AU SERVICE DE L'AGRICULTURE

DOSSIER K_2O

N° 7 - Mars 1977

La FERTILISATION POTASSIQUE des SOLS à FORT POUVOIR FIXATEUR

par André LOUÉ, Ingénieur Agronome I.N.A.

Département d'Agronomie de la S.C.P.A. - MULHOUSE

Introduction et position du problème

Lorsqu'un engrais potassique est apporté dans un sol, une très petite quantité d'ions K passe dans la solution du sol, une quantité beaucoup plus grande va se fixer, s'adsorber sur les surfaces externes des colloïdes argileux et grossir le stock d'ions K dits "échangeables". Ces deux états ou positions de l'ion K le mettent facilement à la disposition des plantes. Mais une certaine quantité d'ions K peut être fixée ou rétrogradée à l'intérieur des colloïdes minéraux du sol, c'est-à-dire entre les feuillets d'argile et être non échangeable.

S'il existe des méthodes, assez bien normalisées bien que nombreuses, de détermination de K échangeable, par contre il n'y a pas de méthode systématique de détermination de K fixé ou rétrogradé. Cette fixation a cependant fait l'objet de très nombreuses études (1, 2, 4, 6, 9, 12, 13). On sait qu'elle dépend surtout de la quantité et de la nature des argiles. La fixation est d'autant plus importante que le sol est plus riche en argiles à expansion telles que : montmorillonite, illites ouvertes ou dégradées, vermiculite...

D'autre part, beaucoup d'études ont porté sur les effets des alternances d'humectation et de dessiccation et cette dernière a nettement tendance à accroître le taux de fixation du potassium apporté (3, 5, 8).

Les différentes méthodes de mesure du pouvoir fixateur (PF) des sols vis-à-vis de l'ion K, consistent à mesurer le potassium resté à l'état dit échangeable (échange par l'acétate d'ammonium le plus souvent) après un apport déterminé de potassium.

La méthode ici pratiquée est celle de Van der Marel (14) qui réalise l'échange par l'acétate de magnésium (de préférence à l'acétate d'ammonium, car l'ion NH_4 peut

O. R. S. T. O. M. 29 NOV. 1978
Collection de Référence
n° 9447 Agn

occuper des sites de fixation du potassium). Les résultats sont exprimés en % de la quantité de potassium introduite qui est d'ailleurs élevée (1 pour 1000 de K_2O par rapport au sol sec).

Le rapport "K fixé/K ajouté" reste en effet constant (sauf pour les terres très légères) pour des apports très variables, pouvant atteindre plusieurs tonnes K_2O/hectare.

La technique de Van der Marel consiste à introduire dans le sol une solution de KCl et à mesurer le potassium échangeable avant et après cette addition. Deux variantes de cette méthode sont ici pratiquées ; selon qu'après l'apport de KCl, le sol est séché une nuit à 70°, ou laissé à l'état humide. On obtient ainsi les pouvoirs fixateurs à l'état humide et à l'état sec, exprimés en % de la quantité de potassium introduite (qui correspond à 3 tonnes de K_2O pour un hectare de 3000 tonnes de terre, c'est-à-dire 1°/°°).

Dans la pratique de la fertilisation potassique, le PF ainsi défini a pour effet de neutraliser au moins temporairement, sinon irréversiblement, une partie de la dose apportée. Il conviendrait donc en stricte logique de majorer la dose calculée par ailleurs, d'un coefficient tenant compte du PF. En France, jusqu'à un passé récent, on s'est contenté d'appliquer un coefficient unique de l'ordre de 1,2 pour se prémunir contre un blocage hypothétique moyen. On peut douter dans bien des cas que les agriculteurs aient appliqué cette majoration de sécurité de 20 %. Cela pourrait expliquer en partie qu'il a été souvent constaté un faible enrichissement des sols en K échangeable et ce d'autant plus que la mesure faite depuis 5 ou 10 ans d'un grand nombre de PF sur des sols de France a montré qu'il dépassait en fait très souvent la barre des 20 %.

La figure 1 montre pour environ 70 essais potasse du réseau expérimental de la SCPA, la distribution du PF après séchage en fonction du taux d'argile. Grâce à de nombreuses déterminations de PF, le Département d'Agronomie de la SCPA a pu introduire cette donnée dans la détermination de la fumure potassique de redressement. QUÉMENER a en effet pu proposer la relation moyenne suivante (10), figure 1 :

PF (en % de K ajouté) = (0,1 × argile en °/°°) + 15

Par exemple, un sol à 300 °/°° (ou 30 % d'argile) fixe en moyenne 45 % du potassium ajouté.

Comme il apparaît sur la figure 1, du fait de la nature des argiles, il y a des fluctuations plus ou moins importantes, autour de cette relation moyenne. Mais celle-ci conserve une assez bonne représentativité, car les sols échantillonnés recouvrent la plupart des sols du pays. La relation précédente est d'ailleurs destinée à s'améliorer par la prise en considération d'un beaucoup plus grand nombre de déterminations de PF, en dehors d'essais (environ 3000 actuellement).

Le besoin en potasse du sol, dans le cas d'une fumure d'enrichissement, s'exprime ainsi par la relation suivante (10) :

$$\text{Besoin en K} = \frac{\Delta K \times \text{poids de terre}}{1 - \frac{PF}{100}} = \frac{\Delta K \times \text{poids de terre}}{1 - \frac{\text{argile en °/°° + 150}}{1000}}$$

avec ΔK = augmentation de teneur en K_2O échangeable °/°° recherchée.

QUÉMENER fait aussi remarquer qu'il n'a pas été tenu compte, ici, du taux de matière organique du sol dans l'estimation du pouvoir fixateur, car les résultats obtenus par cet auteur ont été contradictoires, bien que le principe le plus couramment admis soit que la matière organique abondante diminue l'importance du PF.

C'est ainsi que RÉMY et col, à la Station de Laon, ont adopté un coefficient de fixation faisant intervenir argile et matière organique (11). Selon QUÉMENER (résultats non publiés), la matière organique aurait une faible valeur explicative des variations de PF.

Dans la détermination du PF, il y a également lieu de préciser si l'analyse granulométrique est faite avec ou sans destruction du calcaire. Dans ce dernier cas, la formule devrait comporter un terme correctif pour tenir compte du taux de calcaire et pourrait devenir :

PF = (0,1 argile en °/°° − 0,03 CO_3 Ca °/°°) + 15

Dans la pratique des analyses de sols de routine, la connaissance du taux d'argile permet donc de déduire d'une façon approchée le PF (figure 1).

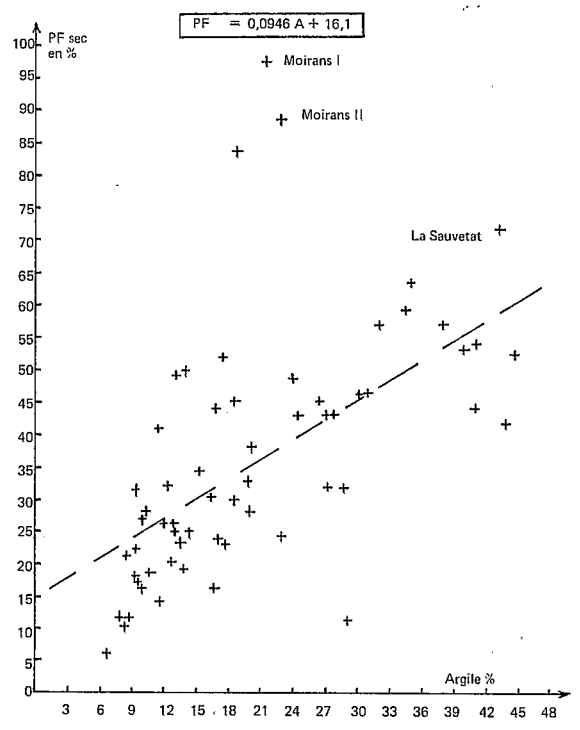


Figure 1 : Pouvoir fixateur vis-à-vis du potassium en fonction du taux d'argile.

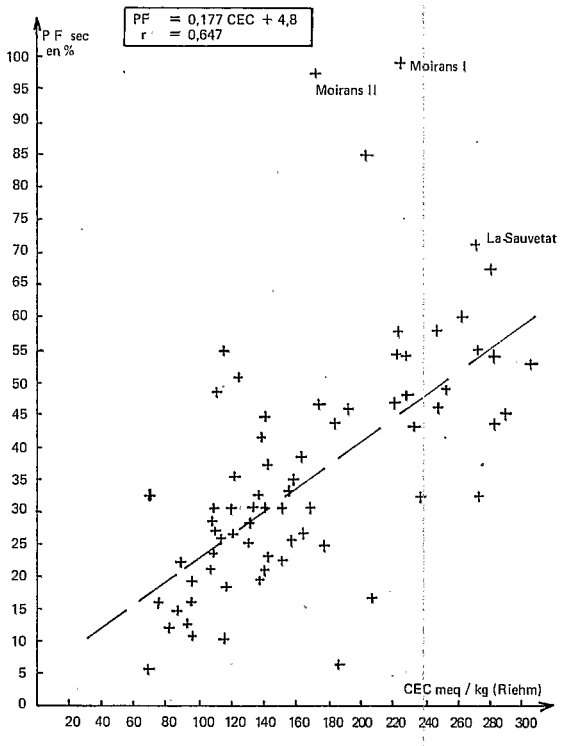


Figure 2 : Pouvoir fixateur vis-à-vis du potassium en fonction de la capacité d'échange.

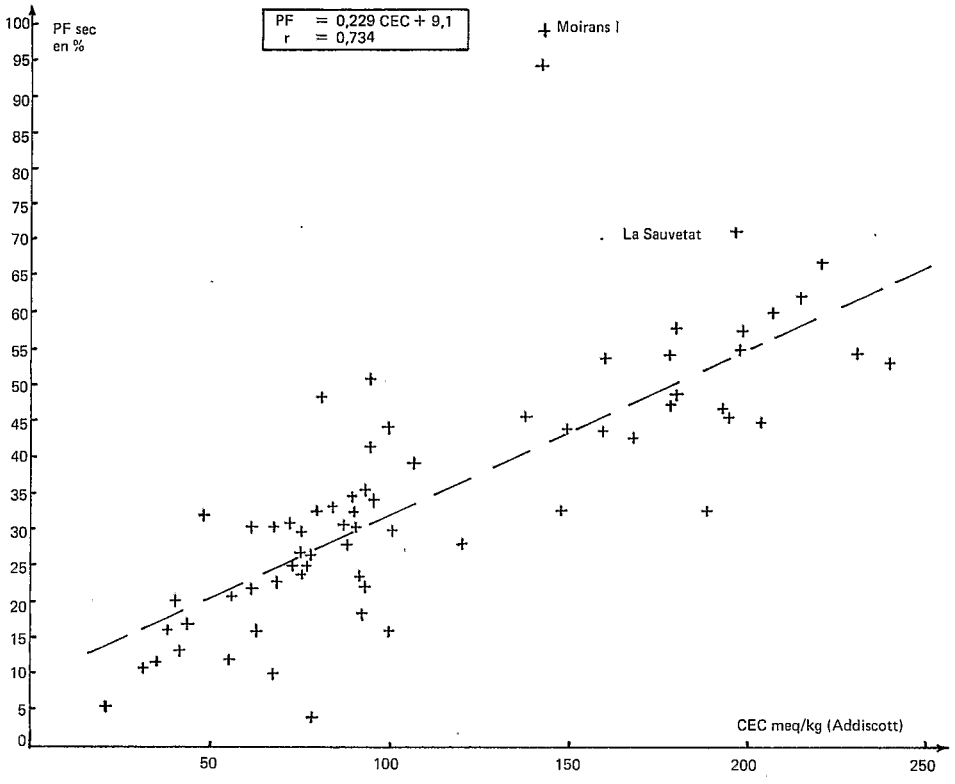


Figure 3 : Pouvoir fixateur vis-à-vis du potassium en fonction de la capacité d'échange minérale.

La figure 2 montre pour les mêmes points, que la prise en considération de la capacité d'échange pour les cations (déterminée par la méthode RIEHM), conduit à une relation plus précise.

Enfin, la figure 3 qui relie, pour les mêmes points toujours, le PF à la capacité d'échange pour les cations, non pas du sol entier, mais seulement de sa fraction minérale, c'est-à-dire de l'argile essentiellement (mesurée par la méthode ADDISCOTT), donne une approche encore meilleure.

Pour les sols du réseau expérimental potasse de la SCPA, le PF après séchage a varié de 5 à 98 % du potassium ajouté. **La mesure du PF se révèle donc à l'usage une donnée très importante pour la détermination de la fumure potassique.**

La constatation de forts pouvoirs fixateurs sans séchage (dépassant par exemple 50 %), a permis d'expliquer des résultats culturaux et expérimentaux très troublants.

L'existence de sols à fort PF était connue depuis longtemps, mais en fait, 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 dont nous citerons en particulier :

a) 1960-1964 : Examen de cas de fixations dans les sols du Ried en Alsace, au moyen de cultures en pots à la Station d'Aspach. En 1960, l'expérimentation portait sur le lin sur un sol à 53,9 % d'argile, 23,4 % de matière organique et 0,08 °/°° de K_2O échangeable. Le résultat très dominant était la très forte influence de la localisation de la potasse dans les pots. Par rapport à l'apport uniforme, la production de matière sèche était multipliée par 1,5 et le rendement en graines par 4.

En 1961, l'essai a été repris sur maïs et les résultats confirmés.

En 1963, 1964, sur un sol à 21,0 % d'argile, 14,7 % de matière organique et à PF humide de 81 % et PF après séchage de 95 %, on a étudié l'interaction ammonium × potassium sur maïs ; l'essai a fait apparaître un effet favorable des formes ammoniacales d'azote sur l'assimilabilité du potassium, en particulier en cas d'apport uniforme et non localisé de la potasse.

b) 1966 : Implantation d'un essai potasse au champ à Moirans (Isère) à la suite de cas troublants de champs de maïs ayant reçu d'assez fortes fumures potassiques et présentant néanmoins les signes caractéristiques de la déficience K (7).

c) 1970 : Implantation d'un second essai potasse à Moirans pour une étude plus précise du problème (7).

d) 1972 : Reconnaissance de cas semblables en terres très argileuses de bas de pente dans le Gers, et implantation d'un essai factoriel azote × potasse à La Sauvetat (7).

e) Les études faites par Dejou et col. sur les alluvions modernes de la Vallée de la Trégonce dans l'Indre, se rattachent au même sujet (15).

Depuis lors, on peut dire que, chaque année, des cas assez similaires sont découverts, en particulier à la suite de la mise en cultures de maïs de terres lourdes de bas de pente, le maïs révélant mieux que toute autre plante les difficultés de nutrition potassique liées aux PF élevés.

L'objet du présent "Dossier K_2O" est précisément l'étude des résultats expérimentaux obtenus dans les sols à PF très élevé de Moirans I, Moirans II, La Sauvetat, dont les points représentatifs ont été reportés sur les figures 1, 2, 3.

Résultats expérimentaux sur sols à très fort pouvoir fixateur vis-à-vis du potassium

I — Essai de Moirans I (Isère) 1965 à 1970 - Maïs

Cet essai fut poursuivi de 1965 à 1970 pour étudier l'effet de doses croissantes de potasse, puis il a été remplacé par l'essai de Moirans II étudiant de façon plus approfondie le problème potassique de ces sols.

En 1965, le dispositif expérimental comportait quatre blocs de trois traitements ; K0, K1, K2, auxquels s'ajoutait un traitement NPK à base d'engrais ternaire. A partir de 1966, l'essai a étudié quatre doses : K0, K1, K2, K3. Chaque année, la fertilisation NP était uniforme.

Les conditions de sol

Il s'agit d'un sol d'alluvions de l'Isère, très riche en matières organiques, riche en chaux et magnésie, pauvre en acide phosphorique et potasse (tableau 1).

Tableau 1 : Principales caractéristiques du sol

Analyse physique (% de terre fine)	Sol	Sous-sol	Analyse chimique	Sol	Sous-sol
Eléments grossiers (sup. à 2 mm)	0	0	N total (°/°°)	3,20	3,05
Sable grossier (2 à 0,2 mm)	0,5	0,7	P_2O_5 ass. (°/°°)	0,13	0,05
Sable fin (0,2 à 0,05 mm)	9,9	12,2	K_2O éch. (°/°°)	0,08	0,04
Sable très fin (0,05 à 0,02 mm)	17,8	16,8	CaO éch. (°/°°)	6,52	6,36
Limon (0,02 à 0,002 mm)	33,9	34,9	MgO éch. (°/°°)	0,18	0,16
Argile (inf. à 0,002 mm)	23,4	24,9	pH	8,5	8,6
Calcaire	14,5	10,5	Capacité éch. (méq %)	22,0	22,5

A — Les rendements observés

Les fertilisations apportées ont été les suivantes :

1965 : Fumure NP = N80 P150, doses K_2O = 0, 150, 300 kg/ha
et 80-160-160 (N, P_2O_5, K_2O) pour le traitement dit NPK_3(soit 800 kg/ha de ternaire 10-20-20).

1966 : Fumure NP = N80 P120, doses K_2O = 0, 100, 200, 300 kg/ha.

1967 à 1970 : Fumure NP = N80 P120, doses K_2O = 0, 80, 160, 240 kg/ha.

Ce fut donc à partir de 1966 que l'essai étudia effectivement quatre doses de potasse. Les fumures N, P, K étaient appliquées chaque année fin mars, milieu d'avril, l'azote sous forme d'ammonitrate 33 %, l'acide phosphorique sous forme de supertriple-45 % et la potasse sous forme de chlorure.

Les variétés de maïs cultivées ont été successivement : Iowa 4417 en 1965, 1966 — INRA 260 en 1967, 1968, 1969 — Cargill 444 en 1970.

Le tableau 2 rapporte les rendements obtenus sur les six ans de l'essai :

Tableau 2 : Rendements en q/ha grains à 15 % d'eau

Traitements	1965	1966	1967	1968	1969	1970	Moyennes 1966 à 1970
NPK0	62,7	71,0	27,0	3,4	3,0	13,9	**23,6**
NPK1	65,8	86,2*	57,3***	20,7***	21,0***	34,6***	**43,9**
NPK2	73,3*	90,1**	69,5***	44,4***	51,7***	61,6***	**63,4**
NPK3	75,0**	87,5**	79,4***	70,6***	81,1***	78,5***	**79,4**
ppds 0,05	8,3	11,3	7,0	8,1	7,5	17,8	—
ppds 0,01	11,9	16,2	10,0	11,7	10,7	22,5	—
CV	7,5%	8,4%	7,5 %	14,7 %	14,7 %	23,6 %	—

En 1965, première année de l'essai, le maïs venait sur défriche de peupliers. En 1965 et 1966, au cours des deux premières années de mise en culture, le rendement était très élevé, même en K0, et la réponse à la potasse cependant très importante (+ 15 à + 20 q/ha). L'effet des doses de potasse était d'ailleurs très marqué en végétation et certaines parcelles K0 présentaient même des signes foliaires de déficience en potassium. D'autre part, le rendement K0 était surestimé en raison de la verse qui affectait en réalité ce traitement.

Signes de carence potassique sur maïs jeune.

L'accroissement de rendement fut légèrement moindre de K160 à K240 (+ 16,0 q/ha) mais hautement significatif en 1967, 1968, 1969.

C'est dire que chaque année, malgré les rendements très estimables obtenus en K3, le rendement maximum n'a pas été obtenu. Il eut exigé chaque année des doses de potasse énormes et inconcevables, dont l'application aurait d'ailleurs pu entraîner des déséquilibres. L'essai de Moirans II a cherché à sortir de cette impasse.

Ensuite, le rendement des parcelles K0 a très vite diminué pour devenir très faible. Les quatre planches en couleurs (pages 12 et 13) représentent l'effet potasse début juillet 1968, correspondant aux quatre doses en essai.

La photo en couleur ci-dessus représente les signes typiques de grave déficience potassique sur jeunes maïs, tels qu'ils ont été régulièrement observés sur cet essai dans les parcelles K0 et même sur certains pieds des parcelles K80.

Sur les cinq ans d'essais à quatre doses (1966 à 1970), l'effet de la potasse a été pratiquement linéaire jusqu'à K160 :

K80 — K0 = + 20,3 q/ha
K160 — K80 = + 19,5 q/ha.

La figure 4 ci-dessous montre en particulier qu'avec les doses croissantes de potasse, la variabilité annuelle du rendement diminue considérablement. L'allure des courbes de réponse suggère qu'avec des doses de l'ordre de K300, la variabilité eut sans doute été moindre et le rendement compris entre 80 et 90 q/ha.

Mentionnons pour mémoire qu'en 1969, les parcelles furent subdivisées en deux pour étudier deux niveaux de fumure azotée (N80 et N120) afin de vérifier si la dose d'azote antérieurement appliquée sur l'essai (N80) était bien suffisante. Effectivement, le rendement maximum fut obtenu dès N80.

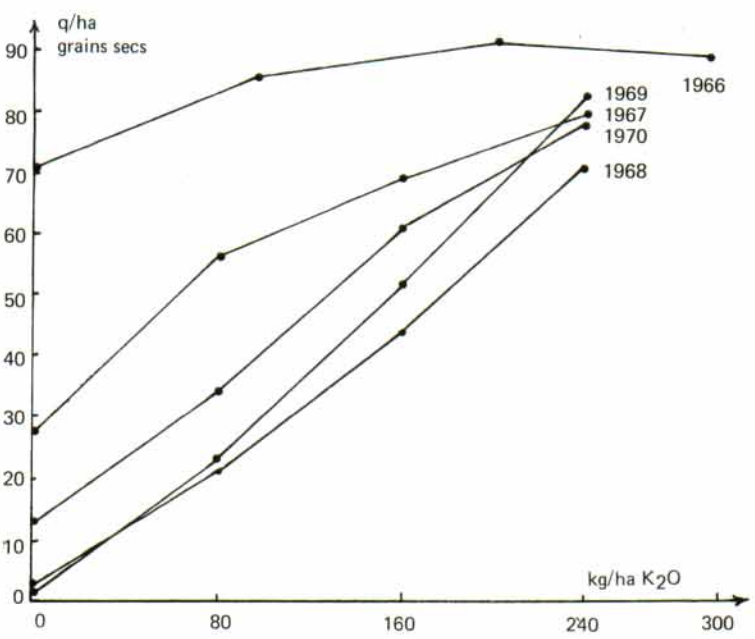


Figure 4 : Effet potasse de 1966 à 1970.

B — Les composantes du rendement

A partir de 1967, les principales composantes du rendement ont été analysées afin de déterminer celles qui étaient les plus perturbées.

a) Le nombre de pieds

L'effet des traitements sur le peuplement fut toujours positif et certaines années d'une manière hautement significative (1968, 1970).

De nombreux pieds périclitaient dès le jeune âge. Cet effet a pu être très important sur les rendements lorsque le peuplement était plutôt faible (1968, 1970).

Tableau 3 : Nombre de pieds et d'épis/hectare

Doses K_2O	Nombre de pieds/hectare				Nombre d'épis/hectare			Nombre d'épis/100 pieds		
	1967	1968	1969	1970	1967	1968	1969	1967	1968	1969
K0	53.490	52.812	82.200	53.645	47.897	9.732	6.648	90	18	8
K80	52.211	55.044	84.253	57.707	53.282*	31.606***	39.982**	102	57	47
K160	53.371	55.624	86.734	66.561**	55.126**	47.097***	54.167***	103	85	62
K240	54.264	58.928**	84.835	67.915**	56.822**	59.285***	73.990***	105	101	87
ppds 0,05	2.324	3.955	4.856	6.163	3.888	8.122	16.362	—	—	—
ppds 0,01	—	5.680	—	8.851	5.583	11.664	23.499	—	—	—
CV	2,7 %	4,4 %	3,8 %	6,3 %	4,6 %	13,7 %	19,8 %	—	—	—

b) Le nombre d'épis récoltables

L'effet des traitements sur le nombre d'épis effectifs fut considérable chaque année et cette influence fut déterminante pour rendre compte de l'ampleur de l'effet K_2O. A partir de 1968, pour les traitements K0 et K80, de très nombreux pieds furent stériles.

Ce n'est pratiquement qu'avec la dose supérieure K240 que chaque pied eut effectivement un épi.

De 1967 à 1969, le nombre d'épis/100 pieds décroît régulièrement pour chaque traitement.

c) Le rapport grains/épis

A l'effet précédent s'est ajouté chaque année un effet positif net et significatif des traitements sur le rapport grains/épis. En 1967, 1968, 1970 en particulier, les épis K0, sinon même K80 étaient plus ou moins mal conformés et pour ce facteur, il faut au moins la dose K160 pour que le rapport approche de la normale.

Tableau 4 : Rapport grains/épis et humidité du grain

Doses K_2O	Rapport grains/épis				Humidité du grain récolté			
	1967	1968	1969	1970	1967	1968	1969	1970
K0	0,585	0,513	0,685	0,637	20,8	20,8	25,0	23,6
K80	0,662***	0,567	0,694	0,549	22,0*	21,0	26,5*	23,1
K160	0,663***	0,618**	0,711	0,714	22,3**	21,4	26,9**	23,7
K240	0,670***	0,650**	0,721	0,714	21,9*	22,0*	26,8**	23,1
ppds 0,05	0,026	0,073	—	—	0,9	1,1	1,1	2,0
ppds 0,01	0,038	0,104	—	—	1,3	1,6	1,6	—
CV	2,6 %	7,8 %	—	—	2,6 %	3,4 %	2,7 %	5,6 %

d) L'humidité du grain récolté

L'humidité des grains récoltés était plutôt faible (tableau 4 ci-dessus). On note régulièrement une très légère élévation, significative le plus souvent, du taux d'humidité avec les doses de potasse.

e) La verse

La verse affecte très souvent les maïs de cette zone, le plus souvent à la suite de tornades. Ainsi, en 1967, les nombres de pieds versés furent les suivants, dans l'ordre des traitements : 27935, 11483***, 4760***, 2082*** (ppds 0,01 = 7450 pieds/ha). Les pourcentages de verse étaient de 52, 22, 9, 4 %, ce qui montre que seule la plus forte dose s'accompagne d'un faible taux de verse.

C — La nutrition minérale du maïs

Elle fut suivie par diagnostic foliaire à la floraison, à partir de 1966. Les résultats furent, chaque année, très caractéristiques de ce milieu.

La nutrition azotée était élevée avec les teneurs moyennes suivantes (3,69 % en 1966, 4,11 % en 1967, 3,78 % en 1968, 3,86 % en 1969 et 3,35 % en 1970).

Les niveaux de nutrition phosphorique furent chaque année très élevés et hautement significativement abaissés avec les doses de potasse, par suite simplement du bien meilleur développement réalisé avec K2 et K3 (0,45 à 0,37 % P en 1966, 0,60 à 0,43 % P en 1967 ; 0,63 à 0,48 % P en 1968 ; 0,49 à 0,38 % P en 1969 et 0,69 à 0,56 % P en 1970).

Le tableau 5 rapporte les résultats principaux qui concernent K, Mg, et la figure 5 la nutrition potassique.

Tableau 5 : Diagnostic foliaire potassique et magnésien

Traitements	K % de matière sèche					Mg % de matière sèche				
	1966 (20/7)	1967 (20/7)	1968 (1/8)	1969 (4/8)	1970 —	1966 (20/7)	1967 (20/7)	1968 (1/8)	1969 (4/8)	1970 —
K0	**0,87**	**0,65**	**0,60**	**0,72**	**0,77**	0,73	0,75	1,07	0,84	0,93
K1	0,86	0,81**	0,75*	0,67	0,73	0,69	0,69	1,06	0,94	1,00
K2	0,96	1,00***	0,89**	0,78	0,79	0,66	0,59**	1,00*	0,88	0,90
K3	**1,12****	**1,13*****	**1,09*****	**1,05**	**1,06****	0,55**	0,47***	0,81***	0,67	0,68**
ppds 0,05	0,16	0,05	0,12	—	0,12	0,09	0,08	0,07	—	0,13
ppds 0,01	0,23	0,07	0,18	—	0,18	0,13	0,11	0,10	—	0,19
CV	—	3,2 %	9,2 %	—	9,2 %	—	8,0 %	4,5 %	—	9,6 %

Chaque année, les niveaux potassiques sont extrêmement faibles en K0, K1 et même K2 et deviennent seulement médiocres en K3.

Avec K80 et K160, l'amélioration de nutrition potassique est compensée par le développement très accru, et la dilution qui en résulte explique le faible effet sur la teneur foliaire en K. L'effet des doses de potasse est néanmoins chaque année positif et hautement significatif en K3, mais limité. Les teneurs obtenues avec K240 correspondent encore à des parcelles K0 dans des cas de déficience grave. Rappelons à cet égard que la nutrition potassique correcte correspond à des teneurs de l'ordre de 1,8 à 2,0 % K.

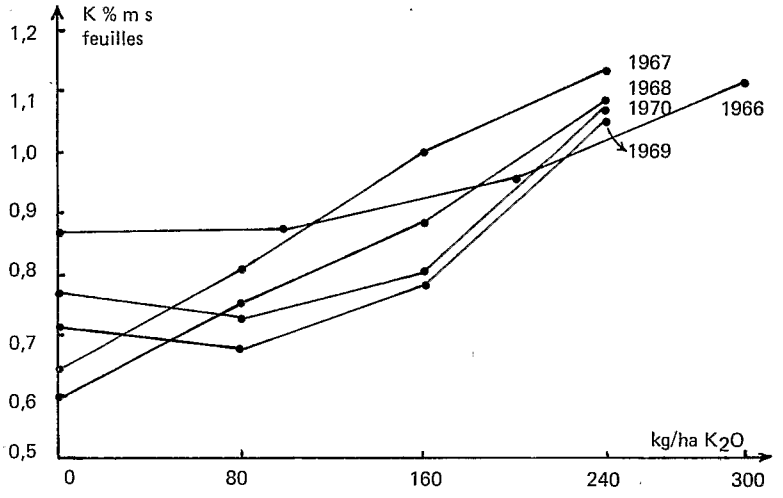


Figure 5 : Nutrition potassique de 1966 à 1970.

La figure 5 montre d'une manière frappante l'impossibilité rencontrée dans un tel cas, d'obtenir une nutrition potassique normale (théoriquement il aurait fallu appliquer des doses considérables de l'ordre de 500 à 600 kg/ha K_2O).

Corrélativement, les niveaux magnésiens ont été, chaque année, très élevés pour les quatre traitements, avec une baisse assez nette, seulement en présence de K3.

Les niveaux calciques furent très peu touchés, ainsi qu'il est normal dans ce contexte de très forte malnutrition potassique (1,23 à 1,13 % Ca en 1966, 1,45 à 1,36 % Ca en 1967, 1,59 à 1,46 % Ca en 1968, 1,34 à 1,19 % Ca en 1969).

D — Conclusions de l'essai

On a l'impression que l'essai aurait pu se poursuivre des années avec reconduction pure et simple des mêmes résultats d'année en année. La réponse énorme à la potasse résulte de la très faible utilisation de l'engrais qu'exprime bien la malnutrition en K240.

L'hypothèse d'un blocage intense de la potasse a pu se vérifier en laboratoire en 1967, au moyen de la détermination du pouvoir fixateur de ce sol vis-à-vis de l'ion K selon la technique de Van der Marel exposée en introduction.

Le pouvoir fixateur sans séchage fut trouvé de 59 % pour le sol et 92 % pour le sous-sol, et le pouvoir fixateur avec séchage de 93 % pour le sol et de 97 % pour le sous-sol.

Sur ce type de sol à pouvoir fixateur très élevé, les rendements peuvent atteindre 80 q/ha avec K240 appliqués environ un mois avant le semis. Le rendement maximum semblerait se situer très au-dessus de K240, mais on ne parvient pas à réaliser une nutrition potassique correcte.

L'essai fut donc repris sous forme d'une étude du placement et du fractionnement de K_2O, considérés comme moyens de faire absorber suffisamment de potassium sans recourir à des apports massifs avant semis.

II — Essai de Moirans II (Isère) 1970 à 1976 - Maïs

Cet essai fut donc créé en 1970 afin d'étudier d'une manière plus approfondie, le problème de la fertilisation potassique du maïs dans des conditions de sols assez semblables à celles de Moirans I et caractérisées par le très fort pouvoir fixateur vis-à-vis de K_2O.

Tableau 6 : Principales caractéristiques du sol

Analyse physique (% de terre fine)	Sol	Sous-sol	Analyse chimique	Sol	Sous-sol
Sable grossier (2 à 0,2 mm)	10,3	11,5	N total (°/°°)	2,11	1,22
Sable fin (0,2 à 0,05 mm)	16,6	19,6	P_2O_5 ass. (°/°°)	0,09	0,04
Sable très fin (0,05 à 0,02 mm)	10,3	10,9	K_2O éch. (°/°°)	0,05	0,03
Limon (0,02 à 0,002 mm)	28,2	22,7	CaO éch. (°/°°)	5,55	5,76
Argile (inf. à 0,002 mm)	23,4	18,1	MgO éch. (°/°°)	0,12	0,10
Calcaire	11,2	17,2	pH	8,4	8,6
			Capacité tot. éch. (méq %)	16,0	12,0

La texture se différencie cependant de celle de Moirans I par un pourcentage nettement supérieur d'éléments grossiers. La mise en culture plus ancienne va de pair avec un taux beaucoup moins élevé de matière organique et une capacité d'échange très inférieure. La pauvreté en potasse échangeable est très nette également comme dans tous les sols de ce type.

Le pouvoir fixateur mesuré par la méthode Van der Marel et après séchage, fut trouvé de 88 % pour le sol et de 94 % pour le sous-sol.

Le dispositif expérimental a comporté chaque année 16 traitements factoriels (4 × 2 × 2) disposés sur le terrain en *confounding* en quatre sous blocs de 8 traitements. A chaque sous bloc sont ajoutés deux traitements hors factoriel (K0 et K dose supérieure). L'essai comporte donc 40 parcelles. Mais les deux facteurs étudiés à deux niveaux (2 × 2) ayant varié en cours d'essai, les résultats doivent être présentés dans l'ordre chronologique.

Résultats de 1970

En 1970, la partie factorielle étudiait 4 doses de potasse (80, 120, 160, 200 kg/ha K_2O) apportées de quatre façons différentes (2 fractionnements × 2 placements) selon le tableau ci-dessous.

Dose 1	Dose 2	Dose 3	Dose 4	Modes d'apport
80	120	160	200	Tout le 15 avril, avant semis
40 + 40	60 + 60	80 + 80	100 + 100	Moitié le 15 avril, moitié au stade 40 cm (17 juin)
40 + 40	80 + 40	120 + 40	160 + 40	Tout le 15 avril, sauf 40 Kg K_2O apportés en starter le 14 mai
20 + 20 + 40	40 + 40 + 40	60 + 60 + 40	80 + 80 + 40	[Moitié — 20 kg K_2O] le 15 avril [Moitié — 20 kg K_2O] au stade 40 cm + K40 en starter le 14 mai

Les deux traitements accessoires étaient K0 et K240 (tout mi-avril). La fumure NP, à base d'ammonitrate et de supertriple, était uniforme, le 15 avril (N120 P180). La forme potasse était uniquement celle du chlorure de potassium 60 %.

Le maïs, variété Cargill 555, venant après maïs, fut semé à 70.000 pieds/ha le 14 mai et récolté le 30 octobre.

Les résultats n'ont pas apporté les informations espérées. A la suite d'une tornade, l'essai fut touché par la verse. Le peuplement constaté s'est légèrement élevé de K80 à K200 selon : 66.332, 67.666, 68.888, 69.388 pieds/ha.

Pour les rendements en grains secs (CV = 9,3 %), les effets mode de fractionnement et mode de placement furent très faibles et sans signification.

Seul l'effet linéaire des doses de potasse fut significatif.

Rendements q/ha grains à 15 % d'eau

K0	K80	K120	K160	K200	K240	ppds	0,05
67,0	**74,3**	**77,8**	**76,4**	**83,4***	**85,5**	Effet K	7,6

Le meilleur traitement individuel fut en tout cas K200, tout en avril avant semis, sans dose starter (86,9 q/ha).

Le diagnostic foliaire à la floraison n'a pas non plus apporté des renseignements nets.

La nutrition NP était très élevée (3,63 % N et 0,66 % P). En ce qui concerne K, seul l'effet dû aux doses de potasse fut positif et significatif (teneurs respectives de 0,99 - 0,95 - 1,04 - 1,07*% K de K80 à K200 avec ppds 0,05 = 0,07 %), mais comme à Moirans I, ces différences sont très minimes.

En dehors de l'effet massif de la potasse de K0 à K200 (+ 20 q/ha environ), l'essai ne permettait donc pas d'apporter des éléments d'information précis sur les modes d'apport de K_2O.

Résultats de 1971

En 1971, en raison de certaines complications dans la réalisation pratique des traitements, l'essai a été transformé en un essai factoriel à 4 doses de potasse (K80, K160, K240, K320) × 2 formes de potasse (pulvérulente et granulée) × 2 fractionnements (tout avant semis et [tout - 40 kg/K_2O] avant semis + K40 en starter au semis), selon le tableau ci-dessous pour chacune des deux formes.

Dose 1 K80	Dose 2 K160	Dose 3 K240	Dose 4 K320	Fractionnement
80	160	240	320	Avant semis (30 mars)
40 + 40	120 + 40	200 + 40	280 + 40	[Tout — 40 kg K_2O] le 30 mars + K40 en starter au semis

Les deux traitements accessoires étaient K0 et K400 granulés, tout avant semis.

La fumure NP uniforme fut de N120 P150, le 30 mars sur labour.

La première application de potasse (deux formes) s'est faite le 30 mars également et la seconde (sous forme granulée) au semis.

Le maïs, variété U50, fut semé le 14 avril et récolté le 12 octobre.

● En ce qui concerne le peuplement/hectare (CV = 4,5 %), l'influence des formes et du placement de K40 fut très faible et sans signification. Seul l'effet des doses globales de potasse fut positif (75.550 en K0, 80.600 en K80, 82.500 en K320) et à la limite de la signification.

● L'humidité du grain récolté fut en moyenne de 34,78 %. Les effets des traitements furent de faible amplitude (33,75 en K0 à 35,20 en K400, 34,49 en pulvérulent et 35,25 en granulé, et + 0,80 % avec K40 starter).

D'autre part, le rapport "grains secs à 15 % d'eau/épis frais" s'est élevé avec les doses de potasse : 0,561 en K0 — 0,583 en K80 — 0,592 en K320.

En ce qui concerne le rendement en grains à 15 % d'eau (CV = 4,0 %), l'effet global des traitements fut hautement significatif.

Tableau 7 : Rendements en q/ha grains à 15 % d'eau

Doses K_2O	Forme pulvérulente	Forme granulée	Effet K	Sans starter	Dont K40 starter	ppds	0,05	0,01
K80	90,6	96,6	**93,6**	91,1	96,2	Effet K	3,9	—
K160	100,0	92,1	**96,0**	94,7	97,3	Effet forme et starter	2,7	—
K240	96,3	99,1	**97,7***	100,1	95,3			
K320	96,7	99,5	**98,1***	94,7	101,5	Table K × forme et K × starter	5,5	7,5
Effet forme	95,9	96,8	Effet starter	**95,2**	**97,6**	Table forme × starter	3,9	—
Sans starter	93,9	96,5		Traitements subsidiaires		**K0 = 68,5 q/ha**		
Dont K40 starter	97,9	97,2				**K400 = 96,6 q/ha**		

● L'effet des doses de potasse est positif et significatif de K80 à K320. La fonction de production calculée sur la partie factorielle de l'essai, de K80 à K320, présente un ajustement parfait avec les rendements observés :

$$R\ (q/ha) = 90{,}15 + 0{,}0494\ K - 0{,}0000761\ K^2$$

Le rendement maximum théorique calculé est pratiquement confondu avec la dose supérieure : 98,2 q/ha avec K324.

On a donc pratiquement : K320 - K80 = + 4,5 q/ha (S).

Notons au passage que le profit maximum calculé à partir de cette fonction, correspondait à K251.

En considérant les deux traitements subsidiaires K0 et K400, on peut se demander si la fonction de production rend bien compte des rendements en dehors de l'intervalle (K80, K320). Les rendements K0 et K400 ainsi calculés seraient de 90,15 q/ha et 97,72 q/ha alors que les rendements effectifs furent de 68,46 et 96,58 q/ha.

La fonction a donc très surestimé le rendement K0, ce qui est assez logique.

La figure 6 ci-contre exprime ces observations.

— L'effet forme est faible et sans signification.

— **L'effet répartition de la fumure potassique, c'est-à-dire sans ou avec K40 starter, est non négligeable. Le placement de K40 en starter a eu un effet positif moyen de + 2,4 q/ha.**

— **L'interaction dose K × forme K est significative ; à la première dose K80, la forme granulée semble bien avoir été plus efficace que le pulvérulent (+ 6,0 q/ha) et aux doses élevées cette supériorité n'est plus que de + 2,8 q/ha.**

Ces résultats peuvent apparaître comme assez logiques. La très forte fixation du potassium pouvait en effet, a priori, militer en faveur d'une forme granulée et du placement à proximité de la graine.

Le meilleur traitement individuel observé (103,4 q/ha) associe les diverses conclusions puisqu'il s'agit du traitement K320, forme granulée, appliqué en K280 sur labour du 31 mars + K40 en starter au semis.

Le diagnostic foliaire, à la floraison a apporté des résultats assez nets en matière d'explication des effets notés sur les rendements.

La nutrition azotée, seulement moyenne, a baissé significativement avec les doses de potasse (3,51 % N en K0 et de 3,15 % N en K80 à 3,00 % N en K320) et avec K40 starter (3,15 à 2,99**% N).

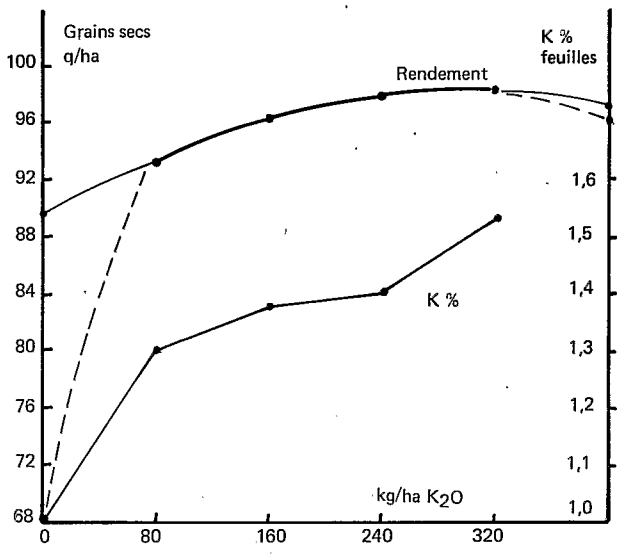


Figure 6 : Rendements et nutrition potassique en 1971

Les niveaux potassiques ont été très supérieurs à ceux de 1970.

Diagnostic foliaire (teneurs en K % de matière sèche)

K80	K160	K240	K320	ppds 0,05	Sans starter	K40 starter	ppds 0,01	K0
1,31	1,38	1,41*	1,54**	0,10	1,32	1,49***	0,09	1,02

La nutrition potassique des témoins K0 est particulièrement faible. Dès K80, l'amélioration est considérable, mais la nutrition demeure nettement insuffisante avec K320.

Sur la figure 6, l'effet potasse sur la nutrition potassique a été reporté. Le parallélisme entre rendements et teneurs potassiques foliaires est évident.

L'effet forme de potasse fut peu net et sans signification (1,39 % K en pulvérulent et 1,42 % K en granulé).

Par contre, l'effet K40 starter fut positif et très hautement significatif. Avec la même dose globale de potasse, la nutrition potassique est nettement plus améliorée lorsque le maïs reçoit la dose K40 au semis.

L'interaction "Forme × Mode de répartition de la potasse", bien que non significative, est intéressante à considérer.

Forme	Teneurs en K % de matière sèche		
	Sans starter	Dont K40 starter	Effet forme
Pulvérulente	1,28	1,51	1,39
Granulée	1,37	1,47	1,42
Effet starter	1,32	1,49	

L'effet de l'apport K40 starter est surtout net si le reste de la dose a été appliqué sous forme pulvérulente, et l'effet favorable de la potasse granulée pour la fumure de base sur labour joue seulement s'il n'y a pas d'application starter K40 granulée.

En 1971, l'essai a donc apporté les informations recherchées en matière de fertilisation potassique du maïs dans les conditions de sols à fort PF vis-à-vis du potassium. La réponse à la potasse va de 68,5 q/ha en K0 à environ 100 q/ha en K320. L'essai a surtout montré une tendance nettement propice à l'obtention d'une meilleure nutrition potassique et de meilleurs rendements, avec l'apport d'une partie de la dose (K40) sous forme granulée au semis. D'autre part, la forme granulée de la potasse s'est révélée plus efficace que la forme pulvérulente, particulièrement aux faibles doses et en l'absence d'apport de K40, forme granulée, en starter. Les meilleurs résultats (103 q/ha) ont correspondu à l'application de K240 sous forme granulée sur le labour de printemps suivie de K40 sous forme granulée en starter au semis. Ce traitement a aussi permis d'atteindre une teneur potassique foliaire de 1,65 % K.

Résultats de 1972

Le dispositif expérimental et les doses ont été identiques à ceux de 1971. Le maïs, variété U 550 fut semé le 5 avril et récolté le 28 novembre.

● En ce qui concerne le peuplement/hectare (CV = 10 %), il y a eu une légère majoration de K0 (99.500) à K400 (105.600) et de la forme pulvérulente (99.400) à la forme granulée (103.500).

● Le nombre d'épis à la récolte (CV = 11,8 %) a été majoré par les doses de potasse (63.900 en K0, 83.000 en K80, 93.000*** en K400) et par l'apport en starter (87.900* contre 79.600). Ce sont surtout les maïs K0 qui présentent un nombre d'épis très inférieur à celui de K80. L'effet de la forme de potasse fut très minime.

● L'humidité du grain récolté était élevée, de l'ordre de 43 %. Elle a diminué de K0 à K320 (49,0 — 43,9 — 42,8 — 43,2 — 42,0 %) et avec l'apport starter (43,5 à 42,5 %). Le rendement en grains secs a présenté un coefficient de variation de 12,5 %.

Tableau 8 : Rendements en q/ha grains à 15 % d'eau

Doses K_2O	Forme pulvérulente	Forme granulée	Effet K	Sans starter	Dont K40 starter	ppds	0,05	0,01
K80	51,3	53,0	**52,2**	43,3	61,0	Effet K	7,4	10,1
K160	57,8	60,3	**59,1**	55,9	62,2	Effet forme et starter	5,2	7,1
K240	63,1	57,4	**60,3***	58,8	61,8			
K320	63,8	64,6	**64,2****	61,3	67,1	Table K × forme et K × starter	10,4	14,2
Effet forme	59,0	58,8	**Effet starter**	**54,8**	**63,0****	Table forme × starter	7,4	10,1
Sans starter	53,1	56,6	Traitements subsidiaires	**K0 = 24,9 q/ha**				
Dont K40 starter	65,0	61,0		**K400 = 69,2 q/ha**				
			ppds 0,01 = 20,1 q/ha					

● L'effet des doses de potasse est positif et hautement significatif de K80 à K320. La fonction de production calculée sur la partie factorielle de l'essai, de K80 à K320, présente un très bon ajustement avec les rendements observés :

$$R\ (q/ha) = 45{,}96 + 0{,}09227\ K - 0{,}000114\ K^2$$

Le rendement maximum théorique calculé se situe légèrement hors essai et est de 64,6 q/ha avec K404. Dans les limites de l'essai, le rendement calculé pour K320 est de 63,8 q/ha. On a donc :

K320 - K80 = + 12 q/ha (HS).

Notons que le profit maximum calculé à partir de la fonction précédente, correspondait à K352, mais se trouvait très voisin du profit obtenu avec K320.

Les rendements K0 et K400 calculés seraient de 46,0 et 64,4 q/ha, alors que les rendements effectifs furent de 24,9 et 69,2 q/ha.

La fonction a donc, tout comme en 1971, très surestimé le rendement K0. La figure 7 ci-contre exprime ces faits. On y a reporté aussi l'effet potasse de K80 à K320 avec et sans K40 starter. On constate qu'en prolongeant la courbe "sans K40 starter", on aboutirait à un rendement K0 voisin de celui effectivement observé.

● L'effet forme fut très faible et sans signification, comme en 1971.

● L'effet répartition de la fumure potassique, c'est-à-dire sans ou avec K40 starter, est hautement significatif, confirmant ainsi la tendance observée en 1971. Le placement de K40 en starter a eu un effet positif moyen de + 8,2 q/ha.

● L'interaction "dose K × forme K", significative en 1971, fut très faible en 1972. On observe tout au plus une très légère supériorité de la forme granulée aux plus faibles doses de potasse.

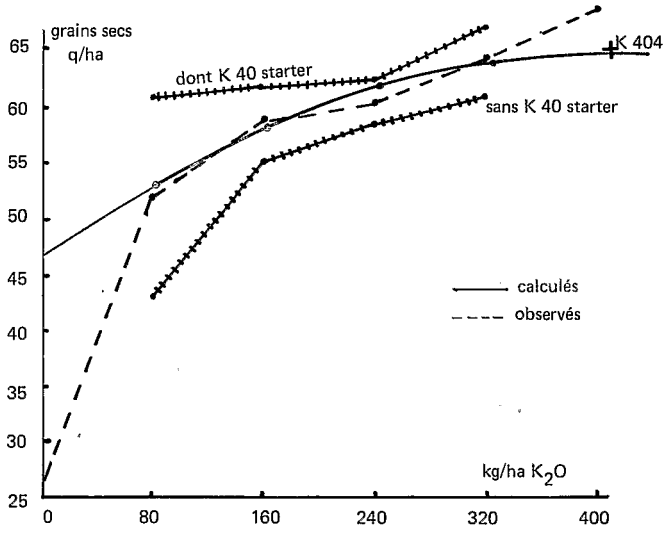


Figure 7 : Rendements en 1972.

● L'interaction "dose K × mode de répartition" est beaucoup plus nette et confirme les observations et hypothèses de 1971. L'effet de K40 en starter décroît avec l'élévation de la dose globale de K_2O (+ 17,7 ; + 6,3 ; + 3,0 ; + 5,8 q/ha).

L'effet de K40 starter est considérable à la dose K80 et l'on constate en particulier que le même rendement de 61 q/ha est obtenu avec K80 dont K40 starter et K320 sans starter (figure précédente, courbes hachurées).

● L'interaction "forme K × mode de répartition" est également assez marquée. La forme granulée dépasse la forme pulvérulente seulement en l'absence de K40 starter.

● Au niveau des traitements individuels de la partie factorielle 4 × 2 × 2, l'examen des tables d'interaction et des effets principaux montre que le meilleur traitement est K320 (forme granulée ou pulvérulente) appliqué en K280 sur labour + K40 en starter au semis.

Essai de Moirans I (Isère)

Une parcelle K0

Une parcelle K80

Le diagnostic foliaire à la floraison (2 août) a indiqué des niveaux élevés en azote (3,57 % N) et en phosphore (0,47 % P).

En ce qui concerne la nutrition potassique, l'effet des doses de potasse est positif et hautement significatif.

Diagnostic foliaire (teneurs en K % de matière sèche)

K80	K160	K240	K320	ppds 0,05	Sans starter	Avec starter	K0	K400
1,29	**1,48***	**1,49***	**1,60****	0,18	1,47	1,46	**1,13**	**1,84**

début juillet

Une parcelle K160

Une parcelle K240

La nutrition potassique des témoins K0 de référence fut particulièrement faible. L'amélioration est notable avec K80 (+ 0,16 % K) et surtout K160 (+ 0,35 % K), mais le niveau obtenu avec K320 est sensiblement inférieur à celui obtenu avec K400, qui correspond à la zone de bonne nutrition.

Les effets "forme" et "mode d'apport" n'ont pas été significatifs. Cependant, la forme granulée fut plus efficace aux premiers niveaux (+ 0,29 % K en K80 et + 0,18 % K en K160), en bon accord avec les rendements et, d'autre part, au niveau K80, l'apport de K40 en starter fut plus efficace (+ 0,18 % K).

A la faible dose K80, la nutrition potassique est particulièrement dépendante de la forme et du mode d'apport.

Traitements K80 et forme		K %	Grains q/ha
K80	Pulvérulente sans starter	1,07	40,7
K80	Pulvérulente dont K40 starter	1,22	62,0
K80	Granulée sans starter	1,33	46,0
K80	Granulée dont K40 starter	1,54	60,0

En 1972, l'essai a donc permis de mieux préciser les résultats antérieurs. La réponse à la potasse s'est située entre 25 q/ha en K0 et 69 q/ha en K400, avec optimum rentable à K350, ceci dans le cas où toute la dose de K_2O est appliquée sur labour avant semis.

Mais l'essai a surtout montré que le rendement pouvait encore être amélioré, même en présence de fortes doses sur labour, avec une dose globale un peu plus faible, de l'ordre de K320, fractionnée en K280 sur labour et K40, forme granulée, placée en starter au semis.

Résultats de 1973

Le dispositif expérimental et les doses ont été identiques à ceux de 1971 et 1972. Les applications avant semis ont été faites le 6 avril pour P et K, le 17 avril pour N et l'application de K40 au semis a été effectuée en surface (et non en placement starter).

Le maïs, variété U550, fut semé le 2 mai. L'essai a été très touché par un orage de grêle le 21 juillet et il fut très gravement versé.

La hauteur des maïs, mesurée le 21 juin faisait déjà ressortir un effet hautement significatif des traitements.

Hauteur des maïs en cm le 21 juin

K80	K160	K240	K320	ppds 0,01	Sans K40	Avec K40	K0	K400
37,1	50,5**	49,6**	55,9**	7,7	47,3	49,3	21,8	56,0

La figure 8 ci-contre rapproche l'effet potasse sur la hauteur à cette date et l'effet sur les rendements.

L'interaction "dose K × forme K" était déjà assez marquée et la forme granulée était plus efficace aux doses K80 (40,0 cm au lieu de 34,2 cm) et K160 (53,0 cm au lieu de 48,0 cm).

D'autre part, le fractionnement comportant K40 au semis présentait un effet positif décroissant de K80 à K320 (+ 6,7 cm, + 2,0 cm, + 2,3 cm, — 3,2 cm).

- Le nombre de pieds à la récolte fut en moyenne de 69.980 pieds (avec légère majoration de K0 (67.900) à K320 (71.300).
- Le nombre d'épis à la récolte a été très affecté par les intempéries (51.300 épis/ha), sans aucun effet significatif des traitements.
- L'humidité du grain récolté était en moyenne de 32,8 % et les traitements n'ont pratiquement pas eu d'influence en ce domaine.

Le rendement en grains secs a présenté un coefficient de variation considérable de 23,2 %.

- **L'effet des doses de potasse est très positif, malgré les irrégularités dans la réponse de K0 à K400 (+ 25,8 q/ha).**
- **L'effet forme de potasse est assez nettement en faveur de la forme granulée (+ 4,0 q/ha).**

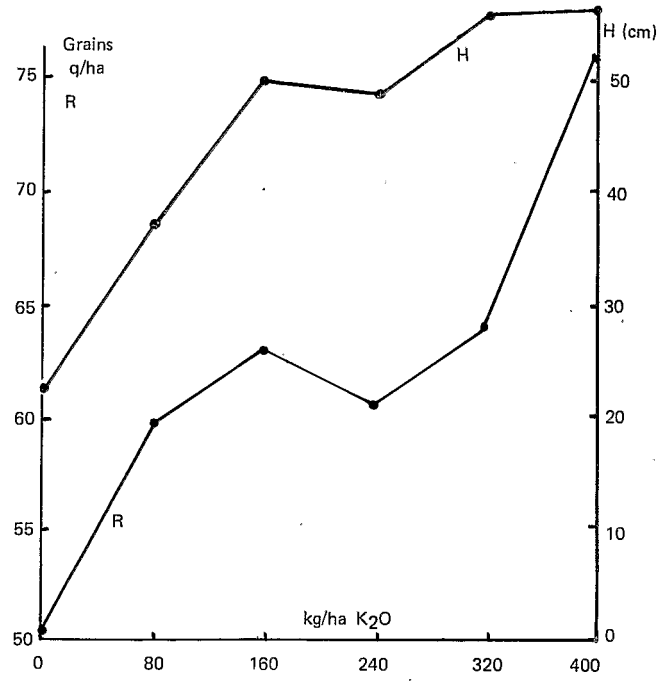


Figure 8 : Rendements en 1973.

L'effet répartition de la potasse est également en faveur du fractionnement avec apport de K40 au semis (+ 3,1 q/ha).

Tableau 9 : Rendements en q/ha grains à 15 % d'eau

Doses K_2O	Forme pulvérulente	Forme granulée	Effet K	Sans K40	Avec K40	ppds	0,05
K80	56,2	63,5	**59,8**	55,5	64,1	Effet K	15,1
K160	60,5	65,6	**63,0**	63,4	62,6	Effet forme et	10,7
K240	62,4	59,0	**60,7**	59,4	62,0	Table K × forme et	21,3
K320	60,4	67,0	**63,7**	62,7	64,7	K × répartition	
Effet forme	**59,8**	**63,8**	**Effet rép.**	**60,3**	**63,4**	Table forme × répartition	15,1
Sans K40	57,2	63,3	Traitements subsidiaires			**K0 = 50,3**	
Avec K40	62,5	64,2				**K400 = 76,1**	
			ppds 18 traitements			0,05 = 30,1	

● L'interaction "dose K × forme K" est peu nette, mais le meilleur traitement est nettement K320 granulé.

● L'interaction "dose K × répartition" est négative ; l'effet de K40 au semis a surtout joué au niveau K80, et le meilleur traitement est "K320 dont K40".

● Au niveau des traitements individuels, le meilleur traitement se déduit logiquement, soit "K320 forme granulée, dont K40 au semis" (71,8 q/ha).

Malgré la grande variabilité de l'essai en 1973, on retrouve donc à peu près les résultats de 1972 et en particulier la supériorité du fractionnement en K280 sur labour et K40 au semis (certes, le traitement subsidiaire K400 s'est placé en tête, mais on ne peut conclure à sa supériorité par rapport au précédent).

Le diagnostic foliaire à la floraison (2 août) a présenté une nutrition NP élevée à très élevée.

La nutrition potassique fut très insuffisante, avec effet positif et hautement significatif des doses de potasse, mais nutrition encore nettement insuffisante en K400.

Diagnostic foliaire (teneurs en K % de matière sèche)

K80	K160	K240	K320	ppds 0,01	K0	K400
1,04	1,14*	1,12*	1,29**	0,17	0,99	1,35

Les effets forme de potasse et mode de répartition ont été très faibles sur le diagnostic.

En 1973, les résultats antérieurs furent donc confirmés, mais l'essai a été caractérisé par une verse très sévère. Le problème de l'obtention d'une bonne nutrition potassique est difficile à résoudre. Cependant, les effets favorables de la "granulation" et du fractionnement sont confirmés.

Résultats de 1974

En 1974, le dispositif a été transformé en un essai factoriel étudiant les 4 mêmes doses de potasse × 2 formes (chlorure ou sulfate) × 2 doses de zinc. Les traitements "chlorure/sulfate" ont remplacé les formes "pulvérulente/granulée" et les traitements zinc ont pris la place des anciens traitements "sans K40" et "avec K40".

Les doses uniformes NP (N120 P150) et les doses de potasse (sous forme chlorure ou sulfate) ont été appliquées sur labour le 20 février 1974. Il ne sera fait état ci-après que des résultats relatifs au potassium, à l'exclusion de ceux concernant le zinc.

● Le peuplement constaté fut en moyenne de 64.000 pieds (CV = 5,3 %). De K0 à K400, il s'est élevé selon : 55.310**, 62.600, 66.500, 66.700, 62.900, 66.970. Le peuplement des K0 était donc significativement inférieur. D'autre part, le peuplement chlorure (66.600) fut significativement supérieur au peuplement sulfate (62.700).

● Le nombre d'épis à la récolte (CV = 5,2 %) est tombé à 56.300, avec une certaine majoration de K0 jusqu'à K160 (+ 3270 épis/ha).

● L'humidité du grain à la récolte était en moyenne de 37 %. Elle a diminué avec les doses de potasse, mais non significativement (37,0 en K80 à 35,4 en K320). Cependant, le taux des K0 (42,5**) fut très significativement supérieur aux taux de tous les autres traitements. L'humidité fut également significativement inférieure avec sulfate (35,6* contre 37,5 avec chlorure).

● Le rendement en grains secs a présenté un faible coefficient de variation (5,9 %).

Tableau 10 : Rendements en q/ha grains à 15 % d'eau

Doses K_2O	Forme Chlorure	Forme Sulfate	Effet K
K80	66,1	63,1	**64,6**
K160	74,1	71,2	**72,7***
K240	77,3	76,9	**77,1*****
K320	85,3	86,5	**85,9*****
Effet forme	75,7	74,4	75,0

ppds	0,05	0,01
Effet K	4,5	6,1
Effet forme	3,2	—
Interaction K × forme	6,3	—
K0 = 39,5* K400 = 86,1**		

L'effet des doses de potasse est extrêmement positif de K80 à K320 (+ 21,3 q/ha THS).

La figure 9 ci-contre représente l'effet potasse observé et l'effet potasse calculé par la fonction de production. Ici aussi la fonction surestime fortement le rendement K0 (59,0 au lieu de 39,5 q/ha).

● L'effet forme de potasse, légèrement en faveur du chlorure, fut faible et non significatif.

● L'interaction "dose K × forme K", bien que non significative, montre qu'avec l'élévation de la dose, le sulfate peut être équivalent, sinon même supérieur au chlorure (— 3,0 ; — 2,9 ; — 0,4 ; + 1,2 q/ha).

Le diagnostic foliaire à la floraison (1er août) a présenté une nutrition azotée élevée (3,49 % N) ainsi que de hauts niveaux en phosphore (0,48 % P).

La nutrition potassique fut majorée très significativement par les doses de potasse, mais, comme précédemment, est restée insuffisante avec K400.

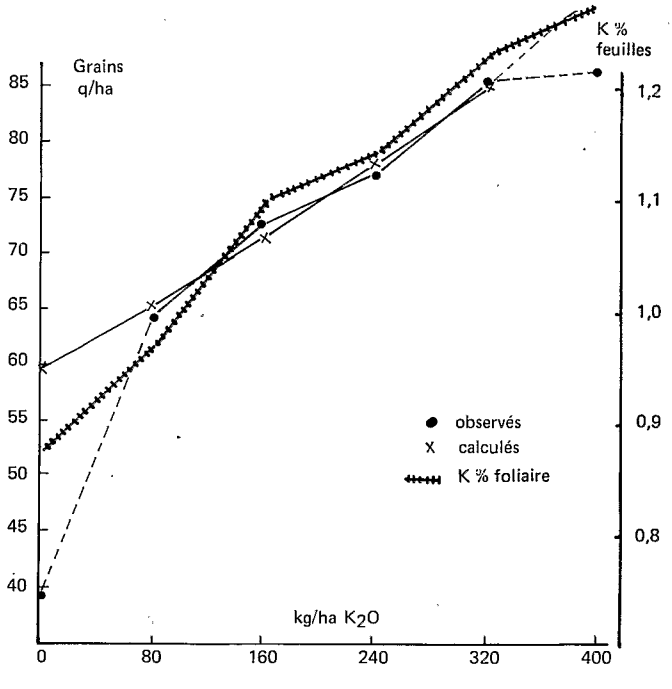


Figure 9 : Rendements et nutrition potassique en 1974.

Diagnostic foliaire (teneurs en K % de matière sèche)

K80	K160	K240	K320	ppds 0,01	K0	K400
0,96	1,10*	1,13**	1,23**	0,16	0,88	1,27

Sur la figure précédente, a été reporté l'effet des doses de potasse sur la teneur en K des feuilles, en liaison avec l'effet sur le rendement.

L'effet forme de potasse a été très faible, mais l'interaction "dose K × forme K" fut significative, l'effet chlorure étant supérieur à l'effet sulfate, pour les premières doses (K80 et K160).

En 1974, la modification des traitements n'a pas permis de poursuivre l'analyse antérieure. Par contre, l'aspect forme de l'anion d'accompagnement du potassium (chlorure ou sulfate) a été abordé et, comme il fallait s'y attendre dans un cas de nutrition très difficile, la forme chlorure a plutôt donné de meilleurs résultats. Mais la nutrition potassique est restée médiocre avec K320 ou même K400.

Résultats de 1975

Le dispositif expérimental et les doses ont été identiques à ceux de 1974. Les doses uniformes NP (N120 P150) et les doses de potasse (sous forme chlorure ou sulfate) ont été appliquées un peu avant semis (8 avril).

● Le peuplement constaté fut en moyenne de 60.885 pieds (CV = 4,7 %). Les effets des traitements n'ont pas été significatifs. Il y a cependant eu un effet K_2O positif entre K0 et K240 (57.920 à 62.760).

● Le nombre d'épis à la récolte (CV = 4,4 %) est tombé à 55.440 avec un très faible effet K0 (53.750 épis contre 55.500 pour les autres K).

● L'humidité du grain à la récolte était en moyenne de 32,7 %. Elle n'a pas été affectée par les doses de potasse de K80 à K320, mais elle était significativement supérieure en K0 (34,15 %).

Comme en 1974, l'humidité fut significativement inférieure avec sulfate (31,6*** contre 33,1 %, avec ppds 0,01 = 0,7 %).

● Le rendement en grains secs a présenté un très faible coefficient de variation (4,4 %).

Tableau 11 : Rendements en q/ha grains à 15 % d'eau

Doses K_2O	Forme Chlorure	Forme Sulfate	Effet K
K80	74,0	62,0	**68,0**
K160	87,3	73,6	**80,4*****
K240	85,8	82,3	**84,0*****
K320	**89,4**	84,9	**87,1*****
Effet forme	**84,1****	**75,7**	79,9

ppds	0,05	0,01
Effet K	3,5	4,8
Effet forme	2,5	3,4
Interaction K × forme	4,9	—

K0 = 32,3***
K400 = 88,8

● L'effet des doses de potasse est extrêmement positif de K80 à K320 (+ 19,1 q/ha (THS).

La fonction de production calculée sur la partie factorielle et très bien ajustée aux résultats observés, est la suivante :

$$R\ (q/ha) = 52{,}97 + 0{,}2219\ K - 0{,}000364\ K^2.$$

Il y correspond un rendement maximum théorique calculé de 86,8 q/ha avec K305.

La figure 10 représente l'effet potasse observé et l'effet potasse calculé, ainsi que les effets chlorure et sulfate. On peut constater ici aussi que le rendement obtenu K400 fut très légèrement supérieur et que la fonction surestime très fortement le rendement K0 (32,3 q/ha au lieu de 53,0 q/ha calculés).

● L'effet forme de potasse est en faveur du chlorure d'une manière hautement significative (+ 8,4 q/ha HS).

● L'interaction K × F (dose × forme) est significative : **avec l'élévation de la dose, la supériorité du chlorure décroît (+ 12,0 q/ha à + 4,5 q/ha).**

Le diagnostic foliaire à la floraison (23 juillet) a encore indiqué une nutrition azotée très élevée (3,89 % N) et d'ailleurs majorée par les doses de potasse et de très hauts niveaux en phosphore (0,51 % P).

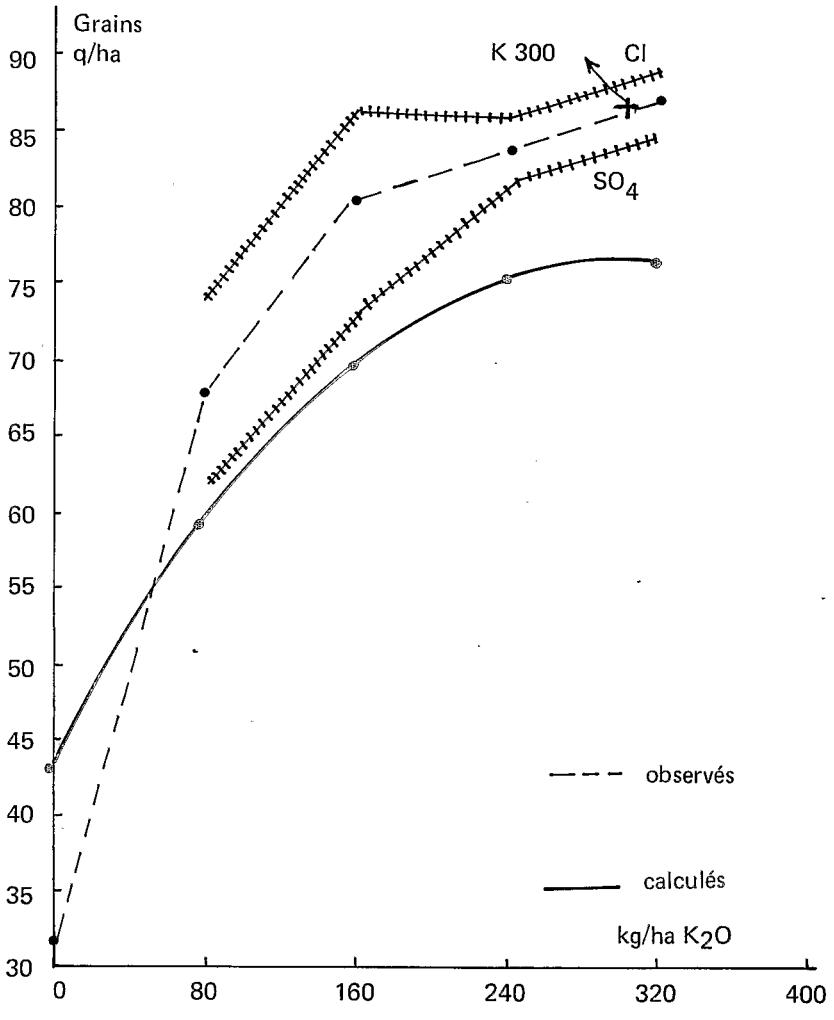
La nutrition potassique a été majorée très significativement par les doses de potasse et pour la première fois, a pu atteindre le niveau correct avec K320.

L'effet forme de potasse et l'interaction dose K × forme K ont été importants et significatifs (tableau 12 page 17).

Tableau 12 : Teneurs en K % de matière sèche (feuilles)

Doses K_2O	Forme Chlorure	Sulfate	Effet K
K80	1,07	1,04	**1,05**
K160	1,52	1,17	**1,35****
K240	1,64	1,56	**1,60*****
K320	1,95	1,79	**1,87*****
Effet forme	**1,55**	**1,39****	1,47

ppds	0,05	0,01
Effet K	0,13	0,18
Effet forme	0,09	0,13
Interaction K × forme	0,19	0,26
K0 =	0,85***	
K400 =	2,11	



Les niveaux potassiques sont plus élevés avec chlorure qu'avec sulfate.

En 1975, les résultats de l'essai ont été remarquables avec les effets doses de potasse (+ 56 q/ha de K0 à K400) et forme de potasse en faveur du chlorure (+ 8,4 q/ha). La nutrition fut effectivement correcte avec K320 chlorure.

Figure 10 : Rendements en 1975.

Résultats de 1976

● Le dispositif expérimental fut identique à ceux de 1974 et 1975. Les doses uniformes NP (N140 P150) et les doses de potasse (sous forme chlorure granulé ou sulfate) ont été appliquées le 30 mars.

Le maïs, variété INRA 508, a été semé fin avril et récolté le 28 septembre 1976.

● Le peuplement constaté fut en moyenne de 64.370 pieds (CV = 3,6 %). Comme précédemment, on a noté un effet K_2O positif entre K0 (60.930 pieds) et K80 et autres K (65.780 pieds).

● Le nombre d'épis à la récolte (CV = 4,0 %) est tombé à 52.800.

K80	K160	K240	K320	ppds 0,05	K0
52.080	52.650	53.490	54.010	2.230	50.940

L'effet potasse fut positif et semble s'être poursuivi jusqu'à K320. Il se caractérise surtout par l'infériorité significative de K0.

L'effet forme de potasse fut faible et non significatif, mais aux premières doses, le nombre d'épis était supérieur avec chlorure.

● L'humidité du grain récolté était en moyenne de 36,3 %. Elle a diminué, bien que non significativement, avec l'effet potasse, de K0 à K320 : 37,85 — 36,71 — 36,35 — 35,92 — 35,72 %.

L'effet forme de potasse a été très faible (36,28 % avec chlorure et 36,06 % avec sulfate).

● Le rendement en grains secs a présenté un coefficient de variation moyen (6,7 %).

Tableau 13 : Rendements en q/ha grains à 15 % d'eau

Doses K_2O	Forme Chlorure	Sulfate	Effet K
K80	77,6	67,0	**72,3**
K160	90,8	80,8	**85,8****
K240	89,7	87,6	**88,7*****
K320	**95,3**	**96,6**	**95,9*****
Effet forme	**88,3***	**83,0**	85,7

ppds	0,05	0,01
Effet K	5,8	7,9
Effet forme	4,1	5,6
Interaction K × forme	8,2	—

K0 = 47,1***
K400 = 93,9

L'effet des doses de potasse est encore très positif de K80 à K320 (+ 23,6 q/ha (THS).

La fonction de production, très bien ajustée, est la suivante :

$$R\ (q/ha) = 59{,}53 + 0{,}1880\ K - 0{,}000239\ K^2.$$

Il y correspond un rendement maximum théorique calculé de 96,4 q/ha avec K392. On peut constater que le rendement obtenu avec K400 fut effectivement un peu inférieur à ce rendement maximum théorique calculé et que la fonction surestime le rendement K0 (47,1 q/ha au lieu de 59,5 q/ha calculés).

La figure 11 représente encore l'effet potasse observé et l'effet potasse calculé ainsi que les effets chlorure et sulfate.

● **L'effet forme de potasse est en faveur du chlorure d'une manière significative (+ 5,3 q/ha (S).**

● L'interaction K × F (dose × forme) est significative.

Avec l'élévation de la dose, la supériorité du chlorure décroît (+ 10,6 ; + 10,0 ; + 2,1 ; — 1,3 q/ha) et les deux formes sont équivalentes à la dose supérieure en essai (K320).

Le diagnostic foliaire à la floraison (20 juillet) a toujours présenté une nutrition azotée élevée (3,52 % N) ainsi que de hauts niveaux en phosphore (0,45 % P).

La nutrition potassique a été majorée très significativement par les doses de potasse et a atteint un niveau correct avec K400 seulement.

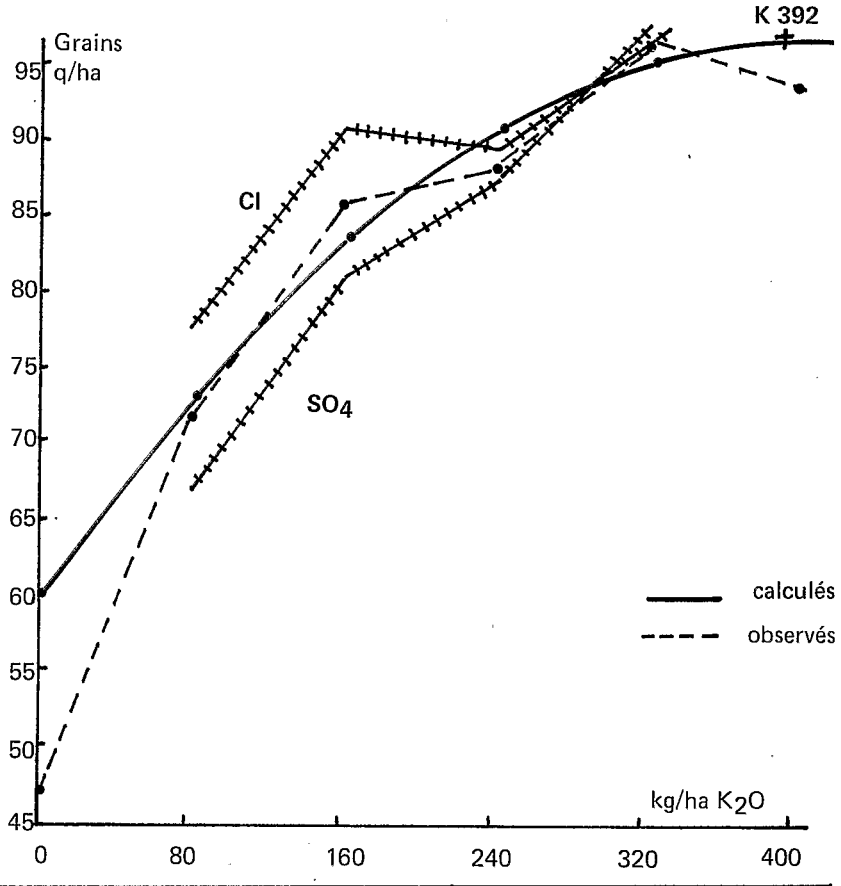


Figure 11 : Rendements en 1976.

K0	K80	K160	K240	K320	K400	Chlorure	Sulfate
0,95	1,16	1,31**	1,51***	1,66***	1,86	1,44	1,37*
		ppds 0,01 = 0,11 % K				ppds 0,05 = 0,06 % K	

Comme en 1975, les niveaux potassiques sont plus élevés avec chlorure qu'avec sulfate, mais la différence fut moins nette.

K % matière sèche (tiges + feuilles)

Forme	K0	K80	K160	K240	K320	K400
Chlorure	0,30	0,42	0,65	0,76	0,90	1,24
Sulfate		0,18	0,36	0,46	0,93	—

Par contre, l'analyse des tiges + feuilles à la récolte a indiqué un effet considérable sur la teneur en K et une supériorité très accusée des teneurs avec chlorure.

En 1976, les résultats de 1975 ont donc été reconduits avec une ampleur moindre : effet potasse de + 46,8 q/ha de K0 à K400 et effet forme de potasse en faveur du chlorure de + 5,3 q/ha. La nutrition potassique fut moyenne avec K320, correcte avec K400.

Conclusions de l'essai

Les résultats de sept ans d'essai à Moirans II peuvent se résumer ainsi :

(1) **L'effet potasse moyen (autres traitements confondus) fut chaque année très élevé** et se résume ainsi (K320 et K400 = moyennes sur 6 ans).

Rendements en q/ha grains secs (7 ans)

K0	K80	K160	K240	K320	K400
47,1	69,2	76,2	79,1	82,5	85,1

Les fonctions de production potasse ont indiqué que le rendement maximum théorique correspondait à des doses comprises entre K300 et K400.

(2) **L'étude du fractionnement a nettement démontré la supériorité, à dose globale égale, de l'apport d'une dose de K40 au semis, soit de préférence en localisation starter (1971, 1972), soit à la rigueur en surface (1973). L'effet moyen de cet apport fractionné ressort à + 4,6 q/ha.**

(3) **Les études de formes de l'engrais potassique ont démontré :**

a) une supériorité catégorique de la "présentation" granulée par rapport à la présentation pulvérulente, en particulier aux faibles doses,

b) la supériorité constante de la forme chlorure par rapport à la forme sulfate (+ 5,0 q/ha en moyenne sur 1974-1975-1976), avec en général une interaction forme × dose négative conduisant à la stricte équivalence des deux formes à la dose supérieure K320.

Le contrôle de nutrition potassique par diagnostic foliaire a le plus souvent très bien coïncidé avec les résultats précédents. Ainsi, l'effet potasse moyen fut le suivant :

K % matière sèche (feuilles), moyenne sur 6 ans

K0	K80	K160	K240	K320	K400
0,97	1,13	1,29	1,38	1,53	1,68

L'obtention d'une alimentation potassique seulement moyenne exige donc K400 ou K320, dont K40 en localisation au semis.

III — Essai de La Sauvetat (Gers) 1968 à 1974

Maïs, blé, sorgho

Cet essai fut poursuivi de 1968 à 1974 pour étudier la fertilisation N × K dans les terreforts argilo-calcaires, en présence d'une fumure phosphatée uniforme. Le dispositif en split-plot comportait 48 parcelles (six blocs de huit traitements, chaque bloc comportant deux sous-blocs N1 et N2 subdivisés en K0, K1, K2, K3).

Les conditions de sols correspondent à un sol de bas de pente, modérément calcaire, mais très argileux, et de plus, très riche en limon. Le complexe absorbant est saturé par la chaux et la magnésie et particulièrement pauvre en potasse échangeable. La pauvreté en P_2O_5 est également nette.

Tableau 14 : Principales caractéristiques du sol

Analyse physique (% de terre fine)	Sol	Sous-sol	Analyse chimique	Sol	Sous-sol
Eléments grossiers (sup. à 2 mm)	1,4	0,9	N total (°/°°)	2,75	1,55
Sable grossier (2 à 0,2 mm)	1,2	1,1	P_2O_5 ass. (°/°°)	0,08	0,05
Sable fin (0,2 à 0,05 mm)	2,3	2,5	K_2O éch. (°/°°)	0,08	0,07
Sable très fin (0,05 à 0,02 mm)	9,0	10,0	CaO éch. (°/°°)	8,72	9,20
Limon (0,02 à 0,002 mm)	36,7	36,0	MgO éch. (°/°°)	0,38	0,38
Argile (inf. à 0,002 mm)	42,8	42,4	pH	8,3	8,4
Calcaire total	8,0	9,0	Capacité tot. éch. (méq %)	27,0	24,0

Le pouvoir fixateur, déterminé selon la méthode de Van der Marel, est de 46 % sans séchage et 72 % après séchage.

A — Les rendements observés

Les principaux résultats sont résumés par le tableau 15 en ce qui concerne l'effet potasse et la figure 12 représente les fonctions de production potasse, toutes bien ajustées aux rendements observés (tableau 15).

Tableau 15 : Rendements en q/ha grains

Cultures	Années	K0	K80	K160	K240	ppds 0,01	Rendement maximum	Rendement maximum de l'essai
Maïs	1968	35,5	56,2***	67,5***	71,9***	4,4	K320	N90 K240 = 72,5
	1969	16,2	35,1***	52,1***	59,7***	2,9	K332	N90 K240 = 60,3
	1970	8,6	30,5***	56,9***	72,2***	6,7	K640	N135 K240 = 75,3
	1974	25,1	54,4***	77,9***	90,0***	5,1	K323	N135 K240 = 91,3
	Moyenne	**21,4**	**44,0**	**63,6**	**73,4**	—	—	N135 K240 = 74,3
Blé	1971	21,8	26,5*	27,3*	29,5**	5,8	K271	N90 K240 = 31,9
	1973	37,2	43,4**	43,3**	43,2**	3,7	K164	N90 K160 = 46,1
	Moyenne	**29,5**	**35,0**	**35,3**	**36,4**	—	—	
Sorgho	1972	72,0	83,6**	89,2***	91,6***	7,0	K233	N135 K240 = 92,3
Indices moyens		**100,0**	**185,8**	**264,1**	**306,8**			

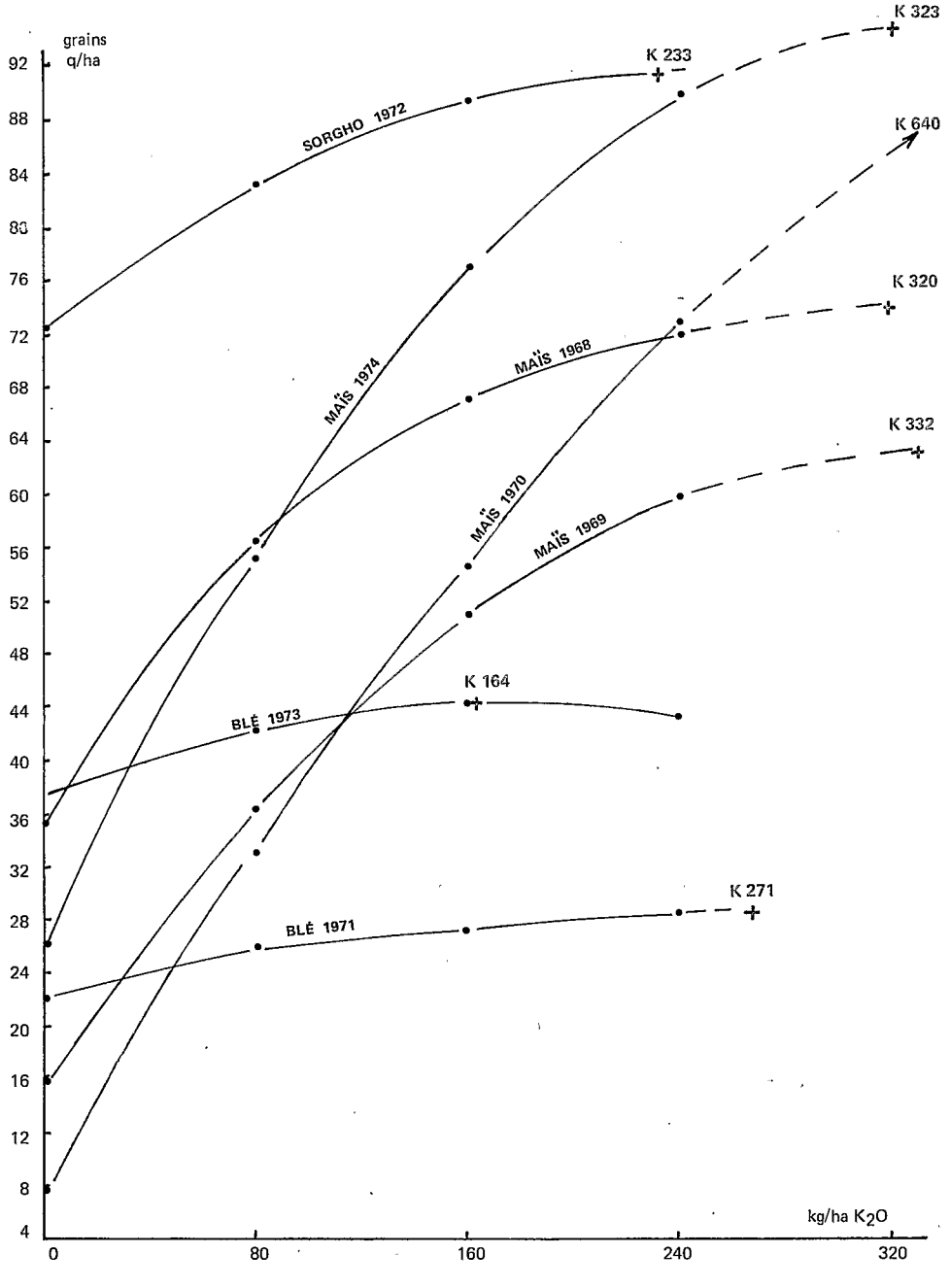


Figure 12 : Fonctions de production Potasse à La Sauvetat.

1 — Résultats sur maïs

Le maïs est venu en 1968, 1969, 1970 et 1974.

Chaque année, les doses d'azote étudiées ont été N90 et N135 sous forme d'urée 46 % et la fumure phosphatée fut uniforme à P150 (sous forme de supertriple 45 %). Tous les engrais ont été apportés courant avril.

Le maïs de 1968 suivait lui-même un maïs venant sur retournement de prairie permanente.

La variété fut Funk G17 en 1968, 1969, INRA 400 en 1970, et Pioneer 368 A en 1974.

● *En 1968,* dès le début de l'essai, les signes de déficience en potassium apparurent ; l'effet des doses de potasse fut positif et très hautement significatif, ainsi que les écarts successifs entre doses.

L'effet du renforcement de la dose d'azote fut légèrement positif (+ 1,4 q/ha), mais non significatif. La meilleure combinaison fut N90 K240 (tableau 15).

● *En 1969,* l'effet K fut déjà important et hautement significatif sur le peuplement : 28317 — 33562** — 37982*** — 38464*** avec ppds 0,01 = 3024. On avait donc :

K240 — K0 = + 10147 pieds/ha (THS).

Le rapport grains humides/épis s'est fortement élevé avec les doses de potasse : 0,660 — 0,748 — 0,776 — 0,779, et l'humidité du grain a diminué dans le même sens : 37,5 — 33,2 — 31,0 — 31,0 %.

Sur le rendement en grains secs, l'effet potasse fut donc positif et très significatif (+ 43,5 q/ha).

Le rendement maximum théorique calculé par la fonction de production se situait hors essai (63,8 q/ha avec K332). Le profit maximum calculé correspondait à une dose de K319.

L'effet azote fut encore légèrement positif (+ 2 q/ha), mais la meilleure combinaison observée fut encore N90 K240 (tableau 15).

● *En 1970,* on retrouve l'effet potasse hautement significatif sur le peuplement (peuplements respectifs de 56.470, 57.345, 59.354**, 59.444** pieds/ha avec ppds 0,05 = 1937 et ppds 0,01 = 2609).

De même, le rapport grains humides/épis fut très majoré par les doses de potasse : 0,746 — 0,767 — 0,776 — 0,791, mais l'humidité du grain fut peu affectée (respectivement 19,0 — 19,0 — 19,5 — 21,0 %).

Sur le rendement en grains, l'effet de la dose supérieure K240 est considérable (+ 63,6 q/ha).

La fonction de production potasse conduit à un rendement maximum théorique de 115 q/ha avec K640, donc tout à fait hors essai.

L'effet azote fut plus nettement positif que précédemment, mais non significatif (+ 4,5 q/ha).

L'interaction N × K fut d'ailleurs positive et le rendement maximum observé a correspondu à N135 K240 (76,5 q/ha).

● *En 1974,* le nombre d'épis récoltés a été majoré très significativement par les doses de potasse, selon : 33.138 — 43.608*** — 45.697*** — 48.324*** avec ppds 0,05 = 2573 et ppds 0,01 = 3464.

Le nombre moyen d'épis par pied fut majoré significativement avec les doses de potasse, selon : 0,828 — 1,065*** — 1,214*** — 1,186*** avec ppds 0,05 = 0,044 et ppds 0,01 = 0,060.

Comme précédemment, le rapport grains humides/épis s'est élevé avec les doses de potasse (0,685 — 0,732 — 0,769 — 0,777) et le taux d'humidité des grains s'est abaissé (34,5 — 30,1 — 28,0 — 28,2).

Sur le rendement en grains secs, l'effet potasse fut très élevé (+ 65 q/ha).

La fonction de production potasse conduit à un rendement maximum théorique de 94,9 q/ha avec K323. Le profit maximum calculé correspondrait à une dose de K313.

L'effet azote a été légèrement positif (+ 2,5 q/ha), mais non significatif. Le rendement maximum observé a correspondu à N135 K240 (91,3 q/ha).

Sur maïs, l'effet potasse fut donc chaque année, considérable et s'est accru avec le temps (+ 36,4 ; + 43,5 ; + 63,6 ; + 64,9 q/ha).

Le rendement maximum s'est régulièrement situé en dehors des doses en essai, et si l'on excepte la réponse exceptionnelle de 1970, on constate qu'il eût fallu en moyenne appliquer K320, dose qui eût donné un rendement moyen de 79,2 q/ha.

Sur la moyenne, l'interaction N × K fut légèrement positive (72,6 q/ha avec N90 K240 et 74,3 q/ha avec N135 K240).

2 — Résultats sur blé

Le blé est venu en 1971 et 1973.

En 1971, la dose d'azote fut appliquée à raison de N30 *uniformément fin octobre, et N60 et N90 début mars* (soit au total N90 et N120). En 1973, la dose d'azote fut de N30 et N45 en décembre, et N60 et N90 en mars (soit au total N90 et N135).

La fumure phosphatée était uniformément de P100 (supertriple) en 1971 et 1973.

La variété fut Moisson en 1971 et Magali en 1973.

● *En 1971,* l'essai fut très versé et les rendements minimes.

L'effet potasse est de + 7,7 q/ha (HS) et **le rendement maximum théorique calculé à partir de la fonction de production potasse serait de 29,3 q/ha avec K271, légèrement hors essai. Le profit maximum théorique dû à la potasse aurait été obtenu avec K215.**

L'effet azote fut légèrement négatif en raison de la verse (— 2,6 q/ha) et le meilleur rendement a correspondu à N90 K240 (tableau 15).

D'autre part, le poids spécifique, très faible en raison de la verse et de l'échaudage, fut majoré significativement par les doses de potasse (59,1 — 62,0** — 62,6** — 63,4*** avec ppds 0,01 = 2,7).

● *En 1973,* l'essai fut à nouveau versé en N135 (effet négatif de — 3,7 q/ha non significatif).

L'effet potasse est de + 6,0 q/ha (HS) et **le rendement maximum théorique calculé serait de 44,3 q/ha avec K164. Le profit maximum théorique dû à la potasse aurait été obtenu avec K144.**

Le meilleur rendement observé a correspondu à N90 K160 (tableau 15).

Le poids spécifique fut très majoré par les doses de potasse (66,0 — 67,9* — 68,5** — 68,9** avec ppds 0,01 = 2,0 unités PS) ; cet effet favorable s'est aussi retrouvé sur le poids de 1000 grains (60,7 — 63,4* — 63,9** — 64,1** grammes).

Sur blé, par comparaison avec le maïs, les réponses, bien que très nettes, ont été beaucoup plus plates, de l'ordre de 6 à 7 q/ha. Les rendements ont d'ailleurs été médiocres et le rendement maximum a été obtenu avec des doses de K_2O nettement inférieures à celles du maïs.

3 — Résultats sur sorgho

Le sorgho (variété NK 123) est venu en 1972.

Les engrais ont été appliqués juste avant semis (N90 et N135 sous forme d'urée, P150 uniforme en supertriple, et chlorure de potassium).

Les rendements ont été très élevés.

L'effet des doses de potasse a été positif et très hautement significatif.

Le rendement maximum théorique calculé par la fonction de production s'est situé juste dans les limites des doses en essai et serait de 91,5 q/ha avec K233.

L'effet azote fut légèrement positif (+ 1,9 q/ha), mais non significatif, et la meilleure combinaison observée fut N135 K240 (tableau 15).

En conclusion, sur l'ensemble des sept cultures, en exprimant les effets annuels en indices par rapport à K0 = indice 100, on constate que le rendement moyen a été plus que triplé avec K240 (tableau 15). La fonction de production moyenne calculée à partir des indices, conduit à une dose moyenne sur sept ans de K326 pour l'obtention du rendement maximum.

B — La nutrition potassique des cultures

L'essai ayant été suivi chaque année par diagnostic foliaire, on peut rapprocher facilement les résultats du tableau 15 des effets K_2O sur l'alimentation potassique (tableau 16).

Tableau 16 : Diagnostic foliaire (teneurs en K % de matière sèche)

Cultures	Années	K0	K80	K160	K240	ppds 0,01
Maïs	1968	0,53	0,66**	0,89***	1,03***	0,08
	1969	0,71	0,72	0,90***	1,07***	0,07
	1970	0,66	0,58*	0,76**	1,05***	0,09
	1974	1,26	0,94**	1,27	1,68***	0,14
	Moyenne	**0,79**	**0,72**	**0,95**	**1,21**	—
Blé	1971	1,16	1,52**	1,75***	2,09***	0,22
	1973	0,90	1,66***	2,12***	2,36***	0,21
	Moyenne	**1,03**	**1,59**	**1,93**	**2,22**	—
Sorgho	1972	0,96	0,96	1,07*	1,22**	—

a) **Sur maïs**, le diagnostic a porté sur la feuille de l'épi à la floraison.

● *En 1968,* la nutrition azotée s'élevait avec les doses de potasse de 3,31 à 3,65*** % N et les teneurs en P, très élevées, s'abaissaient de 0,61 à 0,40 % P avec les doses de potasse, en raison de la dilution due à la meilleure croissance.

Les teneurs en potassium étaient extrêmement basses, majorées très significativement par les doses de potasse, mais encore très déficientes avec K240.

Corrélativement, les niveaux calciques et surtout magnésiens étaient pléthoriques et induits en baisse par les doses de potasse (1,58 à 1,37 % Ca et 1,44 à 0,89 % Mg).

● *En 1969,* les résultats ont été à peu près identiques (3,26 à 3,18 % N ; 0,56 à 0,43 % P ; 1,45 à 1,23 % Ca ; 1,16 à 0,75 % Mg).

● *En 1970,* la nutrition azotée était faible (2,77 à 2,90 % N), la nutrition phosphorique abaissée (0,40 à 0,29 % P).

La nutrition potassique demeure très médiocre en 3e année de K240. Avec K80, on observait même une baisse de teneur qui peut s'expliquer par la dilution due au meilleur développement.

● *En 1974,* les niveaux N étaient élevés (3,98 % N), les niveaux P également, bien qu'abaissés (0,58 à 0,43 % P).

Les teneurs en potassium ne montent pas de K0 à K160, du fait de la dilution ; elles sont seulement moyennes en K240.

Sur la moyenne des quatre maïs, la nutrition potassique est diluée avec K80, légèrement améliorée avec K160, et encore très médiocre avec K240.

b) **Sur blé**, le diagnostic foliaire a été pratiqué à la floraison (fin mai) et portait sur l'ensemble de la 2e et 3e feuille sous l'épi.

● *En 1971,* les doses de potasse se sont accompagnées d'une baisse hautement significative des teneurs en N (2,66 à 2,43** % N), en Ca (1,51 — 1,32*** — 1,23** — 1,09*** % Ca), en Mg (0,33 — 0,31** — 0,30** — 0,26*** % Mg).

La nutrition potassique, très déficiente en K0, était encore insuffisante en K80 et seulement correcte avec K160. L'optimum expérimental, voisin de K210, correspondait aussi à une alimentation très correcte.

● *En 1973,* les doses de potasse ont également entraîné une baisse significative des teneurs en N (2,95 à 2,77* N) par ailleurs très élevées, en Ca (1,46 — 1,16*** — 1,02*** — 0,94*** % Ca), en Mg (0,41 — 0,34 — 0,29 — 0,25 % Mg).

La nutrition potassique, très faible en K0, était normale en K160, au voisinage du rendement maximum.

c) **Sur sorgho**, le diagnostic fut pratiqué à la floraison (10 août) sur la 2e et la 3e feuille.

Les niveaux en N (2,87 %) et en P (0,36 %) étaient élevés.

Les teneurs en K ont très peu varié d'une feuille à l'autre et se sont élevées très significativement avec les doses (tableau 16). En fait, on se trouve en présence de niveaux très faibles et même seulement médiocres avec la dose supérieure K240.

En ce qui concerne la nutrition potassique des cultures, on peut conclure que le maïs et le sorgho ont présenté des diagnostics K assez voisins et nettement inférieurs à ceux du blé. Les plantes à besoins en K importants sur une courte période souffrent nettement plus des conditions difficiles de nutrition potassique de ces sols que le blé dont les prélèvements sont tout de même répartis sur une plus longue période. On constate même, sur ces cultures, une déficience encore nette avec K240 qui explique l'allure des fonctions de production.

C — L'évolution du sol

Des prélèvements parcellaires de sols (0-20 cm) et de sous-sols (20-40 cm) ont été réalisés en fin d'essai.

Les seuls effets des traitements ont concerné la potasse échangeable.

K_2O éch. °/oo	K0	K80	K160	K240	ppds 0,05	0,01	CV %
Sol	0,060	0,080***	0,090***	**0,104*** **	0,006	0,008	9,0
Sous-sol	0,052	0,057*	0,058*	**0,059****	0,005	0,007	11,1

Les résultats ont été d'une précision acceptable pour ce genre d'échantillonnage.

Les effets des doses sont positifs et hautement significatifs. Il apparaît que, seule la dose K240 a permis un très léger enrichissement du sol, qui demeure encore très insuffisamment pourvu (0,9 % de la capacité d'échange). Indiquons pour mémoire que la fonction d'enrichissement en K_2O échangeable en fonction des doses apportées aurait indiqué que l'on aurait atteint au mieux 0,12 °/oo avec une dose très élevée de 510 kg/ha K_2O/an.

D — Conclusions de l'essai

Sur ce type de sol très argileux, à fort pouvoir fixateur, la réponse à la potasse est très élevée et se poursuit jusqu'à des doses très supérieures à la pratique courante (le pouvoir de libération de potassium de ce sol est, d'autre part, très minime, puisque l'extraction au tétraphénylborate de sodium 0,1 N, après sept jours, a été de 17 ppm K seulement, en plus du potassium échangeable).

Comme sur les essais de Moirans, des rendements très élevés en maïs peuvent être obtenus, bien qu'il soit très malaisé d'obtenir une alimentation potassique correcte des cultures à besoins instantanés élevés. Du fait du faible coefficient d'utilisation de l'engrais potassique, il résulte en effet une forte dilution dans la plante du potassium absorbé.

Conclusion générale

Les sols à très fort pouvoir fixateur vis-à-vis du potassium, en particulier pour la mesure du PF à l'état humide, posent de difficiles problèmes de nutrition potassique des cultures, qui ont fait l'objet de ce *"Dossier K_2O"*.

Les expérimentations rapportées se sont déroulées de 1965 à maintenant, et ont considéré les divers aspects du problème, c'est-à-dire la dose, le mode d'apport, la forme d'engrais potassique, les plus aptes à l'obtention d'une alimentation potassique correcte.

Les résultats essentiels ont concerné le maïs et se résument ainsi en ce qui concerne les rendements et la nutrition potassique.

Maïs	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 (7 ans)	47,1	69,2	76,2	79,1	82,5	85,1
La Sauvetat (4 ans)	21,4	44,0	63,6	73,4	—	—
			Teneurs en K % mat. sèche de la feuille de l'épi			
Moirans I	0,72	0,77	0,88	1,09	—	—
Moirans II	0,97	1,13	1,29	1,38	1,53	1,68
La Sauvetat	0,79	0,72	0,95	1,21	—	—

L'utilisation de fortes doses, de l'ordre de K300, sur maïs semble inéluctable et constituer le minimum vital pour obtenir une alimentation potassique assez moyenne.

L'engrais potassique doit être apporté le plus tard possible, et sur maïs le fractionnement apporte une amélioration notable (apport de 40 kg/ha K_2O après semis). La meilleure technique serait certainement la localisation de K40 en starter au semis.

Un résultat inédit est l'effet supérieur du chlorure "granulé" par rapport au pulvérulent. On peut y voir une sorte d'effet localisation.

Un résultat attendu est la supériorité du chlorure par rapport au sulfate, comme meilleur véhicule de l'ion K.

Les effets granulation et placement tendent à disparaître avec l'élévation de la dose vers K300 à K400.

Les exemples traités correspondent à des sols en position anormale sur le graphique 1, donnant la liaison entre le pouvoir fixateur et le taux d'argile. Leur caractère particulier devrait pouvoir se relier à la nature des argiles. Ce problème est à l'étude, et on ne peut indiquer ici que l'analyse des essais de Moirans.

Essai	Quartz	Feldspath pl	Feldspath K	Illite %	Chlorite %	Kao %	Smec %	Interstratifiées irrégulières M	Interstratifiées irrégulières C	Totaux crist	Totaux am
Moirans I	11	3	1	31	9	—	5	10	5	75	25
Moirans II Sol	11	2	1	46	12	—	tr	tr	5	77	23
Sous-sol	12	2	1	38	12	3	0	0	10	77	23

am = amorphe
crist = cristallisé

pl = plagioclase Na-Ca
K = potassique

Kao = Kaolinite
Smec = Smectite

M = Montmorillonite
C = Chlorite

Au sein d'une série d'une trentaine de sols, les essais de Moirans se sont caractérisés par le très fort pourcentage d'illite et de minéraux cristallisés.

Dans d'autres sites, non expérimentaux, à très fort PF, on a noté aussi des teneurs élevées en smectite.

Il serait intéressant, en théorie et en pratique, d'établir un recensement, sinon une cartographie de ces sols à problème potassique.

Dejou et col. citent dans leur étude, des sols alluviaux calcimorphes et humifères, le plus souvent hydromorphes, représentés en France dans de nombreuses régions et dont on peut penser qu'ils présenteraient un comportement voisin de ceux ici rapportés. Selon Dejou, les conditions de rétrogradation du potassium dans ces sols se trouveraient encore favorisées du fait des alternances d'humectation et de dessiccation liées aux variations de hauteur de la nappe aquifère inhérentes aux zones alluviales (15).

Enfin, d'une manière plus générale, la prise en considération du pouvoir fixateur des sols vis-à-vis du potassium dans la détermination de la fertilisation potassique devrait s'imposer dans l'avenir, car on est fondé à penser que des problèmes de fourniture de potassium à certaines cultures peuvent se poser à des niveaux de PF moins excessifs. Il faudrait aussi étudier le degré de réversibilité de la fixation pour les sols à PF assez élevés de l'ordre de 50 à 60 %.

BIBLIOGRAPHIE

(1) BARBIER G. - La dynamique du potassium dans le sol, in Potassium Symposium, Institut International de la Potasse, Berne, 231-258 (1962)

(2) BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C. - Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes. Ann. Agron. 13 (3) 175-201 (1962)

(3) BLANCHET R., GUYOT J., CHAUSSIDON J., CROUZET J., CHAUMONT C. - Influence prédominante des argiles illitiques sur l'alimentation potassique des plantes dans divers types de sols. Ann. Agron. 16 (2) 177-202 (1965)

(4) BLANCHET R., BOSC M. - Bilans de potassium et alimentation potassique des plantes en présence de rétrogradations et de libérations d'ions K^+ non échangeables. Ann. Agron. 18 (6) 601-621 (1967)

(5) BLANCHET R., BOSC M., GELFI N. - Influence du régime hydrique sur l'évolution de fortes fumures potassiques dans deux sols de types différents. Agrochimica, XVII N° 6 - 489-497 (1973)

(6) CHAMINADE R. - La rétrogradation du potassium dans les sols. Ann. Agron., 6, 818 (1936)

(7) LOUÉ A. - Rapports Annuels des Essais de Fertilisation. S.C.P.A. Mulhouse (1966 à 1975)

(8) MORTLAND M.M., GIESEKING J.E. - Influence of the silicate ion on potassium fixation. Soil Science 71 381-385 (1951)

(9) QUÉMENER J. - Analyse du Potassium dans les sols. Dossier K_2O N° 4 - Soc. Comm. Potasse Azote - Mulhouse 26 p. (1976)

(10) QUÉMENER J. - Le conseil de fumure potassique tiré de l'analyse de sol. Dossier K_2O N° 6 - Soc. Comm. Potasse Azote - Mulhouse 21 p. (1976)

(11) RÉMY J.C., MARIN-LAFLECHE A. - L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Ann. Agron. 25 (4) 607-632 (1974)

(12) SCHUFFELEN A.C., VAN DER MAREL H.W. - Potassium fixation in soils, in Potassium Symposium, Institut International de la Potasse, Berne 157-201 (1955)

(13) STRASMAN A., QUIDET P., BLANCHET R. - Dynamique du potassium dans le sol et alimentation potassique des plantes. Ann. Agron. 10, 635-660 (1958)

(14) VAN DER MAREL H.W. - Potassium fixation in Dutch soils : mineralogical analyses. Soil Science - 78 N° 3 - 163-179 (1954)

(15) DEJOU J., MORIZET J., GUYOT J., MILLET R. - Réponse positive de la fertilisation potassique en sols alluviaux calcimorphes humifères - Document non encore publié - à paraître Inst. Int. Potasse. Berne (1977).

S.C.P.A. 2, Place du Général de Gaulle
B.P. 239 68053 Mulhouse Cédex

945.650.802 000 16 RC Mulhouse B
Imprimerie G.A.T. Mulhouse