

Réceptivité des sols à la Hernie des crucifères : analyse statistique de résultats

Laurent DOUBLET, Francis ROUXEL & Jean-Pierre MASSON (*)

I.N.R.A., Station de Pathologie végétale, Centre de Recherches de Rennes, B.P. 29, F 35650 Le Rheu

(*) E.N.S.A., Laboratoire de Biométrie, 65, rue de St-Brieuc, F 35042 Rennes Cedex

RÉSUMÉ

La mise en œuvre de tests biologiques destinés à comparer les niveaux de réceptivité des sols à la Hernie des Crucifères nécessite l'analyse statistique pour exploiter les données acquises. Cet article propose des traitements statistiques permettant une description et un classement précis de 15 sols cultivés en chou-fleur ; il a pour principal objectif de valider l'indice pathologique proposé par ROUXEL & REGNAULT (1985).

Une Analyse Factorielle des Correspondances (A.F.C.) permet de classer les 90 traitements (15 sols croisés avec 6 doses d'inoculum de *Plasmodiophora brassicae*) qui s'organisent autour d'une parabole. Le premier axe de l'Analyse Factorielle Discriminante (A.F.D.) portant sur le facteur traitement est une échelle sur laquelle s'ordonnent les différents traitements en fonction de la gravité de la maladie correspondante. Les sols se placent dans l'ordre croissant de leur degré de réceptivité à la Hernie sur le premier axe de l'A.F.D. réalisée sur le seul facteur sol.

Une grande cohérence est observée entre les résultats de ces analyses et ceux obtenus jusqu'ici à partir du calcul d'un indice pathologique.

Ces traitements de données sont susceptibles d'être appliqués à d'autres systèmes plante-parasite pourvu que des dispositifs expérimentaux consistant à répartir les plantes en différentes catégories selon la gravité de la maladie aient été adoptés.

Mots clés additionnels : *Plasmodiophora brassicae*, chou-fleur, résistance, modélisation, analyse discriminante.

SUMMARY

Soil receptiveness to clubroot : statistical analysis of results.

In carrying out biological tests to compare soil receptiveness levels to clubroot, it was necessary to develop methods of statistical analysis to make the most of the data acquired. This paper presents different ways of processing data on the description and classification of 15 soils ; its main result is the validation of the disease index proposed by ROUXEL & REGNAULT (1985). A Correspondence Factor Analysis (C.F.A.) arranged the 90 treatments (15 soils crossed with 6 concentrations of *Plasmodiophora brassicae* inoculum) around a parabola. The first axis of the Discriminant Factor Analysis (D.F.A.) on the treatment factor was a scale on which the different treatments could be placed according to disease level. The first axis of the D.F.A. on the soil factor was similarly a scale on which the different soils could be placed according to their receptiveness to clubroot. The results of this analysis were closely consistent with those obtained earlier with the disease index. These data processing systems could be used to study other plant-parasite systems, in experimental designs in which plants are classed in different disease-level categories.

Additional key words : *Plasmodiophora brassicae*, cauliflower, suppressiveness, statistical modelling, discriminant analysis.

I. INTRODUCTION

Les difficultés rencontrées pour lutter contre la plupart des maladies d'origine tellurique expliquent que les recherches se soient orientées, au cours des 20 dernières années, vers un approfondissement des connaissances sur les relations entre le sol, la plante et le parasite. Dans plusieurs cas (*Fusarium oxysporum*, *Pythium* sp., *Plasmodiophora brassicae*), ces études se

sont développées autour du concept de réceptivité des sols aux maladies (ALABOUVETTE *et al.*, 1982), grâce à la mise en œuvre de tests biologiques adaptés aux différents modèles.

Il est cependant rapidement apparu qu'une exploitation rigoureuse des données, destinée à permettre un classement des sols en fonction de leur degré de réceptivité, nécessitait une analyse statistique. Selon les

données expérimentales disponibles, plusieurs modélisations ont déjà été proposées : par exemple, certaines maladies extériorisent leurs symptômes sur la partie aérienne de la plante ; le taux de survie est alors modélisé en fonction du temps et d'autres facteurs (CORMAN *et al.*, 1986).

Dans le cas de la Hernie des Crucifères, maladie provoquée par *Plasmodiophora brassicae* Wor., les études reposent jusqu'ici sur la comparaison des valeurs d'un indice pathologique calculé après répartition des plantes en différentes catégories en fonction de la gravité des attaques (ROUXEL & REGNAULT, 1985). Le principal objectif poursuivi dans l'étude présentée dans cet article était de confronter les classements des sols fournis par des traitements statistiques à ceux obtenus grâce à cet indice pathologique. Pour cela, une analyse factorielle des correspondances est d'abord réalisée pour résumer l'information recueillie à partir de tests de réceptivité à la Hernie. La structure de ces données nous conduit ensuite à des Analyses Factorielles Discriminantes, qui permettent la comparaison de la réceptivité des sols. Il existe une très bonne concordance entre les résultats obtenus à partir des 2 critères d'appréciation de la réceptivité, ce qui permet de valider l'emploi de l'indice pathologique.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. Présentation des données biologiques

1. Sols étudiés

Le travail a porté sur 15 sols. Quatorze d'entre eux ont été prélevés sur la commune de Plouénan, dans la zone légumière du Nord-Finistère. Préalablement cultivés en choux-fleurs, ils sont tous indemnes de Hernie. Le quinzième sol sert de témoin ; retenu en raison de sa grande sensibilité à la maladie, il est constitué d'un mélange terreux (1/3 tourbe, 1/3 sable, 1/3 terre franche). Les valeurs des pH (eau) des 15 sols sont compris entre 5,1 et 8,3.

2. Comparaison de la réceptivité des sols à la Hernie

La méthode employée est celle décrite par ROUXEL & REGNAULT (1985) : chaque échantillon de sol est réparti en pots de 300 ml dont une partie est soumise à une infestation artificielle à l'aide de doses croissantes d'inoculum du parasite. L'inoculum de *P. brassicae*, obtenu après broyage de galles racinaires de choux-fleurs provenant de la région des sols étudiés (pathotype n° 16-31-28 déterminé selon le test ECD de BUCZACKI *et al.*, 1975), est apporté au sol par arrosage à raison de 20 ml par pot d'une suspension de spores. Celle-ci est établie de manière à obtenir les concentrations finales de 0, 10⁴, 10⁵, 10⁶, 10⁷ et 10⁸ spores de repos par ml de sol (numérotées de 1 à 6).

Les 90 niveaux du facteur sol-dose d'inoculum sont répétés 5 fois chacun, chaque répétition étant constituée par un pot dans lequel sont semées 5 graines de chou-chinois, var : « Granaat ».

Après 6 semaines de culture sous serre, les plantes sont arrachées et réparties en 4 classes (CL0, CL1, CL2 et CL3) en fonction de la gravité observée de la maladie. Les coefficients (0 - 0,25 - 0,5 - 1) respectivement affectés aux 4 classes permettent le calcul de l'indice pathologique suivant :

$$\frac{\sum (\text{Nb de plantes par classe} \times \text{coef. de la classe})}{\text{Nb de plantes total}} \times 100$$

La valeur de cet indice, calculé en l'absence d'infestation artificielle (Témoin 0), permet d'estimer le potentiel infectieux naturel du sol.

Pour chacune des 5 répétitions de l'un des 90 traitements (15 sols \times 6 doses d'inoculum), nous disposons du nombre de plantes classées dans chacune des 4 classes.

Les méthodes statistiques employées ne prennent pas en compte l'ordre des classes dans les analyses. La structure *a priori* des données est exploitée : les modalités des facteurs sol et dose (et par conséquent traitement) sont contrôlées à l'expérience ; cette structure nous permet de discriminer les différents sols.

B. Analyses statistiques

Une Analyse Factorielle des Correspondances (A.F.C.) (LEBART *et al.*, 1977) effectuée sur le tableau croisant les 90 traitements avec les moyennes (5 répétitions) des nombres de plantes observés dans chacune des classes, nous permet, dans une première approche, de décrire et de représenter l'ensemble des données. L'indice pathologique y est introduit en tant que variable supplémentaire.

Dans un second temps, nous utilisons la structure *a priori* des observations afin d'expliquer nos variables (y) par les facteurs du protocole expérimental. Le facteur traitement (t), indicé par i , définit 90 populations. Pour étudier l'effet du facteur traitement (sur le nombre de plantes classées dans une classe donnée), nous utilisons le modèle d'analyse de la variance multivariable à un facteur suivant :

$$y^{(c),i} = t^{(c)} + \varepsilon^{(c),i}$$

$i = 1 \dots 90$ modalité du facteur traitement

$l = 1 \dots 5$ indice de répétition dans le traitement (sol \times dose)

$c = 0, 1, 2, 3$ indice de classe

ε est le facteur d'erreur.

Pour homogénéiser les variances, nous avons travaillé sur le logarithme des dénombrements ; le modèle sous-jacent est alors du type multinomial à 4 classes*. Les résultats de ces transformations se sont révélés très proches de ceux obtenus à partir des dénombrements ; aussi avons-nous continué à travailler sur les données brutes.

La première Analyse Factorielle Discriminante (A.F.D.₁), qui porte sur le facteur des traitements (sols \times doses), permet de classer ceux-ci en prenant en compte la variabilité INTRA (CAILLET & PAGES, 1976 ; RAO, 1973).

Remarque : Si les plantes n'étaient classées qu'en 2 catégories, le modèle « différence » des modèles logarithmiques équivaldrait au modèle logistique.

La deuxième Analyse Factorielle Discriminante (A.F.D.₂), qui porte sur le facteur sol seul (15 modalités), permet, malgré une interaction sol × dose marquée, de présenter un classement moyen des sols et de rechercher l'existence de liaisons entre les niveaux de réceptivité et les valeurs de pH des sols.

Les analyses présentées dans cet article ont été réalisées sur le Mini 6 du Centre Agronomique de Rennes, à l'aide de la programmathèque Amance (BACHACOU *et al.*, 1981).

III. RÉSULTATS

A. Analyse Factorielle des Correspondances

L'image du nuage des points-traitement dans le plan des 2 premiers axes factoriels est typique d'un effet GUTTMAN (fig. 1). La distribution des points moyens autour d'une parabole met en évidence une relation non linéaire entre les classes. Le premier facteur (CMPY 1) constitue une échelle sur laquelle s'ordonnent les traitements selon le degré d'attaque qu'ils provoquent. Le second facteur, expliqué principalement par les classes intermédiaires, permet une bonne représentation des traitements produisant des attaques moyennes. A l'intérieur de la parabole figurent les traitements pour lesquels les plantes sont réparties dans plusieurs classes ; à l'extérieur se situent les traitements provoquant une absence totale de maladie ou un degré d'infestation maximum.

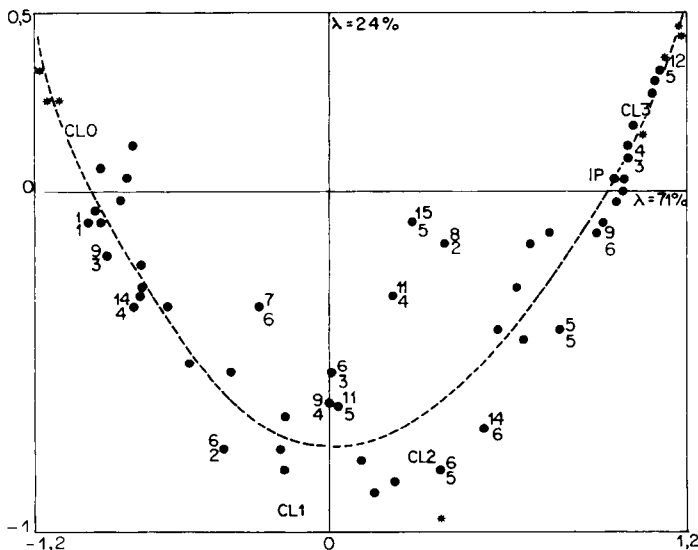


Figure 1
 Comparaison de la réceptivité à la Hernie de 15 sols. Premier plan de l'Analyse Factorielle des Correspondances : les 5 variables (4 classes : CL0, CL1, CL2, CL3 ; indice pathologique = IP) sont projetées sur le plan des 90 traitements (sol-dose d'inoculum) :
 ● numéro du sol
 ○ numéro de la dose d'inoculum
 * superposition de plusieurs points.
 Comparison of 15 soils for clubroot receptiveness. First plane of the Correspondence Factor Analysis : the five variables (4 classes : CL0, CL1, CL2, CL3 ; disease index = IP) are projected on the plane of the 90 treatments (soil-inoculum dose) :
 ● soil number
 ○ inoculum dose number
 * superposition of several points.

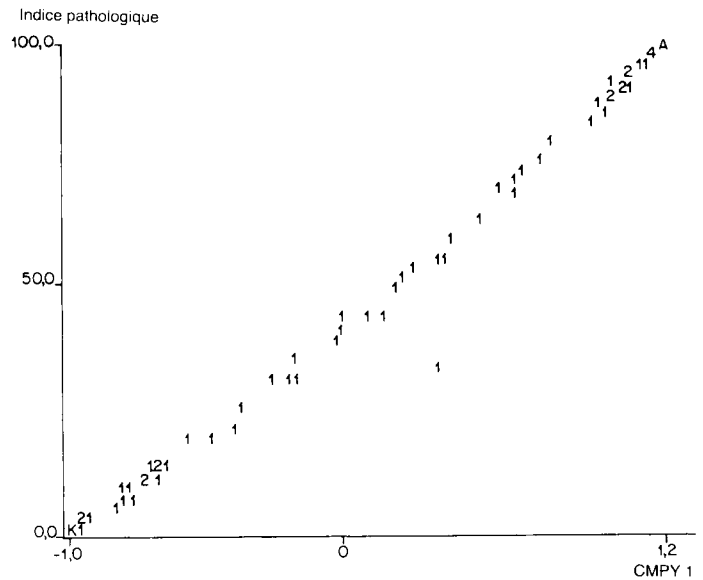


Figure 2
 Comparaison de la réceptivité à la Hernie de 15 sols : relation entre l'indice pathologique et le premier axe factoriel CMPY1 (90 traitements sol-dose d'inoculum).
 Les chiffres indiquent le nombre de points superposés ; des lettres sont utilisées au-delà de 9 (A = 10 ; B = 11 ; ...).
 Comparison of 15 soils for clubroot receptiveness : correlation between disease incidence and the first factor axis CMPY1 (n = 90). Figures indicate the number of superposed points ; letters are used after 9 (A = 10 ; B = 11 ; ...).

L'indice pathologique est très lié au premier axe ; il existe une très forte corrélation (r = 0,995) entre les 2 variables (fig. 2).

B. Analyse de la variance et Analyses Factorielles Discriminantes

1. L'analyse de la variance

Le tableau 1 permet de rendre compte de la grande hétérogénéité des moyennes, quelle que soit la classe considérée ; le critère de Fisher discrimine fortement sur les 2 variables extrêmes CL0 et CL3 : les biologistes, effectuant les notations, rencontrent plus de difficultés à classer les plantes dans les classes intermédiaires CL1 et CL2 que dans les classes extrêmes CL0 et CL3.

2. Première Analyse Factorielle Discriminante : mise en évidence d'une interaction sol-dose d'inoculum

Le pouvoir discriminant du premier axe est mesuré par la valeur du pseudo-F de Fisher (F = 52,73) ; cet axe est défini par :

$$- 0,7271 \text{ CL}_0; - 0,0146 \text{ CL}_1; + 0,4121 \text{ CL}_2; + 1,088 \text{ CL}_3;$$

où CL_j est le nombre moyen de plantes dans la classe j pour le traitement i (*).

Il convient de noter que la fonction affine

$$x \rightarrow \frac{x + 0,7271}{2,2} \times 100$$

permet de transformer les coefficients (0,7271 ;

*L'attention du lecteur est attirée sur le fait que CL0 + CL1 + CL2 + CL3 = CL_i et que par conséquent, il y a lieu, lors de la mise en œuvre, de travailler sur 3 des 4 variables CL_j.

TABLEAU 1

Comparaison de la réceptivité à la Hernie de 15 sols : résultats de l'analyse de la variance sur les 4 variables (CL0, CL1, CL2 et CL3) du modèle à un facteur (90 traitements sol-dose d'inoculum).

Comparison of 15 soils for clubroot receptiveness : analysis of variance table for the 4 variables (CL0, CL1, CL2 et CL3) on the one-way classification model (90 soil-inoculum level treatments).

Variables	Sources de variation	Sommes des carrés des écarts	Degrés de liberté	F calculé
CL0	Entre populations (Inter)	1 671,8	89	30,29**
	Dans les populations (Intra)	223,20	360	
CL1	Inter	105,03	89	3,34**
	Intra	127,20	360	
CL2	Inter	161,42	89	4,08**
	Intra	160,00	360	
CL3	Inter	1 371,3	89	31,37**
	Intra	176,80	360	

** Nombres moyens de plantes significativement différents en fonction des traitements (risque $\alpha = 0.01$).

** Average numbers of plants significantly different according to treatments (α risk = 0.01).

-0,0146 ; 0,4121 ; 1,088) définissant ce premier axe discriminant en les 4 coefficients (0 ; 33,4 ; 51,8 ; 82,5).

L'ensemble des traitements s'échelonne le long de cet axe en fonction de la gravité de la maladie correspondante (fig. 3) ; ce premier facteur (CORO 1) et l'indice pathologique sont très liés ($r = 0,988$). Cette très forte corrélation permet de prédire la valeur de l'indice

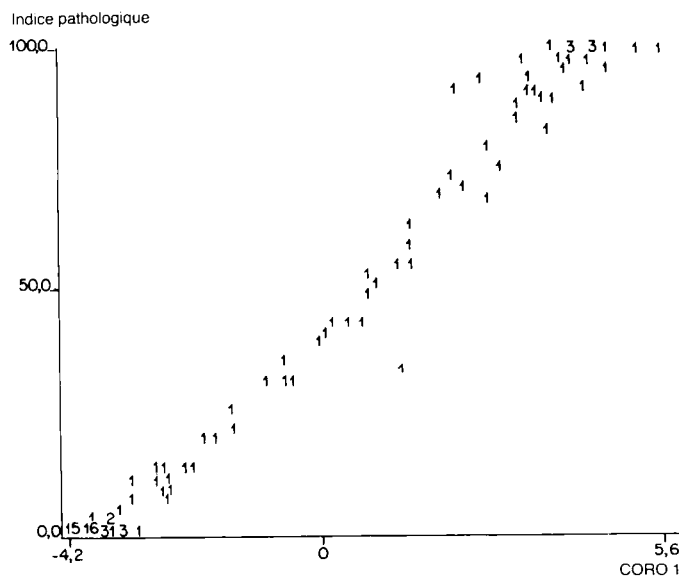


Figure 3

Comparaison de la réceptivité à la Hernie de 15 sols : relation entre l'indice pathologique et le premier axe discriminant CORO 1 (90 traitements sol-dose d'inoculum).

Les chiffres indiquent le nombre de points superposés.

Comparison of 15 soils for clubroot receptiveness : correlation between disease incidence and the first discriminant axis CORO 1 ($n = 90$). Figures indicate the number of superposed points.

pathologique en fonction de la coordonnée sur le premier axe discriminant avec une grande précision. Nous pouvons de plus reconstituer, en portant en abscisses les différentes doses d'inoculum, en ordonnée

les valeurs des traitements sur le premier axe discriminant, les courbes dites de réceptivité utilisées jusqu'ici dans ce domaine.

La visualisation de l'interaction entre les 15 sols et les 6 doses croissantes d'inoculum (fig. 4) aide à préciser l'interprétation de ce premier axe et souligne son intérêt ; nous distinguons :

— des sols réceptifs pour lesquels les attaques sont importantes (abscisses positives), même pour de faibles densités d'inoculum : sols 1, 2, 4, 5 et 8 (les abscisses correspondant à l'absence d'infestation artificielle (dose 1) représentent le potentiel infectieux naturel des 15 sols) ;

— des sols résistants pour lesquels les taux d'attaque demeurent peu élevés (abscisses négatives), quelle que soit la densité d'inoculum : sols 3 et 7.

Les coordonnées des sols les plus typés sont regroupées ; celles des sols intermédiaires s'échelonnent plus ou moins régulièrement le long de l'axe. Les différences entre abscisses varient donc selon les sols considérés, soulignant l'existence d'une interaction entre les facteurs sol et dose.

3. Deuxième Analyse Factorielle Discriminante : classement des sols

Les sols se projettent sur le premier axe de cette nouvelle A.F.D. dans l'ordre croissant de leur réceptivité à la Hernie (fig. 5). Cet axe, très discriminant (pseudo-F = 152,8), a pour définition :

$$-0,6961 \text{ CLO}_i - 0,0681 \text{ CL1}_i + 0,2243 \text{ CL2}_i + 1,117 \text{ CL3}_i \\ i = 1 \dots 15$$

où CL_j est le nombre moyen de plantes dans la classe j pour le sol i .

Comme précédemment, la fonction affine

$$\times \rightarrow \frac{x + 0,6961}{1,8} \times 100$$

transforme les coefficients (-0,6961 ; -0,0681 ; 0,2243 ;

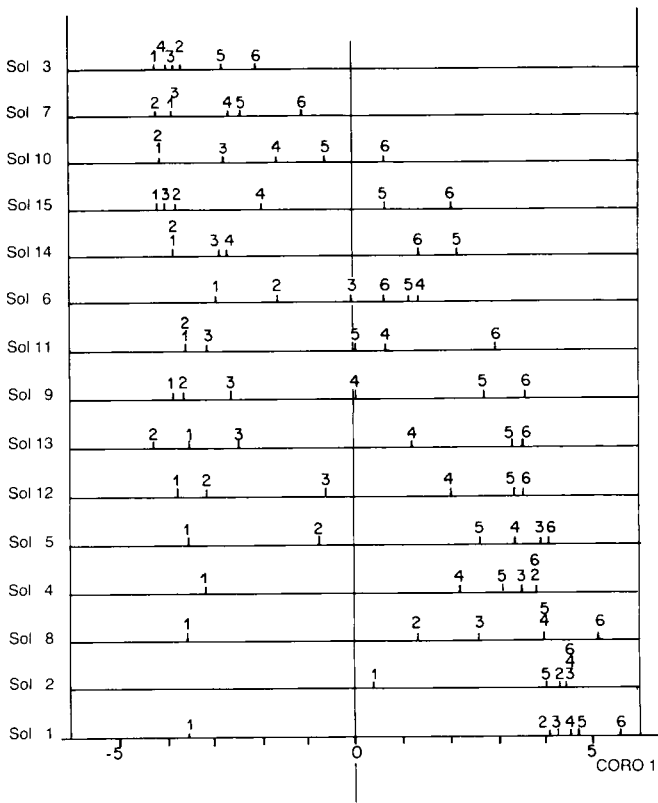


Figure 4
Positionnement des 90 traitements sur le premier axe discriminant (CORO 1) traduisant la gravité de la Hernie dans les 15 sols en fonction des doses d'inoculum de *P. brassicae* (numérotées de 1 à 6). Les niveaux d'attaque sont rangés dans l'ordre croissant de l'abscisse négative vers l'abscisse positive.

Position of the 90 treatments on the first discriminant axis (CORO 1) showing clubroot incidence in 15 soils in relation to inoculum levels of *P. brassicae* (number 1 to 6).

Attacks levels are in increasing order from negative to positive abscissa.

les plus typés de cette nouvelle analyse ; l'interaction sol-dose perturbe faiblement le classement des différents sols.

Une liaison négative très appréciable entre valeurs de pH et niveaux de réceptivité exprimés par les coordonnées sur le premier axe discriminant permet de confirmer l'influence du pH sur la réceptivité des sols à la Hernie : les sols les plus sensibles d'abscisses positives ont des $pH \leq 6,1$ par opposition aux sols plus résistants, d'abscisses négatives.

IV. DISCUSSION — CONCLUSION

L'approche méthodologique proposée dans cet article, qui consiste à décrire les données expérimentales par une Analyse Factorielle des Correspondances, puis à classer les différents traitements (sols) par des Analyses Factorielles Discriminantes, a permis de comparer les niveaux de réceptivité à la Hernie d'une série de sols. Les corrélations très élevées observées entre les premiers axes factoriels et l'indice pathologique précédemment défini confirment tout l'intérêt de cet indice pour l'étude de cette maladie.

La possibilité ainsi offerte au biologiste de classer, de façon précise, les sols selon leur sensibilité à la Hernie à l'aide de l'indice pathologique ou du premier axe discriminant présente un double intérêt : sur le plan de la recherche, le positionnement de chaque sol sur le premier axe discriminant par exemple, constitue un codage unique du niveau de réceptivité qui permet, en utilisant des modèles de régression et/ou des techniques d'analyses multivariées, de tester l'incidence de certains facteurs du milieu (tel le pH des sols) ou de dégager des hypothèses explicatives à partir d'analyse d'enquêtes. Sur le plan agronomique, la possibilité de classer des séries de sols en fonction de leur degré de réceptivité rend envisageable l'établissement de cartes de risques de maladie par région.

Concernant le choix offert à l'expérimentateur entre les 2 critères d'appréciation de la réceptivité des sols, le premier axe discriminant présente la particularité d'être calculé directement à partir des données expérimentales afin de différencier au mieux les sols, contrairement à l'indice pathologique défini sur des bases empiriques ; le premier critère peut donc sembler le mieux adapté, puisque les niveaux de réceptivité doivent précisément rendre compte du comportement global des sols vis-à-vis de l'expression de la maladie, tous les autres facteurs expérimentaux étant identiques pour l'ensemble des sols comparés. Mais dès lors qu'il a pu être validé par l'analyse statistique, comme c'est le cas ici, l'indice pathologique offre les avantages du premier axe factoriel, avec une plus grande simplicité de calcul et une stabilité remarquable, indépendante en particulier des variations d'effectifs entre traitements, parfois inévitables. Il convient donc parfaitement pour l'interprétation courante des analyses de réceptivité.

L'approche statistique présentée ici, en permettant de vérifier la validité d'un indice pathologique, répond en fait à une demande très fréquente chez les biologistes qui sont nombreux à utiliser ce critère d'appréciation sans bases objectives de calcul ; elle est susceptible d'être appliquée à d'autres modèles plante-parasite, pourvu

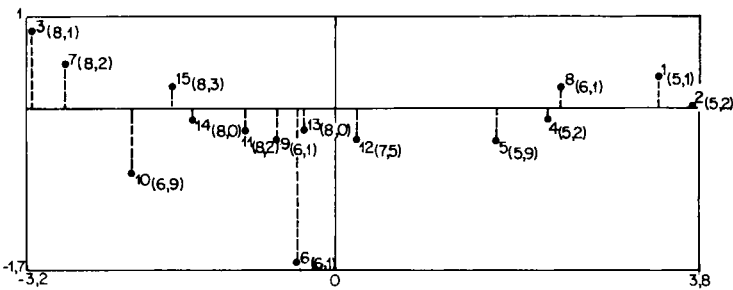


Figure 5
Comparaison de la réceptivité à la Hernie de 15 sols : 1^{er} plan de l'analyse discriminante portant sur le facteur sol. Les 15 sols sont rangés sur le 1^{er} axe dans l'ordre croissant de leurs niveaux de réceptivité, de l'abscisse négative vers l'abscisse positive. Le pH de chaque sol est porté entre parenthèses.

Comparison of 15 soils for clubroot receptiveness : first plane of discriminant analysis on the soil factor ; the 15 soils are ordered on the first axis according to increasing receptiveness levels, from negative to positive abscissa. The soil pH value is in brackets.

1,117) en 4 coefficients (0 ; 34,9 ; 51,1 ; 100,7). Nous validons ainsi par l'analyse statistique l'indice pathologique construit empiriquement.

Les sols réceptifs et résistants mis en évidence par la première analyse discriminante sont également les sols

que des dispositifs expérimentaux consistant à répartir les plantes en différentes catégories en fonction de la gravité de la maladie soient adoptés.

Reçu le 25 octobre 1987.

Accepté le 29 mars 1988.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier M. J. B. Denis pour ses critiques constructives qui ont permis de progresser dans la rédaction de cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alabouvette C., Couteaudier Y., Louvet J.**, 1982. Comparaison de la réceptivité de différents sols et substrats de culture aux Fusarioses vasculaires. *Agronomie*, **2**, (1), 1-6.
- Bachacou J., Masson J. P., Millier C.**, 1981. *Manuel de la programmation statistique Amance*. I.N.R.A. éd., Paris, 515 p.
- Buczacki S. T., Toxopeus H., Mattusch P., Dixon G. R., Hobolth L. A.**, 1985. Study of physiologic specialization in *Plasmidiophora brassicae*; proposals for attempted rationalization through an international approach. *Trans. Br. mycol. Soc.*, **65**, 295-303.
- Caillez F., Pages J. P.**, 1976. *Introduction à l'analyse des données*. Société de Mathématiques Appliquées et de Sciences Humaines éd., Paris, 616 p.
- Corman A., Couteaudier Y., Zegerman M., Alabouvette C.**, 1986. Réceptivité des sols aux Fusarioses vasculaires : Méthode Statistique d'Analyse des résultats. *Agronomie*, **6** (8), 751-757.
- Lebart L., Morineau A., Tabart N.**, 1977. *Techniques de la description statistique. Méthodes et logiciels pour l'analyse des grands tableaux*. Dunod éd., Paris, 351 p.
- Rao C. R.**, 1973. *Linear Statistical Inference and its Applications*. J. Wiley éd., Londres, 625 p.
- Rouxel F., Regnault Y.**, 1985. Comparaison de la réceptivité des sols à la Hernie des Crucifères : application à l'évaluation des risques sur quelques sols à culture de colza oléagineux. 1^{re} J. *études maladies des plantes*, 26-27 février. *ANPP*, **2**, 375-383.