

Analyse des composantes de l'interaction hôte-parasite chez la rouille de l'arachide

II. Mesure de la résistance intermédiaire par un essai en micro-parcelles

S. SAVARY (1) et J. C. ZADOKS (2)

Résumé. — Une expérimentation en micro-parcelles est mise en place afin de comparer les résistances intermédiaires de 6 cultivars d'arachide vis-à-vis de la rouille. Les résultats tirés de cette expérimentation sont plus précis et probablement plus représentatifs des niveaux de résistance réels que ceux provenant d'une expérimentation classique en parcelles adjacentes. Les résultats mettent notamment en évidence plusieurs niveaux de résistance significativement différents, et, en particulier, une résistance partielle chez les cultivars RMP 12, RMP 91 et 69101, dont les intensités de rouille sont deux à trois fois inférieures à celle de la référence de sensibilité. Les valeurs prédictives de trois composantes de résistance à la rouille, représentées par les résistances relatives à l'infection (RR_{EI}), à la durée de la période de latence (RR_{PL}) et à la sporulation (RR_{SP}) sont comparées. RR_{PL} présente la valeur prédictive la plus élevée, quoiqu'inférieure à celle de la résistance relative combinée, RR_c . L'intérêt du dispositif en micro-parcelles pour la sélection de la résistance de l'arachide à la rouille est discuté.

INTRODUCTION

Au cours d'une étude précédente (Savary & Zadoks, 1988 [15]), un système fermé de caractéristiques épidémiologiques avait été élaboré pour décrire le cycle de *Puccinia arachidis* Speg., à partir duquel des composantes de résistance, représentées par des résistances relatives, avaient été définies. Par ailleurs, une résistance relative combinée, RR_c , avait été calculée en tant qu'estimateur de la résistance intermédiaire des cultivars d'arachide à la rouille, puis confrontée aux intensités de rouille observées dans un essai variétal en parcelles adjacentes. La résistance relative combinée s'était avérée produire de bonnes prédictions des intensités de rouille, quoique ne surpassant pas la valeur prédictive de l'une des composantes de résistance envisagées, représentée par la résistance relative pour la durée de la période de latence (RR_{LP}).

L'une des principales réserves émises à l'issue de cette étude était que, pour la mesure de la résistance intermédiaire de l'arachide à la rouille, la mise en place d'expérimentations variétales de dessin classique, en parcelles adjacentes et avec des bandes infestantes, risquait d'induire des estimations erronées des niveaux de résistance réels.

L'expérimentation idéale, en matière de sélection variétale pour la résistance aux maladies, consisterait à pouvoir établir chaque cultivar dans des contextes cultureux représentatifs de situations réelles, et à pouvoir les comparer en les confrontant à des conditions épidémiologiques identiques. Dans le cas de la sélection de l'arachide contre la rouille, il faudrait donc pouvoir suivre des épidémies indépendantes, soumises à des conditions climatiques identiques, et initiées par un inoculum primaire égal pour tous les cultivars. Un dispositif en micro-parcelles, tels que ceux décrits par

Parlevliet & Van Ommeren (1975) [7] et Zadoks & Schein (1979) [22] permet de s'approcher de telles conditions.

L'objectif de la présente étude est de discuter l'intérêt de dispositifs expérimentaux en micro-parcelles dans le cas de la sélection de l'arachide pour la résistance à la rouille, et, à partir de données issues d'une telle expérimentation, de réévaluer la démarche qui avait été précédemment proposée pour l'estimation des composantes de résistance et de la résistance intermédiaire à partir des résultats d'infections artificielles en laboratoire.

1. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — Expérimentations en laboratoire.

1. Matériel végétal.

Six cultivars d'arachide, représentant une large gamme de résistance à la rouille (McVey, 1965 [5]; Cook, 1980a [2]; 1980b [3]; Subrahmanyam *et al.*, 1980 [16]; 1983a [17]; 1983b [18]) ont été choisis: NCAc 17090, PI 259747, RMP 12, RMP 91, 69101 et un cultivar local, de cycle court et à port érigé, qui est habituellement utilisé comme référence de sensibilité. Les infections artificielles sur ce matériel végétal ont été réalisées avec le même isolat de rouille qu'au cours d'une étude précédente (Savary & Zadoks, 1988).

2. Infections artificielles.

La technique employée pour réaliser les infections est identique à celle préalablement décrite (Savary, 1985a [10]; Savary & Zadoks, 1988). Après la contamination, les boîtes contenant les folioles sont maintenues à l'obscurité pendant 12 heures, puis exposées aux conditions ambiantes du laboratoire (22-27 °C, éclairage naturel au travers d'une baie vitrée).

3. Mesure des caractéristiques épidémiologiques et calcul des résistances relatives.

Trois caractéristiques épidémiologiques: l'efficacité des infections (EI), la durée de la période de latence (LP) et

(1) Laboratoire de phytopathologie, ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, Centre d'Adiopodoumé, B.P. V51, Abidjan, Côte d'Ivoire.

(2) Département de phytopathologie, Wageningen Agricultural University, B.P. 8025, 6700 EE Wageningen.

l'intensité de la sporulation (SP), ont été prises en considération, et estimées selon les définitions opérationnelles proposées par Savary & Zadoks (1988) pour la rouille de l'arachide. Ces caractéristiques sont estimées pour chaque cultivar sur un échantillon de cinq lots (boîtes de Petri) de quatre folioles pour l'efficacité des infections, de cinq lots de trois folioles pour la durée de la période de latence et de cinq lots d'une foliole pour l'intensité de la sporulation (pour cette dernière, une suspension de spores est préparée à partir de chaque foliole et trois comptages à l'hématimètre sont effectués). L'unité statistique utilisée dans l'étude est constituée par le lot de folioles contenu dans une boîte de Petri, et qui a été contaminé avec la même dose d'inoculum (200 mg d'un mélange de spores et kaolin à 260 spores par mg).

Les résistances relatives pour l'efficacité des infections (RR_{EI}) et pour la sporulation (RR_{SP}) sont calculées comme (Zadoks, 1972a [19]; Savary & Zadoks, 1988) :

$$RR = 1 - X_x/X_T, \quad (1)$$

où X_x est la performance (EI ou SP) du cultivar considéré, et X_T , la performance la plus élevée enregistrée au cours de l'expérience (référence de sensibilité maximale). Les valeurs de la résistance relative pour la durée de la période de latence (RR_{PL}), sont, de même, calculées comme :

$$RR = 1 - Y_T/Y_x, \quad (3)$$

où Y_x est la performance (PL) du cultivar considéré, et Y_T , la plus faible enregistrée (référence de sensibilité maximale).

La résistance relative combinée (RR_c), est ensuite calculée selon l'équation (Savary & Zadoks, 1988) :

$$RR_c = (1/15) \cdot [(RR_{EI} + 1) \cdot (RR_{PL} + 1) \cdot (RR_{SP} + 1) - 1], \quad (8)$$

B. — Dispositif expérimental au champ.

1. Etablissement de l'essai en micro-parcelles.

L'essai mis en place (Fig. 1) comporte trois blocs où les six cultivars sont randomisés, et représentés par des parcelles de 3 × 3 m (écartement entre les lignes : 0,30 m ; écartement entre les plantes sur la ligne : 0,30 m, soit 100 plantes par micro-parcelle). Ces parcelles sont établies au sein d'une culture de gouar (*Cyanopsis* sp.). Cette culture a été choisie pour son couvert assez analogue à celui d'une culture d'arachide, au moins dans son développement initial (Parlevliet & Van Ommeren, 1975 ; Zadoks & Schein, 1979). L'ensemble de l'essai, mis en place le 14 septembre 1987 sur les périmètres du service d'expérimentations biologiques du centre ORSTOM d'Adiopodoumé, occupe deux hectares, et est disposé de telle manière que les micro-parcelles d'arachide soient séparées entre elles par une distance de 30 m.

2. Etablissement des sources d'inoculum.

Afin d'établir, dans chacune des micro-parcelles, des épidémies initiées par un inoculum identique, des sources d'inoculum, représentées par des plantes en pot artificiellement infectées au laboratoire, y sont établies. Ces plantes sont infectées artificiellement à 18 jours après semis selon la technique décrite par Savary (1987a) [13], et permettent d'obtenir des plantes présentant un nombre de lésions sporulantes homogène : 820 ± 140 lésions · plante⁻¹ ($p < 0,05$), pour les 18 plantes utilisées au cours de l'expérience.

Après la fin de la période de latence, une de ces plantes-sources est déposée au centre de chacune des micro-parcelles (Fig. 1), où elles sont maintenues pendant 7 jours (du 2 au 9 octobre). En estimant, sur ce matériel végétal, l'intensité de sporulation à environ 500 spores · lésion⁻¹ (Savary, 1986)

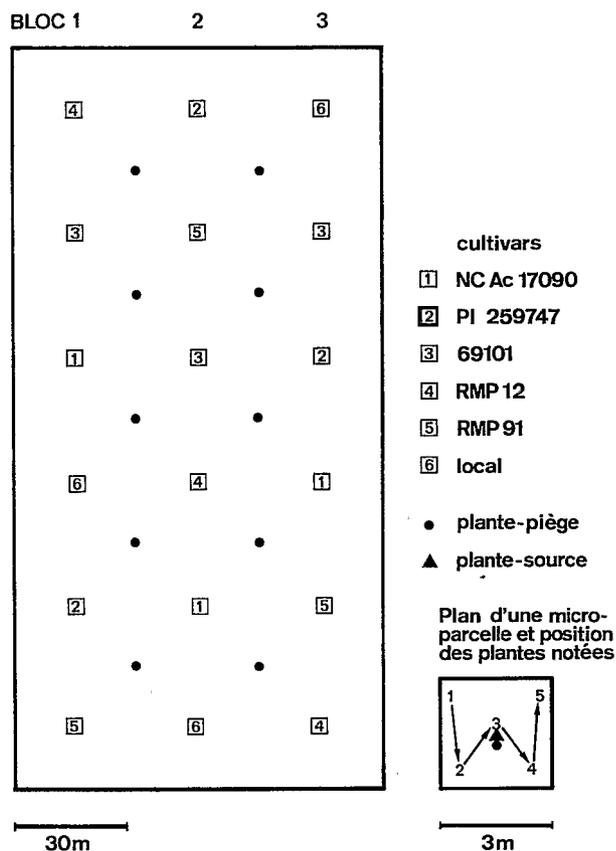


FIG. 1. — Essai variétal en micro-parcelles : plan du dispositif expérimental.

Chaque parcelle élémentaire mesure 3 mètres de côté (10 lignes de 10 plantes). Les parcelles sont séparées par au moins 30 mètres les unes des autres. Elles sont implantées dans une culture de gouar (*Cyanopsis* sp.). Les symboles indiquent les positions des plantes en pot inoculées au laboratoire (sources d'inoculum, déposées le 2 octobre 1987, et retirées le 9 octobre, triangles), ainsi que des plantes pièges permettant d'estimer la dispersion dans et entre les parcelles (déposées le 12 octobre et retirées le 16 octobre 1987, points) (*A field experiment on resistance of groundnut cultivars against rust using micro-plots.*

Each plot measured 3 × 3 m (10 rows of 10 plants each). The plots were separated by a distance of at least 30 m of a guar (Cyanopsis sp.) crop. Symbols indicate the positions of inoculum sources within the plots (potted groundnut plants inoculated with rust, deposited on 2 October 1988, and withdrawn on 9 October, triangles), and of uninoculated trap plants — deposited on 12 October and withdrawn on 16 October, dots).

[12], il est possible d'évaluer la puissance des sources mises en place : environ 2,9 millions de spores émises pendant sept jours de contamination.

3. Estimation de la dispersion de la rouille dans et entre les parcelles.

Il était, ultérieurement, nécessaire de contrôler l'isolement relatif des épidémies établies dans les micro-parcelles. A cette fin, du dixième au quatorzième jour suivant la date de dépôt des plantes sources (c'est-à-dire, au début de la seconde période de latence suivant l'établissement des sources), l'intensité de la dispersion de la rouille est mesurée dans et entre les parcelles (Fig. 1), à l'aide de plantes-pièges en pot. 28 plantes (18 au centre des parcelles, et 10 entré les parcelles) en pot sont utilisées pour ces piégeages, puis transportées en serre, où les dimensions des feuilles exposées sont mesurées, puis, après une période de latence, les lésions sont dénombrées.

4. Estimations des intensités de rouille.

Des estimations hebdomadaires de maladie sont effectuées du 17^e au 52^e jour après l'établissement des sources d'inocu-

lum au centre des micro-parcelles. Cette dernière date correspond au 70^e jour après le semis, c'est-à-dire la période à laquelle les notations sont habituellement effectuées dans les essais variétaux. Pour chaque parcelle, les estimations sont fondées sur l'observation de trois rangs foliaires de cinq plantes réparties le long d'un itinéraire en W (Fig. 1), à l'aide d'une échelle de notation en 7 points (Savary, 1987b) [14]. Cette répartition des plantes observées dans les micro-parcelles permet de prendre en compte l'hétérogénéité des intensités de rouille due au gradient de dispersion de la maladie autour des sources d'inoculum.

C. — Analyse des résultats.

Les mesures des caractéristiques épidémiologiques (EI, PL et SP) sont soumises à des analyses de variance à une dimension, chaque cultivar étant représenté par 5 répétitions pour chacune de ces variables.

Pour chaque date d'observation, les niveaux observés des courbes d'épidémie sont comparés, dans une analyse transversale (Zadoks, 1972b) [20], par une analyse de variance à deux dimensions. Afin de pouvoir comparer, dans une analyse longitudinale, les différentes courbes entre elles, la variable choisie est la surface sous la courbe d'intensité (Buchenaus, 1975 [1]; Forrer & Zadoks, 1983 [4]), estimée comme :

$$SSCI = \sum_{t=1}^T I_t \cdot \Delta t,$$

où I_t représente l'intensité estimée de rouille à la date t , T , la

date de la dernière estimation, et Δt , l'intervalle de temps entre deux estimations.

Enfin, les résistances relatives calculées à partir des mesures des caractéristiques épidémiologiques sont comparées aux surfaces sous les courbes d'intensité grâce à des régressions dont l'équation générale est du type (Savary & Zadoks, 1988) :

$SSCI = a \cdot \exp(-b \cdot RR_i)$, avec $a > 0$ et $b > 0$, où RR_i représente la résistance relative considérée.

II. — RÉSULTATS

1. — Effet des cultivars sur les caractéristiques épidémiologiques envisagées (EI, PL et SP).

Dans le tableau I sont indiquées les valeurs moyennes obtenues concernant les caractéristiques épidémiologiques considérées pour les six cultivars ainsi que les résultats des analyses de variance. Un effet significatif ($p < 0,001$) des cultivars sur EI est mis en évidence. Cette caractéristique varie du simple (NCAc 17090, EI = 0,11) au double (69101, EI = 0,26) selon le cultivar considéré. Un effet également significatif ($p < 0,001$) est obtenu pour PL, avec, cependant, des variations d'amplitude beaucoup plus faible de cette variable (de 10,8 jours pour le cultivar local à 12,4 jours pour le cultivar NCAc 17090). En ce qui concerne SP, l'analyse de variance des observations indique une précision des mesures beaucoup plus faible que pour les deux autres caractéristiques ; cependant le rapport de variance obtenu ($F = 4,6$) est également significatif ($p < 0,01$), les écarts obtenus pouvant aller du simple (670 spores par lésion pour NCAc 17090) au triple (2 000 spores par lésion pour le cultivar local).

TABLEAU I. — Valeurs moyennes et analyse de variance de l'efficacité des infections (EI), de la durée de la période de latence (PL) et de l'intensité de la sporulation (SP) chez six cultivars d'arachide

(Mean values and analysis of variance of infection efficiency (EI), latency period duration (PL), and sporulation intensity (SP) in 6 groundnut cultivars)

Variable	EI ⁽¹⁾				PL				SP			
	ddl	SCE	CM	F ⁽²⁾	ddl	SCE	CM	F	ddl	SCE	CM	F
cultivar	5	0,51	0,10	12,6**	5	9,18	1,84	13,3**	5	6,2 · 10 ⁶	1,2 · 10 ⁶	4,6*
erreur	24	0,19	0,01		24	3,32	0,14		24	6,4 · 10 ⁶	0,3 · 10 ⁶	
total	29	0,70			29	12,5			29	12,7 · 10 ⁶		
Cultivar												
NCAc 17090	0,11 ⁽³⁾	d			12,4 ⁽⁴⁾	d			667 ⁽⁵⁾	d		
PI 259747	0,13	cd			11,6	c			893	cd		
RMP 12	0,17	c			11,4	bc			1 496	abc		
RMP 91	0,18	bc			10,9	ab			1 684	ab		
69101	0,26	a			11,0	ab			1 136	bcd		
Local	0,22	ab			10,8	a			1 982	a		

(1) Les données correspondant à l'efficacité des infections ont été transformées en : $2 \text{ Arc sin } \sqrt{x}$ (Dagnèlie, 1973) avant d'effectuer l'analyse de variance (Data for infection efficiency were transformed into : $\text{Arc sine } \sqrt{x}$ (Dagnèlie, 1973) prior to one-way analysis of variance).

(2) Les valeurs suivies de * ou ** sont significatives aux seuils : $p < 0,01$ ou $p < 0,001$, respectivement (*F-values followed by : * or ** are significant at $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively*).

(3) En nombre de lésions sporulantes par spore déposée. Chaque valeur de la colonne représente la moyenne de 5 répétitions par cultivar. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil : $p < 0,05$ (In sporulating pustules per deposited spore. Figures in the column are the means of 5 replicates per cultivar. Figures followed by different letters are significantly different at $p < 0.05$).

(4) En jours. Chaque valeur de la colonne représente la moyenne de 5 répétitions par cultivar. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil : $p < 0,05$ (In days. Figures in the column are the means of 5 replicates per cultivar. Figures followed by different letters are significantly different at $p < 0.05$).

(5) En nombre de spores produites par lésion après deux jours de sporulation. Chaque valeur de la colonne représente la moyenne de 5 répétitions (3 comptages chacune) par cultivar. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil : $p < 0,05$ (In number of spores produced per pustule after two days of sporulation. Figures in the column are the means of 5 replicates (3 counts each) per cultivar. Figures followed by different letters are significantly different at $p < 0.05$).

TABLEAU II. — Calcul des résistances relatives pour six cultivars d'arachide
(Components of resistance (relative resistance values) for six groundnut cultivars)

Cultivar	RR _{EI} ⁽¹⁾	RR _{PL} ⁽²⁾	RR _{SP} ⁽³⁾	RR _c ⁽⁴⁾
NCAc 17090	0,589	0,132	0,663	0,133
PI 259747	0,481	0,067	0,549	0,097
RMP 12	0,357	0,051	0,245	0,051
RMP 91	0,318	0,008	0,150	0,035
69101	0	0,024	0,427	0,031
Local	0,144	0	0	0,010

(1) Résistance relative pour l'infection (Relative resistance for infection efficiency).

(2) Résistance relative pour la durée de la période de latence (Relative resistance for latency period duration).

(3) Résistance relative pour la sporulation (Relative resistance for sporulation).

(4) Résistance relative combinée (Savary & Zadoks, 1988) (Combined relative resistance [Savary & Zadoks, 1988]).

TABLEAU III. — Mesure de la dispersion de spores dans et entre les micro-parcelles à l'aide de plantes-pièges
(Groundnut rust dispersal within and between microplots, using potted trap plants)

Cultivars	Dispersion dans les parcelles ⁽¹⁾						Dispersion entre les parcelles ⁽²⁾
	NCAc 17090	PI 259747	RMP 91	RMP 12	69101	Local	
Variable							
Nombre de lésions par plante	2,7	37	51	160	264	616	2,3
Densité de lésions par plante ⁽³⁾	0,02	0,20	0,29	0,88	1,74	2,84	0,02

(1) Moyenne de trois répétitions (une parcelle par bloc dans chacun des trois blocs) (Mean of three replicates [one plot of each cultivar in each of the three blocks of the experiment]).

(2) Moyenne de 10 plantes-pièges (Fig. 1) (Mean of 10 trap plants [Fig. 1]).

(3) En nombre de lésions apparues par centimètre carré de feuille (Expressed as number of lesions per square centimeter of leaf area).

TABLEAU IV. — Intensités successives de rouille et aires sous les courbes d'intensité observées dans un essai variétal d'arachide en micro-parcelles

(Variation of rust intensities with time and areas under disease progress curves in a micro-plot experiment with six groundnut cultivars)

Nombre de jours après dépôt des plantes-sources	Analyses transversales : intensités successives												Analyse longitudinale : surface sous la courbe d'intensité		
	17	24	31	38	45	52									
	ddl	SCE	F ⁽¹⁾	SCE	F	SCE	F	SCE	F	SCE	F	SCE	F	SCE	F
Sources de variations															
Variétés	5	0,06	16**	0,06	44***	0,37	25***	0,58	21**	1,25	22***	1,29	40***	205 950	51***
Blocs	2	0,01	0,1	0,01	1,3	0,01	1,1	0,001	0,1	0,001	0,03	0,01	0,8	378	0,2
Erreur	10	0,01		0,003		0,03		0,06		0,11		0,06		8 051	
Totale	17	0,06		0,06		0,41		0,64		1,36		1,37		214 379	
Cultivars ⁽²⁾															
NCAc 17090	0 ⁽²⁾	d		0 ⁽²⁾	d	0,13 ⁽²⁾	c	0,02 ⁽²⁾	b	0,03 ⁽²⁾	c	0,06 ⁽²⁾	c	0,9 ⁽³⁾	c
PI 259747	0,13	c		0,11	c	0,18	c	0,17	b	0,27	c	0,47	c	9,3	c
RMP 12	0,11	c		0,44	b	2,09	b	3,4	a	4,4	b	5,0	b	111	b
RMP 91	0,22	bc		0,38	b	2,12	b	4,3	a	5,5	b	7,5	b	140	b
69101	0,73	a		0,46	b	2,50	b	4,8	a	5,7	b	6,0	b	141	b
Local	0,52	ab		0,80	a	5,0	a	5,6	a	16,3	a	18,0	a	323	a

(1) Les rapports de variance suivis de : *** ; ** ; * , sont significatifs aux seuils : $p < 0,001$, $p < 0,01$ et $p < 0,05$, respectivement (*F-values followed by : *** ; ** ; * , are significant at $p < 0.001$, $p < 0.01$, and $p < 0.05$, respectively*).

(2) Les valeurs représentent les intensités moyennes de rouille (%) ; 3 blocs avec une parcelle de chaque cultivar et 5 plantes notées par parcelle à chaque relevé. Les valeurs moyennes par parcelle ont été transformées en : $2 \cdot \text{Arc sin } \sqrt{(I/100)}$ avant l'exécution des analyses de variance. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil : $p < 0,05$ (Entries are mean rust intensities (%) ; three blocks with one plot of each cultivar, 5 plants scored per plot at each date). Data were transformed into : $2 \cdot \text{Arc sin } \sqrt{(I/100)}$ prior to two-way analyses of variance. Figures followed by different letters are significantly different at $p < 0,05$).

(3) Les valeurs représentent les surfaces moyennes sous les courbes d'intensité de rouille (SSCI, en : % · jour). Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil : $p < 0,05$ (Entries are mean areas under disease progress curves (AUDPC ; % · day). Figures followed by different letters are significantly different at $p < 0,05$).

Les mesures des caractéristiques épidémiologiques permettent de calculer les résistances relatives (Tabl. II). Le cultivar local n'a pas toujours la résistance relative la plus faible (dans le cas de RR_{EI} , elle est inférieure à celle du cultivar 69101) ; la résistance relative combinée la plus basse est cependant celle du cultivar local ($RR_c = 0,010$), plus de dix fois plus faible que celle de NCAc 17090 ($RR_c = 0,133$).

2. — Effet des cultivars sur la dynamique des épidémies de rouille en micro-parcelles.

a) Comparaison de la dispersion de la rouille dans et entre les parcelles.

Les nombres et densités de lésions observées dans les parcelles du cultivar local donnent une mesure de l'intensité maximale de l'ésodémie (Robinson, 1976) [9] se produisant au sein des micro-parcelles de l'essai. Par contre, les observations effectuées sur les plantes-pièges disposées entre les micro-parcelles donnent une mesure de l'intensité de l'exodémie qui affecte l'essai. Ces mesures, effectuées une période de latence après la mise en place des sources d'inoculum, représentent l'intensité de la première vague de spores produites par les épidémies établies dans les micro-parcelles.

Les résultats obtenus (Tabl. III) indiquent une ésodémie en moyenne 140 fois plus intense que l'exodémie (616/2,3, en termes de lésions par plante, et 2,84/0,02, en densité de lésions par centimètre carré). Par ailleurs, les mesures obtenues pour les intensités d'ésodémies en fonction des cultivars reflètent de près (Tabl. II et Tabl. III) les niveaux de résistance qu'ils représentent.

b) Analyse transversale : intensités successives de rouille.

Dès le 17^e jour suivant l'établissement des sources d'inoculum (Tabl. IV), soit environ une période de latence et demie plus tard (Savary, 1985b) [11], des différences significatives ($p < 0,01$) apparaissent entre les cultivars. A partir du 31^e jour, trois groupes de cultivars sont identifiables : le cultivar local (a), d'une part, les cultivars 69101, RMP 91 et RMP 12 (b), d'autre part, et enfin les cultivars PI 259747 et NCAc 17090 (c). Cette séparation se renforce au cours du temps, jusqu'aux intensités terminales de rouille, qui font apparaître un facteur de l'ordre de 300 (18 % contre 0,06 %) entre le cultivar le plus sensible (local) et le plus résistant (NCAc 17090). Les intensités de rouille observées sur les cultivars 69101, RMP 91 et RMP 12 sont alors 2 à 3 fois plus faibles que celles observées sur le cultivar local.

c) Analyse horizontale : surfaces sous les courbes d'intensité de rouille.

Une classification identique et très significative ($p < 0,001$) est obtenue en comparant les moyennes des surfaces sous les courbes d'intensité de rouille (SSCI). Ainsi, un rapport de l'ordre de 360 (323/0,9, Tabl. IV) sépare le cultivar local du cultivar NCAc 17090 ; ces rapports sont de l'ordre de 2 à 3 pour les cultivars 69101, RMP 91 et RMP 12.

3. — Valeur prédictive des composantes de résistance.

Toutes les composantes de résistance envisagées, représentées par les résistances relatives pour l'efficacité des infections (RR_{EI}), pour la durée de la période de latence (RR_{PL}) et pour la sporulation (RR_{SP}), sont significativement corrélées avec la surface sous la courbe d'intensité (SSCI, Tabl. V). RR_{PL} présente, cependant, un coefficient de détermination nettement supérieur ($R^2 = 0,92$) aux autres résistances relatives.

TABLEAU V. — Valeur prédictive des composantes de résistance sur les épidémies de rouille, représentées par les surfaces sous les courbes d'intensité de rouille (SSCI) (Predictive values of components of resistance to groundnut rust as related to the area under disease progress curve [AUDPC])

Composante ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽²⁾	R ² ⁽³⁾	p
RR_{EI}	627	8,55	0,68	< 0,05
RR_{PL}	337	44,0	0,92	< 0,001
RR_{SP}	907	10,2	0,69	< 0,05
RR_c	727	47,7	0,97	< 0,001

(1) RR_{EI} : résistance relative pour l'infection, RR_{PL} : résistance relative pour la durée de la période de latence, RR_{SP} : résistance relative pour la sporulation, RR_c : résistance relative combinée (RR_{EI} : relative resistance for infection, RR_{PL} : relative resistance for latency period duration, RR_{SP} : relative resistance for sporulation, RR_c : combined relative resistance).

(2) Les équations utilisées sont du type : $SSCI = a \cdot \exp(-b \cdot RR_i)$, avec : $a > 0$ et $b > 0$, où SSCI représente la surface moyenne sous la courbe d'intensité de rouille (trois répétitions ; Savary & Zadoks, 1988) (The equations used are of the shape : $AUDPC = a \cdot \exp(-b \cdot RR_i)$, avec : $a > 0$ et $b > 0$, where AUDPC represents the mean value of the area under disease progress curve [three replicates ; Savary & Zadoks, 1988]).

(3) Coefficient de détermination. La différence entre les coefficients pour RR_{PL} et RR_c n'est pas significative à $p < 0,05$ (R_2 = coefficient of determination. The difference between coefficients for RR_{PL} and RR_c is not significant at $p < 0,05$).

La résistance relative combinée (RR_c), d'autre part, présente un coefficient de détermination encore supérieur ($R^2 = 0,97$), ce qui indique que l'association des trois composantes entre elles introduit une amélioration de la prédiction de SSCI.

DISCUSSION ET CONCLUSION

1. — Réévaluation de la valeur prédictive des composantes de résistance.

Au cours d'une précédente étude (Savary & Zadoks, 1988), la prééminence de la résistance relative pour la durée de la période de latence (RR_{PL}) avait été mise en évidence. Par ailleurs, la formule qui avait été proposée pour rassembler les différentes composantes envisagées en une résistance combinée (RR_c) s'était, également, avérée produire une prédiction convenable des intensités de rouille observées au champ, dans une expérimentation de dispositif classique.

Une approche identique, mais fondée sur une expérimentation en micro-parcelles, en apportant des conclusions essentiellement similaires, confirme ces conclusions. Elle fait, cependant, apparaître une amélioration dans les prédictions, ainsi qu'une différence entre les valeurs prédictives de RR_{PL} et de RR_c , cette dernière étant sensiblement accrue. Cette différence est due à la plus grande sensibilité du dispositif en micro-parcelle, qui permet de rendre compte des contributions de chacune des composantes prises en considération dans la résistance intermédiaire de l'arachide à la rouille.

2. — Intérêt du dispositif en micro-parcelles pour la sélection de l'arachide pour sa résistance à la rouille.

Les résultats obtenus dans un dispositif en micro-parcelles peuvent être comparés, pour quatre cultivars d'arachide (PI 259747, RMP 12, RMP 91 et cultivar local), à ceux tirés d'une expérimentation classique, en parcelles adjacentes avec bandes infestantes (Savary & Zadoks, 1988). Cette compa-

raison (Fig. 2) permet de mettre en évidence une forte différence dans l'amplitude des variations de l'intensité de rouille (I) selon le dispositif utilisé : 21,8 % (cultivar local) — 6,6 % (PI 259747) dans le dispositif classique (soit un rapport : cultivar local/PI 259747 = 3,3), contre 18,0 % (cultivar local) — 0,5 % (PI 259747) dans le dispositif en micro-parcelles (soit un rapport : cultivar local/PI 259747 = 38,1).

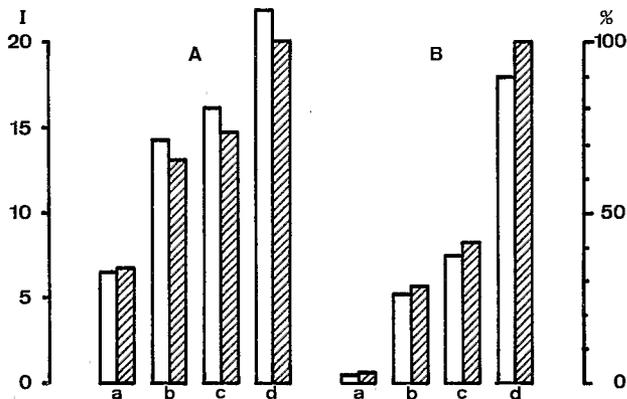


FIG. 2. — Comparaison des résultats obtenus dans l'évaluation des niveaux de résistance de quatre cultivars d'arachide vis-à-vis de la rouille avec deux dispositifs expérimentaux différents.

A : essai conventionnel en parcelles adjacentes avec bandes infestantes.

B : essai en micro-parcelles.

Ordonnées : intensités de rouille estimées 75 près le semis (A) et 70 jours après le semis (B). Colonnes non hachurées : intensités observées (I) ; colonnes hachurées : intensités exprimées en pourcentage de l'intensité maximale observée (%).

a : PI 259747 ;

b : RMP 12 ;

c : RMP 91 ;

d : cultivar local.

(Comparison of two experimental designs for the assessment of resistance of four groundnut cultivars against rust.)

A : conventional trial with adjacent plots and infector rows.

B : microplot test.

Ordinates : rust intensities assessed 75 and 70 days after sowing in A and B, respectively. Open columns : observed intensities (I) ; hatched columns : intensities expressed as percents of the maximum observed (%).

a : PI 259747 ;

b : RMP 12 ;

c : RMP 91 ;

d : cultivar local.

Par ailleurs, l'écart entre le cultivar local et RMP 91 dans le dispositif en micro-parcelle est de 18,0 contre 7,5 % (rapport : 2,4), au lieu de : 21,8 contre 16,1 % (rapport : 1,4) dans le dispositif classique. Il en résulte que la différence entre ces deux cultivars n'est pas significative dans le dispositif classique, alors qu'elle l'est dans le dispositif en micro-parcelles ($p < 0,05$). En d'autres termes : le cultivar RMP 91, jugé sensible dans l'expérimentation de dispositif classique, y aurait été écarté dans un processus de sélection, alors qu'il aurait pu être retenu dans un dispositif en micro-parcelles. Le même raisonnement pourrait être tenu pour le cultivar RMP 12.

Ainsi, dans le cas particulier de la sélection de l'arachide pour sa résistance à la rouille, deux propriétés caractéristiques du dispositif en micro-parcelles (Parlevliet & Van Ommeren, 1975 ; Zadoks & Schein, 1979) sont identifiées :

1) une meilleure représentativité de la résistance effective des cultivars,

2) une meilleure précision dans les estimations des niveaux de résistance.

Ce pouvoir de résolution plus élevé permet, notamment, de mettre en évidence une gamme plus précise de niveaux de résistance, et, éventuellement de retenir des cultivars qui, dans un processus de sélection classique, seraient éliminés.

Face à ces avantages, il convient cependant de souligner l'inconvénient principal du dispositif en micro-parcelles : son

coût extrêmement élevé. Ce coût s'exprime notamment en termes de surface d'expérimentation (0,3 ha par cultivar), et en temps de travail (le rapport est de l'ordre de 25 entre les deux dispositifs).

3. — Résistance intermédiaire et résistance partielle.

La large gamme des niveaux de résistance des cultivars d'arachide vis-à-vis de la rouille (McVey, 1965 ; Subrahmanyam *et al.*, 1980 ; 1983a ; 1983b), et qui s'exprime par une multiplication non nulle de la population du parasite sur un hôte donné (Parlevliet, 1979 [6] ; Rاپilly *et al.*, 1981 [8]), peut être désignée par le terme de résistance intermédiaire (Zadoks & Schein, 1979, ou incomplète, *sensu* Parlevliet, 1979). Cette résistance intermédiaire peut être décrite comme la superposition d'un ensemble de composantes de résistances (Zadoks, 1972a) ; un tel ensemble a été proposé dans le cas de la rouille de l'arachide.

La résistance partielle constitue un cas particulier de résistance intermédiaire dans lequel la multiplication du parasite est réduite, bien que la plante hôte exhibe une réaction typiquement sensible (Parlevliet, 1979). L'expérimentation en micro-parcelle entreprise au cours de cette étude permet de mettre en évidence une résistance partielle dans le couple arachide — *P. arachidis*, représentée par deux cultivars : RMP 12 et RMP 91 qui, effectivement présentent des réactions sensibles (VS) vis-à-vis de la rouille (Savary *et al.*, 1988).

4. — Perspectives.

La sélection de l'arachide pour sa résistance à la rouille dispose de plusieurs techniques, parmi lesquelles :

— Des dispositifs d'expérimentations classiques, en parcelles adjacentes et avec des bandes infestantes, qui permettent d'effectuer un tri initial, sur très grand nombre de cultivars. De telles expérimentations constituent une étape vitale de la sélection, qui ne saurait, sans risques, se fonder exclusivement sur des résultats d'infections artificielles en conditions standardisées, en raison de la variabilité de la résistance intermédiaire avec les facteurs de milieu (Zadoks & Schein, 1979 ; Rاپilly *et al.*, 1981).

— Des techniques d'évaluation en laboratoire, fondées sur des mesures des composantes de résistance. Cette approche, beaucoup plus lourde, impose des choix : toutes les composantes ne peuvent pas être, simultanément, mesurées au cours des opérations de criblage de routine, qui portent sur plusieurs dizaines de cultivars (J. P. Bosc, IRHO, comm. pers.). La mesure de la durée de la période de latence, parce qu'elle est précise, parce qu'elle est significativement corrélée aux autres composantes mesurables, et parce qu'elle présente une bonne représentativité du niveau de résistance réel, peut être recommandée pour cette étape.

— Des dispositifs d'expérimentations détaillés, en micro-parcelles. Cette approche n'est vraisemblablement praticable que pour un nombre restreint de cultivars, dans une perspective précise. Contrairement au dispositif classique en parcelles adjacentes, elle présente, cependant, le grand avantage de produire une estimation de la résistance représentative de la situation réelle, en parcelle commerciale. Ses objectifs pourraient être : (a) d'affiner le choix de géniteurs de résistance ; (b) d'optimiser celui de géniteurs « de bon comportement agronomique », afin de valoriser, chez certains de ces géniteurs, la présence d'une résistance partielle ; et (c) d'évaluer, d'une manière précise, au terme d'un processus de sélection lourd, le comportement de certains croisements jugés particulièrement prometteurs.

Il est vraisemblable que la résistance partielle de l'arachide contre la rouille ne soit présente, à des niveaux sensibles, que chez des variétés à cycles moyens, ou longs comme RMP 12 et RMP 91. L'effet de cette résistance, en termes de pertes de récolte, est donc probablement faible, car les niveaux de tolérance diminuent nécessairement avec les longueurs des cycles de culture. Il demeure néanmoins possible qu'une valorisation effective de la résistance partielle de certains cultivars d'arachide vis-à-vis de la rouille puisse être réalisée en lui superposant une couverture fongicide également

partielle. Cette combinaison de deux modes de lutte contre la rouille de l'arachide n'a sans doute pas encore reçu l'intérêt qu'elle mérite. Elle pourrait, par exemple, faire dépendre l'application de traitements fongicides des prédictions sur le déroulement de l'épidémie en cours (Zadoks, 1975) [21], ou encore associer à une résistance partielle des cultivars une protection chimique incomplète, par exemple fournie par un traitement de semences. Une approche possible pour son évaluation pourrait, elle aussi, être fondée sur un dispositif en micro-parcelles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BUCHENAU G. W. (1975). — Relationship between yield loss and area under the wheat stem rust and leaf rust progress curves. *Phytopathology*, **65**, p. 1317-1318.
- [2] COOK M. (1980a). — Peanut leaf wettability and susceptibility to infection by *Puccinia arachidis*. *Phytopathology*, **70**, p. 826-830.
- [3] COOK M. (1980b). — Host-parasite relations in uredial infections of peanut by *Puccinia arachidis*. *Phytopathology*, **70**, p. 822-826.
- [4] FORRER H. R. & ZADOKS J. C. (1983). — Yield reduction in wheat, in relation to leaf necrosis caused by *Septoria tritici*. *Neth. J. Pl. Pathol.*, **89**, p. 87-98.
- [5] McVEY D. V. (1965). — Inoculation and development of rust on peanuts grown in the greenhouse. *Pl. Dis. Rep.*, **49**, p. 191-192.
- [6] PARLEVLIET J. E. (1979). — Components of resistance that reduce the rate of epidemic development. *Annu. Rev. Phytopathol.*, **17**, p. 203-232.
- [7] PARLEVLIET J. E. & VAN OMMEREN A. (1975). — Partial resistance of barley to leaf rust, *Puccinia hordei*. II. Relationship between field trials, microplot tests and latent period. *Euphytica*, **24** p. 293-303.
- [8] RAPILLY F., LABORIE Y., DEPARTUREAUX C. & SKAJENNIKOFF M. (1981). — Résistance partielle du blé, *Triticum aestivum* L. à *Septoria nodorum* Berk. Etude du temps d'incubation. *Agronomie*, **1**, p. 771-781.
- [9] ROBINSON R. A. (1976). — Plant pathosystems. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 184 p.
- [10] SAVARY S. (1985a). — Comparaison de différentes techniques d'infection de folioles d'arachide par *Puccinia arachidis* Speg. *Agronomie*, **5**, p. 325-329.
- [11] SAVARY S. (1985b). — Effet du niveau de contamination et de la température sur quelques étapes du cycle de *Puccinia arachidis* Speg. *Agronomie*, **5**, p. 479-485.
- [12] SAVARY S. (1986). — Relative humidity and wind velocity associated with diurnal rhythmicity of aerial dispersal of *Puccinia arachidis* urediniospores. *Neth. J. Pl. Pathol.*, **92**, p. 115-125.
- [13] SAVARY S. (1987a). — Decrease by plant development stage and leaf age of susceptibility of groundnut to rust (*Puccinia arachidis*) in a susceptible cultivar. *Neth. J. Pl. Pathol.*, **93**, p. 25-31.
- [14] SAVARY S. (1987b). — Enquête sur les maladies fongiques de l'arachide (*Arachis hypogaea*) en Côte d'Ivoire. I. Méthodes d'enquête et étude descriptive: les conditions culturales et les principales maladies. *Neth. J. Pl. Pathol.*, **93**, p. 167-188.
- [15] SAVARY S. & ZADOKS J. C. (1988). — Analyse des composantes de l'interaction hôte-parasite chez la rouille de l'arachide. I. Définition et mesure des composantes de résistance. *Oléagineux*, 1989, **44**, N° 3, p. 163-174.
- [16] SUBRAHMANYAM P., GIBBONS R. W., NIGAM S. N., RAO V. R. (1980). — Screening methods and further sources of resistance to peanut rust. *Peanut Science*, **7**, p. 10-12.
- [17] SUBRAHMANYAM P., McDONALD D., GIBBONS R. W., SUBBA RAO P. V. (1983a). — Components of resistance to *Puccinia arachidis* in peanuts. *Phytopathology*, **73**, p. 253-256.
- [18] SUBRAHMANYAM P., McDONALD D., SUBBA RAO P. V. (1983b). — Influence of host genotype on uredospore production and germinability in *Puccinia arachidis*. *Phytopathology*, **73**, p. 726-729.
- [19] ZADOKS J. C. (1972a). — Modern concepts in disease resistance in cereals. In: *The way ahead in plant breeding*. Lupton, F.A.G.H., Jenkins G. & Johnson R., Eds. Eucarpia, Cambridge, p. 89-98.
- [20] ZADOKS J. C. (1972b). — Methodology of epidemiological research. *Annu. Rev. Phytopathol.*, **10**, p. 253-276.
- [21] ZADOKS J. C. (1975). — La dynamique des populations de pathogènes et l'amélioration de la résistance des plantes. *Bull. Rech. Agron. de Gembloux* (Vol. spécial: Dynamique des populations de parasites des plantes), p. 259-373.
- [22] ZADOKS J. C. & SCHEIN R. D. (1979). — *Epidemiology and plant disease management*. Oxford University Press, Oxford, New York, 427 p.

SUMMARY

Analysis of components in the host-parasite interaction of groundnut rust. II. Measurement of intermediate resistance using a micro-plot trial.

S. SAVARY and J. C. ZADOKS, *Oléagineux*, 1989, **44**, N° 5, p. 215-224.

A micro-plot trial was set up in order to compare the intermediate resistance of six groundnut cultivars to rust. The results produced by this experiment are more accurate and probably more representative of true levels of resistance than those from traditional adjacent plot experiments. The results most notably reveal several widely varying levels of resistance and, in particular, partial resistance in RMP 12, RMP 91 and 69-101 cultivars, which show rust intensity two or three times lower than the susceptibility reference. Predictive values for the three rust resistance components, represented by resistance relative to infection (RR_{EI}), latency period duration (RR_{PL}) and sporulation (RR_{SP}) were compared. RR_{PL} gives the highest predictive value, although it is lower than that for combined relative resistance, RR_C . The utility of micro-plot design for determining resistance to groundnut rust is discussed.

RESUMEN

Análisis de los componentes de la interacción hospedero-parásito en la roya del maní. II. Medición de la resistencia intermedia mediante una prueba en microparcelas.

S. SAVARY y J. C. ZADOKS, *Oléagineux*, 1989, **44**, N° 5, p. 215-224.

Con el fin de comparar las resistencias intermedias de 6 variedades de maní con relación a la roya, se estableció una experimentación en microparcelas. Los resultados que se sacan de esta experimentación son más precisos y probablemente más representativos de los niveles efectivos de resistencia que los que resultan de una experimentación clásica en parcelas contiguas. Los resultados evidencian entre otras cosas varios niveles de resistencia significativamente distintos, en especial una resistencia parcial en los cultivares RMP 12, RMP 91 y 69101, cuyas intensidades de roya son dos a tres veces inferiores a las de la referencia de sensibilidad. Los valores que pueden preverse por los tres componentes de resistencia a la roya, que integran las resistencias relativas a la infección (RR_{EI}), a la duración del período de reposo (RR_{PL}) y a la esporulación (RR_{SP}) se comparan. RR_{PL} presenta el valor que puede preverse más alto, a pesar de ser inferior al de la resistencia relativa combinada, RR_C . Se discute el interés del dispositivo en microparcelas para la selección de la resistencia del maní a la roya.

Analysis of components in the host-parasite interaction of groundnut rust. II. Measurement of intermediate resistance using a micro-plot trial

S. SAVARY (1) & J. C. ZADOKS (2)

INTRODUCTION

During a previous study (Savary and Zadoks, 1988) [15], a closed system of epidemiological characteristics was drawn up to describe the *Puccinia arachidis* Speg. cycle, from which resistance components, represented by relative resistances, were defined. In addition, combined relative resistance, RR_c , was calculated as an estimate of the intermediate resistance of groundnut cultivars to rust, then compared with rust intensities observed in a varietal trial on adjacent plots. Relative combined resistance proved to produce good forecasts of rust intensity, although it did not surpass the predictive value obtained using one of the resistance components considered, i.e. resistance relative to latency period duration (RR_{PL}).

One of the major reservations expressed at the end of this study was that, for measuring intermediate resistance to groundnut rust, the setting up of varietal experiments using the traditional design, in adjacent plots and with spreader rows, might produce incorrect estimates of true resistance levels.

The ideal experiment, as far as varietal selection based on disease resistance is concerned, would consist of planting each cultivar in a growing context representative of a true situation, and of comparing cultivars by exposing them to identical epidemiological conditions. In the case of groundnut selection on the basis of rust resistance, one would thus have to be able to monitor independent epidemics, in identical climatic conditions, with the primary inoculum being the same for all of the cultivars. A micro-plot design, such as those described by Parlevliet and Van Ommeren (1975) [7] and Zadoks and Schein (1979) [22] makes it possible to come close to these conditions.

The aim of this study is to discuss the utility of microplot experimental designs in the case of groundnut selection on the basis of rust resistance and, from data collected in such an experiment, to review the procedure previously proposed for estimating resistance and intermediate resistance components using results obtained from artificial infection in the laboratory.

I. — MATERIAL AND METHODS

A. — Laboratory experiments.

1. Planting material.

Six groundnut cultivars, with a widely varying rust resistance (McVey, 1965 [5]; Cook, 1980a [2]; 1980b [3]; Subrahmanyam *et al.*, 1980 [16]; 1983a [17]; 1983b [18] were chosen: NCAc 17090, PI 259747, RMP 12, RMP 91, 69-101 and a local cultivar, which has a short cycle, an erect growth habit and is usually used as a susceptibility reference. Artificial infection of this planting material was carried out using the same rust isolate as during a previous study (Savary & Zadoks, 1988).

2. Artificial infection.

The technique used for infection was identical to that previously described (Savary, 1985a [10]; Savary & Zadoks, 1988). After contamination, the boxes containing the leaflets were kept in the dark for 12 hours, then exposed to ambient laboratory conditions (22-27 °C, natural lighting through a large window).

3. Measuring epidemiological characteristics and calculating relative resistance.

Three epidemiological characteristics: infection efficiency (EI), latency period duration (LP) and sporulation intensity (SP), were considered, and estimated according to the operational definitions proposed by Savary & Zadoks (1988) regarding groundnut rust. These characteristics were estimated for each cultivar in five sample batches (Petri dishes) of four leaflets for testing infection efficiency, five batches of three leaflets for latency period duration and five batches of one leaflet for sporulation intensity (for this, a spore suspension was prepared from each leaflet and 3 counts made on the blood-count apparatus). The statistical unit used in this study consists of a Petri dish containing the leaflet batch, which is contaminated with the same dose of inoculum (200 mg of a spore/kaolin mixture with 260 spores per mg).

Relative resistance values for infection efficiency (RR_{EI}) and sporulation (RR_{SP}) were calculated as follows (Zadoks, 1972a [19]; Savary & Zadoks, 1988):

$$RR = 1 - X_x/X_T \quad (1)$$

where X is the performance (EI or SP) of the cultivar in question, and X_T the highest performance recorded during the experiment (maximum susceptibility reference). Relative resistance values for the latency period duration (RR_{PL}) were, likewise, calculated as follows:

$$RR = 1 - Y_T/Y_x \quad (3)$$

where Y_x is the performance (PL) of the cultivar in question and Y_T the weakest performance recorded (maximum susceptibility reference).

Combined relative resistance (RR_c) was then calculated using the following equation (Savary & Zadoks, 1988):

$$RR_c = (1/15) \cdot [(RR_{EI} + 1) \cdot (RR_{PL} + 1) \cdot (RR_{SP} + 1) - 1] \quad (8)$$

B. — Field experiment design.

1. Setting up the micro-plot trial.

The trial set up (Fig. 1) comprises three blocks in which the six cultivars were randomized, with 3×3 m plots (space between rows: 0.30 m; space between plants in a row: 0.30 m, i.e. 100 plants per micro-plot). These plots were set up on a guar plantation (*Cyanopsis* sp.). This crop was chosen because it provides similar cover to groundnut, at least in its early development (Parlevliet & Van Ommeren, 1975; Zadoks & Schein, 1979). The trial as a whole, set up on 14th September 1987 on the perimeter of the Biological Experimentation Service at the ORSTOM Centre at Adiopodoumé, covers two hectares and is designed in such a way that the groundnut micro-plots are 30 m apart.

2. Creating sources of inoculum.

In order to ensure that, in each plot, the epidemic was initiated by an identical inoculum, sources of inoculum, potted plants artificially infected in the laboratory, were created. These plants were artificially infected 18 days after sowing using the technique described by Savary (1987a) [13], and enabled plants to be obtained with homogeneous numbers of sporulating pustules: 820 ± 140 pustules plant⁻¹ ($p < 0.05$), for the 18 plants used in the experiment.

At the end of the latency period, one of these source plants was placed in the centre of each of the micro-plots (Fig. 1), where it was left for 7 days (from 2nd to 9th October). Taking the sporulation intensity on this planting material to be around 500 spores · lesion⁻¹ (Savary, 1986) [12], it was possible to evaluate the performance of the sources used: around 2.9 million spores released over the seven-day contamination period.

(1) Phytopathology laboratory, ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, Adiopodoumé Centre, B.P. V51, Abidjan, Côte d'Ivoire.

(2) Department of phytopathology, Wageningen Agricultural University, P.O. Box 8025, 6700 EE Wageningen, The Netherlands.

3. Estimating rust dispersion within and between plots.

It later proved necessary to monitor the relative isolation of the epidemics in the micro-plots. To this end, from the tenth to the fourteenth day after introducing the source plants (i.e. at the start of the second latency period after creating the sources), the intensity of rust dispersion was measured in and between the plots (Fig. 1), using potted trapper plants. 28 potted plants (18 in the centre of the plots and 10 between the plots) were used as traps, then transferred to a greenhouse, where the exposed leaves are measured and then, after a latency period, the number of pustules is counted.

4. Rust intensity estimates.

Weekly disease estimates were made from the 17th to the 52nd day after introducing the inoculum sources in the centre of the micro-plots. The latter date corresponded to the 70th day after sowing, i.e. the period after which assessments are usually made in varietal trials. For each plot, estimates were based on observations on three leaf ranks on five plants forming a W (Fig. 1), using a 7-point assessment scale (Savary, 1987b) [14]. This distribution of plants observed in the microplots enabled the heterogeneous nature of rust intensities, due to the gradient of disease dispersion around the inoculum source, to be taken into account.

C. — Result analysis.

The epidemiological characteristics (EI, PI and SP) measurements undergo one-way analyses of variance, each treatment (cultivar) being represented by 5 replications for each of these variables.

For each observation date, the observed levels of the epidemic curves are compared, in a transversal analysis (Zadoks, 1972b) [20], using a two-way analysis of variance. In order to be able to compare the various curves in a longitudinal analysis, the variable chosen is the area under the intensity curve (Buchenau, 1975 [1]; Forrer & Zadoks, 1983 [4]), estimated as follows :

$$SSCI = \sum_{t=1}^T I_t \cdot \Delta t,$$

where I_t represents the estimated rust intensity at date t , T , the date of the last estimate, and Δt the time interval between two estimates.

Lastly, relative resistances calculated from the epidemiological characteristics measurements are compared with the area under the intensity curve by means of regression calculations for which, the general equation is of the type (Savary & Zadoks, 1988) :

$$SSCI = a \cdot \exp(-b \cdot RR_i), \text{ where } a > 0 \text{ and } b > 0,$$

II. — RESULTS

1. — Effect of cultivars on the epidemiological characteristics forecast (EI, PL and SP).

Table I contains the mean values obtained for the epidemiological characteristics considered for the six cultivars and the results of the analyses of variance. These reveal that cultivars have a significant effect ($p < 0.001$) on EI. This characteristic can double according to the cultivar in question (NCAc 17090, EI = 0.11; 69-101, EI = 0.26). A significant effect ($p < 0.001$) is also observed for PL with, however, much smaller variations in this variable (between 10.8 days for the local cultivar and 12.4 days for the NCAc 17090 cultivar). As for SP, the analysis of variance on the observations made reveals that measurements were much less accurate than for the other two characteristics; however, the variance ratio obtained ($F = 4.6$) is also significant ($p < 0.01$), the results obtained varying from 670 spores per lesion for NCAc 17090 to three times as many (2 000 spores per lesion for the local cultivar).

The measurement of epidemiological characteristics enables relative resistances to be calculated (Table II). The local cultivar does not always have the lowest relative resistance (in the case of RR_{EI} , it is less than that for cultivar 69-101); the lowest combined relative resistance is, however, that of the local cultivar ($RR_c = 0.010$), more than ten times less than that of NCAc 17090 ($RR_c = 0.133$).

2. — Effect of cultivars on the dynamics of rust epidemics in micro-plots.

a) Comparison of rust dispersion within and between the micro-plots.

The number and density of pustules observed in the local cultivar plots give a measurement of the maximum intensity of the esodemic

(Robinson, 1976) [9] within the micro-plots in the trial. On the other hand, observations made on the trapper plants placed between the micro-plots give a measurement of the intensity of the exodemic affecting the trial. These measurements, taken one latency period after introducing the inoculum sources, express the intensity of the first wave of spores produced by the epidemics in the micro-plots.

The results obtained (Table III) reveal an esodemic on average 140 times more intense than the exodemic (616/2.3, in terms of lesions per plant, and 2.84/0.02 for lesion density per square centimetre). In addition, the measurements obtained for esodemic intensity according to the cultivar give an accurate reflection (Table I and Table II) of the resistance levels which they represent.

b) Transversal analysis : successive rust intensities.

From the 17th day after the creation of the inoculum sources (Table IV) onwards, i.e. approximately one and a half latency periods later (Savary, 1985b) [11], significant differences ($p < 0.01$) between the cultivars become apparent. From the 31st day onwards, three groups of cultivars can be identified : the local cultivar (a), on the one hand, cultivars 69-101, RMP 91 and RMP 12 (b) on the other hand, and finally cultivars PI 259747 and NCAc 17090 (c). These gaps grow wider as time goes on, up until terminal rust intensity, which reveals a factor of around 300 (18 % as against 0.06 %) between the most susceptible cultivar (local) and the most resistant (NCAc 17090). The rust intensities observed on cultivars 69-101, RMP 91 and RMP 12 are two or three times lower than those observed on the local cultivar at this stage.

c) Horizontal analysis : the area under the rust intensity curve.

An identical and very significant classification ($p < 0.001$) is obtained by comparing the mean area under the rust intensity curve (SSCI). Thus, a ratio of around 360 (323/0.9, Table 4) separates the local cultivar and cultivar NCAc 17090; this ratio is around 2 to 3 for cultivars 69-101, RMP 91 and RMP 12.

3. — Predictive values for resistance components.

All of the resistance components considered, i.e. relative resistance as regards infection efficiency (RR_{EI}), latency period duration (RR_{PL}) and sporulation (RR_{SP}), are significantly correlated to the area under the intensity curve (SSCI, Table V). RR_{PL} , however, has a much higher coefficient of determination ($R^2 = 0.92$) than the other relative resistances.

The combined relative resistance (RR_c), on the other hand, has an even higher coefficient of determination ($R^2 = 0.97$), which suggests that combining the three components gives an improved SSCI forecast.

DISCUSSION AND CONCLUSION

1. — Reassessment of the predictive value of resistance components.

During a previous study (Savary & Zadoks, 1988), the pre-eminence of the relative resistance for the latency period duration (RR_{PL}), was revealed. In addition, the equation proposed for combining the various components considered to produce combined resistance (RR_c) also proved to produce a reasonable forecast of rust intensity in the field, in a traditional design experiment.

Producing essentially similar conclusions, an identical approach, but based on experiments in micro-plots, confirms these conclusions. It does, however, reveal improved forecasting, and a variation in the predictive values for RR_{PL} and RR_c , the latter having increased noticeably. This variation is caused by the fact that the micro-plot design is more sensitive, which enables the contributions of each of the components of intermediate groundnut rust resistance considered to be taken fully into account.

2. — The utility of the micro-plot design for groundnut selection on the basis of rust resistance.

The results obtained in a micro-plot design can be compared, for four groundnut cultivars (PI 259747, RMP 12, RMP 91 and local) with those from a conventional experiment, in adjacent plots with spreader rows (Savary & Zadoks, 1988). This comparison (Fig. 2) reveals a significant difference in the size of rust intensity variations (I) according to the design used : 21.8 % (local cultivar) – 6.6 % (PI 259747) in the traditional design (i.e. a local cultivar/PI 259747 ratio of 3.3), as against 18.0 % (local cultivar) – 0.5 % (PI 259747) using the micro-plot design (i.e. a local cultivar/PI 259747 ratio of 38.1).

In addition, the difference between the local cultivar and RMP 91 in the micro-plot design is 18.0 as against 7.5 % (ratio : 2.4), as opposed to : 21.8 as against 16.1 % (ratio : 1.4) using the traditional design. The result of this is that the difference between the two cultivars in the traditional design is not significant, whilst it is significant in the micro-plot layout ($p < 0.05$). In other words, the RMP 91 cultivar, considered susceptible using a classical design experiment, would have been eliminated during the selection process, whilst it could have been adopted in a micro-plot design. The same could be said for the RMP 12 cultivar.

Thus, in the specific case of groundnut selection on the basis of rust resistance, two characteristic properties of the micro-plot design (Parlevliet & Van Ommeren, 1975 ; Zadoks & Schein, 1979), can be identified :

- 1) it is more representative of the effective resistance of the cultivars,
- 2) it gives more accurate forecasts of resistance levels.

This greater resolution capacity means notably that a more precise range of resistance levels can be brought out, and that cultivars may be adopted which would have been eliminated in a conventional selection process.

Despite these advantages, one should, however, stress the major drawback of the micro-plot design : its very high cost. This cost is most notably seen in terms of the area needed for the experiment (0.3 ha per cultivar) and the amount of labour involved (the ratio between the two designs is around 25).

3. — Intermediate resistance and partial resistance.

The wide range of rust resistance levels shown by groundnut cultivars (McVey, 1965) ; Subrahmanyam *et al.*, 1980 ; 1983a ; 1983b), which is expressed by minimal multiplication of the parasite population on a given host plant (Parlevliet, 1979 [6] ; Rapiilly *et al.*, 1981 [8]), can be designated under the term intermediate resistance (Zadoks & Schein, 1979, or *sensu* Parlevliet, 1979, incomplete). This intermediate resistance can be described as a set of resistance components (Zadoks, 1972a) ; such a set has been proposed in the case of groundnut rust.

Partial resistance is a specific example of intermediate resistance in which the multiplication of the parasite is limited, although the host plant displays a typically sensitive reaction (Parlevliet, 1979). The micro-plot experiment undertaken during this study reveals partial resistance in the groundnut — *P. arachidis* pairing, represented by two cultivars : RMP 12 and RMP 91 which, in fact, show susceptibility (VS) to rust (Savary *et al.*, 1988).

4. — Prospects.

Groundnut selection based on rust resistance can be made using several techniques, including :

— Conventional experimental designs, in adjacent plots and with spreader rows, which enable initial sorting to be carried out, using a large number of cultivars. Such experiments are a vital stage in the selection process, which could not safely be based exclusively on results obtained using artificial infection under standardized conditions, because of the variations in intermediate resistance caused by environmental factors (Zadoks & Schein, 1979 ; Rapiilly *et al.*, 1981).

— Laboratory evaluation techniques, based on measurements of the various resistance components. This approach, which is more complex, means that certain choices have to be made : not all of the components can be measured simultaneously during routine screening procedures, which involve several dozen cultivars (J. P. Bosc, IRHO, Pers. comm.). The latency period duration measurement, which, because it is precise, is significantly correlated to the other measurable components and gives a good reflection of the true level of resistance, can be recommended for use at this stage.

— Detailed experimental designs in micro-plots. This approach is probably only practicable using a limited number of cultivars and with a specific aim in mind. Contrary to the conventional design in adjacent plots, it does, however, have the great advantage of producing resistance estimate reflecting the true situation in a commercial plot. Its aims could be : (a) to refine the choice of resistant parents ; (b) to optimise the choice of parents « with good agronomical performances » in order to valorize the existence of partial resistance in some of those parents ; and (c) to evaluate precisely, after a complex selection process, the performances of certain crosses deemed particularly promising.

It is probable that partial resistance to groundnut rust only exists, to any notable extent, in varieties with a medium or long growth cycle, such as RMP 12 and RMP 91. The effect of this resistance, in terms of harvest losses, is thus probably negligible, since tolerance levels necessarily diminish with the length of the growth cycle. It is nevertheless possible that an effective valorization of the partial resistance of certain groundnut cultivars to rust could be carried out by superimposing a partial fungicidal coating. This combination of two methods of controlling groundnut rust has doubtless not been given the attention which it deserves. It could, for example, mean that fungicide applications would be carried out according to the predicted evolution of the epidemic (Zadoks, 1975) [21], or it could associate the partial resistance of the cultivars concerned with incomplete chemical treatments, for example using seed treatment. Possible evaluation approaches could also be based on the micro-plot design.

