donné peut présenter en végétant, plus ou moins bien, il existe une zone de nutrition conduisant au rendement maximum qui constitue *l'optimum d'alimentation* de la plante considérée.

La notion d'optimum nutritif concerne à la fois les pourcentages des divers éléments dans la feuille et les rapports de ces éléments entre eux. La méthode d'interprétation du diagnostic foliaire fait appel à la fois aux notions de niveaux critiques et à celle d'interactions.

Niveau critique - La première base utilisable pour la détermination des déficiences et les recommandations en matière de fumures minérales est la notion de niveau critique qui se définit comme le 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. Pour la détermination de ces niveaux critiques, il est indispensable de disposer d'un grand nombre d'essais de fumure minérale où l'on peut mettre en parallèle l'influence des engrais sur les rendements et sur les teneurs en éléments minéraux.

A vrai dire, la relation entre la teneur d'une feuille déterminée en un élément et le rendement du végétal est complexe.

.../...

Prenons l'exemple du potassium dans le diagnostic foliaire du maïs (feuille de l'épi) auquel l'auteur s'est plus particulièrement intéressé (LOUE (18)).

L'examen de la figure 4 suggère que la relation entre les rendements et les teneurs potassiques foliaires est curvilinéaire. Pour les teneurs allant de 0,4 à 1,0 % environ, zones de carence et de grave déficience, la corrélation est très forte. Pour un accroissement de la teneur de 0,1 % K, le rendement s'accroît d'environ 5 q/ha. On observe ensuite une seconde zone, pour des teneurs allant de 1,0 % à environ 1,6 % K dans laquelle la corrélation demeure nette, mais où une augmentation de 0,1 % K ne provoque plus une élévation de rendement que de 2,5 q/ha environ.
Au delà de 1,6 à 1,7 % K on entre dans un nuage de points. On a pu fixer vers 1,7 à 1,8 % K le niveau critique, teneur au-dessus de laquelle il ney a pas de liaison nette entre les teneurs en K de la feuille de l'épi, et les rendements.

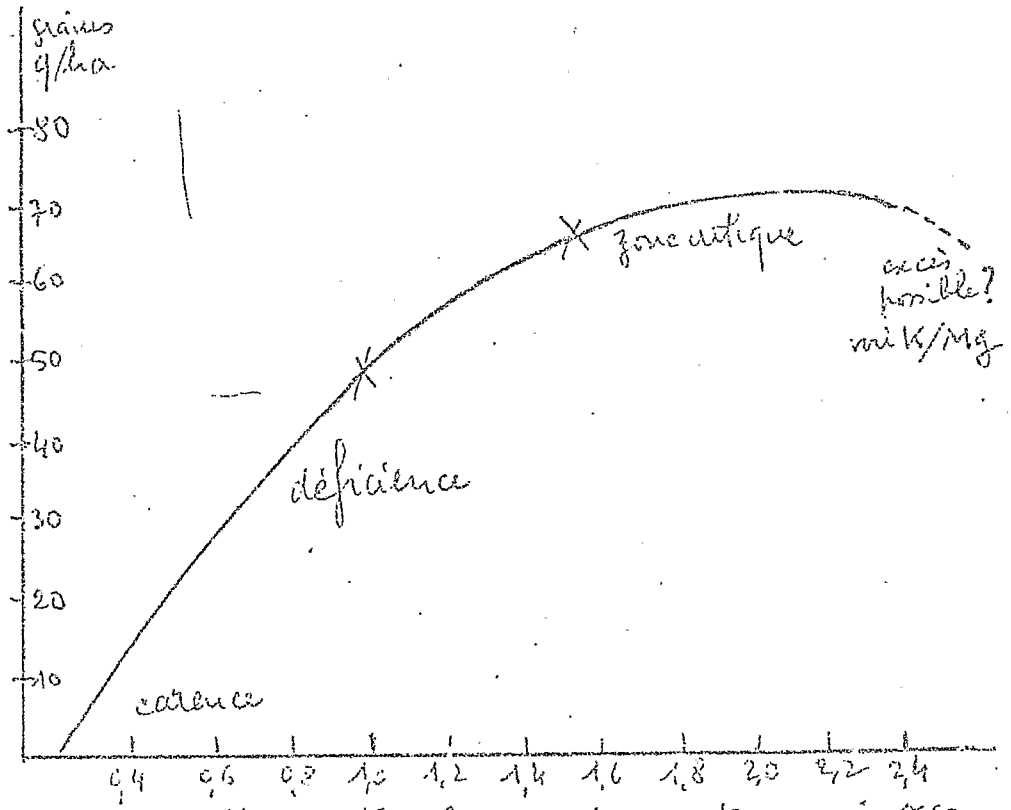

Fig 4 : Relation entre les rendements en grains secs et la teneur en K de la feuille de l'épi du maïs à la floraison.

En fait, il ne convient pas d'indiquer une teneur précise qui serait un véritable niveau critique. Il serait préférable d'indiquer une zone critique

.../...

1,7 à 2,0 % par exemple.

La zone critique serait elle même fluctuante ; dans les cas de déficience hydrique, elle peut tomber dans l'exemple pris vers 1,30 à 1,40 % K Dans une étude récente, il a été montré que la zone critique d'obtention de très hauts rendements correspondait à des teneurs comprises entre 1,9 et 2,2 % K (LOUE (20)).

Interactions - La seconde base de l'interprétation des résultats du diagnostic foliaire est l'étude des interactions, des actions réciproques des éléments sur les teneurs et sur les rendements : Exemples : études des liaisons N x P, N x K, de la somme K + Ca + Mg, des relations K/Ca/Mg.
L'analyse de la régression multiple est de plus en plus employée pour étudier les relations entre les rendements et les teneurs de la feuille en deux éléments.
(Dumenil (5), Fourcassié (6).).

En ce qui concerne les cations majeurs, il se révèle souvent intéressant d'étudier la qualité de la nutrition cationique au moyen du calcul des % de K, Ca, Mg au sein de la somme S = K + Ca + Mg supposée constante et égale à 100.

2314) Critique de la méthode

L'utilisation du diagnostic foliaire est fondée sur un certain nombre d'hypothèses dont certaines sont mieux assises que d'autres :

1) La feuille centre principal du métabolisme
2) La composition chimique de la feuille est le reflet du milieu nutritif et en particulier des modifications qu'on lui fait subir, en particulier par les apports de fertilisants.
Certains stades du développement accentuent mieux les écarts de nutrition enregistrés.
3) Il existe une liaison entre les teneurs à certains stades caractéristiques de la croissance et les rendements futurs.
Il est assez certain que par l'expérimentation, les chercheurs ont pu déterminer la meilleure feuille à échantillonner au meilleur stade. D'autre part, la première partie de la courbe teneurs x rendements (teneurs associées à la déficience grave et à la déficience caractérisée) est en général étudiée avec une bonne précision. Le problème de la détermination du seuil ou de la

zone critique est le plus délicat.

Les réserves formulées à l'encontre des difficultés de généralisation des résultats expérimentaux peuvent être formulées pour les résultats de diagnostic foliaire correspondants. Madame HUGUET a mis aussi l'accent sur la variabilité annuelle en arboriculture fruitière, l'effet année pouvant être supérieur à l'effet traitements de fertilisation. Cet auteur préconise les enquêtes analytiques régionales en complément des essais de base (15).

Pour notre part, nous pensons que des progrès devraient venir des directions suivantes :

1) Effort de normalisation des techniques de prélèvements
En France, dans le domaine des analyses minérales sur poudres végétales, il existe une sorte de Commission dite Inter instituts dont le but est d'obtenir de ses membres une standardisation des dosages aboutissant à une reproductibilité et comparabilité des résultats. Bien que cela soit plus difficile, car cela concerne une même culture il faudrait, en amont, essayer de normaliser les prélèvements.

2) Résultats de nutrition minérale basés sur de nombreuses expérimentations
La normalisation des prélèvements permettrait d'accroître la masse expérimentale contrôlée et d'améliorer l'analyse des résultats. Une des difficultés actuelles est l'insuffisance des expérimentations de base contrôlées.

3) Analyse plus poussée des couples résultats expérimentaux x diagnostic.
Souvent certains facteurs, climatiques, parasitaires, etc sont insuffisamment décrits et surtout l'interaction eau x nutrition minérale est insuffisamment abordée. En ce sens la méthode d'analyse par composantes principales et l'analyse factorielle pour l'étude de toutes les mesures faites sur un essai de fertilisation serait susceptible de mieux analyser les résultats (GAUTIER (12)

4) Conception de dispositifs expérimentaux particuliers, dans des sites choisis en fonction du but poursuivi alors qu'en l'état actuel des choses les agronomes surimposent des contrôles biochimiques sur des essais de fertilisation existants. Par exemple, les facteurs variétaux, eau, façons culturales pourraient parfois être introduits. Il est vrai que la méthode des enquêtes égionales peut poursuivre ce même but si les échantillons sont choisis en conséquence.

232) <u>Le diagnostic pétiolaire</u>

Pour certaines cultures le pétiole est apparu plus sensible que le

limbe pour traduire les différences nutritionnelles. C'est surtout aux Etats Unis que cette technique s'est développée (vigne, betterave sucrière etc). Nous l'avons utilisée en expérimentation sur vigne pour comparer les résultats à ceux du diagnostic foliaire classique, mais surtout comme méthode de prospection des vignobles (LOUE (19)).
D'autre part les essais de fertilisation sur pommes de terre ont été étudiés également par diagnostic pétiolaire et les résultats relatifs au potassium ont été assez nets (LOUE (21)).

233) L'analyse des tissus conducteurs

L'analyse minérale du suc provenant de tissus conducteurs a été conduite sur diverses plantes, le maïs en particulier, dans un but de diagnostic plus ou moins précoce grâce à des tests rapides afin d'intervenir si possible sur la culture en place pour corriger les défauts nutritionnels.
La Station Agronomique de Bordeaux poursuit des études plus fines comportant parfois quinze déterminations analytiques dont les diverses fractions azotées. Les résultats analytiques sont accompagnés pour le maïs de la détermination d'un indice de croissance au moment du prélèvement. Sur maïs, cette méthode a en particulier permis d'étudier " l'intoxication ammoniacale " (Routchenko (25)).

CONCLUSION

Dans le domaine du contrôle de l'expérimentation, il ne saurait être question d'opposer l'analyse du sol et celle de la plante. Les exemples sont nombreux où n'intervient aucune "concurrence" entre les deux méthodes.
Schématiquement, on peut dire que les contrôles analytiques tant du sol que de la plante, peuvent se situer dans deux domaines :

1) Un domaine d'amélioration de l'analyse des résultats expérimentaux (le plus grand nombre possible de résultats sont analysés au niveau du sol et de la plante, qui dépendent de la culture en cause, du type de sol, du thème de l'essai, de son protocole et du but poursuivi et les résultats sont reliés aux traitements). Cela permet le plus souvent d'améliorer l'explication des résultats culturaux et de faciliter leur extension.

2) *Un domaine d'amélioration du diagnostic*

En l'état actuel des connaissances, il convient de mener de front les deux diagnostics (sol, plante) en rapprochant le plus souvent possible l'analyse du sol qui cherche à cerner de mieux en mieux le potentiel nutritif réellement à la disposition de la plante et l'analyse foliaire qui cherche à mesurer le mieux possible l'absorption la plus influente sur le rendement.

BIBLIOGRAPHIE

1 - ALDRICH Samuel R - Plant analyses : problems and opportunities
Soil Testing and Plant Analysis
Soil Science Society of Amer. Madison USA, 1-10, (1967)

2 - BOULD C. Comparative role of soil and leaf analysis in crop nutrition
Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation
Montpellier, 13-19, (1964)

3 - CABIBEL B - Mobilisation du K des sols par le Na TPB en relation avec le comportement des cultures
Ann. Agron. - 23 (3), 355-367, (1972)

4 - CHAPMAN H.D. - Diagnostic criteria for plants and soils
University of California (1966)

5 - DUMENIL L. - Nitrogen and phosphorus composition of corn leaves and corn yields in relation to critical levels and nutrient balance
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25, 295-298 (1961).

6 - FOURCASSIE F. - Diagnostic foliaire du maïs ; réflexion sur la méthodologie, application aux champs d'essais de fertilisation. Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation - Montpellier, 309-315 (1964)

7 - GACHON L. - Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plantes C.R. Acad. agric. Fr.1108-1116 (1966)

8 - GACHON L. - Appréciation de l'aptitude des sols à alimenter les plantes en phosphore analyses du sol et résultats expérimentaux
C.R. Acad. Agric. Fr. 1313-1318 (1966)

9 - GACHON L, TRIBOI E. - Contrôle et évolution de la fertilité phosphorique de sols soumis à des essais de longue durée - C.R. Acad. Agric. Fr. 501-511 (1970)

10 - GARAUDEAUX J. - Etudes sur la fumure potassique réalisées à la station Agronomique d'Aspach-le-Bas (Haut-Rhin) 122 p. (1965)

.../...

11 - GARAUDEAUX J. - QUEMENER J. - Etude de la libération du potassium en culture en pots
9 th Inter. Congress of Soil Science Vol II - 639-647 (1968)

12 - GAUTIER Ph. - Utilisation de la méthode d'analyse par composantes principales pour l'étude des résultats des essais de fertilisation -
Bull. Ass. Fr. Et. Sol 175-179 (1972)

13 - GOODALL D.W., GREGORY F.G. - Chemical composition of plants as an index of their nutritional status
Imp. Bureau - Horticultural and Plantation Crops 167 p. (1947)

14 - HEBERT J, REMY J.C. - Effets de doses croissantes répétées de sels de potasse
C.R. Acad. Agric. Fr. 946-954 (1964)

15 - HUGUET C. - Le contrôle de l'alimentation des plantes par l'analyse du sol et du végétal.
in.: La Fertilité du Sol et la nutrition des plantes
Colloque - Franco-Roumain Bucarest, 225-248, (1968)

16 - LOUÉ A. - Rapports annuels des essais de Fertilisation - Services Agronomiques SCPA
Impr. Mulhouse France (1965 à 1971)

17 - LOUÉ A. - Contribution à l'étude de la nutrition cationique et plus particulièrement potassique du maïs
Fertilité 20 - 57 p. (1963)

18 - LOUÉ A. - Le diagnostic foliaire du maïs (méthodologie, état actuel des connaissance utilisation)
Inst. Int. Potasse 4ème colloque - Belgrade, 105-116 (1965)

19 - LOUÉ A. - L'intérêt du diagnostic pétiolaire dans les études sur la nutrition et la fertilisation potassiques de la vigne
IIe Colloque - Contrôle de la Fertilisation des plantes cultivées
Séville, 283-294, (1968)

20 - LOUÉ A. - Etudes sur la nutrition et la fertilisation du maïs poursuivies à Pau de 1951 à 1968, 104 p, (1971)

21 - LOUÉ A. - L'analyse végétale (pétioles, feuilles, tubercules) en vue d'apprécier la nutrition minérale et plus particulièrement potassique de la

.../...

pomme de terre.
IIIe Colloque - Contrôle de la fertilisation des plantes cultivées - Budapest, 18 p, (1972)

22 - MOREL R. - Evolution dans le temps de la quantité d'azote organique du sol
Science du Sol - 1 -, 121 - 129, (1971)

23 - QUEMENER J, ROLLAND D - Application de la technique de Stanford et de Ment à l'extraction du potassium des sols - Ann. Agron. 21 (6), 819-844, (1970)

24 - QUEMENER J. - Utilisation des résultats des microcultures de Stanford pour la détermination de la fertilité potassique des sols - note non publiée - 13 p. (1969)

25 - ROUTCHENKO W. - Analyse des extraits des tissus conducteurs comme méthode d'étude de la nutrition des plantes
IIe Colloque - Contrôle de la Fertilisation des plantes cultivées
Séville - 13-23, (1968)

26 - STRASMAN A, QUIDET P, BLANCHET R - Dynamique du potassium dans le sol et alimentation potassique des plantes
Ann. Agron. (5), 635-658, (1958)

27 - ULRICH A, HILLS FJ - Principles and practices of Plant analysis - Soil Testing and Plant Analysis
Soil Science Society of Amer. Madison - USA, 11-24 (1967)

28 - Analyse des Plantes et problèmes des engrais minéraux I.R.H.O. 11,Square Pétrarque
Paris - 263 p. (1954)

29 - Analyse des Plantes et problèmes des fumures minérales I.R.H.O. 11, Square Pétrarque
Paris - 410 p (1956)

30 - Plant analysis and Fertilizer Problems, III
American Institute of Biological Sciences
Washington 6, DC, 454 p. (1961)

31 - Plant analysis and Fertilizer Problems, IV
Published by American Society for Horticultural Science 430 p (1964)

.../...

32 - Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures méditerranéennes
édité par Laboratoire Coopératif de Diagnostic foliaire
Montpellier (France) 403 p. (1964)

33 - Le contrôle de la fertilisation des Plantes cultivées
Editado por el Centro de Edafologia y Biologia Aplicada Seville (Espagne), 911 p, (1968)

34 - IIIe Colloque européen sur le contrôle de l'alimentation des plantes cultivées
Université d'Horticulture - Budapest (Hongrie) non imprimé (1972).