

AU SERVICE DE L'AGRICULTURE

DOSSIER K₂O

N° 15 - Octobre 1979

Interaction du potassium avec d'autres facteurs de croissance

Interaction de K avec les autres éléments nutritifs*

par André LOUÉ

Ingénieur Agronome (INA Paris)

Si les effets ou actions des différents facteurs conditionnant la croissance des végétaux ont donné lieu jusqu'ici à d'innombrables travaux et résultats, plus récemment ce sont les effets synergiques (ou antagonistes), ou interactions, de deux ou plusieurs de ces facteurs qui retiennent de plus en plus l'attention. Nous avons demandé à M. Loué de nous faire le point des connaissances actuelles sur les interactions qui impliquent plus spécialement le potassium. NdIR.

INTRODUCTION

A - Définition de l'interaction entre deux éléments

Nous prendrons l'exemple de l'interaction entre l'azote et le potassium (N x K).

Si dans un sol non à l'entretien en potasse, nous expérimentons sur maïs quatre doses K0, K1, K2, K3, on obtient par exemple la courbe de réponse «a» de la figure 1, en présence d'une certaine variété V1, semée à une certaine densité d1, d'une certaine dose d'azote N1, etc.

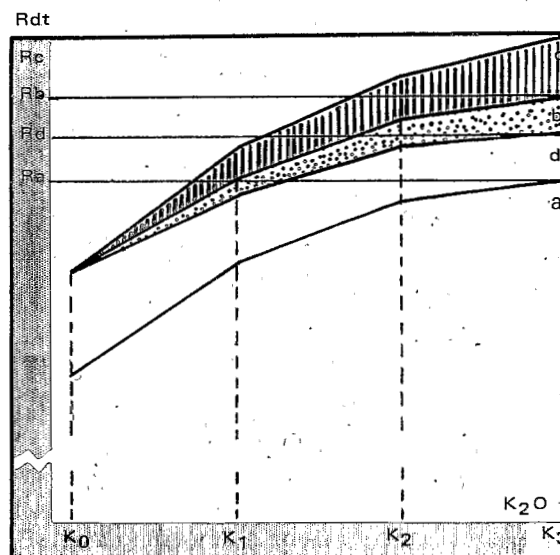
Le rendement Ra correspond sensiblement au rendement maximum avec le facteur potasse dans les conditions V1, d1, N1...

Si l'on ne modifie pas la **qualité** ou **quantité** d'un autre facteur, on ne dépassera pas Ra.

Imaginons maintenant que l'on expérimente K0, K1, K2, K3 dans les mêmes conditions V1, d1... que précédemment, mais en présence d'une dose d'azote supérieure N2. On obtient une nouvelle courbe de réponse à la potasse qui peut occuper, entre autres, les positions b, c, d.

1. La courbe b, parallèle à la courbe a (au-dessus en principe, si N2 est meilleur que N1), traduit l'absence d'interaction entre N et K.
2. La courbe c, au-dessus de la courbe b, traduit une interaction N x K positive et mesurée par la partie hachurée.
3. La courbe d, au-dessous de la courbe b, traduit une interaction N x K négative et mesurée par la zone de points.

Figure 1: Représentation de l'interaction



* table des matières en dernière page

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 867 ex 1

Cote : B

Les interactions constituent un fait général. Dans ce qui précède, au lieu de passer de N1 à N2, on aurait pu passer de la variété V1 à la variété V2 ou de la densité de semis d1 à la densité d2, de la forme de potasse F1 à une forme F2, du mode d'apport M1 au mode M2, etc.

Les interactions peuvent donc concerner des facteurs qualitatifs qui ne sont pas des variables continues (ex. : formes, dates d'apport, modes d'apport de K₂O ou d'autres éléments, variétés) aussi bien que des facteurs quantitatifs (doses des autres éléments N, P, Mg, etc., densités de plantation, doses d'eau, etc.).

B - Les interactions en statistique expérimentale

Le domaine des interactions est examiné dans tous les traités de statistique. Rappelons seulement ici que la notion d'interaction est liée à l'expérimentation factorielle.

Le phénomène observé (dans le cas présent, l'effet de la potasse) est de toute évidence sous la dépendance de nombreux facteurs. En étudiant séparément les effets de ces facteurs et l'effet K, on risquerait de passer à côté des effets complexes dus à la répercussion d'un facteur sur le facteur K.

L'essai factoriel AK est établi de manière à étudier l'action des facteurs A et K dans toutes leurs combinaisons. Son intérêt principal est précisément de révéler les interactions A x K et, si elles existent, d'en tester la signification statistique.

A propos de la potasse, en particulier, l'expérimentateur a tout à gagner à faire des essais factoriels A x K ou A x B x K, et rien à y perdre (il n'y a pas de perte d'informations sur les effets principaux A, B, K).

L'expérience factorielle la plus simple est l'essai 2 x 2. C'est l'interaction la plus simple que l'on puisse étudier.

		K	
		K0	K1
A	A0	—	—
	A1	—	—

La question posée est celle-ci : l'effet du potassium K est-il le même pour les deux niveaux de A ?

L'expression $(A1 K1 - A1 K0) - (A0 K1 - A0 K0)$ mesure la différence entre l'effet K lorsque A est à son plus haut niveau et l'effet de K lorsque A est à son plus bas niveau.

Mais la question aurait aussi bien pu être : l'effet de A est-il le même pour les deux niveaux de K ? Soit : $(A1 K1 - A0 K1) - (A1 K0 - A0 K0)$.

Les deux expressions sont identiques ; c'est l'interaction AK entre les effets A et K (elle équivaut à : $A1 K1 + A0 K0 - A0 K1 - A1 K0$).

Quand le nombre de facteurs est supérieur à 2, 3 par exemple, on distingue alors les interactions de premier ordre AB, AK, BK et l'interaction de second ordre ABK. Mais lorsqu'elles sont significatives, les interactions d'ordre supérieur ne sont pas souvent facilement interprétables. Au fur et à mesure que les dispositifs expérimentaux factoriels se compliquent, le calcul et l'exposé des interactions deviennent plus difficiles.

Une interaction significative, mais faible par rapport aux effets principaux, complique l'exposé des résultats, et l'examen des effets principaux peut donner une vision correcte. Le plus souvent il faudra considérer les tables d'interaction et en mesurer l'importance réelle.

Dans l'expérimentation et les études sur la fertilisation, dans le cas du potassium en particulier, il n'est pas possible de ne pas tenir compte des interactions. Celles-ci ne doivent pas être manipulées pour embrouiller les problèmes, mais bien au contraire pour essayer de mieux dégager et expliquer les effets du potassium. Telle est la tentative faite dans les développements qui suivent.

C - Représentation des interactions au moyen des fonctions de production et des fonctions de profit

Les résultats expérimentaux ont été traités ici par le Département d'agronomie, chaque fois que faire se peut, au moyen des fonctions de production, qui permettent de passer des résultats discontinus correspondant aux doses étudiées, à des résultats continus, au moins dans la limite des résultats expérimentaux. Pour chaque calcul de fonction, l'ordinateur procède à un test d'ajustement. Si celui-ci est bon ou très bon, il est possible de raisonner sur la courbe calculée pour toutes les doses de l'intervalle expérimental, et parfois en dehors de celui-ci, à condition de rester dans des limites vraisemblables.

Au niveau d'un seul élément ou de l'effet principal d'un essai factoriel, c'est l'expression parabolique qui a été choisie. On obtient ainsi une fonction de production de type $R = a + bK + cK^2$.

En introduisant les prix agricoles et celui de l'élément, on en déduit une fonction de profit de type $P = a' + b'K + c'K^2$. On peut ainsi calculer rendement maximum et profit maximum ainsi que doses (K) correspondantes.

Au niveau de deux éléments, la fonction est représentée par une surface parabolique dans l'espace, de type : $R = a + bN + cN^2 + dK + eK^2 + fNK$.

En introduisant les prix agricoles et ceux des éléments, on en déduit la surface de profit de type : $P = a' + b'N + c'N^2 + d'K + e'K^2 + f'NK$.

Le plus souvent, la surface de réponse est convexe vers le haut, comme dans la figure 2 ci-contre, et on peut calculer

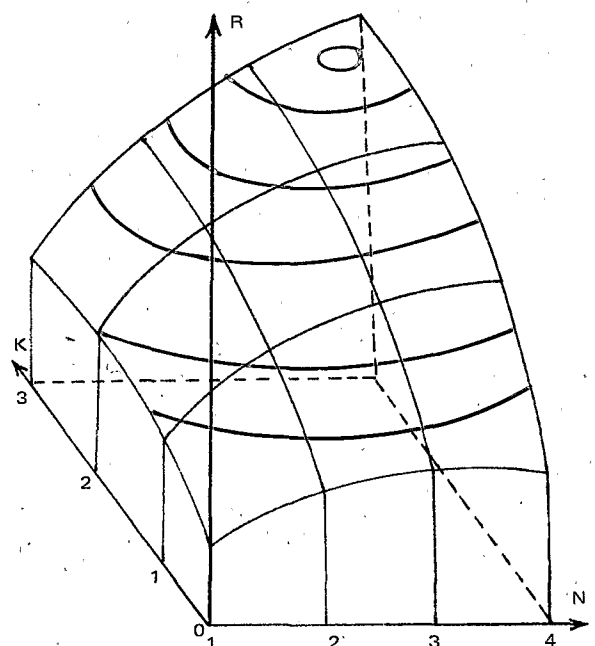


Figure 2: Surface de réponse type N x K

rendement maximum et profit maximum ainsi que les doses ($N \times K$) correspondantes.

Si on coupe cette surface par des plans verticaux parallèles aux axes N ou K , on obtient les courbes de réponse à N ou K .

Si on coupe par des plans parallèles au plan de base des fumures NK , on obtient des courbes d'égal rendement⁽¹⁾. Un même rendement peut être obtenu avec des fertilisations NK très variables et ce, d'autant plus que les rendements sont plus éloignés du rendement maximum.

La représentation dans le plan se fait en projetant les courbes d'égal rendement. Les tangentes à ces courbes parallèles aux axes N et K ont des points de tangence alignés qui délimitent ce qu'on appellera ci-dessous **les zones irrationnelles**, c'est-à-dire celles pour lesquelles l'augmentation de la fumure ne se traduit plus par un accroissement de rendement (elles ne sont évidemment calculées que pour des surfaces de réponse de type convexe).

Enfin, la droite de coût de fumure minimum est le lieu des points où, pour un même rendement, la fumure NK est la moins coûteuse. Elle passe par les points de rendement maximum et de profit maximum (fig. 3).

(1) en bleu

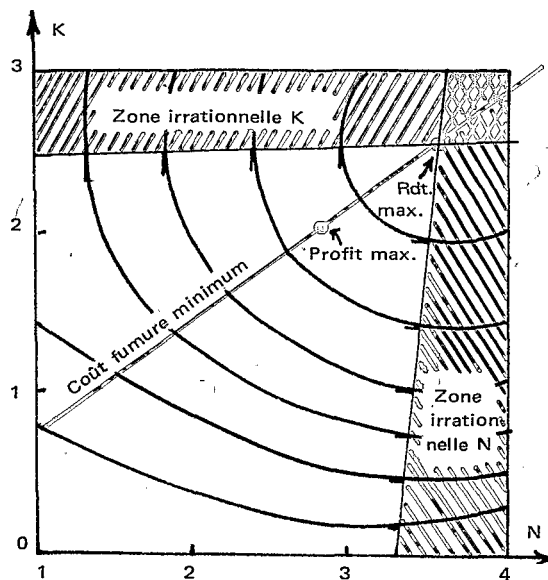


Figure 3: Représentation agroéconomique de l'interaction

1^{re} partie : l'interaction du potassium avec les autres éléments nutritifs

Ce sont les principales interactions à envisager dans le cadre de ce document, car elles peuvent être réalisées par des interventions de fertilisation. Elles mettent également en jeu des interrelations au niveau de l'absorption par la plante, qui reçoivent assez souvent la dénomination d'interactions (exemple : interactions entre cations K Ca Mg , dans la nutrition de la plante). Ces interactions des cations du sol (K en particulier) sur les teneurs cationiques des plantes ont retenu l'attention de nombreux auteurs (78) et la littérature est plus abondante sur ce sujet que sur les conséquences sur les rendements.

En fait, on s'attachera surtout, dans les développements suivants, à mettre l'accent sur les résultats possibles des interactions dans le domaine des rendements.

D'autre part, le problème des interactions du potassium avec ses propres modalités d'apport ne sera pas examiné, car il ne constitue qu'un approfondissement de l'étude de la fumure potassique stricto sensu. On entend par là l'étude des diverses interactions ne faisant intervenir que des modalités de la fumure potassique. Elles visent toutes à obtenir une meilleure efficacité du potassium en agissant par exemple sur la forme, la date d'apport, le mode d'apport ou de répartition de l'engrais potassique. On estime que ces diverses interactions sont à traiter en expérimentation séparée plutôt que combinée factoriellement avec les autres facteurs de la fertilisation.

A - L'interaction azote \times potassium

C'est la plus importante des interactions avec le potassium, et une attention toute particulière lui sera ici accordée à partir des résultats expérimentaux obtenus depuis 25 ans en France par le Département d'agronomie de la SCPA et des principales références disponibles. En ce qui concerne ces dernières, on doit à MUNSON en 1970 une revue générale du sujet (104).

C'est en effet à partir de 1952 environ que la SCPA s'est orientée vers l'étude des interactions $N \times K$ en créant peu à peu un réseau d'essais de moyenne à longue durée de type factoriel $N \times K$ ou $N \times P \times K$, dans les principales régions de France.

D'autre part, en Alsace, sur la Station d'Aspach, de 1956 à 1971, huit soles avaient été consacrées à une rotation de 8 ans et avec le même dispositif expérimental ($3 N \times 3 K \times 6$ blocs). Les essais $N \times K$ de la Station d'Aspach se situaient 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 $K0$ se sont situés dans une zone de déficience modérée. Les interactions $N \times K$ furent en moyenne assez positives, variables à la fois dans le temps pour une même culture et selon les cultures. Les résultats obtenus ont donné lieu à d'assez nombreuses publications par AUDIDIER, GARAUDEAUX et CHEVALIER, au cours de leur obtention (7-42-43-44). Ils constituent la plus importante somme de résultats obtenus en un point donné sur ce sujet.

Notre méthode consistera, pour les principales cultures tempérées, à présenter comme il a été indiqué plus haut, la synthèse par culture des résultats pluriannuels d'Aspach, en les complétant s'il y a lieu de la synthèse des résultats du réseau d'essais hors Station d'Aspach, afin de dégager, avec l'aide de la littérature disponible, les grandes tendances. Les résultats hors Station sont présentés à titre de simplification extrême sous forme de tables d'interaction $2 N \times 2 K$ entre l'équilibre minimum moyen NK des essais et l'équilibre moyen calculé correspondant au rendement maximum moyen observé.

1. Pomme de terre

A priori, pour une plante à forte réponse à K_2O comme la pomme de terre, une élévation de la fertilisation azotée, si elle s'accompagne d'une augmentation du rendement, devrait tendre à accroître la réponse à K_2O et donc à présenter une interaction $N \times K$ nettement positive.

La littérature comporte d'assez nombreuses références dans le domaine des interactions $N \times K$, $N \times P \times K$ (19-64-120-142). BOYD en 1961 (19) rapporte les résultats d'une centaine d'essais sur lesquels les interactions étaient importantes : effet $K = + 4,8$ t/ha et $NPK - NP = + 10,4$ t/ha. INKSON et REITH, en 1966 (64), ont étudié des essais facto-

riels 4^3 pendant dix ans et adopté aussi l'expression quadratique et les surfaces de réponse du second degré.

1.1. L'interaction $N \times K$ sur pomme de terre à Aspach

La fonction de production N conduit à un rendement maximum théorique de 32,3 t/ha avec **N153** et se confond donc pratiquement avec la dose supérieure en essai, et la fonction de production K à un rendement maximum théorique de 34,3 t/ha avec **K235**, un peu hors essai.

Tableau 1: Interaction $N \times K$ sur pommes de terre (t/ha)

Interaction moyenne sur 17 ans à Aspach					Interaction maximum moyenne hors Station			
N \ K	K0	K100	K200	Effet N	N \ K	K0	K269	Effet N
N 50	25,6	29,4	31,8	29,0	N 75	21,9	33,0	27,4
N100	27,1	32,5	34,5	31,4***	N168	23,5	38,0	30,8
N150	27,4	33,4	35,9	32,3***	—	—	—	—
Effet K	26,7	31,8***	34,1***	30,9	Effet K	22,7	35,5	

L'interaction $N \times K$ linéaire, entre les quatre traitements extrêmes, fut négative 2 ans, positive mais inférieure à 2,5 t/ha 7 ans, comprise entre 2,5 et 5 t/ha 5 ans, et supérieure à 5 t/ha 3 ans. Sur l'ensemble des 17 ans, elle est positive (+ 2,3 t/ha) et significative.

Le rendement maximum observé est de 35,9 t/ha avec le traitement supérieur N150 K200 et le rendement maximum théorique, calculé par la fonction de production $N \times K$, très bien ajustée aux résultats observés, se situe hors essai et est de 36,82 t/ha avec **N185 K271**.

L'interaction $N \times K$ moyenne sur les 17 ans, est représentée par la figure 4; son caractère assez nettement positif est exprimé par la zone hachurée.

L'interprétation économique sur la moyenne des 17 ans a été faite sur la base de 300 F/tonne de tubercules, 2,05 F/kg N et 1,00 F/kg K_2O du chlorure. Au niveau des effets N et K , le profit maximum pour N (par rapport à N50) eut été de 783 F/ha avec **N142** et pour K (par rapport à K0) de 2030 F/ha avec **K223**. Pour l'interaction $N \times K$, le profit maximum théorique, par rapport à N50 K0, est de 2808 F/ha, pour un rendement calculé de 36,76 t/ha obtenu avec **N171 K253** (figure 5).

Les résultats calculés, situés légèrement hors essai, sont donnés pour mémoire, mais traduisent bien l'insuffisance des doses expérimentées, compte tenu de l'importance de l'interaction $N \times K$.

Figure 4: Interaction $N \times K$ moyenne sur 17 ans (Aspach) - Pomme de terre

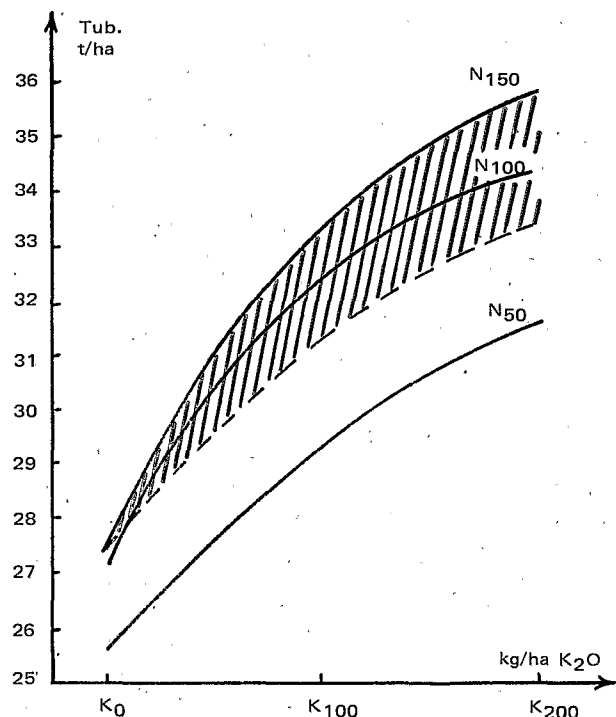
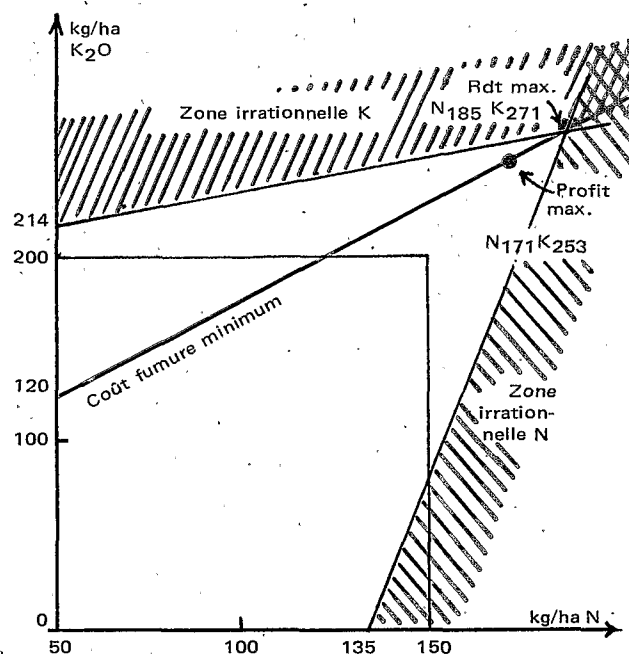


Figure 5: Interprétation agroéconomique - Pomme de terre



1.2. L'interaction N x K sur pomme de terre, hors Station

Dans le réseau d'essai hors Station, on dispose de 1963 à 1971 de 11 résultats (88). Le meilleur traitement observé correspondait à N168 K269 et le traitement minimum moyen à N75 K0. La table d'interaction 2x2 correspondant au rendement maximum moyen observé (tableau précédent) montre que l'interaction moyenne N x K ainsi calculée ressort à + 3,4 t/ha.

On peut conclure que sur pomme de terre, si l'interaction N x K ne revêt pas un caractère positif constant, elle est assez rarement négative, elle peut être nulle, mais le plus souvent elle est positive et représentée par un gain supplémentaire de 2 à 3 t/ha. Indépendamment du caractère plus ou moins positif de l'interaction entre traitements extrêmes, les meilleurs rendements expérimentaux correspondent presque toujours à des équilibres N x K intensifs voisins de (N150, N170) x (K250, K270).

2. Betterave à sucre

La betterave à sucre est une des cultures qui a le plus donné lieu à études d'interaction N x K (35-91-134-143).

L'interaction N x K se manifeste non seulement sur le rendement-qualité (sucre), mais également sur la qualité des jus d'extraction. De nombreux chercheurs ont étudié le rapport N/K₂O de la fumure conduisant à la meilleure qualité et au meilleur rendement.

2.1. L'interaction N x K sur betterave à Aspach

La fonction de production N conduit à un rendement maximum théorique de 42,74 t/ha avec N147, donc pratiquement confondu avec la dose supérieure en essai, et la fonction de production K à un rendement maximum théorique de 43,94 t/ha avec K288, nettement hors essai.

Tableau 2: Interaction N x K sur betterave à sucre (t/ha)

Interaction moyenne sur 18 ans à Aspach					Interaction maximum moyenne hors Station			
N \ K	K			Effet N	N \ K	K		Effet N
	K0	K100	K200			K0	K256	
N 50	38,5	39,9	40,6	39,7	N 95	44,7	49,9	47,3
N100	39,4	42,0	44,8	42,0	N142	43,3	53,8	48,6
N150	39,4	43,7	45,1	42,7	—	—	—	—
Effet K	39,1	41,9	43,5	41,5	Effet K	44,0	51,8	

L'interaction N x K linéaire fut négative 5 ans, positive inférieure à 3 t/ha 3 ans, comprise entre 3 et 5 t/ha 4 ans, comprise entre 5 et 10 t/ha 4 ans et supérieure à 10 t/ha 2 ans. Sur l'ensemble des 18 ans, elle est positive (+ 3,4 t/ha) et très hautement significative.

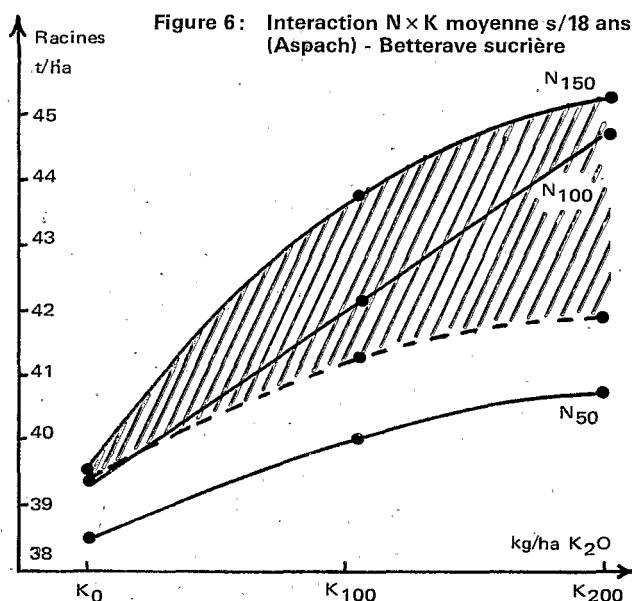
Le rendement maximum observé est de 45,07 t/ha avec N150 K200 et le rendement maximum théorique calculé par la fonction de production N x K se situe beaucoup trop nettement hors essai pour être retenu (49,62 t/ha avec N262 K530!).

L'interaction N x K moyenne sur les 18 ans est représentée par la figure 6. Son caractère fortement positif (zone hachurée) apparaît encore plus nettement que sur pomme de terre.

L'interprétation économique sur la moyenne de 18 ans a été faite sur la base de 146 F/tonne de racines, 2,05 F/kg N et 0,95 F/kg K₂O. Au niveau des effets N et K, le profit maximum pour N (par rapport à N50) eût été de 271 F/ha avec N125 et pour K (par rapport à K0) de 461 F/ha avec K233, en dehors des doses en essai et de 452 F/ha avec K200, dans les limites de l'essai.

Pour l'interaction N x K, le profit maximum théorique, par rapport à N50 K0 est de 867 F/ha pour un rendement calculé de 48,7 t/ha obtenu avec N201 K384 très nettement en dehors de l'essai et de 694 F/ha avec N150 K200 dans les limites de l'essai.

Le fait qu'au niveau des traitements N x K, les points de rendement maximum et de profit maximum calculés se soient situés tout à fait en dehors des doses en essai est à relier au caractère très positif de l'interaction N x K sur betterave (cela montre aussi, au passage, la difficulté de tracer correctement la courbe de réponse à K, sur certaines cultures, avec trois points seulement dont le point zéro).



2.2. Interaction N x K sur betterave, hors Station

Dans le réseau d'essais hors Station, on dispose de 1963 à 1976 de 16 résultats. L'interaction entre les 4 traitements extrêmes des tables N x K de ces divers essais fut en moyenne de + 2,9 t/ha.

Le meilleur traitement observé correspondrait à N142 K256 et le traitement minimum moyen à N95 K0. La table d'interaction 2x2 correspondant au rendement maximum moyen observé (tableau précédent) montre que l'interaction moyenne N x K, ainsi calculée au point le plus favorable, est très élevée et de + 5,3 t/ha racines.

2.3. Interaction N x K et qualité de la betterave

Les critères de qualité de la betterave concernant avant tout la quantité de sucre effectivement extractible, fonction de la teneur en sucre et de la pureté du jus.

2.3.1. Richesse saccharine

L'interaction N x K est importante sur la richesse en sucre. L'élévation de la dose d'azote favorise le développement des feuilles et retarde la formation des réserves. Cela s'accompagne d'une baisse de la richesse en sucre que compense souvent en grande partie une fumure potassique élevée. Ainsi à Aspach, sur une moyenne portant sur 11 ans, l'interaction fut de + 0,2 %, ce qui semble inférieur à ce qu'on observe assez souvent. Il en résulte que l'interaction N x K, exprimée sur les rendements en racines à 16 % de richesse en sucre ou en t/ha sucre, serait encore plus nettement positive.

2.3.2. Pureté des jus

Les principaux constituants du jus qui gênent la cristallisation au cours du procédé d'usinage sont K, Na, et surtout l'azote aminé α (azote nuisible). Les applications élevées de K₂O tendent à élever légèrement les teneurs en K des

racines, mais les teneurs en sodium et azote aminé tendent à diminuer et la potasse exerce de ce fait un rôle de balance plutôt favorable sur la qualité du jus. Un rapport N/K₂O judicieux de la fumure tendra à assurer le meilleur rendement en sucre.

Les résultats relatifs au rôle joué par l'interaction N x K sont concordants. Von MÜLLER et al (103) en culture sur sable et HEISTERMANN (55) en Allemagne ont établi que le rapport N/K₂O de la fumure devait être de 1/2 à 1/3 et que son élévation entraînait une augmentation de l'azote nuisible. Plus récemment encore, KÖHL a étudié le rapport N/K en solution nutritive et a enregistré une interaction positive marquée sur le rendement et la qualité avec un rapport N/K₂O optimum du milieu de 1/2,35 (69).

L'interaction N x K est donc une donnée très importante de la fertilisation de la betterave sucrière du fait que le rapport N/K intervient sur les diverses composantes du rendement en sucre.

3. Maïs

ARNON fait observer que les interactions N x K, du fait qu'elles sont souvent enregistrées dans les essais aux champs sur maïs, prouvent que la balance N/K est d'une grande importance pratique pour cette culture (5). Le maïs absorbe d'ailleurs N et K₂O dans des quantités assez voisines. L'équilibre N/K est très important dès les premiers stades de la croissance (22).

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 (21-28-38-39-70-80-106-111-146).

Les doses de potasse correctes sont le contrepois indispensable à de fortes doses d'azote (65).

L'équilibre N/K de la fumure intervient 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, le poids spécifique (21), mais le résultat final se concrétise surtout au niveau des rendements (21-123).

3.1. L'interaction N x K sur maïs à Aspach

La fonction de production N conduit à un rendement maximum théorique de 64,4 q/ha avec N113 et la fonction de production K à un rendement maximum théorique de 61,0 q/ha avec K108.

Tableau 3: Interaction N x K sur maïs (q/ha grains secs)

Interaction moyenne sur 9 ans à Aspach					Interaction maximum moyenne hors Station				
N \ K	K			Effet N	N \ K	K		Effet N	
	K0	K75	K150			K0	K158		
N33	55,0	55,2	53,6	54,6	N 71	50,8	63,9	57,3	
N66	58,8	61,3	63,0	61,0***	N127	52,0	71,1	61,6	
N99	61,4	65,7	65,2	64,1***	—	—	—	—	
Effet K	58,4	60,7*	60,6*	59,9	Effet K	51,4	67,5		

L'interaction N x K linéaire 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.

Le rendement maximum théorique calculé par la fonction de production N x K 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 7, 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 K₂O. Au niveau des effets N et K, le profit maximum pour N (par rapport à N40) eût été de 571 F/ha avec N104 et pour K (par rapport à K0) de 103 F/ha avec K79.

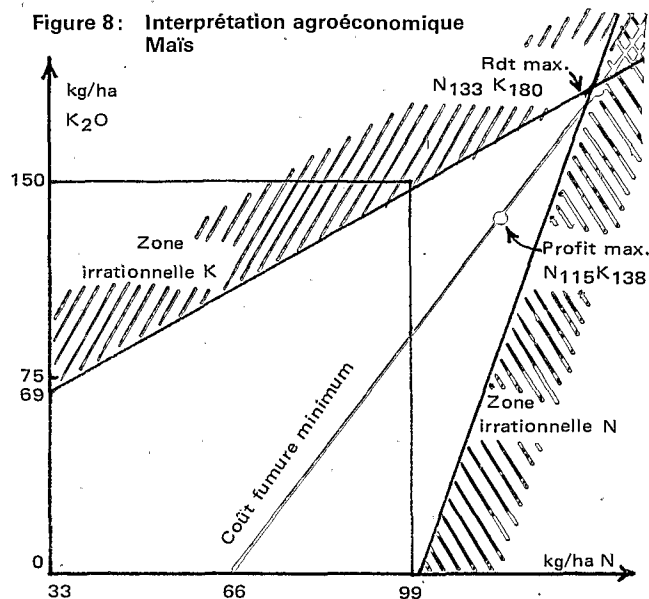
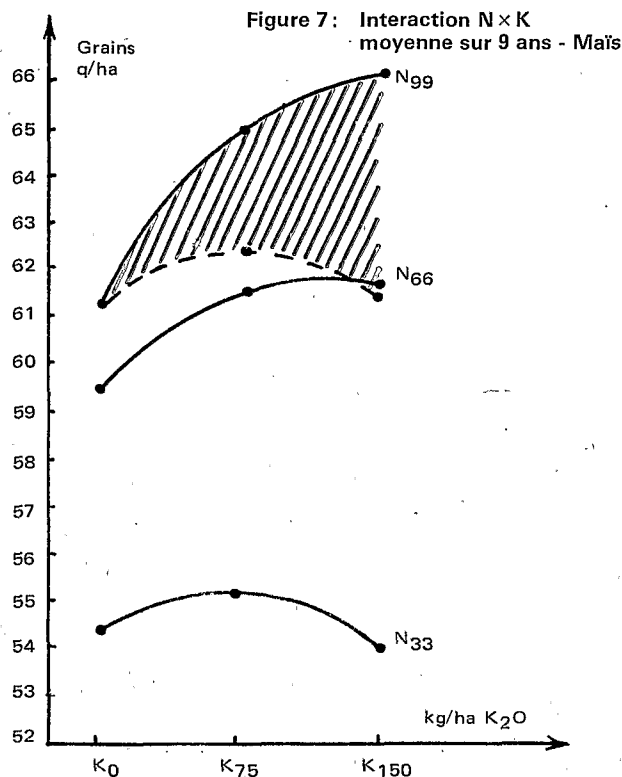
Pour l'interaction N x K, le profit maximum théorique, par rapport à N33 K0, est de 628 F/ha, pour un rendement cal-

culé 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.

3.2. L'interaction N x K sur maïs, hors Station

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.

Le meilleur traitement observé correspondrait à N127 K158 et le traitement minimum moyen à N71 K0. La table d'interaction 2 x 2 correspondant au rendement maximum moyen observé (tableau précédent) montre que 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 maximum possible, avec de fortes fumures azotées, plus se rétrécit la fourchette des équilibres N/K₂O de la fumure adéquate.

4. Blé

L'interaction entre azote et potassium sur blé n'a pas fait l'objet d'études spécialisées considérables. Cependant, la littérature comporte d'assez nombreuses remarques à ce sujet, parfois contradictoires. Le problème revêt une importance grandissante avec l'élévation des fertilisations azotées. Les graminées n'échappent cependant pas à cette interaction, ainsi que cela ressort des travaux récents de TALIBUDEEN et al (128). Ces auteurs ont surtout considéré le rapport N fertilisation / K fertilisation + K échangeable sol. Ce rapport prend une importance croissante lorsque les doses d'azote s'élèvent. Alors que la fertilisation N seule explique dans leurs essais 56 % de la variance, le rapport N/K précédent en explique 68 %. Selon les mêmes, les effets de la balance N/K de la fumure sur les rendements des graminées dépendent en particulier des quatre points suivants :

1) les conditions de sol et de climat qui affectent les besoins N et K et leur rapport optimum en vue de la croissance la plus élevée,

2) le meilleur rapport N/K peut varier selon qu'il s'agit de certaines composantes du rendement ou de paille,

3) le rapport N/K correspondant au rendement maximum en matière sèche peut ne pas correspondre au rendement maximum en protéines,

4) un rapport N/K optimum du milieu de croissance (et donc de la culture) à chaque stade de développement peut être nécessaire pour obtenir rendement maximum et meilleure qualité.

4.1. L'interaction N x K sur blé à Aspach

La fonction de production N conduit à un rendement maximum théorique de 48,3 q/ha avec N111 et la fonction de production K, à un rendement maximum théorique de 46,5 q/ha avec K153.

Tableau 4: Interaction N x K sur blé (q/ha grains)

Interaction moyenne sur 13 ans à Aspach.					Interaction maximum moyenne hors Station			
N \ K	K			Effet N	N \ K	K		Effet N
	K0	K80	K160			K0	K114	
N 65	42,5	42,5	42,8	42,6	N 61	42,3	47,0	44,6
N 95	46,5	48,2	48,3	47,6***	N104	46,0	54,3	50,2
N125	46,8	48,1	48,6	47,8***	—	—	—	—
Effet K	45,2	46,3	46,5	46,0	Effet K	44,2	50,7	—

L'interaction N x K linéaire fut négative 5 ans, faiblement positive 3 ans, moyennement positive 3 ans, fortement positive 2 ans.

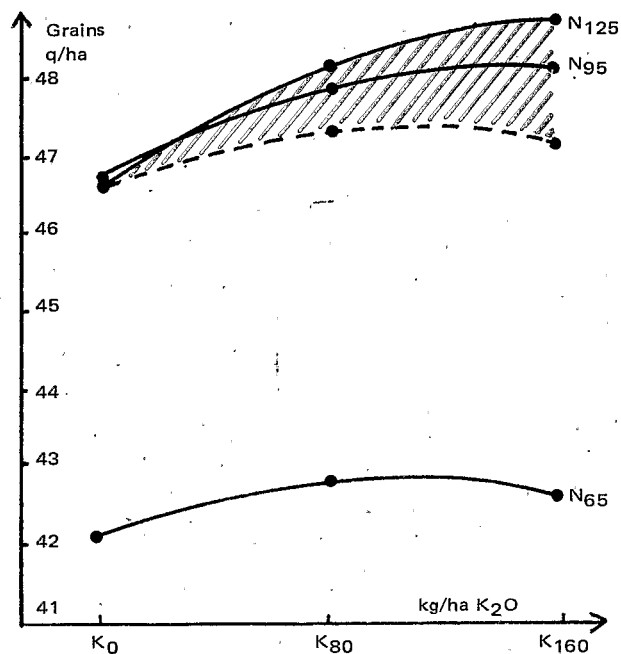
Sur l'ensemble des 13 ans, elle est légèrement positive, mais non significative (+ 1,5 q/hectare).

La fonction de production pour les traitements N x K, très bien ajustée aux résultats observés, conduit à un rendement maximum théorique de 49,2 q/ha avec N114 K180, légèrement hors essai et très proche du rendement maximum dans les limites de l'essai (49,1 q/ha avec N114 K160).

L'interaction N x K moyenne sur les 13 ans est représentée par la figure 9 qui montre un caractère positif beaucoup plus faible que sur maïs.

L'interprétation économique sur la moyenne des 13 ans, a

Figure 9: Interaction N x K moyenne sur 13 ans - Blé



été faite sur la base de 73 F/quintal de blé, 2,05 F/kg N et 0,95 F/kg K₂O. Pour l'interaction N x K, le profit maximum observé par rapport à N65 K0, est de 278 F/ha avec N95 K80.

4.2. Interaction N x K sur blé, hors Station

Dans le réseau d'essais hors Station, on dispose, de 1963 à 1976, de 65 résultats. L'interaction entre les 4 traitements extrêmes des tables N x K de ces divers essais fut en moyenne de + 2,1 q/ha, donc un peu supérieure à celle de la Station d'Aspach. Ces 65 résultats se répartissent en 43 cas d'interaction positive, avec une moyenne de + 4,9 q/ha, et 22 cas d'interaction négative, avec une moyenne de - 3,3 q/ha.

Le meilleur traitement observé correspondrait à N104 K114 et le traitement minimum moyen à N61 K0.

La table d'interaction 2 x 2, correspondant au rendement maximum moyen observé (tableau précédent), montre que l'interaction moyenne N x K ainsi calculée au point le plus favorable est de + 3,6 q/ha. Ce résultat est nettement inférieur à celui du maïs, mais demeure appréciable.

4.3. Interaction N x K et qualité du blé

L'interaction N x K intervient également en matière de poids spécifique. Il a été constaté sur de nombreux essais factoriels N x K que le PS avait tendance à baisser plus ou moins nettement et significativement avec la fumure azotée, mais surtout que l'interaction N x K était importante, en ce sens que l'azote avait un effet fortement dépressif en l'absence de potasse, et pratiquement plus d'influence dépressive en présence d'une certaine dose de potasse (tableau 5 ci-dessous),

Tableau 5: Essai de Chabeuil (Drôme) 1970, poids spécifique

N \ K	K			Effet N
	K0	K100	K200	
N 40	76,2	79,0	79,0	78,0
N 80	75,3	78,8	78,8	77,7
N120	74,3	77,2	78,3	76,6
Effet K	75,2	78,3***	78,7***	

L'interaction N x K peut aussi se manifester dans le domaine de la qualité industrielle: le potassium peut neutraliser l'effet défavorable parfois enregistré de la fumure azotée sur la qualité du gluten. Des essais factoriels azote x potasse ont montré l'effet de la potasse en présence de doses croissantes d'azote sur le coefficient de gonflement. On peut dire qu'il existe une tendance au maintien du coefficient de gonflement par une fertilisation azotée et potassique judicieuse (24).

En conclusion, le blé est une plante moins réactionnelle que le maïs à l'interaction azote x potassium, mais celle-ci tend à se manifester positivement sur les rendements dans d'assez nombreuses situations.

D'autre part, dans le domaine de la qualité, le potassium apparaît souvent comme le contre-poids des fortes fumures azotées.

5. Orge

Le problème de l'interaction N x K se présente un peu comme pour le blé. Le cas de l'orge de brasserie est au demeurant moins favorable, puisque des doses d'azote modérées sont préconisées pour des raisons de qualité. Dans le cas de l'orge pour l'alimentation animale, il est au contraire utile d'obtenir des grains riches en protéines.

5.1. L'interaction N x K sur orge à Aspach

La fonction de production N conduit à un rendement maximum théorique de 40,8 q/ha avec N72 et la fonction de production K, à un rendement maximum théorique de 39,2 q/ha avec K131.

L'interaction N x K linéaire fut négative très faible 3 ans, négative élevée 2 ans, positive très faible 3 ans, positive

moyenne 6 ans. Sur l'ensemble des 14 ans, elle est très minime (- 0,1 q/ha) et sans aucune signification.

La fonction de production pour les traitements N x K, très bien ajustée aux résultats observés, conduit à un rendement maximum théorique de 41,7 q/ha avec N72 K129, qui correspond à l'absence totale d'interaction.

L'interaction N x K moyenne calculée sur les 14 ans est représentée par la figure 10 qui montre bien sa très faible incidence.

L'interprétation économique sur la moyenne des 14 ans a été faite sur la base de 70 F/quintal, 2,05 F/kg N et 0,95 F/kg K₂O. Au niveau des effets N et K, le profit maximum pour N (par rapport à N30) eût été de 330 F/ha avec N68 et pour K (par rapport à K0) de 71 F/ha avec K84.

Tableau 6: Interaction N x K sur orge (q/ha grains)

Interaction N x K moyenne sur 14 ans à Aspach					Interaction maximum moyenne hors Station			
N \ K	K0	K80	K160	Effet N	N \ K	K0	K112	Effet N
N30	33,3	35,4	36,0	34,9	N42	34,2	38,1	36,2
N50	37,6	40,4	39,4	39,1**	N88	37,0	44,4	40,7
N70	39,4	40,9	42,0	40,8***	—	—	—	—
Effet K ..	36,8	38,9**	39,1**	38,3	Effet K ..	35,6	41,2	

Figure 10: Interaction N x K moyenne sur 14 ans Orge

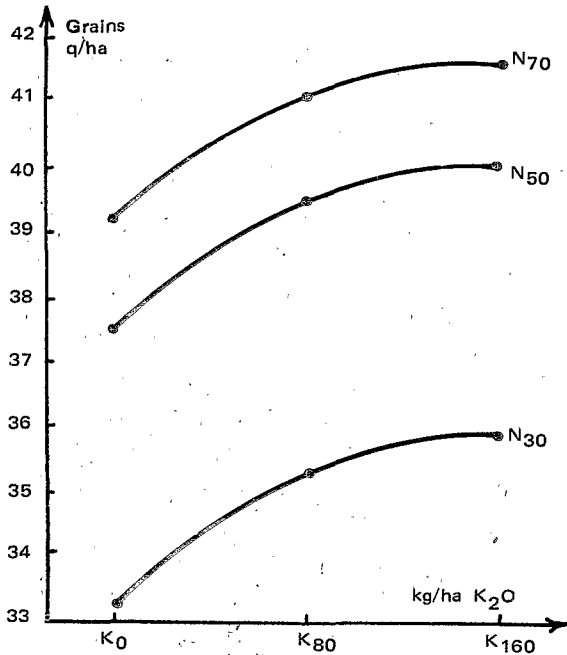
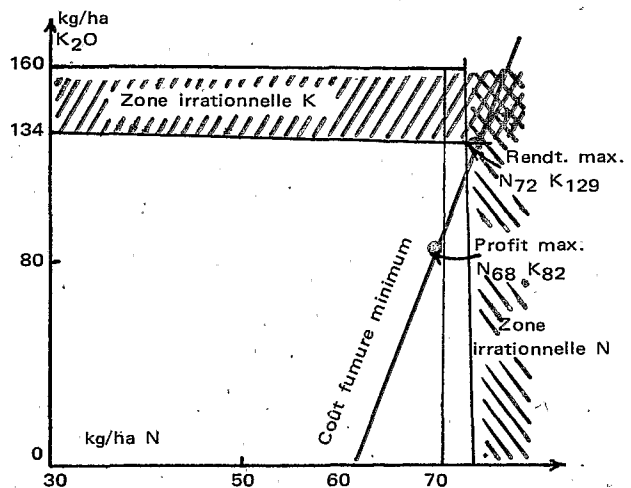


Figure 11: Interprétation agroéconomique - Orge



Pour l'interaction N x K, le profit maximum théorique, par rapport à N30 K0, est de 405 F/ha, pour un rendement calculé de 41,3 q/ha obtenu avec N68 K82 (figure 11).

5.2. Interaction N x K sur orge, hors Station

Dans le réseau d'essais hors Station, on dispose, de 1963 à 1975, de 24 résultats: L'interaction entre les 4 traitements extrêmes des tables N x K de ces divers essais, fut en moyenne de + 2,0 q/ha, donc nettement meilleure qu'à Aspach.

Ces 24 résultats se répartissent en 14 cas d'interaction positive avec une moyenne de + 5,2 q/ha et 10 cas d'interaction négative avec une moyenne de - 2,3 q/ha. Le meilleur traitement observé correspondrait à N88 K112 et le traitement minimum moyen à N42 K0.

La table d'interaction 2 x 2, correspondant au rendement maximum moyen observé (tableau précédent) montre que l'interaction moyenne N x K ainsi calculée au point le plus favorable, est de + 3,5 q/ha, résultat très voisin de celui obtenu dans le cas du blé.

En conclusion, l'orge semble se classer à peu près comme le blé en ce qui concerne la réaction à l'interaction N x K, Mais il est probable qu'il existe à cet égard des différences variétales notables et que certaines variétés à hauts rendements ont un comportement plus sensible à l'interaction.

6. Herbages et cultures fourragères

L'ensemble des herbages et des cultures fourragères présente une très grande diversité en ce qui concerne la flore, le mode de conduite et de culture, les niveaux de fertilisation.

Les herbages exploités par fauche peuvent recevoir des fortes doses d'azote. De nombreux essais ont montré que la quantité de K₂O dans la récolte était au moins égale à la quantité de N appliquée.

La littérature comporte un assez grand nombre de références de l'interaction N x K, dans de telles conditions. Les auteurs ont mesuré les effets sur la production de matière sèche et déterminé les doses de K₂O à appliquer pour que le système puisse durer sans baisse de rendement consécutive à l'épuisement du sol en potassium.

Pour les herbages exploités en pâture, l'interaction N x K revêt une moindre importance en fonction de la fumure azotée. L'intensification de celle-ci tend souvent à provoquer une déficience potassique, même en sols assez bien pourvus, comme dans les essais de DOVRAT (33).

Les cultures fourragères ou la prairie entrant en rotation présentent souvent de fortes interactions N x K qui se répètent sur l'épuisement du sol en potassium et sur la culture suivante. Les études consacrées à ou comportant l'interaction N x K portent donc surtout sur les cultures fourragères et les prairies temporaires en rotation (71).

ADAMS et TWERSKY ont montré que l'interaction N x K jouait sur la résistance au gel du gazon de *Cynodon dactylon* (2-3). WELCH et al ont obtenu des résultats dans le même sens que ceux ici obtenus dans des essais 4 N x 4 P x 4 K sur *Cynodon dactylon* (Coastal Bermudagrass) et présentés d'assez semblable manière avec surfaces de réponse et surfaces économiques (139).

Mac LEOD, en 1965, avait conduit des essais factoriels 5 N x 4 K sur un même type de sol et sur quatre espèces : luzerne, brome, dactyle, fléole. L'interaction N x K était hautement significative mais croissait très nettement de la luzerne (très faible N x K), au brome, au dactyle et à la fléole (93).

Les essais 2 N x 4 K de MONROE et al sur sable arrosé de solutions nutritives sur paturin des prés (*Poa pratensis*) ou Kentucky Blue grass ont clairement montré que les rendements les plus élevés correspondaient à certains équilibres N/K (101).

TALIBUDEEN et al, en 1976, ont étudié les rendements et l'absorption de N et K du ray-grass anglais, afin de vérifier si la teneur en N et le rapport N/K de la plante étaient systé-

matiquement en relation avec le rapport N/K dans le sol (129).

L'interaction N x K joue non seulement sur la production de matière sèche, mais aussi sur le nombre d'exploitations par an, sur la longévité de la culture, et également sur la qualité des fourrages. TEEL avait présenté en 1966 une synthèse du sujet montrant que le rapport N/K était un paramètre important à introduire dans les études de qualité des fourrages (132-133).

6.1. L'interaction N x K sur dactyle à Aspach

L'interaction N x K a été très étudiée sur prairies temporaires sur cette Station à vocation fourragère. Les essais factoriels N x P x K de type 4 N x 2 P x 4 K ont été instaurés sur la Station à partir de 1968 sur graminées pérennes exploitées en simulation de pâture. Le tableau suivant résume les résultats d'un essai en cours sur dactyle Prairial, semé en 1967.

Les doses d'azote furent de 40, 60, 80, 100 kg/ha N au départ de la végétation et 20, 40, 60, 80 kg/ha N après chaque exploitation.

Tableau 7: Interaction N x K moyenne sur 10 ans (1968-1977) sur dactyle (t/ha matière sèche) Station Aspach

N \ K	K				Effet N
	K0	K150	K300	K450	
N110	8,32	8,40	8,80	8,41	8,48
N220	9,13	10,49	10,83	11,18	10,40
N330	8,70	10,49	12,25	12,74	11,04
N440	9,27	10,57	11,95	12,96	11,19
Effet K	8,85	9,99	10,96	11,32	10,28

Les résultats de l'essai ont été présentés par GARAUDEAUX et CHEVALIER pour la période 1967-1974 (25-45). L'interaction N x K fut hautement significative à partir de la seconde année. L'interaction N x K entre les quatre traitements extrêmes, c'est-à-dire (N1 K0 + N4 K3) - (N4 K0 + N1 K3) s'est considérablement accentuée avec la poursuite de l'essai, soit de 1968 à 1977, successivement: +0,60 +0,85 +0,85 +3,09 +4,92 +5,33 +5,62 +5,43 +4,97 +4,35 et sur la moyenne sur 10 ans: +3,60 t/ha.

L'amplification de l'interaction N x K avec le temps provient surtout de la diminution considérable de l'effet N avec K0, due en partie à la dégradation du gazon (de 1968 à 1977, l'effet N4 K0 - N1 K0 passe de +4,61 t/ha à -0,07 t/ha). Au contraire en présence de K450, l'effet N était de +5,21 t/ha en 1968 et encore +4,28 t/ha en 1977.

Les résultats obtenus sur ray-grass anglais sont assez semblables (26). Sur ray-grass anglais (Melle Pature), l'interaction N x K fut également régulièrement positive et très croissante avec le temps, soit de 1971 à 1977: +1,51 +0,77 +2,39 +3,16 +4,26 +6,02 +6,02 et sur la moyenne sur 7 ans: +3,45 t/ha.

Ici aussi, l'effet azote s'est beaucoup mieux maintenu avec le temps en présence de K450 de 1971 (+7,84 t/ha) à 1977 (+5,02 t/ha) qu'en présence de K0 (chute de +6,33 t/ha à -1,00 t/ha).

Les explications de telles interactions seront recherchées plus loin.

Tableau 8: Interaction N x K moyenne sur 7 ans (1971-1977) sur ray-grass anglais (t/ha matière sèche) Station Aspach

N \ K	K				Effet N
	K0	K150	K300	K450	
N1	6,45	6,76	6,82	5,95	6,50
N2	8,02	8,53	8,66	9,09	8,57
N3	9,40	10,23	11,11	11,67	10,61
N4	9,53	12,12	12,85	12,49	11,75
Effet K	8,35	9,41	9,87	9,80	9,36

6.2. L'interaction N x K sur ray-grass - trèfle

Le tableau 9 ci-contre donne les résultats moyens obtenus sur quatre prairies temporaires (ray-grass d'Italie, trèfle violet) de deux ans, incluses dans une rotation: pomme de terre, blé, orge, ray-grass - trèfle 2 ans, sur un essai hors Station, sur un sol pauvre en potasse (K₂O échangeable 0,07°/°° avec CEC = 8 meq %).

Tableau 9: Interaction N x K moyenne sur 8 ans (1963-1971) sur ray-grass-trèfle (t/ha foin à 14% d'eau) Essai de Pont Saint Martin (Loire Atlantique)

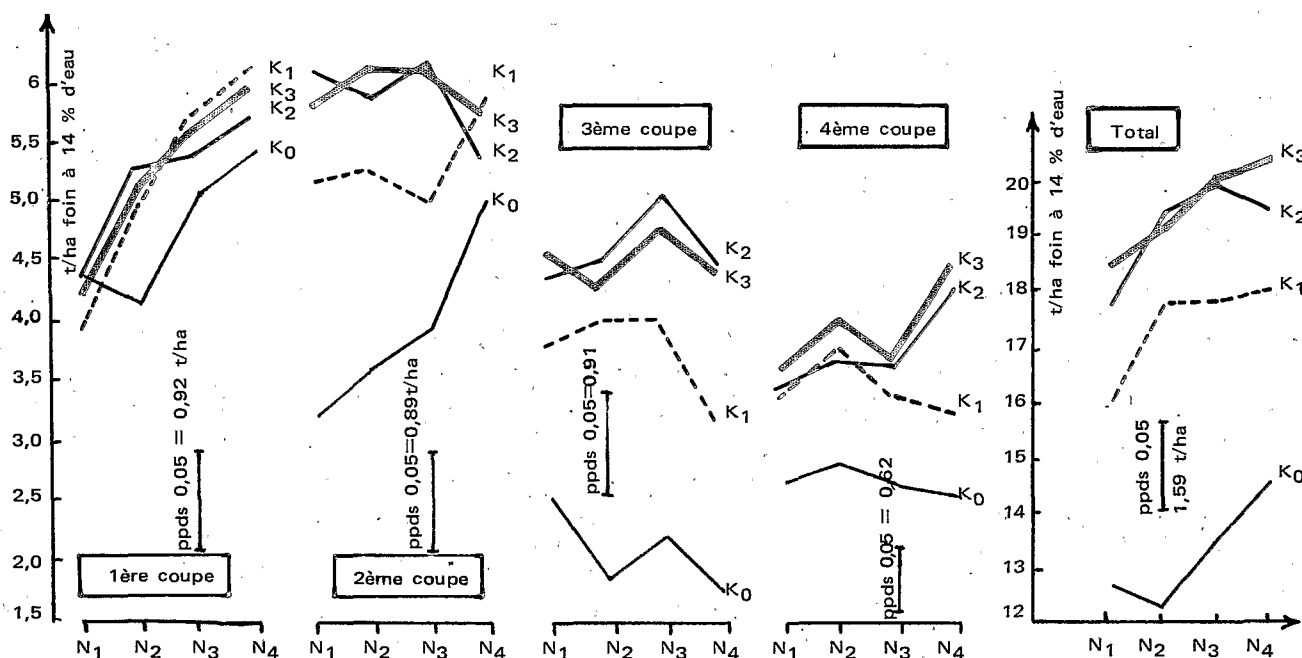
N \ K	K0	K100	K200	K300	Effet N
N 45	7,32	9,86	10,00	10,28	9,36
N 75	7,91	10,52	11,28	11,31	10,25
N105	8,74	11,52	12,19	12,04	11,12
N135	9,00	11,47	12,66	11,97	11,27
Effet K	8,24	10,84	11,53	11,40	10,50

L'interaction moyenne sur 8 ans est exactement nulle, mais les meilleurs résultats correspondent assez nettement aux quatre traitements les plus intensifs.

En fait, l'étude de l'interaction N x K dans le cas d'un

mélange graminée - légumineuse doit être plus poussée et comporter l'examen des interactions sur chacun des deux constituants et pour chaque coupe. Voici, à titre d'exemple, les résultats de 1965 sur l'essai précédent (fig. 12).

Figure 12: Interactions N x K sur ray-grass Italie / trèfle violet - Essai de Pont Saint Martin, Loire Atlantique, 1965



◦ En coupe 1, l'interaction N x K a été très faible; l'effet N a été très marqué (+ 1,52 t/ha) et l'effet K moyen (+ 0,52 t/ha).

◦ En coupe 2, l'interaction a été négative et hautement significative. L'effet N est devenu moyen (+ 0,53 t/ha) et l'effet K très élevé (+ 2,01 t/ha).

◦ En coupe 3, l'interaction est faible; l'effet N est minime et relayé par un effet K très élevé (+ 2,43 t/ha).

◦ En coupe 4, l'interaction N x K devient positive et significative.

Sur le total des 4 coupes, l'interaction N x K était négligeable (+ 0,16 t/ha). Une interaction globale nulle sur le mélange peut donc cacher des interactions notables selon les coupes.

Ces résultats sont à mettre en parallèle avec l'effet de l'interaction N x K sur le développement (ou la régression) du trèfle et selon le rang de l'exploitation. En coupe 2, en particulier, l'interaction N x K fut très négative sur le pourcentage de trèfle. De K0 à K300, le trèfle est passé de 5 à 73% en N1 et seulement de 2 à 20% en N4; le pourcentage moyen était de 32% pour l'ensemble de l'essai. En coupe 3, le pourcentage moyen de trèfle passe à 73% et l'effet dépressif N s'est surtout manifesté avec K0 (70 à 10% de trèfle) et faiblement avec K200 ou K300 (90 à 80%).

Cet exemple montre la complexité des interactions N x K dans un tel cas. Celles-ci ont plutôt tendance à se neutraliser, mais la résultante finale dépend des doses expérimentées, des conditions de sol (et de climat de l'année).

6.3. Prairies naturelles

Les deux exemples ci-dessous concernent deux essais poursuivis sur prairies naturelles en Normandie. Sur l'essai des Loges sur Brécéy (Manche) poursuivi de 1968 à 1973, la prairie était très ancienne, à base de plantains, renoncules, pissenlits, flouves avec très peu de trèfles, et le sol était pauvre en potasse (0,08^g/₁₀₀ K₂O échangeable pour CEC = 14,3 meq %). Sur l'essai de Saint Martin d'Osmonville (Seine Maritime), poursuivi de 1969 à 1975, le sol était mieux pourvu (0,15^g/₁₀₀ K₂O échangeable de 0 à 10 cm et CEC = 16,1 meq %). Dans les deux cas, les rendements ont été contrôlés par fauche au stade pâture.

L'interaction N x K est positive dans les deux cas et très voisine (+ 0,71 t/ha et + 0,66 t/ha). L'interaction N x K à attendre dans de tels cas dépend en particulier de l'état de la flore, de la fourniture N et K du sol, des doses apportées. Les conditions sont très différentes de celles des essais sur graminées de la Station d'Aspach où l'on enregistrait des interactions considérables.

Tableau 10: Interaction N x K moyenne sur 2 prairies naturelles

Les Loges, t/ha foin sec (moyenne 6 ans)						St-Martin, t/ha foin sec (moyenne 7 ans)							
N \ K	K					Effet N	N \ K	K					Effet N
	K0	K70	K140	K210				K0	K70	K140	K210		
N 0 ..	6,50	7,74	8,11	7,92	7,58	N 0 ..	5,79	6,61	6,92	6,44	6,44		
N 50 ..	8,05	8,64	9,02	9,20	8,73**	N 65 ..	7,39	7,96	8,31	8,33	8,00***		
N100 ..	8,62	9,82	9,84	10,30	9,65***	N130 ..	8,01	9,53	9,65	10,06	9,31***		
N150 ..	9,84	9,89	11,49	11,97	10,79***	N195 ..	9,72	10,46	10,81	11,03	10,51***		
Effet K .	8,25	9,02**	9,61**	9,86***	9,19	Effet K .	7,73	8,64**	8,93***	8,96***	8,56		
ppds 0,05 Effets N,K = 0,56 Table N x K = 1,12 ppds 0,01 Effets N,K = 0,76 Table N x K = 1,53						ppds 0,05 Effets N,K = 0,34 Table N x K = 0,68 ppds 0,01 Effets N,K = 0,46 Table N x K = 0,93							

En conclusion, les interactions N x K sur herbages et cultures fourragères présentent une grande diversité liée aux conditions floristiques et aux modes d'exploitation de ces cultures. S'agissant de plantes à prélève-

ments en potassium importants, l'intensification sera presque toujours de nature à favoriser des interactions positives avec l'azote (71).

7. Oléagineux

Le colza est particulièrement sensible à l'interaction N x K au niveau de la teneur en huile.

Le tableau d'interaction N x K moyenne suivante sur 8 ans a été enregistré sur la Station d'Aspach; les doses N ten-

dent à faire baisser la teneur en huile, mais cette baisse est moins forte avec les doses de potasse croissantes. L'interaction N x K (+ 0,8 %) est rendue positive surtout par la diminution de la teneur avec N205 K0.

Tableau 11: Colza (teneur en huile) - (% de grains à 10% d'eau) Aspach

N \ K	K			Effet N
	K0	K140	K280	
N 95	48,4	48,6	49,2	48,7
N150	48,7	48,9	49,2	48,9
N205	47,4	48,4	49,0	48,3
Effet K	48,2	48,6	49,1	

En R.F.A., FORSTER a rapporté des résultats du même type obtenus dans des essais en pots (40). Par contre, il ne semble pas que l'interaction N x K joue en ce qui concerne la composition de l'huile. Selon ARNON, le principal rôle de K chez les oléagineux se situe dans ses interactions avec N. L'engrais potassique aide à contrôler les relations entre les hydrates de carbone et l'azote dans les plantes. Cela revêt

une importance particulière lorsque l'excès de fourniture d'azote engendre une croissance excessive et expliquerait l'effet en général bénéfique de K₂O sur le rendement exprimé en huile (6).

(suite en page 14)

Un exemple d'interaction N x K sur pomme de terre (page couleur ci-contre)

Comme il a été dit plus haut, l'interaction N x K est le plus souvent positive sur pomme de terre. Les planches en couleurs de la page suivante représentent les 4 coins de la table d'interaction N x K sur l'essai d'Omiécourt (Somme) en 1965. Le dispositif expérimental étudiait ici les 12 combinaisons N x K de 3 doses N et 4 doses K₂O.

t/ha tous tubercules

	K0	K150	K300	K450
N 75	20,2	—	—	33,1
N150	—	—	—	—
N225	24,1	—	—	42,3

Les planches en couleurs montrent de haut en bas l'effet de l'azote de N75 à N225 avec K0 ou avec K450 et de gauche à droite l'effet de la potasse de K0 à K450 avec N75 ou N225.

Essai d'Omiécourt sur pomme de terre



Parcelle N75 K0



Parcelle N75 K450



Parcelle N225 K0



Parcelle N225 K450

8. Cultures spéciales, arboriculture, viticulture

Les interactions N x K n'ont pas fait l'objet d'études aussi nombreuses sur ces cultures, ou bien n'y ont pas été étudiées comme sujet principal. Cet ensemble recouvre d'ailleurs une infinité de situations. Sur les nombreux essais de fertilisation étudiant surtout l'équilibre NPK en général, on peut parfois isoler les interactions.

Sur les cultures légumières, nous citerons en particulier les interactions N x K signalées au Symposium Potasse de 1966, par MALQUORI sur artichauts en Italie (équilibre N/K₂O 1/1,5 nettement meilleur que 1/0,5) (97), par BOTTINI sur poivron (16), par LAVALLEYE et STEPPE sur pois (interaction NKCa) (77).

Au Colloque de l'Institut International de la Potasse de Florence (1968), l'interaction N x K a donné lieu à des déve-

loppements de SPALDON et IVANIC sur le piment (122), de LANDI sur diverses cultures maraîchères (73), de MUCI sur le melon (102), de WINSOR sur la tomate (145).

LANDI a rapporté des essais factoriels 3 N x 3 P x 3 K, en particulier sur ail et petits pois. L'interaction N x K entre traitements extrêmes de la table N0, N1, N2 x K0, K1, K2 était positive et hautement significative surtout sur ail (+ 7,79 q/ha pour un rendement du traitement de base N0 K0 de 69,92 q/ha). Sur petits pois, elle était de + 1,17 q/ha pour N0 K0 = 8,89 q/ha.

Le rapport de WINSOR était très approfondi sur l'interaction N x K sur tomates en serres, à partir d'essais factoriels 3 N x 3 K x 2 P x 2 Ca x 2 Mg, conduits pendant une dizaine d'années.

Tableau 12: Interaction N x K sur tomate

	Rendements fruits kg/pied			% de fruits à maturation anormale			% de fruits à formes irrégulières		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3
N1	3,71	3,97	3,86	20,3	7,2	2,4	33,5	25,4	24,8
N2	4,27	4,67	4,62	35,7	11,4	4,5	38,6	30,2	20,0
N3	4,12	4,64	4,66	32,4	9,2	2,5	33,4	25,7	18,5

Les doses furent en moyenne de 165, 420, 910 kg/ha N et 480, 960, 1920 kg/ha K₂O.

L'interaction entre extrêmes était de + 0,39 kg par pied (significative). L'interaction portait aussi sur le pourcentage de défauts de maturation et sur celui de fruits à formes irrégulières.

Sur épinards, en culture légumière de plein champ, LOUÉ a enregistré sur plusieurs essais des interactions N x K très positives.

Ainsi, sur l'essai d'Omiécourt (tableau ci-dessous), en 1974, l'interaction était très significative et de + 10,3 t/ha en vert (89).

Tableau 13: Rendement en matière fraîche (t/ha)

N	K	K0	K100	K200	K300
	N 80		17,1	24,0	24,2
N160		23,9	35,5	39,2	44,5

L'interaction N x K en cultures protégées avait été abordée au Colloque de Florence en particulier par JUNGK (67) et STEINECK (124).

Les conditions sont à cet égard, très différentes de celles qui prévalent en agriculture. Les quantités d'éléments minéraux mises en jeu sont très supérieures et, d'autre part, le problème des ions NO₃⁻ et NH₄⁺ y est très différent. En l'absence de nitrification, l'absorption de NH₄⁺ est plus importante et il peut y avoir une forte concurrence entre les ions K⁺ et NH₄⁺. JUNGK a présenté des résultats sur azalées en relation avec la concentration en NH₄ et K des solutions nutritives (67).

L'arboriculture fruitière et la viticulture ont donné lieu à

un nombre d'expériences nettement plus faible que pour les grandes cultures.

Sur vigne, il y a très peu d'essais factoriels en France, car la fertilisation azotée y est assez plafonnée et la vigne se prête assez mal aux grands dispositifs. On dispose cependant de résultats d'interaction dans le réseau expérimental SCPA.

Sur l'essai d'Aigues-Mortes (Gard), factoriel 3 N x 3 P x 3 K, étudiant en particulier (N0, N50, N100) x (K0, K100, K200), l'interaction N x K moyenne sur 4 ans a été de + 2,2 hl/ha entre traitements extrêmes, la meilleure combinaison étant successivement N50 K200, N0 K100, N100 K200, N50 K200, ce qui traduit d'importantes fluctuations annuelles pour la dose N (89).

9. Cultures tropicales

En 1958, PRÉVOT et OLLAGNIER considéraient que le rapport K/N des exportations des cultures tropicales permettait de les classer en trois catégories: cultures à prédominance potassique (manioc, bananier, palmier à huile, ananas, cocotier, canne à sucre), cultures intermédiaires (tabac, sisal, soja, cacao, café) et cultures à prédominance azotée (maïs, riz, thé, hévéa, coton, arachide) (112). Cette considération peut indiquer seulement des tendances en matière d'interaction N x K.

En ce qui concerne l'interaction N x K sur les cultures tropicales, on peut aussi faire une distinction entre les cultures industrielles et les cultures dites vivrières. Les premières font souvent l'objet de plantations conduites avec des méthodes plus ou moins intensives et avec du matériel végétal dont la productivité a été très améliorée par les sélections. Les interactions positives N x K jusqu'ici reconnues, y sont beaucoup plus fréquentes que pour les cultures vivrières.

Un exemple d'interaction $N \times K$ très positive sur blé :



Essai de Pont Saint Martin (N0 K0).



Essai de Pont Saint Martin (N120 K0).

Bien que l'interaction $N \times K$ soit en général moyenne sur blé, il existe des cas où elle est très accusée si, par exemple, les doses d'azote entraînent une dilution de la nutrition potassique, s'il y a risque de verse avec les doses nulles ou trop faibles de potasse.

Ce fut assez souvent le cas sur l'essai de Pont Saint Martin, près de Nantes, sous climat atlantique.

	K0	K50	K100	K150
N 0	34,6	—	—	33,8
N 40	—	—	—	—
N 80	—	—	—	—
N120	42,5	—	—	63,8

Il ne sera fait état dans ce qui suit que de quelques exemples typiques et des grandes tendances qui se font jour.

Au Colloque d'Abidjan (1973), RICHARD estime qu'en raison de l'importance prévisible croissante du potassium dans la fertilisation des cultures tropicales en voie d'intensification, il sera très important d'étudier non seulement les effets K, mais surtout les interactions de K avec les autres facteurs de production. Il insiste sur la notion d'interaction, beaucoup plus riche d'enseignements que l'étude de l'effet K isolé. Cet auteur a surtout traité des relations de K_2O avec le climat, la fertilisation organique, les restitutions (116).

Au même Colloque, ANDERSON a passé en revue les réponses à K sur les principales cultures de l'est de l'Afrique, signalant quelques cas d'interaction positive avec l'azote, sur caféier robusta non mulché, sur théier, sur canne à sucre, sur cocotier et sur maïs (4).

Au Colloque de Budapest (1974), KANWAR avait dressé un tableau de l'état des besoins en K et des réponses à K des cultures de l'Asie tropicale. Cet auteur postulait qu'en raison de la déficience azotée fréquente des sols et de l'utilisation traditionnelle de variétés peu productives, le potassium a été fort négligé (68).

9.1. Oléagineux

L'analyse la plus poussée du problème des interactions $N \times K$ sur cultures tropicales est peut-être celle d'OLLAGNIER et OCHS sur les oléagineux (110). Ils ont distingué quatre types principaux d'interactions.

- Type A : N seul, positif ; K seul, dépressif, $NK \geq N$
- Type B : N seul, dépressif ; K seul, positif, $NK \leq K$
- Type C : N seul, positif ; K seul, positif, $NK > N + K$
- Type D : N seul, positif ; K seul, positif, $NK \leq N + K$

○ Chez le palmier à huile et le cocotier, les réponses aux apports de potassium sont beaucoup plus importantes et fréquentes que celles dues à l'azote. Il y a de nombreuses interactions qui résultent, en cas de déficience en potassium, d'effet dépressif de l'azote utilisé seul (antagonisme $NH_4 - K$). Les auteurs admettent que l'utilisation de N nitrique devrait permettre l'obtention d'interactions $N \times K$ positives utiles.

Sur cocotier, la culture de nouveaux hybrides, présentant des besoins en azote beaucoup plus élevés, sera de nature à faire ressortir des interactions $N \times K$.

○ Sur arachide, les interactions $N \times K$ semblent rares et peu marquées.

L'absence d'interaction $N \times K$ importante (type C) proviendrait du fait que pour l'instant on n'observe pas d'effet principal N important, l'alimentation azotée étant en général suffisante.

On rencontre plus souvent des interactions de type B, avec K comme facteur limitant et antagonisme $NH_4 - K$.

9.2. Cultures fruitières

Sur ananas au Cameroun, GAILLARD rapporte les résultats d'essais d'interaction $N \times K$, étudiant 7 des combinaisons de (0, 2, 4 g N par plant \times 0, 2, 4, 8 g K_2O par plant) sur sol riche et sur sol pauvre en potasse. Sur le sol riche, il n'y avait pas d'effet K_2O sur le rendement, mais les considérations de qualité et de tenue du fruit ont exigé $K_2O/N = 1$. Sur le sol pauvre, les équilibres $K_2O/N = 2$ sont les plus rentables, mais avec 8 g K_2O par plante, l'acidité est trop élevée et l'auteur préconise alors $K_2O/N = 1,5$ (41). Les mêmes essais ont été suivis par MARCHAL et al, par analyses végétales qui ont montré que si l'action de l'azote déterminait les besoins en potasse, elle stimulait l'absorption du potassium encore plus qu'elle n'augmentait la vitesse de croissance, ce qui expliquerait l'importance de l'équilibre N/K pour cette culture et l'épuisement des sols en potasse sous ananas (98).

9.3. Canne à sucre

STEWART en Afrique du Sud, rapporte les résultats d'importants essais régionaux factoriels $N \times K$, sur un certain nombre desquels l'interaction $N \times K$ était positive, dont voici le meilleur exemple obtenu, il est vrai, sur sol pauvre en potassium (0,064 $^{\circ}/_{\circ}$ K). L'interaction entre extrêmes est de + 6,0 t/ha. Au point de rendement maximum (N330 K360) elle est considérable (+ 10,8 t/ha). Ce qui est surtout typique dans cet exemple, c'est l'effet dépressif de N en l'absence de K et le faible effet de K avec N0. Le meilleur équilibre N/K de la fumure selon l'auteur serait compris entre 1/1 et 1/1,5 avec une préférence vers les équilibres 1/1 (126).

Tableau 14: Rendements en t/ha de sucre

N \ K	K				
	0	36	180	275	360
0	12,2	13,8	12,8	15,5	12,9
110	10,7	19,1	20,1	18,1	19,0
220	10,0	18,3	18,1	16,9	19,8
330	9,7	15,2	18,5	20,4	21,2
440	8,9	14,8	19,9	18,2	15,6

On peut citer aussi, au Brésil, les études de MALAVOLTA qui ont porté sur 40 essais factoriels $3 N \times 3 P \times 3 K$, suivis d'autre part par analyses foliaires (96).

9.4. Théier

Sur théier, K est, après N, le second élément en quantité dans la plante. WILLSON au Kenya a poursuivi dix essais factoriels. Le potassium a limité la réponse à l'azote sur certains d'entre eux, et cet auteur a adopté l'analyse foliaire pour détecter les conditions d'interaction $N \times K$. La dose optimale K_2O dépend nettement de la fumure azotée (144).

RANGANATHAN relate également des essais factoriels $N \times (PK)$ qui ont mis en évidence une interaction positive significative entre les doses de P et de K appliquées dans l'année de la taille et les doses de N de la deuxième année (113).

Aux Indes également, KANWAR a donné un bel exemple d'interaction $N \times K$ très positive sur plantation âgée (68).

9.5. Riz

Sur le riz, les réponses à la potasse sont assez rares, sauf dans les conditions intensives avec des variétés hautement productives et en présence de fortes doses N. TANAKA a établi que lorsque ces deux conditions sont remplies, des réponses à K_2O apparaissent, qui sont actuellement masquées par le complexe variéto-climatique (131).

Von UEXKÜLL insiste sur la balance N/K durant les divers stades de la croissance. Selon cet auteur, une cause fréquente de l'absence de réponse du riz à la potasse serait la mauvaise période d'apport de K_2O qui provoquerait une mauvaise balance N/K de la nutrition (135).

DESKMUKH a présenté des résultats d'interaction $N \times K$ selon une méthode très voisine de celle ici développée, avec approche économique et surfaces de profit à partir d'essais $5 N \times 5 K$. L'interaction $N \times K$ était positive et significative et de + 5,9 q/ha (le rendement passant de 39,2 q/ha en N0 K0 à 65,7 q/ha en N4 K4) et l'auteur concluait à l'intérêt d'équilibres N/K de la fumure différents de ceux jusqu'alors préconisés (31).

(suite du paragraphe en page 18)

essai de Pont Saint Martin - Loire Atlantique - en 1968



Essai de Pont Saint Martin (N0 K150).



Essai de Pont Saint Martin (N120 K150).

Le dispositif expérimental de cet essai étudiait en particulier l'interaction $N \times K$ avec quatre niveaux pour chaque élément, soit les 16 combinaisons de la table ci-contre (résultats en quintaux/hectare de grains).

Les 4 planches en couleurs correspondent aux 4 coins de la table d'interaction $N \times K$ et représentent donc l'interaction linéaire. Celle-ci fut très hautement significative.

La potasse a eu très peu d'effet avec N0. Elle a agi positivement en présence de N40 (+ 5 q/ha), de N80 (+ 12 q/ha) et de N120 (+ 21 q/ha).

VELLY rapporte sur riz à Madagascar les résultats d'un essai $2 N \times 2 K$ qui nous paraît très instructif. Il s'agit d'un essai conçu dans un but de vulgarisation pour montrer aux paysans l'utilité d'inclure la potasse dans la fumure du riz, même lorsque la fumure est assez modeste.

Tableau 15: Rendements en q/ha de riz

N \ K	70/71		71/72		72/73	
	K0	K45	K0	K45	K0	K45
N30	39,7	39,7	27,4	28,1	27,9	28,7
N60	48,0	47,1	30,3	29,3	28,7	33,0

Les deux premières années l'effet K et l'interaction $N \times K$ sont nuls.

En troisième année, l'interaction devient positive (+ 3,5 q/ha) et significative. En l'absence de potasse, l'effet azote est passé en trois ans de + 8,3 à 0,8 q/ha. VELLY conclut que même avec des doses d'éléments fertilisants modestes et en présence de rendements peu élevés, il est prudent d'inclure, dès le début, K_2O dans la fumure du riz (137).

9.6. Cultures vivrières en général

En Sierra Leone, HAQUE montre que le besoin en fumure potassique s'élèvera avec l'augmentation des apports de N et P et qu'il convient de s'en préoccuper, même s'il y a pour le moment peu de réponses (48).

Au Nigéria, sur les cultures par excellence gourmandes en K_2O que sont l'igname et le manioc, OBIGBESAN indique qu'il faut apporter des doses de K_2O plus élevées que par le passé. Les exigences en K augmentent nettement avec l'intensification de la culture, et lorsqu'on fertilise les ignames uniquement avec du sulfate d'ammoniaque, on enregistre une baisse de qualité par rapport à la fertilisation NK (108).

Dans les savanes d'Afrique, l'apparition des déficiences en K est assez récente. HEATHCOTE a bien démontré que l'utilisation des engrais potassiques était essentielle dans les conditions de la culture intensive et continue dans des

régions où l'on considérait jusqu'ici que les cultures pouvaient se passer d'engrais potassiques.

Dans les conditions de culture non intensive qui dominent très largement dans la plupart des zones de savanes, le problème ne se pose pas. Les interactions de K avec N surtout ne pourront apparaître qu'à la suite:

- 1) d'emploi de variétés améliorées,
- 2) de la durée des cultures,
- 3) de l'adoption de dates et de densités de plantation optimales,
- 4) de l'élimination des résidus végétaux (50).

Ces conditions sont précisément remplies sur les essais et HEATHCOTE cite des résultats obtenus au Nigéria, qui nous paraissent également typiques. L'interaction $N \times K$ a été positive et significative dans plus de la moitié des cas examinés, dont voici deux exemples.

Tableau 16: Interaction $N \times K$

	1971 Sorgho-grain		1970 Maïs-grain	
	K0	K54	K0	K54
N 58	10,62	16,66	10,71	13,88
N116	9,23	21,11	11,79	25,96

Les interactions de 5,8 et 11,0 q/ha respectivement sont énormes par rapport aux rendements du traitement de base. Et encore, la dose N58 constituait le double des recommandations alors en vigueur pour le sorgho dans la région de l'essai. Les données montrent de plus en plus nettement l'importance d'une fertilisation potassique correcte pour valoriser la fumure azotée (50-51).

En conclusion, l'interaction $N \times K$ sur les cultures tropicales concerne surtout actuellement les cultures conduites en plantations industrielles pour des raisons de niveaux de rendement atteints grâce à l'élimination de nombreux facteurs limitants.

Sur riz et cultures vivrières, ces conditions seront de plus en plus remplies et le potassium apparaîtra de plus en plus comme un facteur limitant de l'effet de la fertilisation azotée sur variétés plus productives.

10. Considérations sur l'interaction $N \times K$

L'importance attribuée à l'interaction $N \times K$ dans la réalisation du rendement amène à tenter de formuler des considérations de caractère plus général à cet égard.

1°. L'importance de l'interaction $N \times K$ dans une région dépend de nombreux facteurs.

Les effets de l'interaction $N \times K$ sur le rendement et la qualité dépendent beaucoup du matériel végétal cultivé et des conditions de milieu sol et du climat, ainsi que des techniques culturales (dont surtout les niveaux de fertilisation).

La plupart des agricultures sont susceptibles de présenter des interactions $N \times K$ positives, en particulier avec les progrès dans l'amélioration du matériel végétal et dans les techniques culturales et de fertilisation.

Les conditions de milieu interfèrent beaucoup sur les besoins des plantes en azote et en potassium et aussi sur le rapport N/K permettant l'obtention du rendement maximum. Les espèces et même les variétés diffèrent quant à leur faculté d'utiliser le potassium.

Divers auteurs ont aussi montré que le meilleur rapport N/K pour une certaine composante du rendement n'était

pas toujours le meilleur pour d'autres composantes. D'autre part, le rapport N/K conduisant à la plus forte production de matière sèche peut ne pas correspondre au plus fort rendement en protéines. Le rapport N/K interfère sur le métabolisme et la résistance aux maladies. Son élévation tend à accroître la sensibilité à la pourriture des tiges et à diverses maladies cryptogamiques des céréales et du maïs.

Il est possible de synthétiser l'interaction $N \times K$ en un point (ou une petite région) si l'on dispose d'essais factoriels précis conduits pendant plusieurs rotations.

L'exemple précédent des essais $N \times K$ de la Station d'Aspach, poursuivis depuis plus de 20 ans, a montré que l'interaction $N \times K$ revêtait une ampleur différente selon les cultures. Les résultats peuvent en être synthétisés selon les rotations et toutes cultures confondues et, pour cela, il est commode de raisonner en termes économiques, dénominateur commun à toutes les cultures (44).

Une opération du même genre a été tentée par BRUCH-HOLZ en vue de dégager l'équilibre N-K le plus rentable en R.D.A. L'équilibre N94 K134 s'est avéré le meilleur sur l'ensemble de la rotation de cinq ans, à la fois pour le rendement et le profit (20).

2°. Il existe cependant des données permanentes du problème de l'interaction N x K, liées au rôle des deux éléments.

L'interaction N x K tire son importance du rôle des deux éléments dans la constitution du rendement et de la qualité. A partir d'essais N/K en solutions nutritives sur avoine, STEINECK a montré que les fonctions physiologiques de l'azote et du potassium dans la production végétale étaient étroitement reliées. L'effet spécifique du potassium se trouve indirectement démontré du fait que K accroît l'efficacité de l'utilisation de l'azote. Le potassium par son action spécifique, permet à la plante de synthétiser les composés organiques liés à l'absorption d'azote (125).

Le potassium influence également l'efficacité de N, par le fait qu'une absorption plus élevée de K entraîne un accroissement parallèle de l'absorption de N. L'accroissement de la fourniture de N, en présence d'un niveau élevé de K, majore également le prélèvement de K; il semble, selon STEINECK, que la plante absorbe seulement la quantité de K nécessaire à une pleine utilisation de l'azote prélevé. Le comportement de la plante serait différent dans le cas opposé; c'est-à-dire qu'un accroissement de la fourniture de K, à un même niveau N, n'accroîtrait pas le prélèvement de N.

Le potassium exercerait donc une fonction régulatrice sur l'effet de l'azote qui entraînerait l'utilité d'appliquer une quantité suffisante de K, en présence d'apports croissants de N.

Résumant les résultats du Colloque d'Uppsala en 1971, HAEDER indique que le synergisme observé

entre l'azote et le potassium résulte de l'influence de K sur la synthèse des protéines. Ce synergisme est particulièrement étroit entre l'anion NO₃ et le cation K. La plus grande partie des protéines dans les jeunes plantes se trouve dans les enzymes. Le potassium est précisément indispensable pour l'activation de nombreux enzymes, en particulier des enzymes activant la formation de substances de poids moléculaires élevés, à partir de substances à poids moléculaire peu élevé (47).

3°. L'analyse de la plante, soit dans un but de diagnostic, soit dans le but d'établir des bilans potassiques, permet d'expliquer en partie l'allure de l'interaction N x K

Il est intéressant de suivre les essais factoriels N x K par des contrôles de nutrition minérale de la plante au moyen des méthodes de diagnostic mises au point.

On peut ainsi essayer d'expliquer une table d'interaction N x K sur les rendements au moyen des tables d'interaction N x K sur les teneurs en N et K de l'organe analysé. Il existe évidemment de nombreux cas de figures, mais certains résultats peuvent être considérés comme typiques.

° Exemple de diagnostics potassiques en liaison avec N x K

L'interaction N x K sur les teneurs en potassium a été trouvée, d'une manière très générale, fortement positive et le plus souvent significative. On ne considèrera, ci-dessous, que quelques exemples en se limitant à l'interaction entre les quatre traitements extrêmes.

Tableau 17: Interaction N x K et teneurs en potassium de la plante (K % matière sèche)

Essais	Cultures	Organes	N minimum		N maximum		Interaction	
			K0	K max.	K0	K max.		
1976	Coincy	Blé	Feuilles	1,41	2,48	1,06	2,78	+0,65
	Rampillon	Blé	Feuilles	2,02	2,63	1,99	3,43	+0,83
	Aigues Mortes	Vigne	Pétioles	2,31	3,53	2,15	4,05	+0,68
1975	Puch	Blé	Feuilles	2,09	3,45	0,98	3,30	+0,96
	Aigues Mortes	Vigne	Pétioles	1,94	3,62	1,79	4,06	+0,59
1974	Omiécourt	Épinards	Feuilles	4,31	6,52	4,22	7,92	+1,49
	Elliant	Pois	Fanes	2,06	2,38	1,82	2,61	+0,57
1973	Saint Étienne en Bresse	Blé	Feuilles	1,60	2,12	1,07	2,50	+0,91
1970	Omiécourt	Haricots	Filets	2,07	2,71	1,21	2,73	+0,88
	Le Chesnoy	Orge	Feuilles	1,40	1,64	1,35	1,96	+0,37
	Tauxigny	Orge	Feuilles	1,56	1,74	1,69	2,12	+0,25
1966	Pont Saint Martin	Blé	Feuilles	0,85	2,20	0,55	2,45	+0,55

Le caractère positif très général de l'interaction N x K sur les teneurs du végétal en K résulte d'une double tendance de la fumure azotée: tendance à effet négatif avec K0 ou les faibles doses de potassium, et tendance à effet positif avec K maximum ou des doses assez élevées de potassium.

- Les cas d'interaction N x K très positive sur les rendements correspondent en général à la réalisation de ce double effet, si la baisse de teneur en K (avec K0) en présence de doses croissantes N entraîne une stagnation ou une baisse de rendement. — De nombreux auteurs, dont OLLAGNIER et OCHS (110) ont signalé que la nutrition N et K réalisée avec le traitement de base N0 K0, ou N min. K0, ou N min. K min., conditionnait en partie l'interaction N x K à attendre. Cette remarque est particulièrement valable en conditions de faibles rendements et de faibles fertilisations. D'autre part, l'interaction dépend évidemment des doses N2, N3, N max., K1, K2, K max. étudiées —.

Mais le fait le plus utile est de constater qu'à partir d'une certaine dose K, l'absorption de K est également accrue par la fumure azotée. L'obtention des plus hauts rendements est réalisée à partir de certains équilibres N/K de la fertilisation. Ces constatations rejoignent les observations du paragraphe précédent.

° Exemple de bilans potassiques en liaison avec N x K

La considération des bilans K₂O (exportations par les cultures et apports), en particulier pour les cultures importantes consommatrices de K₂O comme les prairies temporaires à forte fertilisation azotée, explique l'importance des interactions N x K correspondantes.

Ainsi l'interaction positive considérable enregistrée sur dactyle sur la Station d'Aspach et citée plus haut, s'explique assez facilement au moyen des bilans K₂O (tableau ci-dessous).

Tableau 18: Bilan en kg/ha K₂O sur 10 ans

N \ K	K			
	K0	K150	K300	K450
N110	-1917	-1131	-264	+1241
N220	-1749	-1487	-757	+191
N330	-1758	-1270	-1232	-560
N440	-1999	-1228	-890	-341

L'effet moyen azote sur les 10 ans croissait de K0 à K450 selon: +0,95 +2,17 +3,15 et +4,55 t/ha matière sèche.

Parallèlement, l'écart de bilan K_2O entre N1 et N4 (effet N), croît aussi de K0 à K450 selon: -87 -97 -626 -1582 kg/ha K_2O .

Dans de tels cas, la table 4 N \times 4 K d'interaction sur le rendement s'accompagne d'une table 4 N \times 4 K très différenciée en ce qui concerne la teneur en potassium échangeable après un certain nombre d'années.

10.4. Conclusions

Selon certaines opinions, le principe d'interaction ne serait qu'une manière plus perfectionnée d'appliquer la vieille loi du facteur limitant; cela voudrait dire dans le cas

présent, qu'avec l'élévation de la dose d'azote, le potassium pourrait devenir limitant. Certes, de nombreux cas d'interaction N \times K, en particulier dans les régions où peuvent beaucoup progresser les rendements et l'utilisation des engrais, peuvent être du ressort de ce principe.

Mais l'interaction N \times K, en particulier lorsqu'elle est positive et interfère sur la qualité, met en jeu de nombreux autres faits beaucoup plus complexes qui tiennent à l'importance de l'équilibre NK dans la nutrition des plantes, du fait du rôle fondamental de N, des propriétés spécifiques de K et de son absorption à peu près aussi importante que celle de N.

B - L'interaction phosphore \times potassium

Les interactions P \times K sont, en moyenne, nettement moins importantes que les interactions N \times K. Elles ont donné lieu à moins d'études. Les agronomes ont souvent traité les deux réponses séparément, dans l'espace et dans le temps. Les déficiences en P ont dans l'ensemble été étudiées en premier.

Les raisons de cette moindre incidence de l'interaction P \times K tiennent au fait que dans le domaine physiologique les relations P/K sont moins importantes que les relations N/K; d'autre part, alors que les quantités mises en jeu sont assez voisines pour N et K, elles sont sensiblement inférieures pour P.

Il nous apparaît, en première approche, que les inter-

actions P \times K sont surtout liées à des problèmes de niveaux du sol, de fourniture du sol en P et en K aux plantes par rapport aux besoins de celles-ci. La plupart des interactions P \times K devraient pouvoir s'expliquer ou être attendues à partir de:

- 1) niveaux respectifs des sols en P et K assimilables,
- 2) besoins globaux et instantanés des cultures vis-à-vis de P et K,
- 3) doses P et K expérimentées.

Dans la plupart des situations, en régions à fertilisations assez avancées, l'interaction P \times K ne sera pas très positive, mais les meilleurs résultats correspondront toujours aux combinaisons de types (P1, P2) \times (K1, K2).

1. Quelques faits expérimentaux typiques

Partant de cette idée que l'interaction P \times K dépend, en première approche, plus du sol que de la culture, il nous semble préférable de donner des exemples expérimentaux, correspondant à certaines conditions de sols.

Les trois premiers rapportent les interactions P \times K moyennes obtenues sur céréales sur trois essais permanents de type 3 N \times 3 P \times 3 K du réseau hors Station (89).

1.1. A Ozoir le Breuil (Eure et Loir), le sol est un limon sur calcaire de Beauce, relativement bien pourvu au départ en P_2O_5 (0,21‰) et K_2O (0,25‰). La rotation a été: maïs, blé, blé dur. L'effet potasse est assez positif, même en l'absence de P_2O_5 , mais l'effet P_2O_5 est nul en l'absence de potasse. L'interaction P \times K est en moyenne faiblement positive (+ 0,8 q/ha), mais on part d'un potentiel P0 K0 assez élevé.

1.2. A Tauxigny (Indre et Loire), le sol est un limon fin argileux, très pauvre en acide phosphorique ($P_2O_5 = 0,07‰$) et assez faible en potasse ($K_2O = 0,14‰$) en début d'essai. Les cultures ont été: maïs, blé, blé dur, orge.

Le potentiel P0 K0 est ici nettement plus faible qu'à Ozoir et l'interaction elle-même fut moyennement positive, de l'ordre de + 1 à + 2 q/ha. Les meilleurs traitements ont toujours associé P1, P2 \times K1, K2.

1.3. A Laval (Mayenne), le sol est un limon fin pauvre en acide phosphorique ($P_2O_5 = 0,13‰$) et très pauvre en K_2O (0,07‰). Les effets P_2O_5 et K_2O ont été ici considérables. L'interaction P \times K (succession blé, maïs, blé, orge) entre extrêmes est très importante (+ 19,2 q/ha).

Tableau 19: Essai d'Ozoir le Breuil (1964-76), moyenne sur 13 ans (q/ha)

P \ K	K		
	K0	K83	K166
P 0	57,9	60,5	61,3
P 83	58,9	62,5	63,2
P166	57,9	61,9	62,1

Tableau 20: Essai de Tauxigny (1966-73), moyenne sur 8 cultures (q/ha)

P \ K	K		
	K0	K68	K136
P 0	38,4	39,5	40,7
P 63	41,6	44,5	46,0
P126	42,5	44,7	45,9

Le tableau 21 ci-après rapporte également l'état P_2O_5 et K_2O des sols en août 1973, après blé. L'interaction P \times K se retrouve ici très négative sur les teneurs (du fait de l'interaction très positive sur les rendements et donc les exportations).

Tableau 21: Essais de Laval, moyenne sur 4 cultures (q/ha), et teneurs des sols en P₂O₅ et K₂O

P \ K	Moy. sur 4 cultures q/ha			P ₂ O ₅ sol ppm			K ₂ O sol ppm		
	K0	K120	K180	K0	K120	K180	K0	K120	K180
P 0	31,3	38,4	38,9	50	56	50	33	66	140
P 84	33,9	54,6	57,1	106	103	93	33	60	103
P168	29,6	58,7	56,4	210	140	170	40	63	85

1.4. Exemple d'interaction P x K en sol de craie (essai de Pocancy - Marne). Il s'agit d'un essai poursuivi de 1957 à 1969 sur sol de craie (pH = 8,3, calcaire = 71 %). L'essai a débuté après défriche de pins, ce qui explique la faiblesse des rendements. Les tableaux ci-après rapportent les tables d'interaction pour les quatre principales cultures intervenues.

Le dispositif expérimental étudiait surtout l'interaction P x K des quatre combinaisons (P1, P2) x (K1, K2). Les trois traitements P0 K0, P0-K2 et P2 K0 peuvent être considérés comme accessoires, car les niveaux 0 étaient à exclure

dans de telles conditions de sol après défriche (on note d'ailleurs les très bas rendements obtenus sur ces traitements). On peut donc mesurer l'interaction P x K entre extrêmes ou pour la partie (P1, P2) x (K1, K2).

Pour toutes les cultures, l'interaction entre les 4 traitements extrêmes est très positive en raison du faible effet positif de chaque élément P ou K, en l'absence de l'autre.

Les tableaux suivants rapportent les résultats moyens par culture sur 4 betteraves, 4 blés d'hiver, 9 céréales secondaires (8 orges et 1 avoine), 2 luzernes (rendements totaux sur 3 ans d'exploitation par luzerne).

Tableau 22: Essai de Pocancy, résultats par culture

Betterave sucrière (t/ha racines à 16%)				Céréales secondaires (q/ha)			
P \ K	K0	K150	K300	P \ K	K0	K70	K140
P 0	5,4	—	8,0	P 0	9,1	—	12,2
P 95	—	32,5	37,8	P 70	—	31,3	31,2
P190	12,5	35,6	39,5	P140	27,2	34,7	36,1

Blé (q/ha)				Luzerne (t/ha à 10% d'eau)			
P \ K	K0	K75	K150	P \ K	K0	K365	K730
P 0	15,1	—	13,6	P 0	2,1	—	3,8
P 75	—	36,9	37,5	P260	—	21,6	24,7
P150	29,8	39,2	40,9	P520	5,6	23,3	26,4

C'est typique de l'interaction P x K en zone de carences : + 24,4 t/ha racines sur betterave, + 12,6 q/ha sur blé, + 5,8 q/ha sur orge et + 19,1 t/ha de luzerne sur 3 ans.

L'interaction entre les niveaux 1, 2 est beaucoup plus modeste : - 1,4 t/ha racines sur betterave, + 1,1 q/ha sur blé, + 1,5 q/ha sur orge et + 0,0 t/ha de luzerne. Malgré cela, le meilleur rendement a été obtenu, sans exception, avec le traitement supérieur.

L'importance de l'interaction P x K à attendre dépend beaucoup des niveaux de fertilité. Aussi semble-t-il également intéressant de considérer les résultats obtenus en 1968 sur l'essai précédent.

A partir de 1968, le dispositif avait été modifié pour devenir un essai PK résiduel x K annuel (la potasse était étudiée à 3 doses K0, K1, K2 appliquées sur les 3 blocs respectifs de l'essai antérieur, en présence d'une dose de P₂O₅ uniforme et importante).

Tableau 23: Betterave sucrière (t/ha racines)

PK 1968	P200 K0			P200 K150			P200 K300		
	K0	K1	K2	K0	K1	K2	K0	K1	K2
PK antérieures									
P0	10,8	—	25,2	27,3	—	33,9	27,6	—	37,3
P1	—	18,6	28,7	—	27,3	34,9	—	27,6	33,9
P2	15,1	23,6	26,5	34,4	27,9	38,3	35,8	36,6	38,2

Sur betterave sucrière, en 1968, la nouvelle interaction entre extrêmes devient négative (- 2,9 t/ha avec K0, - 2,7 t/ha avec K150 et - 7,3 t/ha avec K300). Cela pro-

vient surtout de ce que les anciens traitements P0 K2 ont des rendements beaucoup plus élevés qu'avant, du fait de la correction partielle de la carence P avec P200.

2. Quelques références d'interactions P × K

La littérature comporte d'assez nombreuses références incluant pour partie des études P × K.

L'interaction P × K revêt pour la pomme de terre une importance moindre que l'interaction N × K; elle semble jouer davantage entre doses 0 et doses moyennes qu'entre doses moyennes et doses fortes, ainsi que cela ressort de plusieurs essais rapportés par LOUË (88). A signaler aussi les essais de GERICKE (46) et de LUCAS et al (90).

Sur blé de printemps, CHAPMAN et al rapportent des essais factoriels 5 P × 5 K à interaction positive très significative et considérable, combinant des doses de 0, 56, 112, 224, 448 kg/ha P₂O₅ ou K₂O (23).

Sur les herbages et les plantes fourragères, il y a de nombreuses citations d'interactions P × K. Tels sont les résultats de SCHMITT sur 50 ans (119), de HEXTER en Australie (56).

3. Quelques remarques de conclusions

En première approche, le problème de l'interaction P × K pourrait être envisagé en fonction de la fertilité des sols et de l'évolution de l'agriculture (niveau des rendements, donc des prélèvements et sorties, niveau des apports d'engrais et des restitutions).

Dans les milieux pauvres ou très peu étudiés, la première démarche est de détecter les déficiences par des essais simples conformes à la loi du facteur limitant. Le plus souvent la déficience P (cas de nombreux sols africains) sera mise en lumière en premier, la déficience K n'étant que potentiellement présente et de plus en plus probable avec le temps. Au stade suivant, les deux éléments seront étudiés à deux niveaux, 0 et 1 (absence et présence), de manière à dégager

une interaction possible qui à ce stade signifiera: le potassium commence à marquer lorsqu'on a corrigé en partie la déficience en phosphore.

Dans les régions à fertilisation avancée, on peut considérer, du fait du stockage des deux éléments dans le sol, qu'il est utile d'amener les niveaux P et K du sol aux points de non réponse (en l'état actuel) pour l'ensemble des cultures de la rotation, à des doses supérieures aux doses dites d'entretien (exportations par les récoltes + quantités perdues ou neutralisées par lessivage ou fixation). L'interaction P × K, sauf cas d'espèce, revêt alors une faible incidence à condition que la fertilisation PK soit calculée correctement.

C - L'interaction potassium × magnésium

1. L'antagonisme potassium/magnésium

Il existe un assez grand nombre d'études des relations K/Mg au niveau des cations échangeables des sols. Selon SALMON, les déficiences Mg des cultures sont causées non seulement par un niveau insuffisant de Mg échangeable dans le sol, mais aussi par antagonisme ionique en sols acides et en sols riches en K (117-118).

Les caractéristiques d'un ion, qui commandent sa mobilité sont: sa charge, son rayon ionique, son énergie et son rayon d'hydratation. Plus l'énergie d'hydratation est élevée, plus le nombre de molécules d'eau autour de l'ion sera grand.

La vitesse de diffusion des ions dépend de leur diamètre, en particulier de celui de l'ion hydraté. Les ions ont donc des vitesses de diffusion variables. Certains ions comme le potassium, présentent une grande vitesse de diffusion et donc une absorption préférentielle par les plantes. Il en résulte que les autres ions, absorbés plus lentement, peuvent se trouver en quantité faible ou même insuffisante. En effet, l'ion K, grâce à sa facile pénétration, peut tendre à saturer la pression osmotique du végétal, ce qui peut ralentir encore plus l'absorption des ions plus lents.

Le phénomène d'antagonisme dépend évidemment des quantités relatives dans la solution du sol des ions antagonistes.

Le tableau 24 indique les nombres d'hydratations les plus probables et le diamètre moyen de l'ion hydraté (en Å).

L'ion Mg a le plus petit rayon ionique des 4 cations majeurs (K = 1,33 Å, Na = 0,98 Å, Ca = 1,06 Å et Mg =

Tableau 24:
Nombre d'hydratations et diamètres des ions

	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
H ₂ O/ion	4	2,5	8 à 10	9 à 13
Diamètre Å	4,3	3	6	8

0,78 Å). Les ions à petit rayon cristallin ont de grands rayons d'hydratation.

Mg a une forte faculté à former des hydrates. L'ion Mg présente un nombre d'hydratations (H₂O/ion) très supérieur à celui de K. Il en résulte que le diamètre moyen de l'ion Mg hydraté est très supérieur à celui de l'ion K, soit 8 Å au lieu de 3 Å.

Les ions K de la solution du sol qui pénètrent plus facilement dans le végétal contribuent à diminuer la vitesse de diffusion de l'ion Mg hydraté, plus lourd. L'ion Mg présente la plus petite vitesse de diffusion des quatre cations principaux. Si la solution du sol, pour une raison ou l'autre, se trouve très enrichie en potassium par rapport au magnésium, c'est la pénétration de ce dernier qui est la plus affectée.

Tel est l'antagonisme K/Mg. En général, plus une plante absorbe de K, moins elle tend à absorber de Mg. Mais dans la majorité des cas, cela n'a pas de répercussion fâcheuse sur le rendement.

2. L'intérêt du diagnostic plante dans les études K/Mg

L'antagonisme K/Mg se traduisant par des absorptions modifiées de K et de Mg, l'analyse du végétal est indispensable.

Exemple 1: Les liaisons K/Mg dans le maïs et le diagnostic foliaire.

Le diagnostic foliaire du maïs porte sur la feuille de l'épi principal, prélevée à la floraison. Les études ici poursuivies sur de nombreux essais potassiques ou sur des essais K x Mg, ont permis d'étudier la relation entre les rendements et la nutrition K/Ca/Mg du maïs (81-82-83-84).

Sur la plupart des essais, on a enregistré des corrélations négatives élevées entre les teneurs en K et celles en Ca et Mg. Sur la figure 13 ont été représentées les teneurs Ca et Mg en fonction des teneurs en K. En considérant les courbes approchées, on constate facilement que la zone du déficit en K est celle où l'antagonisme K/Mg est le plus net.

Il semble assez difficile de provoquer chez le maïs une déficience magnésienne grave, induite par excès de fumure potassique (dans la pratique des doses de K₂O apportées au maïs). On constate en effet sur la figure 13 que pour les teneurs élevées en K la diminution de la teneur Mg est très ralentie.

D'ailleurs la déficience magnésienne semble pouvoir se manifester dans certains cas sans qu'il y ait pour autant une répercussion sur les rendements: l'antagonisme K/Mg porterait d'abord sur la fonction « catalytique » du magnésium. Il existe une certaine complémentarité entre K et Mg pour cette fonction catalytique. En effet, K et Mg assurent en majeure partie l'équilibre ionique des liquides contenus dans les limbes. 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 conséquence sur les rendements. Cette dernière apparaîtrait lorsque le remplacement se ferait aux dépens de Mg chlorophyllien.

3. L'interaction K x Mg dans les expérimentations

Il n'y a pas eu jusqu'ici un nombre considérable d'expériences factorielles K x Mg. Elles se développent dans un pays lorsque la déficience magnésienne est reconnue par les symptômes foliaires ou détectée au niveau Mg échangeable des sols. Alors, des essais apparaissent, étudiant le plus souvent deux niveaux Mg₀ et Mg₁ (absence et présence), seuls ou en interaction avec K₂O.

En général, c'est en arboriculture fruitière, viticulture, cultures protégées et spéciales, qu'il y a eu le plus d'études, le plus souvent contrôlées par les analyses végétales comme il vient d'être indiqué pour la vigne.

Les herbages ont également retenu l'attention, à un autre titre: celui de la teneur en Mg, en liaison avec le risque d'hypomagnésémie à la mise à l'herbe. Bien que l'explication de la tétanie d'herbage par une grave déficience de l'herbe en magnésium soit de moins en moins retenue, on recherche cependant des teneurs en Mg suffisantes.

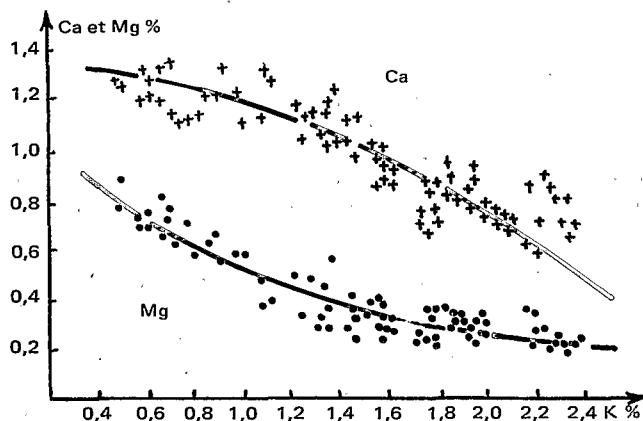
En grande culture, il y a peu de résultats sinon peut-être sur pommes de terre (résultats de LAUGHLIN (76), SIMPSON et CROOKS (121), WALSH et O'DONOHUE (138), HOSSNER et DOLL (61), BIRCH et al (13)).

L'interaction K x Mg a aussi été mise en lumière sur cultures tropicales, en particulier par COOMANS sur cocotier en Côte d'Ivoire (27) et par OCHS et OLLAGNIER (109). Sur cocotier, l'interaction est très positive; l'action de Mg ne se manifeste qu'en présence de K et l'action de K est plus forte en présence de Mg et, en l'absence de Mg les fortes doses de K sont dépressives.

L'interaction K x Mg dans l'expérimentation SCPA

Les principales expérimentations ici poursuivies se sont déroulées dans les deux principales zones à problèmes magnésiens en France (87).

Figure 13: Évolution des pourcentages de Ca et de Mg en fonction de celui de K



Exemple 2: Les liaisons K/Mg dans le diagnostic foliaire de la vigne

Le rapport K/Mg s'est révélé particulièrement utile à considérer dans la nutrition de la vigne. En France il y a eu une abondante prospection de ce sujet (85) et en particulier dans les études du dessèchement de la rafle, trouble physiologique généralement accompagné de basses teneurs en Mg, sinon de forts rapports K/Mg (29-30).

L'analyse pétiolaire est encore plus sensible pour étudier les rapports K/Mg dans la nutrition de la vigne. Là aussi, il a été constaté que la liaison inverse K/Mg jouait surtout pour les nutriments déficientes en potassium (85).

Exemple 1: Essais de Pau (Pyrénées Atlantiques)

Les essais de Pau ont été poursuivis pendant 6 ans selon le schéma 3 K x 3 Ca x 3 Mg en confounding à 2 répétitions pendant les 3 premières années.

Tableau 25: Essais K x Ca x Mg de Pau, rendements en maïs grains secs (q/ha)

Doses annuelles K et Mg	1963	1964	1965
	Mg 0	Mg 133	Mg 266
K 0	14,0	16,0	17,0
K 93	35,1	41,9	47,5
K 186	38,1	43,5	45,4
Doses annuelles K et Mg	1966	1967	1968
	Mg 33	Mg 117	Mg 200
K 33	25,5	23,7	24,8
K 117	46,3	47,7	50,9
K 200	47,9	53,1	52,8
Doses annuelles K, bloquées Mg	1966	1967	1968
	Mg 300	Mg 450	Mg 600
K 50	44,5	40,3	36,3
K 133	57,1	54,5	58,3
K 217	58,0	56,6	56,9

Pour la période 1966-1968, l'essai a 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 3 ans sur l'autre répétition (86).

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 ($K_2O = 0,04\%$, $CaO = 0,16\%$, $MgO = 0,05\%$).

Exemple 2: Essai de Saint Jean sur Moivre (Marne)

Cet essai a étudié pendant 4 ans l'interaction K x Mg sur la rotation betterave-blé en Champagne. Les conditions de sols correspondent ici à une terre de craie (pH = 8,0) très déficiente en magnésium ($0,04\%$ MgO échangeable).

Sur betterave à sucre, l'essai a nettement démontré l'effet magnésien dans ce type de sol, et le caractère positif de l'interaction K x Mg aux niveaux en essai (+ 6,8 t/ha). Le rendement maximum a correspondu en moyenne à K400 Mg87.

Sur blé, les résultats ont été moins nets, mais en faveur de K200 Mg50 (interaction moyenne de + 0,8 q/ha).

BALLIF et DUTIL ont étudié l'interaction K x Mg sur luzerne de déshydratation en sol crayeux dans des conditions très voisines de celles de l'essai précédent et conclu que les apports pour la culture (2 ans) devaient être de K700 et Mg50, c'est-à-dire la couverture des exportations. Il conviendrait aussi, dans ce type de sol, de rechercher un niveau d'équilibre K échangeable/Mg échangeable de l'ordre de 4 (par exemple 280 ppm K et 60 ppm Mg pour le sol et 200 ppm K et 40 ppm Mg en sous-sol en début de première exploitation (8-9-37)).

4. Conclusions

Les exemples précédents montrent que l'antagonisme K/Mg est de nature à rendre plutôt positive l'interaction K x Mg en pénalisant les traitements déséquilibrés de type K3 Mg0 ou K0 Mg2. Sur l'essai de Pau c'est le traitement K0 Mg2 qui a été pénalisé et sur celui de Saint Jean sur Moivre, ce fut le traitement K3 Mg0. Il en résulte que les interactions K x Mg furent assez positives.

Lorsque la nutrition magnésienne 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.

Le problème est d'amener Mg du sol à un niveau permettant à la fumure potassique d'agir correctement sans risque de déclencher des déficiences magnésiennes induites.

Dans le cas de déficience magnésienne certaine, la suppression de la fumure potassique ou sa diminution ne sont pas des solutions valables et durables. Le remède est de remonter Mg de manière à se placer dans la zone d'antagonisme K/Mg indifférent. WELTE et al avaient développé des conclusions très voisines (140).

L'exemple suivant de l'interaction ionique K/Mg emprunté au domaine de la physiologie paraît tout à fait applicable aux résultats agronomiques et de nature à résumer l'aspect essentiel du problème K/Mg.

La figure 14 représente les résultats obtenus par LAVOLLAY sur le développement de *Sterigmatocystis nigra* en fonction de doses croissantes de Mg sur des milieux pauvres ou riches en K (50 ou 500 mg/litre). La forme des courbes de réponse à Mg dépend de la richesse en K du milieu. A faible dose Mg, le développement est meilleur dans le milieu pauvre en K ($A_1 > B_1$) et c'est l'inverse à partir d'une certaine dose Mg. L'action de K dépend donc de la teneur du milieu en Mg (et inversement).

La potasse et la magnésium ont présenté une interaction positive sur les six ans de l'essai à doses annuelles. La magnésium n'a agi qu'en présence des niveaux moyens et élevés de potasse. La valeur de l'interaction est de + 4,3 q/ha pour 1963-65 et + 5,6 q/ha pour 1966/68.

Sur l'essai à doses Mg bloquées, l'effet magnésien est devenu dépressif avec le faible niveau de potasse K50 et les six autres combinaisons sont sensiblement équivalentes.

Tableau 26: Rendements en t/ha racines à 16% (moyennes 1972 et 1974)

	Mg 0	Mg 50	Mg 100	Effet K
K200	35,0	41,9	42,7	39,9
K300	33,4	43,2	43,3	40,0
K400	32,8	46,3	47,3	42,1
Effet Mg	33,7	43,8	44,4	40,7

Tableau 27: Rendements en q/ha grain (moyennes 1973 et 1975)

	Mg 0	Mg 25	Mg 50	Effet K
K100	42,5	44,2	46,5	44,4
K150	42,2	44,5	45,8	44,2
K200	42,6	46,1	47,2	45,3
Effet Mg	42,4	44,9	46,5	44,6

Figure 14: Interaction K x Mg sur *Sterigmatocystis nigra*

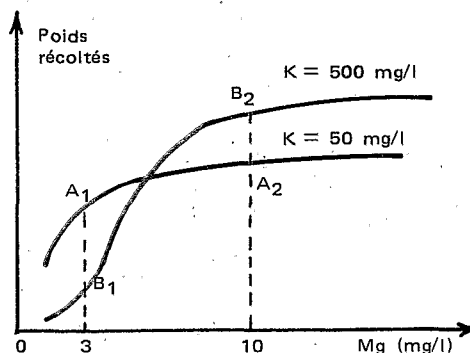
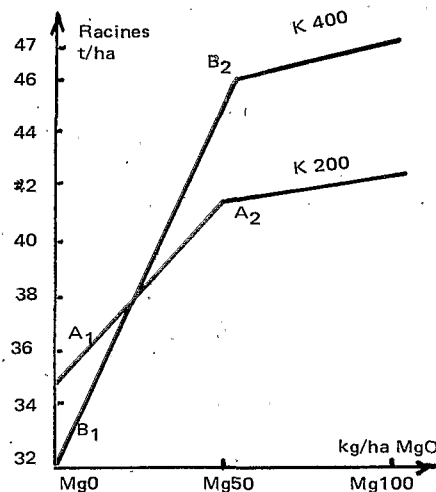


Figure 15: Interaction K x Mg sur betterave sucrière (Essai de Saint Jean sur Moivre)



On constate que les courbes correspondant à l'interaction K × Mg sur betterave de l'essai de Saint Jean sur Moivre sont du même type que les précédentes (figure 15).

A partir d'un milieu déficient en Mg et riche en K (situation B1), on peut augmenter le rendement soit en diminuant

la richesse en K (B1 à A1), soit en augmentant la richesse en Mg (B1 à B2). Cette seconde méthode est celle qui s'impose presque toujours en agronomie, car elle conduit à de meilleurs résultats.

D - L'interaction potassium × sodium

L'effet du sodium sur les plantes va de la toxicité, pour un assez grand nombre, à la nécessité, pour de rares espèces. L'interaction K × Na pourrait être étudiée dans ces deux situations.

La première concerne essentiellement le cas des sols salins et de l'irrigation avec des eaux salines. HEINMANN a particulièrement étudié les relations K/Na en ce domaine (52-54), montrant que les ions K et Na peuvent avoir, suivant les quantités d'éléments mises en présence et leurs rapports, des relations synergiques, ou, au contraire, antagonistes. En conditions salines, ce sont les rapports antagonistes qui prédominent. L'absorption du sodium par la plante est fortement abaissée en présence de concentrations relativement faibles en potassium (qui joue donc un rôle protecteur), alors que l'absorption de potassium par la plante est en général très peu influencée par des concentrations relativement élevées en sodium.

On s'intéressera ici seulement à la deuxième situation qui concerne un éventuel effet positif du sodium. Le sodium n'est pas considéré comme un élément rigoureusement indispensable à la croissance des plantes, bien que certaines d'entre elles en renferment des quantités assez importantes. C'est un élément secondaire nécessaire à certaines plantes.

Il existe en effet des plantes qui réagissent favorablement à des apports de sodium. Aussi la première démarche en matière d'études des interactions K × Na consiste-t-elle à considérer les plantes à réponses à Na.

LEHR a donné en 1953 un schéma de tentative de classification des cultures en fonction de la quantité de potassium qui peut être remplacée par du sodium (79)

Il distinguait quatre groupes :

groupe A : caractérisé par le fait qu'en présence d'une quantité suffisante de potassium, le sodium peut encore augmenter les rendements ; on y trouve essentiellement des chénopodiacées, plantes halophytes : betterave fourragère, betterave sucrière, bette, épinard,

groupe B : chou, cocotier, cotonnier, lupin, avoine,

entre B et C : pomme de terre, hévéa, navet,
groupe C : orge, lin, blé, graminées, colza,
groupe D : maïs, sarrasin, seigle, soja.

La délimitation des groupes B, C, D est présentée comme assez hypothétique. Cependant, de B à D la quantité de K irremplaçable par Na serait très croissante.

MARSCHNER a également précisé qu'il y a une relation assez nette entre l'absorption et la translocation de sodium vers les pousses et l'importance du taux de remplacement possible du potassium par le sodium dans les espèces végétales (99).

HARMER et BENNE avaient établi une autre classification des cultures, basée sur le degré d'intérêt de l'apport de Na en présence soit d'une carence potassique, soit d'une alimentation normale en potassium (49).

Les deux classifications sont assez voisines, et il en ressort que le problème K × Na est à envisager essentiellement sur betteraves sucrières et betteraves fourragères. Parmi les autres cultures susceptibles de réagir favorablement à Na, on peut citer aussi la carotte et le coton.

En général, la réaction au sodium est plus forte lorsque le milieu est pauvre en potassium, et l'effet Na tend à décroître avec l'augmentation du niveau potassique du sol.

Il y a cependant eu des essais Na sur d'autres cultures telles que pommes de terre, orge, avoine, maïs, coton, maïs, le plus souvent en cultures en pots.

LARSON et PIERRE ont étudié l'interaction K × Na sur betterave rouge, avoine, maïs (74).

LANCASTER et al ont montré que le sodium élevait les rendements en coton sur les sols déficients en K, mais qu'il n'y avait pratiquement pas de réponse en l'absence d'apports potassiques (72).

On peut aussi signaler des études sur tabac chez qui Mc EVOY avait trouvé une interaction très négative prouvant que pour cette plante, Na pouvait remplacer K pour certains rôles physiologiques (92).

1. Betterave sucrière

Une récolte de 50 t/ha de racines peut prélever 120 à 130 kg/ha Na₂O dont seulement 10 à 15 kg par les racines. Ces exigences ont longtemps milité en faveur des engrais contenant du sodium (nitrate de soude, sylvinite).

Les apports indirects de sodium en culture betteravière, par les engrais N et K, sont en très nette diminution. Cela constitue sans doute un motif supplémentaire de considérer l'interaction K × Na.

Le problème des interactions K × Na a été considéré en particulier par DRAYCOTT (34), HOLMES (60).

Les essais sur betterave sucrière ont en général montré que si les deux éléments K et Na augmentent les rendements, l'effet de chacun diminue avec la dose croissante de l'autre. La plupart des essais suggèrent que le remplacement de K par Na ne peut être que partiel, et cela ressort bien de la table d'interaction suivante de DRAYCOTT et al, en 1970 (34). Elle a montré que même lorsque la fumure potassique est importante, une petite dose de Na, peut encore augmenter le rendement.

Tableau 28 : Rendements en sucre (en t/ha)

Na K	Na0	Na125	Na250	Na375	Effet K
K 0	8,23	9,29	9,21	9,21	8,99
K138	9,31	9,71	9,43	9,57	9,50
K275	9,38	9,84	9,68	9,50	9,60
K415	9,73	9,91	9,07	9,34	9,51
Effet Na ...	9,16	9,69	9,35	9,40	9,40

L'interaction K × Na est fortement négative (— 1,37 t/ha entre extrêmes). Les meilleurs résultats correspondent dans le cas présent à K415 Na125, mais diverses combinaisons KNa sont équivalentes.

L'interaction K × Na peut également jouer en ce qui concerne la pureté des jus, et donc le rendement réel en sucre extractible.

En conditions salines, HEIMANN a bien montré que l'augmentation de la teneur en sodium et la diminution correspondante du rapport K/Na pouvaient être la cause de détérioration de la qualité. Pour améliorer la qualité des betteraves en milieu salin, il faut diminuer autant que possible l'absorption du sodium (53).

En conditions normales, l'interaction K × Na va jouer sur les teneurs respectives en K et Na des racines, qui interviennent dans les diverses formules de calcul des taux d'impuretés. Le potassium tend à exercer un effet légèrement favorable si Na, plus nuisible que K, diminue plus que K n'augmente, mais on ne peut pas indiquer l'allure moyenne de l'interaction K × Na en ce qui concerne les teneurs en K et Na des racines qui sont beaucoup moins influencées que celles des feuilles (DRAYCOTT 1970).

2. Betterave fourragère

LEHR rapporte les résultats moyens sur 20 essais aux Pays-Bas (79). L'interaction est négative (− 2,7 t/ha) : tableau 29 ci-contre.

Tableau 30 : sans fumier : racines (t/ha)

KCl	NaCl			Effet K
	0	250	500	
0	30,5	34,9	36,1	33,8
250	39,5	41,5	42,9	41,3
500	42,2	43,6	44,4	43,4
Effet Na	37,4	40,0	41,1	39,5

Tableau 29 : Rendements en t/ha

	K0	K160	K320
Na0	60,4	64,2	67,6
Na1	69,6	72,1	74,1

MASTERSON a entrepris une série d'essais au champ afin de déterminer la réaction de la betterave fourragère à K et Na, les doses d'apports étant de 0, 250, 500 kg/ha KCl ou NaCl (100). L'interaction entre traitements extrêmes est très négative (− 3,4 t/ha), mais les trois traitements les plus élevés présentent aussi les trois meilleurs rendements (tableau 30 ci-contre).

3. Herbages et plantes fourragères

Le problème K × Na peut présenter un intérêt sur les herbages et cultures fourragères, plus en matière de qualité minérale que de rendement (si on vise l'obtention d'une teneur en Na de 0,20% de la matière sèche). Il existe d'ailleurs de profondes différences entre les espèces prairiales quant à l'admission de Na (très faible chez la fétuque, la fléole, et plus importante chez le dactyle et le ray-grass).

Dans les expériences avec solutions nutritives de HYLTON et al (63) sur ray-grass d'Italie, l'interaction K × Na était très minime sur la production de matière sèche et très forte sur les teneurs en K et Na.

NOWAKOWSKI a étudié les effets du remplacement du potassium par le sodium sur certains constituants organiques du ray-grass d'Italie, sur essai 2 N × 2 K × 2 Na (107).

En conclusion, l'interaction K × Na est à prendre en considération lorsqu'un effet positif Na est possible, c'est-à-dire surtout dans le cas des plantes sodiophiles. Cette interaction est négative en vertu du taux de remplacement de K par Na. Mais il subsiste souvent un effet additionnel, de sorte que les traitements les meilleurs associent les deux éléments.

Selon MARSCHNER, l'effet activateur de Na sur les enzymes est beaucoup moins important que celui de K, sauf chez quelques espèces végétales. L'effet additionnel de Na,

dans les cas favorables, s'expliquerait par le fait qu'à un niveau déterminé du rapport K/Na dans la plante, on obtiendrait une activité enzymatique plus élevée qu'avec K seul (99).

L'équilibre K × Na dans la pratique de la fertilisation est à étudier surtout pour les plantes sodiophiles de manière à obtenir le meilleur rapport potassium/sodium dans le sol, permettant un effet positif Na en présence d'une bonne nutrition potassique.

E - L'interaction potassium × oligoéléments

Une revue résumée du sujet a été donnée par MUNSON (105) et par ARNON sur maïs (5). On examinera surtout le problème au niveau nutritionnel plus que les interactions éventuelles en termes de rendement. La littérature est en effet très pauvre en cette matière.

1. Interaction K × Mo

Elle avait été notée sur maïs par JONES qui trouvait une forte baisse de teneur en molybdène des feuilles, qui pouvait être due à l'anion d'accompagnement (66).

Une interaction positive K × Mo a d'ailleurs été signalée sur légumineuses. BAROCCIO a étudié le synergisme K × Mo au moyen d'essais 2 K × 2 Mo sur luzerne et sur blé. Il enregistrait une activation de l'absorption potassique par le molybdène, mais l'étude de l'interaction ne portait que sur le niveau de l'absorption (12).

2. Interaction K × B

Les relations entre le potassium et le bore avaient été étudiées par REEVE et SHIVE (115). La littérature fait état de divers cas de déficience en bore induite par de très fortes nutrition potassiques, notamment selon WOODRUFF et al. sur soja (147). Récemment HOLEVAS, dans des essais sur olivier conduits en aquiculture, a montré que la carence en K entraînait l'accumulation de bore dans les feuilles et qu'inversement, en milieu très riche en K, les symptômes de déficience en bore apparaissaient (59).

3. Interaction K × Fe

Sur riz, d'assez nombreux essais en plein champ ont montré un effet positif de l'application de potassium en vue d'éliminer les troubles de toxicité ferrique. TANAKA et al. ont étudié l'interaction 2 doses Fe × 4 doses K₂O (130). Une teneur en potassium suffisante dans les plantes diminue l'absorption de fer et une teneur élevée de fer dans le milieu de croissance tend à diminuer l'absorption de K.

Une déficience grave en K peut interférer sur l'absorption de Fe, sa translocation et son utilisation et entraîner l'apparition de symptômes de chlorose. En général, les symptômes de la déficience ferrique sont aggravés par la déficience potassique (57).

4. Interaction K × Zn

Elle a été beaucoup moins étudiée que l'interaction P × Zn. Sur maïs, selon ARNON, les effets dépressifs de P sur la teneur en Zn seraient diminués en présence d'une forte nutrition potassique. K et Zn seraient en liaison par l'intermédiaire du système enzymatique pyruvic kinase. Selon THOMPSON, cité par ARNON, la déficience en Zn sur maïs pourrait être aggravée aussi bien par une déficience en K que par un fort excès K.

L'interaction K × Zn retient notre attention depuis quelques années, du fait que sur certains essais permanents K ou N × P × 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.

Zn \ K	Grains secs (q/hectare)		
	K0	K180	Effet Zn
Zn0	46,7	59,2	53,0
Zn6	49,2	66,2	57,7**
Effet K	48,0	62,7***	

Dans l'exemple du tableau 31 (essai de Faramans), l'interaction K × Zn, bien que non significative, est nettement positive (+ 4,5 q/ha). Mais les résultats ne sont qu'indicatifs, car il s'agit d'essais à forte réponse potassique.

2^e partie : interactions du potassium avec d'autres facteurs de croissance

Afin de conserver une certaine unité à ce rapport, on ne considérera maintenant que divers facteurs susceptibles d'interférer d'une manière assez directe sur la nutrition potassique et non d'une manière trop indirecte. Dans cette optique, les facteurs les plus concernés sont évidemment ceux qui introduisent par leur présence des quantités de

potassium ou autres éléments (telles sont les interactions de K avec les restitutions et les fumures organiques). Le facteur eau (irrigation) est également primordial, car c'est un facteur général de croissance et il interfère aussi sur la disponibilité du potassium du sol.

A - Interaction K × 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 K₂O plutôt qu'à la véritable interaction : dose irrigation × réponse à K₂O (1-58-62).

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 (36).

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 K₂O 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 (LARSON (75)).

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, atteignent néanmoins un certain niveau, la réponse à la potasse a toutes les 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, U.S.A., par YOUNTS (148). Le tableau ci-après rapporte les rendements en fonction des hauteurs d'eau durant la période de croissance du maïs.

Tableau 32:
Interaction pluviométrie \times K sur maïs (q/ha)

Pluviométrie (mm)	K0	K100
Insuffisante (202 mm)	56,5	81,0
Optimum (448 mm)	93,0	98,0
Excessive (655 mm)	57,1	87,3

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.

Les relations entre la réponse des cultures à la potasse et la pluviométrie, ont particulièrement été étudiées par VAN der PAAUW sur pommes de terre (136), par BARBER (10-11) ainsi que DOLL et ENGELSTAD (32) sur maïs.

VAN der PAAUW a étudié les relations entre la réponse des cultures à la potasse et la pluviométrie. Il a obtenu des corrélations significatives, surtout sur pommes de terre, entre les réponses à K_2O et les nombres de jours sans pluie au cours de la période de croissance, du 1^{er} mai au 30 juillet. Les années sèches, les rendements K0 décroissent lorsque le nombre de jours secs croît; l'écart ($K_{480} - K_0$) est ainsi plus grand au cours des années sèches, comme le montre la figure 16 (136).

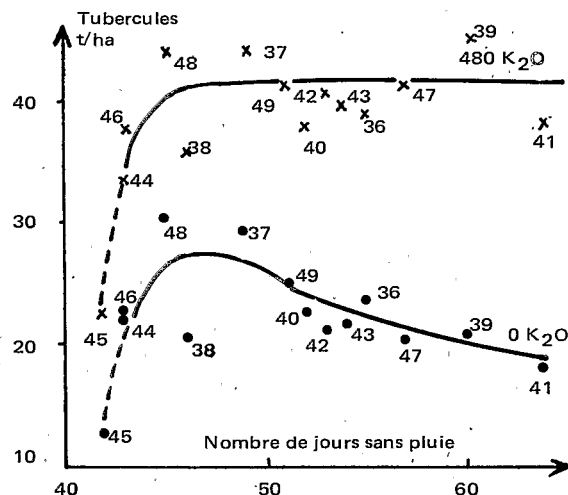
Tableau 33: Relation K \times pluviométrie juillet, essai de Sainte Marthe (Lot et Garonne)

	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 ($K_{140} - K_0$)	+20,2	+ 3,1	+11,4	+10,7	+20,4	+27,7	+10,0	+12,0
kg/ha K_2O pour rendt max. . .	133	(508)	166	138	122	121	107	97

On constate bien que les rendements K0 ont tendance à croître avec la pluviométrie de juillet, que l'effet potasse par rapport à K0 a été de 15,5 % en années humides et de 39 % en années sèches, mais il apparaît une liaison inverse assez nette entre la dose de rendement maximum calculée par les fonctions de production et la pluviométrie de juillet. Le rendement maximum a été obtenu avec environ K100 en année humide, K120 en année moyenne et K145 en année sèche.

BLANCHET et STUDER (14-15) ont étudié les interactions potassium \times eau sur trois espèces prairiales (luzerne, trèfle violet, ray-grass d'Italie) dans trois sols diversément enrichis en potassium et maintenus à divers niveaux d'humidité en cultures en pots. Ces auteurs ont montré que l'interaction potassium \times eau s'exerce avec une ampleur variable selon les espèces végétales: très accusée sur la luzerne, elle est moindre sur le trèfle violet et faible sur le ray-grass d'Italie: «l'alimentation hydrique et l'alimentation potassique peuvent se compenser dans certaines limites pour assurer la croissance et la production de matière sèche». Sur luzerne,

Figure 16: Relation entre le nombre de jours sans pluies (mai-juillet) et le rendement en tubercules de pommes de terre en présence de 0 et 480 kg/ha K_2O (d'après Van der Paauw)



BARBER a observé sur maïs une relation similaire entre la pluviométrie durant la saison de croissance et le rendement K0, calculé en % du rendement qui aurait été obtenu avec des quantités correctes de potasse (10). 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 (11).

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 maximum diffère-t-elle selon la pluviométrie, ou avec ou sans irrigation? Sur maïs, DOLL et ENGELSTAD ont estimé que la dose optimum d'apport de potasse pouvait être évaluée avec une sécurité suffisante, même si les rendements réels différaient notablement en raison des variations pluviométriques (32).

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

par exemple dans leurs essais, une même production de matière sèche pouvait être obtenue soit dans un milieu relativement sec et en présence de fortes doses de K, soit dans un milieu humide et avec peu de K (figure 17).

BLANCHET et al ont obtenu au champ, sur ray-grass, les résultats suivants, en sol de rendzine à 40 % d'argile et 0,20 % K_2O échangeable, avec les doses K0, K250, K1000 et 5 régimes d'eau. L'interaction K \times irrigation est ici très positive, en l'absence d'effet K sans irrigation. Lorsque la fourniture d'eau atteint 60 % de l'évapotranspiration potentielle, la production de matière sèche est limitée à 5 t/ha avec K0; avec K1000, ce rendement était atteint avec 42 % des besoins eau (15-127), figure 18.

Une fertilisation K copieuse avait donc beaucoup amélioré l'efficacité d'utilisation de l'eau. Les auteurs expliquent les résultats par deux mécanismes mis en évidence dans leurs essais en pots: réduction de la transpiration, meilleure utilisation des réserves en eau du sol.

Figure 17: Transpiration par gramme de matière sèche, en fonction des récoltes obtenues, aux divers niveaux de potassium apporté et d'humidité; luzerne (2^e coupe), d'après BLANCHET et al

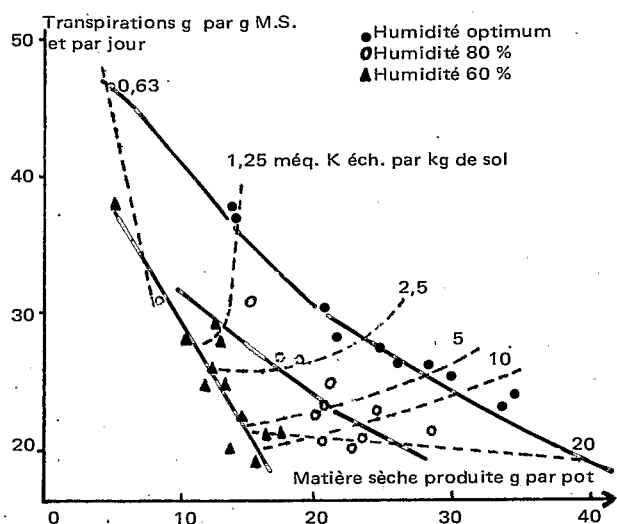
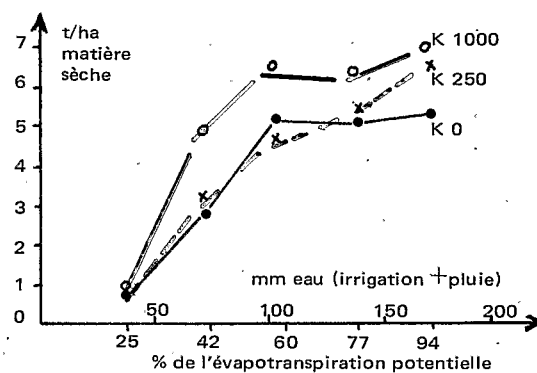


Figure 18: Interaction K × eau sur ray-grass, d'après BLANCHET et al



En conclusion, l'interaction potassium × eau est la résultante de phénomènes situés dans le sol au niveau de la solution du sol et du système racinaire, mais également sous la dépendance des mécanismes physiologiques liés au rôle joué par l'ion K dans la pression osmotique des plantes et sur l'ouverture des stomates, d'où il résulte qu'une bonne nutrition potassique s'accompagne d'une diminution de la transpiration et d'une meilleure utilisation des réserves en eau du sol.

B - Interaction K × apports et restitutions organiques

1. Interaction K × amendements organiques

Si les restitutions organiques peuvent concerner toutes les cultures de la rotation, en particulier les verts de betteraves, les pailles de blé, par contre le fumier de ferme est le plus souvent apporté pour la plante sarclée, tête de rotation.

C'est ainsi que sur pommes de terre on dispose ici de deux séries de résultats d'assez longue durée pour un essai de la Station d'Aspach sur 17 ans et un essai poursuivi à Lieusaint (Seine et Marne) (88).

Tableau 34: Interaction fumures organiques × K₂O sur pommes de terre (t/ha)

	Témoin	+ Engrais verts	+ Paille enfouie	+ Fumier	Effet K
I) Essai de la Station d'Aspach (moyennes sur 17 ans)					
K 0	11,0	16,2	13,6	26,6	16,85
K200	29,4	31,8	31,8	35,2	32,05***
	20,1	24,0**	22,7*	30,9***	
II) Essai de Lieusaint (moyennes sur 11 ans)					
K 0	13,7	14,6	15,5	21,8	16,40
K145	25,0	24,7	26,5	27,7	26,00
K209	28,3	28,0	29,3	29,8	28,85
	22,3	22,4	23,7	26,4	

Dans les deux cas, l'interaction fumier × K est très négative (- 9,8 t/ha et - 6,6 t/ha). Mais les combinaisons K200 + fumier sont les meilleures. Il existe de nombreuses références sur ce sujet et la pomme de terre (18-19-114).

Dans les essais ici poursuivis, l'effet potasse avec fumier a représenté en moyenne 50 % de l'effet sans fumier et, bien que l'interaction fumier × K ait été régulièrement fortement négative, le rendement maximum a toujours correspondu à fumier + dose supérieure de K₂O en essai.

2. Interaction K × restitutions organiques

Le problème des restitutions organiques revêt une grande importance pour les divers types d'agriculture; au regard de la fertilité du sol en général. En ce qui concerne le problème du potassium, le fait de restituer ou non les résidus de récoltes entraîne des modifications notables dans les bilans K₂O, donc dans l'épuisement des sols en potasse.

L'interaction K × restitutions est un problème difficile à introduire dans les dispositifs expérimentaux factoriels

N × P × K. Cela a cependant été tenté ici sur divers dispositifs de type 2 N × 2 P × 4 K × 2 R (R0 = pas de restitutions et R1 = restitutions). Deux essais ont été conduits avec des rotations de type betterave sucrière - blé (les restitutions portant donc sur les verts de betterave et les pailles de blé). Le tableau 35 donne les résultats R × K de l'essai de Beauvais.

Tableau 35: Interaction R x K sur l'essai de Beauvais (rendements en t ou q/hectare)

Cultures	Base R0K0	Meilleur traitement R x K	Interaction R x K entre extrêmes	Effet R avec K0
1967 Blé	-	Première année de l'essai	-	-
1968 Pomme de terre	43,0	R1 K150 = 43,8	+ 1,8 t	- 2,1 t
1969 Blé	47,3	R0 K160 = 49,5	- 2,4 q	- 0,5 q
1970 Betterave	38,7	R1 K280 = 45,7	- 1,5 t	+ 4,0 t
1971 Blé	54,0	R1 K 80 = 57,1	- 3,1 q	+ 2,7 q
1972 Betterave	37,6	R0 K280 = 47,5	- 7,8 t	+ 7,0 t
1973 Blé	63,6	R1 K 80 = 66,8	- 1,6 q	+ 2,7 q
1974 Betterave	37,4	R1 K280 = 51,2	+ 6,6 t	+ 2,2 t
1975 Blé	42,3	R1 K160 = 46,4	- 2,2 q	+ 3,5 q

On constate bien que l'interaction R x K est assez généralement négative: l'effet K est plus faible en présence des restitutions R1 et l'effet R1 décroît avec les doses K. Mais il se passe un peu comme pour l'interaction K x fumier, c'est-à-dire que les meilleurs résultats correspondent plutôt à

R1 + dose de K₂O correcte.

L'état potassique des sols a été très influencé sur cet essai par le jeu de l'interaction R x K. Ainsi, en fin d'essai, après le blé de 1975, la situation était la suivante:

Tableau 36: Teneurs des sols et sous-sols en K₂O

	K ₂ O échangeable ‰ (sols 0-20 cm)					K ₂ O échangeable ‰ (sous-sols)				
	K0	K108	K161	K215	Effet R	K0	K108	K161	K215	Effet R
R0	0,082	0,110	0,145	0,150	0,122	0,060	0,090	0,110	0,120	0,095
R1	0,098	0,130	0,172	0,228	0,157	0,090	0,130	0,140	0,150	0,127
Effet K	0,090	0,120**	0,159**	0,189***	0,139	0,075	0,110	0,125	0,135	0,111

Sur la moyenne des 9 ans de l'essai, les doses de potasse ont été: K0, K108, K161, K215 kg/ha K₂O/an. La teneur en K₂O est très influencée par les effets R, K et l'interaction R x K a été hautement significative et très positive pour le sol. La teneur initiale étant de 0,110 ‰, on peut mesurer l'effet de chaque combinaison RK sur K₂O échangeable.

Il ne s'agit évidemment là que d'un exemple expérimental, mais qui montre bien l'importance de cette interaction dans tout raisonnement de fertilisation potassique.

Conclusion

En 1956, BOYD écrivait à peu près que l'importance des interactions était de nature à rendre rentables des doses de fertilisants totalement imprévisibles lorsqu'on expérimente avec des doses faibles (17). Peut-on en 1979, formuler la même opinion?

Il est probable que dans les régions qui fertilisent peu ou très peu, les progrès futurs de la fertilisation se traduiront par des interactions avec K du même ordre que celles qui ont été exposées. Les diverses interactions avec le potassium traduisent le fait que lorsqu'un facteur important est porté au meilleur niveau possible, les besoins en K tendent à s'élever.

On peut penser que de nouveaux progrès interviendront dans le domaine des interactions, grâce en particulier aux variétés plus performantes et à une meilleure utilisation de

l'eau. Les différences entre cultures quant aux prélèvements et sorties de potassium resteront un facteur important d'interactions avec K.

Le domaine des interactions demeure d'actualité pour l'agronome, l'expérimentateur, le spécialiste de nutrition minérale. Mais il y a encore beaucoup de progrès à accomplir dans l'obtention de faits expérimentaux d'une part, et dans leur interprétation d'autre part, et cela grâce à un travail d'équipes, associant aux précédents les physiologistes, les pathologistes et les économistes.

Au plan économique, les interactions avec le potassium sont plutôt de nature, du fait des coûts relatifs des divers éléments fertilisants, à valoriser des doses de K₂O supérieures à celles qu'indiquerait la seule réponse à K, tous autres éléments confondus.

Bibliographie

1. ACHITOV M.: Revue de la littérature relative à l'interaction entre le potassium et l'eau dans les plantes. *Revue de la Potasse, Section 3, 15^e suite, 1-16*, (1961).
2. ADAMS W.E., TWERSKY M.: Effect of soil fertility on winter killing of coastal Bermudagrass. *Agron. J.* 52, n° 6, 325-326 (1960) et: Influence de la fertilité du sol sur le dépérissement hivernal de *Cynodon dactylon*. *Revue de la Potasse, Section 30, 16^e suite* (1960).
3. ADAMS W.E.: N-K ratio, important factor in coastal Bermudagrass forage production. *Better Crops, march-avril, 16-20*, (1965).
4. ANDERSON G.D.: Potassium responses of various crops in East Africa. *10^e Colloquium Int. Potasse - Abidjan, 413-437* (1973).
5. ARNON J.: Mineral nutrition of maize. *Int. Pot. Inst. p. 452* (1975).
6. ARNON J.: Coordinator's report on the 5th working session. *13th Colloquium Int. Pot. Inst., York, 335-337* (1977).
7. AUDIDIER L.: Rapport général sur l'interaction azote-potasse. *Assemblée Générale du CIEC - Varsovie* (1966).
8. BALLIF J.L. et DUTIL P.: Équilibre de la fumure potassique et magnésienne de la luzerne en Champagne crayeuse. *Inst. Nat. Rech. Agron. Station Chalons-sur-Marne - Bull. n° 30, p. 48* (1974).
9. BALLIF J.L. et DUTIL P.: Recherche de l'équilibre potassium-magnésium dans la fertilisation de la luzerne en Champagne crayeuse. *C. Rend. Acad. Agric. Fr. n° 8, 515-528* (1976).
10. BARBER S.A.: Relation of fertilizer placement to nutrient uptake and crop yield. II Effects of row potassium, potassium soil-level and precipitation. *Agron. J.* 51, 97-99 (1959).
11. BARBER S.A.: The influence of moisture and temperature on phosphorus and potassium availability. *7th Intern. Congress of Soil Science, Madison, Wisconsin USA, 435-442* (1960).

12. BAROCCIO A. : Phénomènes de synergisme molybdène-potassium dans la nutrition potassique des plantes. *Potassium Symposium, Int. Pot. Inst.*, 369-373 (1962).
13. BIRCH J.A., DEVINE J.R., HOLMES M.R.J. : Field experiments on the magnesium requirement of cereals, potatoes and sugar beet in relation to nitrogen and potassium application. *J. Sci. Fd. Agric. vol. 17*, 76-81 (1966).
14. BLANCHET R., STUDEFER R., CHAUMONT C. : Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. *Annales Agron.* 13 (2), 93-110 (1962).
15. BLANCHET R., BOSCH M., MAERTENS C. : Some interactions of cation nutrition and the water supply of plants, in « Transition from extensive to intensive agriculture with fertilizers ». *Int. Pot. Inst.*, 121-131 (1969).
16. BOTTINI E. : La fumure minérale du pois. 8^e Congrès Inst. Int. Pot., Bruxelles, 293-301 (1966).
17. BOYD D.A. : The effect of potassium on crop yield. *Potassium Symposium, Int. Pot. Inst.*, 143-154 (1966).
18. BOYD D.A. : The effect of farmyard manure on fertilizer responses. *J. Agric. Sci.* 52, 384-391 (1959).
19. BOYD D.A. : Fertilizer responses of maincrop potatoes ; a reexamination of the experimental evidence. *J. Sci. Food Agric.* 12, 493-502 (1961).
20. BRUCHHOLZ H. : Soil and crop response to long-term potash fertilization. *10th Congress Int. Pot. Inst., Budapest*, 111-116 (1974).
21. BURKERSRODA K.W. : Fertilizing maize in Rhodesia. *Better Crops* 49 (4), 6-13 (1965).
22. BURSON P.M., CURLEY R.D., ROST C.O. : Balanced N-P-K and placement, key to good root growth. *Crops and Soils* 14 (6), 9-10 (1962).
23. CHAPMAN F.M., MASON J.L. : Effect of phosphorus and potassium fertilizers on the agronomic characteristics of spring wheat and their interaction on grain yield. *Canad. J. Soil Sci.* vol. 49, n°3, 343-347 (1969) et : *Revue de la Potasse, Section 9, 1^{re} suite* (1970).
24. CHEVALIER H. : The influence of nitrogen and potassium dressings on wheat quality. *11th Colloquium Int. Pot. Inst.*, 265-275 (1976).
25. CHEVALIER H. : Fertilisation azotée, phosphatée et potassique de la prairie temporaire exploitée au rythme de la pâture. *Fourrages n°62*, 133-159 (1975).
26. CHEVALIER H. : Influence de la fertilisation azotée et potassique sur la répartition des productions annuelles d'un ray-grass anglais exploité en simulation de pâture. *7th General meeting europ. grassland. feder.* 10, 43-51 (1978).
27. COOMANS P. : Premiers résultats expérimentaux sur la fertilisation des cocotiers hybrides en Côte d'Ivoire. *Oligéineux vol. 32*, n°4, 155-166 (1977).
28. CUNARD A.C. : Maize agronomy Part 2 - Nutrients and nutrient uptake. *World crops*, 19 (2) 200-228 (1967).
29. DELAS J. : Étude par l'analyse foliaire de la carence en magnésium dans le vignoble bordelais, in « Le Contrôle de la fertilisation des plantes cultivées », 1^{er} Colloque, Séville, 343-349 (1962).
30. DELAS J., DUMARTIN P., MOLOT C., BONIFACE J.C. : Le dessèchement de la rafle dans le vignoble bordelais. *Connaissance vigne et vins*, 10, n°3, 227-247 (1976).
31. DESHMUKH S. : Formule économique d'engrais NPK pour le riz paddy dans la région de Chhattisgarh (Inde). *Revue de la Potasse, Section 9, 3^{de} suite* (1977).
32. DOLL E.C., ENGELSTAD O.P. : Effect of rainfall on corn yield response to applied potassium. *Agron. J.* 54, 276 (1962).
33. DOVRAT A. : Potassium deficiency as a result of increased nitrogen fertilization in irrigated pastures. *7^e Congrès Inst. Int. Pot.* 375-385 (1962).
34. DRAYCOTT A.P., MARSH J.A.P., TINKER P.B.H. : Sodium and potassium relationships in sugar beet. *J. Agric. Sci. Camb.* 74, 567-573 (1970).
35. DRAYCOTT A.P. : Sugar beet nutrition ; interactions between nitrogen and other fertilizer elements. P. 28-29 and 64-66. *Applied Science Publishers London* (1972).
36. DROUINEAU G. : Influence of irrigation on the distribution of fertilizer elements in the soil profile, in « Transition from extensive to intensive agriculture with fertilizers ». *Int. Pot. Inst.*, 96-105 (1969).
37. DUTIL P. : Relations entre la fertilisation potassique et magnésienne et les rendements de la luzerne. *Inst. Nat. Rech. Agron. Station Chalons-sur-Marne - Bull.* n°54, p. 18 (1978).
38. FISHER F.L. : Nutrient balance affects corn yield and stalk strength. *Tex. Agric. Exp. Sta. Better Crops* 38, 4, 15-17, 40 (1954).
39. FISHER F.L. : The influence of nutrient balance on yield and lodging of corn. *Agron. J.* 52, 201-204 (1960).
40. FORSTER H. : Influence of K and N fertilizers on the quality and yield of oil from old and new varieties of rapeseed. *13th Colloquium Int. Pot. Inst., York*, 305-310 (1977).
41. GAILLARD J.P. : Recherche d'un équilibre K/N dans la production de l'ananas frais au Cameroun. *Résultats agronomiques : Fruits*, vol. 25, n°1, 11-24 (1970) et : *Revue de la Potasse, Section 27, 5^{de} suite* (1971).
42. GARAUDEAUX J., CHEVALIER H. : Variabilité des réponses aux fumures azotées et potassiques de différentes cultures. *Assemblée Générale du CIEC, Varsovie* (1966).
43. GARAUDEAUX J., CHEVALIER H. : Études des interactions entre azote et potasse réalisées à la Station Agronomique d'Aspach-le-Bas de 1951 à 1964. *Imprimerie Irion, Mulhouse* p. 220 (1967).
44. GARAUDEAUX J., CHEVALIER H. : Étude des interactions entre fumures azotées et potassiques - Résultats globaux obtenus dans les essais de longue durée de la Station Agronomique d'Aspach-le-Bas. *Compte Rend. Acad. Agric. Fr.* n°12, 746-759 (1975).
45. GARAUDEAUX J., CHEVALIER H. : Étude des interactions entre fumures azotées et potassiques sur une prairie temporaire de Dactyle. *Compte Rend. Acad. Agric. Fr.* n°8, 548-552 (1976).
46. GERICKE S. : Wechselwirkungen der Düngernährstoffen bei Kartoffeln. *Der Kartoffelbau*, 19, n°1, 6-7 (1963).
47. HAEDER H.E. : Importance pratique des résultats de recherches présentés au Colloque « Le potassium en biochimie et physiologie ». *Revue de la Potasse, Section 3, 4^{de} suite* (1971).
48. HAQUEI : Réponses des cultures à la potasse au Sierra Leone. *Revue de la Potasse - Section 27, 6^{de} suite*, p. 8 (1974).
49. HARMER P.M., BENNE E.J. : Sodium as a crop nutrient. *Soil Sci.* 60, 137-148 (1945).
50. HEATHCOTE R.G. : Potassium fertilization in the Savanna zone of Nigeria. *Revue de la Potasse, Section 16, 5^{de} suite* (1972).
51. HEATHCOTE R.G. : The use of fertilizers in the maintenance of soil fertility under intensive cropping in Northern Nigeria, in « Le Potassium dans les cultures et les sols tropicaux », 10^e Colloque Inst. Int. Pot. Abidjan, 467-474 (1973).
52. HEIMANN H. : Irrigation with saline water and the ionic environment. *Potassium Symposium. Int. Pot. Inst.* 173-220 (1968).
53. HEIMANN H., RATNER R. : Influence du sodium et du rapport potassium/sodium sur la teneur en sucre des betteraves et leur technologie. *Revue de la Potasse, Section 11, 1^{re} suite*, p. 6 (1962).
54. HEIMANN H., RATNER R. : Influence du potassium sur l'absorption du sodium par les plantes en conditions salines. *Revue de la Potasse, Section 24, 1^{re} suite*, p. 10 (1962).
55. HEISTERMANN P. : Yield and quality of sugar beet and potatoes as affected by fertilizer N/K ratio. *Zesz. probl. Postep. Nauk, roln* 84, 273-288 (1968).
56. HEXTER G.W. : Potassium for pastures. *World Crops* 11, n°4, 135-137 (1959) et : *Revue de la Potasse, Section 30, 1^{re} suite* (1959).
57. HEWITT E.J., BOLLE JONES E.W. : Studies in iron deficiency of crops, II. The interrelationships of iron and potassium in the potato plant. *J. Hort. Sci.* 28, 185-195 (1953).
58. HÖFNER W. : Influence of potassium on water economy, in p. 125-129 « Potassium in Biochemistry and Physiology » (1971).
59. HOLEVAS C.D. : Potassium-boron relationships in olive nutrition. 4^e Colloque Int. sur le contrôle de l'alimentation des plantes cultivées, Gand, vol. II, 167-173, (1976).
60. HOLMES J.C., GILL W.D., RODGER J.B., WHITE G.R., LAWLEY D.N. : Experiments with salt and potash on sugar beet in South-East Scotland. *Expl. Husb.* 6, 7-7 (1961).
61. HOSSNER L.R., DOLL E.C. : Magnesium fertilization of potatoes as related to liming and potassium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* vol. 34, 772-774 (1970).
62. HUDSON J.P. : General effect of potassium on the water economy of plants. *Potassium Symposium Int. Pot. Inst.* 95-107 (1968).
63. HYLTON L.O., ULRICH A., CORNELIUS D.R. : Potassium and sodium interrelations in growth and mineral content of Italian Ryegrass. *Agron. J.* 59, 311-314 (1967).
64. INKSON R.H.E., REITH J.W.S. : Estimating optimal nutrient rates for potatoes. *Trans. Meet Comm II and IV, Int. Soc. Soil Sci.* 377-384 (1966).
65. JOHNSON P.E. : Potassium nitrogen balance for high corn yields. Univ. of Illinois - Urbana. *Better Crops*, 36, n°5, 6-12 and 47-50 (1952).
66. JONES J.B. Jr. : Molybdenum content of corn plants exhibiting varying degrees of potassium deficiency. *Science*, 149 : 94 (1965).
67. JUNGK A. : Influence of nitrogen and potassium concentration of nutrient solutions on yield. *V^e Colloque Int. Pot. Inst., Florence* 310-319 (1968).
68. KANWAR J.S. : Assessment of potassium fertilization in the tropics and subtropics of Asia. *10th Congress Int. Pot. Inst., Budapest*, 261-282 (1974).
69. KÖCHL A. : The effects of nitrogen and potassium nutrition on yield and quality of sugar beet, in « Fertilizer use and production of carbohydrates and lipids ». *13th Colloquium Int. Pot. Inst., York*, 159-169 (1977).
70. KRANTZ B.A., CHANDLER W.V. : Lodging, leaf composition and yield of corn as influenced by heavy applications of nitrogen and potash. *Agron. J.* 43, 547-552 (1951).
71. KRESGE C.B. : N-K partners in forage grass production. *Better Crops, march-april*, 22-27 (1965).
72. LANCASTER J.D., ANDREWS W.B., JONES U.S. : Influence of sodium yield and quality of cotton lint and seed. *Soil Science* 76, 29-40 (1953).
73. LANDI R. : La fertilisation des plantes potagères de plein champ et les rapports d'interaction entre les éléments. *V^e Colloque, Int. Pot. Inst., Florence*, 131-145 (1968).
74. LARSON W.E., PIERRE W.H. : Interaction of sodium and potassium on yield and cation composition of selected crops. *Soil Science* 76, 51-64 (1953).
75. LARSON W.E. : Response of sugar beets to potassium fertilization in relation to soil physical and moisture conditions. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* 18, 313-317 (1954).
76. LAUGHLIN W.M. : Effect of soil applications of potassium, magnesium sulfate and magnesium sulfate spray on potato yield, composition and nutrient uptake. *Amer. Potato J.* 43, 403-411 (1966).
77. LAVALLEYE M., STEPPE H.M. : The effects of potash on pea growth and quality. 8^e Congrès Int. Pot. Inst., Bruxelles, 235-248 (1966).
78. LEHMAN K. : Interaction of potassium, magnesium and calcium concentrations and forms of nitrogen in the medium on cation contents of plants. *10th Congress Int. Pot. Inst., Budapest*, 117-129 (1974).
79. LEHR J.J. : Sodium as a plant nutrient. *J. Sci. Food Agric.* 4, 460-471 (1953).
80. LIEBHARDT W.C., MURDOCK J.T. : Effect of potassium on morphology and lodging of corn. *Agron. J.* 57, 325-328 (1965).
81. LOUÉ A. : La nutrition cationique du maïs et le diagnostic foliaire. *Ann. Physiol. Vég.* 4 (2), 127-148 (1962).
82. LOUÉ A. : Maize nutrition, cation requirements and potash demand. *World Crops*, 15, 373-379 (1963).
83. LOUÉ A. : Contribution à l'étude de la nutrition cationique et plus particulièrement potassique du maïs. *Fertilité* 20, p. 57 (1963).
84. LOUÉ A. : Le diagnostic foliaire du maïs (méthodologie, état actuel des connaissances, utilisation). 4^e Colloque Inst. Int. Pot., Belgrade, 105-116 (1965).
85. LOUÉ A. : L'intérêt du diagnostic pétolaire dans les études sur la nutrition et la fertilisation potassique de la vigne, in « Le contrôle de la fertilisation des plantes cultivées » 2^e Colloque, Séville, 283-294 (1968).
86. LOUÉ A. : Six ans d'expérimentation sur la nutrition et la fertilisation potassiques, calciques, magnésiennes du maïs, in « Études sur la nutrition et la fertilisation du maïs poursuivies à Pau de 1951 à 1963 », 39-92 (1970).
87. LOUÉ A. : Le problème agronomique du magnésium en France. Essais d'interaction entre le potassium et le magnésium dans les principales conditions de déficience magnésienne, in « Kalium und magnesium in der pflanzenverwertung. Merelbeke, Belgique, 24-66 (1977).
88. LOUÉ A. : Fertilisation et nutrition minérale de la pomme de terre. *Imprimerie Alsace, Mulhouse*, p. 148 (1977).
89. LOUÉ A. : Rapports annuels des essais de fertilisation. *SCPA Mulhouse, 14 volumes* (1963 à 1976).
90. LUCAS R.E., WHEELER E.J., DAVIS J.F. : Effect of potassium carriers and phosphate/potash ratios on the yield and quality of potatoes grown in organic soils. *Amer. Potato J.* 31, 349-352 (1954).
91. MC DONNELL P.M., GALLAGHER P.A., KEARNEY P., CARROLL P. : Fertilizer use and sugar beet quality in Ireland. *Potassium Symposium, Brussels*, 107-126 (1966).
92. MC EVOY E.T. : Interaction of sodium and potassium on growth and mineral content of flue-cured tobacco. *Canad. J. Agric. Sci.*, 35, 294-299 (1955).
93. MC LEOD L.B. : Effect of nitrogen and potassium on the yield and chemical composition of Alfalfa, Bromegrass, Orchardgrass and Timothy Grown as pure species. *Agron. J.* vol. 57, 261-266 (1965).
94. MC LEOD L.B. : Effects of N, P and K and their interactions on the yield and Kernel weight of barley in hydroponic culture. *Agronomy J.* vol. 61 25-29 (1969).
95. MC LEOD L.B., CARSON R.B. : Effects of N, P and K and their interactions on the nitrogen metabolism of vegetative barley tissue and on the chemical composition of grain in hydroponic culture. *Agron. J.* vol. 61, 275-278 (1969).
96. MALAVOLTA E. : Foliar diagnosis in sugar cane, with special reference to potassium. *Revue de la Potasse, Section 27, 4^{de} suite*, p. 20 (1963).
97. MALQUORI A. : La fumure minérale des artichauts en Italie. 8^e Congrès Inst. Int. Pot., Bruxelles, 265-271 (1966).
98. MARCHAL J., MARTIN PREVEL P., LACOEUILLE J.J., LOSSOIS P. : Recherche d'un équilibre K/N dans la production de l'ananas frais au Cameroun, II - Analyses foliaires. *Fruits vol. 25, n°2*, 87-95 (1970) et : *Revue de la Potasse, Section 27, 5^{de} suite* (1972).
99. MARSCHNER H. : Why can sodium replace potassium in plants ? in « Potassium in biochemistry and physiology ». *Int. Pot. Inst.* 50-63 (1971).
100. MASTERSON C. : The effect of sodium and potassium on fodder beet. *J. Dep. Agric., Dublin* 54 et : *Revue de la Potasse, Section 11, n°9*, p. 13 (1958).
101. MONROE C.A., COORTS G.D., SKOGLEY C.R. : Effects of nitrogen-potassium levels on the growth and chemical composition of Kentucky Blue-grass. *Agron. J.* vol. 61, 294-296 (1969).
102. MUCCI F. : La culture du melon de plein champ et sous protection. *V^e Colloque, Inst. Int. Pot., Florence*, 153-176 (1968).
103. MÜLLER (von) K., NIEMANN A., WERNER W. : Influence of nitrogen : potassium ratio on yield and quality of sugar beet. *Zucker*, 15, 142-147 (1962) et : *Revue de la Potasse, Section 11, 1^{re} suite* (1963).
104. MUNSON R.D. : L'équilibre N-K, une appréciation. *Revue de la Potasse, Section 16, 5^{de} suite*, p. 24 (1970).
105. MUNSON R.D. : Interaction of Potassium and other ions, in « The role of potassium in agriculture ». *Chapt. 16, 321-353, Madison U.S.A.* (1968).
106. MURDOCK J.T., STENGEL P.J., DOERSCH R.E. : How fertility level and balance can affect crop production. *Better crops* 46 (2), 16-21 (1962).
107. NOWAKOWSKI T.Z. : Effects of potassium and sodium on the contents of soluble carbohydrates and nitrogenous compounds in grass, in « Potassium in biochemistry and physiology ». *Int. Pot. Inst.* 45-49 (1971).

108. OBIGBESAN G.O. : The influence of potassium nutrition on the yield and chemical composition of some tropical root and tuber crops. *10^e Colloque Inst. Int. Pot., Abidjan, 439-451* (1973).
109. OCHS R., OLLAGNIER M. : The effect of fertilizers on the yield and composition of lipids in some tropical crops. *13th Colloquium Int. Pot. Inst., York, 269-293* (1977).
110. OLLAGNIER M., OCHS R. : Interaction entre l'azote et le potassium dans la nutrition des oléagineux tropicaux. *10^e Colloque Inst. Int. Pot., Abidjan, 215-231* (1973).
111. OTTO H.J., EVERETT H.L. : Influence of nitrogen and potassium fertilization in the incidence of stalk rot of corn. *Agron. J., 48, 301-305* (1956).
112. PREVOT P., OLLAGNIER M. : La fumure potassique dans les régions tropicales et subtropicales. *Potassium Symposium Int. Pot. Inst. 277-318* (1958).
113. RANGANATHAN V. : Certains aspects de la fumure du théier. UPASI, Tea Research Station India. *Revue de la Potasse, Section 27, 71^e suite, p. 6* (1975).
114. REITH J.W.S., INKSON R.H.E. : Effect of fertilizer and dung on potatoes. *J. Agric. Sci. 51, 218-224* (1958).
115. REEVE E., SHIVE J.W. : Potassium-boron and calcium-boron relationships in plant nutrition. *Soil Sci. 57, 1-14* (1944).
116. RICHARD L. : La fertilisation potassique en relation avec les autres facteurs de production. *10^e Colloque Inst. Int. Pot., Abidjan, 333-357* (1973).
117. SALMON R.C. : Magnesium relationships in soils and plants. *J. Sci. Fd. Agric., vol. 14, 605-610* (1963).
118. SALMON R.C. : Cation activity ratios in equilibrium soil solutions and the availability of magnesium. *Soil Science, vol. 98, n°4, 213-221* (1964).
119. SCHMITT L. : Le problème du potassium étudié à la lumière des résultats d'un essai de fumure de 50 ans sur prairie. *Revue de la Potasse, Section 30, 18^e suite, p. 9* (1963).
120. SIMPSON K., CROOKS P. : Effects of fertilizers on the yield of potatoes in S.E. Scotland. *J. Sci. Food Agric. 12, 131-137* (1961).
121. SIMPSON K., CROOKS P., Mc INTOSH S. : Effects of potassium and magnesium fertilizers on yield and size distribution of potatoes. *Journal of Agric. Sci. 80. (3), 360-373* (1973).
122. SPALDON E., IVANIC J. : Influence des doses croissantes NPK sur le rendement et la qualité du piment. *V^e Colloque Inst. Int. Pot., Florence, 208-218* (1968).
123. STANGEL P.J. : N-K Means high profit corn. *Better crops 49 (2), 8-13* (1965).
124. STEINECK O. : Importance du potassium pour la synthèse des composés organiques de la plante. *V^e Colloque Inst. Int. Pot., Florence, 320-323* (1968).
125. STEINECK O. : The relation between potassium and nitrogen in the production of plant material. *10th Congress Int. Pot. Inst., Budapest, 189-196* (1974).
126. STEWART M.-J. : Potassium and sugar cane. *The South African Sugar Jour* (1969) et : *Revue de la Potasse, Section 27, 47^e suite* (1969).
127. STÜDER R., BLANCHET R. : Irrigations en région tempérée à influence océanique et interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. *Compte Rend. Acad. Agric. Fr. n°5, 339* (1963).
128. TALIBUDEEN O., PAGE M.B., RAMACHANDRAN NAIR P.V. : The interaction of nitrogen and potassium nutrition on dry matter and nitrogen yields of the Graminae: Spring wheat. *J. Sci. Fd. Agric., 27, 1179-1189* (1976).
129. TALIBUDEEN O., PAGE M.B., MITCHELL J.D.D. : The interaction of nitrogen and potassium nutrition on dry matter and nitrogen yields of the Graminae: Perennial ryegrass (*Lolium perenne*). *J. Sci. Fd. Agric., 27, 999-1004* (1976) et : *Revue de la Potasse, Section 27, 22^e suite* (1977).
130. TANAKA A., TOSHIKI TADANO. : Le potassium en relation avec la toxicité ferrique chez la plante de riz - *Revue de la Potasse, Section 9, 21^e suite* (1972).
131. TANAKA A. : Influence of special ecological conditions on growth, metabolism and potassium nutrition of tropical crops (as simplified by the case of rice). *10^e Colloque Inst. Int. Pot., Abidjan, 147-167* (1973).
132. TEEL M.R. : Nitrogen potassium, teamwork on forage composition. *Better Crops, may-juin, 34-42* (1963).
133. TEEL M.R. : Nitrogen-potassium relationships and their influence on some biochemical intermediates and quality of crude protein in forages. *8th Congress Int. Pot. Inst., Bruxelles, 465-480* (1966).
134. TINKER P.B.H. : The effects of nitrogen, potassium and sodium fertilizers on sugar beet. *J. Agric. Sci. Camb., 65, 207-212* (1965).
135. UEXKÜLL (von) H.R. : Some notes on the timing of potash fertilization of rice (nitrogen-potash balance in rice nutrition). *9th Congress Int. Pot. Inst., 413-416* (1970).
136. VAN DER PAAUW F. : Relation between the potash requirements of crops and meteorological conditions. *Plant and Soil IX, 254-263* (1958).
137. VELLY J. : La réponse du riz au potassium à Madagascar, in *« Le potassium dans les cultures et les sols tropicaux », 10^e Colloque Inst. Int. Pot., Abidjan, 453-465* (1973).
138. WALSH T., O'DONOHUE T.F. : Magnesium deficiency in some crop plants in relation to the level of potassium nutrition. *Journ. Agric. Sci. 35, 264-263* (1945).
139. WELCH L.F., ADAMS W.E., CARMON J.L. : Yield response surfaces, isoquants and economic fertilizer optima for coastal Bermudagrass. *Agron. J., vol. 55, 63-67* (1963).
140. WELTE E., WERNER W. : Potassium-magnesium antagonism in soils and crops. *J. Sci. Food Agric. 14, 180-186* (1963).
141. WIDDOWSON F.V., PENNY A., WILLIAMS R.J.B. : Experiments with nitrogen and potash on barley. *J. Agric. Sci. 57, 29-33* (1961).
142. WIDDOWSON F.V., PENNY A. : Experiments with nitrogen and potash on potatoes. *Experim. Husbandry 8, 30-39* (1961).
143. WIDDOWSON F.V., PENNY A. : Results of an experiment at Woburn testing farmyard manure and N, P, K fertilizers on five arable crops and a long ley 1. *Yields. J. Agric. Sci. Camb., 68, 95-102* (1967).
144. WILLSON K.C. : Studies on the mineral nutrition of tea. IV Potassium. *Plant and Soil 43, n°3, 279-293* (1975) et : *Revue de la Potasse, Section 27, 75^e suite* (1976).
145. WINSOR G.W. : A long term study of the nutrition of greenhouse tomatoes. *V^e Colloque, Inst. Int. Pot., Florence, 269-281* (1968).
146. WITTELS H., SEATZ L.F. : Effect of potash fertilization on yield, stalk breakage and mineral composition of corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 17, 369-371* (1953).
147. WOODRUFF C.M., Mc INTOSH J.L., MIKULCIK J.D., SINHA H. : How potassium cause boron deficiency in soybeans. *Better Crops with Plant food 44 (4), 4-11* (1960).
148. YOUNTS S.E. : Trends in soil fertility and plant nutrition. *A.S.A. Special Publ. n°20, « Moving off the yield plateau », 69-82* (1971).

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1	C - L'interaction potassium × magnésium	22
A - Définition de l'interaction entre deux éléments	1	1. L'antagonisme potassium/magnésium ...	22
B - Les interactions en statistique expérimentale ...	2	2. L'intérêt du diagnostic plante dans les études K/Mg	23
C - Représentation des interactions au moyen des fonctions de production et des fonctions de profit	2	3. L'interaction K × Mg dans les expérimentations	23
1^{re} partie : l'interaction du potassium avec les autres éléments nutritifs	3	4. Conclusions	24
A - L'interaction azote × potassium	3	D - L'interaction potassium × sodium	25
1. Pomme de terre	4	1. Betterave sucrière	25
2. Betterave à sucre	5	2. Betterave fourragère	26
3. Maïs	6	3. Herbages et plantes fourragères	26
4. Blé	7	E - L'interaction potassium × oligoéléments	26
5. Orge	8	1. Interaction K × Mo	26
6. Herbages et cultures fourragères	9	2. Interaction K × B	26
7. Oléagineux	12	3. Interaction K × Fe	27
8. Cultures spéciales, arboriculture, viticulture	14	4. Interaction K × Zn	27
9. Cultures tropicales	14	2^e partie : interactions du potassium avec d'autres facteurs de croissance	27
10. Considérations sur l'interaction N × K ...	18	A - Interaction K × irrigation	27
B - L'interaction phosphore × potassium	20	B - Interaction K × apports et restitutions organiques	29
1. Quelques faits expérimentaux typiques ...	20	Conclusion	30
2. Quelques références d'interactions P × K ...	22	Bibliographie	30
3. Quelques remarques de conclusions	22	<i>Planches en couleur : Interaction N × K sur pomme de terre</i>	12
<i>Planches en couleur : Interaction N × K sur blé</i>	16		