

L'INTERACTION AZOTE \times PHOSPHORE DANS LES RECHERCHES SUR LA FERTILISATION DES SOLS TROPICAUX.

par

S BOUYER

Service Fertilité et Fertilisation des Sols
(I R A T)

Les deux éléments qui figurent le plus souvent dans les formules d'engrais vulgarisables en Afrique sont l'azote et le phosphore ; l'azote est un facteur de croissance très efficace pour la plupart des cultures, les céréales en particulier ; le phosphore du sol, d'autre part, constitue l'un des principaux facteurs limitants de la productivité, dans beaucoup de régions tropicales.

L'association NP est donc particulièrement favorable dans la mise au point d'une formule d'engrais, d'autant plus qu'elle donne parfois naissance à un effet d'interaction positive.

Le calcul statistique nous apprend qu'il y a interaction lorsque le rendement assuré par l'association de N et de P est significativement différent des effets propres cumulés de N et de P. Cette constatation ne permet de préjuger en rien de la nature du phénomène qui peut être aussi bien d'ordre pédologique ou physiologique qu'une conséquence du simple jeu de la loi du minimum.

QUELQUES EXEMPLES D'INTERACTIONS NP CONSTATEES EN AFRIQUE ET A MADAGASCAR.

La fréquence de ces interactions, dans les essais de fertilisation réalisés par l'IRAT, est relativement faible ; mais c'est parfois l'imprécision, inhérente à certains essais, qui fait qu'elles ne sont pas significatives et ne peuvent pas être prises en considération.

Le tableau suivant récapitule les exemples les plus typiques d'interactions NP significatives décelées dans nos expérimentations. Nous n'avons pas retenu certains exemples relatifs à l'arachide, parce que l'azote avait été apporté sous forme de sulfate d'ammoniaque et qu'il pouvait aussi bien s'agir, dans le cas de cette culture, d'un effet SP que d'un effet NP. Nous avons également omis d'autres exemples, dans le cas du riz en particulier, pour alléger le tableau.

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 13539

Points d'essai	Types de sols	Années	Cultures	Types d'essais	Effets significatifs
RICHARD-TOLL (Sénégal)	Hydromorphe alluvionnaire	1966	R i z	NP 52	N, P, <u>NP</u> .
BASSE IKOPA (Madagascar)	Alluvions de l'Ikopa	1961-62	R i z	NPK 2 ³	N, K, <u>NP</u> .
VALLEE de l'ISANDRA (Madagascar)	Alluvions tachetées	1963-64	R i z	NPK 2 ³	N, P, K, <u>NP</u>
AMBILA, zone 5 (Madagascar)	Organique à gley	1963-64	R i z	NPK 3 ³	P, <u>NP</u> , PK
MAGARIA (Niger)	Ferrugineux tropical	1964	Arachide	NPS 33	N, P, S, <u>NP</u> , PS.
FIADANANA (Madagascar)	Alluvions basaltiques	1961-62	Arachide	NPK 2 ³	K, <u>NP</u> .
AGRIMEY (Dahomey)	Faiblement ferrallitique	1963	Maïs	NPK 3 ³	N, P, <u>NP</u>
HINVI (Dahomey)	Faiblement ferrallitique	1965	Maïs	NP 52	N, <u>NP</u>
HINVI (Dahomey)	Faiblement ferrallitique	1966	Maïs	NPK 3 ³	N, P, <u>NP</u> .
HINVI (Dahomey)	Faiblement ferrallitique	1967	Maïs	NP 42	N, <u>NP</u>
MERIDJONOU (Dahomey)	Faiblement ferrallitique	1967	Maïs	NP 42	N, P, <u>NP</u>
SAVE (Dahomey)	Ferrugineux tropical	1967	Maïs	NPK 3 ³	N, P, <u>NP</u> , PK
OUARKOYE (Haute-Volta)	Ferrugineux tropical	1963	Sorgho	NPK 2 ³	N, P, <u>NP</u>
DORI (Haute-Volta)	Ferrugineux tropical	1966	Sorgho	NP 32	<u>NP</u>
PEDE (Dahomey)	Ferrugineux tropical	1962	Sorgho	NPK 33	P, <u>NP</u>
ATISSA KARDE (Cameroun)	Alluvial de piedmont	1966	Sorgho	NPK 3 ³	<u>NP</u> , NK.
RICHARD-TOLL (Sénégal)	Alluvial (Hollaldé léger)	1965	Canne à sucre	NPK 2 ³	N, <u>NP</u>
SAVE (Dahomey)	Ferrugineux tropical	1965	Tabac	NPK 3 ³	N, <u>NP</u> , NK
PLAINE des CAFRES (Réunion)	Ferrallitique beige	1964	Pâturage naturel	NPKCa 24	N, P, K, Ca, <u>NP</u> , NK, PK

Ce tableau appelle quelques commentaires préliminaires

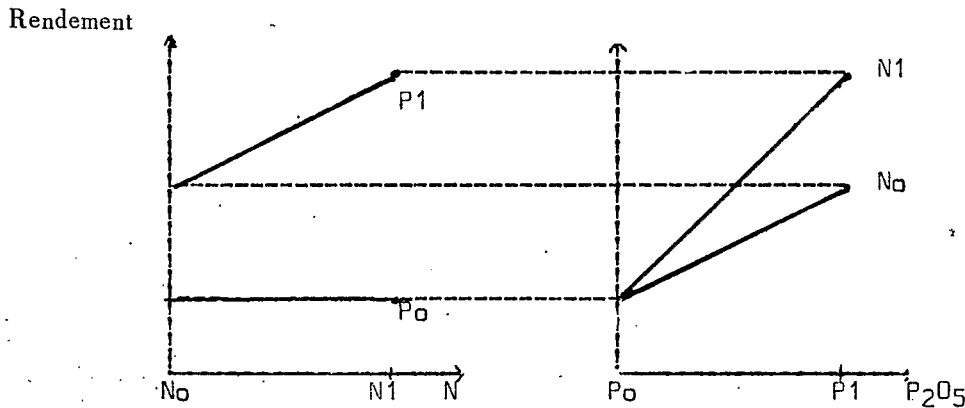
L'existence de l'interaction NP ne semble pas particulièrement liée à tel ou tel type de sol, ou à telle ou telle culture ; elle est susceptible de se manifester dans tous les cas où les deux éléments sont efficaces sur les cultures

Le plus souvent, l'interaction est accompagnée d'un effet principal de l'azote et du phosphore. Parfois cependant un seul de ces deux effets principaux est significatif et dans quelques exemples, assez rares, aucun ne l'est. Nous en verrons l'explication, à l'examen de quelques cas particuliers

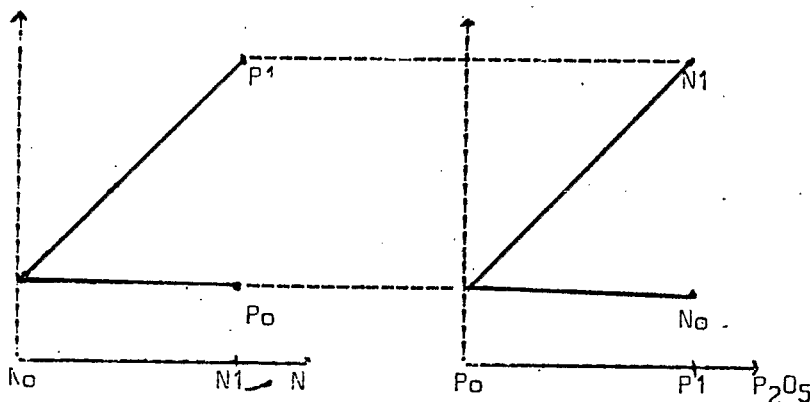
Dans certains essais d'autres facteurs de croissance, K ou S par exemple, ont un effet significatif ; nous verrons qu'il peut être utile d'en tenir compte dans l'interprétation de l'interaction

Si l'on représente par deux graphiques la réponse de la plante à des doses croissantes d'azote en présence de divers niveaux de P, et la réponse à des doses croissantes de P en présence de divers niveaux de N, les nombreux cas d'interaction étudiés peuvent se résumer, en général, à l'un des trois types suivants (Schéma 1) :

- premier type : un facteur limitant prédominant :



- deuxième type : deux facteurs «isolimitants» :



- troisième type : existence d'effets dépressifs :

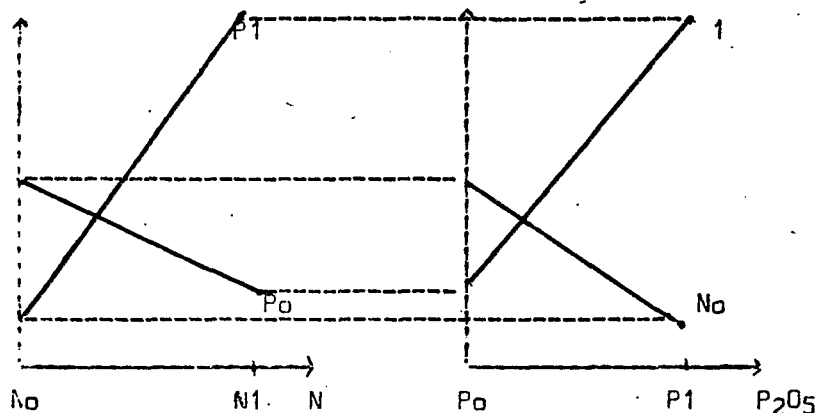


Schéma 1.

Ces graphiques sont évidemment très schématiques, les courbes de réponse y sont assimilées à des droites. Dans la réalité, ce n'est jamais aussi net ; d'autre part il existe d'autres types de graphiques, qui se rattachent plus ou moins aux cas précédents.

ESSAI D'INTERPRETATION DE QUELQUES CAS D'INTERACTION.

Cas d'un facteur limitant prédominant.

Premier exemple : interaction NP constatée dans un essai orientatif NPK 23, réalisé à QUARKOYE (Haute-Volta) en 1963.

- Sol : ferrugineux tropical sur grès.
- Culture : sorgho, variété locale.
- Doses d'engrais : N1 : 22,5 unités de N.
P1 : 22,5 unités de P₂O₅
K1 : 22,5 unités de K₂O.
- Rendements obtenus en kg de grain à l'hectare :

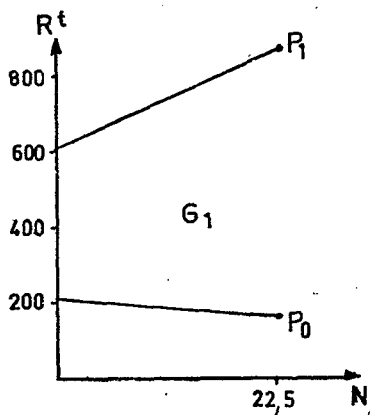
T : 190	NP : 875
N : 152	NK : 192
P : 608	PK : 621
K : 221	NPK : 889
- Effets significatifs : N, P et NP.

Il s'agissait d'un terrain très pauvre et le rendement du témoin a été très faible : 190 kg. L'engrais a été très efficace.

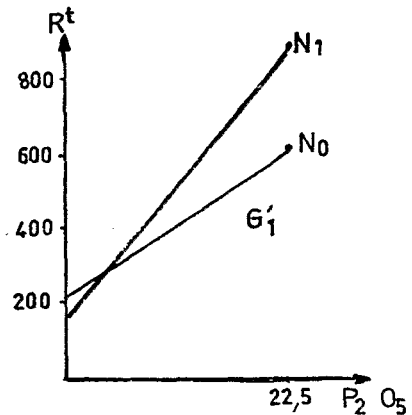
L'azote et le phosphore augmentent le rendement ; mais comme ils agissent en interaction, c'est cette interaction qu'il faut étudier, car elle permettra de voir comment l'azote agit en présence ou en l'absence de phosphore et comment le phosphore agit en présence ou en l'absence d'azote. Il faut donc présenter les résultats dans un tableau à double entrée en fonction de N et P ; ces résultats sont, pour une combinaison NP donnée, la moyenne des deux rendements obtenus avec et sans potasse ; c'est légitime puisque la potasse n'agit pas.

	No	N1
Po	205	172
P1	614	882

G1 et G'1 en donnent la représentation graphique



OUARKOYE.
Sorgho - 1963



On constate que :

- le phosphore est très nettement le premier facteur limitant : il est efficace en l'absence d'azote (N0 sur G'1), alors que l'azote est inefficace en l'absence de phosphore (P0 sur G1) ;
- l'efficacité du phosphore est plus accentuée en présence d'azote (N1 sur G'1)

On pourrait donc conclure que l'azote permet une meilleure utilisation du phosphore, qu'il stimule l'action du phosphore. Mais on peut aussi bien faire valoir que l'azote peut devenir efficace, lorsque l'on a auparavant apporté du phosphore (P1 sur G1) ; dans ce cas l'interaction statistique ne serait qu'une expression mathématique du strict jeu de la loi du minimum : le phosphore étant le premier facteur limitant, l'azote seul n'agirait pas et le rendement serait déterminé par le niveau très bas du phosphore ; mais après apport de phosphate qui augmenterait le rendement jusqu'à un certain niveau, c'est l'azote qui deviendrait à son tour facteur limitant et l'application d'engrais azoté serait alors efficace. Cette dernière interprétation du phénomène est illustrée par le schéma 2, sur lequel nous avons reporté les deux droites N0 et N1 du graphique G'1

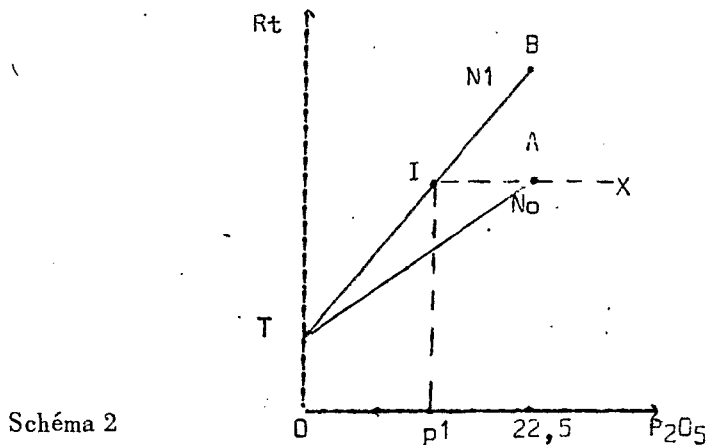


Schéma 2

La courbe de réponse à l'engrais phosphaté, entre 0 et 22,5 kg de P2O5, dans le cas de l'absence d'azote, n'est pas forcément la droite TA ; elle pourrait, par exemple, être la ligne brisée TI - IA x ; jusqu'à la dose p1, que l'on peut d'ailleurs facilement calculer (approximativement 14 kg de P2O5), le rendement augmenterait seulement du fait du phosphore (segment TI) ; à ce moment, l'azote deviendrait à son tour facteur limitant, et sans fureur azotée, le rendement resterait constant, malgré l'apport de quantités supplémentaires de phosphate (demi droite IA x) ; par contre, l'application d'engrais azoté en même temps que ces quantités supplémentaires de phosphate, se traduirait par une nouvelle augmentation du rendement (segment IB).

L'interaction NP peut donc être interprétée de deux façons dans ce cas : ce serait soit une stimulation de l'action du phosphore par l'azote, soit, plus simplement, une action successive du phosphore seul, puis de l'azote associé à de nouvelles quantités de phosphore

Deuxième exemple : interaction NP dans un essai NPK 33 réalisé à AGRIMEY (Dahomey) en 1963

- Sol : terre de Barre dégradée
- Culture : maïs, variété Niaouli 7
- Doses d'engrais :

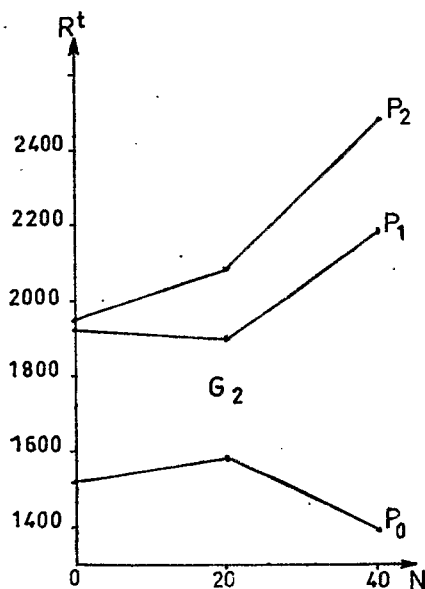
N : 0 - 20 - 40
 P₂₀₅ : 0 - 20 - 40
 K₂₀ : 0 - 20 - 40 unités à l'hectare

Effets significatifs : N, P et NP

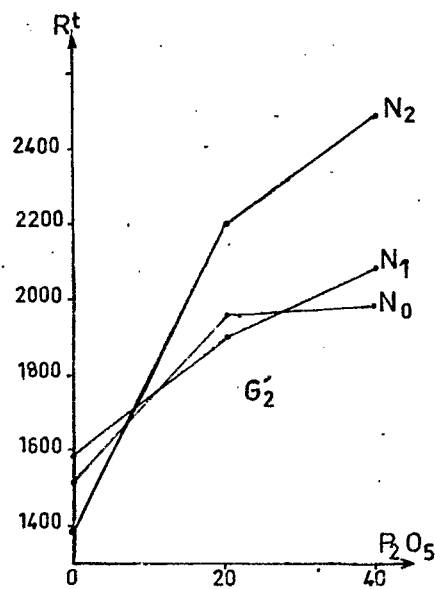
- Tableau d'interaction

	No	N1	N2
P ₀	1 516	1 582	1 396
P ₁	1 943	1 903	2 197
P ₂	1 976	2 090	2 491

Graphiques G₂ et G'₂



AGRIMEY
Maïs - 1963

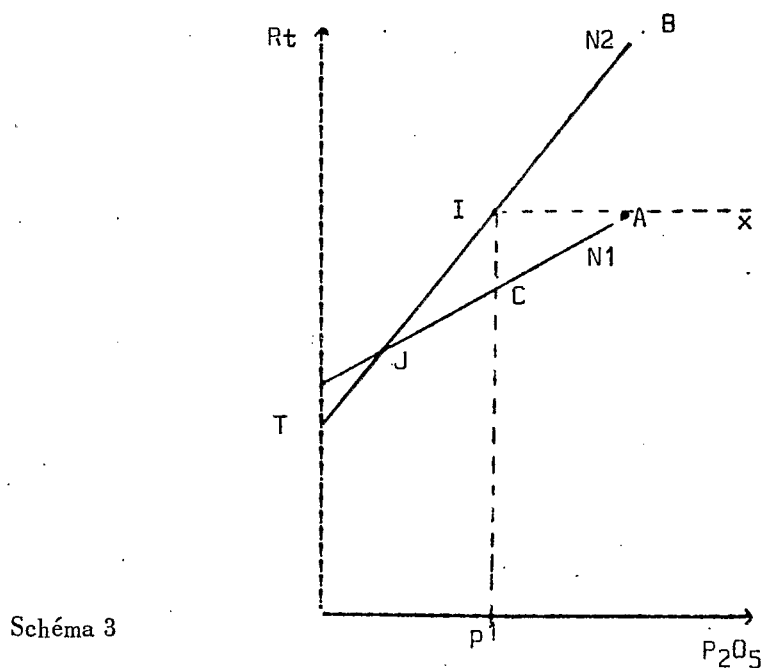


Le phosphore est très nettement le premier facteur limitant : il est efficace en l'absence d'azote (N₀ sur G₂), alors que l'azote est inefficace en l'absence de phosphore (P₀ sur G₂)

L'efficacité du phosphore est plus nette en présence d'une dose N₂ d'azote (N₂ sur G₂) ; cette interaction est positive, car la pente de la courbe N₂ est plus forte que celles des courbes N₀ et N₁

Comme dans le cas précédent, on peut dire que l'apport d'azote stimule l'action du phosphore.

Par contre, il ne semble pas possible de refaire ici le raisonnement tendant à prouver qu'il s'agit en réalité du jeu de la loi du minimum. En effet l'analyse statistique a montré que les réponses N₂ et N₁, par exemple, peuvent être ajustées à deux droites de pentes significativement différentes



Si l'accroissement de rendement constaté, lorsque la dose d'azote passe de N1 à N2, était dû à une action successive de P + N1 (segment TI), puis d'un nouvel apport d'azote associé à une quantité supplémentaire de P (segment IB), la courbe de réponse à P + N1 devrait passer par I ($TI - IA \cdot x$) ; or elle passe par C. Puisque statistiquement elle a été ajustée à la droite N1, l'azote au niveau N2 joue donc un rôle plus complexe que celui qui découle de l'application de la loi du minimum : il stimule l'action de P à partir d'un certain niveau de cet élément, alors qu'il semble inhiber son action, par déséquilibre alimentaire, pour de très faibles doses de P ; dans ce dernier cas, en effet, le rendement est inférieur à celui de la courbe N1 (segment TJ).

Cas de deux facteurs «isolimitants»

Troisième exemple . interaction NP dans un essai orientatif NPK 23 réalisé à la BASSE IKOPA (Madagascar), en 1961-1962

- Sol : alluvions de l'Ikopa
- Culture : riz, variété Rojomena
- Doses d'engrais :

N1 : 30 unités de N
 P1 : 62 unités de P₂O₅
 K1 : 45 unités de K₂O

- Rendements en kg de paddy à l'hectare :

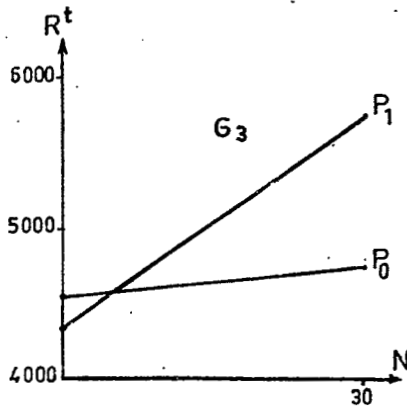
T : 3 740 NP : 5 430
 N : 4 680 NK : 4 820
 P : 4 380 PK : 4 470
 K : 5 410 NPK : 6 090

Effets significatifs : N, K, NP.

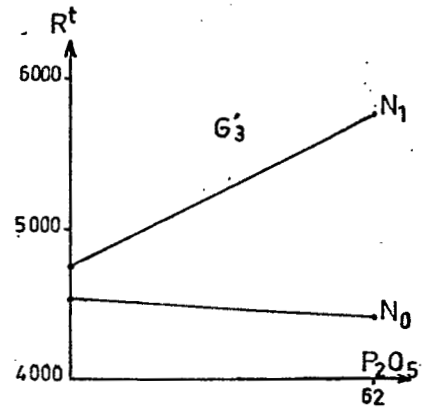
Tableau d'interaction

	No	N1
Po	4 575	4 750
P1	4 425	5 760

- G3 et G'3 en donnent la représentation graphique



BASSE IKOPA
Riz - 1961-1962



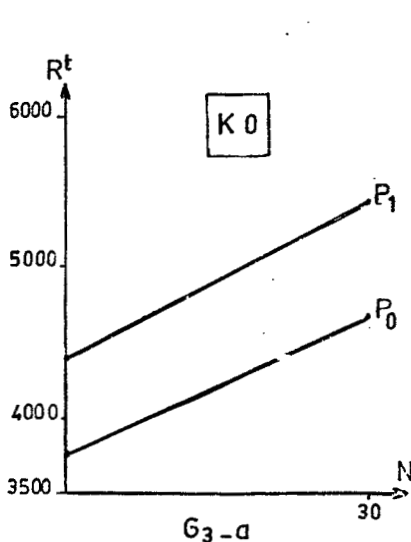
Les deux éléments sont facteurs limitants au même degré ; on pourrait dire qu'ils sont "isolimitants" ; N n agit pratiquement pas en l absence de P, et P n agit pas en l absence de N.

Mais, si on les associe, on obtient un accroissement très net du rendement.

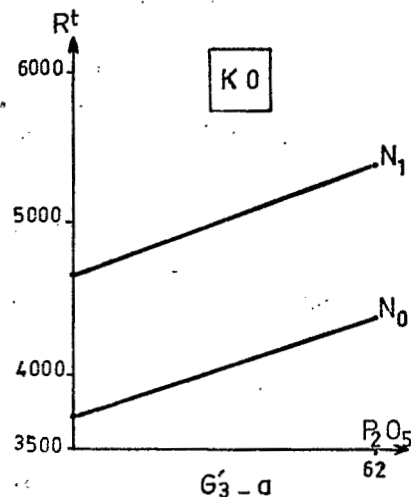
On pourrait donc considérer cet exemple comme un cas particulier de la loi du minimum, les deux facteurs intervenant au même moment dans la limitation du rendement ; c est la combinaison NP indissociable qui constituerait le premier facteur limitant.

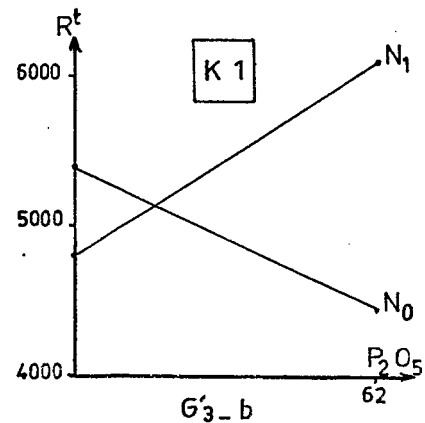
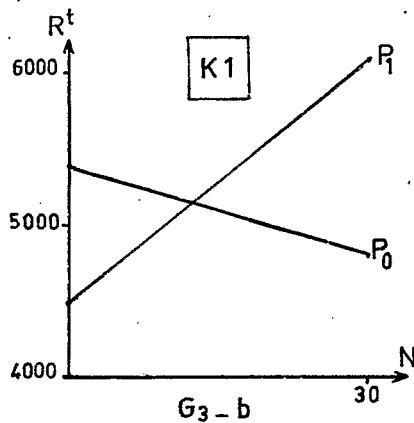
En réalité, ce cas particulier est plus complexe, car l élément potassium agit dans cet essai ; les valeurs que nous avons fait figurer dans le tableau d interaction sont, pour une combinaison NP donnée, la moyenne des deux rendements avec et sans K. Il vaut mieux étudier l interaction en l absence de K d une part, et en sa présence d autre part. On obtient alors les tableaux d interaction et les graphiques G_{3 a} et G_{3 b} et G_{3 c} et G_{3 d} suivants.

	K ₀		K ₁	
	N ₀	N ₁	N ₀	N ₁
P ₀	3 740	4 680	5 410	4 820
P ₁	4 380	5 430	4 470	6 090



BASSE IKOPA
Riz - 1961-1962





On constate que :

sans fumure potassique (K₀ : G3 a et G 3 a) les deux éléments N et P agissent déjà lorsqu'ils sont appliqués seuls ; la loi du minimum ne joue pas de façon stricte, puisque si N est limitant, P appliqué seul ne devrait pas être efficace ; de même si P est limitant, N appliqué seul ne devrait pas agir ; or ce n'est pas ce que l'on constate : on obtient en effet un surcroît de rendement avec l'un quelconque des deux facteurs limitants, même lorsque l'autre ne figure pas dans la fumure ; on voit d'autre part dans ce cas que, si on associe les deux facteurs, leurs effets sont additifs (courbes P₀ et P₁ parallèles, N₀ et N₁ parallèles) ; sans potasse, il n'y a pas d'interaction NP ;

en présence de fumure potassique (K₁ : G3 b et G'3.b), les résultats sont tout différents ; chacun des éléments a ici un effet dépressif, s'il est appliqué en l'absence de l'autre ; par contre il devient efficace s'il est associé à l'autre ; en présence de fumure potassique, il existe donc une interaction NP due à un déséquilibre créé par cette fumure potassique : les combinaisons NK sans P et PK sans N donneraient naissance à un déséquilibre alimentaire ayant un effet dépressif sur le rendement ; on ne peut pas dire que c'est, par exemple, la seule absence de P qui empêche N d'agir, puisque cette action de N se manifeste bien en l'absence de K

Cet exemple peut donc se résumer ainsi :

- en l'absence de potasse, chacun des deux facteurs «isolimitants» N et P peut agir seul ; c'est en contradiction avec la loi du minimum ; d'autre part il n'y a pas d'interaction NP ;

- l'apport de potasse crée un déséquilibre alimentaire dépressif, si on n'associe pas les deux éléments N et P dans la fumure ; il y a dans ce cas une interaction NP positive, mais elle résulte du contraste entre l'effet dépressif de N au niveau P₀ et l'effet positif de N au niveau P₁ ; il en est de même pour les effets de P.

Quatrième exemple : interaction NP dans un essai factoriel NP 52, réalisé à HINVI (Dahomey) en 1965.

- Sol : terre de Barre, faiblement ferrallitique
- Culture : maïs.
- Doses d'engrais :

N : 0 - 15 - 30 - 45 - 60

P₂O₅ : 0 - 40 - 80 - 120 - 160 unités à l'hectare

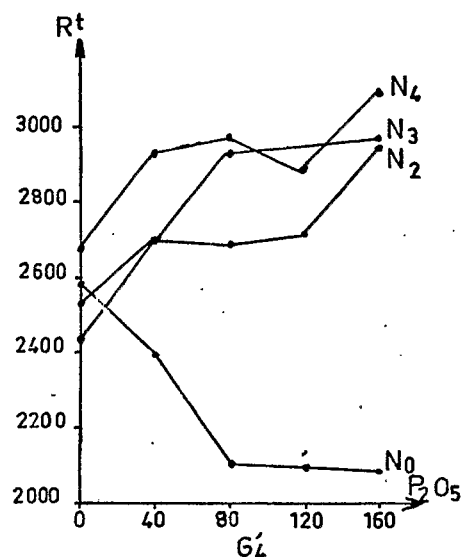
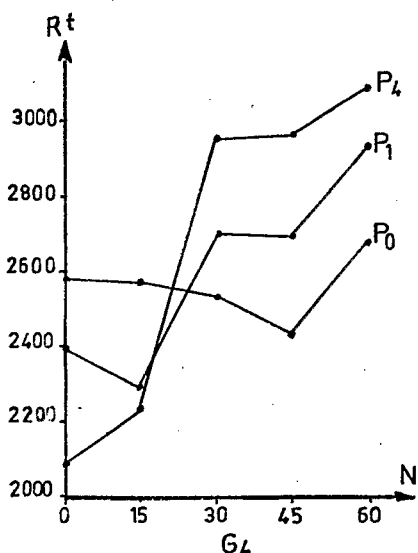
Toutes les parcelles avaient reçu en outre une application uniforme de 120 unités de K₂₀/ha.

- Effets significatifs : N et NP
- Tableau d'interaction.

	No	N1	N2	N3	N4
Po	2 580	2 570	2 535	2 435	2 675
P1	2 395	2 285	2 700	2 690	2 930
P2	2 105	2 525	2 690	2 925	2 965
P3	2 100	2 820	2 715	2 945	2 885
P4	2 085	2 240	2 950	2 965	3 085

- Graphiques G4 et G'4.

HINVI Maïs_1965



Sur ces graphiques nous n'avons reporté qu'une partie des courbes de réponse, pour simplifier.

Ils mettent en évidence :

- un effet nul de l'azote, lorsque l'on n'apporte pas d'engrais phosphaté (Po sur G4) ;
- un effet dépressif du phosphore, lorsque l'on n'apporte pas d'engrais azoté (No sur G'4) ;
- des accroissements de rendement importants, lorsque les deux éléments sont associés ; l'azote est de plus en plus efficace au fur et à mesure que le niveau de P augmente ; il y a donc interaction positive

De même que dans l'essai d'AGRIMEY (deuxième exemple), il ne peut pas s'agir seulement du simple jeu de la loi du minimum ; il s'agit de la stimulation de l'efficacité d'un élément par la présence de l'autre ; cette stimulation de l'action de N par P par exemple, ne se produit d'ailleurs qu'à partir d'un certain niveau de N, voisin de 15 unités ; pour des doses plus faibles de N, il y a déséquilibre par excès de P et effet dépressif (ex début de la courbe P4 sur G4).

On observe, de façon très nette, un phénomène fréquent dans les cas d'interaction et qui est important au point de vue pratique : du fait que le rendement augmente lorsque, pour une même dose de P, le niveau de N est plus élevé, il résulte que l'on atteint un même rendement pour une dose de P plus faible, lorsque N augmente (ex sur G'4, les rendements de N2P4, N3P2, et N4P1 sont équivalents) Tout se passe comme si les deux éléments étaient interchangeables ; du fait de l'interaction, on obtient le même rendement avec beaucoup

d'azote et peu de phosphore qu'avec beaucoup de phosphore et peu d'azote

Cas d'interactions négatives

Cinquième exemple : interaction NP dans un essai orientatif NPK 23 réalisé à FIADANANA (Madagascar) en 1961-1962.

- Sol : alluvions basaltiques.

- Culture : arachide

- Doses d'engrais :

N1 : 15

P1 : 40

K1 : 30 unités à l'hectare

- Rendements en kg de gousses à l'hectare :

T : 820 NP : 845

N : 1 135 NK : 695

P : 940 PK : 885

K : 1 535 NPK : 1 375

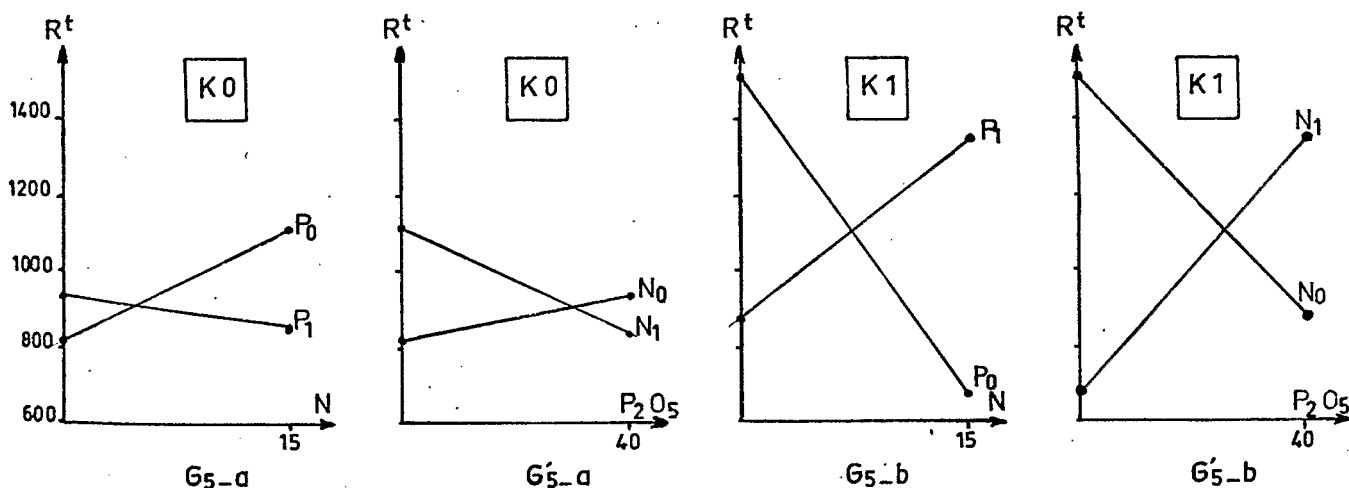
- Effets significatifs : K et NP

- Tableau d'interaction.

	K ₀		K ₁	
	N ₀	N ₁	N ₀	N ₁
P ₀	820	1 135	1 535	695
P ₁	940	845	885	1 375

- Graphiques G5.a et G5.a, G5.b et G5.b.

FIADANANA
Arachide - 1961-1962



Lorsqu'on n'apporte pas d'engrais potassique, l'interaction NP est négative ; chacun des éléments N et P, appliqué seul, est efficace ; mais l'adjonction du second élément a un effet dépressif ; on peut penser que c'est l'apport des deux anions, dans un sol déficient en K, qui crée un déséquilibre alimentaire dépressif

Par contre, si l'on apporte une fumure potassique, le déséquilibre alimentaire se produit pour KN sans P et pour KP sans N. Lorsque les trois éléments NPK se trouvent associés, l'équilibre est alors satisfaisant

et le rendement s'accroît. L'interaction NP redevient alors positive, puisque le rendement est plus élevé dans le cas de N1P1 que dans le cas de N1P0.

Il faut d'ailleurs noter que, dans cet essai il suffit d'ajouter de l'engrais potassique, puisque le rendement de NoPoK1 est au moins égal à tous les autres, dans la gamme des doses utilisées ; cela demanderait évidemment confirmation. Si l'on ajoute N et P, ils agissent en interaction, mais à un niveau inférieur au niveau de productivité assuré par la seule fumure potassique ; c'est un exemple où cette interaction ne présente pas d'intérêt pratique.

Cette expérimentation met bien en évidence l'importance de l'équilibre NPK dans le cas des fumures étudiées à faible dose pour des raisons d'ordre économique : si l'on n'étudie pas soigneusement cet équilibre par des essais orientatifs factoriels, on risque de constater une inefficacité complète, ou même un effet dépressif, des engrais appliqués.

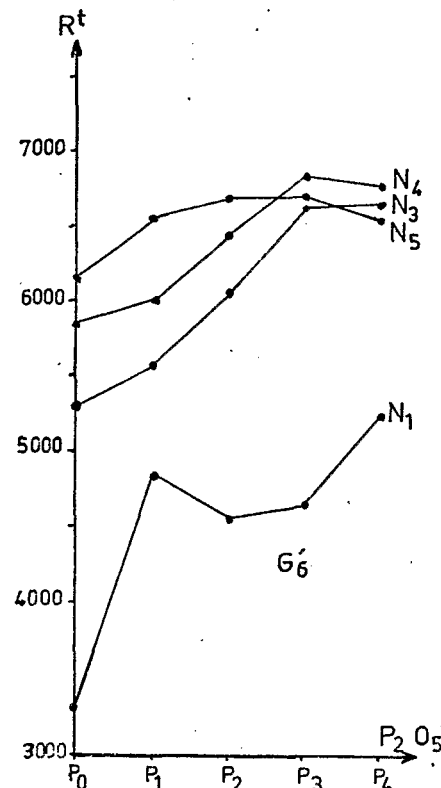
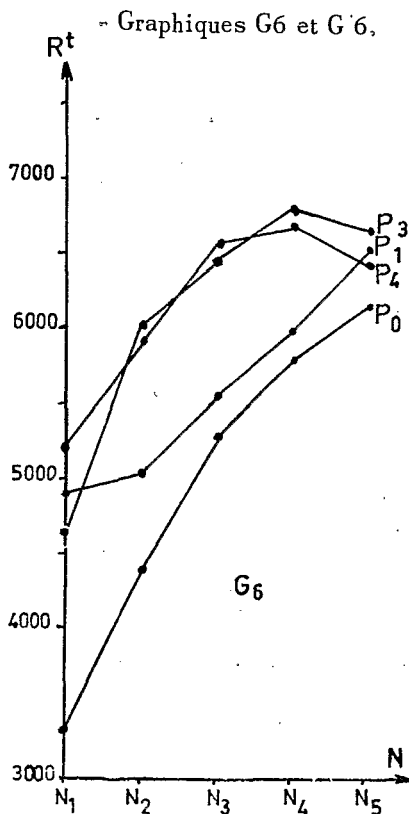
Sixième exemple : interaction NP dans un essai NP52 réalisé à RICHARD-TOLL (Sénégal) en 1966

- Sol : alluvionnaire hydromorphe (Hollaldé).
- Culture : riz.
- Doses d'engrais : on cherchait à déterminer à partir de quelle dose de P205, cet élément peut devenir efficace ; en raison du fort pouvoir fixateur de ce terrain, on a été conduit à expérimenter des doses très élevées, atteignant jusqu'à 4 tonnes de P205, appliquées en trois années.
- Effets significatifs : N, P et NP.
- Tableau d'interaction.

	N1	N2	N3	N4	N5
P0	3 335	4 420	5 300	5 825	6 170
P1	4 890	5 005	5 565	6 000	6 565
P2	4 585	5 485	6 075	6 495	6 720
P3	4 685	5 985	6 655	6 835	6 690
P4	5 210	5 940	6 670	6 745	6 550

RICHARD - TOLL

Riz — 1966



Pour simplifier, nous n'avons pas fait figurer toutes les courbes de réponse sur ces graphiques.

On constate que la fumure azotée est très efficace, même sans phosphate, puisqu'elle fait passer le rendement de 33 à plus de 60 quintaux.

Les courbes de réponse à l'azote pour les niveaux P₀, P₁ et P₂ sont sensiblement parallèles et ce n'est qu'aux niveaux P₃ et P₄ que l'interaction commence à se manifester ; elle est d'ailleurs négative, c'est-à-dire que le rendement obtenu avec les combinaisons NP à fortes doses devient alors inférieur à la somme des rendements propres de N et P pris séparément.

Le phénomène ne saurait être imputé à un effet dépressif de trop fortes doses d'azote, car alors il devrait apparaître aussi pour ces mêmes doses (N₄ et N₅) en présence de niveaux faibles de P ; or ce n'est pas le cas. Il n'est pas dû non plus à un déséquilibre NP, car il se produit aussi bien pour N₄P₄ que pour N₅P₃. Il semble plutôt imputable à une trop forte concentration globale des deux éléments, qui atteint 200 unités d'azote et 4.000 unités de P₂O₅, ce qui est évidemment très élevé.

Cet exemple montre que ce n'est pas seulement dans le domaine des faibles doses d'engrais que peut se manifester l'interaction NP ; elle peut apparaître aussi aux très hauts niveaux de fumure ; mais elle est alors négative, alors que dans le premier cas elle est souvent positive.

INTERET PRATIQUE DE L'INTERACTION NP.

Nous avons vu que l'existence d'une interaction NP, telle qu'elle est mise en évidence par le calcul statistique, peut dans certains cas s'interpréter comme une simple conséquence de la loi du minimum ; cela se produit dans les essais à deux niveaux d'intervention des facteurs de croissance, car on n'a alors aucune information sur la forme de la courbe de réponse entre ces deux niveaux ; on exploite cette possibilité de tracer une courbe quelconque en la faisant telle, qu'elle corresponde au jeu de la loi du minimum.

Dans les essais à plus de deux niveaux, par contre, ce n'est pas toujours possible et l'on est alors obligé d'admettre l'existence d'un phénomène propre d'interaction, qui serait une stimulation de l'efficacité de l'un des facteurs par la présence de l'autre. Les nombreux auteurs qui ont étudié ce phénomène (1) en rapportent plusieurs explications possibles, d'ordre pédologique ou physiologique :

- modification du pH du sol par les engrais azotés, ce qui aurait une influence sur la solubilisation des phosphates ;
- augmentation du développement racinaire par les engrais azotés, ce qui provoquerait une absorption plus intense des phosphates ;
- stimulation de l'action microbienne par le phosphore, ce qui provoquerait une minéralisation plus importante de l'azote à partir de la matière organique ;
- nombreux autres phénomènes encore mal connus

Il est évident que la recherche de la cause exacte du phénomène d'interaction exige de nombreuses déterminations analytiques sur le sol et la plante. Nous ne disposons pas de tels résultats dans les exemples exposés ici ; mais il serait important de prévoir cette étude dans les cas les plus importants.

Ce manque d'information sur la nature intime du phénomène, n'enlève rien à l'intérêt pratique qu'il présente. Nous en donnons ci-dessous quelques exemples.

3.1 / Cas où la loi du minimum peut expliquer l'existence de l'interaction

Dans le premier exemple (OUARKOYE), le fait d'avoir utilisé un plan factoriel à deux niveaux de N et de P, nous a permis de déterminer le seuil d'efficacité de l'azote ; jusqu'à 14 kg de P₂O₅ environ, seul cet élément est efficace et la fumure azotée est inutile. Ce fait est important pour la mise au point de formules économiques ; il a son application, actuellement dans la fertilisation de l'arachide en Haute-Volta et au Niger, où l'on apporte seulement du superphosphate simple à raison de 15 unités de P₂O₅. Cette application pratique sup-

(1) Voir en particulier .

GRUNES, D L. Advances in Agronomy Vol XI 369 396 1959

COPE F et HUNTER, J G. Phosphore et agriculture n° 46 1-34 février 1967

pose évidemment qu'il n'y a pas stimulation de P par N, mais seulement intervention de la loi du minimum ; il est bon dans ce cas de vérifier cette hypothèse de travail, par d'autres essais à trois niveaux au moins, par exemple NP 32.

3.2/ Cas d'une véritable interaction NP positive

Nous avons insisté dans l'exemple N°4 (HINVI), sur le fait que, par le jeu de l'interaction positive, on obtient le même rendement avec des formules contenant de plus en plus d'azote et de moins en moins de phosphore, comme si les deux éléments étaient interchangeable ; c'est évidemment important au point de vue économique, puisque le prix de l'unité de P₂O₅ est moins élevé que celui de l'unité d'azote ; en réalité dans le cas de HINVI, N et P étaient « interchangeables » à raison de 1 unité d'azote pour 3 unités au moins de P₂O₅, et en définitive ce sont les formules à dominance azotée qui étaient les plus économiques. La recherche d'une fumure économique, lorsqu'il y a interaction, revient donc en définitive à la recherche d'un équilibre optimum, et on utilise généralement dans ce cas un dispositif factoriel 32 ou 42.

3.3/ Cas d'une interaction NP négative

Nous en avons donné un exemple (FIADANANA), dans lequel, en raison de la carence du sol en potasse, il vaut mieux appliquer l'un des deux éléments seulement que les deux à la fois ; si on corrige la carence potassique, on peut alors associer N et P dans la fumure.

Ce n'est qu'un exemple des nombreux cas de déséquilibres alimentaires, dépressifs sur les rendements, que l'on peut constater lorsque l'on veut mettre au point des fumures économiques ; si l'on n'étudie pas de façon systématique, par des combinaisons factorielles, ces équilibres NPK, on risque de conclure à l'inefficacité d'un engrais ou même à sa nocivité, alors qu'il s'agit simplement d'un mauvais choix de l'équilibre mis à l'essai.

3.4/ Cas d'une interaction NP négative pour un niveau très élevé de fumure

C'est un cas assez rare ; nous l'avons constaté cependant dans une expérimentation sur l'amélioration foncière en riziculture. Il semble que, pratiquement, on ne risque de le rencontrer que pour des apports très élevés de phosphate.

CONCLUSION

Les essais d'engrais orientatifs, relatifs à la recherche des facteurs limitants de la croissance végétale, mettent parfois en évidence des phénomènes d'interaction, entre azote et phosphore par exemple. Il est possible que cette interaction NP ne soit, dans certains cas, que la conséquence de l'intervention de la loi du minimum. Mais, dans beaucoup d'autres cas, elle correspond à un autre phénomène qui serait, d'après les auteurs qui l'ont étudiée, une stimulation de l'efficacité de l'un des deux éléments par la présence de l'autre. Enfin dans les sols pauvres, l'interaction peut résulter de l'existence d'effets dépressifs, lorsque les fumures sont mal équilibrées.

Quelle que soit la cause de l'existence de cette interaction, elle présente toujours un intérêt pratique pour la mise au point des formules de fumure.

Aussi est-il nécessaire que l'expérimentateur adopte, dès le début de ses recherches en matière de fertilisation, des plans expérimentaux qui lui permettent de déceler ces interactions, pour le cas où elles existeraient ; à cet effet, les plans factoriels constituent un outil de recherche particulièrement efficace.