

## Recherche de formules d'engrais N-P-K économiquement rentables pour la culture du maïs pluvial dans le centre sud Sénégal

M. Ndiaye<sup>1</sup> et M. Sidibe<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Centre National de Recherches Agronomiques (CNRA) de Bambey, BP 53  
S é n é g a l .

<sup>2</sup> Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Bureau d'Analyses Macro-économiques (BAME) de Dakar BP 2057  
Sénégal

### Résumé

Le maïs, plante très exigeante en éléments fertilisants, était cultivé autour des cases où les sols sont généralement plus riches. Mais depuis une vingtaine d'années sa culture se fait en plein champ sur des sols plus pauvres. L'utilisation des engrais minéraux en milieu paysan est limitée à cause de leurs coûts très élevés. L'objectif de cette étude est de rechercher des doses optimales de fumure N P K économiquement rentable pour la culture du maïs pluvial. Ce travail a été réalisé en 1990 en milieu paysan au niveau du village de Paoskoto dans le centre sud Sénégal sur un sol ferrugineux tropical lessivé. Le dispositif expérimental est un arrangement composé rotatif central basé sur la réponse de surface représentée par un polynôme du second degré d'équation:  $y = b_0 + b_1N + b_2P + b_3K + b_4N^2 + b_5P^2 + b_6K^2 + b_7NP + b_8NK + b_9PK$ . Les doses d'engrais des trois éléments ont été pour N de 0, 50, 150, 250 et 300 kg ha<sup>-1</sup>, pour P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 0, 30, 70, 110 et 140 kg ha<sup>-1</sup> et pour K<sub>2</sub>O de 0, 40, 110, 180 et 220 kg ha<sup>-1</sup>. La variété de maïs utilisée est Synthetic C de cycle de 90 jours. Les résultats ont montré que P et N sont les facteurs les plus limitant du rendement en grain du maïs. Les doses optimales de N et de P sont, respectivement, de 150 kg N ha<sup>-1</sup> et de 70 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg ha<sup>-1</sup>. Par dérivation partielle de l'équation du second degré obtenue, on obtient la formule 147 N - 79 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 65 K<sub>2</sub>O kg ha<sup>-1</sup> procurant le maximum de rendement. L'établissement des budgets partiels et l'analyse de dominance ont permis de déterminer les traitements qui présentent un intérêt pour le producteur. L'analyse marginale effectuée a permis de quantifier l'importance relative des traitements économiquement rentables. On pourrait recommander au paysan de Paoskoto l'emploi de la formule SON-110 - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 180 K<sub>2</sub>O qui a généré un taux marginal de rémunération (TMR) de 334 % d'autant plus que ce traitement correspond au rendement le plus intéressant (1525 kg ha<sup>-1</sup>). Sur la base d'un taux cible de 100 %, les traitements 50-110-40, 50-110-180, et 150-70-110 avec des TMR respectifs de 902 %, 344 % et 115

%, mériteraient d'être testés dans des essais implantés sur différents types de sols et zones écologiques.

### Abstract

The maize plant being very demanding in terms of its nutrient requirements has been cultivated around compound houses where soils are generally richer. However, during the last 20 years it has been cultivated in open fields on poorer soils. The use of mineral fertilizers by farmers has been limited because of the very high cost. The objective of this study was to search for the optimum rates of fertilizer (N P K) which is economically profitable for the cultivation of rainfed maize. This work was done on-farm in 1990 in the village of Paoskoto of the south central part of Sénégal which is located on tropical ferruginous exhausted soils. The experimental layout was based on the surface response represented by a polynome of the second degree equation:  $y = b_0 + b_1N + b_2P + b_3K + b_4N^2 + b_5P^2 + b_6K^2 + b_7NP + b_8NK + b_9PK$ . The fertilizer rates of the three elements were N: 0, 50, 150, 250, 300 Kg/ha, P2O5: 0, 30, 70, 110, 140 Kg/ha and K2O: 0, 40, 110, and 220 Kg/ha. The variety used was CP 75 of 75 days cycle. The results showed that P and N are the limiting factors of maize grain yield. The optimal dose of N and P are 150 Kg N/ha and 70 P2O5 Kg/ha respectively. Using the second degree equation, the formula obtained 147 N - 79 P2O5 - 65 K2O Kg/ha gave the maximum yield. The development of partial budgets and the analysis of dominance permitted the determination of the treatments that are of interest to the producer. The marginal analysis allowed the determination of the relative importance of the treatments which are economically profitable. The treatment 50 N - 110 P2O5 - 180 K2O could be recommended to Farmers in Paoskoto since it gave a marginal rate of return (MRR) of 334%, and corresponded to the highest grain yield (1525Kg/ha). Based on a target rate of 100%, the treatments 50-110-40, 50-110-180 and 150-70-110 which gave a MRR of 902%, 344% and 115% respectively, need to be verified and the results promoted for adoption for different types of soils and ecological zones.

### Introduction

Le maïs était cultivé autour des cases, mais depuis une dizaine d'années sa culture se fait en plein champ grâce aux résultats déjà très prometteurs obtenus par la recherche agronomique (surtout en matière de génétique et d'amélioration du maïs pluvial et aussi grâce à l'encadrement fourni par les sociétés de développement et les organisations non gouvernementales dans les régions de Ziguinchor, Kolda, Tambacounda, Kaolack et Fatick. Cependant, l'aspect agronomique de la culture du maïs pluvial n'a pas été exploré au même degré que l'a été l'aspect génétique et amélioration. Cette situation se traduit par l'introduction du matériel végétal en milieu paysan avec des techniques culturales ne permettant pas souvent l'expression du potentiel optimum du rendement ou tout simplement non appropriées. L'utilisation des engrais minéraux en milieu paysan est

limitée à cause de leurs coûts très élevés. L'objectif de l'expérimentation est de rechercher les doses optimales en éléments fertilisants N, P et K, pour les productions du maïs pluvial et d'évaluer leur rentabilité économique.

#### Matériel et méthode

L'essai a été implanté à Paoskoto (Département de Nioro) en 1990 sur un sol de type ferrugineux tropical avec taches et concrétions ferrugineuses, sur sable ou grès sablo-argileux, et cuirasse pouvant affleurer (Piéri, 1989). L'essai a été mené en milieu paysan sous la gestion de l'exploitant. L'ISRA n'est intervenu que dans le cadre de la mise en place des intrants et du suivi des opérations culturales. Le dispositif expérimental est un arrangement composé rotatif central (« Rotatable Central Composite Design ») basé sur l'hypothèse selon laquelle la surface de réponse peut être représentée par un polynôme du second degré en dessous (Cochran and Cox, 1957).  $Y = b_0 + b_1N + b_2P + b_3K + b_4N^2 + b_5P^2 + b_6K^2 + b_7NP + b_8NK + b_9PK$ , où N, P, et K représentent les doses respectives d'azote, de phosphore et de potassium et où  $b_0, \dots, b_9$  sont les coefficients du polynôme du second degré. Les essais factoriels sont souvent utilisés en matière de recherche sur la fertilisation des cultures. Cependant le dispositif factoriel aboutit à un nombre excessif de traitements lorsque le nombre de facteurs ou de niveaux augmente. Cochran et Cox (1957) ont reporté un dispositif central et rotatif qui donnait un nombre total de traitement de  $2^k + 2k + 1$  (où  $k =$  nombre de facteurs). Le centre de ce dispositif est répété six fois pour avoir la même erreur standard des points équidistants du point central (une meilleure précision pour l'extension du paramètre étudié par la courbe de surface de réponse). Les différents traitements sont identifiés par un code compris entre -1,682 et +1,682. Le traitement (0,0,0) est le centre du dispositif (Tableau 1).

L'azote est apporté sous forme d'urée (46% N) fractionné à raison de 20 % au semis, 40 % au 27<sup>e</sup> et 40 % au 41<sup>e</sup> jour après semis. Le phosphore sous forme de superphosphate triple (45 %  $P_2O_5$ ) et le potassium sous forme de chlorure de potassium (60 %  $K_2O$ ) sont apportés en une seule fois au semis. Chaque parcelle expérimentale est composée de 8 lignes de 10m de long et de 6,30m de large. Les écartements sont de 0,90m entre lignes et 0,25 entre poquets sur la ligne. Le matériel végétal utilisé est la variété synthétique C d'un cycle de 90 jours (du semis à la récolte). Le labour avec reprise a été réalisé en début de cycle sur une profondeur de 20-25cm. Il a été suivi d'un hersage. Le semis a été effectué à raison de 3 graines / poquet et le démarrage à un pied par poquet a été fait 1.5 jours après la levée.

Des analyses chimiques du sol ont été effectuées sur des échantillons prélevés aux horizons 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 et 80-100cm, avant l'implantation de l'essai. A la récolte, le rendement en grain a été déterminé à partir d'une parcelle utile 19,71 m<sup>2</sup> et l'analyse proposée ici est basée sur ces résultats. L'analyse économique proposée suit une démarche à trois temps. D'abord un budget partiel a été établi pour l'ensemble des traitements sur la base d'estimations de prix pour la récolte, les intrants agricoles et le travail familial.

Tableau 1. Matrice des Traitements de l'essai

N° Traitement	Doses d'engrais			Echelle codifiée		
	N	P <sub>205</sub>	K <sub>20</sub>	N	P	K
1	50	30	40	-1	-1	-1
2	250	30	40	1	-1	-1
3	50	150	40	-1	1	-1
4	250	110	40	1	1	-1
5	50	30	180	-1	-1	1
6	250	30	180	1	-1	1
7	50	110	180	-1	1	1
8	250	110	180	1	1	1
9	0	70	110	-1.682	0	0
10	300	70	110	0	0	0
11	150	0	110	0	-1.682	0
12	150	140	110	0	1.682	0
13	150	70	0	0	0	1.682
14	150	70	220	0	0	1.682
15	150	70	110	0	0	0
16	150	70	110	0	0	0
17	150	70	110	0	0	0
18	150	70	110	0	0	0
19	150	70	110	0	0	0
20	150	70	110	0	0	0

En suite l'analyse a été poursuivie par une évaluation de la rentabilité relative de chaque traitement dans le but de déterminer ceux qui présentent un intérêt économique particulier pour les producteurs. Enfin, pour chaque traitement économiquement intéressant, un taux marginal de rémunération a été calculé pour mesurer le gain additionnel espéré si ce niveau de fertilisation était adopté.

Le prix moyen au producteur observé dans les marchés de la zone (100 F CFA/kg) est utilisé pour évaluer la récolte. Compte tenu de la faible part de l'autoconsommation familiale, toute la récolte est évaluée au prix moyen reçu par le producteur. Pour les intrants agricoles, les prix pratiqués par les commerçants de la zone (incluant le transport) sont utilisés (tableau 6). Les temps d'épandage des engrais ont été ramenés en équivalent homme-jour sur la base du nombre d'heures nécessaires pour faire le travail. Une journée de travail d'environ 8 heures a été retenue. Le coût associé à la récolte a été considéré comme un élément de coût d'opportunité contrairement à la pratique consistant à la déduire de la valeur de la production.

Les données obtenues sur le rendement-grain sont analysées en utilisant un modèle de régression multiple (Cochran and Cox, 1957).

#### Resultats et discussions

##### Aperçu sur la pluviométrie

Un total de 429mm de pluie a été enregistré à Paoscoto. Cette pluviométrie (Figure 1) a été marquée par une première pluie de 17mm tombée le 20

Juin suivie d'une dernière décade du mois très sèche. L'hivernage a réellement démarré le 4 Juillet avec 18,5mm d'eau. Cependant le mois de Juillet a été bien arrosé (72,1mm en 9 jours). L'essai a été semé le 26 Juillet dans des conditions d'humidité ayant permis une bonne levée. Le mois d'août a été relativement pluvieux (231,3mm en 13 jours) : ce qui a permis une bonne croissance des plantes jusqu'au stade 6-8 feuilles. Le stade 8-10 feuilles jusqu'à l'apparition de l'épi femelle a été marqué par une sécheresse très sévère. Durant le mois de Septembre (surtout la dernière décade), on a enregistré un total de 52,2mm en 6 jours. Globalement la pluviométrie n'a pas été favorable pour l'obtention de bons rendements (Figure 1).

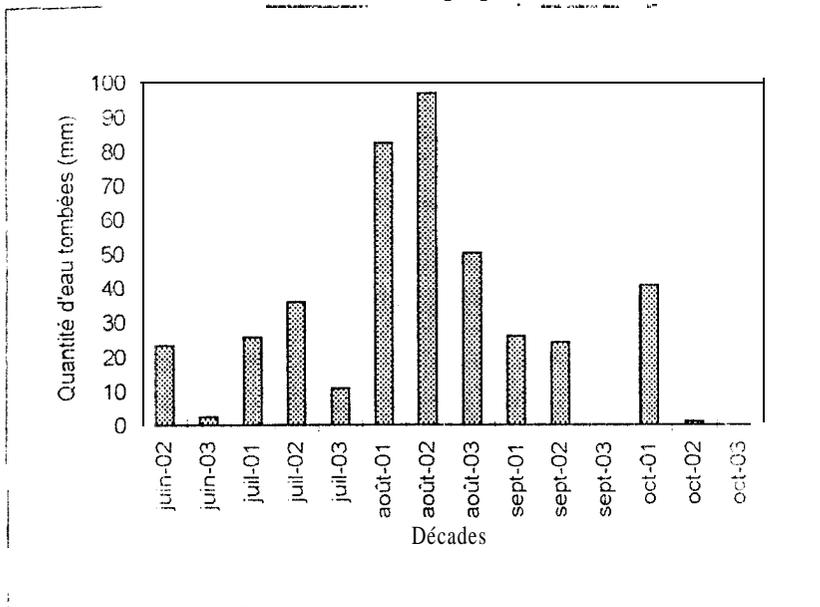


Fig. 1 Pluviométrie décadaire sur le site

#### Aperçu sur les maladies et les insectes

En utilisant les guides pratiques sur les maladies et insectes nuisibles du maïs (Carlos De Leon, 1986; Alejandro Ortega, 1987) un inventaire a été entrepris. Au semis, des iules (millipodes) ont été rencontrées dont les dégâts peuvent se traduire par l'arrêt de la germination des graines. Elles ont été traitées au Furadan. Les dégâts causés par des perdrix de moindre importance ont été aussi observés. En cours de végétation certains insectes ont été identifiés; il s'agit d'*Héliothis zea* (très répandu au moment de la floraison), des pucerons du genre *Rhopalosiphium maidis* et des termites.

Certaines maladies fongiques ont été identifiées, parmi lesquelles on peut citer des tâches foliaires dues à *Curvularia lunata* et des brûlures de feuilles dues à *Helminthosporium maydis* et *Helminthosporium turcicum*. En outre, quelques très rares cas de plantes atteintes de maïze streak virus (MSV), transmise par les Cicadelles (*Cicadulina sp*) ont été enregistrés.

## Analyse du sol

Les caractéristiques chimiques du sol d'expérimentation sont indiquées dans le Tableau 2. Le pH (eau) est faiblement acide. Cette acidité semble être particulièrement marquée aux horizons 0-20cm et 0-40cm, zone de propagation des racines. Le sol est relativement mieux pourvu en matière organique (MO), de l'ordre de 0,67 %, dans les vingt (20) premiers centimètres, mais le stock de MO du sol baisse rapidement en profondeur jusqu'à des niveaux d'équilibre très médiocres (0,39 %). Cette diminution du taux de MO vient de ce que les seules restitutions organiques aux sols dans les systèmes traditionnels sont celles des systèmes racinaires dont les quantités sont faibles. L'azote est un élément déterminant pour la croissance et le rendement des céréales, le maïs en particulier. La dynamique de l'azote dans le sol est étroitement liée au statut organique du sol. La carence chimique la plus fréquente des sols au Sénégal est celle du phosphore. Il y a rarement plus de 350 mg de  $P_2O_5$  total par kg de terre (Nicou, 1975). Dans le sol de Paoskoto le phosphore total varie entre 213 et 270mg de  $P_2O_5$  total par kg de terre, respectivement aux horizons 20-40cm et 80-100cm. Ce qui confirme les résultats obtenus par Nicou (1975). Des teneurs en potassium échangeable entre 0,03 et 0,20meq/100g de sol, quoique basses peuvent être suffisantes au début de la mise en culture, pour les besoins des plantes (Nicou, 1975). Dans le sol de Paoskoto, les teneurs en potassium échangeable varient entre 0,026 et 0,13meq/100g, donc comprises dans l'intervalle ci-dessus. La capacité d'échange cationique du sol varie entre 1,44 et 1,29meq/100g de sol. En effet, du fait de leur texture à dominante sableuse, les horizons superficiels du sol sont caractérisés par une surface colloïdale d'absorption limitée à cause de la prédominance kaolinite et sesquioxides (Pieri, 1989). Les taux de calcium et de magnésium échangeables sont relativement faibles dans les horizons superficielles (jusqu'à 40cm de profondeur) et concourent (surtout Ca) à une diminution du pH dans ces horizons. Compte tenu de la grande variabilité des sols et du climat dans les zones de la maïsiculture, il est difficile et hasardeux de faire des généralisations. On gagnerait donc à étendre ces types d'analyses physico-chimiques du sol et à implanter des essais de fertilisation minérale du maïs pluvial dans les régions et sites à vocation maïsicole.

## Rendement - grain

## Recherche de l'élément le plus limitant du rendement

Les résultats de rendement reportés dans les Tableaux 3 permettent de comparer l'importance des éléments fertilisants.

Le potassium a été le facteur le moins limitant du rendement étant donné que les rendements sous les traitements 150 - 70 - 110 et 150 - 70 - 0 sont de 1298 kg ha<sup>-1</sup> et 944 kg ha<sup>-1</sup>, soit une différence de 354 kg ha<sup>-1</sup> en valeur absolue.

L'azote a été un facteur limitant du rendement puisque l'on a une différence de 584 kg ha<sup>-1</sup> entre les traitements 150-70-110 et 0-70-110. Le phosphore a été le facteur limitant le plus important dans les conditions

de culture du maïs à Paoskoto. Le traitement sans P (150-O-110) a été même inférieur (au plus équivalent) au témoin sans engrais (04-O). On a noté une différence de 820 kg ha<sup>-1</sup> entre 150 - 70 - 110 et 150 - 0 - 710.

Les analyses de sol reportées dans le Tableau 2, aident à comprendre ces résultats. La teneur en P (0,0047 à 0,013 g/kg) est faible par rapport à la teneur moyenne du Sénégal (0,01 à 0,05 mg kg<sup>-1</sup>) (Tourte, 1952). Cette faiblesse pourrait expliquer la très forte prépondérance de l'action à dominance phosphatée. Par contre, le terrain d'expérimentation est assez pourvu en K<sub>2</sub>O. La teneur en matière (organique (MO) est de l'ordre de 6 g kg<sup>-1</sup> de sol; cette MO a été minéralisée par les agents microbiens du sol, libérant ainsi dans le sol des quantités de nitrate pouvant atteindre 30 kg N ha<sup>-1</sup> tout le long de la saison, valeur inférieure à celles variant de 60 à 100 kg N ha<sup>-1</sup> indiquées par Blondel (1971). Ce qui pourrait expliquer la moindre prépondérance de l'action à dominance azotée, comparée à celle du phosphore.

### Interprétation graphique

L'interprétation graphique proposée consiste à tracer la courbe moyenne des rendements d'un élément quand les deux autres sont maintenus constants. Il convient de signaler le fait que nous disposons pour le tracé des courbes que de trois points correspondant aux doses expérimentées. L'examen des courbes qui suivent nous permet d'estimer les doses de N, P et K qui procurent un rendement en grain optimum.

La réponse à N se révèle par une légère augmentation du rendement avec l'accroissement de doses de N jusqu'à un maximum qui se situerait aux environs de 150 kg de N ha<sup>-1</sup>.

L'apport de 150 kg de N ha<sup>-1</sup> procure un gain de rendement de 582 kg ha<sup>-1</sup> par rapport au témoin sans N. En effet le maïs exige des quantités considérables d'éléments fertilisants, d'azote en particulier. Les exportations en N par le maïs SC chiffrent à 30-35 kg de N ha<sup>-1</sup> pour une récolte de 1000 kg grain/ha (FAO, 1968) et 100 à 150 kg N ha<sup>-1</sup> pour une récolte de 5000 à 6000 kg grain ha<sup>-1</sup> (Prasad, 1978). Or les sols ne peuvent en général assurer qu'une quantité limitée de N, Carsky and [wuafor (1999) par conséquent un apport substantiel de cet élément s'avère indispensable pour une production au moins soutenue. Un apport de 50 ou 150 kg N ha<sup>-1</sup> nous semble justifié, sans toutefois perdre de vue que des méthodes d'application de l'azote (application localisée par exemple) doivent faire l'objet d'étude pour une meilleure efficacité des engrais azotés.

La réponse du rendement au phosphore est très nette. Le maximum de production est obtenu avec un apport de 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> environ. On enregistre un gain de rendement de 820 kg ha<sup>-1</sup> par rapport au témoin sans P. Ce résultat corrobore celui reporté par Pieri (1986) qui stipule qu'en Afrique comme à Madagascar, la carence la plus fréquente est celle phosphatée. Cette carence nécessite, pour être corrigée, des doses modestes de phosphore : 40 à 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en Afrique de l'Ouest.

Tableau 2. Caractéristiques du sol d'expérimentation (moyenne de 3 échantillons)

Horizons (cm)	pH		C Total	M0*	N Total	C/N	P total	P.assi	Ktotal	Bases échangeables, meq/100g					
	eau	KCl								0/00	0/00	ppm**	meq/100g	Ca	Mg
0-10	6.1	5.5	3.94	6.77	0.33	12	0.365	13.27	2.057	0.98	0.35	0.32	0.056	1.42	1.44
10-20	5.6	5.0	3.47	5.96	0.30	11	0.382	10.17	2.415	2.415	0.33	0.31	0.034	1.22	1.14
20-40	5.5	5.0	2.67	4.59	0.25	<b>11</b>	0.2%	9.9	<b>3.001</b>	<b>3.001</b>	0.37	0.37	0.137	1.48	<b>1.29</b>
<b>40-60</b>	5.9	5.5	2.22	3.81	0.22	10	0.362	7.1	2.919	2.919	0.47	0.47	0.039	1.58	1.52
60-80	6.1	5.2	2.31	3.97	0.24	<b>10</b>	0.370	5.5	2.937	2.937	0.74	0.74	0.026	1.87	1.72
80-100	5.5	5.1	2.29	7.93	0.24	9	0.382	1.7	3.228	3.228	0.86	0.86	0.107	2.29	1.92

\*MO = 1.72 x C

\*\* P. assi = assimilable = P. TRUOG ppm

**Tableau 3.** Effets des engrais NPK sur le rendement en grain (kg ha<sup>1</sup>) et % d'augmentation par rapport au témoin sans engrais

N° Traitement	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Rend.-grain kg ha <sup>-1</sup>	% d'augmentation/ Témoin
1	50	30	40	787	+ 35
2	250	30	40	1189	+102
3	50	110	40	1025	+74
4	250	110	40	1008	+ 71
5	50	30	180	911	+ 55
6	250	30	180	1067	+ 81
7	50	110	180	1525	+ 159
8	250	110	180	1003	+ 70
9	0	70	110	714	+ 21
10	300	70	110	1170	+ 99
11	150	0	110	478	-19
12	150	140	110	869	+47
13	150	70	0	944	+60
14	150	70	220	1325	+125
15	150	70	110	1298	+120
T(témoin)	0	0	0	589	0

en gras sont indiquées les données utilisées pour la détermination des éléments les plus limitant

La réponse du rendement aux doses est **moins nette** croissantes de K<sub>2</sub>O. Le rendement maximum est obtenu avec un apport de 110 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> correspondant à un gain de rendement de 352 kg ha<sup>-1</sup> par rapport au témoin sans K. Un apport de 110 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> nous semble parfaitement justifié puisque la différence de rendement **entre** 110 et 220 kg ha<sup>-1</sup> est très faible (27 kg grain/ ha).

#### Analyse économique

##### Budget partiel

Les bénéfices nets **générés** par les **différents** équilibres NPK sont indiqués dans le Tableau 4. On note que le producteur obtient le bénéfice net le plus élevé (97291 Fcfa) avec le traitement 50-110-180 tandis que le traitement 110-0-110 lui procure le bénéfice net le plus bas (12145 Fcfa). Dès lors, il convient de mesurer la **performance** d'un traitement à travers l'ampleur de son bénéfice net, compte tenu de son coût total de réalisation.

##### Analyse de dominance

Le **tableau 8** résume les paramètres calculés selon le traitement appliqué par ordre croissant des coûts totaux. Un traitement est considéré comme dominé s'il est possible de trouver un autre traitement qui coûterait moins cher tout en ayant un bénéfice net plus élevé. Dans ce cas, le gain de rendement obtenu ne parvient pas à compenser les coûts additionnels engagés. Autrement, le traitement est dit supérieur (Tableau 5). La courbe des bénéfices nets est illustrée dans la figure 2. Les points situés sur cette courbe montrent les traitements supérieurs tandis que ceux qui sont

dominés sont situés bien en dessous de la courbe. Les traitements 1, 13, 3, 2, 15 et 7 constituent ceux qui présentent actuellement un intérêt économique pour le producteur. La pente des droites reliant les points sur la courbe des bénéfices nets déterminent l'importance relative des traitements économiquement rentables. L'analyse marginale qui suit nous permettra de quantifier cette importance.

#### Analyse marginale

Le taux marginal de rémunération (TMR), selon l'optique qui nous concerne ici, exprime le comportement des bénéfices nets reliés à un traitement par rapport aux coûts engendrés par l'investissement en intrants et en main d'œuvre. Les résultats obtenus figurent dans le tableau 6. Par exemple, le passage du témoin (NPK = O-O-O) au traitement 1 (NPK = 50-30-40) produit, du delà de l'investissement initial, un revenu supplémentaire équivalent à 7% de cet investissement. Si l'agriculteur décide de passer au traitement 13 étant donné qu'il se situait déjà au traitement 1, il aurait en plus des 7% mentionnés, un revenu additionnel de 3%.

La pratique courante veut que le TMR calculé soit comparé à un taux cible acceptable dans la zone d'étude pour déterminer les traitements rentables selon l'optique des producteurs. Ce taux cible devrait tenir en compte la nature de la technologie proposée ainsi que du coût du capital. Si nous adoptons le taux moyen de 50% alors les traitements, 3, 2, 1.5 et 7 mériteraient une attention particulière pour la suite de l'essai. Toutefois, comme l'objectif de l'essai était de localiser les traitements susceptibles d'être poursuivis les années suivantes, il serait souhaitable de poursuivre tous les traitements supérieurs en diversifiant les lieux d'implantation.

#### Analyse statistique

L'équation du second degré qui définit les rapports input/output s'établit comme suit (interaction du 3<sup>e</sup> ordre étant négligée) :

$$y = 4.68 + 0.08N + 0.58P + 0.11K - 0.31N^2 - 0.48P^2 + 0.02K^2 + 0.49NP - 0.33NK + 0.23PK$$

Cette équation relie les facteurs de production (N,P,K) au rendement de la culture. Le coefficient de détermination multiple  $R^2=0.69$  trouvé par l'analyse, indique que 69% de la variation des valeurs de rendement observées sont expliquées par l'équation du modèle. D'autres facteurs de l'environnement (climat et fertilité intrinsèque du sol) peuvent être crédités de 31% de cette variation des valeurs de rendement. Les dérivés partielles (par rapport à chaque élément) sont des équations qui égalées à zéro et résolues simultanément permettent de déterminer les doses de N,  $P_2O_5$  et  $K_2O$  procurant des rendements maximum (Ndiaye,1988). Dans le cas de cette étude ces doses sont de 147 kg N/ha, 79kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> et de 65 kg  $K_2O$  ha<sup>-1</sup>. Ces résultats sont en adéquation avec ceux trouvés à partir de l'interprétation graphique et de l'analyse marginale. Toutefois, ce qui est intéressant pour le paysan, ce n'est pas le rendement maximum mais plutôt celui qui procure le maximum de profit.

Tableau 4. Budget partiel des traitements:

Traitements	0	1	2	3	4	5	6	7
Rdt ajust (Kg ha <sup>-1</sup> )	589	787	11890	1025	1008	911	1067	1525
VP (fcfa/ ha)	58900	78700	118900	102500	100800	91100	106700	152500
C V Engrais								
Quantité N	0	50	250	50	250	50	250	50
Quantité P	0	30	30	110	110	30	30	110
Quantité K	0	40	40	40	40	180	180	180
Azote (N)	130	130	130	130	130	130	130	130
Phosphore (P)	200	200	200	200	200	200	200	200
Potassium (K)	143	143	143	143	143	143	143	143
Total CV engrais	0	18220	44220	34220	60220	8240	64240	54240
C.O (H-J)								
N-urée	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
P	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
K	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
C.O Récol te	0,56	0.74	1.12	0.97	0.95	0.86	1.04	1.44
T.J(fcfa)	500	500	500	500	500	500	500	500
Total C.O	277,8	621.18	810.78	733.43	725.41	679.66	753.24	969.25
Total CV	277,8	18841	45031	34953	60945	38920	64993	55209
Bénéfice Net (Fcfa /ha)	58622	58959	73869	67547	39855	25180	41707	97291

Table 4 *conta*

Traitements	8	9	10	11	12	13	14	15
Rdt ajust.(Kg ha-1)	1003	714	1170	478	869	941	1325	1298
VP (Fca/ha)	100300	71400	117000	47800	86900	94400	132500	129800
<b>C V Engrais</b>								
Quantité N	250	0	300	150	150	150	150	150
Quantité P	110	70	70	0	140	70	70	70
Quantité K	180	110	110	110	110	0	220	110
Azote (N)	130	130	130	130	130	130	130	130
Phosphore (P)	200	200	200	200	200	200	200	200
Potassium (K)	143	143	143	143	143	143	143	143
Total CV engrais	80240	29730	68730	35230	3230	33500	64960	49230
<b>C V Engrais</b>								
Quantité N	0.3	0	0.3	0.3	0.3	0.3		
Quantité P	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.3	0.3
Quantité K	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1
Quantité K	0.95	0.67	1.10	0.45	0.82	0.89	0.1	0.1
Azote (N)	500	500	500	500	500	500	1.25	1.22
Phosphore (P)	723.05	436.75	801.82	425.41	659.83	645.23	500	500
Potassium (K)	80963	30167	69532	35655	63890	34145	874.92	862.19
Total CV cngt-ais	19337	41233	-17368	12145	23010	60255	65833	50092
							66665	79708

Rdt.ajust. = rendement ajusté, VP = valeur de la production, C.V = coûts variables (Fca/ha),

C.O = coûts d'opportunité (Fca), T.J = taux journalier (Fca), H-J = homme/jour

Prix de l'urée (16 % N) = 130 F cfa par kg unité N.

Prix du chlorure de potassium (60 % K<sub>2</sub>O) = 113 F cfa par kg unité K<sub>2</sub>O

Prix du super phosphate triplee (45% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) = 200 F cfa par kg unité P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Prix du kg maïs-grain = 100 F cfa

Tableau 5. Traitements supérieurs et dominés

Doses NPK	Numéro	Coût Total	Bénéfice Net	Statut des traitements
000-000-000	0	278	58622	témoin
050-030-040	1	18841	59859	supérieur
000-070-110	9	30167	41233	dominé
150-070-000	13	34145	60255	supérieur
050110-040	3	34953	67547	supérieur
150-000-110	11	35655	12145	dominé
050-030-180	5	38920	52180	dominé
	2	45031	73869	supérieur
250-030-010	15	50092	79708	supérieur
050-110-180	7	55209	97291	supérieur
250-110-040	4	60945	39855	dominé
150-140-110	12	63890	23010	dominé
250-030-180	6	64993	41707	dominé
150-070-220	14	65835	66665	dominé
300-070-110	10	69532	47468	dominé
250-110-180	8	80963	19337	dominé

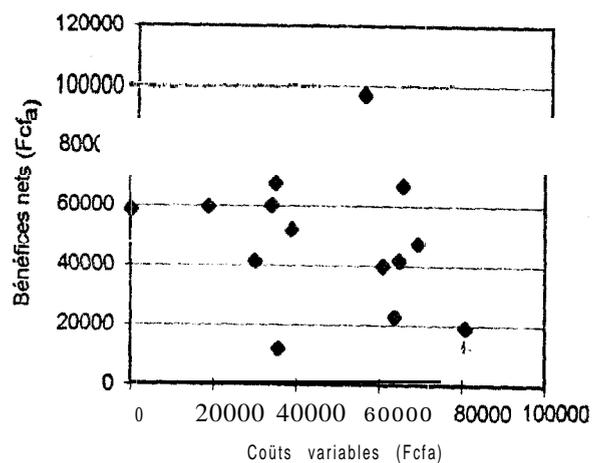


Fig. 2. Courbe de bénéfice net (FCFA)

Tableau 6. Evaluation des taux marginaux de rémunération

Traitements	Coût Total	Coût Marginal	Bénéfice Net	Bénéfice Marginal	TMR
000-000-000	278		58622		
050-030-040	18841	18563	59859	1237	7
000-070-110	30167	30000	60255	396	3
050-110-040	34953	80804	67547	7292	902
250-030-040	45031	10077	73869	6323	63
050-110-180	55209	3997	97291	5839	115
				17583	344

\*TMR = Taux Marginal de Rémunération

On doit signaler cependant! qu'il ne s'agit pas simplement de rechercher à augmenter les rendements de façon à obtenir des profits immédiats pour une dépense d'investissement minimum mais plus profondément d'approcher du potentiel des rendements élevés pendant une période indéfinie.

#### Conclusion

Les études de fumures entreprises antérieurement ont mis en évidence la nécessité d'étudier des formules d'engrais adaptées aux principaux types de sol et le danger d'utiliser une formule passe-partout, comme cela se pratique à nos jours.

L'essai que nous avons initié n'a pu être implanté que dans une seule localité en 1990 à raison de diverses contraintes rencontrées. Ils ont permis toutefois de montrer que le phosphore est le plus important facteur qui limite le rendement dans le sol du paysan de Paoskoto. Sans apport de  $P_2O_5$ , les rendements peuvent être de  $400 \text{ kg ha}^{-1}$ . On peut multiplier ce chiffre par 2 à 3 en apportant  $70 \text{ kg P}_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  sous forme de superphosphate triple. L'azote est ensuite l'élément qui limite le rendement si le phosphore n'est pas un facteur limitant. L'azote ( $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) fournit une augmentation substantielle du rendement. Le potassium serait le facteur le moins limitant du rendement dans ce sol, toutefois il serait souhaitable d'envisager un apport de cet élément. Pour le cas particulier de ce sol de Paoskoto on pourrait recommander au paysan l'emploi de 50-110-180 d'engrais N-P-K à partir de notre analyse économique. Dans ce cas particulier, ce traitement correspond aussi au rendement le plus intéressant sur le plan agronomique. La reconduction de l'essai sur plusieurs années permettra d'affiner l'information agro-économique et d'orienter l'analyse vers la formulation de recommandations.

#### References

- Alejandro Ortega C. 1987. *Insect Pests of Maize. A Guide for Field Identification*. Maize Program. Mexico, D.F.; CIMMYT. 106 p.
- Blondel, D. 1971 *Contribution à la connaissance de la Dynamique de l'Azote Minéral en sol Ferrugineux Tropical à Nioro du Rip (Sénégal)*. CRA de Bambey, Sénégal. 7 p.
- Carsky, R. J. and E. N. O. Iwuafor, 1999. Contribution of soil fertility research and maintenance to improved maize production and productivity in sub-Saharan Africa, Pp 3-20. In Badu-Apraku B., M. A. B. Fakorede, M. Ouedraogo and F. M. Quin (eds.) *Strategy for Sustainable Maize Production in West and Central Africa*. Proceedings of a Regional Maize Workshop, IITA-Cotonou, Benin Republic, X-25 April, 1997. WECAMAN/IITA.
- Cochran, W.G. and G.M. Cox., 1957. *Experimental Designs*. Second Edition John Wiley and Sons, Inc., New York.

- De Leon, C. 1986. Maladies du Maïs. Guide d'Identification au champ. *Programme Maïs*. Mexico, D.F.; CIMMYT. 100 p.
- Eric W.C. et Kamanga, M. 1987. L'Analyse Economique des Essais Agronomiques pour la formulation des Recommandations aux paysans. ISRA / Michigan State University. 70 p.
- FAO, 1968. Freedom from Hunger Campaign Fertilizer Program : Physical and Economical Summary of Trial and Demonstration Results, 1961/1962 - 1965/1966. FAO, Rome. 56 p.
- Ndiaye, J.P. 1988. **Recherche d'une formule de Fumure Minérale Optimum : Aspects Méthodologiques**. Doc. ISRA, 54 p.
- Nicou, R. 1975. Caractéristiques principales des sols sableux et sablo-argileux du Sénégal. Problèmes de leur mise en valeur. Communication présentée à la 3<sup>e</sup> réunion du sous-comité Ouest Africain de corrélation de sols pour l'évolution et l'aménagement des ressources en sol. Dakar, 20 Février - 2 Mars, 1975. Doc., ISRA, 23 p.
- Piéri, C. 1963. **Etudes Pédologiques de la Région de Nioro du Rip**. Note Technique du CNRA, Bambey-Sénégal. 131 p.
- Piéri, C. 1989. Fertilité des terres de Savanes. Bilan de Trente (30 ans) de Recherche et Développement Agricole au Sud du Sahara. Ministère de la Coopération et du Développement. ISRA-CIRAD-France. 444 p.
- Piéri, C. 1986. Fertilisation des cultures vivrières et Fertilité des sols en Agriculture Paysanne Subsaharienne. *L'Agronomie Tropical* 41(1) : 1-20.
- Prasad, D. 1978. Management Practices For Improving Maize Yields. In S.C. Holmes (ed.) **Technology for increasing food production**. FAO, Rome 3 34 5.58, Italy
- Sere, Y. 1984. Phytopathologie du Maïs. **Rapport de synthèse 1983**, IVRAZ, Station Farako Ba - Burkina Faso
- Tourte, R. 1952. Les Engrais N.P.K. Poursuite de l'étude de leurs effets sur arachide et mil au Sénégal. Annales du CRA de Bambey au Sénégal. **Bulletin Agronomique** 8 Septembre 1953, 24 p.

## Effets de la température et de la photopériode sur les performances du maïs en culture irriguée au Sahel

Ndiaye A.<sup>1</sup>, Charcosset A.<sup>2</sup>, Grillais A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ISRA/Fleuve BP : 240 Saint-Louis Sénégal, <sup>2</sup> INRA Station de Génétique Végétale Ferme du Moulon 91190 Gif-sur-Yvette, France.

### Résumé

Douze semis mensuels de huit populations et hybrides ont été réalisés à la station de recherche agronomique de Ndiol dans le delta du fleuve Sénégal. L'objectif est d'étudier et de modéliser les interactions génotype x date de semis (G x D) faisant intervenir une grande variabilité entre les génotypes et les environnements climatiques. L'étude de l'espérance des carrés moyens montre que les caractères dont l'effet environnemental est très important sont très sensibles aux variations du milieu. Il s'agit de la floraison femelle, de la hauteur du plant, du rendement et de ses composantes. Pour une caractérisation des génotypes et des dates de semis, les techniques de modélisation de l'interaction telles la régression conjointe, la régression factorielle et le modèle multiplicatif ont été utilisées. Avec la régression conjointe l'interaction (G x D) modélisée, bien que significative pour certains caractères, explique mal l'interaction totale. Compte tenu des connaissances actuelles relatives au déterminisme du développement du maïs, la température moyenne saisonnière et la photopériode ont été introduites au modèle de régression factorielle comme covariables environnementales. Si les covariables "température et photopériode" expliquent de façon significative les variations de l'effet principal "date de semis" pour tous les caractères, l'interaction G x D est souvent mal expliquée par leurs régressions résiduelles respectives notamment pour le rendement et ses composantes. Enfin, pour le choix d'une meilleure modélisation de l'interaction "génotype x date de semis" les qualités d'ajustement des moyennes génotypiques et environnementales par la régression conjointe d'une part et d'autre part par la régression factorielle combinée avec le modèle multiplicatif à deux termes ont été comparées. Le modèle hybride, combinant les formules du modèle de régression factorielle et du modèle multiplicatif, a une meilleure qualité d'ajustement, autant pour les moyennes des génotypes que pour les moyennes des dates de semis.

### Abstract

Twelve monthly seedling of eight stands and hybrids were carried out at the Ndiol agronomic research station in the Senegal River delta. The aim is to study and modelize the genotype interactions x sowing date which results in a wide variability between the genotypes and the climatic environment. The study on the expectation of an average concession shows that the characters on which the environment has a major impact are very sensitive to environmental changes. These characters include female flowering, plant height, output and its components. The combined modelized G x D interaction regression, although significant for certain characters, hardly explains the total interaction. In light of the current knowledge regarding the deterministic nature of maize development, the average seasonal temperature

and photoperiod were introduced into the factorial regression model as environmental co-variables. If the "temperature and photoperiod" co-variables considerably explain the variations of the main effect ("sowing date") on all the characters, the G x D interaction is often not well understood given their respective residual regression especially with regard to output and its components. Finally, concerning the choice of an improved modelization of "genotype x sowing date" interaction, the average genotype and environmental adjustment qualities by combined regression, on the one hand, and factorial regression combined with a two-term multiplicative model, on the other hand, were compared. Hence the hybrid model combining the factorial regression and multiplication models, has a higher adjustment quality not only for average genotype but also for average planting dates.

### Introduction

L'utilisation agricole de la vallée du fleuve Sénégal en particulier et des vallées sahéliennes en général, est un problème très délicat qui se complique du fait des variations annuelles des inondations et des inconvénients climatiques particulièrement les fortes variations thermiques, les vents desséchants (forte évaporation) etc.

Une baisse de rendement de 40 à 60% y est souvent observée entre la saison froide allant de novembre à janvier et la saison des pluies de juin à octobre. Les facteurs climatiques - température et photopériode essentiellement - sont suspectés d'être à l'origine de cette réduction.

En effet, les rendements du maïs sont plus faibles en zone tropicale qu'en zone tempérée même sous culture intensive. Chang (1968) met en évidence une forte corrélation positive entre le rendement en grain et la latitude dans 98 pays, les rendements diminuant de façon géométrique au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'équateur. Jong et al. (1982) montrent que les plaines chaudes du Mexique sont caractérisées par ces rendements faibles, des vitesses de développement élevées, de courtes périodes de remplissage du grain, un indice de récolte réduit et un nombre de grains/rang faible comparativement aux hautes et moyennes altitudes. En altitude, la durée du cycle semis-maturité du maïs est allongée, la surface foliaire plus importante et les rendements en grain et en matière sèche plus élevés. Autrement dit, les rendements du maïs en zone tropicale ont tendance à augmenter avec l'altitude et à diminuer sous les hautes températures en plaine.

La température affecte directement les rendements biologiques et économiques en influençant le taux de croissance (d'accumulation de matière sèche), la répartition de la matière sèche, la vitesse de développement et enfin la durée du cycle de la culture. L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence de la température et de la photopériode sur ce phénomène d'une part et d'autre part d'étudier les interactions génotype x date de semis faisant intervenir une grande variabilité entre les génotypes et les milieux. Cette étude permettra de comprendre les effets de ces facteurs sur le développement du maïs et d'établir un modèle de diagnostic pour la comparaison des différentes situations autant pour le choix des dates de semis et des génotypes adaptés au milieu que pour la sélection et le calage du cycle.

### Matériels et méthodes

Douze dates de semis de populations et hybrides de cycles et d'origines différents ont été réalisés à la station de recherche agricole de Ndiol dans le delta du fleuve Sénégal. La station est située à 3 m d'altitude et 15°9' Nord de latitude.

Huit génotypes d'origines géographiques différentes ont été utilisés pour cette étude. Il s'agit de : Cimmyt Pool 1, tropical altitude précoce ; Cimmyt Pool 12, tropical altitude tardif ; IRAT 143 tropical de plaine précoce ; X 304 C tropical de plaine tardif ; LG 11 tempéré de plaine précoce, Hélios (B73 x Mo 17), tempéré de plaine tardif ; Early Thai tropical intermédiaire et témoin station vulgarisé, et enfin IR 30, hybride double tropical tardif originaire du Brésil.

Les semis ont eu lieu le 15<sup>ème</sup> jour de chaque mois. L'essai a été mené durant la période d'août 1993 à juillet 1994. Le dispositif était composé de blocs complets randomisés avec deux répétitions. La parcelle élémentaire comprend 5 lignes de 3,5 m de long, les écartements sont de 80 cm entre les lignes et 25 cm entre les poquets : deux graines ont été semées par poquet et ensuite démarquées à un plant/poquet, soit une densité optimale de 50 000 plants/ha. Dix plants sont observés sur la ligne centrale de chaque parcelle. Tous les essais ont été semés sur la même bande et ont reçu respectivement 24u N, 54u P, 8 lu K. avant le semis et 138u N fractionnées à la montaison et à la floraison. Outre la durée semis-floraison (FF50) et le rendement (RDT), d'autres caractères quantitatifs liés au rendement ont été mesurés. Il s'agit de la hauteur du plant et de l'épi (HMP, HEPI), du nombre de grains par rang (NGR), du nombre de rangs par épi (NRE), du poids de mille grains (PMGR), de la longueur et la largeur de l'épi (LOEP, LAEP) etc.

Une analyse de variance préliminaire selon le modèle interactif complet a été d'abord effectuée. Ainsi, pour une parcelle  $ijk$  du génotype  $i$  à la date de semis  $j$ , on peut écrire:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \theta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

où  $Y_{ijk}$  est la valeur du génotype  $i$  dans le bloc  $j$  de la date de semis ;  
 $\mu$  est la moyenne générale  
 $\alpha_i$  est l'effet du génotype  $i$ , effet aléatoire, de variance  
 $\beta_j$  est l'effet de la date de semis (milieu)  
 $\gamma_k$  est l'effet bloc  $k$  dans la date de semis  $j$  ;  
 $\theta_{ij}$  est l'interaction génotype x date de semis ;  
 $\varepsilon_{ijk}$  est la résiduelle au niveau de la parcelle  $ijk$  de variance  $\sigma^2_e$  ;

L'étude de l'espérance des carrés moyens permet d'estimer la variation expliquée par les effets des génotypes [ $S\alpha_i^2 / (g-1)$ ] et des dates de semis [ $S\beta_j^2 / (d-1)$ ] d'une part, par les effets d'interaction [ $S\theta_{ij}^2 / (g-1)(d-1)$ ] d'autre part ( $g$  est le nombre de génotypes,  $d$  le nombre de dates de semis et  $n$  le nombre de répétitions :

Pour l'étude de l'interaction génotype x date de semis, plusieurs méthodes de modélisation de l'interaction ont été utilisées : la régression conjointe (Yates et Cochran 193X; Finlay et Wilkinson 1963), les écovalences génotypiques et environnementales, le modèle multiplicatif et enfin la régression factorielle dont l'espérance de la matrice de données  $X$  de dimensions  $(I, J)$  s'écrit (Denis 1988) :

$$E(X_{ij}) = \sum_h \sum_k Y_{i(k)} \cdot v_{(k,h)} \cdot Z_{(h)j} + \sum_h \rho_{i(h)} \cdot Z_{(h)j} + \sum_k Y_{i(k)} \cdot \tau_{(k)j}$$

Les indices  $h$  et  $k$  varient respectivement de 1 à  $H$  et de 1 à  $K$ .

Les matrices de paramètres inconnues du modèle sont représentées par des lettres grecques tandis que les matrices de valeurs des covariables associées à chacun des facteurs sont connues *a priori* et représentées par des lettres latines.  $K$  et  $H$  sont respectivement les nombres de covariables associées au facteur génotype ( $K \leq I$ ) et au facteur environnement ( $H \leq J$ )

Ce modèle englobe les modèles linéaires précédemment décrits, du modèle additif au modèle de régression conjointe. En effet, si une seule covariable constante est associée à chaque facteur ( $H = K = 1$ ) le modèle de régression factorielle revient au modèle additif (Denis 1991) :

$$E(X_{ij}) = \mu + \alpha_i + \beta_j$$

### Résultats

Les résultats du tableau 1 d'analyse de variance montrent des effets "génotypes" et des effets "date de semis" très hautement significatifs. L'interaction "génotype x date de semis" est aussi hautement significative pour tous les caractères notamment de précocité, de morphologie et du rendement et de ses composantes. Elle n'est cependant pas significative pour la largeur de la feuille.

Les caractères qui ont l'effet environnemental est important sont très sensibles aux variations du milieu. Il s'agit de la durée semis-floraison femelle, de la hauteur du plant, de la longueur de la feuille, du poids de mille grains, de la largeur de l'épiméle comme le montre le Tableau 2. Cet effet environnemental souvent très important peut être doublé d'une forte interaction G x D comme pour les caractères de floraison et de caractéristiques de la panicule mais il se trouve que quand l'erreur résiduelle  $\sigma^2$  est importante par rapport à l'interaction, les effets d'interaction deviennent alors difficilement interprétables.

Compte tenu de l'ampleur des effets observés, nous nous intéresserons aux effets "date de semis", aux effets "génotypes" et ensuite aux interactions génotype x date de semis.

Les dates de semis affectent de façon significative tous les caractères. Les plus grandes variations inter-dates de semis sont obtenues avec les variables de précocité (FF50), des caractères morphologiques et du rendement et de ses composantes (RDT, LOEP, LAEP, PMGR etc.) (40% pour le poids de mille grains et 75% pour le rendement).

La durée moyenne de semis-floraison est plus courte au semis de septembre (50 jours) et plus longue au semis de janvier (73 jours), soit un allongement moyen du cycle d'environ de 23 jours pour l'ensemble des variétés. Alors que cette différence de précocité est plus marquée chez les génotypes tropicaux tardifs tels IR 30 (30 jours), X 304 C (33 jours), et Cimmyt Pool 1 (26 jours), elle devient moins

Tableau 1. Analyse de variance selon le modèle interactif complet (Somme des carrés d'écarts SCE)

Source	ddl	FF50	HMP	HEPI	PMGR	LOEP	LAEP	RDT
Génotype	7	9311.7 ***	24645 ***	17393 ***	67461 II	31210 ***	1382 ***	9948 ***
Date de semis	11	11309 ***	28712 ***	12248 ***	216064 .	18258 ***	2776 ***	28641 ***
Bloc (date de semis)	12	68.7 n	5682 **	1837 *	06.1 ii	6026 **	4 % n	1186 n
Inter. G x D	77	1494.2 ***	21597 *	12878 ***	165461 ***	29893 ***	1866 **	13931 ***
Résiduelle	84	543.2	15282	5999	74229	14590	1394	4546

NH: Suite aux données manquantes, les ddl de la variance résiduelle de NRP, LAF, NGR, PMGR, et RDT sont respectivement égales à 79, 882, et 67

Tableau 2. variation expliquée par les génotypes et les dates de semis

Effet	FF50	HMP	LOF	PMGR-	LOEP	LAEP	RDT
Génotype $\{\sum \alpha_i^2 / (g-1)\}$	55.1	139.1	29.0	363.8	178.5	7.5	56.3
Date semis $\{\sum \beta_j^2 / (t-1)\}$	63.8	151.7	176.8	1171.0	92.8	14.7	158.4
Interaction $\{\sum \theta_{ij} / (g-1)(t-1)\}$	6.5	49.2	9.6	621.8	107.3	3.8	56.5
$\sigma^2$	6.4	181.9	48.9	905.2	173.6	16.5	67.8

importante chez les génotypes précoces tropicaux et/ou tempérés comme IRAI 143 (19 jours), LG 11 (11 jours), et Early Thai (18 jours). En somme, l'ampleur de la durée du cycle est fonction du génotype, autrement dit, plus le génotype est tardif, plus l'allongement du cycle est important.

Comme pour les caractères de précocité, des variations analogues se manifestent pour plusieurs autres caractères. Ainsi les plus faibles et plus grandes valeurs se retrouvent respectivement aux semis de juillet - août d'une part, de novembre - décembre et de mars - avril d'autre part pour les caractères tels le nombre de ramifications primaires et surtout le rendement et ses composantes : la longueur de l'épi, le nombre de grains par rang et le poids de mille grains. D'autres caractères morphologiques comme la hauteur moyenne du plant, la longueur de la feuille et de l'entre-noeud sont plus importants pour les semis d'octobre.

La tendance générale est en fait à la baisse des rendements aux semis de juin, juillet et août et à la hausse pour les semis de novembre-décembre et de mars-avril. Ces réductions et/ou ces augmentations sont le résultat des variations des composantes du rendement (PMGR, LOEP, LAEP, NGR) et de la durée du cycle suite aux variations des facteurs climatiques.

L'étude de la variation du rendement en fonction de la date de semis (Fig.1) montre que tous les génotypes ont des rendements faibles (RDT < 20q/ha) généralement pour les semis de juillet, d'août et souvent de septembre ; ils ont des rendements moyens compris entre 20 et 40q/ha pour les semis d'octobre, de janvier, de février et de mai et enfin des rendements supérieurs à 50q/ha pour les semis de novembre-décembre d'une part et de mars-avril d'autre part. Les variétés précoces

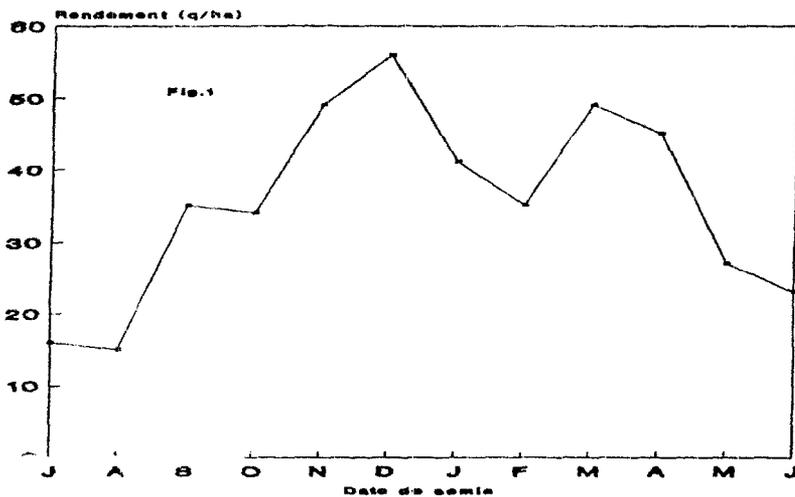


Fig. 1. Variation du rendement moyen des génotypes en fonction de la date de semis.

LG 11, Cimmyt Pool 1, Cimmyt Pool 12 et Early Thai ont leur rendement maximal inférieur à 60 q/ha, contrairement aux variétés tardives Helios, IRAT 143 et IR 30 dont les rendements maxima sont supérieurs à 70 q/ha.

L'évolution des composantes du rendement tels le nombre de rangs/épi, le nombre de grains/rang et le poids de mille grains met en évidence des maxima pour les semis de novembre et de mars et des minima pour les semis de juin, de juillet et d'août.

Au total, l'étude de l'évolution des caractères permet de répartir les dates de semis en quatre groupes :

(i) *le groupe de juin, juillet, août et septembre* dont :

- le sous-groupe d'août qui se caractérise essentiellement par le raccourcissement des cycles des variétés (durée moyenne semis-floraison inférieure à 50 jours), un rythme d'apparition des feuilles assez élevé, des plantes de taille réduite, un nombre total de feuilles et des surfaces foliaires réduites (NTF, LOF, LAF), de petits épis et par conséquent des rendements très faibles (< 20q/ha), les températures ont varié de 24 à 34°C avec des extrêmes pouvant aller jusqu'à 77 °C. L'humidité relative est élevée (66 à 91%) et la photopériode longue (13,1 h/j).

- le sous-groupe de juin, juillet et septembre est caractérisé par des cycles un peu plus longs (= 60 jours) un nombre de feuilles important (environ 20 feuilles par plant) et des rendements faibles à moyens (< 30q/ha). Les températures varient de 16 à 42°C avec une humidité relative de 80% et une photopériode de 13.8 h/j.

(ii) *Le groupe d'octobre et de mai* qui se caractérise par une durée moyenne semis-floraison inférieure ou égale à 58 jours, un rythme d'apparition des feuilles assez élevé, des températures variant entre 16 et 33°C et une humidité relative oscillant entre 33 et 67%.

(iii) *Le groupe de janvier et de février* qui se caractérise essentiellement par une durée semis floraison très importante (durée moyenne supérieure à 70 jours) et des rendements moyens suite aux effets des vents chauds soufflant à cette époque.

(iv) *Le groupe novembre-décembre et mars-avril* se caractérisant par un allongement important de la durée semis-floraison femelle (supérieure à 70 jours), un nombre élevé de feuilles, des plantes de grande taille, une surface foliaire importante un rythme d'apparition des feuilles relativement faible, de grands épis et des rendements élevés (> 50q/ha). Les températures sont relativement fraîches et varient de 15 à 20°C et la photopériode assez courte, variant entre 11 et 12,5h/j. En définitive, ce dernier groupe peut être considéré comme celui des meilleures dates de semis dans le cadre de la maïsiculture irriguée.

Comme pour les dates de semis, les effets géotypes affectent tous les caractères. Globalement, il semblerait que, pour le développement semis-floraison, la durée de base (base vegetative phase) soit en liaison avec l'origine géographique. En effet les moyennes de ces durées pour les géotypes étudiés sont de 50 jours pour les tempérés précoces Cimmyt Pool 1 et LG 11, de 63 jours pour les tempérés tardifs Cimmyt Pool 12 et Helios et enfin de 60 jours pour les tropicaux de plaines tels que X 304 C, IR 30 etc.

L'existence d'interactions hautement significative entre les géotypes et les dates de semis indique que pour tous les caractères sauf la largeur de la feuille, les différentes variétés n'ont pas le même rang de classement selon la date de semis considérée. En d'autres termes, l'effet du milieu est plus ou moins importante selon les géotypes.

Le modèle de régression conjointe ne permettant pas d'expliquer de façon significative l'interaction "géotype x date de semis" (cf tableau 3), l'écovalence géotypique a été retenue comme paramètre de stabilité. Pour le rendement, les géotypes de plaine précoces à intermédiaires Cimmyt Pool 1, LG 11, Early Thai et IRAT 143 sont les plus stables car ayant des écovalences relativement faibles,

On observe en général, que les plus fortes interactions (en valeur absolue) sont positives. Par contre, les géotypes Cimmyt Pool 12, X 304 C, Helios et IR 30 ayant des écovalences souvent importantes sont moins stables que la moyenne et ont une adaptabilité dite spécifique. Ils sont plus productifs quand les conditions environnementales sont favorables.

Pour le rendement, les dates de semis à écovalence importante sont le mois de septembre, de novembre, de mars et d'avril. Ces dates de semis correspondent aux meilleures dates mis à part le semis de septembre dont l'écovalence forte est due au fait que les variétés stables y ont des rendements généralement inférieurs à la moyenne calculée d'une part et d'autre part les variétés à adaptabilité spécifiques y trouvent les conditions pour donner souvent de bons rendements. C'est le cas de IRAT 143 et de Helios.

L'interaction G x D modélisée par la régression conjointe, bien que significative pour la floraison, la hauteur du plant, la hauteur de l'épi et la largeur de l'épi, explique mal l'interaction totale (environ 25% pour la floraison). Elle n'est pas significative pour le rendement et ses composantes. Les résultats de l'analyse de variance figurent au Tableau 4A.

Compte tenu des connaissances actuelles relatives au déterminisme du développement du maïs, la température moyenne saisonnière et la photopériode ont été introduites au modèle de régression factorielle comme covariables

Tableau 3. Paramètres de stabilité des différents caractères

Géno.	FF50	HMP	HEPI	PMGR	LOEP	LAEP	RDT
Cim P1							
Wi	136	1455	1659	8992	16	205	777
CimP12							
Wi	60	1953	1384	7419	1218	160	837
IRT143							
Wi	58	1201	537	3411	918	74	512
X 304 C							
Wi	164	1341	681	17506	1613	105	969
LG 11							
Wi	135	1275	624	9849	4073	223	751
Hetios							
Wi	73	1246	525	19039	2248	114	1489
E. Thai							
Wi	76	846	469	7374	788	134	667
IR 30							
Wi	79	1579	552	13386	2899	154	1215

Tableau 4A. Table d'ANOVA du modèle de régression conjointe sur les différents caractères  $X_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \rho_{ij} + \gamma_j + \epsilon_{ij}$

Source	ddl	FF50 4669	H M P 12317	HEPI 8697	PMGR 3525	LOEP 15605	LAEP 763	RDT 5966
Effet géotype	7	***	**	***	**	**	***	***
Effet date	II	5670	14369	5624	110789	9129	1331	16167
		***	**	***	*	***	***	**
Interaction G*D	77	748	1078X	6439	85814	14946	1076	SO96
		***	***	†	***	***	†	***
inter. modélisée	17	305	2845	1909	19655	5221	330	3036
		*	†	***	***		***	ns
reste interaction	60	441	7942	4529	66159	9225	746	5060
					ns			

ns : non significatif à < 0.05 \* : significatif à P < 0.05 \*\* : significatif à P < 0.01 \*\*\* : significatif à P < 0.001

Tableau 4B. Table d'ANOVA du modèle de régression factorielle faisant intervenir la température et la photopériode comme covariables environnementales sur la variabilité des caractères  $E(X_{ij}) = \mu + h = 1,2 Z(h)j + j + h = 1,2 i(h) Z(h)j + ij$

Source	ddl	FF50	HMP	HEPI	P M G R	L O E P	LAEP	RDT
Effet géotype		4669	12317	8697	3525	15605	763	5966
		***	***	***	***	***	***	***
Effet date semis	I	5670	14368	5624	110789	9129	1330	16116
		**	***	***	***	***	***	***
regTempérature		3961	174	14	32506	1271	24	5290
		***	ns	ns	***	***	ns	***
regPhotopériode		1096	1155	315	14436	2573	128	4614
		***	***	†	***	***	***	***
reste		613	13040	5295	63847	5289	1178	6263
		***	***	***	***	***	***	***
Interaction G x D	7	748***	10788	6439	85814	14946	1076	8094
			***	*	***	***	***	***
résidTempérature		147	1099	383	3045	1130	152	682
		**	***	ns	ns	ns		ns
résidPhotopériode		105	1054	1088	14635	1445	134	607
		**	*	†	**	ns	ns	ns
reste interaction	6	194	8635	4968	68133	12370	791	7105

ns : non significatif à < 0.05 \* : significatif à P < 0.05 \*\* : significatif à P < 0.01 \*\*\* : significatif à P < 0.001 j est le résidu par rapport aux régressions

environnementales La photopériode de référence correspond à la période de sensibilité maximale de la plante aux variations de la photopériode c'est-à-dire la tinte à laquelle la plante aura accumulé la moitié de son parcours de développement. Les caractères étudiés sont ceux ayant une interaction significative.

Le modèle de régression factorielle a permis de décomposer l'effet "date de semis" et l'interaction G x D en régressions sur les covariables environnementales "température et photopériode" dans le but de mieux comprendre les phénomènes biologiques responsables de l'interaction. Les résultats de l'analyse de variance du modèle de régression factorielle faisant intervenir les covariables précitées sont présentés dans le tableau 4B. Ces résultats montrent que:

• La régression sur la covariable "température" est très hautement significative pour la floraison femelle, le nombre total de feuilles, le nombre de ramifications primaires, la longueur de la feuille, le nombre de rangs/épi, le nombre de grains/rang, le poids de mille grains, la longueur de l'épi et enfin le rendement ;

• La régression sur la photopériode est aussi très hautement significative pour tous les caractères énumérés ci-dessus hormis la taille paniculaire et le nombre de grains/rang.

• Enfin le reste de l'effet additif environnemental, après introduction des deux covariables, est significative pour tous les caractères ; ce qui revient à dire qu'il devrait exister d'autres covariables pour expliquer l'intégralité de l'effet date de semis.

• Pour l'interaction G x D, la régression résiduelle sur la température est hautement significative pour la floraison femelle, la hauteur du plant, la longueur de l'entre-nœud, le nombre total de feuilles, la taille paniculaire, le nombre de ramifications primaires, le nombre de rangs/épi et la largeur de l'épi.

La régression résiduelle sur la photopériode est significative pour la floraison femelle. les hauteurs du plant et de l'épi, le nombre de rangs/épi et le poids de mille grains. En effet, la période du cycle la plus touchée par ces facteurs limitants du rendement correspond à la période de floraison-maturité mieux à la phase d'élaboration du poids de mille grains. Cependant, une étude de type écophysologique devrait être menée dans le cadre de la quantification, des effets de la température et de la photopériode sur les paramètres d'élaboration du rendement.

En somme, si les covariables "température et photopériode" expliquent de façon significative les variations de l'effet principal "date de semis" pour tous les caractères (89% pour la floraison par exemple), l'interaction G x D est souvent mal expliquée par leurs régressions résiduelles respectives (un maximum de 34% pour la floraison) notamment pour le rendement, le nombre de grains/rang, le poids de mille grains et les dimensions de l'épi.

Les résultats de l'analyse de variance du modèle de régression factorielle, faisant intervenir les paramètres additifs du délai semis-floraison  $i$  et  $j$  comme covariables génotypique  $Y$  et environnementale  $Z$ , sur la variabilité du rendement figurent dans le tableau 4C. En ce qui concerne les effets principaux, les paramètres additifs  $Y$  et  $Z$  expliquent significativement le rendement moyen des génotypes (85% environ).

Tableau 4C. Table d'ANOVA du modèle de régression factorielle faisant intervenir les paramètres additifs du délai semis-floraison  $i$  et  $j$  comme covariables génotypique  $Y$  et environnementale  $Z$  sur la variabilité du rendement.

Source	SCE	ddl	C.M	F	P
Effet géotyp:	5966.0	7	852.2		0.000***
régres.par Y	1503.5	1	1503.5	15.0	0.000***
reste	4462.3	6	143.1	7.4	0.000***
Effet date de semis	16166.0	11	1470.0		0.000***
régres.par Z	10311.2	1	10311.2	102.6	0.000***
reste	5855.5	10	585.5	5.8	0.000***
Interaction	8096.0	77	105.1		0.000***
rég.sur Y	1642.2	10	164.2	1.6	0.11 ns
rég.sur Z	425.9	2	70.9	1.2	0.307 ns
rég.par Z. Y	0.06	1	0.06	0.0	ns
reste interaction	6027.6	60	100.5		

La représentation graphique des dates semis en fonction des paramètres additifs environnementaux du rendement et des paramètres additifs environnementaux de la floraison d'une part, et d'autre part la représentation des génotypes en fonction de l'écovalence génotypique  $W_i$  du rendement et des paramètres additifs génotypiques de la floraison permet une meilleure vue d'ensemble. Les figures 2A et 2B donnent respectivement les deux types de représentation. On peut noter sur le plan engendré par l'axe 1 et l'axe 2 que :

- les dates de semis favorisant l'allongement du délai semis-floraison donc la tardiveté seraient probablement responsables de l'essentiel de l'interaction  $G \times D$  du fait que la variabilité de l'interaction est d'autant plus importante que la floraison est tardive. C'est le cas des semis de novembre, de décembre, de janvier, de février, de mars et d'avril qui ont des écovalences importantes et des paramètres additifs environnementaux positifs et supérieurs à 5 sauf pour le semis d'avril.

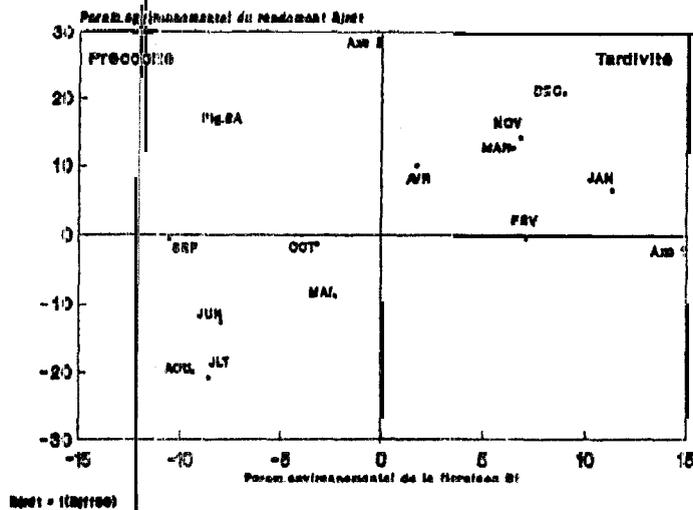


Fig. 2a. Variation du paramètre env. du rendement en fonction de celui de la floraison.

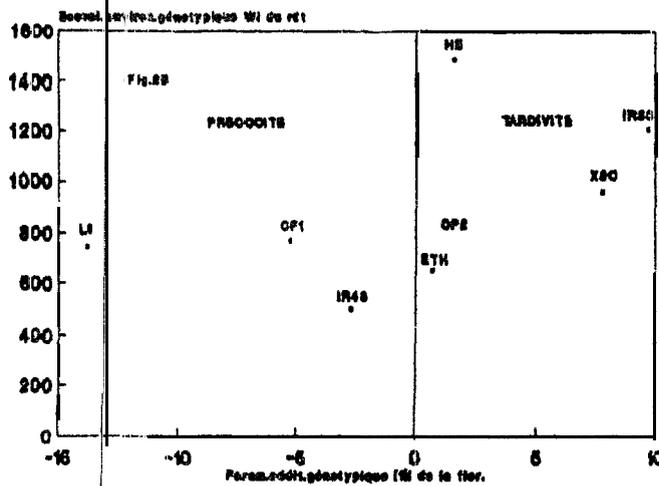


Fig. 2b. Représentation des génotypes en fonction de l'écoval. et des paramètres additifs génotypiques.

-A l'opposé, les dates de semis favorisant la réduction du délai semis-floraison donc la précocité ont des écovalences **relativement** faibles et des paramètres additifs environnementaux **négatifs**. C'est le cas des semis de mai, de juin, de juillet, d'août, de septembre et d'octobre.

• Dans l'ensemble les génotypes précoces comme LG 11, Cimmyt Pool 1 et IRAT 143 participent faiblement à l'interaction tandis que les génotypes tardifs présentent généralement des écovalences très importantes notamment Helios, IR 30 et X 304 C.

- L'interaction observée sur le rendement serait due à un allongement important du cycle des génotypes provoquant un accroissement de leur rendement dans les périodes favorisant la tardiveté avec des températures fraîches et des photopériodes relativement courtes. Ces deux facteurs pouvant favoriser le remplissage du grain, affectant ainsi le poids de mille grains, le nombre de grains par rang et le nombre de rangs/épi.

Toutefois, les dates de semis à floraison précoces correspondent aux périodes les plus chaudes et à photopériodes plus longues (> 12.5 h / j).

Quant au modèle multiplicatif à deux termes (TM1 et TM2) les résultats sont représentés dans le tableau 4D. Le premier terme TM1 est hautement significatif pour tous les caractères notamment pour la floraison, les dimensions de la plante, le nombre total de feuilles, la taille paniculaire, le nombre de ramifications primaires, la longueur de la feuille et pour le rendement et ses composantes alors que le second terme TM2 n'est pas significatif pour la hauteur de l'épi, la longueur de l'entre-noeud, le nombre total de feuilles, la longueur de la feuille et la largeur de l'épi. Au total, les deux termes multiplicatifs expliquent 71 % de l'interaction pour la floraison, 61% pour la hauteur du plant, 75% pour la taille paniculaire, 68% pour le poids de mille grains enfin 71% pour le rendement et le rythme d'apparition des feuilles.

Le principe de la modélisation multiplicative de l'interaction étant similaire à celui de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) appliquée au terme d'interaction  $R_{ij}$ , une représentation graphique des génotypes et des dates de semis en fonction des termes multiplicatifs TM1 et TM2 a été effectuée. La Figure 3A met en évidence trois groupes dont:

Tableau 4D. Table d'ANOVA du modèle multiplicatif avec deux termes sur les différents caractères  $X_{ij} = + i + j + m = 1, 2 i(m) \cdot (m) \cdot j(m)$

Source	ddl	FF50	HMP	HEPI	PMGR	LOEP	LAEP	RDT
Effet génot. (i)	7	4669 ***	12317 ***	8697 ***	35251 ***	15605 ***	763 ***	5966 ***
Effet date (j)	11	5670 ***	14369 ***	5624 ***	110789 ***	9129 ***	1331 ***	16166 ***
Rij	77	748	10788	6439	85813	14946	1076	8096
$\sigma^2_{y_i \infty j}$	17	343 ***	3808 **	2698 **	3.5753 ***	5463 **	368 *	3117 ***
$\sigma^2_{y_2i \infty 2j}$	15	190 **	2782 *	1439 ns	22756 **	4143 *	233 ns	2692 ***
Résid. pure	45	214	4199	2302	27305	5341	474	2286

- le **groupe G1** avec: les **cultivars** tropicaux de plaine tardifs X 304 C et IR 30 à très haut potentiel de production ; leurs meilleurs rendements sont obtenus pendant les semis de septembre, de décembre et de janvier.

- le **groupe G2**, avec un potentiel moyen, comprend les génotypes tropicaux intermédiaires Early Thaï, IRAT 143 et le tempéré tardif Helios ; ces derniers ont donné des rendements élevés au semis d'avril.

- enfin le **groupe G3** à faible potentiel de production comprend les génotypes précoces Cimmyt Pool 1, Cimmyt Pool 12 et LG 11 avec des rendements moyens en octobre et en novembre.

La **représentation** des dates de semis en fonction des termes multiplicatifs (Fig. 3B) ne permet pas d'établir une typologie claire des lieux. Seul l'axe 1 permet de mettre en relation le semis d'avril et le comportement des variétés Helios, Early Thaï et IRAT 143. L'axe 2 oppose le tropical tardif IR 30 et les précoces LG 11, Cimmyt Pool 1 et Cimmyt Pool 12.

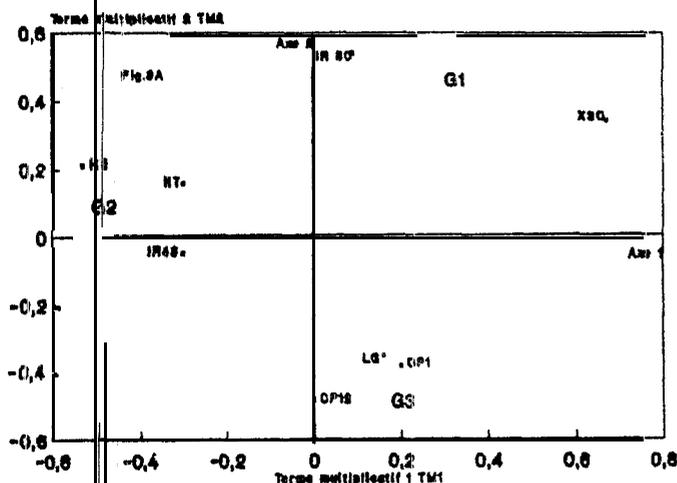


Fig. 3a. Représentation des génotypes en fonction des termes multiplicatifs du rendement.

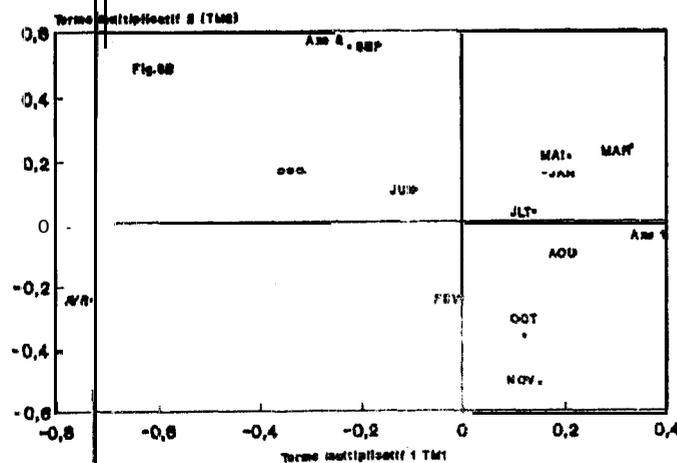


Fig. 3b. Représentation des dates de semis en fonction des paramètres multiplicatifs du rendement.

pour le choix d'une meilleure **modélisation** de l'interaction "**génotype** x date de semis", les **qualités** d'ajustement des moyennes génotypiques et environnementales par la **régression** conjointe (RC) d'une part et d'autre part par la **régression** factorielle combinée avec le modèle multiplicatif à deux termes TM1 et TM2 ont été comparées. Ainsi le modèle **hybride**, combinant les **formules** du modèle de régression factorielle et du modèle multiplicatif à deux termes, a une **qualité** d'ajustement toujours **meilleure**, autant pour les moyennes des génotypes que pour les moyennes des dates de semis. La qualité d'ajustement varie de 81 à 98% sur l'ensemble des dates de semis et des génotypes dont 98% pour la floraison et 94% pour le rendement. La **faible qualité** d'ajustement liée souvent à certaines **dates** de semis est due au fait que la régression factorielle sur les covariables n'expliquait pas souvent une partie de l'interaction G x D.

Par contre, la régression conjointe donne le plus souvent un ajustement **très** moyen, à la fois pour les moyennes des génotypes que pour celles des dates de semis. L'ajustement est d'environ **60%** pour la floraison femelle et les hauteurs de la plante et de l'épi, de 50% pour les caractéristiques de la **panicule** et enfin varie de 41 à 59% pour les composantes du rendement (NRE, NGR, PMGR). Alors que la régression conjointe, mettant en relation la **variabilité** des caractères (par ex. le rendement) et les potentialités des **dates** de semis, est directement interprétable, le modèle de régression factorielle permet en outre de comprendre quels étaient les facteurs biologiques et/ou climatiques responsables de l'interaction génotype x date de semis sur les caractères.

### Discussion

L'importance des interactions génotype x date de semis peut s'expliquer notamment par la diversité du matériel étudié, tant par les différences de cycle que par les origines d'une part et d'autre part par le problème complexe de l'adaptabilité des génotypes aux conditions agroclimatiques. Si la présence d'interactions génotype x date de semis rend difficile toute généralisation, il est néanmoins possible de tirer quelques grandes tendances des analyses précédentes :

- L'étude de l'espérance des **carrés** moyens a permis d'estimer la variation expliquée par les effets génotypes, les effets date de semis et les interactions. Les **caractères** tels la durée semis-floraison, la hauteur du plant, la longueur de la feuille, le poids de mille grains et le rendement, dont l'effet environnemental est plus important, sont très sensibles aux variations du milieu.

- Les dates de semis affectent de façon significative tous les caractères notamment les variables de **précocité**, les caractères **morphologiques**, le rendement et ses composantes. La tendance générale est en fait à la baisse des rendements aux semis de juin, de juillet et d'août et à la hausse pour les semis de novembre-décembre et de mars-avril.

- Le modèle de régression factorielle a permis de décomposer l'effet date de semis et l'interaction en régressions sur les covariables **environnementales** "température et photopériode". Si les covariables **expliquent** de façon significative l'effet principal "date de semis", l'interaction G x D est souvent mal expliquée par les régressions résiduelles.

L'interaction observée sur le rendement serait due à un allongement du cycle des génotypes pendant les périodes relativement fraîches et aux **photopériodes** courtes.

- La représentation graphique des génotypes et des dates de semis en fonction des termes multiplicatifs a permis de distinguer trois groupes de génotypes

différentiables par la durée de leur cycle et de leur potentiel de production. L'interaction génotype x date de semis rendant impossible toute généralisation, deux stratégies apparemment contradictoires sont envisageables :

(1) Recherche de variétés ayant une bonne adaptation générale, ce qui a pour corollaire une certaine limitation de leur performance. C'est le cas des variétés IRAT 143 LG11, Early Thai et IR 30 qui ont des écovalences relativement faibles.

(2) Recherche de variétés spécifiquement adaptées à des saisons particulières, ce qui permet le plus souvent d'obtenir les meilleures performances au prix d'une spécialisation sociale très stricte. Dans cette optique, on peut citer les variétés tropicales IRAT 143 IR30, Early Thai et la variété tempérée tardive Hélios pour la saison froide (semis de novembre-décembre) et les variétés Early Thai, X304 C et IR 30 pour la saison chaude (semis de mars-avril). Cependant les potentialités de ces variétés sont plus importantes en saison froide qu'en saison chaude. Cette constatation répond bien aux objectifs de systématisation de la double culture dans la vallée du fleuve du Sénégal en particulier et du Sahel en général pour l'augmentation de la productivité dans le cadre de la sécurité alimentaire.

Les variations de rendement, ainsi que d'autres caractères, liées aux variations des conditions environnementales (température et photopériode essentiellement) ont toujours posé des problèmes aux sélectionneurs : effet négatif des interactions génotype x environnement dans l'efficacité des programmes de sélection. L'étude des interactions "génotype x date de semis" en particulier et "génotype x environnement" en général nécessite d'être "recadrée" dans la problématique plus générale de la compréhension de l'expression de la variabilité génétique en agriculture (Parisot-Baril 1992). Les sélectionneurs sont souvent confrontés à l'antagonisme qui existe entre l'adaptation spécifique à des conditions particulières de milieu et l'adaptabilité générale (homéostasie). Alors que l'adaptation spécifique permet une meilleure valorisation des intrants dans les conditions environnementales optimales ou des milieux particuliers, l'adaptabilité générale apporte une sécurité de comportement face aux facteurs non contrôlés du milieu.

Pour un caractère aussi complexe que le rendement, l'analyse de la variation et de la covariation génétiques et environnementales à différents niveaux doit conduire à la formulation d'un modèle de régulation sous forme de relations plus ou moins précises entre étapes, plus ou moins définies selon les niveaux d'analyse et la complexité des interactions en cause. Cependant, toute approche physiologique d'un phénomène, au niveau de la plante entière, est nécessairement plus ou moins systémique et simplificatrice (Gallais 1990).

Enfin, la connaissance du potentiel de production d'une saison de culture peut ainsi permettre d'obtenir une meilleure régularité du rendement. Les facteurs limitants en culture irriguée restent les variations des facteurs incontrôlables du milieu : durée du jour, la nature du sol, l'insolation moyenne et la température moyenne. L'étude de leurs effets sur le développement du maïs a permis d'établir un modèle de diagnostic pour la comparaison des différentes situations de semis et de récolte. Ces dates de semis et des génotypes adaptés au milieu que pour l'âge du cycle, vu la tendance actuelle à la systématisation de la double culture dans la vallée du fleuve Sénégal.

## Références

- Blondon, F. et A. Gallais. 1976. Influence de la température, de la valeur de l'éclairement et de la photopériode sur le développement floral de quatre génotypes de maïs, Ann. Amélior. Plantes 26(2): 195-21.
- Bonhomme, R., M. Derieux, and G.G. Edmeades. 1992. Flowering dates of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation field trials. 40 p.
- Brian, C. 1978. Les interactions génotype-environnement ; Méthodes d'une statistique basée sur la régression. Tocsin du Radiateur N° 6 : 35 I-365.
- Brown, J. 1988. An alternative approach to multivariate selection in plant breeding where genotypes are evaluated at many locations. Theor. Appl. Genet. 76: 76-80.
- Chuang-Sheng, Lin, and Brian Thompson. 1975. An empirical method of grouping genotypes based on a linear function of the genotype-environment interaction. Heredity 34(2): 255-263.
- Crossa, J., A.G. Gauch, Jr and R.W. Zobel. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. Crop Sci. 30: 493-500.
- Decoux, G. et J.B. Denis. 1991. INTERA, logiciel pour l'interprétation statistique de l'interaction entre deux facteurs.
- Denis, J.B. et P. Vincourt. 1982. Panorama des méthodes statistiques d'analyse des interactions génotype x milieu. Agron. 2(3) : 219-230.
- Freeman, G. H. and Jean M. Perkins. 1970. Environmental and genotype-environmental components of variability. III. Relations between genotypes grown in different environments and measures of these environments. p. 15-25.
- Freeman, G.H., and P. Crisp. 1979 The use of related variables in explaining genotype-environment interactions. Heredity 42: 1-11
- Gallais, A., 1991. Adaptation et adaptabilité en amélioration des plantes Compte-rendu de la journée A.S.F. 24 p
- Hardwick, R.C. and J.T. Wood. 1971. Regression methods for studying genotype-environment interactions. Agron. J. 209-221
- Jong, Seung Keun, J.L. Brewbaker, and Chong Hee Lee. 1982. Effects of solar radiation on the performance of maize in 41 successive monthly plantings in Hawaii. Crop Sci. 22 : 13-19.
- Lin, C.S. 1982. Grouping genotypes by a cluster method directly related to genotype-environment interaction mean square. Theor. Appl. Genet. 62: 277-280.
- Ndiaye, A. 1995. Contribution à la définition d'idéotypes de maïs pour la culture irriguée en zone sahélienne. Thèse Doctorat Univ. Paris-Sud, France.
- Parisot-Baril, C. 1992. Etude de la stabilité du rendement chez le blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L. Thell)
- Wood, J.T. 1976. The use of environmental variables in the interpretation of genotype-environment interaction. Heredity 37 (1): 1-7.
- Wright, A.J. 1976. Bias in the estimation of regression coefficients in the analysis of genotype-environmental interaction. Heredity 37(2): 299-303.