

AU SERVICE DE L'AGRICULTURE

# DOSSIER K<sub>2</sub>O

N° 16 - JUIN 1980

## LE POTASSIUM ET LE MAÏS

par André LOUÉ, Ingénieur Agronome I.N.A.  
Département d'Agronomie de la SCPA - MULHOUSE

### SOMMAIRE

	page
<b>Introduction — Le rôle de la fertilisation a été très important dans les progrès de la culture du maïs et inversement le maïs occupe une place de choix dans les progrès de la fertilisation .....</b>	3
<b>Première partie</b>	
<b>LA NUTRITION MINÉRALE ET PLUS PARTICULIÈREMENT POTASSIQUE DU MAÏS .....</b>	4
<b>1.1. Prélèvements et exportations d'éléments fertilisants, potasse en particulier, par le maïs .....</b>	5
<i>1.1.1. Le grain (composition minérale) .....</i>	5
<i>1.1.2. Les rafles (composition minérale) .....</i>	6
<i>1.1.3. Les exportations par les épis .....</i>	6
<i>1.1.4. Les tiges et les feuilles à maturité (composition minérale) .....</i>	6
<i>1.1.5. Exportations d'éléments fertilisants par les tiges et les feuilles .....</i>	8
<i>1.1.6. Les racines .....</i>	9
<i>1.1.7. Exportations et exigences totales du maïs .....</i>	9
<b>1.2. La nutrition minérale du maïs au cours du cycle végétatif : cas particulier du potassium et conséquences .....</b>	10
<i>1.2.1. Matériel et méthodes .....</i>	10
<i>1.2.2. Croissance et production de matière sèche .....</i>	10
<i>1.2.3. Evolution de l'absorption des éléments minéraux .....</i>	11

(suite au verso)

1.3. La nutrition potassique du maïs et le diagnostic foliaire .....	14
1.3.1. <i>Méthodologie du diagnostic foliaire du maïs</i> .....	14
1.3.2. <i>Les résultats obtenus par le diagnostic foliaire</i> .....	15
1.4. Symptômes de déficience minérale et plus particulièrement potassique .....	20
1.4.1. <i>Déficience en azote</i> .....	20
1.4.2. <i>Déficience en phosphore</i> .....	20
1.4.3. <i>Déficience en potassium</i> .....	21
1.4.4. <i>Déficience en calcium</i> .....	23
1.4.5. <i>Déficience en magnésium</i> .....	23
 <b>Deuxième partie</b>	
<b>FERTILISATION POTASSIQUE DU MAÏS</b> .....	26
2.1. L'effet moyen de la potasse sur maïs dans les essais permanents SCPA .....	26
2.1.1. <i>Réponses du maïs à la potasse selon la richesse des sols en K<sub>2</sub>O échangeable</i> .....	26
2.1.2. <i>Réponses du maïs à la potasse, dans certaines conditions de sols</i> .....	28
2.1.3. <i>Tests potassiques du sol autres que K échangeable</i> .....	30
2.1.4. <i>Evolution du potassium du sol sous culture de maïs</i> .....	31
2.2. Les interactions du potassium avec les autres facteurs nutritifs sur maïs .....	32
2.2.1. <i>L'interaction azote × potassium</i> .....	32
2.2.2. <i>L'interaction phosphore × potassium</i> .....	34
2.2.3. <i>L'interaction potassium × calcium</i> .....	35
2.2.4. <i>L'interaction potassium × magnésium</i> .....	36
2.2.5. <i>L'interaction potassium × oligoéléments</i> .....	37
2.3. Interactions du potassium avec d'autres facteurs de croissance .....	38
2.3.1. <i>Interaction potassium × variétés</i> .....	38
2.3.2. <i>Interaction potassium × peuplements</i> .....	38
2.3.3. <i>Interaction potassium × irrigation</i> .....	38
2.3.4. <i>Interaction potassium × façons culturales</i> .....	39
2.4. Effets de la fumure potassique sur la santé du maïs .....	41
2.5. Effets de la fumure potassique sur la qualité du maïs .....	41
2.6. Les modalités de la fumure potassique du maïs .....	42
2.6.1. <i>La forme de potasse</i> .....	42
2.6.2. <i>Les modes d'apport de la potasse</i> .....	42
<b>Conclusions</b> .....	44
<b>Bibliographie</b> .....	46
<b>Planches en couleur</b> .....	24-25

# LE POTASSIUM ET LE MAÏS

## INTRODUCTION

**Le rôle de la fertilisation a été très important dans les progrès de la culture du maïs et inversement le maïs occupe une place de choix dans les progrès de la fertilisation**

La culture du maïs a accompli des progrès considérables en France depuis l'après-guerre. En 1948-1949, le rendement moyen pour le maïs grain, était de 15,7 q/ha sur une surface de 293 000 hectares. Trente ans après, en 1978-1979, il était de 50 q/ha sur une surface de 1 804 000 hectares. La figure 1 représente l'évolution du rendement moyen national. Le cap des 50 q/ha est franchi depuis une décennie, en 1968-1969, mais on note une stagnation à ce niveau (le rendement moyen des 11 dernières années a été de 48,5 q/ha), si bien que l'objectif de 60 q/ha parfois avancé pour 1983, semble avoir très peu de chances d'être atteint.

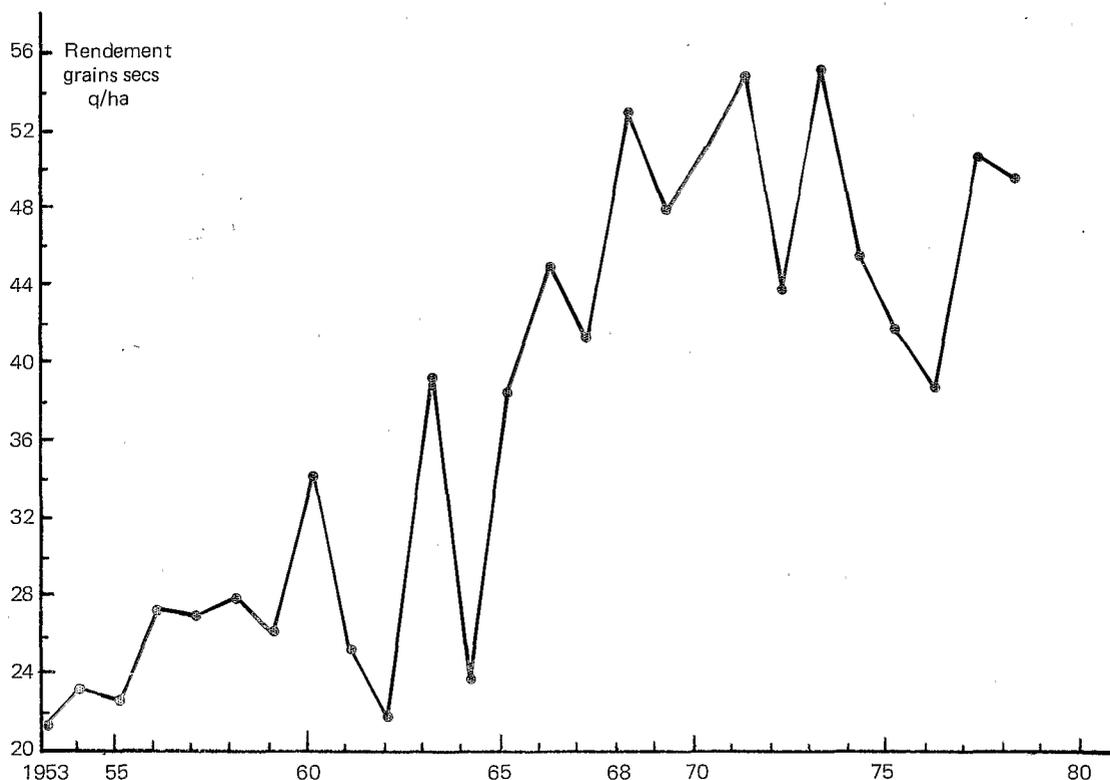


Figure 1: Évolution du rendement moyen national du maïs en France.

Ces progrès considérables des rendements, malgré l'extension des surfaces, tiennent évidemment aux progrès variétaux, grâce surtout aux hybrides précoces français bien adaptés, aux progrès dans l'utilisation des herbicides (triazines), aux progrès des techniques culturales (dont la fertilisation). Il est difficile de mesurer la part imputable à cette dernière, mais il n'est pas exagéré de l'estimer à 25 à 35 % du progrès d'ensemble.

Le rôle de la fertilisation a donc été très important dans les progrès de la culture du maïs et inversement la part du maïs a été très grande dans les progrès de la fertilisation.

Selon GROS, en 1972, la fertilisation moyenne du maïs en France était de N104 P116 K77 (en kg/ha N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) contre N92 P102 K68 pour le blé (61). En quantités globales, le maïs est, après le blé, le second consommateur de fertilisants.

Il existe évidemment des disparités régionales importantes. Ainsi, l'Association Générale des Producteurs de Maïs (AGPM) estimait que dans les régions productrices de maïs, la fertilisation moyenne de 1972 était de N133 P155 K136 et que, dans ces conditions, les sols devaient être en général bien pourvus en P et K, ce qui devait militer en faveur d'une certaine réduction des apports destinés à assurer désormais des doses d'entretien (172). Une enquête du Ministère de l'Agriculture

Fonds d'investissement agricole

N° : 82/80/00 857

Cote : B. ex 1

Date : 23 AVRIL 1982

sait état des fertilisations moyennes sur maïs en régions intensives en 1975 : N144 P166 K153 en Ile de France (Seine et Marne, Yvelines, Essonne et Val d'Oise) et N133 P155 K138 dans le Centre (Eure et Loir, Loir et Cher, Loiret).

Depuis la crise de l'énergie, il y a eu de nombreuses campagnes dans le grand public, mettant l'accent sur les économies d'énergie, les risques de pollution des nappes phréatiques par l'azote, les économies de devises (phosphates importés, naphtha) et surtout la diminution des coûts en agriculture (102).

Le maïs a été accusé d'être une culture gourmande en énergie et particulièrement en engrais. Le problème du maïs et de l'énergie avait été abordé dans le Rapport d'Orientation de l'AGPM à Pau en 1978, sous l'angle des engrais, de l'irrigation, du séchage (173). La conclusion en était que «c'est une folie dans le monde actuel où plus des deux tiers de la population ne mange pas à sa faim que de vouloir réduire la productivité des sols. Le vrai problème, c'est de tirer du sol la production maximale avec le minimum de moyens économiques, tout en préservant sa fertilité».

Pour les cultures de maïs, la consommation d'énergie est effectivement imputable principalement aux engrais soit, selon HUTTER, 49 % contre 39 % pour les carburants (70).

Sur les bases suivantes de consommation d'énergie par élément (1000 K cal/kg K<sub>2</sub>O, 3000 K cal/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 17000 K cal/kg N) et dans le cas d'un engrais NPK d'équilibre 1-1-1, la fertilisation azotée représente environ 80 % du coût énergétique de la fumure.

Les études faites aux USA aboutissent à des résultats très voisins (174). La fertilisation potassique est donc faiblement concernée par l'aspect énergétique. Il n'en reste pas moins que la fertilisation du maïs est à raisonner dans son ensemble (NPK, et éventuellement Mg et oligoéléments), car elle représente le poste le plus important des coûts de production.

L'effet de chaque élément devrait être considéré en termes de rendement, de rentabilité, de maintien du potentiel de fertilité des sols et aussi en combinaison avec les autres éléments ou facteurs de croissance.

Le présent document a été rédigé selon ce principe, mais se réfère tout particulièrement au potassium et à la fertilisation potassique du maïs. Il est incontestablement souhaitable que la fertilisation potassique du maïs soit la plus rationnelle possible pour en tirer les meilleurs effets aux plus faibles coûts dans le cadre plus vaste du maintien ou de l'amélioration de la fertilité des sols.

Une première partie concerne les principaux aspects de la nutrition potassique du maïs et actualise ou complète une étude de 1963 (92).

Une deuxième partie rapporte les effets de la fertilisation potassique sur le maïs, seule ou en liaison avec d'autres facteurs.

## **Première partie : LA NUTRITION MINÉRALE ET PLUS PARTICULIÈREMENT POTASSIQUE DU MAÏS**

La nutrition minérale du maïs constitue un très vaste sujet qui fut plus particulièrement étudié aux USA. Des articles portant sur l'ensemble du problème et passant en revue les résultats les plus substantiels de la vaste littérature en cause y avaient été publiés, en particulier ceux de SAYRE (134-135) et de NELSON (115). En France on dispose de très peu de synthèses sur le sujet (76) sinon en ce qui concerne les applications pratiques, mais de très nombreuses études régionales ou études de cas nutritionnels dont l'ensemble constitue une source très importante d'informations.

Il convient de citer enfin et surtout l'ouvrage de I. ARNON, publié en 1975 par l'Institut International de la Potasse de Berne, dont les 450 pages consacrées à ce sujet représentent une masse documentaire tout à fait unique sur une seule culture (2). Ce même Institut a publié en 1978 un bulletin spécial consacré à la fertilisation du maïs (56).

Cette première partie est plus particulièrement consacrée aux aspects spécifiques de la nutrition potassique du maïs (mais il va sans dire que si le potassium occupait une place

privé dans ces études, les autres éléments N, P et parfois Ca, Mg furent également étudiés).

Les aspects de cette nutrition peuvent être étudiés par diverses méthodes qui seront envisagées dans l'ordre suivant :

- 1) les prélèvements et exportations d'éléments minéraux, enregistrés au moment de la maturité (chapitre 1),
- 2) l'étude de l'évolution de l'absorption des éléments minéraux au cours du cycle, jusqu'à la récolte (chapitre 2),
- 3) l'étude de la nutrition minérale sous forme d'un diagnostic foliaire (chapitre 3),
- 4) la connaissance des symptômes de malnutrition (chapitre 4).

Les méthodes rapides d'appréciation des besoins nutritifs ne sont pratiquement pas utilisées en France dans leur concept habituel, mais l'analyse du suc pétiolaire y fut étudiée par les chercheurs de la Station Agronomique de Bordeaux dans un but de recherche pour expliquer des problèmes de malnutrition comme l'intoxication ammoniacale (132-133).

# 1.1. PRÉLÈVEMENTS ET EXPORTATIONS D'ÉLÉMENTS FERTILISANTS, POTASSE EN PARTICULIER, PAR LE MAÏS

Il a été procédé à l'analyse de très nombreux échantillons de grains, rafles, tiges, issus de parcelles expérimentales afin de préciser les points suivants :

1) la composition moyenne du grain, de la rafle, des tiges en N, P, K, Ca, Mg.

2) l'influence éventuelle de la fumure potassique sur la composition de ces organes.

Les résultats relatifs au potassium sont ici rapportés, ceux concernant N, P, Ca, Mg étant seulement résumés.

## 1.1.1. LE GRAIN (COMPOSITION MINÉRALE)

La composition chimique du grain de maïs présente des variations d'assez faible amplitude qui expliquent la bonne concordance des résultats concernant les exigences du maïs, rapportées au quintal de grain.

Inversement cela explique que les auteurs ayant étudié les mérites respectifs des analyses de grains et de feuilles pour la connaissance des niveaux nutritifs du maïs ont toujours conclu à la supériorité marquée de la composition foliaire (13).

### 1.1.1.1. Azote :

C'est de loin l'élément le plus souvent étudié dans la composition du grain de maïs, surtout en relation avec les fumures azotées, la densité de culture et la teneur en protéine. On constate généralement une influence positive de la nutrition et de la fertilisation azotée sur la teneur en azote du grain. SOUBIÉS et GADET avaient trouvé des taux entre 1,10 et 2,21 % N et relevé l'influence de la fertilisation azotée (144).

Sur les essais N x K de la Station d'Aspach, en Alsace, la teneur a varié entre 1,60 et 2,0 % N selon les années et les variétés. Sur l'essai de Pau, en 18 ans, la teneur moyenne a varié entre 1,36 et 1,88 % N.

L'influence de la potasse sur le taux d'azote du grain n'est décelable que lorsque, en présence d'une alimentation azotée correcte, le rendement se trouve considérablement limité par une nutrition potassique très déficitaire.

Pour le calcul des exportations dues aux grains, on peut admettre une teneur moyenne de 1,45 % N pour le grain à 15 % d'humidité.

### 1.1.1.2. Acide phosphorique :

Sur l'ensemble des parcelles étudiées la teneur a varié entre 0,40 et 0,90 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Bien qu'il soit parfois fait état de teneurs un peu supérieures dans la littérature, il semble que l'on doive considérer comme normale une teneur de 0,70 à 0,75 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, soit environ 0,65 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pour le grain à 15 % d'humidité.

### 1.1.1.3. Potasse :

Le potassium a été beaucoup moins étudié dans le grain de maïs que N et P.

BENNET a enregistré de très faibles variations selon les apports d'azote (13), SOUBIÉS et GADET indiquaient comme teneurs extrêmes 0,36 à 0,52 % (144).

DEPARDON donnait un taux moyen de 0,43 % sur U 20, en précisant cependant que la teneur moyenne sur 12 échantillons de U 20, U 22, U 26, W 240, W 255 a été de 0,52 % (39).

COLLIER et al. ont enregistré une variation assez ample allant de 0,36 à 0,69 % de matière sèche, mais les teneurs supérieures à 0,54 concernaient des maïs très mal développés souffrant de la déficience en eau (31).

Les apports de potasse ont eux-mêmes très peu d'influence; KRANTZ et CHANDLER, dans des essais comportant cinq niveaux de potasse de 0 à 320 kg/ha K<sub>2</sub>O, n'observèrent pas de différence appréciable dans la teneur

des grains en potasse (0,37 à 0,39 %) (81). Il en fut de même dans les essais de ROBERTSON et al (129-130) pour des doses allant de 0 à 556 kg/ha K (0,42 % K<sub>2</sub>O). ARNON conclut que la teneur en potassium du grain se situe le plus souvent autour de 0,40 % (2).

Dans les essais SCPA de Pau, les grains des parcelles très déficientes en potasse étaient un peu plus riches en K<sub>2</sub>O que ceux des parcelles bien pourvues.

Pour la Station d'Aspach, GARAUDEAUX et CHEVALIER avaient donné pour dix années, de 1954 à 1964, une table de variation de la teneur en K<sub>2</sub>O des grains en fonction des neuf traitements (3N x 3K). Pour les 90 teneurs moyennes (9 traitements x 10 ans) la variation extrême allait de 0,33 à 0,57 % K<sub>2</sub>O. La variation due aux traitements se situait entre 0,46 et 0,50 % K<sub>2</sub>O et celle due aux années était beaucoup plus accusée (entre 0,35 et 0,56 % K<sub>2</sub>O) (57).

La Station de Laon a adopté pour la table de prélèvements des cultures 0,50 % K<sub>2</sub>O (0,5 kg K<sub>2</sub>O par quintal de grains secs). En 1963 nous avons adopté une teneur de 0,40 % K<sub>2</sub>O pour le grain à 15 % d'humidité (92).

Les teneurs en K<sub>2</sub>O ici enregistrées sur quelques centaines d'échantillons très récents se sont toujours situées dans la fourchette antérieurement admise.

Ainsi en 1976, sur deux enquêtes dans le Sud-Ouest, les résultats concernant la teneur en K<sub>2</sub>O des grains furent les suivants :

Teneurs en K % de matière sèche

Nord des Landes		Béarn-Chalosse		
0,30	1	0,32	0,33	1
0,42	3	0,34	0,35	2
0,46	6	0,36	0,37	17
0,53	1	0,38	0,39	10
	11	0,40	0,41	13
		0,42	0,43	15
		0,44	0,45	7
		0,46		2
				67

Pour l'enquête dite « Nord des Landes », la moyenne était de 0,44 % K, correspondant à 0,45 % K<sub>2</sub>O pour les grains à 15 % d'humidité.

Pour l'enquête dite « Béarn-Chalosse », la composition moyenne des 67 échantillons était la suivante : 1,68 % N, 0,292 % P, 0,40 % K, 0,158 % Mg (% de matière sèche). La moyenne correspondait donc à 0,41 % K<sub>2</sub>O par rapport au grain sec.

On considère maintenant que par rapport au grain à 15 % d'eau, la moyenne la plus courante se situe de 0,42 à 0,44 % K<sub>2</sub>O. Une teneur moyenne de 0,45 % K<sub>2</sub>O a un haut degré de représentativité et permet de calculer avec une bonne sécurité les exportations de K<sub>2</sub>O.

#### 1.1.1.4. Chaux et magnésie :

Le grain de maïs est particulièrement pauvre en chaux. En accord avec la littérature, des variations extrêmement réduites furent enregistrées sur les nombreuses analyses de

grains des essais, qui se résument pratiquement à attribuer une teneur moyenne de 0,025 % (CaO) aux parcelles K0 et 0,015 % (CaO) aux parcelles K1 et K2.

Les taux de magnésie sont nettement plus élevés et également peu dispersés entre 0,18 % et 0,22 % (MgO).

### 1.1.2. LES RAFLES (COMPOSITION MINÉRALE)

Elles présentent une composition chimique nettement plus fluctuante que les grains. Les variations enregistrées ont été les suivantes par rapport à la matière sèche :

N : 0,26 à 0,51 %  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 0,07 à 0,23 %  
K<sub>2</sub>O : 0,48 à 0,94 %

moyenne = 0,35 % N  
moyenne = 0,15 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>  
moyenne = 0,70 % K<sub>2</sub>O

Les rafles sont pauvres en chaux et en magnésie. Cependant la teneur en chaux est nettement supérieure à celle du grain. Par contre, celle de magnésie est plus faible que dans le grain.

### 1.1.3. LES EXPORTATIONS PAR LES ÉPIS

A partir des teneurs moyennes ci-contre, qui ont un haut degré de représentativité, on peut calculer les exportations par une récolte moyenne de 70 quintaux de grains à 15 % d'humidité.

On trouve ainsi : 102 kg N, 46 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 32 kg K<sub>2</sub>O, 1,4 kg CaO, 14 kg MgO.

Il convient d'ajouter les exportations dues aux rafles. Une certaine variation intervient de ce fait, car pour 70 q de grains, le poids des rafles peut varier dans des limites assez larges qui dépendent notamment de la variété cultivée, de la fumure appliquée, de la pluviométrie durant le cycle. En particulier, la carence potassique augmente significativement le pourcentage de la rafle par rapport à l'épi (par exemple, sur la Station d'Aspach, en 1959, le poids des rafles avait été déterminé pour les neuf traitements 3N x 3K et s'était avéré peu fluctuant de 9,0 à 10,8 q/ha pour des rendements en grains allant de 48 à 55 q).

Pour une récolte de 70 quintaux de grains à 15 % d'humidité, on peut estimer à environ 12 quintaux la matière sèche de rafles dont les exportations seraient d'environ : 4,2 kg N - 1,8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 8,4 kg K<sub>2</sub>O - 1,4 kg CaO - 1,1 kg MgO.

Pour le calcul des exportations par les épis, il convient d'ajouter celles dues aux spathes : 2,5 kg N - 1 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 5 kg K<sub>2</sub>O environ.

Tableau 1: Teneurs moyennes du maïs

	Teneurs en pour cent de	
	grain à 15 % d'eau	rafle (mat. sèche)
N	1,45	0,35
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,65	0,15
K <sub>2</sub> O	0,45	0,70
CaO	0,02	0,12
MgO	0,20	0,09

L'exportation globale engendrée par une récolte de 70 quintaux de grains serait ainsi de : 109 kg N - 49 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 45 kg K<sub>2</sub>O - 2,8 kg CaO - 15 kg MgO.

La conclusion à laquelle conduisent ces calculs est généralement la modicité des exportations du maïs en K<sub>2</sub>O (aussi bien qu'en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

Le concept des exportations réelles (grains secs ou épis) exprime en fait très mal les caractéristiques de la nutrition potassique du maïs qui est au contraire très dynamique comme cela ressort de l'examen des prélèvements des plantes entières.

### 1.1.4. LES TIGES ET LES FEUILLES A MATURITÉ (COMPOSITION MINÉRALE)

Sous la dénomination de pailles on considérera l'ensemble des tiges et des feuilles adhérentes (gainés et limbes) échantillonnées au moment de la récolte. Les pailles ont surtout été étudiées dans le but de suivre la migration des éléments minéraux chez le maïs (27).

Sur les essais SCPA, les analyses de tiges et feuilles (réunies ou séparées) échantillonnées au moment de la récolte ont été faites en complément du diagnostic foliaire dont il sera parlé plus loin. La composition minérale de la plante à maturité peut en effet fournir des indications utiles sur le bilan nutritionnel de la plante entre la vue instantanée fournie par le diagnostic foliaire et la maturité de l'épi.

#### 1.1.4.1. Azote :

Dans les essais de Pau, la teneur en azote des pailles a été très fluctuante de 0,56 à 1,29 % N.

Sur les essais de la Station d'Aspach de 1954 à 1964, la teneur a fluctué de 0,51 % à 1,10 % N, avec une moyenne de 0,77 % N. Les pailles des parcelles K0 étaient un peu plus

riches en azote (0,81 %) que celles des parcelles K1 et K2 (0,75 % N).

On est amené à considérer comme normale la teneur de 0,75 % N pour l'ensemble des parties aériennes végétales.

#### 1.1.4.2. Acide phosphorique :

Sur les essais de Pau, la teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a varié de 0,07 à 0,51 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Sur la Station d'Aspach, la variation parcellaire fut de 0,21 à 0,42 %. Pour le calcul des « exportations », il semble correct d'adopter une teneur moyenne de 0,20 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

#### 1.1.4.3. Potasse :

On considère les résultats obtenus ici sur des essais potasse importants afin de montrer les variations enregistrées et de tenter une estimation moyenne des teneurs en K<sub>2</sub>O à maturité.



Ces contrôles permettent cependant de dégager des sortes de normes pour les teneurs en K<sub>2</sub>O des pailles de maïs à la maturité.

#### K<sub>2</sub>O % matière sèche

< 0,8	Déficiência très grave en K <sub>2</sub> O, ou forte dilution du stock de potasse absorbée en cas de nutrition insuffisante, ou fort lessivage.
0,8 à 1,2	Nutrition potassique faible (le plus souvent sans signes foliaires de déficience).
1,2 à 1,4	Nutrition potassique moyenne (la plupart des traitements K1 et certains K0).
1,4 à 2,0	Nutrition potassique correcte.
> 2,0	Nutrition potassique élevée (plantes encore vertes près de la maturité). Au-dessus de 2,4 %, il peut y avoir concentration par excès dû à la sécheresse ou aux faibles rendements.

Pour le calcul de prélèvements, on peut adopter le centre de la zone correcte, soit 1,7 % K<sub>2</sub>O.

#### 1.1.4.4. Chaux et magnésie :

Il y a nettement tendance à ce que les parcelles déficientes en potasse aient des pailles plus riches en chaux et un

antagonisme plus net se manifeste avec la magnésie. Ainsi, sur les essais considérés ci-dessus pour K<sub>2</sub>O, les résultats moyens suivants furent obtenus.

Sur l'essai de Pau, les teneurs moyennes pour 1965 et 1966, ont été pour les doses K0, K100, K200 respectivement : 0,73 - 0,61 - 0,61 % CaO et 0,45 - 0,32 - 0,26 % MgO.

Sur la Station d'Aspach, les teneurs moyennes sur 10 ans (1954-1964) correspondant aux effets principaux des doses K0, K75, K150 ont été : 0,61 - 0,57 - 0,53 % CaO et 0,34 - 0,30 - 0,27 % MgO.

Sur l'essai de Pont Saint Martin, les teneurs moyennes pour 1971, 1972, 1973 ont été dans l'ordre croissant des quatre doses de potasse en essai, respectivement : 1,00 - 0,85 - 0,77 - 0,73 % CaO et 0,71 - 0,43 - 0,33 - 0,28 % MgO.

En conclusion, la composition chimique des pailles à maturité pourrait difficilement servir de guide précis dans l'établissement des fertilisations appropriées aux divers cas. Cependant elle peut fournir des indications utiles sur les tendances.

Un problème pratique lié à la composition des pailles à maturité est celui des exportations éventuelles par les tiges.

## 1.1.5. EXPORTATIONS D'ÉLÉMENTS FERTILISANTS PAR LES TIGES ET LES FEUILLES

### 1.1.5.1. Le poids des pailles à la récolte :

La détermination des exportations en kg d'éléments par hectare pose les problèmes d'échantillonnage des pailles en vue des analyses et de la connaissance exacte du poids de paille par hectare.

Sur la plupart des essais, ces deux données ont été calculées à partir d'échantillons de dix pieds par parcelle. Dans certains cas, la totalité des tiges correspondant à la récolte

d'épis, a été pesée. L'estimation des rendements en tiges + feuilles est donc susceptible d'une moins bonne précision que celle des rendements en grains.

Sur l'essai de Pau, la matière sèche des pailles a présenté en 1965 et 1966 les valeurs suivantes : la variété était Funk G75 et la densité était réglée à 40 000 plantes/ha et le rendement en grains avait atteint 90 q/ha avec K250. A partir de K100, le rapport paille (matière sèche)/grain (à 15 % d'eau) fut compris entre 0,65 et 0,71.

Tableau 5: Matière sèche des pailles (q/ha) - Essai de Pau

	K0	K50	K100	K150	K200	K250
1965	7,6	43,7	47,9	47,6	57,6	60,4
1966	10,2	37,5	53,2	57,5	63,4	68,8
Moyenne	8,9	40,6	50,5	52,6	60,5	64,6
Rapport paille/grain	(1,78)	0,77	0,66	0,65	0,69	0,71

Sur la Station d'Aspach, de 1964 à 1974, l'interaction 3N x 3K sur le rendement en pailles fut la suivante : les variétés étaient des maïs précoces (Wisconsin 240 de 1954 à 1961 et INRA 200 de 1962 à 1964) à la densité de 30 à 35 000 pieds seulement et le rendement moyen sur cette période fut de 50 q/ha. La production de pailles fut donc très inférieure à celle de Pau et le rapport moyen paille (sec)/grain à 15 % fut ici de 0,574.

Sur l'essai de Pont Saint Martin enfin et pour la moyenne sur 3 ans de 1971 à 1973, ce même rapport a pris les valeurs suivantes pour K0, K1, K2, K3 : 0,80 - 0,61 - 0,58 - 0,60. Sur la moyenne sur 3 ans de K1, K2, K3, pour 70,3 q de grains le poids moyen de matière sèche des pailles était de 45 q/ha.

Dans de telles études, le poids de matière sèche des pailles à l'hectare devrait être accompagné de l'indication de la variété cultivée, du peuplement, etc.

Pratiquement, on peut considérer que le rapport précédent est situé entre 0,60 et 0,70 et adopter un rapport moyen de 0,65 et donc une production de 45 q/ha de matière sèche de pailles pour un rendement de 70 q/ha de grains.

Tableau 6 : Matière sèche des pailles q/ha (moyenne sur 10 ans) Aspach

N \ K	K			Effet N
	K0	K75	K150	
N35	24,7	27,7	30,2	27,5
N70	26,3	29,7	30,4	28,8
N105	27,0	30,6	30,3	29,3
Effet K	26,0	29,3	30,3	28,5

### 1.1.5.2. Exportations par les pailles à la récolte :

La composition chimique des pailles à maturité est donc beaucoup plus fluctuante que celle des grains et, de ce fait, confère une certaine imprécision au calcul des exigences minérales totales du maïs.

Les exportations (éventuelles) par les pailles sont obtenues en multipliant les teneurs moyennes (pour une alimentation correcte de la plante) en N (0,80 %), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,20 %), K<sub>2</sub>O (1,70 %), CaO (0,60 %), MgO (0,30 %), par le poids moyen de paille (45 à 50 quintaux de matière sèche).

Sur ces bases, on obtient environ : 40 kg N - 9 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 80 kg K<sub>2</sub>O - 30 kg CaO - 15 kg MgO.

Le prélèvement en potasse est le plus sujet à fluctuation, selon la teneur en K<sub>2</sub>O considérée comme normale.

Sur la base d'un seuil de teneur en K<sub>2</sub>O de 1,20 %, l'exportation la plus faible normale serait de 54 kg K<sub>2</sub>O/ha pour 45 q/ha de pailles et 60 kg K<sub>2</sub>O/ha pour 50 q.

Les résultats obtenus sur les divers essais divergent plus ou moins des moyennes citées plus haut.

Ainsi sur l'essai de Pau, les quantités moyennes sur deux ans (1965 et 1966) présentes dans les pailles pour le traitement K200 (87 q/ha de grains secs et 60 q/ha de paille) furent les suivantes : 46 kg N - 8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 59 kg K<sub>2</sub>O - 37 kg CaO - 17 kg MgO. Il a été indiqué plus haut que les pailles pouvaient être considérées comme nettement pauvres en K<sub>2</sub>O.

Sur la Station d'Aspach, pour la moyenne sur 10 ans (1954-1964) en présence de rendements très inférieurs, on a trouvé seulement 20 - 23 - 24 kg N pour l'effet doses N et 33 - 46 - 55 kg K<sub>2</sub>O pour l'effet doses K<sub>2</sub>O (26 à 30 q/ha de pailles).

### 1.1.6. LES RACINES

Le système racinaire du maïs a été peu étudié en fonction de la nutrition minérale. FEHRENBARGER et SNIDER ont étudié, sur divers types de sols, le poids de matière sèche des racines du maïs. Dans un essai comportant ou non apport de K<sub>2</sub>O sur un sol très pauvre en potasse, la

composition chimique des racines fut très peu influencée pour N, P, Ca, Mg, mais nettement modifiée vis-à-vis de K (1,61 % K au lieu de 0,34 % K de 0 à 20 cm). Les données ci-après concernent deux sols, avec un rendement de 51 q pour le premier et 47 q pour le second (48).

Tableau 7 : Exemples de composition minérale des racines de maïs

	Matière sèche kg/ha	En % de matière sèche				
		N	P	K	Ca	Mg
0- 25 cm	1560	0,92	0,12	1,20	0,35	0,26
25-180 cm	648	1,22	0,15	1,15	0,41	0,28
0- 20 cm	1356	0,80	0,12	0,62	0,35	0,20
20-180 cm	1090	1,10	0,19	0,65	0,39	0,26

Les systèmes racinaires précédents renfermaient ainsi environ 22 kg N, 6 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 20 à 30 kg K<sub>2</sub>O. Il semble donc que les racines de maïs correspondant à une récolte

moyenne ont des exigences dont il conviendrait de tenir compte, particulièrement pour N et K<sub>2</sub>O.

### 1.1.7. EXPORTATIONS ET EXIGENCES TOTALES DU MAÏS

Les exigences totales du maïs sont constituées des éléments présents dans les épis, les parties aériennes (tiges et feuilles) et les racines. Les exportations réelles, au contraire,

sont très différentes selon que les parties aériennes sont effectivement exportées ou enfouies.

Tableau 8 : Exigences d'une récolte de 70 q de grains secs (kg/ha)

	Épis dont grains		Tiges et feuilles	Exigences totales (sans les racines)
N .....	109	102	40	150
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	49	46	9	60
K <sub>2</sub> O .....	45	32	80 (60 - 100)	125 (105 - 145)
CaO .....	2,8	1,4	30	33
MgO .....	15	14	15	30

Les véritables exigences sont celles de la plante entière. Ce sont aussi les exportations dans le cas du maïs-fourrage.

Pour le potassium, les choses se compliquent d'autre part du fait que le maximum du prélèvement opéré par une culture de maïs se situe non à la maturité (comme il vient d'être envisagé), mais environ trois semaines après la floraison. Ces faits sont bien connus depuis les études de SAYRE (135) et sont mesurés au chapitre suivant.

D'autre part, les variétés tardives à haut rendement et les cultures actuelles à fort peuplement (80 000 pieds/ha), peu-

vent présenter des exigences supérieures aux données précédentes, au moins lorsqu'elles sont en mesure de réaliser leurs potentialités supérieures, particulièrement en cas d'irrigation.

Dans cet ordre d'idées, le tableau 9 rapporte les résultats moyens sur 6 ans (1973 à 1978) obtenus sur un essai 2N x 2P x 2K x 2 modalités d'irrigation poursuivi à Gréoux en liaison avec l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages, et pour les deux doses d'azote (N150 et N285 environ en moyenne), en culture continue de maïs fourrage (en général variété INRA 508 à 85 000 pieds/ha réels).

**Tableau 9 : Exportations moyennes sur 6 ans (kg/ha) - Essai de Gréoux (Alpes de Haute Provence)**

	Epis		Tiges + feuilles		Total		Variation sur le total	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2
N .....	109	144	46	66	155	210	119-193	197-221
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	54	60	10	12	65	72	56-82	66-84
<b>K<sub>2</sub>O</b> .....	<b>57</b>	<b>60</b>	<b>146</b>	<b>162</b>	<b>203</b>	<b>222</b>	<b>151-221</b>	<b>188-263</b>
CaO .....	4	4	83	91	87	95	63-122	79-126
MgO .....	19	22	28	33	47	55	35-55	47-64
Rendements q/ha matière sèche .....	97,9	107,8	79,0	81,2	176,9	189,0	157,7-195,3	166,0-203,0

Il est difficile de comparer ces résultats à ceux du tableau moyen précédent. La récolte a été ici effectuée lorsque le maïs était au stade  $35 \pm 3\%$  matière sèche plantes entières. Les colonnes épis sont très comparables à la colonne épis précédente, compte tenu de la différence de production. Les organes végétatifs ont ici exporté des quantités très supérieures avec un renforcement en CaO et MgO (sol calcaire).

Pour les rendements extrêmes enregistrés sur cet essai, de 15,77 et 20,30 t/ha matière sèche plantes entières, l'exportation moyenne en K<sub>2</sub>O fut respectivement de 12,1 et 13,0 kg K<sub>2</sub>O par tonne de matière sèche.

HUGHES et al, en Angleterre ont calculé en 1978 qu'une récolte type de maïs fourrage d'un rendement de 11 t/ha matière sèche exportait en moyenne par hectare 13 kg N - 4,5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 14 kg K<sub>2</sub>O par tonne de matière sèche (69).

## 1.2. LA NUTRITION MINÉRALE DU MAÏS AU COURS DU CYCLE VÉGÉTATIF : CAS PARTICULIER DU POTASSIUM ET CONSÉQUENCES

La composition minérale de la plante à maturité constitue la résultante des accumulations et migrations au cours de la croissance. Elle peut servir comme il vient d'être vu au chapitre précédent, à la détermination des exportations d'éléments minéraux.

Mais l'étude de l'accumulation et des mouvements des éléments nutritifs dans la plante au cours de la croissance est de la plus haute importance pour la détermination des besoins en éléments nutritifs.

La répartition des éléments minéraux dans le maïs au cours de sa végétation a d'abord été étudiée par SAYRE dont les graphiques sont classiques (134-135), et par la suite

par HANWAY (63). En France, SOUBIÉS et al ont étudié la répartition des éléments minéraux à trois époques pour la variété Iowa 4417 :

- 1) au début de l'épiaison,
- 2) quatre semaines après,
- 3) à maturité,

axant particulièrement leur étude sur l'influence de l'intensité de la nutrition azotée sur la pénétration et la migration des éléments minéraux (144).

Les études en ce domaine ont été conduites ici en 1961, 1962, 1963, sous l'angle de la comparaison de diverses variétés.

### 1.2.1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

**1961 :** essais comparatifs de variétés en Lot et Garonne (on a étudié de mai à octobre la nutrition minérale sur divers champs d'essais comparatifs de variétés situés en Lot et Garonne dans des conditions de sol différentes (alluvions, bouldène, terrefort).

Les variétés étudiées étaient : Iowa 4417, United 32, Funk G 75 A, Wisconsin 690, INRA 640. Du semis à la récolte, six prélèvements de pieds entiers furent opérés, à raison de 50 pieds pour les trois premiers, 25 pieds pour les trois derniers par champ et par variété.

Les déterminations de N, P, K, Ca, Mg % de matière sèche furent faites sur les plantes entières pour les trois pre-

miers prélèvements et sur les diverses parties (tiges, feuilles, rafles, grains) ensuite.

**1962 :** essai de Serres Castets (Pyrénées Atlantiques).

En 1962, le problème avait été repris avec plus de précision sur un seul essai comportant quatre répétitions de quatre variétés (Iowa 4417, Funk G 75 A, Illinois 3152, INRA 640). Entre le semis (27 avril) et la récolte (22 novembre), neuf prélèvements de pieds entiers furent opérés à raison de 50 pieds par parcelle pour les trois premiers, 25 pieds pour les 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> prélèvements et 10 pieds pour les 6<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup>, 8<sup>e</sup>, 9<sup>e</sup> prélèvements. Les analyses ont porté sur les plantes entières pour les prélèvements 1, 2, 3, sur les tiges et feuilles pour les prélèvements 4, 5, 6, et sur tiges, feuilles, enveloppes, rafles, grains ensuite.

### 1.2.2. CROISSANCE ET PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE

A titre de simplification, on ne retiendra dans le cas présent que deux variétés, d'une part Iowa 4417 qui était vers les années 1960-65 considérée comme variété témoin dans le Sud-ouest et d'autre part Funk G 75 A pour les variétés plus tardives de cette époque.

La figure 2 représente donc pour Iowa et Funk et pour un des essais de 1961 (essai sur alluvion irriguée) et l'essai de Serres Castets 1962, l'évolution du poids de matière sèche par pied pour les feuilles, le total de la tige et des feuilles et les plantes entières.

Le tableau 10 représente pour l'essai de 1961 retenu, l'évolution du poids de matière sèche par pied (le semis était du 25 avril).

Jusqu'aux prélèvements de mi à fin juillet, les variétés ne

se sont pratiquement pas différenciées. La différenciation s'est produite vers le 15 juillet, au moment de la sortie des panicules mâles chez Iowa 4417 et s'est accentuée jusqu'aux environs du 20 août pour les tiges + feuilles.

**Tableau 10: Poids de matière sèche par pied, en grammes, essai 1961, alluvions irriguées**

	Tiges + feuilles						Epis 18.08	Pl. ent. 18.08	Rafle 5.10	Grain 5.10	Pl. ent. 5.10
	16.05	6.06	21.06	5.07	18.08	5.10					
Iowa	0,22	1,28	9,88	51,8	109,6	106,0	183,0	292,6	48,4	202,3	356,7
Funk	0,18	1,36	11,30	56,3	142,9	146,6	166,7	309,6	44,8	219,8	405,2

La variété Iowa 4417 a présenté un poids sec des parties végétatives nettement inférieur à ceux des autres variétés (qui ne se sont pas différenciées entre elles).

Sur l'essai de Serres Castets 1962 les résultats ont été identiques (figure 2), mais les prélèvements plus nombreux sur juillet (tableau 11).

**Tableau 11: Poids frais (g/pied) tiges + feuilles (plantes entières à partir du 13.08), essai 1962.**

	5.06	15.06	25.06	5.07	16.07	30.07	13.08	28.08
Iowa	3,4	14,9	78,6	245	502	703	905	831
Funk	3,8	14,8	82,6	280	487	841*	1132**	1042*
ppds 0,05	NS	NS	NS	NS	NS	110	137	178

**Tableau 12: Poids de matière sèche par pied, en grammes, essai 1962, Serres Castets.**

	30.07		13.08		28.08		19.10	
	Tiges	Feuilles	Tiges	Feuilles	Tiges	Feuilles	Tiges	Feuilles
Iowa	36,3	49,9	34,2	57,3	33,1	55,5	38,8	48,5
Funk	43,9*	65,0**	50,5**	78,3**	42,7*	74,9**	46,6**	64,8**
ppds 0,01	9,2	7,4	11,9	9,7	13,4	15,2	4,9	5,5

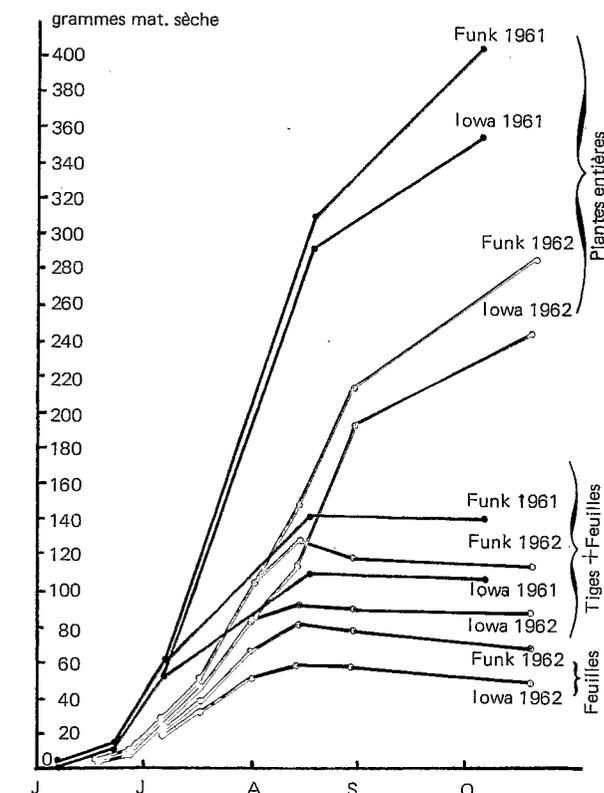


Figure 2: Évolution du poids de matière sèche par pied pour 2 variétés et 2 essais.

Les différences enregistrées entre Iowa et les autres variétés ne devinrent significatives qu'à partir du prélèvement du 30 juillet.

Le maximum du poids de matière sèche des organes végétatifs se situe au cours de la seconde quinzaine d'août. A ce moment là, l'écart entre Iowa 4417 et les autres variétés en essais était d'environ 25 %.

On peut noter également que les différences sont plus nettes pour les feuilles que pour les tiges.

Du milieu d'août à la récolte, le poids de matière sèche de la partie végétative demeure sensiblement constant. Si une certaine baisse est enregistrée, il semble qu'elle soit imputable aux feuilles plus qu'aux tiges.

Toute la production de matière sèche, réalisée à partir de cette phase sert à la formation des grains (courbes plantes entières de la figure 2).

### 1.2.3. ÉVOLUTION DE L'ABSORPTION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX

Le tableau 13 rapporte l'évolution des teneurs en N, P, K, Ca, Mg des parties végétatives sur l'essai de 1961 précédemment considéré (6 prélèvements).

Les figures 3 et 4 représentent l'évolution des teneurs en N, P et K des organes végétatifs sur l'essai de Serres Castets en 1962. Ces courbes sont en effet plus précises que le tableau précédent, car elles comportent 9 points dont surtout 5 points sur juillet + août au lieu de 2. A partir du 5 juillet, chaque date comporte 3 points (teneurs des tiges, des feuilles et des tiges + feuilles pondérées).

Tableau 13: Évolution des teneurs en N, P, K, Ca, Mg dans les organes végétatifs, essai 1961 (alluvions irriguées)

	16.05	6.06	21.06	5.07		18.08		5.10	
	Plantes entières			Tiges	Feuilles	Tiges	Feuilles	Tiges	Feuilles
N toutes variétés .....	4,50	4,11	3,73	1,80	2,61	0,68	1,84	0,64	0,91
P toutes variétés .....	0,32	0,42	0,44	0,23	0,34	0,09	0,19	0,06	0,09
<b>K Iowa .....</b>	<b>3,81</b>	<b>3,77</b>	<b>3,56</b>	<b>2,36</b>	<b>2,47</b>	<b>1,32</b>	<b>1,20</b>	<b>0,88</b>	<b>0,75</b>
<b>variétés plus tardives .....</b>	<b>2,85</b>	<b>4,69</b>	<b>4,54</b>	<b>3,35</b>	<b>2,94</b>	<b>1,50</b>	<b>1,50</b>	<b>1,42</b>	<b>0,84</b>
Ca toutes variétés .....	0,93	1,04	0,79	0,75	0,68	0,43	1,03	0,40	0,81
Mg toutes variétés .....	0,36	0,32	0,49	0,59	0,43	0,33	0,42	0,34	0,41

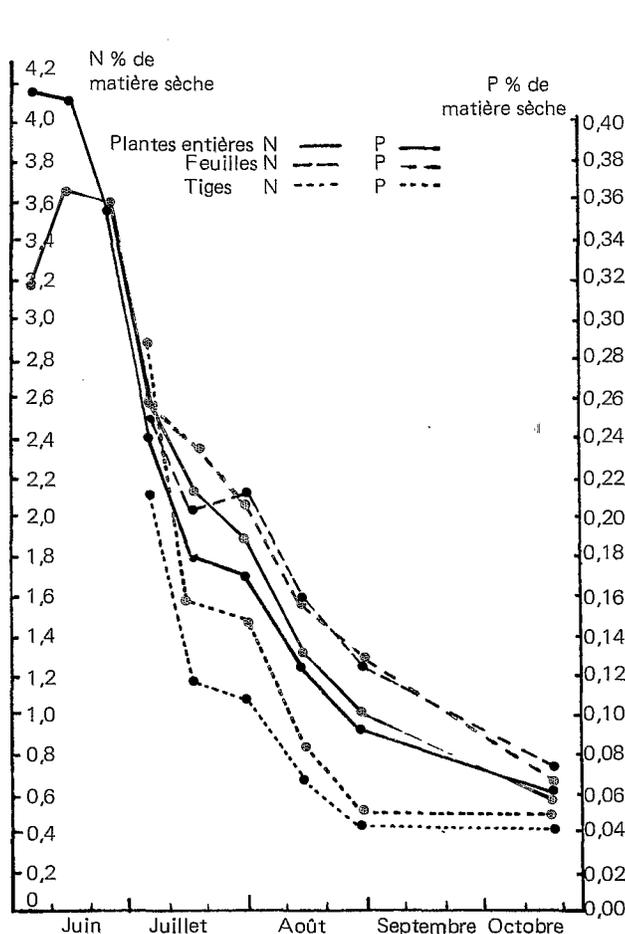


Figure 3: Essai de Serres Castets 1962 — Évolution des teneurs en N et P des organes végétatifs (moyennes de 4 variétés).

### 1.2.3.1. Azote :

Le tableau 13 rapporte les teneurs moyennes des cinq variétés, car les résultats en étaient bien groupés.

Les teneurs en azote décroissent d'une manière continue depuis le premier prélèvement, mais demeurent élevées (3,5 à 4 %) jusqu'à la fin de juin. Les prélèvements du début de juillet accusent une diminution considérable de teneur qui correspond au plus fort rythme de formation de matière sèche des organes végétatifs. Vers le 20 août, le poids de matière sèche de ces organes est maximum et à ce moment la tige a perdu la majeure partie de son azote.

Ces faits apparaissent avec netteté et précision sur la figure 3.

L'absorption totale d'azote elle-même croît rapidement jusque vers le 20 août et se poursuit assez lentement ensuite (tableau 14 et figure 5).

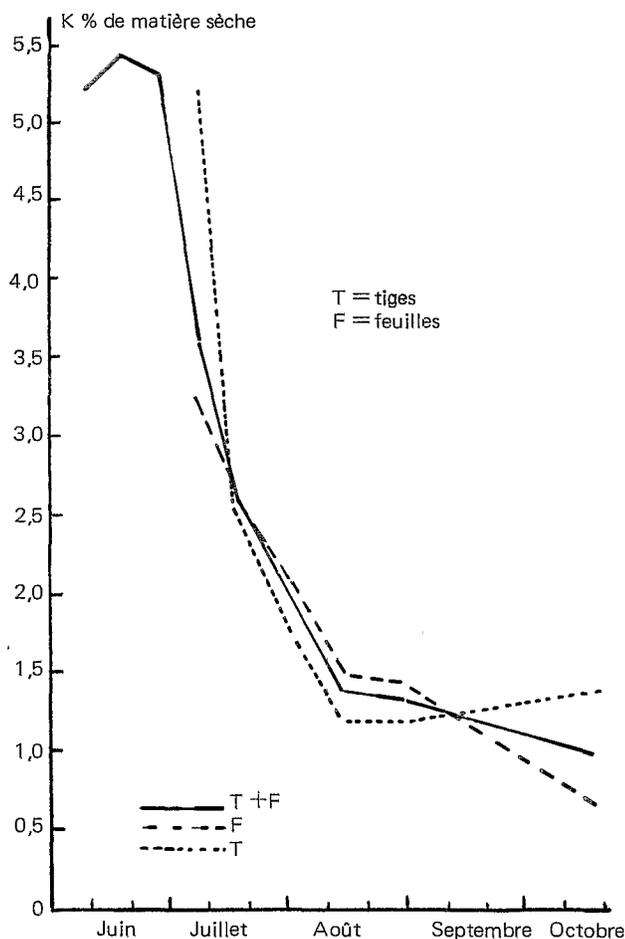


Figure 4: Essai de Serres Castets 1962 — Évolution des teneurs en K des organes végétatifs (moyennes de 4 variétés).

### 1.2.3.2. Phosphore :

Les différences variétales ayant été négligeables, le tableau 13 indiquait les moyennes toutes variétés.

Il existe un net parallélisme entre N et P : teneurs élevées durant les deux premiers mois de la croissance environ, puis baisse continue jusqu'à maturité. Les tiges et les feuilles se vident progressivement de leur phosphore au profit des grains, mais le gain par les épis dépasse plus ou moins nettement la perte par les autres organes ; ceci confirme les indications antérieures selon lesquelles l'absorption de phosphore à partir du sol se poursuit après la fin de la croissance de la plante (135).

Il apparaît sur la figure 3 que le rapport N/P des organes végétatifs est très voisin de 10 le long du cycle végétatif.

L'absorption globale de  $P_2O_5$  s'est poursuivie jusqu'à la maturité mais très ralentie au cours du dernier mois (tableau 14 et figure 5).

Tableau 14: Évolution de l'absorption en kg N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O/ha

Essai 1961 (alluvions) 40000 pl./ha		21.06		5.07		18.08		5.10			
		Plantes entières		Tiges et feuilles		Epis		Plantes entières		Tiges et feuilles	
										Epis	
										Plantes entières	
N	Iowa	15,3	52,6	57,6	103,2	160,8	38,1	145,8	183,9		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Iowa	4,2	15,4	14,3	45,4	59,7	11,3	63,2	74,4		
K <sub>2</sub> O	Iowa	16,9	60,8	66,4	51,2	117,6	41,4	47,0	88,4		
K <sub>2</sub> O	Funk	19,6	61,4	81,2	52,3	133,5	57,4	44,3	101,7		
Essai 1962 Serre Castets 51 700 pl./ha		15.06		25.06		5.07		16.07		30.07	
		Plantes entières		Tiges et feuilles		Epis		Plantes entières		Tiges et feuilles	
										Epis	
										Plantes entières	
N	Iowa	2,6	12	29	42	76	41	79	120	29	98
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Iowa	0,5	3	7	13	20	10	31	41	6	39
K <sub>2</sub> O	Iowa	4,2	23	51	71	108	77	37	114	54	40
K <sub>2</sub> O	Funk	4,2	24	57	76	124	92	39	131	62	51
CaO	Iowa	0,7	4	11	19	35	36	3	39	31	3
MgO	Iowa	0,3	2	6	12	21	18	11	29	15	14

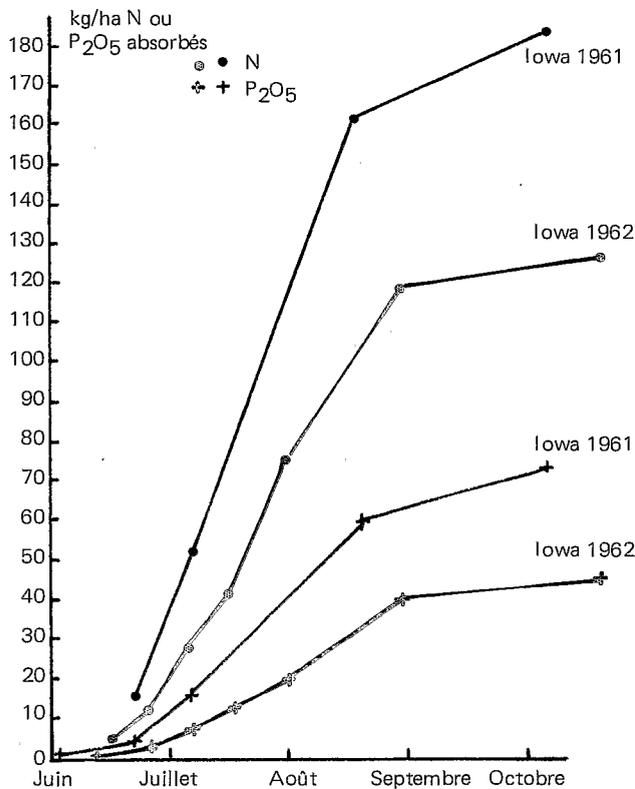


Figure 5: Évolution de l'absorption N et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> par le maïs.

### 1.2.3.3. Potassium :

Le tableau 13 indiquait plus haut pour le même essai de 1961 les résultats concernant la variété témoin Iowa 4417 et la moyenne des autres variétés plus tardives.

L'opinion selon laquelle l'azote est l'élément qui pénètre le plus vite dans les tissus du maïs est exacte si l'on considère les tout premiers stades de la croissance, car dans les stades suivants le potassium est présent en quantité équivalente, sinon supérieure. Dès le premier prélèvement la teneur des plantes en K est élevée. C'est essentiellement dans cet exemple du 6 au 21 juin que les teneurs en K sont les plus élevées. Elles décroissent ensuite jusqu'à maturité.

Les tiges et les feuilles ont un comportement différent; elles ont des teneurs en K assez voisines en août, mais à maturité les feuilles se sont beaucoup plus appauvries que les tiges. SOUBIÈS et al. avaient signalé cette prédilection

du potassium pour la tige (144) et HANWAY a montré nettement l'accumulation de K dans les tiges à partir des feuilles (63). KISSEL et al, étudiant la redistribution des éléments nutritifs à partir des organes végétatifs vers les grains en formation, jusqu'à la maturité, indiquèrent aussi que le potassium était redistribué de toutes les parties de la plante sauf les tiges dans lesquelles la teneur en K augmentait au cours de la maturation (78). D'une manière générale, le potassium se déplace facilement dans la plante maïs, ainsi que cela fut montré par CHAMEL à l'aide de K42 (28).

La courbe K moyenne des 4 variétés de l'essai de Serre Castets 1962 est très représentative de l'évolution du potassium (figure 4).

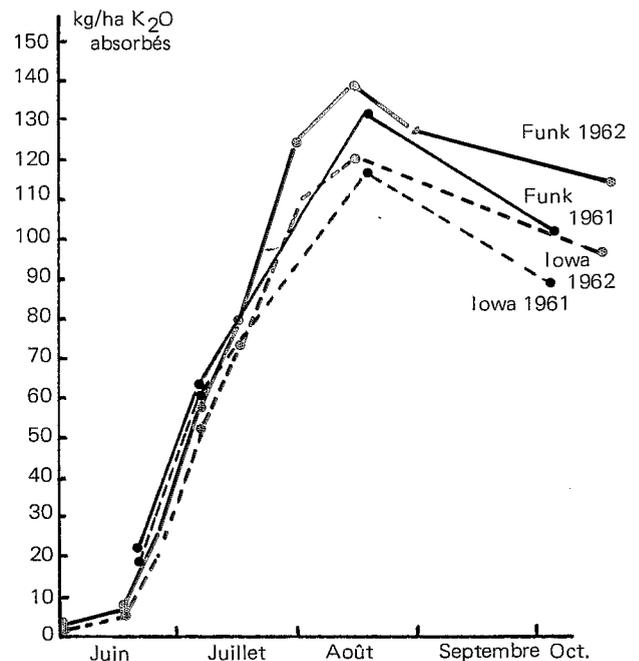


Figure 6: Évolution de l'absorption K<sub>2</sub>O par le maïs.

L'absorption globale de K<sub>2</sub>O est indiquée au tableau 14 pour les deux mêmes variétés et les deux sites et représentée par la figure 6. Les courbes de la figure 6 expriment bien les faits typiques de l'absorption de K<sub>2</sub>O :

- 1) le potassium est autant absorbé vers la fin de juillet environ qu'il le sera à maturité,
- 2) le maximum d'absorption de K<sub>2</sub>O ne correspond pas à la maturité, mais se situe environ trois semaines après la floraison, au moment où les organes végétatifs présentent leur

maximum de poids sec, soit du 15 au 20 août dans le cas présent,

3) l'accumulation de  $K_2O$  décroît à partir de ce moment jusqu'à la maturité (désorption de potassium).

La désorption de  $K_2O$  entre le maximum d'absorption et la maturité est variable suivant les variétés, les essais, la climatologie de la période concernée.

Pour l'essai de 1961 elle avait varié entre 29 kg  $K_2O$  pour Iowa et 42 kg  $K_2O$  pour INRA 640.

Le prélèvement maximal de potasse par une culture de maïs est en moyenne supérieur d'une quantité comprise entre 20 et 50 kg  $K_2O$ , au prélèvement constaté à la maturité.

La comparaison des courbes des figures 5 et 6 montre bien la différence d'évolution de l'absorption de N et  $P_2O_5$  d'une part et  $K_2O$  d'autre part. Ces résultats peuvent se présenter sous forme de courbes indiquant l'évolution de l'absorption des éléments en pourcentages des totaux absorbés, comme dans la figure 7 qui représente ces faits pour la variété témoin Iowa 4417. Ces courbes sont très semblables à celles de HANWAY (63) et de PESEK (126) et présentent une légère inversion de position entre N et  $P_2O_5$  par rapport à celles de COURPRON et TAUZIN (34).

Le rythme relatif d'absorption est ici dans l'ordre croissant : matière sèche,  $P_2O_5$ , N,  $K_2O$ . Au stade des soies, on constate que 75 % du total de  $K_2O$  dans le maïs est déjà absorbé alors qu'à ce stade il y a seulement 50 % pour N, 45 % pour  $P_2O_5$  et 40 % pour la matière sèche produite.

Dans la phase de croissance rapide du maïs, c'est donc pour le potassium que les prélèvements sont le plus intenses, pouvant atteindre et dépasser 10 à 12 kg  $K_2O$ /ha par jour au moment de la sortie des panicules mâles.

Ces faits entraînent une conséquence rarement mentionnée (126) : l'accumulation précoce et rapide de potasse donne à penser que le potassium doit être disponible en quantités correctes très tôt au cours du cycle du maïs, car cette importante absorption s'effectue à partir d'un volume de terre prospecté par les racines relativement plus faible que pour N et  $P_2O_5$  puisque réalisé par des plantes dont le système racinaire est moins développé. Le maïs doit donc

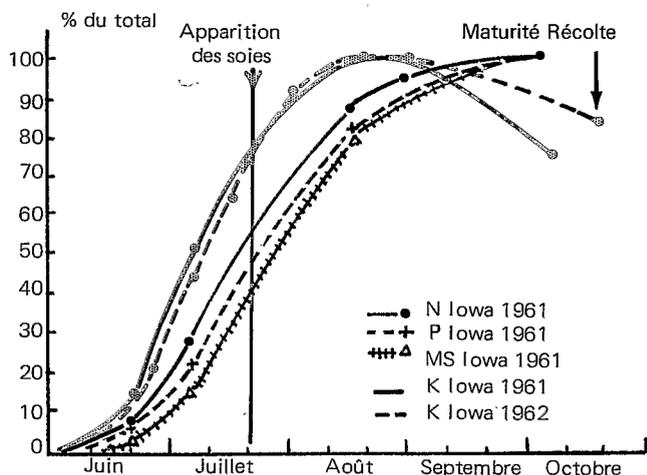


Figure 7: Rythmes relatifs d'accumulation de matière sèche N, P, K, par le maïs.

être cultivé plutôt en sols relativement bien pourvus en potassium échangeable. Les résultats expérimentaux tendent dans l'ensemble à confirmer cette opinion (paragraphe 2.1.1.).

#### 1.2.3.4. Calcium et magnésium :

Pour suivre les mouvements on a rapporté dans les tableaux précédents les résultats pour Iowa 4417.

Au cours de la phase de grande croissance, le calcium décroît dans les tiges et croît dans les feuilles, et le magnésium décroît dans les tiges et se stabilise dans les feuilles.

En allant vers la maturité, Ca décroît dans les tiges et les feuilles sans donner lieu à une migration vers les grains, tandis que Mg est à peu près stable.

Les quantités absorbées au moment de la maturité sont principalement influencées pour MgO par les rendements en grains et le développement, pour CaO par le seul développement et le degré de sécheresse.

## 1.3. LA NUTRITION POTASSIQUE DU MAÏS ET LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

La nutrition du maïs peut être étudiée à partir d'essais d'engrais plus ou moins complexes, sur lesquels on suit la composition chimique d'un organe par des prélèvements déterminés. Cette méthode, basée à la fois sur la physiologie de la nutrition et sur l'expérimentation agronomique, complétée par des études de sols, semble la plus riche d'enseignements et la plus propice aux applications pratiques. Elle prend le plus souvent le nom de diagnostic foliaire. C'est elle qui est très couramment utilisée ici sur le réseau expérimental et sur la Station Agronomique d'Aspach.

Certains chercheurs se sont demandés si les teneurs en éléments minéraux constituaient de meilleurs critères nutri-

tionnels que les quantités absorbées elles-mêmes. WALKER et PECK, ont analysé des maïs à trois stades de croissance (les plantes entières aux stades 25 et 76 cm de haut et l'ensemble des 5<sup>e</sup>, 6<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup> feuilles au stade début floraison mâle) pour étudier les relations entre le rendement et les teneurs ou absorptions des éléments. Ils estimèrent qu'aux deux premiers stades (25 et 76 cm) l'absorption proprement dite d'un élément était un meilleur critère de nutrition que la teneur elle-même en cet élément. Au stade plus avancé, absorption et teneur avaient à peu près la même valeur de diagnostic (159). Les teneurs critiques en K correspondant à ces trois échantillons furent de 3,98 - 3,90 et 1,80 % K. La teneur en K était un meilleur facteur d'explication des rendements que les quantités de K effectivement prélevées (160).

### 1.3.1. MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC FOLIAIRE DU MAÏS

La méthode fut inaugurée sur le maïs par THOMAS, aux Etats-Unis en 1938 (151) puis poursuivie par THOMAS et al, en 1939, 1943, 1944.

La feuille échantillonnée était alors la troisième ou la quatrième feuille à partir de la base. Puis ces études s'étaient développées surtout aux Etats-Unis. En 1946, TYNER opérait sur la sixième feuille à partir de la base, au moment de la pleine floraison (155-156). Les avantages de ce prélèvement

seraient les suivants :

- c'est un stade facile à reconnaître,
- le poids des parties végétatives est assez près du maximum à ce moment et la demande d'éléments nutritifs est très élevée.

Les teneurs des feuilles au stade floraison sont donc les plus typiques, car c'est la période critique.

Le diagnostic foliaire est pratiqué sur la feuille de l'épi principal, prélevée à la floraison.



Ce mode de prélèvement fut également utilisé en 1953 par BENNET et al (13). En France, le diagnostic foliaire du maïs a été d'abord abordé par DULAC en 1955 (42). Ces prélèvements concernaient les feuilles à l'aisselle desquelles apparaît l'épi principal, en ne conservant que le tiers central et à quatre époques physiologiques:

- a) le début de la floraison mâle;
- b) le début de la dessiccation des soies;
- c) quinze jours plus tard;
- d) le début du jaunissement des spathes.

Ensuite ces problèmes furent repris en détail par les chercheurs de l'Industrie des Engrais Azotés (52) et la nutrition cationique fut étudiée par LOUÉ (91-92-94).

Les points les plus importants de la méthode du diagnostic foliaire du maïs sont assez bien établis. On note d'ailleurs une bonne concordance entre la méthode ici employée (94) et celle décrite par CHAPMAN à partir des principales références bibliographiques (29).

En ce qui concerne la période de prélèvement, les prélèvements avant floraison sont à rejeter.

Pour l'azote et le potassium, les prélèvements aux stades a et b indiqués plus haut fournissent les meilleures liaisons teneurs  $\times$  rendements.

Pour les cations K, Ca, Mg, le diagnostic pratiqué seulement au stade a serait insuffisant et devrait être complété par un second prélèvement à la dessiccation des soies.

L'utilisation pratique de la méthode du diagnostic foliaire, c'est-à-dire le contrôle de très nombreuses parcelles expérimentales ou champs de maïs fait qu'en général une seule période de prélèvement est retenue, le stade pleine floraison.

En ce qui concerne le rang de la feuille à prélever, les prélèvements ici réalisés concernaient toujours la feuille de l'épi récoltée sur 60 pieds par parcelle échantillonnée au stade pleine floraison, et on ne conserve en général que le tiers central de la feuille (94).

Une autre raison qui milite en faveur de la feuille de l'épi au moment de la floraison, c'est que le poids de matière sèche de cette feuille présente une corrélation en général très positive avec le poids de matière sèche de l'ensemble des organes aériens (132), ce qui atténue beaucoup l'une des difficultés du diagnostic foliaire qui est celle d'associer les teneurs à un bon indice de croissance.

La feuille de l'épi est elle-même le siège de mouvements remarquables des cations, K, Ca, Mg du tiers basal au tiers apical qui sont tels que le tiers central constitue un échantillon très correct (94).

SMID et al ont même étudié la microdistribution du potassium dans la feuille de maïs. Une nutrition potassique élevée allait de pair avec des teneurs en K croissantes des marges vers la nervure centrale. La déficience potassique allait de pair avec des teneurs en K peu variables et inférieures à 1 % des marges vers la nervure centrale et les zones nécrotiques présentaient des teneurs inférieures à 0,3 % K (141).

### 1.3.2. LES RÉSULTATS OBTENUS PAR LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

Le but des recherches de diagnostic foliaire est d'abord l'obtention de corrélations entre les rendements et les teneurs foliaires en N, P, K, permettant la détermination de niveaux critiques, de zone de déficience, grave déficience; c'est ensuite l'étude des rapports des éléments entre eux. Il est en réalité très délicat de tenter d'exprimer le rendement en fonction de la teneur en un élément, sous forme d'une régression simple en raison des liaisons entre éléments. C'est particulièrement vrai pour le groupe des cations K, Ca, Mg pour lequel existe une liaison négative forte K-Mg, une liaison négative moins catégorique K-Ca et une liaison positive assez modérée Ca-Mg.

Le concept de niveau critique conserve cependant une importance pratique fondamentale en matière de diagnostic foliaire du maïs. TYNER l'avait défini comme la teneur minimale requise pour le maximum de croissance (155). BENNETT et al définirent les niveaux critiques comme les teneurs correspondant à 95 % du rendement maximal (13). DUMENIL adoptait un concept agroéconomique faisant du

niveau critique la teneur associée à l'obtention du profit maximal (43). La définition ici adoptée est de caractère purement agronomique: teneur au-dessous de laquelle l'application de l'élément a de fortes chances d'accroître les rendements.

#### 1.3.2.1. Les niveaux azotés et phosphoriques

Ce sujet est ici très résumé bien que les études de diagnostic foliaire du maïs aient surtout concerné les niveaux azotés.

TYNER et al (1946) (155), BENNETT et al (1953) (13), VIETS et al (1954) (157), DULAC (42), SOUBIES (144), DUMENIL (43), BAIRD et al (4) ont mis en lumière la liaison nette existant entre les rendements et le taux d'azote de la feuille à la floraison.

TYNER avait proposé comme niveau critique (au-dessus de laquelle la réponse à l'azote serait douteuse et faible) 3,10 %.

BENETT et al ont montré que la teneur critique peut varier à l'intérieur d'une zone assez étroite (2,8 à 3,0 %). Dans l'Illinois, selon MELSTED et al, les teneurs critiques adoptées sont : 3 % N, 0,25 % P, 1,90 % K, 0,40 % Ca et 0,25 % Mg pour la feuille de l'épi (108).

DULAC avait vérifié la liaison azote-rendement pour un intervalle de rendement de 48 à 93 quintaux, couvert par une variation de teneurs s'étalant de 2,3 à 3,5 %.

FOURCASSIÉ a étudié la relation entre les taux d'azote de la feuille de l'épi et ceux de la feuille de niveau immédiatement inférieur (52).

En ce qui concerne les niveaux phosphoriques, TYNER avait proposé comme niveau critique une teneur de 0,31 à 0,32 % P, généralement adoptée. En Italie, ROSSI et al ont obtenu des teneurs en P très supérieures (0,45 % P) (131). La régression multiple a été employée pour N et P par DUMENIL à partir de très nombreux essais (43).

Pour apprécier les niveaux potassiques foliaires en liaison avec les rendements, il est nécessaire de se placer à l'optimum de nutrition azotée et phosphorique. Dans tous les essais ici contrôlés, la nutrition NP a été portée à un niveau satisfaisant par des apports allant par exemple de N80 ou P80 à N150 ou P150, qu'il s'agisse d'essais K (à doses NP uniformes) ou d'essais factoriels N x K ou N x P x K. Dans la plupart des cas, les niveaux foliaires en N et P ont été légèrement supérieurs aux seuils critiques adoptés (3,10 % pour N et 0,32 % pour P). A noter au passage que l'on retrouve le rapport N/P très près de 10 cité plus haut.

### 1.3.2.2. Les niveaux potassiques

Les études sur la nutrition potassique du maïs en fonction des niveaux foliaires sont de plus en plus nombreuses.

PENSTON, en 1935, avait étudié la variation diurne du potassium dans les feuilles de maïs (122).

TYNER, étudiant une gamme de teneurs allant de 0,7 à 2,0 % a trouvé une corrélation hautement significative et proposé une concentration critique en K, de la sixième feuille à la floraison, de 1,30 % en précisant que ce niveau pourrait être révisé car il n'y avait pas d'indication nette de l'existence d'un point à partir duquel la tendance de liaison linéaire entre les rendements et les teneurs en K disparaîtrait (155-156).

KRANTZ et CHANDLER en 1951 observèrent une liaison étroite entre les teneurs des feuilles en potassium et les apports, allant de 0 à 320 kg K<sub>2</sub>O/hectare sur des sols diversément dotés en K échangeable (81).

De LONG, Mac KAY et STEPLER obtinrent des teneurs moyennes en potassium comprises entre 2,04 et 3,15 % pour la feuille de même position que celle ici étudiée, donc des teneurs élevées susceptibles de se trouver dans une zone d'indifférence (38).

VIETS, NELSON et CRAWFORD, en 1954, enregistrèrent des variations de teneurs entre 1,90 et 2,79 % et peu de relation avec les rendements (157).

ELLIS et al, en 1956, associèrent les teneurs foliaires inférieures à 1,30 % K aux sols présentant moins de 200 livres par acre de potasse échangeable (soit environ 0,10<sup>o/oo</sup> de sol) et notèrent que l'application de 90 kg K<sub>2</sub>O/ha à de tels sols amenait les teneurs au-dessus du seuil critique de TYNER (44).

Les résultats de HANWAY et al, en 1962, avaient présenté une vue assez complète de la liaison teneurs K x rendements, avec l'indication des prévisions d'accroissements de rendements sous l'effet d'apports potassiques en fonction du diagnostic potassique témoin K0 (64).

Les études ici poursuivies depuis 1961 ont permis une approche plus poussée de ce problème.

La figure 8 rapporte la dispersion de nombreux rendements parcelaires en fonction des teneurs potassiques foliaires correspondantes pour divers essais.

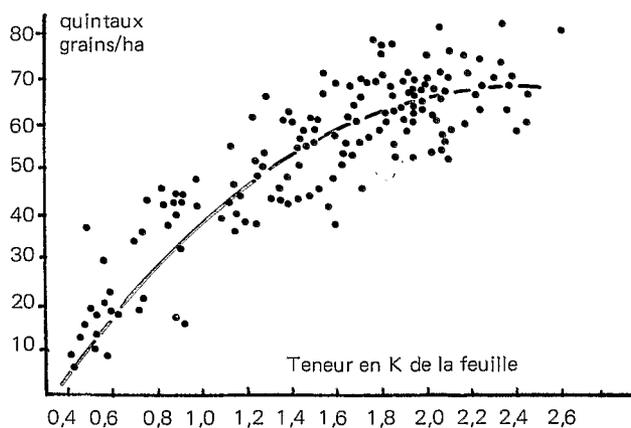


Figure 8: Relation entre les rendements en grains (15% d'humidité) et la teneur en K de la feuille au-dessous de l'épi à la floraison.

Les teneurs inférieures à 0,70 % sont des teneurs de très grave déficience, accompagnées de rendements moyens inférieurs à 25 q. Elles furent obtenues dans les cas de traitements K0 permanents sur sols initialement pauvres en potassium échangeable.

Avec les apports assez faibles K1, soit 80 kg K<sub>2</sub>O/hectare, la nutrition potassique est généralement comprise entre 1,30 et 2,00 %, selon les sols et les années, avec une moyenne générale de K = 1,65 %. Les traitements dits K2 (soit 120, 150 ou 160 kg K<sub>2</sub>O/ha selon les essais) engendrent généralement une nutrition potassique très correcte, les teneurs étant comprises entre 1,80 et 2,75 %, avec une moyenne générale de K = 2,05 %.

De K1 à K2, les rendements s'accroissent généralement, mais la signification statistique de K2/K1 varie selon les essais et les années. Pour les teneurs supérieures à 1,8 % environ, la dispersion des rendements est assez grande. Il y a des années où les plus fortes doses de K<sub>2</sub>O sont favorables.

L'examen de la figure 8 suggère que la relation plus générale entre les rendements et les teneurs potassiques foliaires n'est pas linéaire, mais curvilinéaire.

En première approximation, la méthode graphique montre que 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 quintaux/hectare.

On observe ensuite une seconde zone des teneurs allant de 1,0 % à environ 1,5 %, dans laquelle la corrélation demeure nette, mais où une augmentation de 0,10 % K ne provoque plus une élévation de rendement que de 2,5 q/ha environ.

Au-delà de 1,6 à 1,7 % on entre dans un nuage de points. Graphiquement, on peut fixer à 1,7 % le niveau critique, teneur au-dessus de laquelle il n'y a pas de liaison nette entre les teneurs en K de la feuille considérée (la première au-dessous de l'épi supérieur) et les rendements.

En fait, il est très difficile d'indiquer une teneur précise qui serait un véritable niveau critique. En ce qui concerne le potassium, en effet, cation d'absorption préférentielle, il est général qu'au-delà de certaines teneurs, tout calcul de liaison rendements x teneurs deviendrait illusoire. Il serait préférable d'indiquer une zone critique, de 1,7 à 2,0 % par exemple. Pour les teneurs supérieures à 2,0 % environ, il y aurait consommation indifférente. A partir de cette zone, les cations dont le rôle principal est non constructeur, doivent être considérés également sous l'aspect qualitatif, de l'équilibre des trois cations majeurs entre eux.

Mais la notion de zone critique, qui semble devoir être préférée à celle de seuil critique, en ce qui concerne le moins K, est elle-même contingente. Elle dépend en particulier de l'alimentation en eau.

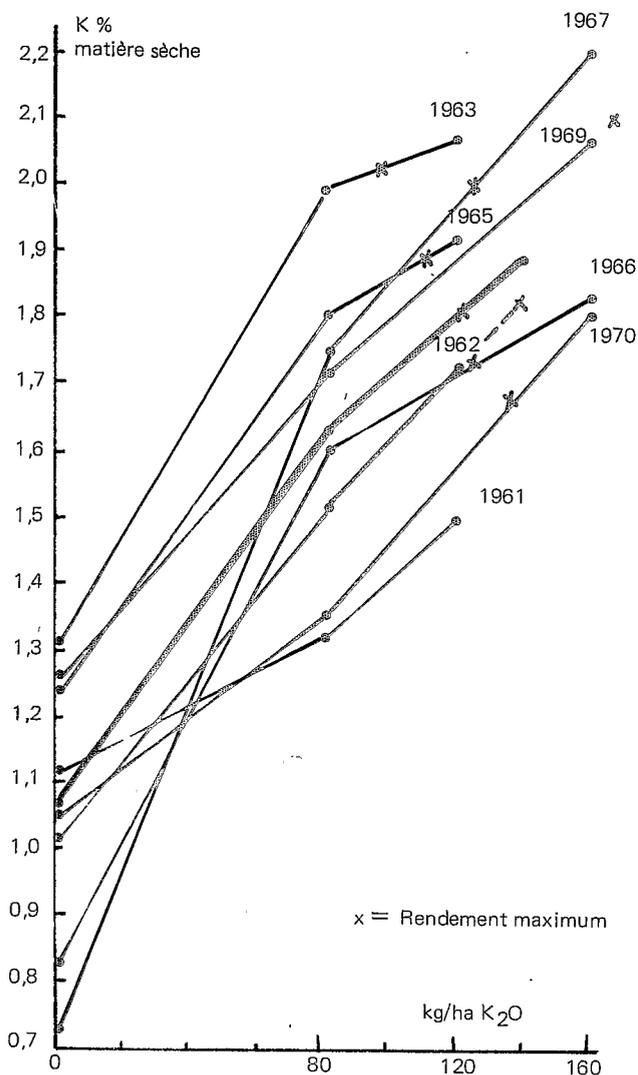


Figure 9: Variation annuelle du niveau potassique foliaire correspondant au rendement maximal théorique (essai de Sainte Marthe, Lot et Garonne).

En un même point (sur un même essai), l'effet des fumures potassiques est variable selon les années. Ainsi la figure 9 représente l'effet de doses de potasse sur la nutrition potassique du maïs sur l'essai de Sainte Marthe (Lot et Garonne) pour 8 années. Le rendement maximal théorique a effectivement correspondu à des teneurs foliaires en potassium comprises entre 1,68 et 2,10 %.

D'autre part, on a tenté d'étudier la nutrition potassique dans le cas des rendements élevés, supérieurs à 80 q/ha. C'est ainsi que la figure 10 exprime la relation rendements  $\times$  teneurs en K de la feuille pour les 211 diagnostics effectués de 1955 à 1968 sur l'essai de Pau (Pyrénées Atlantiques). Alors que la figure 8 concernait des synthèses de divers essais situés dans des conditions de sols très variables, la figure 10 concerne un seul site suivi par diagnostic pendant 13 ans.

Les deux distributions de points sont assez semblables, mais l'étude de la liaison rendements  $\times$  teneurs en K se trouve améliorée pour une gamme de hauts rendements. Ces derniers sont assortis de teneurs en K supérieures à 1,8, sinon 1,9 %. Il se confirme que la zone critique des hauts rendements peut être proposée à 1,8 à 2,0 % K, sinon 1,9 à 2,2 % K.

	K150	K200	K250
Rendements moyens 7 ans (1962 à 1968) q/ha .....	81,5	86,6	87,4
Diagnostic foliaire K % (moyenne 7 ans) .....	1,91	2,05	2,12

Dans le cas de milieu propice aux hauts rendements, le seuil critique général proposé à 1,7-1,8 % K serait donc trop faible et devrait être remonté vers 2,0 % K. Ces faits seront retrouvés plus loin à propos de l'examen des résultats expérimentaux.

La notion de niveau critique de teneur en K, si elle ne semble pas tout à fait rigoureuse en vue de la détermination de la fumure potassique, reste cependant très utilisable comme terme de référence.

L'examen des niveaux potassiques foliaires enregistrés en fonction des doses de  $K_2O$  appliquées sur un type de sol donné, fournit des indications précises sur l'aptitude de ce sol à fournir un certain débit de potassium disponible.

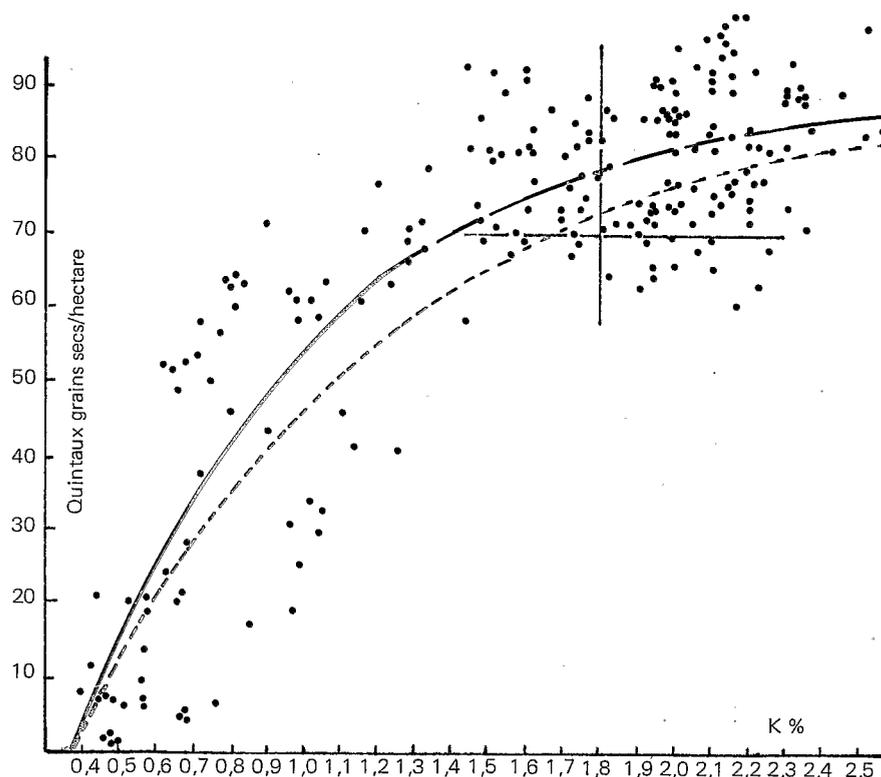


Figure 10: Relation entre les rendements en grains (15 % d'humidité) et la teneur en K de la feuille au-dessous de l'épi à la floraison (essai de Pau, 1955-1968).

### 1.3.2.3. Teneurs de la plante en potassium, activité photosynthétique et rendements

Comme on vient de le voir, il y a maintenant beaucoup de données en ce qui concerne la relation entre la teneur en K de la plante (feuille de l'épi le plus souvent) et le rendement en matière sèche. Plusieurs chercheurs ont obtenu des relations curvilinéaires du type de celle ici proposée pour exprimer la liaison rendements en matière sèche  $\times$  teneur en K des tissus foliaires. Il serait fondamental de pouvoir relier les teneurs en K des tissus foliaires à l'activité photosynthétique pour mieux expliquer la relation teneurs en K  $\times$  rendements.

Certains chercheurs ont adopté cet axe de recherches plus physiologiques, en mesurant l'assimilation nette de CO<sub>2</sub> en parallèle avec les teneurs en K des feuilles de maïs.

PEASLEE et MOSS, en 1966, ont établi des relations quantitatives entre les teneurs en K dans les feuilles de maïs et les niveaux de photosynthèse des feuilles. Les feuilles d'apparence normale de maïs très déficitaires en K présentaient des niveaux de photosynthèse très diminués. Au-dessous de 1 % K, la liaison entre teneur en K et assimilation de CO<sub>2</sub> était très forte. Dans ces essais, la concentration jugée critique en K (au regard de l'assimilation de CO<sub>2</sub>) était entre 1,1 et 1,5 % K (sur la base matière sèche) (120).

ESTES et al, en 1973, ont étudié l'assimilation nette de CO<sub>2</sub> par le maïs en fonction des teneurs croissantes en K de plantes sur solutions à quantités croissantes de K. Ils ont aussi obtenu une relation curvilinéaire qui montrait qu'à partir de 1,5 % K l'assimilation de CO<sub>2</sub> n'augmentait plus que très peu (47).

KOCH et ESTES, en 1975, ont étudié plus précisément l'influence de la déficience potassique sur l'assimilation de CO<sub>2</sub>. L'absorption de CO<sub>2</sub> était d'environ 70 % inférieure pour les maïs déficitaires en K à 62 jours, les teneurs en K correspondantes étaient alors de 2,29 % pour les maïs normaux et 0,69 % pour les maïs carencés (80).

SMID et PEASLEE en 1976 ont cherché à déterminer les effets de trois peuplements simulés et de quatre niveaux de

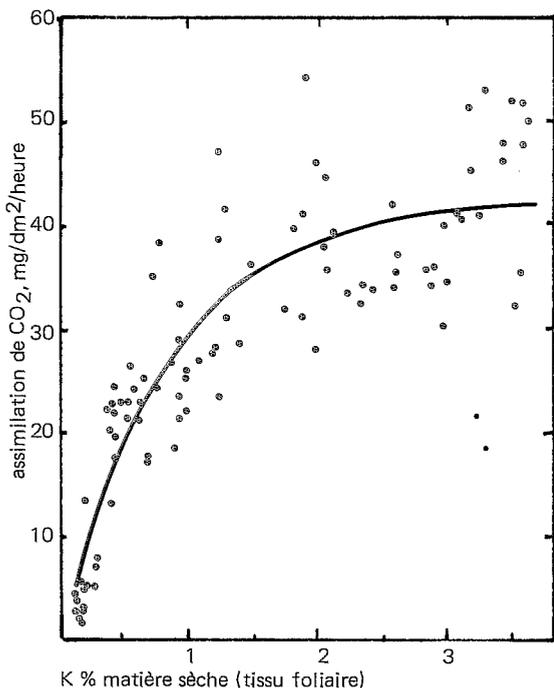


Figure 11: Relation entre l'assimilation nette de CO<sub>2</sub> et les teneurs en K des feuilles de maïs (de différents niveaux nutritionnels K et de peuplements simulés) d'après SMID et PEASLEE.

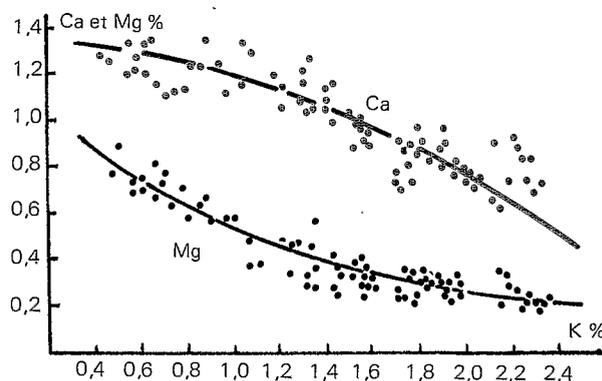


Figure 12: Évolution des pourcentages de Ca et Mg en fonction du pourcentage de K.

nutrition potassique sur la croissance et l'assimilation nette de CO<sub>2</sub> chez le maïs (142).

La figure 11 représente la relation entre les taux d'assimilation nette de CO<sub>2</sub> et les teneurs en K des feuilles. Cette relation curvilinéaire, hautement significative ( $r=0,89$ ), s'apparente de toute évidence avec la relation proposée par la figure 8.

Selon les auteurs, il apparaît nettement sur la figure 11 que le niveau critique de K, au-dessous duquel le taux d'assimilation de CO<sub>2</sub> fut fortement réduit, était d'environ 1,7 à 2 % K.

On obtient donc ici un étalonnage des teneurs en K du tissu foliaire vis-à-vis de l'assimilation de CO<sub>2</sub>, parallèle à l'étalonnage de K de la feuille de l'épi vis-à-vis des rendements.

### 1.3.2.4. Les niveaux calciques et magnésiens

La plupart des auteurs précités ont étudié également les niveaux foliaires en Ca et Mg.

Sur la plupart des essais étudiés, on a enregistré des corrélations négatives élevées entre les teneurs en K et celles en Ca et Mg. Des résultats assez semblables ont été obtenus par HAHNE et ORCHARD en Afrique du Sud (62).

Sur la figure 12 ont été représentées les teneurs en Ca et Mg en fonction des teneurs en K (données issues de nombreux essais). En considérant les courbes approchées, on constate facilement que la zone du déficit en K est celle de l'antagonisme K/Mg, que la zone des hauts niveaux potassiques est plutôt celle de l'antagonisme K/Ca et que la zone intermédiaire correspond à une forte corrélation positive entre Ca et Mg, qui décroissent avec K croissant.

En liaison avec l'existence de niveaux potassiques très élevés peut se poser le problème des déficiences calciques ou magnésiennes induites par ces excès éventuels.

En ce qui concerne le calcium, sur aucun des essais suivis les teneurs foliaires ne sont tombées dans la zone de déficience typique (107).

En ce qui concerne le magnésium, l'opinion doit être plus nuancée.

On a constaté sur certaines parcelles de l'essai de Pau, qui a étudié à partir de 1962 des doses de K<sub>2</sub>O élevées, que la teneur était tombée à 0,13 à 0,14 % Mg, niveaux assez voisins de la zone d'apparition des signes de déficience.

On peut penser que ces teneurs occasionnelles de 0,13 et 0,14 % sont un peu faibles. De 1962 à 1968, les teneurs moyennes (7 ans) en Mg des traitements K150, K200, K250 furent respectivement 0,29 %, 0,24 % et 0,22 %, ce qui montre qu'avec les plus fortes doses, les teneurs sont nettement supérieures à celles de la déficience.

FOY et BARBER avaient montré que certaines lignées de maïs différaient plus ou moins dans leur faculté d'accumulation de magnésium dans les feuilles. Ils ont indiqué que les

faibles concentrations en Mg des feuilles de certaines variétés étaient surtout dues à une immobilisation de Mg dans les tiges (53). D'autre part, ces auteurs réalisèrent des essais combinant 2 doses de potasse (100 et 500 kg  $K_2O$ /ha) et 2 doses de magnésie (0 et 75 kg  $MgO$ /ha). Sur certains sols, la dose élevée de  $K_2O$  induisait une déficience magnésienne typique, mais celle-ci n'était pas accompagnée d'une baisse de rendements. Les apports de Mg prévinrent contre la manifestation des symptômes, accrurent significativement la teneur en Mg, diminuèrent celle en K, mais sans affecter les rendements. La teneur en Mg associée aux symptômes typiques était de 0,06 % pour la sixième feuille. Avec K100 Mg75, les symptômes étaient peu nets et la teneur en Mg était de 0,13 % (54).

Les teneurs associées aux symptômes nets sont inférieures à 0,10 % Mg pour la feuille de l'épi (95).

Il semble difficile de provoquer chez le maïs une déficience magnésienne grave, induite par excès de fumure potassique, dans la pratique des doses de  $K_2O$  apportées au maïs, qui dépassent rarement 180 kg  $K_2O$ /ha. On constate en effet sur la figure 12 que pour les teneurs élevées en K, la diminution de la teneur en Mg est très ralentie.

D'ailleurs, la déficience magnésienne semble pouvoir se manifester par les signes foliaires connus, sans qu'il y ait pour autant une répercussion sur les rendements. FOY et BARBER en avaient donné l'explication suivante : la nutrition magnésienne des plantes déficientes pourrait être dans ces cas de non réponse, suffisante pour satisfaire aux fonctions de Mg non liées à la fonction chlorophyllienne, mais insuffisante pour la production normale de chlorophylle. La pleine production chlorophyllienne ne serait pas toujours nécessaire pour atteindre le niveau de rendement permis par les autres facteurs, et les rendements, dans de tels cas, ne seraient pas réduits malgré l'existence de symptômes.

L'antagonisme K/Mg, qui concerne la fonction catalytique du magnésium (second grand rôle de Mg) fut également abordé sur maïs par CALMES qui parle plutôt de complémentarité. Calculant la somme  $K + Mg$  (en meq), il lui trouve une assez bonne constance qu'il explique par le fait que le potassium et le magnésium assurent en majeure partie l'équilibre ionique des liquides contenus dans les limbes (25-26).

Dans cet ordre d'idées, on peut penser que l'antagonisme K/Mg porterait d'abord sur la fonction « catalytique » du magnésium. Pour les zones de teneurs de la plante en K et Mg pour lesquelles Mg catalytique diminue au profit de K, il n'y aurait pas de conséquences sur les rendements. Ces dernières apparaîtraient lorsque le remplacement se ferait aux dépens de Mg chlorophyllien. Cette option nous semble conforme à ce qu'on peut observer dans les cas de nutrition Mg un peu marginale.

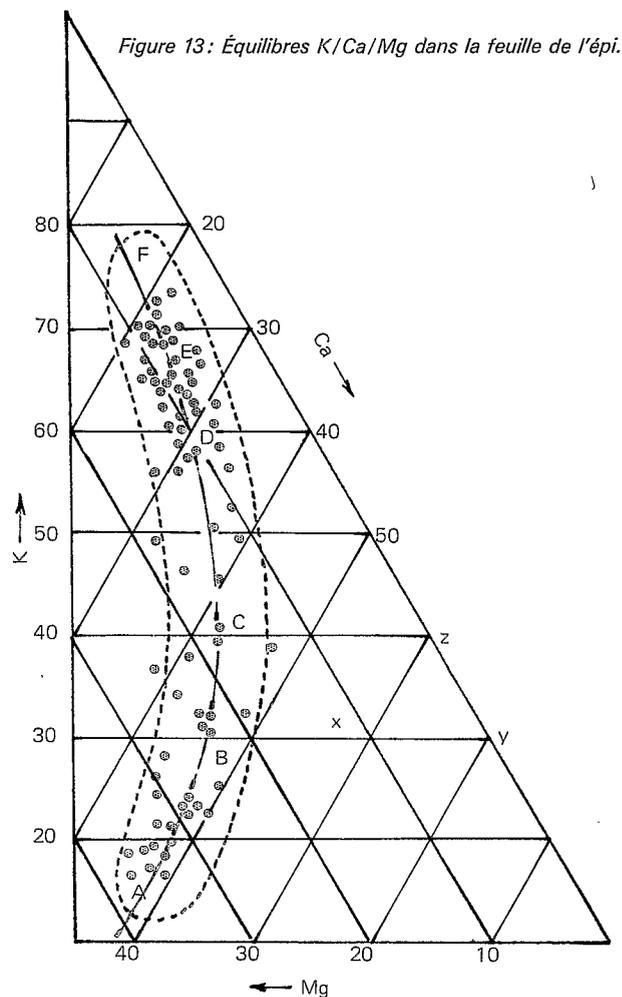
Néanmoins sur certains types de sol, la fumure potassique doit être étudiée en tenant compte d'une déficience Mg. Cette question sera abordée plus loin à propos de l'interaction  $K \times Mg$ .

La considération des équilibres foliaires K/Ca/Mg est toujours utile dans ces cas-là.

### 1.3.2.5. Étude des équilibres foliaires K/Ca/Mg

La somme  $S = K + Ca + Mg$  des cations majeurs absorbés présente pour la feuille considérée des variations d'amplitude assez faibles et il est intéressant d'étudier la qualité de la nutrition cationique au moyen du calcul des pourcentages de K, Ca, Mg au sein de la somme S supposée constante et égale à 100 (les teneurs étant exprimées en éléments pour cent de matière sèche).

Le diagramme triangulaire de la figure 13 synthétise la nutrition K/Ca/Mg du maïs en rapportant de nombreux équilibres K/Ca/Mg allant de la carence potassique à la déficience magnésienne modérée. Ces équilibres ne sont pas quelconques selon les conditions du milieu sol ou l'effet de



la fumure. Au contraire, les équilibres possibles dans la feuille de premier rang au-dessous de l'épi se trouvent groupés dans une zone allongée représentée en traits discontinus et qui peut se diviser en 5 parties.

La partie AB correspond aux équilibres où K représente moins de 25 %, Mg de 25 à 40 % et où Ca est très peu dispersé entre 45 et 50 %. Dans cette partie, la courbe d'ajustement est à peu près parallèle à l'axe xz, d'où la constance relative du pourcentage de Ca. C'est la zone de déficience potassique aiguë, caractéristique des parcelles K0 des essais considérés en l'absence de fumure organique. Il est peu probable que des équilibres de cette zone puissent se rencontrer maintenant en grande culture en France. Cette zone est par excellence celle de l'antagonisme K/Mg.

La partie BC correspond aux équilibres où K représente entre 25 et 40 %. C'est une zone où il y a, à la fois, antagonisme K/Mg et antagonisme K/Ca et une liaison Ca/Mg.

La partie CD correspond aux équilibres où K représente de 40 à 60 % de la somme S, Ca de 42 à 30 % et Mg de 18 à 10 %. C'est une zone typique de déficience, nette vers le point C à modérée vers le point D.

Dans la partie CD, le pourcentage de K augmente surtout au détriment de Ca. C'est une zone d'antagonisme K/Ca marqué et d'antagonisme K/Mg moins accusé.

La partie DE correspond aux équilibres où K représente de 60 à 70 % de la somme S, Ca de 30 à 22 % et Mg de 12 à 8 %. Théoriquement cette zone est la plus favorable aux rendements en ce qui concerne la nutrition cationique. L'optimum lui-même pourrait correspondre à des équilibres compris entre 60 - 28 - 12 et 68 - 22 - 10.

La partie EF enfin correspond aux équilibres où K représente plus de 70 %, Ca moins de 22 % et Mg plutôt moins de 8 %.

Pour la partie DF, la courbe d'ajustement est à peu près parallèle à l'axe yz : aussi, dans cette zone, le pourcentage de Mg reste-t-il sensiblement constant. C'est principalement la zone des antagonismes K/Ca. Cependant au-delà de E apparaît le risque d'une déficience au moins relative pour les équilibres où Mg représente moins de 6%.

Il y a eu un certain nombre d'études sur le problème des cations K/Ca/Mg chez le maïs et sur les notions d'effets de dilution ou d'antagonismes.

BRADFORD et al, en 1966, ont étudié l'absorption des cations K, Ca, Mg en fonction d'apports de chaux et de chaux magnésienne et de deux doses de potasse par quatre hybrides, et leur conclusion était que les effets antagonistiques de l'addition d'un des éléments sur l'absorption des deux autres dépendaient en partie de facteurs génétiques (20).

TERMAN et al ont étudié les relations K/Ca et K/Mg en fonction des apports potassiques pour voir si elles étaient du ressort de la dilution et (ou) de l'antagonisme ionique. Ce serait surtout la dilution qui interviendrait en cas d'augmentation de rendement due à de faibles doses de potasse ; ce serait à la fois la dilution et l'antagonisme en présence de doses de  $K_2O$  moyennes et surtout l'antagonisme aux doses élevées de  $K_2O$  (149).

Remarquons enfin que dans tous les essais ici suivis, le cation sodium n'a joué aucun rôle. Les teneurs en Na furent toujours infimes (situées entre 0,01 et 0,04 % dans la feuille de l'épi). Ces teneurs corroborent les résultats de LARSON et PIERRE (82), COPE et al (32) qui montrèrent que le maïs absorbe très peu de sodium, même si le milieu en est bien pourvu. Les mouvements de Na sont négligeables en comparaison de ceux de K (6).

## 1.4. SYMPTÔMES DE DÉFICIENCE MINÉRALE ET PLUS PARTICULIÈREMENT POTASSIQUE

En matière de symptômes de déficience minérale il est utile de connaître les symptômes correspondant aux principales déficiences en éléments nutritifs afin d'identifier une carence avec plus de sécurité. Les publications sur ce sujet, telles que celles de WALLACE (161), CHAPMAN (29),

HOFFER (66) comportent en général des développements sur le maïs. Les signes sur maïs ont aussi été reproduits par l'AGPM (171), ARNON (2), LOUÉ (95) et d'assez nombreux auteurs.

### 1.4.1. DÉFICIENCE EN AZOTE

Lorsqu'elle survient dès les premiers stades de la croissance, elle se manifeste par le moindre développement des plantes et l'aspect jaune à vert pâle du feuillage ; ce jaunissement est uniforme. Ces signes sont assez rares de nos jours, car les maïs reçoivent généralement avant semis des apports plus ou moins importants d'engrais azotés ou d'engrais complets.

Plus courante et plus typique est l'apparition d'une déficience azotée ultérieure au cours de la phase de grande croissance de la plante, c'est-à-dire entre le stade hauteur du genou et la floraison. Les symptômes foliaires sont alors très typiques et ne peuvent être confondus avec d'autres troubles. L'azote se déplaçant des feuilles âgées vers les plus jeunes, ce sont les pointes des feuilles de la base qui présentent les premières le jaunissement caractéristique. Si la déficience en azote persiste, le jaunissement se propage le long de la nervure centrale, en direction de la tige sous forme d'un V typique inversé, dont la pointe est orientée

vers la tige, cependant que les bords de la feuille demeurent verts. C'est ce que représente la planche en couleur n° 1, page 24. Ultérieurement la feuille entière devient jaune et le processus gagne les feuilles supérieures.

On sait que l'expérimentation en France a montré qu'en moyenne la localisation profonde d'azote (15 à 18 cm) dans l'interligne en cours de végétation permettait sous certains climats une meilleure utilisation de l'azote par le maïs et, par suite, une meilleure guérison des cas de déficience, assortis de signes ici décrits. Dans de telles conditions climatiques, les symptômes expriment la difficulté de la plante à absorber l'azote au niveau des racines plutôt qu'une véritable déficience azotée.

Signalons enfin, à l'opposé, qu'en culture irriguée le maïs est particulièrement sensible à la déficience azotée et qu'il est fréquent de rencontrer les signes typiques en V même sur des cultures ayant reçu 150 kg/ha N.

### 1.4.2. DÉFICIENCE EN PHOSPHORE

La déficience en phosphore sur maïs se détecte de préférence sur les jeunes plantes. Les symptômes y sont plus prononcés et plus caractéristiques que sur les plantes en fin de croissance, car leur demande instantanée de phosphore assimilable est proportionnellement à leur développement racinaire plus intense.

Les plantes atteintes voient leur croissance diminuée, la maturité retardée et les épis mal conformés par suite du retard dans la sortie des soies.

La planche 2 (page 24) représente un pied de parcelle P0 sur un essai de Pau Pont Long en première année de défriche de la lande, dans des conditions de sols particulièrement déficientes en phosphore (95).

La déficience en phosphore sur les jeunes pieds de maïs se caractérise par une croissance faible et par le développement d'une couleur pourpre sur les feuilles et les tiges. Cette couleur pourpre provient de l'effet de l'accumulation des sucres sur la formation du pigment pourpre (anthocyanine). L'accumulation des sucres résulte de la déficience en phosphore, mais la formation du pigment pourpre est aussi sous la dépendance de facteurs génétiques. Les variétés de maïs

ne comportent pas toutes les facteurs génétiques indispensables au développement de ce pigment. Dans ce dernier cas, la déficience en phosphore sur jeunes pieds se caractérise plutôt par un aspect vert foncé bronzé.

La planche 2 représente évidemment un cas extrême du symptôme rouge pourpre.

Si ce dernier est valable dans de nombreux cas, il convient cependant de signaler que des conditions défavorables au moment de la croissance et en particulier la persistance d'un temps froid après la levée, peuvent engendrer une couleur pourpre semblable sur les jeunes plantes, qui affecte surtout les pointes et les marges des feuilles. Certains facteurs adverses (basses températures, dégâts d'insectes sur les racines) conduisent en effet à la production exagérée d'anthocyanine. Ces symptômes peuvent être seulement passagers et ne pas affecter la croissance ultérieure et le rendement.

La planche 3 (page 24) représente, sur le même essai, les symptômes typiques des cas de déficience moins sévère (parcelle P105). La couleur pourpre subsiste plutôt sur les pointes et les marges des feuilles et aux aisselles.

### 1.4.3. DÉFICIENCE EN POTASSIUM

Les principaux signes de la déficience potassique sur maïs sont : croissance plus faible, signes caractéristiques sur feuilles, verse plus ou moins grave, épis mal conformés. Les essais de doses de K<sub>2</sub>O, à forte réponse, présentent évidemment les conditions idéales pour l'observation des signes de

malnutrition potassique. C'est ainsi que le tableau 15 rapporte l'effet potasse dans des conditions de réponse considérable à K<sub>2</sub>O due au pouvoir fixateur du sol très élevé vis-à-vis du potassium (90 %) (98).

**Tableau 15: Effets de la carence en potassium sur les composantes du rendement (Essai de Moirans, Isère, sol à très fort pouvoir fixateur)**

Doses K <sub>2</sub> O	Nombre de pieds/hectare			Nombre d'épis/hectare			Rapports grains/épis			Pieds versés
	1967	1968	1969	1967	1968	1969	1967	1968	1969	1967
K0	53.490	52.812	82.200	47.897	9.732	6.648	0,585	0,513	0,685	27.935
K80	52.211	55.044	84.253	53.282*	31.606**	39.982**	0,662**	0,567	0,694	11.483**
K160	53.371	55.624	86.734	55.126**	47.097**	54.167**	0,663**	0,618**	0,711	4.760**
K240	54.264	58.928**	84.835	56.822**	59.285**	73.990**	0,670**	0,650**	0,721	2.082**
ppds 0,05	2.324	3.955	4.856	3.888	8.122	16.362	0,026	0,073	—	5.187

#### Déficience potassique et peuplements (pieds, épis)

Lorsque la déficience est très sévère, de nombreux pieds peuvent périr dès le jeune âge. De ce fait, les parcelles déficientes présentent souvent des peuplements un peu inférieurs, ce qui peut se répercuter sur les rendements, en présence de peuplements initialement faibles. La gravité de la carence K pouvant être variable à quelques mètres de distance, il en résulte souvent que les parcelles K0 sont hétérogènes dans de tels cas.

La croissance est alors ralentie dès les stades de début. Les jeunes feuilles sont plus ou moins jaunissantes et leurs bords peuvent même se dessécher. Il est encore possible d'apporter une fumure potassique au stade des jeunes feuilles lorsque ces signes ont été reconnus. Cette application de potasse ne peut se concevoir que comme une mesure de salut lorsque la croissance est diminuée (72), mais il est exclu d'obtenir un rattrapage.

Lorsque la déficience est modérée, les différences sont minimales au début de la végétation, puis elles grandissent. Il n'y a généralement pas de signes foliaires. Cette influence du potassium sur la phase de croissance du maïs est à relier à l'étude des mouvements des éléments nutritifs au cours de la croissance (fig. 6, 7).

#### Symptômes foliaires

Ce sont les plus caractéristiques. On les rencontre sur les feuilles plus âgées en raison de la facile migration du potassium vers les points de croissance. Ils n'apparaissent pas d'une manière généralisée sur les feuilles du diagnostic foliaire (feuille au-dessous de l'épi), mais plutôt sur les feuilles de rangs 1, 2, 3, 4, 5 au-dessus du sol. Les symptômes consistent en décolorations marginales qui évoluent en taches brunes, puis en nécroses tout le long des marges de feuilles.

Puis les feuilles dessèchent sur toute la longueur des marges, et le dessèchement de la totalité de la feuille devient prématuré. La perte du rôle physiologique de nombreuses feuilles est évidemment préjudiciable lorsqu'elle survient assez tôt. Il est préférable que de nombreuses feuilles restent fonctionnelles le plus longtemps possible.

La planche 4 (essai de Pau Pont Long) représente sur jeune plant le stade le plus répandu et le plus typique d'une déficience prononcée en potassium (jaunissement des bords des feuilles inférieures).

La planche 5 (essai de Pau Pont Long) représente l'aspect d'une parcelle K0 avec feuilles inférieures typiques à bords nécrosés et symptômes plus nuancés sur les feuilles supérieures.

La planche 6 (essai de Pau Saint Léon) représente l'aspect d'une parcelle extrêmement carencée venant après quatre années de prairie temporaire, en sol très appauvri en potassium (figure 17). Ces trois planches figurent page 25.

#### Le système racinaire

Il y a eu très peu d'études sur le développement du système racinaire du maïs en fonction de la déficience en potasse. Il peut varier dans de grandes proportions selon les traitements appliqués (48-143). Il est plus important lorsque la nutrition potassique est correcte, et les racines ne brunissent pas prématurément et sont moins atteintes de pourriture. Un système racinaire plus développé a deux avantages :

- 1) l'exploration du sol est meilleure et l'alimentation hydrique peut être mieux satisfaite en année sèche,
- 2) la tige risque moins de se coucher.

#### La verse

La verse du maïs, en milieu ou en fin de végétation, est un trouble important qui se répercute gravement sur les rendements et qui peut avoir des causes variables.

La maladie complexe dénommée pourriture de la tige peut être causée par un ou plusieurs microorganismes tels que *Gibberella zeae* et *Diplodia zeae*, *Pythium*. Ces parasites affaiblissent l'intérieur de la tige près de la base et provoquent la verse ou la cassure de la tige, particulièrement en périodes humides et ventées.

Mais la verse peut aussi être de nature nutritionnelle, comme résultat de la déficience potassique, qu'il s'agisse soit d'un mauvais enracinement par pourriture précoce de racines, soit de cassures de la tige vers les nœuds inférieurs. HOFFER avait montré qu'en cas de grave déficience potassique, des accumulations de fer obturaient en partie les vaisseaux conducteurs (66).

JOSEPHSON, en 1954, estimait que le degré de sénescence de la tige de maïs serait un bon indice de preuve de l'effet de la potasse (75). Il est important d'avoir le plus de tiges fonctionnelles possibles jusqu'à la récolte (119).

OTTO et EVERÉTT, en 1956, montraient l'influence de l'équilibre N/K sur la pourriture de la tige de maïs aggravée par les doses N et diminuée par les doses K, mais avec des différences variétales en ce domaine (117).

Divers auteurs, dont YOUNTS et MUSGRAVE (1958) indiquaient que l'effet bénéfique de KCl dans la réduction de la pourriture de la tige serait dû au chlore, plutôt qu'au potassium (169). Mais par la suite, ce problème fut élucidé. MARTENS et ARNY en 1967, ont montré que KCl retardait la mort des plantes et diminuait la pourriture non parasitaire

de la tige, mais également que l'effet KCl était beaucoup plus important que l'effet du chlore seul. Ils montrèrent que Cl appliqué avec NH<sub>4</sub> Cl avait effectivement quelques effets bénéfiques sur la moelle des tiges, mais KCl retardait nettement plus la désintégration de celle-ci (105).

Les mêmes auteurs étudièrent les effets K et Cl sur certains constituants organiques des tissus (azote et divers glucides) dans le second entre-nœud en relation avec la verse pour élucider le processus de réduction de la verse et de la pourriture, et ils notèrent que KCl faisait nettement décroître les sucres réducteurs alors que NH<sub>4</sub> Cl agissait de même, mais moins nettement. KCl agit surtout sur le rapport sucres réducteurs/azote, mais les différences variétales sont importantes en ce qui concerne ce rapport (104). Plus récemment encore, en 1976, LIEBHARDT et MUNSON ont

comparé NH<sub>4</sub> Cl et KCl et montré que la réduction de la verse était bien due en grande partie à K et non à Cl (64 % de verse avec NH<sub>4</sub> Cl contre 16 % avec KCl) (89).

LIEBHARDT et MURDOCK, en 1965, firent une analyse approfondie du problème de la verse liée à la déficience potassique (en l'absence de détection d'organismes parasitaires dans les tissus végétaux). Ils distinguaient deux types de verse, la «verse racinaire» et la «cassure des tiges». La verse d'origine racinaire est due au faible développement des racines d'ancrage (qui sont en plus petit nombre et recouvrent une plus faible surface du sol en cas de grave déficience potassique) et à la destruction ultérieure des cellules du parenchyme de ces racines. La cassure des tiges provient de la désintégration du parenchyme dans la partie inférieure de la tige. Les principaux résultats sont résumés au tableau 16 :

**Tableau 16:**  
**Influence de la déficience en potassium sur la verse et le développement des racines d'ancrage du maïs (selon LIEBHARDT et MURDOCK)**

N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Verse en %			Système racinaire d'ancrage		
			Racines	Tiges	Total	Nombre racines d'ancrage par pied	% de pieds ayant racines d'ancrage hors du sol	Surfaces couvertes par racines d'ancrage (cm <sup>2</sup> )
176	77	0	50	28	78	7,1	42	65
176	77	146	10	1	11	19,0	85	299

D'autre part, les plantes déficientes en K présentèrent des rapports N/K supérieurs à 3,5 à maturité, contre 0,6 pour les plantes ayant reçu K146. Ces auteurs ont aussi réalisé des sections histologiques de racines et de tiges au cours de la croissance et prouvé que la décomposition prématurée du parenchyme des racines d'ancrage et de la tige résultait bien de la déficience K (87).

LIEBHARDT et al en 1968 étudièrent les mécanismes susceptibles de provoquer cette décomposition prématurée du parenchyme du tiers inférieur des tiges de maïs déficientes en K. Le facteur principal serait la translocation de composés glucidiques de la tige vers l'épi et, de fait, la décomposition ne débute qu'après la formation de l'épi. Lorsque l'alimentation potassique est normale, la teneur en K dans la partie inférieure de la tige va de 2,4 % avant le stade des soies à 1,5 % K à la maturité. Si la déficience K est très grave ces teneurs vont de 0,4 à 0,2 % K (88).

On doit à WALTER et PARKS, en 1969, une étude assez complète des relations verse × potassium sur un sol de limon du Tennessee. Ils étudièrent pendant trois ans l'effet de différents niveaux du sol en K, de doses de K<sub>2</sub>O appliquées en bande localisée ou en plein (0, 33, 67, 100 kg/ha K<sub>2</sub>O) sur la verse du maïs. Ils représentèrent les faits au moyen de fonctions du type suivant (158) :

$$\% \text{ de verse} = a + b_1 K_s + b_2 K_e + b_3 A + b_{11} K_s^2 + b_{22} K_e^2 + b_{33} A^2 + b_{12} K_s \times K_e + b_{13} K_s \times A + b_{23} K_e \times A.$$

avec K<sub>s</sub> = K<sub>2</sub>O du sol K<sub>e</sub> = K<sub>2</sub>O engrais A = effet année

Le potassium du sol et celui de l'engrais faisaient diminuer significativement le taux de verse, mais les différences entre années étaient significatives ainsi que l'interaction entre les effets K engrais et année.

L'interaction K<sub>s</sub> × K<sub>e</sub> était également significative comme le montre la figure 14.

Selon ARNOLD et al enfin, en 1974, alors que N et P auraient peu ou pas d'influence sur les caractéristiques des tiges, les apports potassiques réduisent le pourcentage de tiges sénescentes, la verse des tiges, et accroissent la force d'ancrage et l'épaisseur de la tige. Mais, comme il a déjà été indiqué, l'effet K sur le vieillissement des tiges dépend de la variété (1).

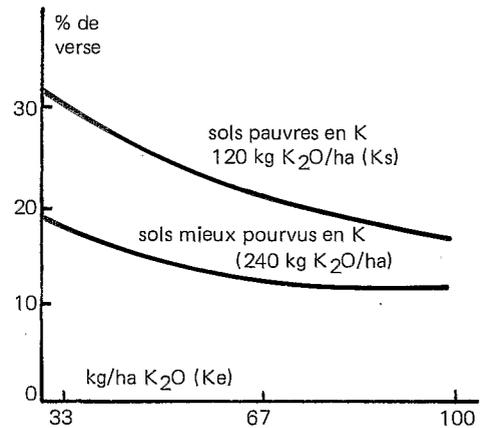


Figure 14: Effet potasse sur la verse du maïs selon la richesse des sols en potassium (d'après WALKER et PARKS).

**Tableau 17:**  
**Effet K sur les caractéristiques des tiges (moyennes 1966, 67, 68) selon ARNOLD et al**

	K0	K56	K112	K224
Tiges sénescentes en % .....	79,8	64,3*	56,2**	54,0**
Résistance à l'écrasement (kg)	254	350 **	374 **	351 **
Épaisseur de l'écorce .....	91	97 *	100 *	98 *
Verse des tiges (%) .....	18,1	14,4*	12,0**	13,5*

Dans certains des essais ici rapportés, la fumure potassique s'accompagnait aussi d'une baisse du pourcentage de tiges versées. Ainsi, dans le cas un peu extrême de l'essai de Moirans (tableau 15), le pourcentage de verse est passé de 52 à 4 %. Mais un taux de verse de l'ordre de 5 à 10 % peut être le signe d'une alimentation potassique un peu marginale.

Il a été signalé récemment par JOHNSON, en 1979, dans l'Ohio, que l'effet du potassium pouvait être influencé positivement par une date de récolte trop tardive du fait de la clima-

tologie, en raison d'un accroissement de la verse et des nombres de tiges trop faibles qui engendraient des pertes à la récolte mécanique passant de 26 à 13 % de K0 à K200 (73).

L'équilibre N/K de la fumure intervient en ce domaine (voir aussi plus loin en 2.2.1.).

#### *Les épis mal conformés*

Les épis des parcelles très déficientes en potassium sont souvent mal conformés, mal terminés. Le tableau n° 15 montre d'une manière très amplifiée, l'influence de la carence K sur le nombre d'épis/hectare. Dans cet exemple, ce n'est pratiquement qu'avec la dose supérieure K240 que chaque pied avait effectivement un épi.

Un autre effet, plus commun, est celui de la grave déficience K sur le rapport grains/épis. Dans le même exemple, les épis K0 sinon même K80 étaient plus ou moins mal conformés et ce n'était qu'à partir de K160 que le rapport approchait de la normale.

### 1.4.4. DÉFICIENCE EN CALCIUM

La déficience calcique sur maïs a été étudiée en particulier par MELSTED (107). Les plantes montrant les symptômes typiques contenaient moins de 0,2 % Ca. En cas de véritable carence nutritionnelle (très rare), les jeunes plantes montrent des symptômes caractéristiques : les points de croissance noircissent, les extrémités des feuilles non encore déroulées se collent ensemble et sèchent.

Cette carence a été observée sur l'essai de Pau Pont Long et la planche ci-contre montre ces déformations. L'aspect de la plante ferait penser à un effet sécheresse, mais la gélatinisation des extrémités des feuilles est le signe le plus caractéristique.



Essai de Pau Pont Long en 1964 (traitement K2 Ca0 Mg1) : pied présentant des déformations foliaires fréquentes sur les parcelles sans chaux.

### 1.4.5. DÉFICIENCE EN MAGNÉSIUM

Les premiers symptômes de la déficience magnésienne apparaissent sur les feuilles inférieures. Avec la migration du magnésium vers les feuilles les plus jeunes, il se développe une graduation des symptômes de la base vers l'extrémité. Ils consistent typiquement en une chlorose due au manque de chlorophylle, qui se développe entre les nervures parallèles, en longues traînées jaunes, parfois interrompues de petites zones vertes qui confèrent un aspect caractéristique. Dans les cas sévères, toutes les feuilles présentent cet aspect ; dans les cas moins graves, les feuilles basales ont des zones internervuraires presque blanches, celles au-dessus des zones jaune pâle, puis vert jaunâtre. Dans les cas bénins, seules les deux ou trois premières feuilles au-dessus du sol sont atteintes et se dessèchent vite.

La planche 7 (page 25) représente un pied typique de l'essai de Pau Pont Long caractérisé par une triple déficience K, Ca, Mg.

La déficience magnésienne se manifeste en France surtout sur les sols sableux acides des Landes et dans les conditions de sols de défriches des landes à touyas des Pyrénées Atlantiques. La déficience y est plus ou moins endémique et nécessite des apports magnésiens ou de chaux magnésienne, au début de mise en culture de maïs. On la rencontre dans de nombreuses autres situations sur des petites zones et en fonction de la climatologie de l'année (une pluviométrie élevée en mai-juin peut être une condition favorisante).

Les cas de déficience induite par pléthore potassique sont assez rares, et il n'y correspond généralement que des troubles légers limités aux feuilles basales.

*Photos de la page 15 et de cette page : origine SCPA, Département d'Agronomie.*

# SYMPTÔMES DE CARENCES EN ÉLÉMENTS MAJEURS N, P, K, Mg SUR MAÏS

*Photos SCPA, Département d'Agronomie.*



1) Déficience en azote



2) Déficience en phosphore, cas extrêmement sévère, avec développement de la couleur pourpre dans toute la plante



3) Déficience en phosphore, cas moins grave, avec couleur pourpre sur les pointes et les marges des feuilles



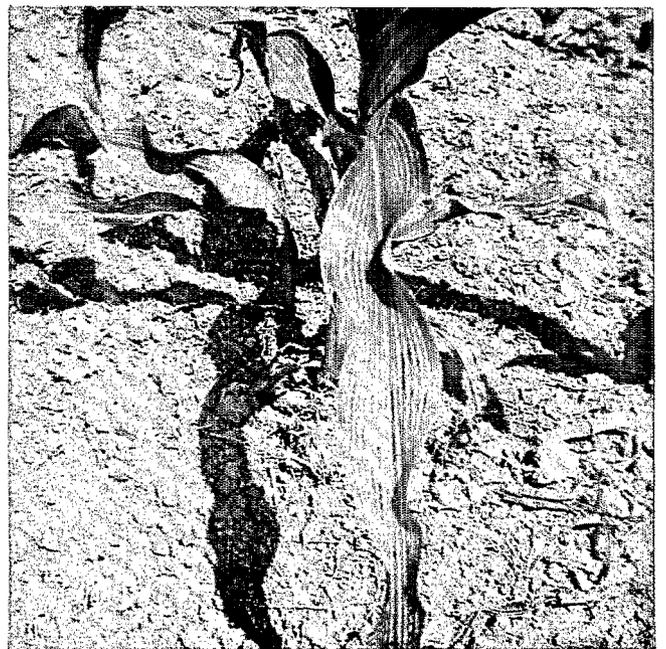
4) Déficience en potassium : stade le plus répandu d'une déficience prononcée; les symptômes de jaunissement des bords des feuilles apparaissent



5) Déficience en potassium : aspect sur pieds adultes d'une parcelle carencée



6) Essai de Pau Saint Léon : au premier plan, une parcelle sans potasse, au second plan, une parcelle recevant depuis le début de l'essai 100 kg/ha  $K_2O$ . Ce maïs de 1965 venait après 4 ans de prairie temporaire



7) Déficience en magnésium (essai de Pau Pont Long, Pyrénées Atlantiques) : chlorose internervuraire caractéristique

## Deuxième partie : FERTILISATION POTASSIQUE DU MAÏS

*L'expérimentation des engrais potassiques est, dans la grande majorité des cas, une expérimentation permanente. En effet, l'action de la potasse ne se mesure pas sur une culture, mais au minimum sur une rotation ou de préférence sur une dizaine d'années. C'est une des raisons qui font que les essais potasse sont en général beaucoup moins nombreux que les essais d'azote. Les résultats en sont le plus souvent présentés sous forme de synthèses d'essais plutôt que de cultures. Le Département d'Agronomie de la SCPA disposant de la masse de résultats expérimentaux sur  $K_2O$ , sans doute la plus importante en France, il est néanmoins possible après une vingtaine d'années de présenter des synthèses pour certaines cultures, le maïs en particulier.*

*Les essais de fertilisation potassique donnent des résultats discontinus correspondant aux doses de  $K_2O$  étudiées. Une interprétation agronomique et économique plus poussée des essais nécessite le passage de ces résultats discontinus et ponctuels à des résultats continus, au moins dans les limites des résultats expérimentaux. La méthode des fonctions de production permet précisément, à partir des résultats expérimentaux de déterminer des résultats agronomiques (rendements) et économiques (profits) pour toutes les zones de l'intervalle expérimental. C'est l'expression parabolique qui a été ici adoptée. Pour chaque calcul de fonction, on procède à un test d'ajustement et, si celui-ci est bon, il est possible de raisonner sur la courbe calculée pour toutes les doses de l'intervalle expérimental.*

### 2.1. L'EFFET MOYEN DE LA POTASSE SUR MAÏS DANS LES ESSAIS PERMANENTS SCPA

Cette étude est basée sur le tracé des fonctions de production et des fonctions de profits moyennes de la potasse sur maïs, à partir de l'ensemble des résultats expérimentaux SCPA obtenus depuis 1955. Au préalable trois remarques doivent être faites :

1) **il est évident que dans une telle étude sur 20 ans, les rendements moyens sont nettement inférieurs à ceux de l'époque actuelle, en raison des grands progrès variétaux et culturaux,**

2) à titre de simplification, les résultats seront présentés en fonction de trois doses  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ , variables selon les cultures, mais il faut préciser que de nombreux essais comportaient quatre doses de  $K_2O$ ,

3) les résultats obtenus correspondent aux effets principaux  $K$ , qu'il s'agisse d'essais  $K$  ou factoriels  $N \times K$  ou  $N \times P \times K$ , c'est-à-dire en présence de fumures  $NP$  uniformes jugées non limitantes dans le cas des essais  $K$  ou correspondant aux moyennes des doses  $NP$  étudiées, dans le cas des essais factoriels.

De 1955 à 1976, 243 résultats ont été recensés qui ont donné les résultats moyens suivants (tableau 18 ci-contre).

**Tableau 18 :**  
**Effet K moyen de 1955 à 1976**

Rendements (q/ha)	Nombre d'essais	$K_0$	$K_1$	$K_2$
Essais simples ...	59	38,3	60,5	63,8
Essais avec répétitions .....	184	44,7	59,0	63,0
Ensemble .....	243	43,2	59,3	63,2

Les doses  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  ressortent en moyenne à  $K_0$ ,  $K_80$ ,  $K_{160}$ .

La fonction de production moyenne, calculée sur les 243 essais, conduit à un rendement maximal théorique de 63,4 q/ha avec  $K_{146}$ .

Les fonctions de profit ont toutes été calculées sur la base 1977/78 de 74 F/quintal de maïs et 1 F/kg  $K_2O$ .

La fonction de profit moyenne, calculée sur les 243 essais conduit à un profit maximal moyen, par rapport à  $K_0$ , de 1353 F/ha avec  $K_{138}$ .

#### 2.1.1. RÉPONSES DU MAÏS A LA POTASSE SELON LA RICHESSE DES SOLS EN $K_2O$ ÉCHANGEABLE

Les conditions de sols doivent intervenir directement sur la nutrition cationique  $K/Ca/Mg$  du maïs et, par suite, sur les solutions à apporter au problème de la fumure potassique. La teneur en potassium échangeable du sol est le principal paramètre à considérer.

Les corrélations entre les rendements du maïs d'une part, et les teneurs du sol en potassium échangeable et les apports d'engrais potassiques d'autre part, ont été étudiées surtout aux Etats-Unis : BRAY (21-22) en 1944, 1945, WINTERS (165) en 1945, KRANTZ et CHANDLER (81) en 1951,

LONG et SEATZ en 1953 (90), HUTTON et al en 1956 (71), BOSWELL et PARKS en 1957 (17), etc. En Afrique du Sud, BEAUFILS a essayé de relier les rendements du maïs à  $K$  échangeable, et dans son étude le potassium était limitant au-dessous de 90 ppm  $K$  éch. (rendements moyens de 29 q/ha) et les meilleurs résultats (36 q/ha en moyenne) correspondaient à l'intervalle 90 à 150 ppm  $K$  échangeable (12). On peut penser que ces niveaux de rendements avaient peu de chances de poser des problèmes potassiques, sinon de balance entre éléments au-dessus de 150 ppm  $K$  (0,18°/°°  $K_2O$ ).

HANWAY et al, en 1962, ont remarqué que l'introduction de la teneur du sous-sol en K échangeable dans les équations de régression multiple exprimant les teneurs foliaires en K et le rendement en grains en fonction de la teneur du sol en K échangeable, améliorerait le degré de corrélation (64). Les mêmes auteurs concluaient d'une série expérimentale de 51 points du Corn Belt, que K éch. déterminé sur les échantillons à l'humidité au champ donnait une meilleure estimation de la réponse du maïs aux engrais potassiques que la détermination de K éch. sur la terre séchée à l'air ou à l'étuve.

Divers auteurs ont essayé d'expliquer le rendement du maïs (et la teneur en potassium de la feuille de l'épi) à partir d'équations du modèle quadratique signalé plus haut à propos de la verse et introduisant les effets de  $K_2O$  du sol ( $K_s$ ),  $K_2O$  de l'engrais ( $K_e$ ) et de l'année ( $A$ ). Ainsi, GALLAHER et al, à partir d'essais à 4 doses de  $K_2O$  conduits pendant 3 ans, adoptèrent le même modèle :

$$\text{Rendement (ou teneur foliaire en K)} = a + b_1 K_s + b_2 K_e + b_3 A + b_{11} K_s^2 + b_{22} K_e^2 + b_{33} A^2 + b_{12} K_s \times K_e + b_{13} K_s \times A + b_{23} K_e \times A.$$

Ainsi, les variations étaient expliquées à 83 % pour le rendement et 88 % pour le potassium de la feuille de l'épi (55).

Malgré les difficultés de transposition des données du Corn Belt en France, on constatait en 1963 une concordance acceptable avec les résultats ici obtenus (92-93). Mais une meilleure approche est maintenant possible.

Les 184 essais avec répétitions ont été répartis en trois catégories suivant la teneur en  $K_2O$  échangeable des sols.

Pour chaque catégorie de sols et pour le total, ont été calculées les courbes de rendements et les courbes de profits et le tableau 19 rapporte les rendements observés et les résultats calculés relatifs aux points de rendement maximal et de profit maximal.

Tableau 19: Rendements en q/ha de grains (à 15% d'humidité)

K <sub>2</sub> O échangeable en ‰	Nombre	Rendement (q/ha)			Rendement maximal		Profit maximal	
		K0	K80	K160	q/ha	kg K <sub>2</sub> O	F/ha	kg K <sub>2</sub> O
Sup. à 0,20	19	71,5	75,1	75,8	75,9	K139	202	K110
0,10 à 0,20	66	45,7	60,9	63,6	64,2	K137	1228	K130
Inf. à 0,10	99	39,0	54,6	60,2	60,2	K165	1409	K156
Total .....	184	44,7	59,0	63,0	63,1	K151	1212	K143

La figure 15 représente les trois fonctions de rendement et les trois fonctions de profit correspondant à ces trois niveaux de richesse du sol en  $K_2O$  échangeable. On peut tirer les conclusions suivantes.

1) Les sols ayant une teneur en  $K_2O$  échangeable inférieure à 0,10 ‰  $K_2O$  (ou 0,22 meq pour 100 g de sol) sont dans la zone de forte probabilité de réponse du maïs aux engrais potassiques. En l'absence de fumure organique, les résultats

expérimentaux indiquent généralement une supériorité des doses plus fortes (150 et 160 kg  $K_2O$ /ha) par rapport aux doses moyennes (100 et 120 kg  $K_2O$ /ha) et plus faibles (80kg). L'écart K<sub>2</sub> - K<sub>1</sub> ressort en moyenne à 5,5 q/ha. Cependant, lorsqu'il y a apport de 25 t/ha de fumier sur maïs, la dose élevée est inutile, la dose de 100 kg/ha conduisant alors à un rendement assez proche du rendement maximal théorique.

2) Les courbes de profit sont très influencées par la richesse du sol en potasse. La dose de profit maximal passe de 110 à 130 et 156 kg  $K_2O$ /ha, et le profit par rapport à K<sub>0</sub> de 202 à 1228 et 1409 F/ha.

3) Il y a intérêt à se situer en sols plutôt bien pourvus en potasse, car les rendements sont plus élevés et la culture plus rentable. Même sur ces sols plus riches, il subsiste souvent une réponse à la potasse qui rentabilise en moyenne K<sub>110</sub>.

Pour les sols ayant plus de 0,20 ‰ de potasse échangeable, la courbe de profit (fig. 15) est aplatie et on a pu calculer que l'application de la dose K<sub>60</sub>, parfois avancée comme dose d'entretien pour le maïs, donnerait un rendement de 74,5 q/ha et un profit par rapport à K<sub>0</sub>, de 162 F/ha (au lieu de 202 F/ha). L'écart de profit entre K<sub>110</sub> et K<sub>60</sub> n'est évidemment pas « significatif ».

Notons au passage et pour mémoire, qu'il a été possible de comparer les réponses du blé et du maïs à la potasse à partir de ces synthèses, car il s'agit dans la plupart des cas des mêmes essais permanents : sur l'ensemble de 163 essais blé, la teneur moyenne en  $K_2O$  échangeable était de 0,13 ‰ avec 18 % d'argile et sur l'ensemble des 184 essais maïs, elle était de 0,12 ‰ avec 20 % d'argile. Sur ces ensembles, la dose optimale a été de K<sub>108</sub> sur blé et de K<sub>143</sub> sur maïs. Ce résultat semble lié, en particulier, au caractère spécifique du cycle d'absorption du potassium par le maïs, qui en fait une plante à besoins importants sur une courte période (chapitre 1.2.3.).

Il ne faut pas demander à une telle synthèse, portant sur une vingtaine d'années, plus qu'elle ne peut donner, mais, lorsque le nombre d'essais est suffisant comme dans le cas présent, elle révèle assez bien le comportement de la culture en fonction de la richesse du sol en potasse.

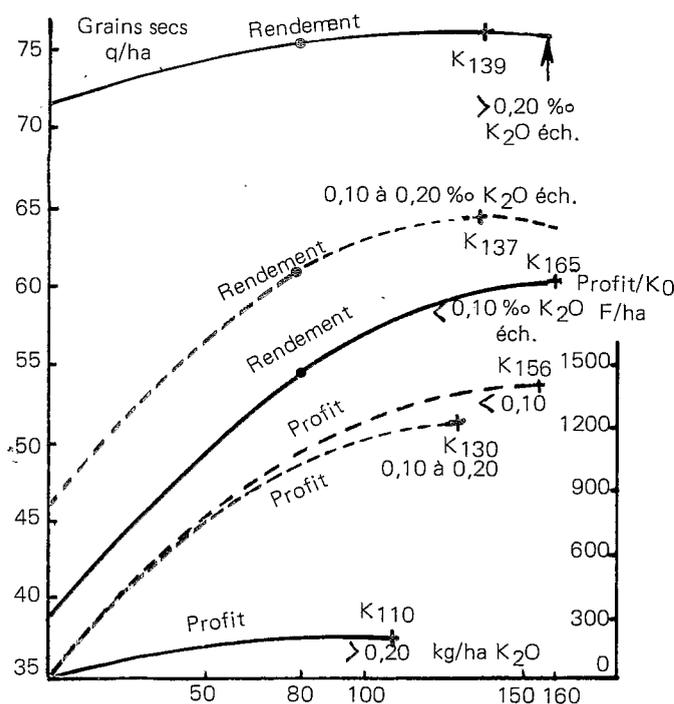


Figure 15: Fonctions de production et de profit pour la potasse sur maïs selon la teneur des sols en potasse échangeable.

Il est certain que le caractère permanent de l'expérimentation potasse exerce un effet notable sur l'importance de la réponse, exprimée par rapport au témoin permanent K0. Par contre, les écarts K2 - K1, K3 - K2... sont moins affectés par ce caractère permanent et en particulier la dose de K<sub>2</sub>O correspondant aux points de rendement maximal théorique. Il en est de même pour le profit. La permanence de l'expérimentation influence beaucoup plus le profit lui-même (calculé par rapport à K0) que la dose correspondant au profit maximal théorique.

D'autre part, l'aplatissement des courbes confère aux doses dites de l'optimum une précision illusoire. On peut souvent obtenir 99 % du profit maximal avec une dose inférieure. Il nous paraît préférable de parler de zone de profit supérieur. Il convient donc de tenir compte :

- 1) de l'imprécision statistique qui frappe le point de rendement (et ou de profit) maximal,
- 2) de la faible incidence de  $\pm 10$  unités K<sub>2</sub>O de part et d'autre de ce point.

## 2.1.2. RÉPONSES DU MAÏS A LA POTASSE, DANS CERTAINES CONDITIONS DE SOLS

Ayant considéré précédemment les effets moyens de la potasse sur maïs sur l'ensemble des résultats expérimentaux SCPA, donc tous types de sols confondus, on envisage maintenant les résultats obtenus dans certaines conditions de sols typiques où le maïs est particulièrement cultivé, ce qui englobe en particulier les paramètres suivants :

- teneurs du sol en cations échangeables, K principalement,
- capacité d'échange et taux de saturation en potassium,
- texture du sol, etc.

Mais il est bien connu que d'autres caractéristiques du sol peuvent intervenir. Selon LAWTON, la mauvaise aération du sol pourrait réduire l'efficacité des engrais potassiques (84). De même, BOWER et al, étudiant la nutrition du maïs en fonction de différentes pratiques culturales, ont également noté une sous-absorption de K dans les conditions de mauvaise aération du sol (19). Mme PERIGAUD avait noté le même effet dépressif du déficit en oxygène sur l'absorption de K par le maïs (123). Cinq exemples vont être examinés dont les conditions de sols figurent au tableau 20.

Tableau 20: Conditions de sols moyennes de quelques essais

Profondeur (cm)	Boulbènes		Terreforts		Pau 0-20	Ozoir		Sols à fort pouvoir fixateur	
	0-20	20-40	0-20	20-40		0-20	20-40	0-20	20-40
<i>Analyse physique (%)</i>									
Sable grossier (2-0,2 mm) .....	5,9	5,8	5,0	4,5	7,0	1,6	1,3	4,0	4,4
Sable fin (0,2-0,05 mm) .....	14,4	15,5	12,4	10,7	11,1	} 39,3	} 34,2	9,6	11,4
Sable très fin (0,05-0,02 mm) .....	38,4	36,1	15,2	14,8	19,1			12,4	12,5
Limon (0,02-0,002 mm) .....	24,0	24,2	21,2	21,1	33,0			31,2	31,2
Argile (<0,002 mm) .....	15,3	17,2	36,2	37,5	21,7	25,0	31,8	30,0	28,5
Calcaire total .....	0	0	9,5	11,1	0	0	0	11,2	12,2
<i>Bases échangeables</i>									
CaO °/°° .....	1,42	1,08	(7,46)	(6,65)	2,15	5,54	5,06	6,93	7,10
MgO °/°° .....	0,14	0,14	0,24	0,22	0,11	0,22	0,20	0,23	0,21
K <sub>2</sub> O °/°° .....	0,07	0,05	0,15	0,11	0,06	0,25	0,13	0,07	0,05
CEC (meq %) .....	11,1	10,7	24,8	24,2	18,0	17,9	17,4	21,7	19,5
K/CEC .....	1,4	1,0	1,3	1,0	0,8	2,9	1,5	0,7	0,6
pH .....	6,2	6,3	8,1	8,1	6,4	7,5	7,3	8,3	8,5

### Exemple 1: Les boulbènes du Sud-Ouest

Les boulbènes sont des limons fins, caractérisés par leur mauvaise structure, leur battance et leur assez fréquente hydromorphie. Elles sont naturellement pauvres à très pauvres en potasse échangeable (0,04 à 0,18 °/°° K<sub>2</sub>O avec une moyenne de 0,08 K<sub>2</sub>O °/°° pour le sol et 0,06 °/°° pour le sous-sol). La capacité d'échange est située entre 6 et 13 meq pour cent de sol avec une valeur moyenne de 9,3 meq % (96).

Les conditions de sols moyennes de trois essais permanents ont été reportées au tableau 20 (essai 2N x 3K de Sainte Marthe (Lot et Garonne), 1961 à 1970, essai 4 K de Saiguède (Haute Garonne), 1964 à 1968, essai 4N x 2P x 4K de Puch d'Agenais (Lot et Garonne), 1967 à 1978).

La figure 16 représente l'effet K<sub>2</sub>O moyen (pour les 17 résultats expérimentaux sur maïs obtenus sur ces essais) sur les rendements et les teneurs en K de la feuille de l'épi du diagnostic foliaire.

Au-dessus de K80, K100, l'amélioration de la nutrition potassique est encore largement significative et éminemment souhaitable pour les rendements.

Sur de tels sols, le potassium échangeable est apparu comme un critère de fertilité potassique satisfaisant, en dépit de ses insuffisances (96).

### Exemple 2: Les terreforts du Sud-Ouest

Les terreforts du Sud-Ouest sont des sols argileux, lourds (30 à 40 % d'argile), le plus souvent des argilo-calcaires. Les teneurs en potasse échangeable y sont très fluctuantes, de 0,10 à 0,50 °/°°. La capacité totale d'échange pour les bases y varie d'environ 20 à 30 meq %. La fertilisation potassique y a été étudiée de même manière que pour les boulbènes, mais les résultats maïs n'ont pas toujours été très nets, car cette culture y souffre beaucoup de la sécheresse.

Le tableau 20 représente ici aussi, les conditions de sols moyennes de quatre essais permanents (essais 2N x 4K de

Marignac (Tarn et Garonne), 1963 à 1966, et Lévignac (Lot et Garonne), 1963 à 1974, essai 3 K d'Avignonnet (Haute Garonne), 1965 à 1969, essai 4 K de Gramont (Tarn et Garonne), 1963 à 1968).

La figure 16 représente aussi l'effet  $K_2O$  moyen (pour les 14 résultats expérimentaux sur maïs obtenus sur ces essais) sur les rendements et les teneurs en K de la feuille de l'épi.

Les réponses apparaissent ici plus faibles que pour les brouillards et presque linéaires, traduisant une assez nette inertie. La nutrition potassique, en particulier, est relativement peu accrue (+ 0,23 % K en moyenne en K160, représentant + 14,2 % de la teneur K des K0 contre + 0,81 % K représentant + 72,3 % de la teneur K0 pour les brouillards). Pour les sols de ce type, la corrélation « rendement × teneur K foliaire » est en général meilleure que la corrélation « rendement ×  $K_2O$  échangeable ». En d'autres termes, le K échangeable serait, dans ce cas, un moins bon critère que pour les brouillards.

### Exemple 3: Essai de Pau Saint Léon (Pyrénées Atlantiques) 1951-1968

Cet important essai permanent (1951 à 1968) déjà cité à différentes occasions, comprenait depuis 1957, quatre soles en maïs et quatre soles en prairie temporaire, la permutation se faisant tous les quatre ans. Chaque sole était depuis 1962 subdivisée en six parcelles pour tester six doses de potasse (K0, K50, K100, K150, K200, K250).

Les conditions de sol de cet essai étaient représentatives d'importantes surfaces en maïs dans cette région : alluvions anciennes, à forte teneur en matière organique, bonne structure, mais très pauvre en  $K_2O$ .

La figure 16 représente l'effet  $K_2O$  moyen pour les quatre maïs de la dernière rotation (1965 à 1968) sur les rendements et la teneur potassique foliaire. Comme il a été indiqué plus haut (1.3.2.2.), les hauts rendements sont assortis de teneurs en K supérieures à 1,9 %, ce qui a permis, entre autres, de proposer une zone critique d'obtention des hauts rendements, de 1,9 à 2,2 % K.

Dans de telles conditions de sols et de rotation, l'optimum de dose de  $K_2O$  était K200. La plus forte dose K250 ne serait valable que pour le premier maïs venant après la prairie temporaire ou dans l'éventualité d'approcher 100 q/ha de grains.

### Exemple 4: Essai d'Ozoir le Breuil (Eure et Loir) 1964-1978

Les conditions de sol sont ici très représentatives de la Beauce de Châteaudun : limon sur calcaire de Beauce, assez bien pourvu au départ en  $K_2O$ . La rotation des cultures était maïs, blé ou maïs, blé, blé dur, et de 1964 à 1978, les résultats (figure 16) sont la moyenne de 7 récoltes (les trois premiers maïs 1964, 67, 70 étaient en culture sèche et les quatre suivants 1972, 74, 76, 78 irrigués).

La fonction de production moyenne conduit à un rendement maximal théorique de 78,6 q/ha avec K162 et à un profit maximal théorique moyen par rapport à K0, de 306 F/ha avec K133.

Mais dans les conditions de cet essai (bonne fourniture de  $K_2O$  du sol bien qu'avec une mobilité plutôt restreinte, irrigation depuis 1972) des résultats voisins de l'optimum pouvaient être obtenus avec une dose de l'ordre de K100 (profit de 287 F/ha par rapport à K0).

On remarque aussi sur la figure 16 que le niveau potassique moyen dans les feuilles des traitements K0 (1,8 % K) n'était absolument pas un niveau de déficience potassique, que la nutrition potassique était très correcte avec K1 (environ K90) et qu'à l'optimum économique théorique de K133, correspondait une teneur potassique foliaire de 2,24 % K que l'on pouvait effectivement considérer comme l'optimum.

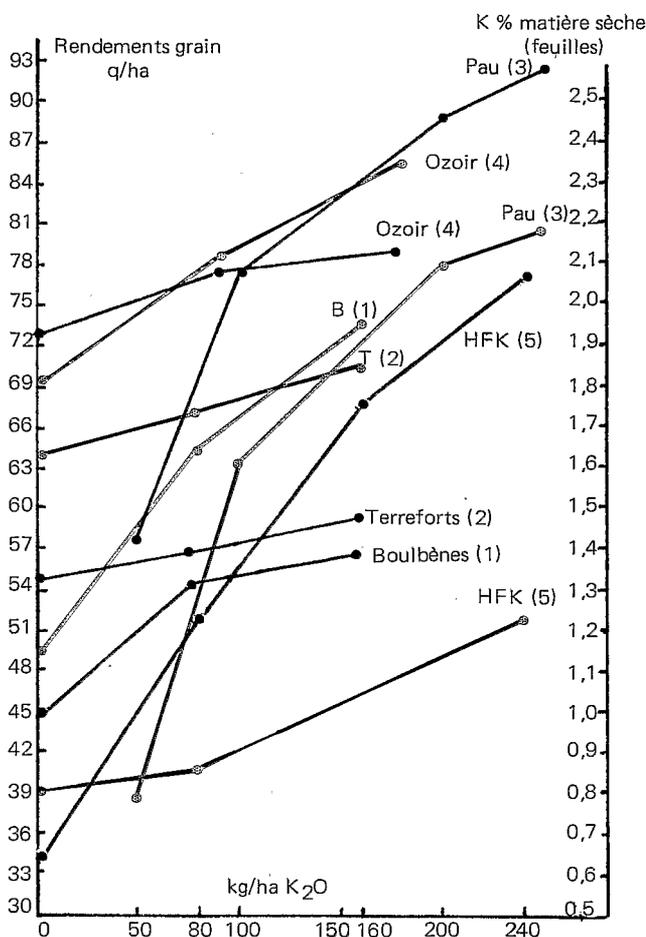


Figure 16: Effets  $K_2O$  sur les rendements et la teneur en K de la feuille de l'épi dans 5 conditions de sols (courbes en noir : rendements; en bleu : teneurs en K).

Dans de telles conditions, des rendements assez importants sont encore obtenus sans potasse après un certain nombre d'années K0, mais les hauts rendements supérieurs à 80 q/ha nécessitent une bonification de l'alimentation potassique.

### Exemple 5: Sols à fort pouvoir fixateur (1965-1978)

L'existence de sols à fort pouvoir fixateur vis-à-vis du potassium est connue depuis longtemps, mais ce n'est que dans un passé assez récent que le sujet a été réellement étudié par suite de la découverte croissante de cas concrets, notamment par DEJOU et al dans l'Indre (37) et plus récemment encore en Limagne, au sein d'une région aux sols réputés riches en potasse, par LE BUANEC et al (86). Chaque année, des cas assez similaires sont découverts, en particulier à la suite de la mise en culture de maïs, de terres lourdes de bas de pente ou d'anciens marais, le maïs révélant mieux que toute autre plante les difficultés de nutrition potassique liées aux PF élevés (98).

Le tableau 20 représente les conditions de sols moyennes de trois essais permanents situés sur de tels sols (essai 4 K de Moirans (Isère), 1965 à 1970, essai 6 K de Moirans, 1970 à 1978, essai 2N × 4K de La Sauvetat (Gers), 1968 à 1974). Il s'agit toujours de sols lourds, riches à très riches en matières organiques, à pH élevés, très faible taux de saturation en K.

Le pouvoir fixateur (PF) mesuré ici selon la méthode de Van der Marel (avec deux variantes, selon que le sol est séché une nuit à 70° ou laissé à l'état humide) était de 93,88 et 72 % à l'état sec pour les trois essais (60 à 70 % pour le PF à l'état humide). Ces PF très élevés ont pour effet de neutraliser au moins temporairement, sinon irrévocablement, une forte partie des fumures potassiques apportées.

Le tableau 21 résume les résultats essentiels de ces trois essais.

**Tableau 21: Effet K<sub>2</sub>O sur sols à fort pouvoir fixateur.**

	K0	K80	K160	K240	K320	K400
	Rendements q/ha grains secs					
Moirans I (6 ans) . . . . .	23,6	43,9	63,4	79,4	—	—
Moirans II (9 ans) . . . . .	41,5	67,7	75,9	77,9	82,0	83,0
La Sauvetat (4 ans) . . . . .	21,4	44,0	63,6	73,4	—	—
	Teneurs en K en % matière sèche de la feuille de l'épi					
Moirans I (5 ans) . . . . .	0,72	0,77	0,88	1,09	—	—
Moirans II (8 ans) . . . . .	0,90	1,09	1,28	1,40	1,52	1,72
La Sauvetat (4 ans) . . . . .	0,79	0,72	0,95	1,21	—	—

La figure 16 représente l'effet K<sub>2</sub>O moyen sur les trois essais. L'utilisation de fortes doses annuelles de l'ordre de K300 sur maïs semble inéluctable et constituer le minimum vital pour obtenir une alimentation potassique assez moyenne d'ailleurs. Une dilution considérable du potassium absorbé, due à la mobilité de K dans la plante, explique que des rendements de 80 q/ha aient pu être obtenus avec seulement 1,2% K dans la feuille de l'épi.

L'essai de Moirans II (qui étudiait aussi le mode d'apport et le fractionnement de la fumure potassique) avait montré également que l'engrais potassique devait être apporté le plus tard possible, que le fractionnement apportait une amélioration notable (apport de 40 kg/ha K<sub>2</sub>O après semis) et que la meilleure technique comportait la localisation de K40 en starter au semis.

### 2.1.3. TESTS POTASSIQUES DU SOL AUTRES QUE K ÉCHANGEABLE

L'intérêt de l'examen de la réponse du maïs à la potasse en fonction des conditions de sol et non de la seule teneur des sols en K échangeable, résulte de l'insuffisance de la mesure de K échangeable pour tester l'aptitude d'un sol à fournir du potassium.

Les principaux risques de K échangeable sont connus :

- a) risque de sous-estimer les possibilités K du sol si le K échangeable se renouvelle rapidement (on sait qu'il se produit d'une manière très variable, selon les sols, une libération progressive du potassium sous forme non échangeable qui permet de renouveler les disponibilités en K échangeable),
- b) risque de surestimer ces possibilités si K échangeable se renouvelle très lentement.

De nombreuses études sur l'amélioration du test K sol ont été réalisées précisément sur maïs.

De TURK et al, dès 1943, signalaient déjà que sur un sol de l'Illinois, le taux de potassium échangeable diminuait de 40 % de mai à octobre au cours d'une culture de maïs, mais le niveau d'origine était rétabli au mois de mai suivant (154).

Selon SCHMITT et PRATT, en 1953, les quantités de K extraites par NO<sub>3</sub>H fourniraient un meilleur indice que la teneur en K échangeable pour estimer la réponse du maïs à K<sub>2</sub>O. Le meilleur indice de K absorbé dans les sols sans apport de potasse serait une régression multiple dans laquelle l'absorption de K est calculée en fonction de K échangeable au début de la culture et de K libéré des formes non échangeables par l'extraction par NO<sub>3</sub>H N (136).

SCOTT et WELCH ont montré en 1961, par des expériences sur courtes périodes, que le maïs absorbait des quantités de K fort variables de sols cependant identiques au départ en K échangeable (138).

Selon KOCH et al, en 1970, le pool de K labile est un meilleur critère que le rapport d'activité et le potassium échangeable. On estime que ce pool est un bon indice du potentiel de K assimilable au cours de la période de croissance du maïs dans le cas de sols ne libérant pas des quantités appréciables de K sur de courtes périodes (79).

Dans le cadre de ces «Dossiers K<sub>2</sub>O» on doit à QUÉME-

NER, en 1976, une revue des tests ayant pour but l'amélioration du diagnostic K sol (128).

Cet auteur a étudié deux types de tests: la technique d'extraction biologique apparentée à la méthode Stanford, avec l'orge comme plante test, et les extractions au tétraphénylborate de sodium. Des résultats intéressants ont été obtenus avec les deux méthodes. La méthode Stanford réalise une courte durée de contact plante/sol (20 jours), ce qui permet d'extérioriser seulement les réserves en K les plus mobiles et de se rapprocher quelque peu des conditions d'absorption rapide du potassium par le maïs.

Des résultats significatifs ont aussi été obtenus ici avec l'extraction du potassium au tétraphénylborate de sodium Na TPB 0,1 N et une durée d'extraction de 7 jours. Les sols présentant une très forte réponse à K<sub>2</sub>O, en particulier sur maïs, sont à la fois pauvres en K échangeable et très pauvres en K supplémentaire extrait par ce réactif. Pour un même niveau en K échangeable, certaines différences de réponses du maïs correspondent effectivement à des différences nettes en K supplémentaire (en plus de K éch.) extrait par Na TPB 0,1 N (100).

Pour une plante à croissance rapide comme le maïs, le potassium échangeable peut être considéré comme un critère seulement relativement satisfaisant. Lorsque la teneur en K éch. d'un sol est élevée, il y a lieu de penser que la solution du sol sera toujours suffisamment pourvue en K durant la période d'intense absorption. Mais du fait que la presque totalité du prélèvement K s'opère entre le 15 juin et le 15 août (figure 6), il serait intéressant d'évaluer l'aptitude des principaux types de sols à céder du potassium au cours de la culture sur une courte période.

Ici le diagnostic K est basé sur l'extraction par Na TPB 0,1 N, en combinaison avec K échangeable, CEC et pouvoir fixateur. Mais on considère que le diagnostic K sol doit être complété par le diagnostic foliaire K de la feuille de l'épi. En particulier, la teneur en K de la feuille de l'épi est un meilleur critère que le rendement lui-même pour établir des corrélations avec le niveau potassique des sols, car le rendement est une fonction plus complexe des facteurs qui conditionnent la croissance du maïs que la teneur en K de la feuille ou l'absorption K (c'est la raison pour laquelle sur la figure 16 ont été reportés à la fois les effets K sur les rendements et la teneur K foliaire).

## 2.1.4. ÉVOLUTION DU POTASSIUM DU SOL SOUS CULTURE DE MAÏS

Bien que, pour une récolte de 70 q/ha de grains, les exportations de  $K_2O$  par les grains soient seulement de 35 kg  $K_2O$ /ha environ et le prélèvement total à maturité d'environ 125 kg  $K_2O$ , l'apport de doses de 100 à 150 kg  $K_2O$ /ha se révèle souvent efficace et cette efficacité dépend plus ou moins du niveau potassique du sol. Mais en même temps, en cas de retour des tiges au sol, les doses de 120 à 150 kg  $K_2O$  devraient enrichir le sol.

On estime que l'équilibre du bilan de  $K_2O$  doit être recherché plutôt sur l'ensemble de la rotation (maïs blé; maïs blé orge).

Le tableau 22 rapporte les niveaux moyens en  $K_2O$  échangeable des sols enregistrés sur certains essais à dominante maïs, précédemment cités :

Sainte Marthe (Lot et Garonne), brouillards : après 10 ans dont 8 maïs.

Ozoir le Breuil (Eure et Loir) : après 10 ans dont 4 maïs.

Pau Saint Léon (Pyrénées Atlantiques) : après 4 ans de maïs ou 4 ans de prairie.

Moirans (Isère), sol à très fort PF : après 9 ans de maïs continu.

Tableau 22 : Evolution de  $K_2O$  échangeable (‰) sur divers essais.

Essai	Ste Marthe	Ozoir le Breuil	Pau		Moirans	
Niveau initial	0,060	0,250	0,030 à 0,052		0,050	
	K0 = 0,049 K84 = 0,066 K152 = 0,077	K0 = 0,193 K83 = 0,214 K166 = 0,277	K0 = 0,040 K50 = 0,047 K100 = 0,072	K150 = 0,112 K200 = 0,127 K250 = 0,175	K0 = 0,032 K80 = 0,036 K160 = 0,042	K240 = 0,045 K320 = 0,059 K400 = 0,073

Le niveau initial du sol semble maintenu avec des apports de l'ordre de K80, K100.

En culture continue du maïs, avec enfouissement des tiges, il a été trouvé que le niveau potassique des sols pouvait être accru d'environ 80 ppm  $K_2O$  en 4 à 6 ans d'apports de K200. L'enrichissement devient significatif à partir de K150. Bien sûr, dans le cas de sols à très fort pouvoir fixateur, comme à Moirans, en dépit du retour des tiges au sol, il apparaît très difficile d'enrichir le sol.

Il a été effectivement prouvé aux USA que la culture continue du maïs était possible sur une longue période sur des sols de faible fertilité, si un programme de fertilisation correct était suivi (46).

Le problème est particulièrement délicat lorsque le maïs vient après une prairie temporaire assez intensive; la figure 17 représente l'évolution de  $K_2O$  échangeable après deux périodes de 4 ans de maïs ou de prairie temporaire, sur l'essai de Pau Saint Léon. La conclusion était que l'on pouvait tolérer une balance négative sur la prairie temporaire, qui serait compensée par une balance positive avec les fortes doses de  $K_2O$  sur maïs, ce dernier valorisant mieux les plus fortes doses de potasse.

On dispose d'un certain nombre d'études sur ce problème de l'évolution de la fertilité potassique sous maïs.

HUTTON et al, 1956, avaient enregistré après cinq maïs successifs sur un sol initialement pauvre en potasse, un appauvrissement de 36 kg  $K_2O$  en K0, un statu quo de + 9 kg en K70, et un enrichissement de 36 kg en K140 (71).

SOYER et al, en 1976, à partir des premiers résultats d'un récent réseau d'essais potasse, estiment qu'en sols « normalement » pourvus en potassium, une fertilisation potassique correspondant aux exportations par les grains, affectées d'un coefficient multiplicateur de 1 à 1,5 (selon les risques de lessivage), paraît permettre le maintien du niveau de K échangeable du sol en monoculture de maïs (145).

Sur leur essai de Doazit en Chalosse, après 3 maïs, le traitement K0 perdait 23 ppm K éch., le traitement (K = 1,5 × exportation) gagnait 4 ppm et le traitement (K = 3 × exportation) seulement 10 ppm. Les auteurs constataient qu'avec ce dernier traitement, l'augmentation de K éch. était nettement plus faible que selon les indications du bilan cultural. Ils ont cependant estimé que la dose d'entretien était de l'ordre de K40 dans de telles conditions.

Dans le cas des sols sableux des Landes, très faiblement pourvus au départ, en termes de K échangeable (22 ppm), ces auteurs obtenaient après 8 ans de maïs des taux de 11, 19, 20 ppm K éch. avec des applications annuelles de K0, K26, K54. Le rendement K0 pouvait encore atteindre 70 q/ha contre 90 à 100 q/ha en K54. Le test du K échangeable semble en défaut dans ce type de sols pour mesurer le statut potassique du sol et son évolution dans le temps. Des doses très sensiblement supérieures sont d'ailleurs apportées, mais SOYER et al déconseillent dans ces conditions les doses de l'ordre de K200 en raison principalement des pertes de potassium par lessivage, qui selon les études de COURPRON pourraient atteindre 60 kg  $K_2O$ /ha/an (33-35).

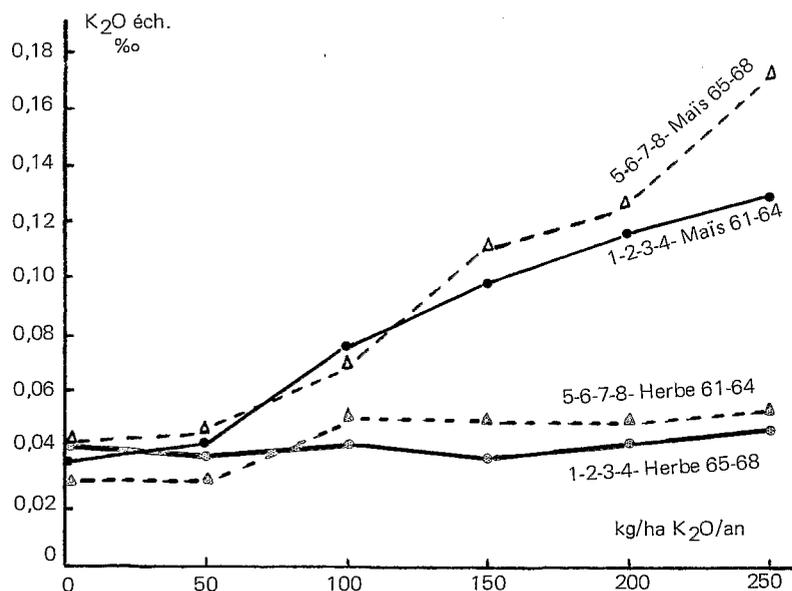


Figure 17 : Évolution de  $K_2O$  échangeable sur l'essai de Pau Saint Léon après 4 ans de maïs ou 4 ans de prairie temporaire.

## 2.2. LES INTERACTIONS DU POTASSIUM AVEC LES AUTRES FACTEURS NUTRITIFS SUR MAÏS

Dans ce qui précède, ce sont les effets principaux de la potasse qui ont été considérés (c'est-à-dire tous les autres niveaux des autres facteurs confondus). La prise en considération des interactions du potassium avec les autres facteurs de croissance, les autres éléments nutritifs principalement, se révèle indispensable, pour mieux mesurer les possibilités de réponses à la fumure potassique, car le maïs est une culture particulièrement sensible aux interactions.

Celles-ci peuvent concerner des facteurs qualitatifs (ex. : formes de l'engrais potassique, dates et modes d'apports de  $K_2O$ , variétés de maïs) aussi bien que des facteurs quantitatifs (doses des autres éléments N, P, Mg, etc., densités de plantation, doses d'eau, etc.). Le problème fut récemment abordé d'une manière plus générale (101-103-113). Ce sont surtout les interactions du potassium avec les autres éléments nutritifs qui seront ici envisagées dans le cas du maïs.

### 2.2.1. L'INTERACTION AZOTE $\times$ POTASSIUM

ARNON fait observer que les interactions  $N \times K$ , du fait qu'elles sont souvent enregistrées dans les essais au champ sur maïs, prouvent que la balance  $N/K$  est d'une grande importance pratique pour cette culture (2). Le maïs absorbe d'ailleurs N et  $K_2O$  dans des quantités assez voisines (chapitre 1.1.).

L'équilibre  $N/K$  est très important dès les premiers stades de la croissance (chap. 1.2.3.). BURSON et al ont montré que dans l'engrais starter lui-même, l'équilibre  $N/K$  était important, contrairement à une pratique d'engrais starte sans potassium (24).

L'équilibre  $N/K$  intervient très nettement dans le domaine de la verse consécutive à une pourriture d'origine parasitaire (*Gibberella* par exemple). De nombreuses recherches ont montré que de hauts niveaux d'azote, associés à de bas niveaux potassiques, favorisaient beaucoup la verse (36-51-81-87-117).

WITTEL et SEATZ, étudiant le rapport  $N/K$  de la fumure pour un maïs sujet à la verse, ont trouvé que pour un apport de 130 kg/ha N, il fallait au moins 50 kg/ha  $K_2O$  pour ramener le pourcentage de verse au niveau normal dans les conditions de l'essai. En présence de petites doses d'azote, le potassium n'avait pas d'effet (166).

Des résultats semblables ont été obtenus par FISHER et al, étudiant quatre niveaux d'azote (0, 44, 88, 132) et trois niveaux de potasse (0, 44, 88). En présence de N132, le taux de verse baissait de 70 à 30 % de  $K_0$  à  $K_{88}$  (50-51).

En Rhodésie, BURKERSRODA a mis en évidence une très forte interaction  $N \times K$  sur la verse (le taux passant de 60 % en  $N_3 P K_0$  à 5 % en  $N_3 P K_3$  (23). A partir de ces mêmes résultats, CUNARD a pu calculer la quantité de  $K_2O$  nécessaire pour compenser les effets des doses croissantes d'azote (36). MURDOCK et al ont également obtenu des résultats significatifs avec diminution du taux de verse de 78 % à 11 % avec  $K_{146}$ , en présence de  $N_{176} P_{77}$  (114).

On retiendra donc surtout en ce domaine que des doses de potasse correctes sont le contrepois indispensable à de fortes doses d'azote.

L'équilibre  $N/K$  de la fumure intervient donc positivement tout au long du cycle du maïs ; des interférences sur la qualité ont même été signalées, sur la teneur en protéines, la qualité de l'ensilage.

BURKERSRODA a également montré l'effet de l'interaction  $N \times K$  sur le poids spécifique (23). Mais le résultat final se concrétise surtout au niveau des rendements.

STANGEL rapporte une très forte interaction, entre  $N_0$ ,  $N_{176}$  et  $K_0$ ,  $K_{145}$  (+ 16,9 q/ha) (147) : tableau ci-contre.

Les résultats de BURKERSRODA, déjà cité, sont également très nets entre  $N_{44}$ ,  $N_{132}$  et  $K_0$ ,  $K_{99}$  (13).

LASZTITY a rapporté récemment les résultats moyens sur 5 ans d'un essai factoriel  $4N \times 4K$  (40, 80, 120, 160 kg/ha  $K_2O$ ) qui ne montraient pas d'interaction  $N \times K$  nette, le rendement étant, il est vrai, plafonné à 50 q/ha avec  $N_{120} K_{120}$  (83).

L'interaction  $N \times K$  est la plus importante des interactions du potassium avec les autres éléments nutritifs, et une attention particulière lui est ici accordée à partir des résultats expérimentaux obtenus depuis 25 ans en France par le Département d'Agronomie de la SCPA, en présentant la synthèse des résultats pluriannuels de la Station Agronomique d'Aspach et des résultats du réseau d'essais hors Station (97-99-103).

#### 2.2.1.1. L'interaction $N \times K$ sur maïs sur la Station d'Aspach

Les essais  $N \times K$  de la Station d'Aspach, conçus vers 1955, comportaient 8 soles consacrées à une rotation de 8 ans. Chacun des 8 essais était de type  $3N \times 3K \times 6$  blocs et se situait en présence d'une fumure phosphatée uniforme et de restitutions organiques uniformes qui apportèrent en moyenne 50 kg  $K_2O$ /ha/an. Les apports de fumier ayant, certaines années, opéré des transferts importants de potasse, les rendements se sont situés dans une zone de déficience modérée. Les résultats de l'ensemble de ces essais ont été décrits par GARAUDEAUX et CHEVALIER et constituent une importante source d'information sur ce sujet (57-58).

Le tableau 23 représente l'interaction moyenne sur 9 ans sur maïs à Aspach (ici, l'interaction  $N \times K$  est considérée comme la différence entre les réponses au facteur K, en présence du plus élevé et du plus faible niveau du facteur N).

Au niveau des effets principaux N et K, la fonction de production N conduirait à un rendement maximal théorique de 64,4 q/ha avec  $N_{133}$  et la fonction de production K, à un rendement maximal théorique de 61,0 q/ha avec  $K_{108}$ .

L'interaction  $N \times K$  linéaire (4 traitements extrêmes de la table  $N \times K$ ) fut négative une seule année, moyennement à faiblement positive 3 ans et fortement positive 5 ans.

Sur l'ensemble des 9 ans, elle est très positive (+5,2 q/hectare) et significative.

Interaction  $N \times K$  (grains q/ha), selon STANGEL

N \ K	K		
	$K_0$	$K_{145}$	Effet N
$N_0$ .....	29,1	32,3	30,7
$N_{176}$ .....	61,4	81,5	71,4
Effet K .....	45,2	56,9	

**Tableau 23: Interaction N x K moyenne sur 9 ans à Aspach (q/hectare)**

N \ K	K			Effet N	ppds	0,05		0,01	
	K0	K75	K150			0,05	0,01		
N33 .....	55,0	55,2	53,6	<b>54,6</b>	Effets N ou K Table N x K	1,9	2,6	3,3	4,4
N66 .....	58,8	61,3	63,0	<b>61,0***</b>					
N99 .....	61,4	65,7	65,2	<b>64,1***</b>					
<b>Effet K</b> .....	<b>58,4</b>	<b>60,7*</b>	<b>60,6*</b>	59,9	CV = 5,9%				

L'interprétation par les fonctions de production et de profit a été faite comme il a été indiqué par ailleurs, au moyen des surfaces paraboliques.

La fonction de production pour les traitements N x K, bien ajustée aux résultats observés est la suivante:  
 $R (q/ha) = 45,97 + 0,305 N - 0,001519 N^2 + 0,013 K - 0,000221 K^2 + 0,000527 NK$ .

Le rendement maximal théorique est de 67,5 q/ha avec **N133 K180**, un peu en dehors des limites de l'essai, et de 66,1 q/ha avec N99 K148 dans les limites de l'essai.

L'interaction N x K moyenne sur les 9 ans correspondant à la fonction précédente, est représentée par la figure 18 et son caractère très positif apparaît nettement.

L'interprétation économique sur la moyenne des 9 ans a été faite sur la base de 74 F/quintal de grains secs, 2,05 F/kg N et 0,95 F/kg K<sub>2</sub>O.

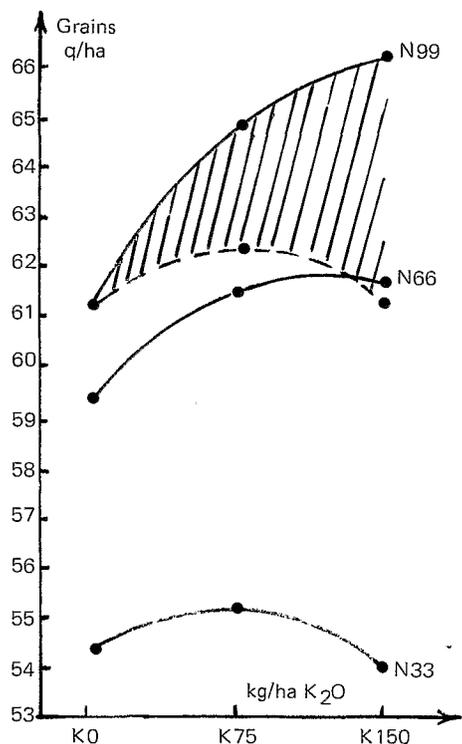
Rappelons que les zones irrationnelles sont celles pour lesquelles l'augmentation de la fumure ne se traduit plus par un accroissement de rendement et que la droite de coût de fumure minimal est le lieu des points où pour un même rendement, la fumure (NK) est la moins coûteuse.

Au niveau des effets principaux N et K, la fonction de profit N conduirait à un profit maximal théorique (par rapport à N33) de 571 F/ha avec N104 et pour K (par rapport à K0) de 103 F/ha avec K79.

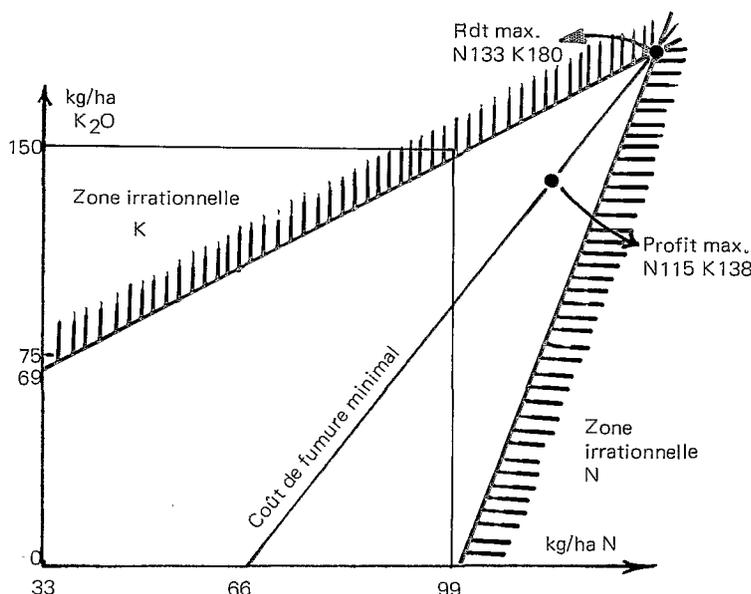
Pour l'interaction N x K, le profit maximal théorique, par rapport à N33 K0 est de 628 F/ha pour un rendement calculé de 66,9 q/ha, obtenu avec N115 K138, légèrement en dehors de l'essai, et de 605 F/ha avec N99 K118 dans les limites de l'essai.

En conclusion, le caractère positif de l'interaction N x K a donc contribué à faire passer l'optimum de la dose de K<sub>2</sub>O de K79 (toutes doses d'azote confondues) à K118 en présence de N99 et K138 en présence de N115.

Figure 18: Interaction N x K sur maïs à la Station Agronomique d'Aspach le Bas.



Interprétation agro-économique



**2.2.1.2. L'interaction N x K sur maïs hors Station**

Les essais hors Station étaient de type 2N x 3K, 3N x 3K et surtout 2N x 4K et 4N x 4K, ces derniers permettant de tracer avec plus de sécurité les fonctions de production K.

En raison de la diversité des dispositifs, les résultats sont présentés sous forme d'une interaction 2N x 2K entre le traitement minimal moyen des essais (moyenne des N1 K0) et l'équilibre moyen correspondant à la moyenne des équilibres N x K de rendement maximal de chaque essai.

Dans le réseau d'essais hors Station, on dispose de 1963 à 1976 de 56 résultats. L'interaction entre les 4 traitements extrêmes des tables N x K de ces divers essais fut en moyenne de + 3,8 q/ha.

Ces 56 résultats se répartissent en 36 cas d'interaction positive avec une moyenne de + 7,6 q/ha et 20 cas d'interaction négative avec une moyenne de - 2,9 q/ha.

**Tableau 24: Interaction N x K moyenne (q/ha) (réseau d'essais hors Station)**

N \ K	K		Effet N
	K0	K158	
N71 .....	50,8	63,9	57,3
N127 .....	52,0	71,1	61,6
<b>Effet K</b> .....	51,4	67,5	

Le meilleur traitement observé correspondrait à N127 K158 et le traitement minimal moyen à N71 K0. La table d'interaction 2x2 correspondant au rendement maximal moyen observé est celle du tableau 24.

L'interaction moyenne N x K, ainsi calculée au point le plus favorable, est très élevée et de +6,0 q/ha.

En conclusion, le maïs est une culture d'autant plus sensible à l'interaction azote x potassium qu'elle est plus perfectionnée et plus intensive. Plus on se rapproche du rendement maximal possible, avec de fortes fumures azotées, plus se rétrécit la fourchette des équilibres N/K<sub>2</sub>O de la fumure adéquate.

L'interaction N x K se situe plutôt dans une optique d'obtention de hauts rendements qui vont de pair avec certains équilibres N/K. Mais elle peut trouver place dans des pays où la fertilisation est encore modeste et, dans ce dernier cas, on peut dire que le principe d'interaction n'est qu'une manière plus perfectionnée d'appliquer la vieille loi du facteur limitant : avec l'élévation de la dose d'azote, le potassium pourrait devenir limitant.

Dans les savanes d'Afrique, par exemple, l'apparition des déficiences en K est assez récente. Dans les conditions de culture non intensive qui y dominent très largement, les interactions de K avec N sur maïs ne pourront intervenir qu'à la suite d'emploi de variétés améliorées, de la fixation des cultures, de l'adoption de dates et de densités de plantations optimales. HEATHCOTE rapporte des résultats obtenus dans de telles conditions au Nigéria (table ci-après).

Maïs (q/ha grains) 1970

	K	K0	K54
N			
N58	.....	10,71	13,88
N116	.....	11,79	25,96

Dans cet exemple, l'interaction obtenue, de + 11,0 q/ha, est énorme par rapport au rendement du traitement de base N58 K0 (65). Il ne faudrait donc pas croire que la mise en jeu des interactions N x K serait réservée aux régions qui utilisent beaucoup d'engrais.

## 2.2.2. L'INTERACTION PHOSPHORE x POTASSIUM

Le problème de l'interaction P x K fut étudié précédemment d'un point de vue plus général (101-103). Les interactions P x K sont, en moyenne, nettement moins importantes que les interactions N x K. Chez le maïs, en particulier, les quantités de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et de K<sub>2</sub>O présentes dans les épis sont du même ordre de grandeur (tableau 8), mais les prélèvements par les plantes entières sont beaucoup plus élevés en K<sub>2</sub>O qu'en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et d'autre part, la figure 7 permettait de comparer les rythmes relatifs d'absorption de P et K par le maïs.

Les interactions P x K sur maïs, dans les expérimentations, sont influencées surtout par les réponses propres à P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O en fonction des richesses des sols et par les doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et de K<sub>2</sub>O expérimentées.

Dans le réseau expérimental SCPA, l'interaction P x K reçoit moins d'attention que l'interaction N x K. Elle est cependant étudiée sur un bon nombre d'essais, soit à 3 niveaux P et K (0, 1, 2 par exemple) dans l'interaction 3P x 3K, soit plus souvent à 2 niveaux P seulement (1 et 2) et 4 niveaux K (0, 1, 2, 3), dans l'interaction 2P x 4K. Quelques exemples vont être considérés.

1) *A Laval (Mayenne)*, le sol de l'essai est un limon pauvre en acide phosphorique (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 0,13 ‰) et très pauvre en potasse (0,07 ‰). Les effets P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O ont été ici très marqués et les traitements P0 ont d'ailleurs été transformés en P60 à partir de 1975. Il y a eu 4 maïs ensilages dont les rendements furent faibles car très affectés par les sécheresses.

Tableau 25: Interaction 3P x 3K sur l'essai de Laval (t/ha matière sèche - plantes entières)

	1972				1975			1976			1977		
	K0	K120	K240		K0	K100	K150	K0	K100	K150	K0	K150	K225
P0	4,02	5,37	5,73	P60	4,33	4,55	4,40	4,83	4,90	6,36	3,80	8,12	8,46
P120	4,89	<b>9,37</b>	10,17	P75	4,20	<b>6,93</b>	6,50	4,47	<b>7,84</b>	6,72	3,71	<b>7,62</b>	3,82
P240	3,39	9,01	9,32	P150	4,19	5,50	6,01	5,57	6,08	7,13	2,63	7,48	7,22

L'interaction P x K entre les 4 traitements extrêmes était très élevée en 1972 (+ 4,22 t/ha), encore nette en 1975 (+ 1,75 t/ha) et nulle en 1976 et 1977. L'effet P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est négatif ou variable avec K0 et l'effet K<sub>2</sub>O au premier niveau P0 ou P60 est surtout positif à partir de 1976. La correction de l'état de carence P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (transformation de P0 en P60) a évidemment enlevé beaucoup de substance à l'interaction et c'est encore plus net si l'on considère le traitement central.

2) *A Ozoir le Breuil (Eure et Loir)*, le sol de l'essai (considéré plus haut, tableau 20) était relativement bien pourvu au départ en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,21 ‰). De 1964 à 1978, il y a eu 7 cultures de maïs dont les rendements moyens figurent au tableau ci-contre.

L'interaction linéaire (entre extrêmes) est assez positive (+ 1,9 q/ha). Cela provient surtout ici de ce que P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> n'a pas répondu en l'absence de potasse. Pour les 4 derniers maïs, irrigués (1978-76-74-72), l'interaction moyenne fut d'ailleurs plus nette que pour les 3 premiers, non irrigués, en 1970-67-64 (+ 2,9 q/ha).

Ozoir le Breuil: q/ha grains secs (moyennes sur 7 ans)

	K	K0	K89	K178
P				
P0	.....	72,9	76,6	77,7
P89	.....	73,0	<b>78,8</b>	<b>79,4</b>
P178	.....	71,5	76,5	78,2

3) *Le tableau 26* donne enfin trois exemples d'interaction 2P x 4K.

A Faramans, sur une moyenne de 6 ans (1970-71-72-73-75-77), l'interaction linéaire est légèrement positive, mais en fait le meilleur rendement obtenu correspond à P70 K120. Cependant la majoration de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est totalement inutile avec K0.

A Pont Saint Martin, sur une moyenne de 3 ans (1971-72-73), l'interaction P × K est assez nettement positive, surtout du fait que le doublement de la dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a été nuisible avec la très faible dose de potasse.

Au Chesnoy, sur une moyenne de 2 ans (1971-72), l'interaction P × K a très peu de substance, mais les meilleurs résultats correspondent bien au traitement supérieur.

Il a d'autre part été noté que l'interaction P × K pouvait jouer favorablement sur le taux d'humidité des grains récoltés.

Ainsi, dans les deux exemples du tableau 27, au premier niveau de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (P75) le taux d'humidité du grain croît avec les doses de K<sub>2</sub>O, alors qu'il reste à peu près stable en présence de la dose supérieure de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Ce caractère, assez souvent significatif de l'interaction P × K, peut contribuer à valoriser une dose assez élevée de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en présence d'une dose élevée de K<sub>2</sub>O.

Enfin, en ce qui concerne la nutrition minérale (teneurs foliaires en P et K), chacun des deux éléments agit relativement peu sur la teneur de l'autre. Ainsi, sur les essais du tableau 26, l'effet moyen des quatre doses de K<sub>2</sub>O sur la teneur foliaire en P fut le suivant : 0,42 - 0,37 - 0,36 - 0,36 % P. Il y a évidemment dilution de K0 à K160, mais au-dessus de K60, l'effet K est minime. Il vaudrait mieux parler de concentration en P pour les traitements K0 que de dilution avec les doses de potasse. Néanmoins, sur certains essais, il peut y avoir dilution nuisible lorsque la nutrition P est marginale.

Inversement, l'effet P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est, en moyenne, restreint sur la teneur foliaire en K, au niveau de l'effet moyen (toutes doses K<sub>2</sub>O confondues). Ainsi, sur la moyenne de sept essais, le diagnostic K moyen est passé de 1,82 à 1,71 % K sous l'influence de la fumure P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (P0 ou P60 à P150). Par contre, en l'absence de potasse, la baisse de teneur en K risque d'être préjudiciable (exemples : 1,48 à 1,12 % K en 1975 et 0,96 à 0,76 % K en 1976 sur l'essai de Laval et 1,57 à 1,32 % K à Faramans en 1975). Cet effet sera de nature à rendre plutôt positive l'interaction P × K sur les rendements, du fait d'une baisse possible de rendements de P1 K0 à P2 K0, mais qui ne sera pas nécessairement accompagnée d'une majoration de rendement de P1 K2 à P2 K2.

L'interaction P × K intéresse l'agriculteur si précisément P2 K2 est meilleur que P1 K2 ou que P2 K1 ou en tout cas que P1 K1. On peut conclure qu'il est probable qu'il en sera

Tableau 26: 2 P × 4 K (q/ha grains secs)

<i>Essai de Faramans (Ain)</i>				
	K0	K60	K120	K180
P70	49,0	61,0	<b>63,3</b>	62,0
P140	48,3	62,5	62,3	62,8
<i>Essai de Pont Saint Martin (Loire Atlantique)</i>				
	K33	K117	K200	K283
P75	34,0	55,8	64,6	61,5
P150	32,2	<b>66,4</b>	64,9	63,0
<i>Essai du Chesnoy (Loiret)</i>				
	K0	K100	K120	K180
P80	59,3	64,7	68,5	68,3
P160	61,2	66,1	68,1	<b>70,9</b>

Tableau 27: Humidité du grain (%) à la récolte

<i>Essai de Faramans (1973)</i>				
	K0	K60	K120	K180
P75	42,9	43,4	43,0	44,0
P150	41,9	42,2	41,6	41,0
<i>Essai de Pont Saint Martin (1973)</i>				
	K50	K100	K150	K200
P75	37,0	37,6	39,5	40,8
P150	35,8	36,1	35,9	36,3

ainsi vers les hauts rendements. Dans les autres situations, si la fertilité PK a été portée à un bon niveau, l'interaction P × K aura une assez faible incidence, à condition que la fertilisation PK ait été calculée correctement et ne comporte pas de déséquilibre notable.

### 2.2.3. L'INTERACTION POTASSIUM × CALCIUM

Les relations entre K et Ca ont été envisagées plus haut sous l'angle de la nutrition minérale et des équilibres K/Ca dans la feuille du diagnostic foliaire, à partir d'essais comportant toujours des doses de K<sub>2</sub>O et très rarement des doses de CaO, réalisés dans des conditions de sols très variables en ce qui concerne en particulier le complexe absorbant et sa garniture en bases, K, Ca, Mg.

Il a d'autre part été précisé que la déficience calcique nutritionnelle vraie devait être rare sur maïs.

Le maïs est en fait cultivé, en France en particulier, sur des sols à pH très variables, allant de sols très déficients en calcium à des sols au complexe saturé par Ca.

STANFORD et al étudièrent dès 1942, la balance des cations chez le maïs, en relation avec la déficience potassique, en se servant comme indice du rapport (Ca + Mg)/K dans la plante jeune, exprimé en milliéquivalents. Pour les valeurs inférieures à 3,5, la nutrition était considérée comme normale et pour les valeurs supérieures à 5,0 la déficience K était plus ou moins sévère. Sur les sols riches en chaux, le maïs nécessitait des apports de potasse plus élevés pour contrebalancer le haut niveau calcique (146).

BOWER et PIERRE avaient montré qu'un rapport élevé (Ca + Mg)/K dans la solution du sol, cas fréquent dans l'État d'Iowa, pouvait être un facteur de déficience potassique sur maïs. Sur ces sols riches en chaux, les apports de potasse faisaient baisser la teneur de la plante en Mg plus que celle en Ca, et ces auteurs postulaient que la faible absorption K sur les sols très riches en chaux résultait plus de l'antagonisme K/Mg que d'un antagonisme K/Ca (18-127).

Le rapport Ca/Mg des bases échangeables semble relativement moins important pour le maïs que le rapport K/Mg, bien qu'il ait été montré dans des cultures en pots que ce rapport devait être supérieur à 1 (77).

De LONG et al trouvaient en 1953 que le rapport Ca/K des cations échangeables était un meilleur indice des niveaux potassiques foliaires du maïs que le seul K échangeable. Le rapport Ca/K présentait une corrélation négative hautement significative avec la teneur des feuilles en K (38).

YORK et BRADFIELD avaient expérimenté sur maïs, sur des sols à pH 5, des applications d'enviro 4, 8, 20 tonnes de chaux/ha, avec deux niveaux de K<sub>2</sub>O (0 et 200 kg). Seule la plus faible application de chaux améliorait les rende-

ments; au-delà de 8 t, la chaux devenait très nettement dépressive. La potasse augmentait significativement les rendements à tous les niveaux de chaulage, mais davantage au niveau 0 (167).

Il apparaît que sur des sols saturés en calcium ou en présence de niveaux élevés de chaulage sur des sols pauvres en Ca, la teneur en potassium de la feuille de l'épi a plutôt tendance à être plus faible à même richesse du sol en K échangeable, laissant supposer une compétition avec K ou une inhibition de K au niveau des surfaces racinaires (45).

Le problème de l'interaction potassium  $\times$  calcium proprement dite peut être limité au domaine suivant: dans le cas de sols très acides, à très bas niveaux calciques, la réponse à la potasse est-elle modifiée par les apports calciques, par ailleurs nécessaires?

Des essais furent poursuivis sur ce thème pendant six ans (1963 à 1968) à Pau Pont Long, comportant de triples apports de potasse, chaux et magnésium selon le schéma  $3K \times 3Ca \times 3Mg$  en confounding à 2 répétitions pendant les trois premières années. Pour la période 1966-67-68, l'essai avait été scindé en deux, avec poursuite des doses annuelles K, Ca, Mg sur une répétition et blocage des doses Ca et Mg en 1966 pour trois ans (1966-67-68) sur l'autre répétition. Les conditions de sols correspondaient à une lande à fougères, défrichée en 1963 pour mise en culture de maïs, à pH très acide (5,0) et à triple déficience en K, Ca, Mg ( $K_2O = 0,04\%$ ,  $CaO = 0,16\%$  et  $MgO = 0,05\%$ ).

Les résultats sont rapportés au tableau 28 pour les rendements et le diagnostic foliaire K.

**Tableau 28: Essai de Pau Pont Long, interaction  $3K \times 3Ca$**

	Rendements en grains secs q/ha			K % MS feuille de l'épi		
	Ca0	Ca242	Ca483	Ca0	Ca242	Ca483
	1963, 1964, 1965 (doses annuelles en kg/ha $K_2O$ et $CaO$ )					
K0 .....	9,2	16,5	21,4	0,63	0,62	0,64
K93 .....	29,2	45,7	49,6	1,53	1,69	1,71
K186 .....	30,4	45,8	50,8	2,09	2,04	2,09
	1966, 1967, 1968 (doses annuelles en kg/ha $K_2O$ et $CaO$ )					
	Ca166	Ca433	Ca700	Ca166	Ca433	Ca700
K33 .....	18,9	25,5	29,6	0,89	1,01	1,07
K117 .....	34,8	52,7	57,5	1,49	1,96	2,04
K200 .....	37,7	56,4	59,9	1,94	2,19	2,28
	1966, 1967, 1968 (doses annuelles $K_2O$ en kg/ha et doses $CaO$ en kg/ha en 1966 seulement)					
	Ca1000	Ca2000	Ca3000	Ca1000	Ca2000	Ca3000
K50 .....	35,1	42,2	43,9	1,38	1,27	1,37
K133 .....	47,9	60,6	61,4	1,89	1,98	1,99
K217 .....	51,2	58,2	62,1	2,08	2,22	2,15

En ce qui concerne les rendements, l'interaction  $K \times Ca$  fut très minime pour les deux premières années de l'essai (1963-1964) et nettement positive et significative en 1965, 1966, 1967, puis très faible en 1968, sur l'essai doses annuelles. Pour les deux sous-périodes, les meilleurs rendements furent nettement obtenus avec le traitement supérieur. Sur l'essai à doses de chaux bloquées en 1966, l'interaction fut positive en 1966 et 1967.

L'interaction entre les 4 traitements extrêmes fut donc fortement positive. Mais l'interaction entre les 4 traitements supérieurs est beaucoup moins élevée (elle était devenue à peu près nulle en 1968 sur l'essai à doses bloquées, les rendements des quatre combinaisons supérieures étant à peu près identiques et de 70,2 q/ha).

En ce qui concerne le diagnostic foliaire K, l'interaction  $K \times Ca$  fut négligeable en 1963, 64, et positive et marquée en 1965 et ensuite. Le chaulage a favorisé indirectement la nutrition potassique, en particulier avec la dose médiane de potasse. L'interaction  $K \times Ca$  est devenue beaucoup moins nette sur l'essai à doses bloquées du fait que la première dose de chaux était déjà de 1000 kg  $CaO/ha$ .

Il apparaît que l'importance de l'interaction potasse  $\times$  chaux sur cet essai résultait de la très grave carence calcique. Dès que celle-ci fut en grande partie corrigée, donc que la réponse du maïs au chaulage devint faible, il n'y avait plus d'interaction nette.

## 2.2.4. L'INTERACTION POTASSIUM $\times$ MAGNÉSIIUM

Nous avons vu plus haut que les essais de fertilisation étudiant en particulier les effets K et les interactions  $K \times Mg$  sur maïs, suivis par analyses du végétal, ont permis l'étude des relations entre les rendements et la composition K/Ca/Mg de la plante. Sur la plupart des essais, on a enregistré des corrélations négatives entre les teneurs foliaires en K et celles en Mg.

Il a été indiqué qu'il était assez difficile de provoquer chez le maïs une déficience magnésienne grave, induite par excès de fumure potassique, dans la pratique des doses de  $K_2O$  apportées au maïs.

Il n'y a pas eu jusqu'ici un nombre considérable d'expériences factorielles  $K \times Mg$  sur maïs. Les principales expérimentations ici poursuivies se sont déroulées dans l'extrême Sud-Ouest de la France qui fut une des premières régions reconnues à problèmes magnésiens. La déficience magnésienne y survient fréquemment sur les sols sableux des Landes mis en culture de maïs, et elle se rencontre aussi sur les sols de «tuyas» des Pyrénées Atlantiques. L'essai de Pau Pont Long, considéré pour l'interaction  $K \times Ca$ , correspondait à de telles conditions et les résultats de l'interaction  $K \times Mg$  sont rapportés au tableau 29, en ce qui concerne les rendements.

**Tableau 29 : Essai de Pau Pont Long**  
Interaction K x Mg sur les rendements en q/ha grains.

1963, 1964, 1965 (doses annuelles en kg/ha K <sub>2</sub> O et MgO)			
	Mg0	Mg133	Mg266
K0 .....	14,0	16,0	17,0
K93 .....	35,1	41,9	47,5
K186 .....	38,1	43,5	45,4
1966, 1967, 1968 (doses annuelles en kg/ha K <sub>2</sub> O et MgO)			
	Mg33	Mg117	Mg200
K33 .....	25,5	23,7	24,8
K117 .....	46,3	47,7	50,9
K200 .....	47,9	53,1	52,8
1966, 1967, 1968 (doses annuelles en kg/ha K <sub>2</sub> O et doses en 1966 seulement en kg/ha MgO)			
	Mg300	Mg450	Mg600
K50 .....	44,5	40,3	36,3
K133 .....	57,1	54,5	58,3
K217 .....	58,0	56,6	56,9

La potasse et la magnésie ont présenté une interaction positive sur les six ans de l'essai à doses annuelles. La magnésie n'a agi qu'en présence des niveaux moyens et élevés de potasse. La valeur de l'interaction (au sens indiqué plus haut pour N x K) est de +4,3 q/ha pour la période 1963-65 et +5,6 q/ha pour 1966-68.

Sur l'essai à doses Mg bloquées pour 3 ans, l'effet

magnésien est devenu dépressif avec le faible niveau de potasse K50, et les six autres combinaisons sont sensiblement équivalentes.

L'interaction K x Mg fut en moyenne très faible sur la teneur en K de la feuille de l'épi, aggravant très peu la carence potassique en présence de K0 (0,65 à 0,60 % K), diminuant très peu les teneurs K en présence de la dose supérieure de potasse (2,15 à 2,10 % K). Par contre, la magnésie a engendré une dilution nuisible de la teneur en K avec les petites doses de potasse comme K50 (respectivement 1,50 - 1,36 - 1,16 % K).

	Mg0	Mg1	Mg2
K0 .....	•	•	•
K1 .....	•	•	•
K2 .....	•	•	•

Cet exemple montre que l'antagonisme K/Mg est de nature à rendre plutôt positive l'interaction K x Mg en pénalisant les traitements déséquilibrés de type K2 Mg0 (effet dépressif de K<sub>2</sub>O sur la nutrition magnésienne) et (ou) K0 Mg2 (si K facteur limitant). Ce qui importe le plus, c'est que les quatre combinaisons encadrées présentent les meilleurs rendements possibles. Lorsque la nutrition magnésienne du maïs est faible à très faible, ce n'est en général pas la conséquence des seuls apports potassiques, mais le reflet de la pauvreté du sol en magnésium. Dans ce cas, il est indispensable de corriger cette déficience, et les essais ont le plus souvent montré qu'il est préférable de la corriger assez vite sans excès, plutôt que d'étaler trop les apports dans le temps. On constate bien au tableau 29 pour la seconde période 1966, 67, 68 que les rendements avec Mg600 pour 3 ans sont très supérieurs à ceux de Mg 200 pendant 3 ans).

## 2.2.5. L'INTERACTION POTASSIUM x OLIGOÉLÉMENTS

La littérature et l'expérimentation sont particulièrement pauvres en cette matière.

L'interaction potassium x molybdène avait été notée sur maïs par JONES en 1965, qui avait trouvé une liaison inverse K/Mo dans les feuilles. Les maïs déficients en K présentaient des concentrations très supérieures en molybdène (4 fois plus que dans les feuilles normales). Les apports de potasse entraînaient une forte baisse de la teneur en molybdène des feuilles, qui pouvait être due à l'anion d'accompagnement (74).

En ce qui concerne l'interaction potassium x zinc, selon STUCKENHOLTZ et al, les effets dépressifs de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sur la teneur en zinc des maïs seraient diminués en présence d'une forte alimentation potassique, liée à un taux de saturation en K du sol plus élevé (148).

Le zinc et le potassium seraient en liaison par l'intermédiaire du système enzymatique pyruvic Kinase (2).

Selon THOMPSON, en 1962, de faibles teneurs en zinc dans le maïs pourraient être constatées aussi bien en présence d'une faible que d'une forte nutrition potassique (152).

Il apparaît que les relations K/Zn dans la plante maïs devraient être interprétées en fonction du développement des plantes et donc tenir compte des phénomènes de concentration ou dilution.

L'interaction K x Zn retient notre attention depuis quelques années, du fait que sur certains essais permanents K ou N x P x K, situés sur des terroirs présentant un risque d'apparition de déficience zincique sur maïs, certains traitements K ont été subdivisés pour l'étude de deux doses de zinc (0 et 6 kg/ha Zn) sur cette culture.

**Tableau 30 : Essai de Faramans (Ain) - 1975, interaction K x Zn**

Zn \ K	Grains secs (q/hectare)			ppm Zn feuille de l'épi		
	K0	K180	Effet Zn	K0	K180	Effet Zn
Zn0 .....	46,7	59,2	53,0	36	30	33
Zn6 .....	49,2	66,2	57,7**	49	35	42**
Effet K .....	48,0	62,7***		42	32*	

Dans l'exemple ci-dessus (essai de Faramans), l'interaction K x Zn bien que non significative, est nettement positive (+ 4,5 q/ha). Au contraire, sur la teneur en Zn de la feuille de l'épi à la floraison, l'interaction est négative (dilutions).

Signalons enfin, rapportés par ARNON (2), les résultats des expériences de THOMPSON (152), selon lesquels des apports croissant de 0 à 100 kg/ha K<sub>2</sub>O faisaient diminuer la teneur des maïs en manganèse (20 à 13 ppm environ), ainsi que la teneur en aluminium (80 à 40 ppm).

## 2.3. INTERACTIONS DU POTASSIUM AVEC D'AUTRES FACTEURS DE CROISSANCE

Les interactions constituent un fait général et l'on pourrait imaginer d'étudier les interactions possibles du potassium avec de nombreux facteurs du rendement en dehors des facteurs chimiques précédents. On se limitera à quelques exemples importants.

### 2.3.1. INTERACTION POTASSIUM × VARIÉTÉS

Il existe des différences entre les variétés, lignées pures ou hybrides de maïs, dans leurs facultés d'absorption des éléments minéraux et de réponse aux engrais (2). L'interaction potassium × variétés peut provenir en particulier :

- 1) de prélèvements potassiques différents résultant, soit d'une productivité supérieure, soit d'une plus grande aptitude à absorber K,
- 2) d'un comportement différent en présence de sols pauvres ou riches en K en fonction par exemple de leur faculté d'absorber Mg,
- 3) d'exigences différentes en azote et de sensibilité à la verse, etc.

Mais il semble que l'on soit surtout en présence de différences imputables au degré de tardivité de la variété et au peuplement correspondant plus que de différences intrinsèques vis-à-vis du potassium ou des cations K, Ca, Mg.

Il existe cependant des différences génétiques et certains

hybrides ont des racines plus efficaces dans l'absorption de certains ions (5).

BENTON JONES a particulièrement étudié les réactions de différentes lignées vis-à-vis du potassium. Les lignées absorbant facilement K voyaient aussi leur développement accru avec la richesse du milieu en K. D'autre part, certaines lignées se développaient plus rapidement que d'autres aux plus faibles concentrations du milieu en K, mais inversement étaient moins développées aux fortes concentrations (14).

D'une manière générale, des différences importantes d'accumulation de potassium entre hybrides sont signalées dans la littérature, en particulier par ROBERTSON et al (129-130) et ici même (92).

Mais les différences les plus fondamentales sont entre les maïs locaux, à pollinisation libre, aux exigences modestes, et les hybrides adaptés aux conditions de milieu.

### 2.3.2. INTERACTION POTASSIUM × PEUPELEMENTS

Elle peut être étudiée par des essais factoriels. Lorsqu'on fait varier le peuplement d'une culture de maïs, on modifie pour chaque plante la quantité d'eau disponible, le volume prospecté par les racines et la disponibilité en éléments nutritifs.

L'interaction peuplements × doses K est donc la résultante de ces modifications.

La recherche du rendement maximal passe par la réalisation de la nutrition optimale (potassique en particulier) du peuplement optimal. Dans le cas du maïs, par exemple, le peuplement est surtout commandé par le choix de la variété en fonction du climat, et secondairement du type de sol. Le choix du peuplement ne se fait pratiquement pas en fonction des possibilités de fourniture de K du sol, mais à l'inverse, celles-ci peuvent interférer sur la nutrition potassique du peuplement.

Il a été montré sur maïs, qu'il existe bien une véritable interaction peuplement × dose K sur le rendement en dehors du milieu sol, par le biais d'une interaction surface foliaire × fourniture K sur l'assimilation de CO<sub>2</sub>. SMID et PEASLEE ont étudié l'interaction de trois peuplements simulés (33.000, 98.800 et 118.000 plantes/ha) et de quatre doses de potassium. Elle était très significative en ce qui concerne le poids de matière sèche par plante. L'efficacité de K (par plante) décroissait avec le peuplement croissant. On peut concevoir qu'au regard de l'assimilation de CO<sub>2</sub>, il existe des combinaisons peuplements × fourniture de K, susceptibles de donner les plus fortes productions globales de matière sèche pour le peuplement (142).

La fumure potassique peut d'ailleurs interférer sur le peuplement. On note assez souvent en expérimentation maïs, un peuplement inférieur des traitements K<sub>0</sub> déficients en potassium.

### 2.3.3. INTERACTION POTASSIUM × IRRIGATION

La littérature comporte surtout des références à l'interaction alimentation en eau × alimentation potassique ou à l'interaction pluviométrie sur la période de croissance × réponse à K<sub>2</sub>O plutôt qu'à la véritable interaction : dose irrigation × réponse à K<sub>2</sub>O. MEDERSKI et STACKHOUSE ont étudié la liaison entre l'absorption K par le maïs et l'humidité du sol. Pour de faibles teneurs en eau du sol, le K absorbé par le maïs peut provenir du voisinage immédiat de la surface racinaire. Pour des niveaux d'humidité du sol élevés, le K absorbé peut venir de plus loin et peut être transporté vers les racines avec l'eau absorbée par la plante (106).

L'irrigation entre en interaction avec K, en particulier pour les raisons suivantes :

- 1) l'intensification des cultures et l'augmentation des rendements accroissent les besoins en K,
- 2) la dynamique de K est plus ou moins modifiée,
- 3) le lessivage de K est accru et le profil K peut être modifié.

Le schéma de l'influence de la pluviométrie (ou de l'irrigation) sur la nutrition potassique des plantes et sur la réponse à la potasse est le suivant :

- 1) *En saisons humides*, dans les sols bien aérés, l'augmentation de la teneur en eau du sol provoque un accroissement de la quantité de K soluble et une plus grande mobilité et disponibilité de K pour les plantes. La nutrition potassique aura tendance à être bonne si le sol n'est pas appauvri en potasse. On ne peut présager de l'ampleur de la réponse à

K. Cela dépendra du niveau des rendements, du niveau K du sol et des apports de potasse. Si la production de matière sèche est élevée, comme on peut le supposer, la réponse à  $K_2O$  pourra être élevée en présence de rendements élevés.

2) Dans les sols mal aérés, si les conditions de sols deviennent asphyxiques par excès d'humidité, l'assimilation de potassium pourra être mauvaise. Dans les sols humides avec conditions anaérobies, la disponibilité du potassium est faible, en raison du manque d'oxygène (123).

3) En saisons très sèches, une teneur en eau du sol trop faible est un facteur limitant pour l'absorption de potassium du sol. Si la production de matière sèche, et donc le rendement, atteint néanmoins un certain niveau, la réponse à la potasse a toutes chances d'être élevée. C'est dans de telles conditions que l'on observe souvent les plus forts écarts entre parcelles K0 et parcelles ayant reçu de fortes doses de potasse (surtout en raison des bas rendements K0).

Il en résulte que l'on peut concevoir que l'interaction irrigation  $\times K_2O$  revête des aspects variables. Cela est bien illustré par les résultats suivants obtenus dans des essais à long terme sur maïs, à l'Université de Purdue, USA, par YOUNTS (170). Le tableau 31 rapporte les rendements en fonction des hauteurs d'eau durant la période de croissance du maïs.

**Tableau 31:**  
Interaction pluviométrie  $\times$  K sur maïs (q/ha)  
(d'après YOUNTS, 1971)

Pluviométrie (mm) durant la période de croissance	K0	K100
Insuffisante (202 mm) . . . . .	56,5	81,0
Optimale (448 mm) . . . . .	93,0	98,0
Excessive (655 mm) . . . . .	57,1	87,3

**Tableau 32: Relation K  $\times$  pluviométrie juillet, essai de Sainte Marthe (Lot et Garonne)**

	1970	1961	1969	1962	1967	1966	1965	1963
Pluviométrie juillet (mm) . . . . .	15	16	18	28	31	36	39	66
q/ha grains secs en K0 . . . . .	32,2	39,1	41,1	30,9	29,9	52,3	64,2	76,8
q/ha grains secs (K140 - K0) . . .	+20,2	+3,1	+11,4	+10,7	+20,4	+27,7	+10,0	+12,0
kg/ha $K_2O$ pour rendement maximal . . . . .	133	508?	166	138	122	121	107	97
K% matière sèche des feuilles K0	1,02	1,12	1,25	1,02	0,74	0,84	1,24	1,31

1) Les rendements K0 ont tendance à croître avec la pluviométrie de juillet. Les plantes ne recevant pas de potasse se sont incontestablement mieux alimentées en K au cours des années notées comme pluvieuses (1963 et 1965). Le diagnostic foliaire a d'ailleurs donné des teneurs de la feuille de l'épi très supérieures en K ces années-là (ligne inférieure).

2) La réponse à la potasse a été en moyenne de 11 q/ha pour les deux bonnes années et de 13 q/ha pour les cinq

L'interaction eau  $\times K_2O$  entre les niveaux d'insuffisance et d'optimum est très négative ( $- 19,5$  q/ha).

Au contraire, l'interaction entre les niveaux d'insuffisance et d'excès est assez positive ( $+ 5,7$  q/ha). La potasse semble donc avoir été plus efficace avec excès qu'avec insuffisance d'eau. Mais le meilleur rendement est bien obtenu avec K100 et optimum hydrique.

En présence d'une alimentation en eau insuffisante, l'effet potasse est considérable ( $+ 24,5$  q/ha) en raison de la mobilité accrue de K et de l'enrichissement de la solution du sol.

MENGEL et al ont montré dans des essais en pots sur jeunes plants de maïs que la mobilité du potassium dépendait fortement de l'humidité du sol et que des apports potassiques supérieurs, en accroissant la concentration en K de la solution du sol, pouvaient dans une certaine mesure, contrebalancer l'effet dépressif de pF supérieurs à 2 sur la diffusion du potassium (109).

BARBER a observé sur maïs une relation nette entre la pluviosité durant la saison de croissance et le rendement K0, calculé en % du rendement qui aurait été obtenu avec des quantités correctes de potasse (7). La connaissance des relations entre la pluviométrie et les réponses à  $K_2O$  devrait permettre de calculer la réponse moyenne à la potasse et la fréquence d'apparition de réponses s'écartant plus ou moins de la moyenne (8).

Le problème de l'interaction K  $\times$  pluviométrie ou K  $\times$  irrigation peut être posé en d'autres termes : la dose de  $K_2O$  nécessaire à l'obtention du rendement maximal diffère-t-elle selon la pluviométrie, ou avec ou sans irrigation ? Sur maïs, DOLL et ENGELSTAD ont estimé que la dose optimale d'apport de potasse pouvait être évaluée avec une sécurité suffisante même si les rendements réels différaient notablement en raison des variations pluviométriques (41).

Nous avons observé les résultats suivants sur un essai à dominante maïs dans le Sud-Ouest de la France.

plus sèches en juillet, ce qui fait que par rapport à K0, l'effet potasse a été de  $+ 15,5\%$  en années humides et de  $+ 39\%$  en années sèches.

3) Le calcul de la dose de rendement maximal par les fonctions de production donne une liaison inverse assez nette avec la pluviométrie de juillet. Le rendement maximal a été obtenu avec K100 en année humide, K120 en année moyenne et environ K145 en année sèche.

### 2.3.4. INTERACTION POTASSIUM $\times$ FAÇONS CULTURALES

On entend ici l'interférence que peuvent avoir sur la fertilité et la nutrition potassique du maïs, les techniques de cultures sans labour expérimentées depuis une dizaine d'années au moins. Ce sujet a été beaucoup plus étudié aux Etats-Unis qu'en France. Une des préoccupations des chercheurs était le problème de l'absorption des éléments nutritifs appliqués seulement en surface, en particulier pour P et K et celui de leur distribution dans le profil du sol (49).

Dès 1948, LAWTON et BROWNING avaient étudié l'effet des façons culturales sur le rendement et la nutrition NK du

maïs, sur six types de sols de l'Etat d'Iowa. Le labour traditionnel donnait les meilleurs rendements dans cinq cas, et la teneur en K des plantes entières était plus élevée sur labour dans quatre cas, particulièrement dans les cas de moins bonne structure ou de pauvreté relative du sol (85).

TRIPLETT et al, en 1969, ont comparé la culture sans labour avec la culture traditionnelle avec labour, en monoculture de maïs pendant six ans. Le potassium se trouvait effectivement concentré près de la surface du sol en non-labour. Mais la teneur en K des feuilles de maïs était identi-

que au stade floraison et même significativement supérieure sans labour, au stade 8-10 feuilles. Les auteurs concluaient que K (et P) pouvaient être appliqués près de la graine pour couvrir une certaine partie des besoins de la plante, le reste de la dose étant appliqué en plein (153).

MOSCHLER et al, en 1972, firent une étude assez semblable sur trois types de sols de Virginie, les engrais étant appliqués seulement en surface. Les cultures sans labour donnèrent ici de meilleurs rendements que les labours (+ 25, + 14, et + 39 %). Les auteurs concluaient que l'application en surface des engrais pour le maïs sans labour était une bonne technique (110). Les mêmes auteurs en 1975 ne trouvèrent aucune interaction entre doses de potasse et façons culturales (avec et sans labour), les plantes étant correctement nourries en K avec les apports en surface (111).

SCHULTE, dans le Wisconsin, en 1979, rapporte une interférence très forte entre la technique de labour ou non labour et l'effet de la fertilisation potassique, l'écart de rendement (labour - non labour) étant respectivement de 23, 16, 8 q/ha pour K0, K90, K180. Parallèlement, la teneur en K de la feuille de l'épi était très affectée par le non labour (0,73 à 0,59 % K en K0; 1,40 à 1,04 % K en K90 et 1,71 à 1,42 % K en K180 (137).

En France, l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF) réalise depuis 1971 des essais sur le thème de la

simplification du travail du sol, dans trois conditions de sols :

- 1) à Boigneville (Essonne) sur assolement maïs-blé ou monoculture de maïs,
- 2) à Auzeville (Haute Garonne) sur assolement maïs irrigué-blé,
- 3) à Saint Aubin de la Plaine (Vendée) sur assolement maïs non irrigué-blé.

Des essais du même type existent à Grignon (15). Trois traitements sont en essais L0 = travail profond, L1 = travail superficiel, L2 = semis direct (non travail du sol).

A Boigneville, dans les meilleures conditions de sol, les moyennes sur 8 ans (1971 à 1978) pour l'essai en monoculture de maïs ont été les suivantes pour respectivement L0, L1, L2: 69,4 - 67,3 - 63,8 q/ha grains secs. Sur l'essai maïs-blé, on enregistrait une faible différence entre L0 et L1 en faveur de L0, et le semis direct L2 était assez inférieur (60).

A Auzeville, de 1972 à 1976, le labour a été régulièrement en tête tandis que L1 et L2 ne différaient pas. L'évolution du potassium échangeable a été suivie sur ces essais et la figure ci-après représente, selon BODET et FOURBET l'évolution de 1970 à 1974 sur l'essai de Boigneville (15) (les résultats de Saint Aubin de la Plaine et de Grignon vont dans le même sens) :

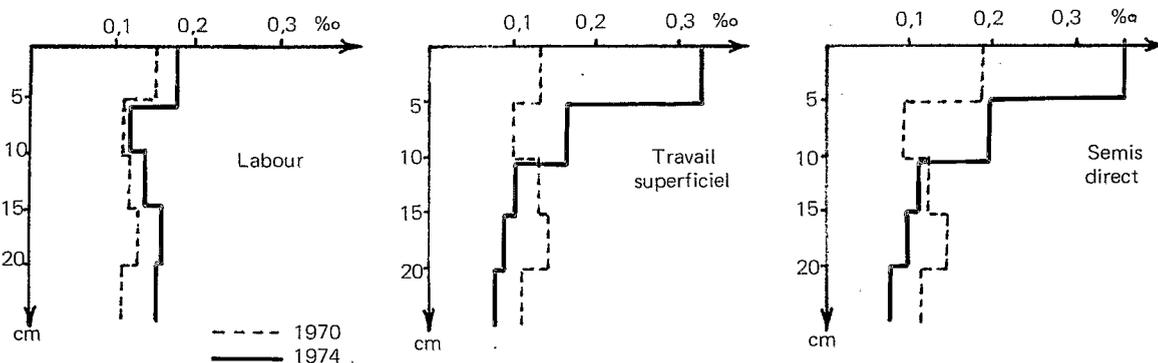


Figure 19: Évolution des teneurs en potasse échangeable (en ‰ K<sub>2</sub>O) selon les différentes techniques de travail sur l'essai de Boigneville.

On constate que la répétition, en un même endroit, des traitements L1 (travail superficiel) et L2 (semis direct) a très nettement modifié la répartition de la potasse le long du profil : très fort enrichissement de 0 à 5 cm, enrichissement plus faible de 5 à 10 cm et appauvrissement au-dessous de 15 cm au fond de l'ancienne couche labourée.

La plupart de ces essais furent contrôlés par des analyses de plantes effectuées au Département d'Agronomie SCPA,

sur des échantillons de diagnostic foliaire ou de plantes entières à divers stades.

Sur l'essai de Boigneville, GILLET et COUTURE ont pu noter que les quantités de K<sub>2</sub>O absorbées au stade floraison femelle par le maïs étaient plus faibles avec le traitement L2 semis direct qu'avec le travail superficiel et surtout le labour. Selon ces auteurs, la désorption de potassium entre le stade floraison femelle et la récolte ne se vérifiait que sur les maïs cultivés sur labour ou travail superficiel (60) (tableau 33).

Tableau 33: Essai de Boigneville (1978)

	Essai A - maïs non irrigué			Essai B - maïs irrigué		
	Grains q/ha	Absorption K <sub>2</sub> O (kg/ha)		Grains q/ha	Absorption K <sub>2</sub> O (kg/ha)	
		Floraison femelle	Récolte		Floraison femelle	Récolte
L0	74,5	177,3	138,4	82,4	176,0	154,9
L1	74,5	160,9	149,2	79,4	150,6	148,1
L2	69,9	157,0	158,1	78,8	141,4	160,9

Dans les conditions françaises, on obtient en général (maïs non toujours) un rendement et une alimentation potassique plus élevés du maïs avec labour. L'infériorité moyenne du semis direct résulte surtout, semble-t-il, des bas rendements obtenus certaines années en relation avec la climatologie. Ainsi, à Saint Aubin de la Plaine en 1972, les rendements respectifs de L0, L1, L2 furent de 56,3 - 56,8 et 23,5 q/ha et les teneurs en K correspondantes de la feuille

de l'épi de 1,71 - 1,59 et 1,21 % K. De toute évidence, le traitement L2 et à un moindre degré L1 étaient accompagnés d'une nutrition potassique très déficiente.

L'interaction entre le potassium et les façons culturales est sous la dépendance des conditions de sols (structure et niveau potassique en particulier) et de la pluviométrie de la saison. Elle se situe au niveau de l'absorption K par les raci-

nes, c'est-à-dire qu'elle va dépendre de la distribution des racines par rapport au profil potassique du sol (figure 19) et aussi des conditions d'aération de ce dernier. Dans les conditions physiques de sols les moins favorables et sur les sols faibles en potassium, les meilleurs résultats sont obtenus avec les façons culturales qui tendent à augmenter l'aération du sol, car l'absorption K par les racines du maïs est

nettement dépendante de l'oxygénation du milieu. L'absorption du potassium sera donc influencée par les façons culturales dans la mesure où celles-ci auront créé des différences dans le profil K du sol (fait général), mais aussi des différences nettes d'aération du sol (fait nettement moins évident selon les techniques pratiquées).

## 2.4. EFFETS DE LA FUMURE POTASSIQUE SUR LA SANTÉ DU MAÏS

Le sujet a été rencontré plus haut à propos de l'effet de la fumure potassique sur la verse parasitaire du maïs (*Gibberella zeae* et *Diplodia zeae*), qui est un des effets les mieux établis en ce qui concerne la relation fertilisation/parasitisme. Un Dossier K<sub>2</sub>O antérieur a d'ailleurs été consacré à ce thème comportant en particulier un article général de PERRENOUD traduit d'un document très complet (124-

125) et une étude de ARNON traduite de l'ouvrage du même auteur (2-3).

Le potassium tend à réduire d'une manière significative la pourriture des racines et des tiges, le charbon et la brûlure des feuilles de maïs (tableau 34 d'après PERRENOUD (125).

Tableau 34: Effets du potassium sur les maladies du maïs (nombre de cas)

Maladies	Effet +	Effet 0	Effet -	Totaux	Références bibliographiques
Pourriture racine .....	5	2	—	7	MARTENS et al (105), THAYER et al (150)
Pourriture tige .....	49	5	14	68	OTTO et al (117), SIEBOLD (140)
Charbon .....	9	—	—	9	MÜHLE et al (112)
Brûlure feuilles .....	10	3	1	14	BOGYO (16), HOOKER et al (67-68)

Selon SIEBOLD, cité par PERRENOUD (140), sur sol fixant K, l'apport de K<sub>2</sub>O provoquait une réduction considérable de la pourriture des tiges (32 % en K0, 18 % en K300, 8 % en K600).

En ce qui concerne le charbon (*Ustilago maydis*), selon MÜHLE et al, l'effet de la potasse serait variable selon les années (112) et l'interaction N x K pourrait jouer favorablement.

L'helminthosporiose qui se traduit par une sorte de nécrose des feuilles (*Helminthosporium turcicum*) est atténuée par la fertilisation potassique, selon BOGYO (16). Les essais de HOOKER et al ont indiqué une diminution de l'infection selon les notations de 2,9 en K0, 2,0 en K55 et 1,4 en K110, pour des notes allant de 0,5 en cas d'infection légère à 5,0 en cas d'infection sévère (67-68). L'effet favorable de K<sub>2</sub>O pourrait être accentué par le chaulage (3).

## 2.5. EFFETS DE LA FUMURE POTASSIQUE SUR LA QUALITÉ DU MAÏS

Ce domaine a été relativement peu exploré, si l'on en excepte l'aspect très important, considéré plus haut, du rôle du potassium et de la fumure potassique sur la verse du maïs.

L'effet de K<sub>2</sub>O sur le taux de matière sèche à la récolte ne revêt pas, sauf cas particulier, une grande ampleur. Il y a une très légère tendance, en moyenne sur les essais, à ce que les fortes doses de K<sub>2</sub>O entraînent une légère augmentation du taux d'humidité du grain (la récolte se faisant au même moment).

PEASLEE et al ont montré que le nombre de degrés x jours entre l'apparition des soies et la maturité était corrélé avec les fertilisations P et K (coefficients respectifs de 0,61 et 0,81). La nutrition potassique influence les rythmes de développement du maïs et en particulier la période de formation des grains. Une forte alimentation potassique accélère le stade soie et retarde un peu la maturité du grain en relation avec l'effet K retard sur le vieillissement des feuilles (121).

La nutrition potassique exerce une influence marquée sur la formation de l'épi, en ce sens que lorsque la déficience potassique est accentuée, le pourcentage de rafle par rap-

port à l'épi augmente d'une manière généralement significative; les épis sont mal conformés, souvent inachevés à la pointe.

La fertilisation potassique n'agit pas nettement sur la teneur en huile du grain de maïs, qui dépend surtout de la variété. WELCH signale cependant un effet assez modeste (3,51 à 3,68 %) de K0 à K448, pour des rendements en grains passant de 92,9 à 101,1 q/ha (164). L'influence de K<sub>2</sub>O sur la composition minérale du grain est également faible ainsi qu'il a été vu plus haut (1.1.1.).

La qualité du maïs ensilage peut être bonifiée par une abondante fertilisation potassique. Selon MUNSON, cité par GAMBOA, le potassium aurait une grande influence sur la qualité de l'ensilage de maïs en augmentant de 10 % le rapport grains/tiges, en élevant le taux de glucides fermentescibles qui accroissent la production d'acide lactique, en diminuant les pertes de matière sèche au cours de l'ensilage (56). STANGEL avait trouvé, de K0 à K132, des taux de pertes en fermentation, par rapport à la matière sèche, de 6,8 et 2,1 % respectivement (147).

## 2.6. LES MODALITÉS DE LA FUMURE POTASSIQUE DU MAÏS

Il y aurait lieu d'envisager successivement: la dose globale de  $K_2O$ , les modalités d'apport (formes de l'engrais, périodes et modes d'apport).

Le problème principal est, de loin, celui de la dose, et il a fait l'objet des développements précédents consacrés aux effets du potassium sur maïs (voir 2.1.1.).

La dose de  $K_2O$  optimale dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont:

- teneur du sol en K échangeable,
- type de sol et capacité totale d'échange,
- fumure organique éventuelle et restitutions des tiges,
- variétés cultivées, densités de plantation et rendements visés possibles,
- rotations culturales,
- pluviométrie et irrigation éventuelle,
- prix du  $K_2O$  et du maïs, etc.

### 2.6.1. LA FORME DE POTASSE

Il semble que ce soit un problème secondaire sur maïs. Les deux grandes formes d'engrais potassique, chlorure et sulfate, se sont révélées équivalentes comme sources de  $K_2O$  sur maïs dans de nombreux essais ici poursuivis. Dans certains cas, la forme sulfate a pu présenter une légère supériorité pour la croissance, mais cependant les exigences du maïs en soufre sont faibles, de l'ordre de 12 à 15 kg/ha.

Comme le fait remarquer ARNON (2), avec les quantités importantes de K appliquées au maïs dans certaines conditions, des quantités également importantes de Cl se trouvent aussi apportées et il y a lieu de savoir si elles peuvent avoir une influence sur le maïs, soit directement, soit en modifiant l'absorption et l'accumulation des autres ions dans la plante.

SEATZ et al ont comparé sur maïs les effets des anions Cl,  $SO_4$ ,  $CO_3$ , et les doses de chlore correspondaient à 165, 330, 660, 990 kg/ha en présence d'une dose uniforme de 132 kg  $K_2O$ /ha. Les rendements du maïs étaient inférieurs dans la série Cl, mais aucun effet nuisible chlore ne pouvait être observé sur les plantes. Les auteurs attribuèrent l'effet dépressif Cl aux valeurs beaucoup plus élevées de la conductivité électrique des extraits à saturation des sols. Mais du fait que les doses Cl de la pratique de la fertilisation potassique avec KCl sont très inférieures aux doses de ces essais, les auteurs concluaient qu'il n'y avait pas de précau-

tions à prendre dans les apports normaux de KCl sur maïs. Dans ces essais, la teneur en Cl des plantes passait de 0,42 à 1,20 % Cl, la teneur corrélative en P de 0,105 à 0,110 et celle en soufre de 0,25 à 0,24 %. Il n'y avait donc pas d'antagonisme avec P ou S (139).

NIELSEN et al ont confirmé ces faits en comparant 0 et 330 kg Cl/ha. Le passage de Cl 0 à Cl 330 n'avait pas d'effet sur les teneurs des maïs en N, P, K, alors que Cl passait de 0,14 à 0,93 % (116).

Le problème de l'ion Cl sur maïs ne peut se poser qu'en cas de localisation de KCl à des doses importantes (ce qui n'intervient pas dans la pratique). Dans les essais de YOUNTS et MUSGRAVE, la croissance du maïs était diminuée lorsque les doses de chlore étaient de 50 à 100 kg/ha (correspondant à 66 à 132 kg  $K_2O$  sous forme KCl), appliquées dans la raie. Au contraire, aux doses les plus faibles en localisation, l'ion Cl devenait bénéfique, en tendant à réduire la pourriture de la tige (168-169).

En conclusion, la forme chlorure est la forme la plus économique d'apport de  $K_2O$  pour le maïs, et elle ne pose pratiquement aucun problème de chlore ou d'antagonisme anionique. La forme sulfate ne sera préférée que dans des cas très particuliers en vue d'avoir une plus faible conductivité de la solution du sol autour des racines.

### 2.6.2. LES MODES D'APPORT DE LA POTASSE

La fumure potassique du maïs pourrait comporter les modes d'apports suivants:

- a) fumure de fond au labour: on enterre alors le fumier de ferme, s'il y a lieu, et la fumure potassique (ou phospho-potassique) adaptée au type de sol,
- b) fumure épandue avant le semis: elle peut apporter, soit un complément éventuel de  $K_2O$  (et de  $P_2O_5$  sous forme rapidement assimilable), soit la totalité de  $K_2O$  (et de  $P_2O_5$ ) si la fumure potassique (ou PK) de fond n'a pas été pratiquée,
- c) localisation au semis d'un engrais starter NPK,
- d) apport de potasse dans l'interligne.

En France, dans la très grande majorité des situations, les apports sont réalisés selon a et b. L'AGPM préconise d'apporter la potasse au moment du labour, courant mars, en sols non sableux, et juste avant le semis dans les sols sableux très filtrants (172). Aux Etats-Unis, la localisation est beaucoup plus pratiquée. La potasse y est parfois appliquée en ligne pendant la croissance du maïs. WASHKO, appliquant KCl à des stades variés (40,59 et 73 jours après la plantation), a trouvé que l'efficacité était plus grande à la première, mais qu'il y avait aussi une réponse à 73 jours (162).

La localisation d'un engrais a pour but de mettre à la disposition des jeunes plantes des éléments nutritifs en plus grande concentration que par la fumure classique. Elle vise à

obtenir l'utilisation la plus élevée possible des engrais par la plante; les doses sont faibles ou seulement moyennes, rapportées à la surface totale, mais élevées si rapportées à la surface de contact avec les racines.

Le problème est en effet de maximiser les contacts des racines du maïs avec le potassium de la solution du sol. La connaissance des caractéristiques de l'absorption de potassium par les racines du maïs permettrait d'adopter les meilleures pratiques de fertilisation. Dans cet ordre d'idées, CLASSEN et BARBER ont étudié l'influence de la distribution du potassium dans la zone racinaire du maïs au moyen de jeunes plantes sur solutions nutritives et dont une partie variable du système racinaire était au contact de potassium. Pour obtenir la plus forte production de matière sèche, 50 % environ des racines devaient être alimentées en potassium. Lorsqu'une partie des racines était sans K, l'autre partie en absorbait nettement plus (jusqu'à 2,6 fois). Les auteurs estimaient que même en cas de localisation d'engrais K près de la ligne de plantation, il y avait nettement moins de la moitié des racines au contact de l'engrais (30).

Le placement de quantités faibles à moyennes d'engrais, dans des bandes près de la graine, à la plantation, a été étudié surtout aux Etats-Unis. La localisation est en général effectuée en une seule bande, à 5 cm sur le côté et 5 cm au-dessous de la ligne où sont déposées les graines. On recommandait l'application de 125 à 250 kg/ha de ternaires NPK,

plutôt faibles en N et à dominante  $P_2O_5$ . Le plus souvent on ne dépassait pas 50 kg/ha pour le total  $N + K_2O$ . C'est un principe de sécurité, au cas où des conditions de sécheresse surviendraient dans les semaines suivant le semis.

La doctrine actuelle semble être que si l'on apporte assez de potasse lors des labours précédant le semis, il ne serait pas nécessaire d'inclure la potasse dans l'engrais localisé. Mais quand des quantités assez moyennes de potasse sont utilisées avant le semis, il est utile d'inclure la potasse en localisation avec N et P. La faible quantité de potasse ainsi apportée peut avoir une efficacité sur le rendement plus grande que si on l'avait incluse dans la fumure de base, ainsi que cela ressort des études en ce domaine.

Il a été souvent mentionné que la germination du maïs pouvait être affectée lorsque de trop fortes doses de potasse étaient mises en contact avec la graine. BATES, en 1971, relate des essais comparant divers systèmes d'épandage (en plein, localisé à 5 cm de la graine, la moitié en pulvérisation sur le sillon et la graine et l'autre moitié en plein ou localisée). L'apport avec la graine réduisait les différences entre les divers placements de K (11). Sur les sols pauvres en potassium, il faut évidemment apporter des doses de potasse très supérieures à celles qui seraient tolérables, et il faut appliquer l'engrais potassique, soit en plein, soit en localisation à une certaine distance de la graine.

Le placement de doses trop élevées trop près de la graine pourrait réduire la germination. D'autre part, le mélange avec le sol peut favoriser la fixation du potassium plus que le placement localisé (mais cela joue en moyenne moins pour K que pour P).

BARBER estimait que la réponse du maïs était surtout affectée par le niveau potassique du sol, et concluait que les apports K en bande localisée ou uniformes en plein étaient des méthodes équivalentes d'apport d'engrais potassique pour le maïs (7).

WITTEL et SEATZ, en 1953, trouvèrent que le rendement, la verse, la teneur en K des plantes n'étaient pas modifiés par le mode de placement de K (166).

MEDERSKI a montré que la réponse du maïs à des applications de K localisées en ligne décroissait lorsque s'élevaient les apports de K en plein (106).

WELCH et al, en 1966, ont comparé l'efficacité de K appliqué en localisation à 5 cm à côté et au-dessous de la graine et de K appliqué à la volée, sur les rendements du maïs, sur trois essais factoriels dans l'Illinois, combinant 5 doses K en plein (0 - 27,5 - 55 - 110 - 220 kg K/ha) et 4 doses K localisées (0 - 14 - 28 - 55 kg K/ha). Ils ont exprimé le rendement par une fonction quadratique incluant les doses K (à la volée) et K (localisé). Les taux d'explication des rendements étaient de 62, 77 et 81 %. Le potassium appliqué en bande se révélait plus efficace que le potassium appliqué à la volée. L'efficacité relative de ce dernier allait de 0,33 à 0,88 par rapport à K localisé; ce coefficient dépendait de la dose K et du type de sol. Cela proviendrait de différences d'assimilabilité: fixation accrue lorsque l'engrais K est mélangé au sol, faible mouvement de diffusion de K selon le type de sol. Avec l'apport localisé, il n'y avait pas de dégâts de germination jusqu'à environ 74 kg K/ha. Les auteurs estimaient cependant que les planteurs peuvent préférer l'application uniforme, bien que le kg K localisé puisse être plus efficace que le kg K en plein (163).

PARKS et WALKER, en 1969, ont exprimé le rendement du maïs en fonction du niveau K du sol et de la dose K appliquée, soit à la volée, soit localisée dans une raie près du semis (une équation pour l'apport en plein et une pour l'apport localisé) (118).

Rendement =

$$a + b_1 K_s + b_2 K_e + b_3 A + b_{11} K_s^2 + b_{22} K_e^2 + b_{33} A^2 + b_{12} K_s \times K_e + b_{13} K_s \times A + b_{23} K_e \times A.$$

avec  $K_s = K \text{ sol}$        $K_e = K \text{ engrais}$        $A = \text{effet année.}$

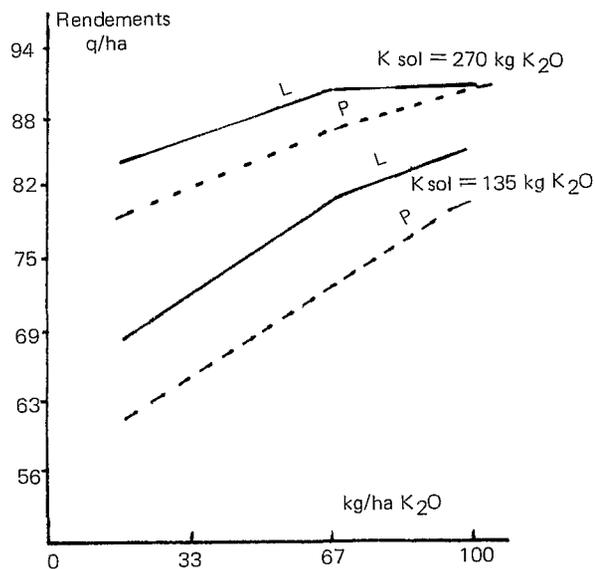


Figure 20: Effet de l'apport de potassium en plein (P) ou en localisation (L) sur maïs à 2 niveaux de richesse du sol en K (selon PARKS et WALKER).

Les équations rendaient compte des variations de rendements pour 54 % avec l'apport localisé et 63 % avec l'apport en plein. L'effet année était hautement significatif, en raison sans doute de l'effet alimentation en eau sur la réponse du maïs à K.

La figure 20 représente les principaux résultats: la localisation a été plus efficace que l'apport en plein, mais cette supériorité diminue lorsque K sol s'élève et aussi avec la dose K appliquée. Si le total K ( $K_s + K_e$ ) disponible pour la plante s'élève, l'effet de la localisation devient moins important, ce qui confirme les conclusions de la plupart des chercheurs, que la réponse à la localisation décroît lorsque la fertilité s'élève.

Dans les 2 équations obtenues, les auteurs ont calculé les rapports des coefficients linéaires de  $K_s$  et de  $K_e$  et ils ont obtenu 0,645 pour l'apport en surface et 0,374 pour l'apport localisé, ce qui les faisait conclure qu'une unité K sol a une efficacité de 64,5 % de celle d'une unité K engrais en plein et 37,4 % de celle d'une unité K engrais localisé.

Les conclusions sont les suivantes:

- 1) sur les sols très pauvres en K, les meilleurs rendements pourraient être obtenus avec K appliqué en localisation dans une raie près de la graine plutôt qu'avec K appliqué uniformément en surface, et ce d'autant plus qu'on appliquerait de plus faibles doses,
- 2) en agriculture plus intensive, en sols moyennement pourvus et pour des rendements supérieurs à 50 q/ha, la majeure partie sinon la totalité de la fertilisation potassique est apportée à la volée avant labour; une petite partie de la dose pourrait être localisée au semis,
- 3) sur les sols assez bien pourvus en K, en principe il n'y a pas de différence à espérer des modes d'application de K.

Notons enfin qu'en France, la localisation d'un engrais starter de type NP, sans potasse, avait connu une certaine vogue vers 1960-1970, en particulier dans le Sud-Ouest, et ensuite dans des régions climatiques marginales avec l'extension du maïs. Puis la localisation de binaires NP riches en N ammoniacal fut incriminée dans des cas de troubles du maïs par intoxication ammoniacale, et le rôle protecteur du potassium démontré (133).

La localisation d'un binaire NP est effectivement de nature à induire dans certains sols une moindre nutrition potassique. Dans les essais rapportés par GAUTIER et al (59), la localisation starter au semis de phosphate diammonique accentuait

K en % matière sèche de la feuille de l'épi			Sans localisation NP	Avec NP
N96	P120	K0	1,22	1,10
N96	P120	K64	1,93	1,84
N96	P120	K144	2,14	2,31

la déficience potassique en l'absence de potasse et avec K64, et accroissait au contraire la teneur en K avec K144 (à partir d'un diagnostic témoin sans engrais de 1,41 % K).

Avec le développement de la fertilisation potassique de base du maïs dans ce pays, le problème de la localisation de la potasse a perdu beaucoup d'intérêt, mais il est probable que certaines cultures de maïs en tireraient profit.

## CONCLUSIONS

Le but de toute maïsiculture intensive est d'obtenir les meilleurs résultats techniques et aussi économiques. On peut considérer, comme aux USA, que 13 grands facteurs de croissance sont à prendre en compte :

- |                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| 1) fertilité générale des sols, | 8) K,                      |
| 2) hybride,                     | 9) chaux et pH,            |
| 3) date de semis,               | 10) méso et oligoéléments, |
| 4) densité de plantation,       | 11) parasitisme,           |
| 5) alimentation en eau,         | 12) façons culturales,     |
| 6) N,                           | 13) rotations.             |
| 7) P,                           |                            |

Il est évident que la nutrition et la fertilisation potassiques ne sont qu'un des aspects de cet ensemble. Le but ici recherché était de montrer l'importance spécifique du facteur K pour le maïs.

Les faits importants concernant la nutrition potassique du maïs sont les suivants.

- 1) **Les prélèvements de K<sub>2</sub>O de la plante entière à maturité et récolte sont très supérieurs aux seules exportations de K<sub>2</sub>O par les grains et les épis**, car les organes végétatifs mobilisent d'importantes quantités de K<sub>2</sub>O (tableau 8).
- 2) **Le prélèvement de K<sub>2</sub>O réalisé à un certain stade du cycle est sensiblement supérieur (de 30 à 50 kg K<sub>2</sub>O) au prélèvement constaté à la maturité, car il y a désorption de potassium**. C'est le prélèvement maximal qui mesure les besoins réels du maïs (figure 6).
- 3) **Le rythme d'absorption du potassium par le maïs est précoce, rapide, en avance par rapport au développement des racines**, et il en résulte une assez forte sensibilité du maïs au niveau potassique des sols (figure 7).

Cette étude a ensuite montré l'intérêt du diagnostic de la feuille de l'épi pour connaître la nutrition potassique du maïs en fonction des conditions de sols et de fertilisation. La teneur en K de la feuille de l'épi est évidemment un très bon diagnostic vers les teneurs basses à moyennes (inférieures à 1,4 % K) et secondairement vers les fortes teneurs (supérieures à 2,4 % K) en liaison avec les niveaux calciques et magnésiens (figures 12 et 13). La zone critique pour les hauts rendements est proposée à 1,9 à 2,1 % K (figure 10).

La seconde partie du document est consacrée à la fertilisation potassique du maïs. La meilleure fumure potassique doit à la fois :

### 1) Procurer la plus haute rentabilité de la fumure

Cela dépend évidemment de la nature de la réponse et des prix respectifs du maïs et de K<sub>2</sub>O. L'ensemble des résultats ici obtenus a été présenté sous forme de fonctions de rendements et de fonctions de profit, selon la richesse des sols en K<sub>2</sub>O échangeable (figure 15).

Certains résultats (effet des doses de K<sub>2</sub>O sur les rendements et les teneurs en K de la feuille de l'épi) ont également été présentés en fonction de types de sols (figure 16). Il existe bien sûr une infinité de cas, allant de la non réponse jusqu'aux réponses quasi linéaires sur sols à fort pouvoir fixateur vis-à-vis du potassium.

### 2) Contribuer au moins au maintien de la fertilité du sol

Le plus souvent avec maïs grain et enfouissement des tiges, la dose de K150 réalise un certain enrichissement du sol. Par contre, les doses de K80 à K100 semblent bien être des doses d'équilibre du niveau de K<sub>2</sub>O/ha échangeable du sol.

### 3) Conduire à la nutrition potassique la plus élevée, n'engendrant pas de déséquilibre nutritionnel

Les doses de fumure préconisées pour satisfaire aux trois principes précédents vont de 80 à 160 kg K<sub>2</sub>O/ha dans la majorité des situations. Elles sont étayées par les considérations sur la nutrition potassique basées sur l'absorption des éléments minéraux par le maïs et sur le diagnostic K de la feuille de l'épi.

Reconsidérant les 13 grands facteurs de croissance mentionnés plus haut, il convient de considérer les relations entre K et les autres, c'est-à-dire tout le domaine des interactions. Les interactions les plus importantes ont été envisagées.

Une place de choix a été faite à l'interaction azote × potassium, car elle est primordiale chez le maïs (figure 18 et tableau 24). **Le maïs est une culture d'autant plus sensible à l'interaction N × K qu'elle est plus intensive.**

Mais avec l'évolution des techniques, des interactions nouvelles apparaissent, comme par exemple K × façons culturales.

### Quel avenir pour les rendements et la fertilisation du maïs ?

Revenant à la considération émise en introduction, selon laquelle le rôle de la fertilisation a été très important dans les progrès des rendements du maïs (figure 1), on peut se demander ce que pourrait être l'évolution future des rendements du maïs en rapport avec celle de la fertilisation. Pour ce faire, il semble intéressant de considérer l'exemple américain.

L'évolution des rendements aux USA a été aussi spectaculaire qu'en France, jalonnée par les points suivants (1940 = 18,8 q/ha ; 1950 = 25,1 q/ha ; 1960 = 37,6 q/ha ; 1970 = 52,7 q/ha). De 1960 à 1969, le rendement moyen annuel était de 41,4 q/ha et l'accroissement annuel moyen supérieur à 1 q/ha. C'est dire que vers 1968-1970, les rendements des États-Unis et de la France étaient très voisins et vers

50 q/ha. Mais cette évolution s'est poursuivie aux États-Unis au cours de la dernière décennie alors que les rendements français ont stagné à tel point que le rendement moyen des États-Unis en 1978 était de 101 bushels/acre, soit 63,3 q/ha.

Pendant longtemps, les deux grands facteurs limitants

des rendements du maïs ont été, aux États-Unis, les faibles peuplements et la fertilité des sols. Or la fertilisation y a accompli des progrès considérables sur maïs (le blé y demeure fertilisé d'une manière très extensive, particulièrement en PK). Le tableau 35 indique l'évolution de la fertilisation du maïs en 1965 et 1976 pour les plus grands états producteurs.

Tableau 35: La fertilisation du maïs aux USA

	Surfaces maïs en 1976 (millions ha)	Fertilisation en 1965 en kg/ha			Fertilisation en 1976 en kg/ha			Échantillons de sols (%) classés moyens ou faibles	
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Ohio	1,578	79	62	56	128	86	88	45	52
Indiana	2,528	100	75	87	142	92	112	44	63
Illinois	4,693	85	53	48	153	83	96	48	46
Michigan	0,809	55	59	51	97	67	80	31	76
Wisconsin	0,930	36	52	50	95	64	112	59	81
États du Nord-Est Centre	10,540	81	59	58	138	83	99		
Minnesota	2,265	39	40	29	111	64	70	33	59
Iowa	5,158	62	37	25	136	62	63	73	53
Missouri	1,165	77	37	33	124	52	57	70	69
Nebraska	2,508	80	17	3	143	30	13	69	5
États du Nord-Ouest Centre	12,372	57	31	20	130	52	48		
États-Unis	26,949	71	44	40	135	66	73		

La consommation N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O est passée en 12 ans de 155 à 274 unités/hectare. L'azote a progressé de 90 %, l'acide phosphorique de 50 % et la potasse de 80 %, et l'équilibre P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O est passé de 1,10 à 0,90.

L'équilibre P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O moyen des principaux états du Corn-Belt est de 0,84. La comparaison des fertilisations du maïs aux USA et en France montre qu'on applique en moyenne aux USA :

- 1) une plus forte fertilisation azotée (N135), très voisine de ce qui était considéré en France vers 1972-1975 comme la fumure des zones de pointe (N140),
- 2) une nettement moindre fertilisation phosphatée (moitié moindre),
- 3) une fertilisation potassique un peu inférieure, mais qui a progressé de manière importante, d'où un équilibre P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O sensiblement différent. Progressivement les quantités de K<sub>2</sub>O appliquée dans le Corn Belt ont pu arriver à compenser, selon BARBER et al, les quantités exportées par les récoltes et perdues par lessivage (9).

Malgré les progrès accomplis, il apparaît que la fertilité PK demeure dans bien des cas un facteur limitant des rendements du maïs aux USA. Le tableau 35 montre que dans le Corn Belt il y a environ 60 % des sols qui sont classés insuffisamment pourvus en potassium.

Certains agronomes américains estiment qu'en l'an 2000, le rendement national pourrait atteindre 150 bushels/acre (94 q/ha). En effet, les meilleurs fermiers, en nombre non négligeable, obtiennent déjà 200 bushels (125 q/ha). DIBB et GRIFFITH rapportent les résultats d'une enquête portant sur 549 fermes obtenant un rendement moyen de 136 q/ha, avec une date de semis du groupe du 22 avril, une densité

de 63.000 pieds/ha et une fertilisation de 242 kg N, 105 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 120 kg K<sub>2</sub>O (40). BARBER et OLSON, dès 1968, indiquaient que les rendements de 125 q/ha étaient associés à des fertilisations moyennes de N220 P110 K165 (10). Ces auteurs estimaient alors que la fertilisation du maïs tendrait vers de hautes doses d'azote, supérieures à 200 kg/ha et pouvant atteindre 300 kg/ha, que les besoins en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O seraient accrus dans une moindre proportion, sauf dans les cas d'utilisation des tiges pour K<sub>2</sub>O.

Quels enseignements pouvons-nous tirer de l'exemple américain ?

- 1) Il devrait être possible d'obtenir aussi en France une majoration importante des rendements moyens au cours de la décennie à venir. L'obtention de très hauts rendements sur des surfaces plus importantes qu'actuellement, ne pourra bien sûr se faire par la seule fertilisation, mais seulement par la prise en compte de l'ensemble des facteurs du rendement, grâce au jeu des interactions (prises ici dans un sens très général).
- 2) La fertilisation demeurera un facteur clé de l'amélioration des rendements. Elle devrait évoluer vers une dominante azotée (dans toutes les situations de réponses à N). On revient alors au problème soulevé en introduction des dépenses énergétiques et des coûts.
- 3) La fertilisation phosphopotassique devra être entretenue à un haut niveau et non être ajustée vers le minimum compatible avec des rendements encore jugés satisfaisants, et il faudra veiller corrélativement aux problèmes de magnésium et de zinc.

Il faudra sans doute accorder, dans certains cas, une plus grande importance relative à la fertilisation potassique pour être en meilleur accord avec les exigences du maïs et permettre l'efficacité d'une fertilisation azotée accrue.

## BIBLIOGRAPHIE

1. ARNOLD, J.M., L.M. JOSEPHSON, W.L. PARKS, and H.C. KINCER — Influence of nitrogen, phosphorus and potassium applications on stalk quality characteristics and yield of corn. *Agron. J.* 66: 605-608. 1974.
2. ARNON, I. — Mineral nutrition of maize. *Intern. Pot. Inst., Bern*, 452 p. 1975.
3. ARNON, I. — Les répercussions de la fertilisation du maïs sur le développement des maladies et des insectes. *Dossier K<sub>2</sub>O, SCPA, n° 12*: 29-32. 1978.
4. BAIRD, B.L., J.W. FITTS, and D.D. MASON — The relationship of nitrogen in corn leaves to yield. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26: 378-381. 1962.
5. BALIGAR, V.C., and S.A. BARBER — Genotypic differences of corn for ion uptake. *Agron. J.* 71: 870-873. 1979.
6. BANGE, G.G.J., and E. Van VLIET — Translocation of potassium and sodium in intact maize seedlings. *Plant and Soil XV-4*: 312-328. 1961.
7. BARBER, S.A. — Relation of fertilizer placement to nutrient uptake and crop yield: effects of row potassium, potassium soil level and precipitation. *Agron. J.* 51: 97-99. 1959.
8. BARBER, S.A. — The influence of moisture and temperature on phosphorus and potassium availability. *Proc. 7th Intern. Congress of Soil Science, Madison, USA*: 435-442. 1960.
9. BARBER, S.A., and H.J. MEDERSKI — Potassium fertility requirements in « *Advances in Corn Production* »: 257-284. Iowa State Univ. — Press, Ames, Iowa. 1966.
10. BARBER, S.A., and R.A. OLSON — Fertilizer use on corn, in « *Changing patterns in fertilizer use* »: 163-188. *Soil Sci. Soc. of America, Madison, Wisc.* 1968.
11. BATES, T.E. — Response of corn to small amounts of fertilizer placed with the seed: III. Relation to P and K placement and tillage. *Agron. J.* 63: 372-375. 1971.
12. BEAUFILS, E.R. — Application of physiological diagnosis techniques for establishing a norm relating soil available K to maize yield. *Transaction of the 10th Intern. Cong. Soil. Sci. IV*: 341-348. 1974.
13. BENNETT, F., G. STANFORD, and L. DUMENIL — Nitrogen, phosphorus and potassium content of the corn leaf and grain as related to nitrogen fertilization and yield. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 17: 252-258. 1953.
14. BENTON JONES, J. Jr. — Nutrient element requirements for several inbred lines of corn. *Trans. 7th Int. Cong. Soil. Sci. Madison, Wisc. USA 3*: 336-342. 1960.
15. BODET, J.M. et J.F. FOURBET — Incidence de la simplification du travail du sol sur le devenir du phosphore et du potassium, in « *Simplification du travail du sol en production céréalière* ». ITCF Paris: 167-187. 1976.
16. BOGYO. — L'effet des apports de potassium et de chaux sur l'apparition et la gravité de l'*Helminthosporium turcicum* chez le maïs. *Revue de la Potasse. Section 23. 16<sup>e</sup> suite*. 1955.
17. BOSWELL, F.C., and W.L. PARKS — The effect of soil potassium levels on yields, lodging and mineral composition of corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 21: 301-305. 1957.
18. BOWER, C.A., and W.H. PIERRE — Potassium response of various crops on a high lime soil in relation to their contents of potassium, calcium, magnesium and sodium. *Agron. J.* 36: 608-614. 1944.
19. BOWER, C.A., G.M. BROWNING, and R.A. NORTON — Comparative effects of plowing and other methods of seedbed preparation on nutrient element deficiencies in corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 9: 142-146. 1944.
20. BRADFORD, R.R., D.E. BAKER, and W.I. THOMAS — Effect of soil treatments on chemical element accumulation of four corn hybrids. *Agron. J.* 58: 614-617. 1966.
21. BRAY, R.H. — Soil plant relations I — The quantitative relation of exchangeable potassium to crop yields and to crop response to potash addition. *Soil Sci.* 58: 305-324. 1944.
22. BRAY, R.H. — Soil plant relations II — Balanced fertilizer use through soil tests for potassium and phosphorus. *Soil Sci.* 60: 463-473. 1945.
23. BURKERSRODA, K.W., von — Fertilizing maize in Rhodesia. *Better Crops* 43 (4): 6-13. 1965.
24. BURSON, P.M., R.D. CURLEY, and C.O. ROST — Balanced NPK and placement, key to good root growth. *Crops and Soils* 14 (6): 9-10. 1962.
25. CALMES, J. — Le potassium et le magnésium dans les limbes du maïs. *C.R. Ac. Sci. Paris*: 292-294. 1959.
26. CALMES, J. — Contribution à l'interprétation du diagnostic foliaire chez le maïs. *C.R. Acad. Agric. France*, 51: 1178-1183. 1965.
27. CARLES, J., L. SOUBIES et R. GADET — Répartition des éléments minéraux dans le maïs au cours de sa végétation. Influence d'une fourniture plus ou moins abondante d'engrais azotés sur la pénétration et la migration des éléments minéraux chez le maïs. *C.R. Acad. Agric. France*, 43: 523-544. 1957.
28. CHAMEL, A. — Effet de quelques facteurs sur la fixation et la migration du 42K appliqué sur les feuilles de maïs. *Revue de la Potasse, Section 3, 43<sup>e</sup> suite, p. 7*. 1972.
29. CHAPMAN, D. — Diagnostic criteria for plant and soil. *Univ. of California*. 1966.
30. CLAASSEN, N., and S.A. BARBER — Potassium influx characteristics of corn roots and interaction with N, P, Ca and Mg influx. *Agron. J.* 69: 860-864. 1977.
31. COLLIER, D., L. GACHON, et M. ROBELIN — Réaction des plantes cultivées aux conditions de sous-sol: essais sur maïs-grain. *C.R. Acad. Agric. France* 44: 610-616. 1958.
32. COPE, J.T., R. BRADFIELD, and M. PEECH — Effect of sodium fertilization on yield and cation content of some field crops. *Soil Sci.* 76: 65-74. 1953.
33. COURPRON, C. — Comparaison de la mobilité de différents sels de potasse appliqués à un sol sablo-humifère des Landes de Gascogne. *C.R. Acad. Agric. France*: 891-896. 1969.
34. COURPRON, C., et J. TAUZIN — Rythme de l'absorption des éléments minéraux par une culture de maïs irriguée en sol sableux des Landes. *C.R. Acad. Agric. France*: 479-492. 1971.
35. COURPRON, C. — Pertes en éléments fertilisants dans les sols sableux des Landes soumis à une fertilisation et une irrigation intensives. *Ann. Agron.*, 25: 467-482. 1974.
36. CUNARD, A.C. — Maize agronomy. Part 2. Nutrients and nutrient uptake. *World Crops* 19 (2): 200-228. 1967.
37. DEJOU, J., J. MORIZET, J. GUYOT et R. MILLET — Réponse positive de la fertilisation potassique en sols alluviaux calcimorphes humifères. *Revue de la Potasse. Section 16. 73<sup>e</sup> suite*. 1977.
38. DE LONG, W.A., D.C. MAC KAY, and H.A. STEPLER — Coordinated soil plant analysis I/Nutrient cations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 17: 262-266. 1953.
39. DEPARDON, MAUVISSEAU et BURON — Besoins en éléments fertilisants des maïs hybrides. *C.R. Acad. Agric. France* 38: 143-145. 1952.
40. DIBB, D.W., and W.K. GRIFFITH — Interactions for top corn yields. *Better Crops*, vol LXIII: 9-13. 1978.
41. DOLL, E.C., and O.P. ENGELSTAD — Effect of rainfall on corn yield response to applied potassium. *Agron. J.* 54: 276. 1962.
42. DULAC, J. — Diagnostic foliaire des céréales III. Application de la relation azote-rendement au maïs IV. Relation entre la teneur en azote de la feuille de l'épi, le rendement à l'hectare, le rendement par pied et la densité du maïs. *C.R. Acad. Agric. France*: 500-507. 1955.
43. 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.
44. ELLIS, B.G., C.J. KNAUSS and F.W. SMITH — Nutrient content of corn as related to fertilizer application and soil fertility. *Agron. J.* 48: 455-459. 1956.
45. ELZAM, O.E., T.K. HODGES — Calcium inhibition of potassium absorption in corn roots. *Plant Physiol.* 42: 1483-1488. 1967.
46. ENGLEHORN, A.J., J. PESEK, and W.D. SHRADER — Role of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in continuous corn culture on Nicollet and Webster soils. *Iowa Agric. Exp. Sta. Res. Bull.* 522. 1964.
47. ESTES, G.O., D.W. KOCH, and T.F. BRUETSCH — Influence of potassium nutrition on net CO<sub>2</sub> uptake and growth in maize. *Agron. J.* 65: 972-975. 1973.
48. FEHRENBACHER, J.B. and H.J. SNIDER — Corn root penetration in Muscatine, Elliott and Cisne soils. *Soil Sci.* 77: 281-291. 1954.
49. FINK, R.J., and D. WESLEY — Corn yield as affected by fertilization and tillage system. *Agron. J.* 66: 70-71. 1974.
50. FISHER, F.L. — Nutrient balance affects corn yield and stalk strength. *Tex. Agric. Exp. Sta. — Better Crops* 38: 15-17. 40. 1954.
51. FISHER, F.L. — The influence of nutrient balance on yield and lodging of corn. *Agron. J.* 58: 201-204. 1960.
52. FOURCASSIÉ, F. — Diagnostic foliaire du maïs — Réflexions sur la méthodologie. Application aux champs d'essai de fertilisation, in « *Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation* » 1<sup>er</sup> Colloque - Montpellier: 309-315. 1964.
53. FOY, C.D., and S.A. BARBER — Magnesium absorption and utilization by two inbred lines of corn. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* 22: 57-62. 1958.
54. FOY, C.D., and S.A. BARBER — Magnesium deficiency and corn yield on two acid Indiana soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 22: 145-148. 1958.
55. GALLAHER, R.N., W.L. PARKS, and L.M. JOSEPHSON — Effect of levels of soil potassium, fertilizer potassium, and season on yield and ear leaf potassium content of corn inbreds and hybrids. *Agron. J.* 64: 645-647. 1972.
56. GAMBOA, A. — La fertilisation du maïs. *Inst. Intern. Potasse. Berne. Bulletin IIP n°5*, p. 72. 1978.

57. GARAUDEAUX, J., et H. CHEVALIER — Études des interactions entre azote et potasse réalisées à la Station Agronomique d'Aspach le Bas. Imprimerie Union, Mulhouse, p. 220. 1967.
58. GARAUDEAUX, J., et H. CHEVALIER — Études des interactions entre fumures azotées et potassiques. Résultats globaux obtenus dans les essais de longue durée de la Station Agronomique d'Aspach le Bas. C.R. Acad. Agric. France 12: 746-759. 1975.
59. GAUTIER, P. et A. LANGLET — Influence de la fertilisation starter localisée sur la teneur en éléments minéraux de la feuille de maïs à la récolte. C.R. Acad. Agric. France 56: 51-56. 1970.
60. GILLET, J.P. et D. COUTURE — Compte rendu d'essais techniques de travail du sol. Boigneville - ITCF 1978.
61. GROS, A. — Le développement de la fertilisation au cours de la décennie 1962-1972. C.R. Acad. Agric. France: 516-540. 1973.
62. HAHNE, H.C., and E.R. ORCHARD — Maize nutrition. II. Potassium, calcium and magnesium content of maize leaves in relation to fertilizer treatment and grain yield. *Agrochimica* 2: 85-92. 1970.
63. HANWAY, J.J. — Corn growth and composition in relation to soil fertility. I. Growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield. II. Uptake of N, P, K, and their distribution in different plant parts during the growing season. III. Percentages of N, P, K, in different plant parts in relation to stage of growth. *Agron. J.* 54 I: 145-148. II: 217-222. III: 222-229. 1962.
64. HANWAY, J.J., S.A. BARBER, R.H. BRAY et al — North Central regional potassium studies. III. Fields studies with corn. *Iowa Agric. Exp. Sta. Res. Bull.*; 503, p. 32. 1962.
65. HEATHCOTE, R.G. — Potassium fertilization in the Savanna zone of Nigeria. *Potash Review*, Subject 16, 57th suite. 1972.
66. HOFFER, G.N., and B.A. KRANTZ — Deficiency symptoms of corn and small grains, in «Hunger signs in crops»: 59-105. 1949.
67. HOOKER, A.L., P.E. JOHNSON, M.C. SHURTLEFF, and W.D. PARDEE — Soil fertility and northern corn leaf blight infection. *Agron. J.* 55: 411-412. 1963.
68. HOOKER, A.L. — Plant nutrients on stalk rot and lodging. *Better Crops*. 1966.
69. HUGHES, A.D., R.J. UNWIN, and P.A. JOHNSON — Amounts of N, P and K fertilisers needed by maize intended for fodder production in Southern England. *J. Sci. Fd. Agric.* 29: 669-676. 1978.
70. HUTTER, W. — Énergie consommée par la production de quelques cultures. C.R. Acad. Agric. France, n° 4: 297-308. 1976.
71. HUTTON, C.E., W.K. ROBERTSON, and N.D. HANSON — Crop response to different soil fertility levels in a 5 by 5 by 2 factorial experiment. I. *Corn. Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*: 531-537. 1956.
72. JOHNSON, P.E. — Potassium-nitrogen balance for high corn yields. *Univ. of Illinois Urbana. Better Crops* 36, n° 5: 6-12, 47-50. 1952.
73. JOHNSON, J.W. — Potassium reduces dry weather and late harvest risks. *Better Crops*, Vol LXIII: 12-14. 1979.
74. JONES, J.B. Jr — Molybdenum content of corn plants exhibiting varying degrees of potassium deficiency. *Science* 149, 94. 1965.
75. JOSEPHSON, L.M. — Effects of potash on premature stalk dying and lodging of corn. *Agron. J.* 54: 179-180. 1962.
76. JUSTE, C. et J. DECAU — Nutrition et fertilisation du maïs en France. *Symp. Probl. Fertil. et Nutr. Maïs, Novi Sad, Yougoslavie*: 39-57. 1974.
77. KEY, J.L., L.T. KURTZ, and B.B. TUCKER — Influence of ratio of exchangeable calcium-magnesium on yield and composition of soybeans and corn. *Soil Sci.* 93: 265-270. 1962.
78. KISSEL, D.E., and J.L. RAGLAND — Redistribution of nutrient elements in corn: N, P, K, Ca and Mg redistribution in the absence of nutrient accumulation after silking. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31: 227-230. 1967.
79. KOCH, J.T., E.R. ORCHARD, and M.E. SUMNER — Leaf composition and yield response of corn in relation to quantity-intensity parameters for potassium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 94-98. 1970.
80. KOCH, D.W., and G.O. ESTES — Influence of potassium stress on growth, stomatal behaviour, and CO<sub>2</sub> assimilation in corn. *Crop Science* 15, n° 5: 697-699. 1975.  
— Influence de la carence en potassium sur la croissance et le comportement des stomates et l'assimilation de CO<sub>2</sub> chez le maïs. *Revue de la Potasse - Berne - Section 3*, 56<sup>e</sup> suite, 1976.
81. KRANTZ, B.A., and W.V. CHANDLER — Lodging, leaf composition and yield of corn as influenced by heavy applications of nitrogen and potash. *Agron. J.* 43: 547-552. 1951.
82. LARSON, W.E., and W.H. PIERRE — Interaction of sodium and potassium on yield and cation composition of selected crops. *Soil Sci.* 76: 51-64. 1953.
83. LASZTITY, B. — The effects of nitrogen and potassium fertilizers on maize yield in calcareous sandy soils. *Acta Agronomica*, vol. 23, 3-4: 468-472. 1974 et *Revue de la Potasse*, Section 9, 29<sup>e</sup> suite. 1975.
84. LAWTON, K. — The influence of soil aeration on the growth and absorption of nutrients by corn plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 10: 263-268. 1945.
85. LAWTON, K., and G.M. BROWNING — The effect of tillage practices on the nutrient content and yield of corn. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* 311-317. 1948.
86. LE BUANEC, B., J. QUEMENER et C. ROUGERON — Existence d'une carence en potasse dans certaines terres noires de Limagne. C.R. Acad. Agric. France, 10: 846-852. 1979.
87. LIEBHARDT, W.C., and J.T. MURDOCK — Effect of potassium on morphology and lodging of corn. *Agron. J.* 57: 325-328. 1965, ou Effet du potassium sur la morphologie et la verse du maïs. *Revue de la Potasse*, Section 9, 13<sup>e</sup> suite. 1965.
88. LIEBHARDT, W.C., P.J. STANGEL, and T.J. MURDOCK — A mechanism for premature parenchyma breakdown in corn. *Agron. J.* 60: 496-499. 1968.
89. LIEBHARDT, W.C., and R.D. MUNSON — Effect of chloride and potassium on corn lodging. *Agron. J.* 68: 425-426. 1976.
90. LONG, O.H. and L.F. SEATZ — Correlation of soil tests for available phosphorus and potassium with crop yield responses to fertilization. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*: 258-262. 1953.
91. LOUÉ A. — La nutrition cationique du maïs et le diagnostic foliaire. *Ann. Physiol. Vég.* 4, 2: 127-148. 1962.
92. LOUÉ A. — Contribution à l'étude de la nutrition cationique et plus particulièrement potassique du maïs. *Fertilité* n° 20, 57 p. 1963.
93. LOUÉ, A. — Maize nutrition, cation requirements and potash demand. *World Crops*, n° 15, 373-379. 1963.
94. LOUÉ A. — Le diagnostic foliaire du maïs, méthodologie, état actuel des connaissances, utilisation. *Inst. Int. Potasse, Berne, 4<sup>e</sup> Colloque*: 105-116. 1965.
95. LOUÉ A. — Études sur la nutrition et la fertilisation du maïs poursuivies à Pau de 1951 à 1968. *Expér. et Et. Agron.* 108 p. 1970.
96. LOUÉ A. — Études sur la fertilisation et le problème du potassium des sols de brousses du Sud-Ouest de la France (1961 à 1971). *Expér. et Et. Agron.* 76 p. 1972.
97. LOUÉ A. — Rapports annuels des essais de fertilisation. SCSA Mulhouse, 15 volumes, 1963 à 1977.
98. LOUÉ A. — La fertilisation potassique des sols à fort pouvoir fixateur. *Dossier K<sub>2</sub>O*, n° 7, 24 p. 1977.
99. LOUÉ A. — The response to potassium dressing related to the nature of the crop, the potassium level of the soil and the magnitude of the nitrogen/potassium interaction in «Potassium in soils and crops». *Potash Res. Inst. of India - New Delhi*: 165-184. 1978.
100. LOUÉ, A., et J. QUEMENER — La recherche de l'amélioration du diagnostic sol en matière de fertilisation potassique. *Cong. Int. Sci. Sol IV*. Edmontion 1978.
101. LOUÉ, A. — The interaction of potassium with other growth factors, particularly with other nutrients. *Int. Pot. Inst.*, Bern, p. 22. 1979.
102. LOUÉ, A. — Les bases agronomiques et les contraintes économiques de l'emploi rationnel des engrais en France. *Colloque CENECA, Paris*, 1215, p. 9. 1979.
103. LOUÉ, A. — Interaction du potassium avec d'autres facteurs de croissance. *Dossier K<sub>2</sub>O* n° 15, p. 32. 1979.
104. MARTENS, J.W., and D.C. ARNY — Nitrogen and sugar levels of pith tissue in corn as influenced by plant age and by potassium and chloride ion fertilization. *Agron. J.* 59: 332-334. 1967.
105. MARTENS, J.W., and D.C. ARNY — Effects of potassium and chloride ion on root necrosis, stalk rot, and pith condition in corn. *Agron. J.* 59: 499-502. 1967.
106. MEDERSKI, H.J., and J. STACKHOUSE — Relation of plant growth and ion accumulation to soil moisture level stabilized with a divided root technique. 7th Intern. Congress of Soil Science, Madison, Wisc. USA, vol. III, IV: 467-474. 1960.
107. MELSTED, S.W. — Some observed calcium deficiencies in corn under field conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 17: 52-54. 1953.
108. MELSTED, S.W., H.L. MOTTO, and T.R. PECK — Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data. *Agron. J.* 61: 17-20. 1969.
109. MENGEL, K., and L.C. von BRAUNSCHWEIG — The effect of soil moisture upon the availability of potassium and its influence on the growth of young maize plants. *Soil Sci.* 114: 142-148. 1972.
110. MOSCHLER, W.W., G.M. SHEAR, D.C. MARTENS, G.D. JONES and R.R. WILMOUTH — Comparative yield and fertilizer efficiency of no-tillage and conventionally tilled corn. *Agron. J.* 64: 229-231. 1972.
111. MOSCHLER, W.W. and D.C. MARTENS — Nitrogen, phosphorus and potassium requirements in no-tillage and conventionally tilled corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39: 886-891. 1975.
112. MÜHLE, E., und K. FRAUENSTEIN — Der Einfluss der Düngung auf das Auftreten des Beulenbrandes an Körnermais. *Nachrichtenbl. Pflanzenschutzd. DDR* 20: 15-18. 1966.
113. MUNSON, R.D. — Interaction of potassium and other ions, in «The role of potassium in agriculture». *American Society of Agronomy Madison, Wisc. USA. Chapt 16*: 321-353. 1968.
114. MURDOCK, J.T., P.J. STANGEL, and R.E. DOERSCH — How fertility level and balance can affect corn production. *Better Crops* 46 (2): 16-21. 1962.
115. NELSON, L.B. — The mineral nutrition of corn as related to its growth and culture. *Advances in Agro.* 8: 321-375. 1956.
116. NIELSEN, K.F., R.B. CARSON, and I. HOFFMAN — A study of ion interactions in the uptake of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, chlorine and sulfur by corn. *Soil Science* 95: 315-321. 1963.
117. OTTO, H.J., and H.L. EVERETT — Influence of nitrogen and potassium fertilization on the incidence of stalk rot of corn. *Agron. J.* 48: 301-305. 1956.
118. PARKS, W.L., and W.M. WALKER — Effect of soil potassium, potassium fertilizer and method of fertilizer placement upon corn yields. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33: 427-429. 1969.
119. PARKS, W.L., and P.L. RUSS — Effects of potash on premature stalk dying and lodging of corn. *Agron. J.* 54: 179-180. 1962.
120. PEASLEE, D.E., and D.N. MOSS — Photosynthesis in K and Mg deficient maize leaves. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 30: 220-223. 1966.
121. PEASLEE, D.E., J.L. RAGLAND, and W.G. DUNCAN — Grain filling period of corn as influenced by phosphorus, potassium, and the time of planting. *Agron. J.* 63: 561-563. 1971.
122. PENSTON, N.L. — Studies of the physiological importance of the mineral elements in plants. The variation in potassium content of maize leaves during the day. *New Phytol.* 37: 1-14. 1935.
123. PERIGAUD, S. — Effets de la résistance mécanique et du déficit en oxygène sur la nutrition minérale du maïs. C.R. Acad. Agric. Fr. 52: 702-707. 1966.
124. PERRENOUD, S. — Potassium and plant health. *Inter. Potash Inst. Bern. Bulletin I.P.I.* n° 3, p. 218. 1977.
125. PERRENOUD, S. — Potassium et santé des plantes. *Dossier K<sub>2</sub>O SCSA* n° 12: 3-28. 1978.
126. PESEK, J. — Potassium nutrition of soybeans and corn, in «The role of potassium in Agriculture». *Madison, USA. Chapt. 20*: 447 - 468. 1968.
127. PIERRE, W.H., and C.A. BOWER — Potassium absorption by plants as affected by cationic relationships. *Soil Sci.* 55: 23-26. 1943.

128. QUEMENER, J. — The measurement of soil potassium. Intern. Pot. Inst. Bern. Research Topics n° 4, p. 48. 1978.  
— «Analyse du potassium dans les sols». Dossier K<sub>2</sub>O n° 5, p. 26. 1976.
129. ROBERTSON, W.K., L.C. HAMMOND, and L.G. THOMPSON, Jr — Yield and nutrient uptake by corn for silage on two soil types as influenced by fertilizer, plant population and hybrids. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29: 551-554. 1965.
130. ROBERTSON, W.K., L.G. THOMPSON, Jr, and L.C. HAMMOND — Yield and nutrient removal by corn for grain as influenced by fertilizer, plant population and hybrid. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32: 245-249. 1968.
131. ROSSI, N., G. CASALICCHIO, e U. PALLOTA — Sulla diagnostica fogliare del mais da granella in «Le Contrôle de l'Alimentation des Plantes Cultivées». 3<sup>e</sup> Colloque Budapest: 325-333. 1972.
132. ROUTHENKO, W. et J.P. SOYER — Contrôle de la nutrition du maïs en cours de végétation. Bull. Tech. Inf. n° 264-265: 935-938. 1971.
133. ROUTHENKO, W., et E. LUBET — Rôle de l'équilibre cationique et de chacun des principaux cations dans le déclenchement du phénomène d'intoxication ammoniacale des jeunes plants de Zea Mays. C.R. Acad. Sci. 262: 281-284. 1966.
134. SAYRE, J.D. — Mineral accumulation in corn. Plant Physiol. vol. 23 (3): 267-281. 1948.
135. SAYRE, J.D. — Mineral accumulation of corn in «Corn and corn improvement». Amer. Soc. Agr. vol. V: 293-314. 1955.
136. SCHMITZ, G.W., and P.F. PRATT — Exchangeable and non exchangeable potassium as indexes to yield increases and potassium absorption by corn in the greenhouse. Soil Sci. 76: 345-353. 1953.
137. SCHULTE, E.E. — Fertility needs change under conservation tillage. Crops and Soils Magazine. V. 31 n° 4: 10-11. 1979.
138. SCOTT, A.D., and L.F. WELCH — Release of non exchangeable soil potassium during short periods of cropping and sodium tetraphenylboron extraction. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 128-132. 1961.
139. SEATZ, L.L., A.J. STERGES, and J.C. KRAMER — Anion effects on plant growth and anion composition. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22: 149-152. 1958.
140. SIEBOLD, M. — Einfluss der Kalidüngung auf die Stengelfäule bei Kornmais. Gesunde Pflanze 26: 65-68. 1974.
141. SMID, A.E., R.I. BARNHISEL, and D.E. PEASLEE — X-ray emission technique for determining potassium in corn leaves. Agron. J. 64: 78-80. 1972.
142. SMID, A.E., and D.E. PEASLEE — Growth and CO<sub>2</sub> assimilation by corn as related to potassium nutrition and simulated canopy shading. Agron. J. 68, n° 6: 904-908. 1976  
et Revue de la Potasse, Section 9, 38<sup>e</sup> suite, 1977.
143. SNIDER, H.J. — Strong roots make high corn yields. Univ. of Illinois - Urbana. Better Crops 37, n° 7: 17-19. 1953.
144. SOUBIES, L. et R. GADET — L'exportation d'éléments fertilisants par le maïs. C.R. Acad. Agric. France 39: 176-178. 1953.
145. SOYER, J.P., E. LUBET, M. MENET, et R. CHIGNON — Entretien de la fertilité phosphopotassique du sol en culture céréalière à rotation simple (monoculture maïs ou rotation blé/maïs). C.R. Acad. Agric. France, n° 11: 843-857. 1976.
146. STANFORD, G., J.B. KELLY, and W.H. PIERRE — Cation balance in corn grown on high lime soils in relation to potassium deficiency. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 6: 335-341. 1942.
147. STANGEL, P.J. — N-K means high profit corn. Better Crops 48: 8-13. 1965.
148. STUKENHOLTZ, D.D., R.J. OLSEN, G. GOGAN, and R.A. OLSON — On the mechanism of phosphorus-zinc interaction in corn nutrition. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30: 759-763. 1966.
149. TERMAN, G.L., S.E. ALLEN, and B.N. BRADFORD — Nutrient dilution antagonism effects in corn and snap beans in relation to rate and source of applied potassium. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 680-685. 1975.
150. THAYER, P., and L.E. WILLIAM — Effect of nitrogen, phosphorus and potassium concentrations on the development of Gibberella stalk and root rot of corn. Phytopathology 50: 212-214. 1960.
151. THOMAS, W., and W.B. MACK — The foliar diagnosis of Zea mays subjected to differential fertilizer treatment. J. Agric. Res. 58: 477-491. 1939.
152. THOMPSON, J.W. — Effects of fertilizers and soil amendments on the mineral constituents of maize. Soil Sci. 94: 323-330. 1962.
153. TRIPLETT, G.B. Jr and D.M. VAN DOREN, Jr — Nitrogen, phosphorus and potassium fertilization of non-tilled maize. Agron. J. 61: 637-639. 1969.
154. TURK De, E.E., L.K. WOOD, and R.H. BRAY — Potash fixation in Corn-Belt soils. Soil Sci. 55: 1-12. 1943.
155. TYNER, E.H. — The relation of corn yields to leaf nitrogen phosphorus and potassium content. Soil Sci. Soc. Amer. Proc.: 317-323. 1946.
156. TYNER, E.H., and J.W. WEBB — The relation of corn yields to nutrient balance as revealed by leaf analysis. Journ. Amer. Soc. Agro. 38: 173-185. 1946.
157. VIETS, F.G., C.E. NELSON, and C.L. CRAWFORD — The relationships among corn yields, leaf composition and fertilizer applied. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 18: 297-301. 1954.
158. WALKER, W.M. and W.L. PARKS — Effect of soil potassium, potassium fertilizer, and method of placement upon lodging in corn. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33: 909-911. 1969.
159. WALKER, W.M., and T.R. PECK — Relationship between corn yield and plant nutrient content. Agron. J. 66: 253-256. 1974.
160. WALKER, W.M., and T.R. PECK — Relationship between corn yield and plant potassium. Agron. J. 67: 445-448. 1975.
161. WALLACE, T. — The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms. A color atlas and guide. H.M. Stationery Office, London. 1951.
162. WASHKO, J.B. — Correcting potash deficiency in growing corn. Tennessee Agric. Exp. Sta. 93, p. 4. 1945.
163. WELCH, L.F., P.E. JOHNSON, G.E. Mc KIBBEN, L.V. BOONE, and J.W. PENDLETON — Relative efficiency of broadcast versus banded potassium for corn. Agron. J. 58: 618-621. 1966.
164. WELCH, L.F. — Effect of N, P, and K on the percent and yield of oil in corn. Agron. J. 61: 890-891. 1969.
165. WINTERS, E. — Crop response to potassium fertilization. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 8: 162. 1945.
166. WITTELS, H., and L.F. SEATZ — Effect of potash fertilization on yield, stalk breakage, and mineral composition of corn. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 17: 369-371. 1953.
167. YORK, E.T., R. BRADFELD, and M. PEECH — Influence of lime and potassium on yield and cation composition of plants. Soil Sci. 77: 53-63. 1954.
168. YOUNTS, S.E., and R.B. MUSGRAVE — Growth, maturity and yield of corn as affected by chloride in potassium fertilizer. Agron. J. 50: 423-426. 1958.
169. YOUNTS, S.E., and R.B. MUSGRAVE — Chemical composition, nutrient absorption and stalk rot incidence of corn as affected by chloride in potassium fertilizer. Agron. J. 50: 426-429. 1958.
170. YOUNTS, S.E. — Trends in soil fertility and plant nutrition. ASA Special Publ. n° 20, Moving off the yield plateau: 69-82. 1971.
171. Anonyme — Parasites et carences du maïs. Brochure AGPM 1966.
172. Anonyme — La fertilisation du maïs. Brochure de l'ITCF et de l'AGPM 8 p. 1974.
173. Anonyme — Rapport d'orientation AGPM XXIX Congrès. Pau: 26-27. 1978.
174. Anonyme — Utilisation de l'énergie en agriculture: maintenant et pour l'avenir. Traduction CNEEMA, BI n° 250. 1978.