

# LES FONGICIDES DE SOL (\*)

par **K. H. DOMSCH**

*Institut biologique pour l'agriculture et les forêts.*

*Institut de phytopathologie des plantes céréalières, oléagineuses et fourragères de Kiel-Kitzberg (Allemagne).*

Traduit par **E. LAVILLE** et **J.-C. LEFÈVRE**

*Institut Français de Recherches Fruitières Outre-Mer (I. F. A. C.)*

LES FONGICIDES DE SOL

par K. H. Domsch \*

(traduit par E. Laville et J.-C. Lefèvre, I. F. A. C.).

*Fruits*, vol. 21, n° 5, mai 1966, p. 235 à 250.

**RÉSUMÉ.** — Synthèse bibliographique sur les fongicides de sol, traduite de *Annual Review of Phytopathology*, vol. 2, 1964, p. 293-320.

L'auteur développe les principes de base et insiste sur la méthodologie des essais de ces produits mais ne se propose pas de donner une compilation des techniques recommandées, ni des résultats des multiples essais réalisés.

Origine. Seuls quelques-uns de ces produits ont été étudiés spécialement d'abord pour leur emploi en tant que fongicides de sol.

Définition. On distingue les fongicides de sol *sensu lato* et les fongicides de sol *sensu stricto*.

Fonctions. Diffusion dans le sol. Effet immédiat et période d'inhibition.

Expériences à partir de « screening tests ». Propriétés fongitoxiques, fongistatiques, rémanence. Champignons tests, plantes tests, sols tests.

Essais en plein champ. Mode d'application, formulation, facteurs environnants, humidité, considérations économiques, résidus, influence sur les propriétés du sol.

Microflore du sol. Décomposition, influence sur le nombre des organismes, sur l'activité.

Mode d'action. Métabolisme du champignon, populations de champignons pathogènes, recolonisation, approche conjuguée.

217 références.

*Cette synthèse sur les questions posées par les produits fongicides appliqués au sol pour les traitements des maladies radiculaires d'origine fongique, a été traduite d'un article intitulé : « Soil fungicides » de M. le Professeur Klaus H. Domsch, paru dans le volume n° 2, de la revue Annual Review of Phytopathology (\*).*

*Nous avons pensé que cette mise au point récente permettrait à nos lecteurs de langue française d'accéder à une connaissance générale de l'ensemble des travaux actuellement en cours dans ce domaine.*

*Il nous est particulièrement agréable de remercier M. le Professeur Klaus H. Domsch pour l'autorisation qu'il nous a donnée de traduire son travail de synthèse, ainsi que MM. les éditeurs d'Annual Review of Phytopathology pour la bienveillance avec laquelle ils ont accepté la diffusion en langue française de cet article.*

*La bibliographie jointe par l'auteur à cet article s'arrête en janvier 1964. Nous avons pensé qu'il serait intéressant d'y adjoindre une liste complémentaire recueillie sur les documents parus depuis cette date et reçus à la bibliothèque de l'IFAC.*

(\*) Annual Review of Phytopathology, vol. 2, 1964, p. 293-320, directeur J. G. Horsfall, éditeur : Annual Reviews, Inc., Palo Alto, Californie.

## INTRODUCTION

Durant les deux dernières décades, l'application de produits chimiques, destinés à contrôler l'action des champignons pathogènes du sol, s'est constamment accrue. C'est de plus la vocation de la revue *Annual Review of Phytopathology* de plaider pour ou contre ce développement. Mais les discussions récentes sur le bon ou le mauvais usage des pesticides, nous invitent à présenter ce travail avec quelques remarques.

Nous n'ignorons pas que chaque sol naturel est caractérisé par un arrangement bien équilibré et stable. Un sol possédant un haut degré d'organisation peut être appelé « sain » ou, dans un sens plus précis, peut être caractérisé par une productivité régulière. Dans notre contexte un grand nombre de cas de rendements restant faibles proviennent d'un désordre de l'organisation du sol. Les phytopathologistes prennent en considération la reconnaissance d'une causalité et d'une régulation significative. Puisque la recherche sur les fongicides de sol est comparativement un domaine neuf de la pathologie végétale, tout au début, une bonne part des expériences, négatives ou positives, ont été exploitables pour les disciplines voisines. Néanmoins, en théorie et en pratique, nous sommes loin d'atteindre le stade d'un « sol silencieux » (1) et il faut faire remarquer que de même que dans tous les champs d'action de la phytopathologie, l'utilisation de pesticides pour le contrôle des parasites du sol, doit être conseillée seulement dans les cas où les autres moyens culturaux se sont révélés incapables de lutter contre les maladies originaires du sol.

Simultanément, avec l'application pratique, de nouvelles méthodes pour tester ces substances et des nouveaux critères d'estimation de leur mode d'action et de leur efficacité ont été développés, principalement dans les pays possédant un niveau de production agricole élevé.

La complexité de la biologie d'un sol implique que les renseignements soient tout d'abord recueillis à partir d'expériences dont les protocoles simplifient les conditions naturelles. Pour cette raison, dans cet article, quelques-uns des principes de base seront développés, en insistant sur la discussion des méthodes de test. Cependant il n'est pas dans notre intention de donner une compilation de techniques recommandées ou de résultats d'essais de fongicides de sol. Dans l'esprit des *Annual Reviews* cet article sera forcément limité. Pour le lecteur qui serait intéressé par des informations plus détaillées sur les différents aspects des fongicides de sol, un certain nombre d'autres revues sont accessibles (11, 33, 73, 79, 80, 91, 95, 110, 165, 169).

## GENÈSE

Les produits chimiques utilisés contre les champignons pathogènes du sol sont en général appelés « fongicides de sol ». Mais il ne fait aucun doute que si l'on considère le produit en soi, un vrai fongicide de sol n'existait pas du tout avant que récemment quelques substances particulières soient devenues utilisables. En retraçant la courte histoire des fongicides de sol, on reconnaît aisément que ce sont principalement, d'une part le lieu de leur application (le sol) et d'autre part la nature de leur action (fongicide) qui sont responsables du terme « fongicide de sol ».

En gardant présent à l'esprit ce fait, les fongicides de sol les plus courants, peuvent être définis à partir de quatre types de produits chimiques agricoles :

a) Les produits protégeant les semences, utilisés pour la désinfection des graines, qui ayant été reconnus aptes à garantir les semences des invasions des pathogènes du sol (tels que les composés organo-mercuriques, le chloranil, etc.) ont été par conséquent incorporés au sol.

b) Les fongicides utilisés en pulvérisations foliaires avec une grande stabilité et une grande efficacité, qui ont été éprouvés dans les conditions d'application au sol (tels que le T. M. T. D., le zinèbe, le captane, etc.).

c) Les fumigants du sol, qui, possédant un effet biocide total, ont été éprouvés vis-à-vis des champignons du sol (tels que la chloropicrine, le bromure de méthyle, le dibromure d'éthylène, le D. D. fumigant, etc.).

d) Enfin quelques fongicides, qui, spécialement étudiés pour le contrôle des champignons du sol, sont devenus utilisables (tels que le P. C. N. B., le Dexon, ou *p*-diméthylamino-benzène-diazo sodium sulfonate (162), le 2-propène-1,1-dioldiacétate (138, 151), l'acide 4-éthylthio-2-aminobutyrique (101, 115, 187), etc.

## DÉFINITION

L'hétérogénéité de ces composés, rend difficile une définition correcte du terme « fongicide de sol ». Pour faciliter la compréhension des différents termes utilisés dans cette étude, les quatre groupes de

(1) L'auteur fait allusion ici à un livre récent : « Printemps silencieux », de Rachel Carson (traduction : Ed. Plon, Paris), traitant du danger que fait courir à la nature l'utilisation inconsidérée de pesticides.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Abeygunawardena, D. V. W., and Wood, R. K. S., Effect of certain fungicides on *Sclerotium rolfsii* in the soil, *Phytopathology*, **47**, 607-9 (1957)
2. Adams, P. B., and Howard, F. L., Alkyl-arsine oxides as fungicidal and nematocidal agents, *Phytopathology*, **53**, 869 (1963)
3. Aldrich, D. G., and Martin, J. P., Effect of fumigation on some chemical properties of soils, *Soil Sci.*, **73**, 149-59 (1951)
4. Alexander, P. M., Movement of a fungicide, cyano (methylmercuri) guanidine, in sand and in soil, *Dissertation Abstr.*, **19**, 215 (1958)
5. Ashley, M. G., and Leigh, B. L., The action of metham-sodium in soil. 1. Development of an analytical method for the determination of methylisothiocyanate residues in soil, *J. Sci. Food Agr.*, **14**, 148-53 (1963)
6. Ashley, M. G., Leigh, B. L., and Lloyd, L. S., The action of metham-sodium in soil. 2. Factors affecting the removal of methylisothiocyanate residues, *J. Sci. Food Agr.*, **14**, 153-61 (1963)
7. Baker, R., Phillips, D. J., and Martinson, C., Control of *Fusarium* yellows of celery by means of soil fumigation, *Plant Disease Repr.*, **45**, 76-77 (1961)
8. Bald, J. G., and Jefferson, R. N., Interpretation of results from a soil fumigation trial, *Plant Disease Repr.*, **40**, 840-46 (1956)
9. Bartlett, G. W., Gain and loss of resistance in the fungus *Penicillium roqueforti* Thom., *Proc. roy. Soc., Ser. B.*, **150**, 120-30 (1959). *Abst. Rev. Appl. Mycol.*, **38**, 729 (1959)
10. Bird, L. S., Ranney, C. D., and Watkins, G. M., Evaluation of fungicides mixed with the covering soil at planting as a control measure for the cotton seedling disease complex, *Plant Disease Repr.*, **41**, 165-73 (1957)
11. Bollen, W. B., Interactions between pesticides and soil microorganisms, *Ann. Rev. Microbiol.*, **15**, 69-92 (1961)
12. Brinkerhoff, L. A., Oswalt, E. S., and Tomlinson, J. F., Field tests with chemicals for the control of *Rhizoctonia* and other pathogens of cotton seedlings, *Plant Disease Repr.*, **38**, 467-75 (1954)
13. Brodie, B. B., Use of 1,2-dibromo-3-chloropropane as a fungicide against *Pythium ultimum*, *Phytopathology*, **51**, 798-99 (1961)

14. Brown, A. L., Jurinak, J. J., and Martin, P. E., Relation of soil properties to Br uptake by plants following soil fumigation with ethylene dibromide, *Soil Sci.*, **86**, 136-39 (1958)
15. Burchfield, H. P., Comparative stabilities of dyrene, 1-fluoro-2,4-dinitrobenzene, dichlone, and captan in a silt loam soil, *Contrib. Boyce Thompson Inst.*, **20**, 205-15 (1959)
16. Buxton, E. W., Sinha, I., and Ward, V., Soil-borne diseases of Sitka spruce seedlings in a forest nursery, *Trans. Brit. Mycol. Soc.*, **45**, 433-48 (1962)
17. Chandra, P., and Bollen, W., Effects of nabam and mylone on nitrification, soil respiration, and microbial numbers in four Oregon soils, *Soil Sci.*, **92**, 387-93 (1961)
18. Chinn, S. H. F., and Ledingham, R. J., A laboratory method for testing the fungicidal effect of chemicals on fungal spores in soil, *Phytopathology*, **52**, 1041-44 (1962)
19. Corden, M. E., and Young, R. A., The fungicidal activity and sorption of nabam in soil, *Phytopathology*, **50**, 83 (1960)
20. Corden, M. E., and Young, R. A., Changes in soil mycoflora following treatment with fungicides, *Phytopathology*, **51**, 64 (1961)
21. Corden, M. E., and Young, R. A., Evaluation of eradicant soil fungicides in the laboratory, *Phytopathology*, **52**, 503 (1962)
22. Cram, W. H., and Vaartaja, O., Rate and timing of fungicidal soil treatments, *Phytopathology*, **47**, 169-73 (1957)
23. Daines, R. H., Some principles underlying the fungicidal action of mercury in soils, *Phytopathology*, **26**, 90 (1936)
24. Dalton, F. H., and Hurwitz, C., Effect of volatile disinfectants on survival of microflora in soil, *Soil Sci.*, **66**, 233-38 (1948)
25. Dittmann, A. L., Ätiologische Zusammenhänge zwischen Nematoden und Pilzkrankheiten; *Zentr. Bakteriolog. Parasitenk., Abt. II*, **116**, 716-49 (1963)
26. Domsch, K. H., Untersuchungen zur Wirkung einiger Bodenfungicide. *Mitt. Biol. Bundesanstalt*, **H. 97**, 100-6 (1958)
27. Domsch, K. H., Die Wirkung von Bodenfungiciden, I., Wirkstoffspektrum, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **65**, 385-405 (1958)
28. Domsch, K. H., Die Wirkung von Bodenfungiciden II., Wirkungs-dauer, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **65**, 651-56 (1958)
29. Domsch, K. H., Die Wirkung von Bodenfungiciden, III., Quantitative Veränderungen der Bodenflora, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **66**, 17-26, 1959

produits mentionnés ci-dessus, sont considérés comme les « fungicides de sol *sensu lato* ». Cette généralisation tient compte du fait que le terme imprécis de « fungicide de sol », est communément utilisé pour beaucoup de sortes de produits fungicides. Ce terme doit comprendre tous les produits qui en fait sont appliqués au sol, directement contre les champignons pathogènes du sol. Les « fungicides de sol *sensu stricto* », comprennent tous les produits à phytotoxicité faible ou négligeable qui protègent les parties souterraines des plantes contre les attaques des champignons pathogènes du sol, ou qui préviennent la multiplication de ceux-ci. Finalement, les « fungicides de sol » sont des produits, qui, possédant généralement une forte biotoxicité, aident à réduire, ou à faire disparaître les membres nuisibles de la microflore et de la microfaune du sol.

## FONCTIONS

La fonction des fungicides de sol *s. l.* est dirigée contre la présence de pathogènes, ainsi que contre la recolonisation d'un sol désinfecté. Puisque les pathogènes du sol peuvent survivre principalement dans les trois dimensions de l'espace, ainsi que dans une quatrième dimension, celle du temps (118), un fungicide de sol doit pouvoir opérer à la fois dans l'espace et dans le temps.

La pénétration dans l'espace peut être obtenue par diffusion dans les phases liquide ou gazeuse d'un sol. Si aucune de ces conditions n'existe, le fungicide doit cependant être distribué d'une manière homogène dans le sol. Il a été observé que les composés ayant une faible tension de vapeur, en suspension ou en solution (tels que le captane, le Nabame, le P. C. N. B., le zinébe) ne produisaient pas de vapeurs fongitoxiques dans le sol. Mais d'autres comme le mylone, le Vapam, et la dicyanodiamide de méthylmercure sont décomposés rapidement en vapeur dans le sol (5, 108, 160, 161).

Si l'on considère le facteur temps, la survie du pathogène peut être limitée ou par un effet mortel immédiat, ou par une longue période d'inhibition. Ces deux possibilités correspondent aux deux termes d'« éradicant » et de « protecteur », utilisés couramment pour les fungicides foliaires. Même si ces termes usuels sont utilisés pour les fungicides de sol *s. l.*, il reste évident que les conditions de base de l'action des fungicides de sol diffèrent considérablement de celles des fungicides de feuillage. Avec les feuilles, les fruits, etc., le traitement se limite aux deux dimensions de la surface de l'organe à protéger. Dans le sol, un fungicide doit franchir tous les obstacles à sa pénétration dans les trois dimensions de l'espace. Sur les parties aériennes d'une plante, le fungicide doit agir sur un champignon comme dans les conditions d'une monoculture fongique. Dans le sol, la microflore totale exerce une influence, positive ou négative, sur l'action du fungicide. Toutes les parties aériennes d'une plante ont une surface totale relativement faible par rapport au système racinaire. De plus, la racine représente un organe très sensible, « ouvert » au prélèvement d'éléments nutritifs, alors que les feuilles sont beaucoup mieux protégées contre les influences environnantes adverses.

## EXPÉRIENCES A PARTIR D'ÉPREUVES DE TRI (Screening Tests)

Il ne semble pas utile de tenter, sur les bases de notre connaissance actuelle, une interprétation et une revue critique des techniques d'épreuves et d'en discuter leurs principes de base et leurs limitations. Partout où un grand nombre de produits sont soumis à des épreuves de routine, celles-ci doivent être réalisées à une échelle économique et à l'aide de méthodes simples. Dans ce cas, les épreuves de tri sur milieu artificiel sont recommandées. Cependant, la fongitoxicité est un caractère biologique aussi valable qu'un critère chimique. La fongitoxicité est toujours en relation avec la sensibilité des organismes étalons. La fongitoxicité sélective de l'alcool allylique montre que ceci s'applique aussi aux produits qui sont catalogués comme fumigants : par exemple le *Rhizoctonia solani* est très sensible, alors que les espèces de *Pythium* tolèrent souvent une concentration de produit dix fois plus forte (27). Pour cette raison, le plus d'espèces fongiques possible doivent être incluses dans ces épreuves préliminaires de tri, de ce type (72).

La procédure du tri sur milieu artificiel avec les associations fungicides-champignons, possède certains inconvénients. Ceux-ci deviennent apparents lorsque les mêmes produits sont étudiés sur différents milieux nutritifs. Un exemple peut servir pour beaucoup de cas : on a pu montrer que la D.-L.-éthionine était sensiblement vingt fois moins toxique sur milieu à base de Pomme de terre, Dextrose, Agar (P. D. A.) que sur une solution synthétique (101). La teneur en antimétaboliques d'un milieu nutritif complexe, peut être responsable de cette faible action, puisque par exemple la L.-méthionine inhibe l'action de l'éthionine. De plus, les épreuves biologiques, fondées sur la solubilité d'un matériel fungicide dans de l'agar, ou dans une solution nutritive, ne sont généralement pas utilisées dans les procédures de tri et ne donnent généralement pas beaucoup d'informations.

Le caractère préliminaire de ces épreuves de tri, devient également plus évident, lorsque les substances qui se sont révélées pleines de promesses aux épreuves de laboratoire, sont expérimentées

en plein champ (75). Beaucoup d'entre elles faillissent. Il semble que certains de ces échecs puissent être évités, si, tout au début, des décisions claires sont prises, à propos des buts principaux assignés aux épreuves de tri des fongicides. En général, il n'est pas possible de sélectionner des substances fortement toxiques du type fumigant, par les méthodes utilisées dans la sélection des produits seulement fongistatiques, et vice versa. C'est perdre son temps que de tenter les deux en une fois.

L'action biologique d'un produit doit être éprouvée en rapport avec son efficacité fongitoxique.

### Propriétés fongitoxiques.

Un champignon peut être facilement tué en laboratoire, sur milieu artificiel, ou dans des colonnes de terre, des tubes fermés, ou des pots (72, 136, 176, 183, 186). Mais il ne paraît pas réaliste de transposer cette idée d'éradication totale dans les conditions de sol naturel. Dans un sol, et à des doses raisonnables, une forte proportion d'organismes peuvent être éliminés sur une population globale de champignons pathogènes. Les formes au repos demeurent viables jusqu'à un certain point. Pour détruire la masse restante, des concentrations excessives sont nécessaires.

Un modèle mathématique connu, à savoir l'équation de Bald-Jefferson, établit la relation entre la dose d'un produit fumigant et l'infection de plantes tests. L'action cumulative d'un fumigant sur la population des pathogènes du sol, et l'action des pathogènes survivants sur les plantes tests, ont été calculées pour obtenir une courbe sigmoïde asymétrique entre le logarithme de la dose, et le pourcentage de plantes infectées. D'un point de vue plus théorique il devrait être possible, en connaissant l'efficacité du fumigant, exprimée en termes de « fractions d'organismes restants, tués par chaque dose additionnelle de fumigant appliquée », de choisir un produit fumigant correspondant au mieux au degré d'infestation du sol (8).

Puisque chaque augmentation du nombre de pathogènes détruits s'accompagne toujours d'un accroissement de l'influence dépressive sur la microflore non pathogène, on doit accepter avec réserve l'idée de traiter le sol avec de fortes doses de biocides. Même si on désire un travail parfait, les résultats d'une désinfection parfaite d'un sol, ne seront toutefois jamais comparables à la fumigation d'un entrepôt !

L'effet d'un fumigant du sol est le résultat de la concentration du produit multipliée par le temps. Dans le sol, l'action de ces deux facteurs dépend des influences biotiques et abiotiques. De la deuxième loi de la diffusion de Fick, une équation a été dérivée, pour permettre d'étudier sur une base purement théorique, l'influence de facteurs tels que la solubilité du fumigant dans l'eau du sol, l'adsorption du fumigant par les fractions solides du sol et les réactions chimiques. De l'étude mathématique, on peut conclure que l'action du fumigant se déroule en trois étapes : tout d'abord, une diffusion radiale à partir des points d'injection, accompagnée de grandes pertes par la surface du sol (durée inférieure ou égale à un jour), suivie par une étape de transition (deux à quatre jours) et terminée par la troisième étape au cours de laquelle les zones de concentrations se dessinent et s'uniformisent dans le profil du sol. La troisième étape dure jusqu'à ce que le fumigant se soit dissipé du sol (58).

Dans chaque épreuve de laboratoire, le facteur temps peut être mis clairement en évidence, lorsque l'inoculum est exposé à l'action du fongicide selon des temps croissants d'incubation (32, 65, 103, 166, 173). Plus long est le temps d'incubation, plus faible peut être la concentration nécessaire pour détruire complètement l'inoculum. Apparemment ce « facteur d'exposition » reflète l'aptitude d'un fumigant donné, à pénétrer le substratum colonisé par le champignon. Ainsi, ce facteur peut aussi être considéré comme un « facteur de pénétration » (21). Dans des essais comparatifs, il a été observé que la plupart des fumigants du sol présentent ce « facteur d'exposition », alors que les fongicides de sol *s. s.* ne le présentent pas. Quelques substances peuvent pénétrer dans les sections de tige de plante ou dans les disques d'agar, ce sont en particulier le 1-2, dicyano-1-2 dichloroéthylène (21), le tétrachloroéthylrodanide et le « dithiocarbamic acid-formic acidmethyl ester » (32).

Un autre aspect important du facteur temps est la période passée jusqu'à ce que la phytotoxicité ait disparu des sols traités aux fumigants. Cette période d'attente dépend autant des propriétés physiques du produit, que des conditions environnantes. Une épreuve simple, utilisant la sensibilité à la germination de graines (*Lepidium sativum*) permet de comparer l'action de différents produits volatils, dans un sol identique, ou d'un même produit dans des sols différents (137). La mesure de la croissance de jeunes plants de laitue, mis en place à différents moments après la fumigation, dans des sols traités, est aussi une bonne indication utilisable (88).

Une augmentation de température accélérera la disparition des produits toxiques gazeux du sol. Pour la plupart des fumigants, une relation linéaire existe entre la température du sol et le temps nécessaire pour que la phytotoxicité disparaisse (65). Cependant, cette période d'attente entre l'application du produit et la possibilité de plantation des cultures, varie avec les conditions climatiques et aucune recommandation générale ne peut être énoncée.

Les calculs des réponses aux différentes doses dans des expériences en laboratoire avec les fumigants, indiquent que ces produits se caractérisent par des courbes de régression à pente forte. Les concentrations  $E. D_{50}$  et  $E. D_{95}$  sont difficiles à séparer mais peuvent être cependant analysées. Elles ont été définies à l'intérieur d'une gamme très restreinte de concentrations, en comparaison de celle définie pour les fongicides de sol *s. s.* (27). La courbe de réponse à la dose d'un nématicide spécifique comme le 1-2 dibromo-3-chloropropane, montre quelques analogies avec celle des fongicides *s. s.* particulièrement dans l'action de ce produit contre *Pythium ultimum* (13).

Les épreuves de germination de spores dans le sol, se situent entre les épreuves de tri pour les

30. Domsch, K. H., Die Wirkung von Bodenfungiciden, IV., Veränderungen im Spektrum der Bodenpilze, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **67**, 129-50, 1960
31. Domsch, K. H., Erfahrungen mit neueren fungiciden Wirkstoffen im Boden, *Tagungsberichte Deutschen Akad. Landb. wiss. Berlin*, **41**, 61-68 (1961)
32. Domsch, K. H., Prüfung für *Thielaviopsis*- und *Fusarium*-aktive Wirkstoffe, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **69**, 1-17 (1962)
33. Domsch, K. H., Einflüsse von Pflanzenschutzmitteln auf die Bodenmikroflora, *Mitt. Biol. Bundesanstalt, H.* **107**, 52 p., (1963)
34. Domsch, K. H., Der Einfluß saprophytischer Bodenpilze auf die Jugendentwicklung höherer Pflanzen, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **70**, 470-75 (1963)
35. Domsch, K. H., The action of physiologically active substances in the root region, *Intern. Symp. Tschech. Akad. Wiss., Prague* (1963) (In press)
36. Domsch, K. H., Der Einfluß von fungiziden Wirkstoffen auf die Bodenatmung, *Phytopathol. Z.*, (In press 1964)
37. Domsch, K. H., Der Einfluß von Capitan auf den Abbau Glucose, Äsculin, Chitin, und Tannin im Boden, *Phytopathol. Z.* (In preparation)
38. Elsaid, H. M., Adapted tolerance of *Rhizoctonia solani* to increased concentrations of three soil fungicides, *Phytopathology*, **53**, 875 (1963)
39. Elsaid, H. M., and Sinclair, J. B., Adapted tolerance to organic fungicides by an isolate of *Rhizoctonia solani*, *Phytopathology*, **52**, 731 (1962)
40. Elsaid, H. M., and Sinclair, J. B., Effect of temperature on, specificity of, and permanence of adapted tolerance of *Rhizoctonia solani* to organic fungicides, *Phytopathology*, **53**, 622 (1963)
41. Forsberg, J. L., A new method of evaluating fungicides, *Phytopathology*, **39**, 172-74 (1949)
42. Fuhr, I., Bransford, A. V., and Silver, S. D., Sorption of fumigant vapors by soil, *Science*, **107**, 274-75 (1948)
43. Garber, R. H., and Leach, L. D., The use of chemical indicators in the study of distribution of row-treatment fungicides, *Phytopathology*, **47**, 521 (1957)
44. Garren, K. H., Use of specific pesticides in determining probable cause of peanut pod rot, *Phytopathology*, **52**, 1218 (1962)
45. Georgopoulos, S. G., and Thanasouloupolos, C. C., Research on the control of *Sclerotium rolfsii* Sacc. with fungicides, *Ann. Inst. Phytopathol. Benaki, N. S.*, **3**, 65-78 (1960); *Abst. Rev. Appl. Mycol.*, **40**, 655-56 (1961)

46. Georgopoulos, S. G., and Wilhelm, S., Effect of nonsterile soil on *Rhizoctonia solani* mycelium in the presence of PCNB, *Phytopathology*, 52, 361 (1962)
47. Gibson, I. A. S., Trials of fungicides for the control of damping-off in pine seedlings, *E. African Agri. J.*, 21, 96-102 (1955); *Abstr. Rev. Appl. Mycol.*, 35, 798 (1956)
48. Gibson, I. A. S., An anomalous effect of soil treatment with ethyl mercury phosphate on the incidence of damping-off in pine seedlings, *Phytopathology*, 46, 181 (1956)
49. Gibson, I. A. S., Ledger, M., and Boehm, E., An anomalous effect of pentachloronitrobenzene on the incidence of damping-off caused by a *Pythium* sp., *Phytopathology*, 51, 531-33 (1961)
50. Gondo, M., and Kubo, T., Effect of some fungicides on *Helicobasidium mompa* Tanaka in soil., *Bull. Fac. Agr. Kagoshima Univ.*, 6, 101-7 (1957); *Abstr. Rev. Appl. Mycol.*, 37, 677 (1958)
51. Goring, C. A. I., Control of nitrification by 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine, *Soil Sci.*, 93, 211-18 (1962)
52. Gould, C. J., Soil treatment tests for the control of *Sclerotium rolfsii* in bulbous iris. *Phytopathology*, 44, 489-90, (1954)
53. Gray, R. A. and Streim, H. G., Identification of a nonvolatile phytotoxic impurity in vapam and preventing its formation, *Phytopathology*, 52, 734 (1962)
54. Großmann, F., Untersuchungen über die Hemmung pektolytischer Enzyme von *Fusarium oxysporum* f. *lycopersici*, III, Wirkung einiger Hemmstoffe *in vivo*, *Phytopathol. Z.*, 45, 139-59 (1962)
55. Hansen, E. W., and McCalla, T. M., Effects of fumigation in a stubble mulch system on the biological and related properties of the soil, *Bacteriol. Proc.*, 58, 7 (1958)
56. Hanson, W. J., and Nex, R. W., Diffusion of ethylene dibromide in soils, *Soil, Sci.*, 76, 209-14 (1953)
57. Hartzfeld, F. G., Terraclor, a new soil fungicide, *Agr. Chem.*, 21, 31-33 (1957)
58. Hemwall, J. B., Theoretical consideration of soil fumigation, *Phytopathology*, 52, 1108-15 (1962)
59. Hilborn, M. T., Effect of various chemicals on infection by *Rhizoctonia solani* and *Verticillium albo-atrum*, *Phytopathology*, 43, 475 (1953)
60. Hildebrand, A. A., Soil treatment with arasan for the control of blackroot of sugar beet seedlings, *Proc. Can. Phytopathol. Soc.*, 16, 16 (1949)
61. Hildebrand, A. A., McKeen, W. E., and Koch, L. W., Row treatment of soil with tetramethylthiuram disulphide for control of blackroot of sugar-beet seedlings, I, Greenhouse tests, *Can. J. Res. Sect. C*, 27, 23-43 (1949)

fumigants, et celles pour les fongicides de sol *s. s.* Une variante de la méthode de viabilité par flotation appliquée à *Helminthosporium sativum*, à *Fusarium culmorum* et à *Alternaria solani*, comme champignons tests, donne une corrélation satisfaisante avec les épreuves de semis (18).

#### Propriétés fongistatiques.

L'inhibition des champignons pathogènes est le principe fondamental d'action de la plupart des fongicides de sol *s. s.* Ils peuvent affecter la reproduction ou la croissance. Apparemment cette distinction est moins importante avec les fongicides de sol qu'avec les fongicides de feuillage, parce qu'il y a moins de dispersion de spores dans le sol que dans l'air.

Le principe d'inhibition inclut un large éventail de réactions possibles, et par conséquent facilite le développement de produits possédant une action spécifique. Dans cette optique, la sélectivité doit être considérée comme une situation extrême dans la sensibilité naturelle graduelle des champignons du sol. Une forte sensibilité peut être décelée dans un groupe d'organismes (cf. Pythiacées) relativement à la microflore, vis-à-vis des fongicides sélectifs tels que le Dexon ou O-O-O-triméthylphosphorothioate, et vice versa vis-à-vis de quelques antibiotiques (pimaricine, endomycine). Le simple fait qu'un produit soit plus actif qu'un autre pour le contrôle d'un seul champignon, ou d'un groupe de champignons, ne doit pas être accepté comme un critère suffisant pour le classer comme fongicide de sol spécifique.

Actuellement de nombreux produits sont utilisables, et remplissent plus ou moins les conditions requises d'efficacité pour un fongicide de sol *s. l.* Par conséquent, il semble raisonnable de mener les épreuves avec des fongicides standards, aux doses actives minimum du standard (32). Les fongicides standards, au sens large, possèdent une forte activité, et qui sont utilisables et recommandables, sont les suivants : la chloropicrine, le Vapam, le méthylisothiocyanate, le Mylone, le captane, le Dexon, le P. C. N. B. Cependant en essais de laboratoire, la formulation des fongicides de sol a une importance mineure (comparée à celles des fongicides foliaires) et toute comparaison de résultats doit être fondée sur le pourcentage de matière active.

#### Rémanence.

La rémanence est un autre critère important pour les fongicides de sol *s. s.* Après avoir consulté la littérature disponible sur ce sujet, il semble qu'une confusion notable prévaut sur ce point. Un fongicide de sol peut conserver principalement la possibilité de contrôler une maladie ou un champignon. En outre, il peut demeurer stable en tant que produit, ou rester actif dans ses effets biologiques. Si l'on utilise un indicateur biologique pour estimer la rémanence, on ne peut savoir si c'est le produit lui-même, ou un produit de sa décomposition qui est responsable de son activité. Les résultats obtenus à partir d'analyses chimiques n'intéressent que le produit original, et ne doivent être interprétés en termes d'activité biologique, qu'avec réserves.

D'un point de vue chimique, la stabilité d'un fongicide peut dépendre de ses réactions avec les groupements actifs. On a proposé d'utiliser comme critère de stabilité la notion de « spécificité de groupe », par exemple les réactions d'un fongicide avec les groupes sulfhydryle, par rapport aux réactions de ce même produit avec les groupes aminés (15). Le captane, par exemple, possède une « spécificité de groupes aminés » élevée, par rapport au Dyrène (2-4-dichloro-6[*o*-chloroaniline]-s-triazine).

Dans un limon fin, le captane est à peu près sept fois plus stable que le Dyrène. Le Nabame perd rapidement, après application, la possibilité de diffuser. La détoxification du Nabame aussi bien que celle du Ferbam, qui est plus rémanent que le Nabame, est abiotique (106). Les composés organomercuriques, sont généralement réduits en sels métalliques, très tôt après leur contact avec le sol. La dispersion des composés métalliques mercuriques, est limitée par la présence de substances précipitantes, par la capacité de sorption du sol vis-à-vis du mercure et par le potentiel d'oxydation du sol (23). Sous l'influence de la lumière, le *p*-diméthylamino-benzènediazole sodium sulfonate subit une réaction photo-chimique. Le composé diazonium correspondant se forme et dans une réaction ultérieure le composé *p*-diméthyl aminophénol aussi. Les étapes suivantes sont des réactions d'oxydation et de polymérisation. Les produits de la réaction ont perdu les propriétés fongicides du matériel original (64, 162).

Puisque les réactions dépendent des possibilités des deux membres, elle est aussi fortement influencée par les conditions chimiques du sol. C'est apparemment l'explication de la très grande variation des observations sur la rémanence dans le sol (57, 60, 74, 129, 135, 150, 167). Une autre raison du défaut de concordance dans les résultats, est la dépendance directe de la rémanence du fongicide avec sa concentration. Plus la dose appliquée est élevée, plus longtemps se fait sentir l'effet fongicide, et plus faible est le taux de décomposition (28, 167).

D'une part, nous désirons utiliser une faible concentration, pour des raisons d'hygiène du sol. D'autre part une forte rémanence du fongicide durant la croissance de la plante est nécessaire. Pour obtenir un compromis raisonnable entre ces deux exigences, un rapport de 10 à 1 a été défini entre la dose d'application (en p. p. m.) et la demi-période de vie (en jours) du fongicide de sol. Les produits qui correspondent à ce postulat en conservant une demi-période de vie fongicide (et non de vie chimique) sont par exemple le captane (demi-période de vie supérieure à cinquante jours), le T. M. T. D., le Nabame (demi-période de vie inférieure à cinquante jours) (28).

Il y a deux moyens de caractériser la rémanence d'un fongicide dans un sol : par la détermination de l'activité résiduelle du fongicide, ou par la viabilité résiduelle des champignons pathogènes.

Dans le premier cas, le fongicide est incorporé dans le sol, au début de l'expérience, et observé périodiquement par des inoculations répétées de champignons pathogènes dans le sol et la mise en place de semences ou de plantes sensibles après des périodes de temps données. La seconde méthode consiste à traiter et à infester un sol une seule fois, et à contrôler ensuite l'apparition ou à prévenir la recolonisation, après certaines périodes, en utilisant des plantes indicatrices.

Ainsi qu'il a été mentionné ci-dessus, un fumigant du sol idéal doit disparaître très tôt après traitement. Il semble que ce concept nécessite une interprétation complémentaire puisque le critère de l'efficacité d'un fumigant est son action destructrice, et que les concentrations subtoxiques (pour les pathogènes ou pour les plantes) ne sont généralement pas observées. Mais la présence de concentrations subtoxiques semble avoir un effet additionnel important sur chaque application efficace de fumigants. Par conséquent, chaque fumigant qui ne disparaît pas complètement, mais qui demeure dans le sol à de faibles concentrations, contribue à la stabilité de l'action, en prévenant une recolonisation rapide (31, 32, 169, 179, 182). En gros, les fumigants qui nécessitent un temps long pour disparaître du sol appartiennent à ce groupe de produits. Des représentants typiques de ce groupe sont par exemple le disulfure de N,N-diméthylthiurame et le sel de zinc du N-méthyl-dithiocarbamate (32). Il est intéressant de voir combien la séparation artificielle entre fumigants et fongicides s. s. est comblée jusqu'à un certain point, et il est souhaitable que de meilleurs et de plus nombreux produits de ce type puissent être utilisés dans l'avenir.

### Champignons tests.

Un essai fongicide peut être influencé par le « potentiel d'inoculum ». L'âge, l'état physiologique, le stade d'activité sont les facteurs essentiels définissant le « potentiel d'inoculum ». Habituellement les jeunes mycéliums sont plus résistants aux fongicides que les vieux (183), et les mycéliums moribonds plus sensibles que ceux en bon état physiologique (148), de plus, les stades inactifs, ou de repos, sont plus résistants que les stades de croissance active. Finalement différents types de formes de repos (allant des sporangiospores aux sclérotés) présentent certainement, dans la plupart des cas, des sensibilités différentes.

Parce qu'il n'est pas possible d'agir à tous les stades d'activité d'un champignon donné, et que le potentiel d'inoculum d'un sol infesté, en plein champ, en pépinière ou en serre, n'est pas analysable chaque jour, la forme de survie typique et la mieux adaptée d'un champignon donné, doit être considérée dans les tests fongicides. Dans l'avenir, il sera nécessaire d'observer plus soigneusement les courtes périodes de temps durant lesquelles les champignons pathogènes demeurent au stade de croissance active. Pour cette raison et pour d'autres encore, un inoculum, constitué de mycélium nu (41), n'est guère utilisable pour les tests fongicides si le fongicide est incorporé au sol immédiatement après l'inoculation. Il n'y a aucun doute que dans le sol, les filaments mycéliens sont liés aux différents substrats qu'ils doivent coloniser et qu'il importe de prévenir cet envahissement (96, 143).

La densité de l'inoculum doit être envisagée dans ce contexte séparément d'avec le potentiel d'inoculum. A partir de nombreux exemples, il est bien admis, mais cela n'est pas totalement connu de l'auteur, qu'une densité élevée d'inoculum nécessite un taux plus élevé pour un contrôle efficace (7, 12, 87).

Au laboratoire, avec *Pythium irregulare*, on a montré qu'il existait une relation linéaire entre le logarithme de la dose fongicide (avec le thiuram, la méthylmercure dicyanodiamide), nécessaire pour un contrôle de 50 p. cent de la maladie, et le logarithme de la densité d'inoculum (131).

### Plantes tests.

Les Angiospermes et les champignons ont beaucoup de réactions métaboliques communes. Pour cette raison, il est difficile de trouver des substances possédant un fort pouvoir antifongique, et une faible phytotoxicité. Toute recherche de base sur les fongicides devrait inventorier échelon par échelon, les principales différences dans les métabolismes. Ce problème présente un certain nombre de difficultés en ce qui concerne les fongicides de feuillage, mais celles-ci sont encore plus grandes avec les fongicides de sol.

Il est très utile de caractériser la relation existant entre la fongitoxicité et la phytotoxicité par un indice, appelé « indice chimiothérapeutique » ou c. i. (chemotherapeutic index). Ce terme a été introduit de la pharmacologie à la phytopathologie, et représente la relation entre la dose curative (d. c.) et la dose toxique (d. t.), c'est-à-dire  $c. i. = \frac{d. t.}{d. c.}$ . Il est normal de considérer comme dose

curative, une concentration qui permet un contrôle supérieur ou égal à 99,5 p. cent, et comme dose toxique, la concentration avec laquelle apparaissent les premiers signes de phytotoxicité. Le captane, le zinèbe, le Dexon (27) sont des exemples de produits possédant un faible indice chimiothérapeutique (0,05 à 0,1). Les composés organo-mercuriques ont en général un c. i. voisin de 0,5 mais il existe des différences significatives de phytotoxicité dans ce groupe. Le chlorure éthylmercure, le benzoate méthylmercure et la dicyanodiamide de méthylmercure sont fortement toxiques, alors que le pyrocatechol phénylmercure est bien toléré par les plantes (168).

En laboratoire, les essais sont fondés sur une toxicité aiguë. En plein champ, d'autres observations sur la phytotoxicité d'accumulation doivent être prévues. Jusqu'ici, aucun cas de phytotoxicité résultant de l'accumulation de produit n'a été mentionnée. Dans cette optique, on doit gar-

62. Hills, F. J., Studies on uptake and translocation of  $C^{14}$ -labeled *p*-dimethylaminobenzene diazo sodium sulfonate (Dexon) by sugar beet seedlings, *Phytopathology*, 50, 639 (1960)
63. Hills, F. J., Uptake, translocation, and chemotherapeutic effect of *p*-dimethylaminobenzene diazo sodium sulfonate (Dexon) in sugar beet seedlings, *Phytopathology*, 52, 389-392 (1962)
64. Hills, F. J., and Leach, L. D., Photochemical decomposition and biological activity of *p*-dimethylaminobenzene diazo sodium sulfonate (Dexon), *Phytopathology*, 52, 51-56 (1962)
65. Homeyer, B., Zur chemischen Bodenuntersuchung, *Mitt. Biol. Bundesanst.*, H. 108, 98-104 (1963)
66. Hughes, J. T., Preliminary observations on the conversion of sodium N-methyldithiocarbamate (metham sodium) to methyl-isothiocyanate in soil, *Glassh. Crops Res. Inst. Rept.*, 1959, 108-11 (1960); *Abst. Soils Fertilizers*, 24, 231 (1961)
67. Ichikawa, S. T., Gilpatrick, J. D., and McBeth, C. W., Soil diffusion pattern of 1,2-dibromo-3-chloropropane, *Phytopathology*, 45, 576-78 (1955)
68. Jacks, H., and Smith, H. C., Soil disinfection, XII, Effect of fumigants on growth of soil fungi in culture, *New Zealand J. Sci., Technol. Sect. A*, 33, 69-73 (1952)
69. Jensen, H. L., Biologisk sønderdeling af ukrudtsmidler i jordbunden, II, Allylalkohol, *Tidsskr. Planteavl*, 65, 185-98 (1961)
70. Johnson, F. R., and Hillis, A. M., A fluorescent mineral tracer technique to determine fungicide placement in the soil profile, *Plant Disease Rept.*, 42, 287 (1958)
71. Kendrick, J. B., Jr., Comparative fungitoxicity of some mono- and dialkylsubstituted dithiocarbamate vapors and solutions, *Phytopathology*, 50, 641 (1960)
72. Kendrick, J. B., Jr., and Zentmyer, G. A., Laboratory evaluation of chemicals as potential soil fungicides, *Phytopathology*, 47, 20 (1957)
73. Kendrick, J. B., Jr., and Zentmyer, G. A., Recent advances in control of soil fungi, *Advan. Pest Control Res.*, 1, 219-75 (1957)
74. Kennedy, B. W., and Brinkerhoff, L. A., Comparison of four soil fungicides in the greenhouse for the control of seedling diseases of cotton. *Plant Disease Rept.*, 43, 90-97, (1959)
75. Klomprens, W., and Vaughn, J. R., The correlation of laboratory screening of turf fungicides with field results. *Mich. Agr. Expt. Sta. Quart. Bull.*, 34, 425-35 (1952)

76. Klotz, L. J., DeWolfe, T. A., and Baines, R. C., Laboratory method for testing effectiveness of soil disinfectants, *Plant Disease Repr.*, **43**, 1174-75 (1959)
77. Kötter, C., Ein Beitrag zur Wirkung von Trapex (Methylisothiocyanat) gegen parasitische und saprophytische Bodenpilze, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **70**, 342-44 (1963)
78. Kötter, C., Willenbrinck, J., und Junkmann, K., Der Abbau von <sup>35</sup>S-markiertem Methylsenföl in verschiedenen Böden, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **68**, 407-11 (1961)
79. Kreutzer, W. A., Soil fungicides. *Recent Advan. Botany, I & II*, 466-81 (1961)
80. Kreutzer, W. A., Selective toxicity of chemicals to soil microorganisms, *Ann. Rev. Phytopathol.*, **1**, 101-26 (1963)
81. Kreutzer, W. A., The reinfestation of treated soil, In Intern. Symp. *Factors determining the behavior of plant pathogens in soil*, Berkeley (In press)
82. Lambe, R. C., The influence of temperature, moisture, and method of application on the fungitoxicity of mylone and vapam, *Dissertation Abstr.*, **21**, 418 (1960)
83. Lapensee, J. M., Chemicals and biological changes effected in certain Ohio soils by partial sterilization and plant growth relationships, *Dissertation Abstr.*, **20**, 1918-20 (1959)
84. Latham, A. J., The soil-column method and other techniques for evaluating soil fungicides, *Dissertation Abstr.*, **22**, 3342 (1962)
85. Legator, M., and Racusen, D., Mechanism of allyl alcohol toxicity, *J. Bacteriol.*, **77**, 120-21 (1959)
86. Linden, G. und Schicke, P., Untersuchungen über die fungizide und herbizide Wirkung von Vapam im Boden unter Berücksichtigung von Eindringtiefe, Adsorption und Karenzzeit, *Mededel. Landbouwhogeschool, Opzoekingssta. Gent*, **22**, 399-418 (1957)
87. Livingston, C. H., Nagayoshi, Oshima, and Morrill, C. C., Evaluation of tetraclor (pentachloronitrobenzene) as a control measure for *Rhizoctonia* disease of potatoes, *Phytopathology*, **52**, 18 (1962)
88. Lloyd, G. A., The elimination of methylisothiocyanate from soil after treatment with methamsodium, *J. Sci. Food Agr.*, **13**, 309-15 (1962)
89. Maier, C. R., In-the-furrow application of soil fungicides for control of cotton seedling diseases, *Plant Disease Repr.*, **45**, 276-80 (1961)
90. Maier, C. R. Response of selected *Rhizoctonia solani* isolates to different soil chemicals in culture tests, *Phytopathology*, **52**, 19 (1962)

der présent à l'esprit que la concentration d'un produit dans le sol ne saurait doubler avec des doses constantes d'application, aussi longtemps que la demi-période de vie du produit (en tenant compte de la phytotoxicité), reste égale ou inférieure à la période séparant deux applications successives.

#### Les sols tests.

On sait que le sol lui-même a une influence sur l'action et le mouvement des fongicides, par la « sorption » sur les particules d'argile ou les particules organiques par les liaisons ioniques, covalente, et les liaisons hydrogène de Van der Waal's (6, 84, 99, 133, 143). Le mouvement des fongicides diffusibles et non volatils est lié à la texture du sol (la pénétration dans un terrain argilo-sableux étant meilleure que dans un terrain argileux). Le lessivage n'a pas d'effet lorsque les suspensions sont arrêtées par des actions de filtre comme dans la tourbe, ou dans la mousse, ou dans des mélanges tourbe-mousse. Les petite particules (diamètre voisin de 1,05  $\mu$ ) d'une suspension de fongicide, pénètrent mieux à travers les sols de texture grossière que les particules plus grandes (diamètre de 14,5  $\mu$ ) (107).

Il est intéressant de noter, non seulement les différences entre les sols, vis-à-vis d'un produit donné, mais aussi de remarquer que des substances très voisines se comportent de manières différentes dans un même sol. Deux composés organo-mercuriques ont, par exemple, des sorptions tout à fait distinctes dans le sol ; l'iodure méthylmercure se combine avec le sol sans rien perdre de son activité fongicide alors que le phosphate éthylmercure franchement fongicide au début perd son activité après lessivage. Deux autres produits, le chlorure méthoxyméthylmercure et l'acétate phénylmercure, sont faiblement fongicides d'un bout à l'autre (50, 149 et autres).

En relation avec la sorption, quelques remarques générales peuvent être faites :

- les produits possédant un fort degré d'ionisation sont très fortement adsorbés sur les micelles colloïdales de silico-alumine, chargées négativement des minéraux argileux ;
- la sorption dépend du degré d'hydratation des micelles argileuses. Une forte adsorption des composés polarisés (cf. alcools allyliques ou formaldéhydes) est associée avec une forte hydratation de ces composés ;
- les produits possédant une faible solubilité dans l'eau (bromure de méthyle) sont seulement faiblement sorbés (42, 79).

En combinaison avec la pénétration ci-dessus mentionnée des fumigants, dans les substrats organiques, la pénétration dans un certain volume de sol peut être étudiée en laboratoire. Plusieurs méthodes sont utilisables : des colonnes de sol, avec des disques de papiers filtres imprégnés du champignon (152) ; avec des racines infectées (76) ; avec le champignon test sur un substrat naturel (111) ; des colonnes de sol débitées et dont les fractions sont mises à l'épreuve par des essais biologiques (105) ; des essais biologiques ou chimiques sur les effluents des colonnes de sol (4).

Les facteurs agissant d'abord indépendamment des propriétés de sol sont en général la tension de vapeur et le poids spécifique. Ils peuvent servir à déterminer l'étendue et la direction de la pénétration dans le sol : la chloropicrine, par exemple, diffuse dans toutes les directions ; mais le bromure d'allyle migre seulement vers le bas (176) ; le 1-2 dibromo-3-chloropropane possède une faible tension de vapeur et ne diffuse que très lentement. Il ne devient fortement actif qu'entre deux et neuf semaines après application (67).

## ESSAIS EN PLEIN CHAMP

Dans les essais en champs, un certain nombre de facteurs additionnels entrent en ligne de compte. Il faut mentionner, par exemple, le mode d'application, l'influence de la température, l'humidité, la lumière, les traitements mécaniques préalables du sol, le problème des résidus chimiques, les changements dans les propriétés physico-chimiques du sol, et les considérations économiques.

#### Mode d'application.

Dans la plupart des cas les fumigants sont injectés à la main ou mécaniquement. Ils peuvent être aussi vaporisés sous couverture plastique (bromure de méthyle) ou utilisés en arrosage (vapeur, alcool allylique) ou en poudrage (mylone). Quelques produits sont appliqués en épandage, en traitement du sillon, ou en traitement en passe, et en relation avec l'irrigation. La méthode d'application dépend du produit (fumigants ou fongicides de sol s. s.) et de la formulation. L'activité des fumigants est augmentée en colmatant la surface du sol, par l'eau, ou par une feuille de plastique.

Si cela est possible, des traitements répétés, avec de faibles doses de fongicides de sol s. s., donnent de meilleurs résultats qu'une seule application à forte dose (22). Dans les cas particuliers, comme celui de la lutte contre *Sclerotinia trifoliorum* sur le trèfle, le nombre de traitements et la dose (P. C. N. B.) peuvent être de moindre importance que la date d'application (181).

Plusieurs techniques ont été envisagées pour étudier dans les différents profils du sol la distribution des fongicides appliqués dans le sillon. Les colorants fluorescents, les minéraux (willemite) ou le rubidium 86 radio-actif semblent devoir être prometteurs (43, 70, 128). Les outils de labour, qui favorisent l'incorporation de fongicides granulés dans les sols sableux tels que la charrue rotative à couteaux et pointes, les herbes à dents ou à disques, sont à retenir (112).

Deux applications inhabituelles de fongicides peuvent être citées : le Vapam qui a été utilisé en action chemothérapeutique à faible concentration contre *Phytophthora cinnamomi* sur avocatier (184) et le bromure de méthyle en fumigation (à plus de 350 kg par hectare) sur des sols infectés par *Pythium ultimum* simultanément avec des semis de melons, a fourni des levées cinq fois meilleures que dans les rangées non traitées (175).

#### Formulation.

Les préparations fongicides sont formulées sous forme de suspensions, de solutions, d'émulsions ou de poudres. Les fongicides solubles dans l'eau ne sont pas utilisables dans un grand nombre de cas. Quelques-uns d'entre eux sont rapidement décomposés dans le sol. En raison de leurs propriétés physico-chimiques, ils peuvent être aussi fortement adsorbés. Il est donc recommandé d'utiliser les fongicides de ce type (Nabame par exemple) plutôt en les mélangeant au sol qu'en arrosage (19). Pour profiter de l'action énergétique initiale, et pour éviter les inconvénients d'une période de vie courte, on peut utiliser un mélange de fongicides solubles et insolubles dans l'eau pour obtenir un contrôle rapide et continu (146). Les suspensions de fongicides sont retenues dans les couches supérieures du sol, et peuvent causer de sérieux dégâts par accumulation de fortes concentrations dans ces couches (1). Un traitement de la surface du sol peut être suffisant selon l'emplacement de l'infection (pourritures de la base de la tige) ou la zone de traitement (prévention de la sporulation à la surface du sol, par exemple avec *Cercospora herpotrichoides*). Si, par ailleurs, les suspensions sont utilisées pour contrôler des maladies radicaires, elles doivent être incorporées dans le sol. Les émulsions fongicides sont fréquemment plus efficaces que les suspensions (27). Les solvants organiques ou les adjuvants peuvent avoir des effets synergiques (97). Pour ces raisons, des mélanges de fumigants peuvent être plus efficaces que les composés simples. C'est probablement ce qui est obtenu dans les différentes actions de la chloropicrine, et du mélange chloropicrine-bromure de méthyle dans la lutte contre le *Verticillium* du Wilt du fraisier (177). Une action semblable a été observée avec des mélanges insecticide + fongicide : des combinaisons de T. M. T. D., de captane ou de Spergon avec l'aldrine, la dieldrine, ou le lindane, assurent une meilleure protection contre *Pythium ultimum* ou *Rhizoctonia solani*, qu'un fongicide seul (130).

#### Facteurs environnants.

Les facteurs environnants ayant une influence sur l'action fongicide aussi bien que sur la récolte et la croissance du champignon, il est difficile de distinguer entre les nombreux effets exercés par ces facteurs. En général, aux températures basses, la croissance de l'hôte est ralentie et les champignons qui occasionnent par exemple les fontes de semis, sont fortement favorisés. Aussi l'action d'un fongicide sera-t-elle comparativement plus basse, à faible température (74). Dans la mesure où l'infection elle-même dépend de la température (lorsque les champignons sont adaptés aux basses ou aux fortes températures), uniquement des fongicides indépendants de la température, seuls ou en mélanges, doivent être utilisés (127).

La tension de vapeur des fumigants s'accroît avec la température. En même temps, les conditions de pénétration et, par là même, la diffusion dans l'air, sont augmentées. La perte du fumigant par diffusion dans l'air peut devenir extrêmement forte dans des conditions extrêmes, en sols tropicaux ou subtropicaux. Des fumigants (comme l'isothiocyanate de méthyle) ne peuvent pas alors pénétrer à la profondeur désirée, sans que le sol ne soit recouvert d'un film plastique, aussitôt après l'application (132). L'influence de la température a été considérée comme négligeable pour le Vapam, entre 6° et 20° C (172). Mais bien que le pourcentage d'isothiocyanate de méthyle émis à partir du Vapam varie directement avec la température (6, 160) cette observation ne peut être apparemment généralisée. De plus, si un fumigant est en contact prolongé avec un champignon à basse température (voir facteur d'exposition) il peut présenter un effet accru. Cet effet peut être complètement masqué si le fumigant est appliqué à une dose très élevée et fongitoxique. Il n'est pas improbable que certains fongicides aient un optimum de température différent, pour différents champignons, ainsi que cela a été observé pour le Mylone (pour une température supérieure à 25° C) et pour le Vapam (aux environs de 20° C) contre *Verticillium albo-atrum* (82).

De fortes températures survenant après l'application de T. M. T. D. occasionnent des effets phytotoxiques (61).

#### Degré hygrométrique.

L'humidité et la température d'un sol ont une influence sur l'activité métabolique des pathogènes. L'humidité et la température peuvent affecter à la fois la pénétration du produit et le degré de sensibilité du pathogène (134, 144). Pour la pénétration des fumigants, un fort degré hygrométrique est plus désavantageux qu'un faible degré. Pour les produits insolubles dans l'eau, un optimum hygrométrique doit certainement être recherché, et les conditions extrêmes évitées (84, 86, 123, etc.). Le point de flétrissement permet de déterminer un degré hygrométrique critique pour l'action du dibromure d'éthylène (56). Les produits solubles dans l'eau, ayant une faible tension de vapeur (par exemple le formaldéhyde) migrent aussi loin que l'eau du sol permet leur diffusion. Une forte humidité du sol accroît leur action (135).

91. Martin, J. P., Influence of pesticide residues on soil microbiological and chemical properties, *Residue Rev.*, **4**, 96-129, (1963)
92. Martin, J. P., and Aldrich, D. G., Effect of fumigation on soil aggregation, *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, **16**, 201-3 (1952)
93. Martin, J. P., Baines, R. C., and Page, A. L., Observations on the occasional temporary growth inhibition of citrus seedlings following heat or fumigation treatment of soil, *Soil Sci.*, **95**, 175-85 (1963)
94. Martin, J. P., Helmkamp, G. K., and Ervin, J. O., Effect of bromine from a soil fumigant and from CaBr<sub>2</sub> on growth and chemical composition of citrus plants, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **20**, 209 (1956)
95. Martin, J. P., and Pratt, P. F., Fumigants, fungicides, and the soil, *J. Agr. Food Chem.*, **6**, 345-48 (1958)
96. Matuo, T., and Sakurai, Y., On the fungicidal effect of chloropicrin and other new drugs upon *Rosellinia necatrix* and *Corticium centrifugum* in the soil, *J. Seric. Sci. Japan*, **28**, 395-401 (1959); *Abst. Rev. Appl. Mycol.*, **39**, 638 (1960)
97. Maurer, C. L., Baker, R., Philips, D. J., and Danielson, L., Evaluation of applied soil fumigants with the soil microbiological sampling tube, *Phytopathology*, **52**, 957-59 (1962)
98. McCalla, T. M., Haskins, F. A., and Curley, R. D., Soil aggregation by microorganisms following soil fumigation, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **22**, 311-14 (1958)
99. McKeen, C. D., Methyl bromide as a soil fumigant for controlling soil-borne pathogens and certain other organisms in vegetable seedbeds, *Can. J. Botany*, **32**, 101-15 (1954)
100. Moje, W., The chemistry and nematocidal activity of organic halides, *Adv. Pest Control. Res.*, **3**, 181-217 (1960)
101. Moje, W., Kendrick, J. B., Jr., and Zentmyer, G. A., Systemic and fungicidal activity of D-, L-, and DL-ethionine, S-alkyl-DL-homocysteine derivatives, and methionine antagonists, *Phytopathology*, **53**, 883 (1963)
102. Moje, W., Martin, J. P., and Baines, R. C., Structural effect of some organic compounds on soil organisms and citrus seedlings grown in an old citrus soil, *J. Agr. Food Chem.*, **5**, 32-36 (1957)
103. Morgan, O. D., The use of chemical soil drenches to control *Phytophthora parasitica* var. *nicotianae* and their phytotoxic effects on tobacco and toxicity to other soil flora, *Plant Disease Repr.*, **43**, 755-61 (1959)
104. Moubasher, A. H., Selective effects of fumigation with carbon disulphide on the soil fungus flora, *Trans. Brit. Mycol. Soc.*, **46**, 338-44 (1963)



105. Munnecke, D. E., Biological assay technic for studying fungicide drenches in soil, *Phytopathology*, **44**, 499 (1954)
106. Munnecke, D. E., The persistence of nonvolatile diffusible fungicides in soil, *Phytopathology*, **48**, 581-85 (1958)
107. Munnecke, D. E., Movement of non-volatile, diffusible fungicides through columns of soil, *Phytopathology*, **51**, 593-99 (1961)
108. Munnecke, D. E., Domsch, K. H., and Eckert, J. W., Fungicidal activity of air passed through columns of soil treated with fungicides, *Phytopathology*, **52**, 1298-306 (1962)
109. Munnecke, D. E., and Solberg, R. A., Inactivation of Semesan in soil by fungi, *Phytopathology*, **48**, 396 (1958)
110. Newhall, A. G., Disinfestation of soil by heat, flooding, and fumigation, *Botan. Rev.*, **21**, 189-250 (1955)
111. Newhall, A. G., An improved method of screening potential soil fungicides against *Fusarium oxysporum* f. *cubense*, *Plant Disease Repr.*, **42**, 677-79 (1958)
112. Newhall, A. G., and Gunkel, W. W., Efficient incorporation of granular fungicides and other chemicals in the root zone of cultivated soils, *Plant Disease Repr.*, **43**, 111-14 (1959)
113. Nishihara, R., The search for chemical agents which efficiently inhibit nitrification in soil and studies on its utilization in agricultural practice, *Bull. Fac. Agr. Kagoshima Univ.*, **12**, 107-58 (1962); *Abst. Soils Fertilizers*, **26**, 424 (1963)
114. Palmer, J. G., and Hacskaylo, E., Additional findings as to the effects of several biocides on growth of seedling pines and incidence of mycorrhizae in field plots, *Plant Disease Repr.*, **42**, 536-37 (1958)
115. Papavizas, G. C., and Davey, C. B., Effect of sulfur-containing amino compounds and related substances on *Aphanomyces* root rot of peas, *Phytopathology*, **53**, 109-15 (1963)
116. Papavizas, G. C., and Davey, C. B., Effect of amino compounds and related substances lacking sulfur on *Aphanomyces* root rot of peas, *Phytopathology*, **53**, 116-22 (1963)
117. Papavizas, G. C., Davey, C. B., and Woodard, R. S., Comparative effectiveness of some organic amendments and fungicides in reducing activity and survival of *Rhizoctonia solani* in soil, *Canad. J. Microbiol.*, **8**, 915-22 (1963)
118. Park, D., Survival of microorganisms in soil, In Intern. Symp. *Factors determining the behavior of plant pathogens in soil*. Berkeley (In press)
119. Parry, K. E., and Wood, R. K. S., The adaptation of fungi to fungicides: Adaptation to copper and mercury salts, *Ann. Appl. Biol.*, **46**, 446-56 (1958)

### Considérations économiques.

A côté de l'utilisation d'un point de vue biologique d'un fongicide, le coût du matériel peut définitivement limiter les applications lorsque de grandes surfaces doivent être traitées. Les cultures qui produisent un revenu important justifient une dépense élevée en matériel et en travail. Dans cette optique la situation en horticulture (pépinières) est totalement différente de celle de l'agriculture. Même si une mesure de contrôle est très efficace pour réduire les pertes dues à une maladie, en produisant des plants plus sains, à maturité plus précoce, et à rendements supérieurs, le bénéfice attendu du traitement doit en excéder le coût. Il est très souhaitable de poursuivre les expériences en plein champ jusqu'à ce que le revenu net puisse être calculé en termes de régularité, de quantité, et de qualité de la récolte. Les données utilisables actuellement indiquent que les avis oscillent de l'optimisme (rendement six à dix fois supérieurs) au scepticisme (bénéfice nul) (7, 89, 117, 182).

### Résidus fongicides.

Lorsqu'on considère les cultures destinées à la consommation humaine ou animale, il importe d'envisager l'éventualité de résidus fongicides. Jusqu'à présent, il n'y a guère eu d'exemples d'assimilation et de translocation de doses dangereuses de fongicides de sol, dans les plantes. A cet effet, les fumigants halogénés (14, 94, 145) ont été spécialement étudiés.

Il n'y a probablement aucun prélèvement d'isothiocyanate de méthyle par les plantes, ainsi que l'ont précisé des expériences conduites avec du matériel marqué au soufre 35 (178). En outre, les exclusions, pour des raisons toxicologiques, qui s'appliquent probablement aux produits fongicides contenant de l'arsenic (même lorsqu'il s'agit de produits très efficaces comme les composés d'alkylarsine) (2, 82), ou pour une influence néfaste sur la qualité (goût de P. C. N. B. des pommes de terre) peuvent aussi empêcher une application étendue.

### Influence sur les propriétés du sol.

Les changements dans les propriétés physico-chimiques du sol après traitements fongicides, sont difficiles à séparer des influences biotiques indirectes. Des modifications de la solubilité ou de la disponibilité des éléments nutritifs minéraux doivent être mentionnées en premier. Les éléments nutritifs peuvent être issus de la dégradation de fongicides, comme dans le cas de produits organiques contenant du soufre, où la teneur en sulfates du sol s'accroît (47). Une autre possibilité est la libération d'éléments nutritifs de la fraction humique du sol par « effet d'amorce », à partir de petites quantités de matières riches en énergie prêtes à être utilisées. La fumigation à l'aide de divers produits, provoque une plus forte concentration de sels solubles tels que Mn, Cu, Zn, Ca et K dans le sol (3, 24, 83).

Une inhibition temporaire de la croissance de jeunes Citrus, après fumigation, a pu être observée. L'absorption de P, Cu, Zn par la plante était réduite, alors que l'élément Na des feuilles atteignait des niveaux toxiques. On peut penser qu'un inhibiteur d'absorption soit à l'origine de ce phénomène (93). En plus des éléments nutritifs mentionnés ci-dessus, le prélèvement de N, K, Ca et Mg, a été réduit par certains biocides (170). Il n'a pas encore été décidé dans ces cas si la perturbation portait sur la disponibilité des éléments nutritifs ou sur le métabolisme même de la plante.

## MICROFLORE DU SOL

Les éléments de la microflore du sol jouent, en relation avec l'action des fongicides de sol, un rôle qui peut être actif ou passif. Tous les effets originaires de la microflore du sol peuvent être considérés comme actifs. Chaque effet supporté par les micro-organismes à cause de la présence de fongicide doit être considéré comme passif.

### Décomposition.

Quelques fongicides sont sujets aux décompositions microbiennes. Par comparaison avec les herbicides et certains insecticides, la décomposition des fongicides est plus difficile et plus lente, à cause essentiellement de la nature de ces composés. Une comparaison sur la persistance du T. M. T. D. montre la stabilité de ce fongicide dans le sable, au-delà de deux mois, mais une complète disparition en une semaine dans un compost (129). Il est fort probable que cette différence est causée par la forte concentration de micro-organismes actifs présents dans le compost. Les espèces d'*Aspergillus* et de *Penicillium* jouent un rôle dans la décomposition du 2-chloro-4-(hydroxymercure) phénol (109, 142). De même la cyano-(méthylmercure) guanidine est préférentiellement décomposée par une espèce de *Bacillus*. Ce phénomène est limité à ce composé, et n'est pas valable pour l'hydroxyde de méthylmercure (141). L'alcool allylique, à une dose d'application normale, est encore actif dans un sol stérile, après trois à quatre semaines. Il disparaît après quatre à huit jours dans un sol bien aéré et non stérile. *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*, des souches de *Nocardia corallina*, *Trichoderma viride*, et quelques souches d'*Azotobacter* sont des agents puissants de décomposition (69). La stérilisation du sol n'a pas d'effet sur la décomposition oxydative du Vapam et du Mylone, mais les propriétés du sol influencent fortement la disparition

de ces deux produits et la formation d'isothiocyanate de méthyle (53, 66). Apparemment, les microrganismes oxydants ne sont pas exclus de la décomposition de l'isothiocyanate de méthyle (78).

#### Influence sur le nombre des organismes.

Les influences négatives que la microflore subit par l'action des fongicides n'ont été étudiées qu'occasionnellement. On doit signaler que les progrès théoriques et méthodologiques portant sur les relations entre la phytopathologie et la microbiologie du sol demeurent en-deçà de ce qu'il serait nécessaire d'entreprendre.

Les travaux expérimentaux dans ce domaine concernent principalement trois points :

- a) preuves de la présence de microflore saprophyte avant et après l'application du fongicide,
- b) mesures de l'activité microbienne,
- c) détermination des tolérances sur milieu artificiel.

Le problème de la mise en évidence de la présence de la microflore dans un sol est limité par deux désavantages décisifs. D'abord, on ne connaît pas du tout quels organismes devraient être recherchés dans le sol d'un point de vue pratique (maintien de la fertilité du sol). Dans de nombreux cas, des groupes de micro-organismes sont, en fait, étudiés parce que les méthodes sélectives, ou pseudo-sélectives, sont disponibles pour dénombrer ce qu'on appelle les groupes physiologiques, et non parce que leur importance est établie. Le second désavantage réside dans le fait que les résultats obtenus par les méthodes conventionnelles d'analyse du sol ne sont pas susceptibles d'être interprétés raisonnablement, car elles contiennent, ou des informations limitées, ou rien sur la participation des micro-organismes aux processus actifs du métabolisme du sol.

Dans la plupart des travaux portant sur la microbiologie du sol, les organismes qui se développent à partir des suspensions sont simplement dénombrés comme bactéries, streptomycètes ou champignons. Dans les études préliminaires, cette méthode se justifie. Mais toutes les fois que l'on considère des organismes individuellement, chaque détermination semble être un gaspillage de temps si l'on ne descend pas au niveau de l'espèce. Si nous espérons un progrès réel dans les domaines de la microbiologie du sol et de la phytopathologie, nous ne pouvons nous contenter du jugement, qui par exemple, dit ceci : « les champignons du genre *Fusarium* ou *Penicillium* ou même pire, les *Sphaeropsidales* ou les *Dematiaceae* » sont sensibles à un certain fongicide...

En consultant les rapports des recherches sur quelques fongicides *s. s.* qui sont fréquemment utilisés en horticulture ou en agriculture (thirame, captane) et en les considérant avec toutes les réserves d'usage, il est évident cependant que des « doses normales » de ces fongicides réduisent le nombre total de champignons, de bactéries et de streptomycètes d'une manière significative. Seul le Nabame (à 200 kg par hectare) semble moins toxique pour les bactéries et les streptomycètes. Si l'on considère la réaction à six fongicides différents (tels que le captane, le T. M. T. D., les composés arsénicaux organiques, le Nabame, le Vapam, et l'alcool allylique) des espèces cryptogamiques suivantes : *Rhizoctonia solani*, *Doratomyces microsporus* (*Cephalotrichum medium*), *Monilia pruinosa*, *Mucor hiemalis*, *Rhizopus nigricans*, *Mortierella alpina*, *Fusarium solani* et *Aspergillus fumigatus*, on peut estimer, à l'aide d'une analyse de la flore fongique du sol, que ceux-ci sont particulièrement sensibles aux fongicides. Par contre, une tolérance particulière aux produits fongicides caractérise les espèces *Penicillium nigricans*, *Pullularia pullulans*, *Chaetomium sp.*, *Aspergillus versicolor* (30).

Les fumigants du sol sont en général considérés comme étant fortement toxiques pour la microflore du sol. Nombre de bactéries sont en fait fortement atteintes par les concentrations usuelles de bromure de méthyle, de chloropicrine, de dibromure d'éthylène, etc. La même action s'applique aux champignons. Mais l'inhibition initiale est très souvent suivie d'une extraordinaire stimulation de nombreux membres de la population microbienne. Ce phénomène est bien connu sous le nom d'« effet de stérilisation ». Il semble être indépendant du type de sol (17). En dépit du fait que les fumigants sont généralement considérés comme possédant une influence négative très forte sur la microflore du sol, on doit remarquer que ceci n'est en aucune manière valable dans tous les cas. Par exemple, le Vapam, et mieux encore l'alcool allylique, sont moins nuisibles lorsqu'ils réduisent les champignons saprophytes du sol, que le captane ou les fongicides arsénicaux (29).

#### Influence sur l'activité.

On peut déterminer par la mesure de l'activité microbienne *in situ*, le degré selon lequel les sources d'énergie du sol sont utilisées et mobilisées après applications de fongicides *s. l.* La nitrification semble un processus très sensible d'activité microbienne.

La nitrification est inhibée par des doses normales de Nabame, de bromure de méthyle, de chloropicrine, de Vapam, de Mylone, et d'alcool allylique. Il faut souvent plusieurs mois pour que ce processus retrouve son niveau initial. Des travaux qui ont été faits sur la nitrification en relation avec les applications fongicides, on peut estimer que ce processus est encore considéré comme essentiel dans les sols cultivés. Alors que ceci est reconnu, on utilise les produits avec le désir d'inhiber sélectivement la nitrification, ce qui est un exemple classique de la confusion existant en microbiologie des sols cultivés (51, 113).

L'ammonification n'est affectée qu'à un bien plus faible degré. Ces influences ont été récemment revues en détail par plusieurs auteurs (33, 91).

C'est probablement une méthode d'approche utile, que de considérer le sol comme un « organisme » et d'étudier continuellement ses réactions aux fongicides, avec des méthodes empruntées à la phy-

120. Parry, K. E., and Wood, R. K. S., The adaptation of fungi to fungicides: Adaptation to captan, *Ann. Appl. Biol.*, **47**, 1-9 (1959)
121. Parry, K. E., and Wood, R. K. S., The adaptation of fungi to fungicides: Adaptation to thiram, ziram, ferbam, nabam, and zineb, *Ann. Appl. Biol.*, **47**, 10-16 (1959)
122. Partridge, A. D., and Rich, A. E., Induced tolerance to fungicides in three species of fungi, *Phytopathology*, **52**, 1000-4 (1962)
123. Partyka, R. E., and Mai, W. F., Effects of environment and some chemicals on *Sclerotinia sclerotiorum* in laboratory and potato field, *Phytopathology*, **52**, 766-70 (1962)
124. Persidsky, D. J., and Wilde, S. A., Effect of eradicants on the microbiological properties of nursery soils, *Trans. Wisconsin Acad. Sci.*, **44**, 65-73 (1956)
125. Powell, N. T., The role of plant-parasitic nematodes in fungus diseases, *Phytopathology*, **53**, 28-35 (1963)
126. Rankin, H. W., and Good, J. M., Effect of soil fumigation on the prevalence of southern blight on tomatoes, *Plant Disease Repr.*, **43**, 444-45 (1959)
127. Ranney, C. D., and Bird, L. S., Greenhouse evaluation of in-the-furrow fungicides at two temperatures as a control measure for cotton seedling necrosis, *Plant Disease Repr.*, **40**, 1032-40 (1956)
128. Ranney, C. D., and Hillis, A. M., A study of the distribution of in-the-furrow applied fungicides, *Phytopathology*, **48**, 345 (1958)
129. Richardson, L. T., The persistence of thiram in soil and its relationship to the microbiological balance and damping-off control, *Can. J. Botany*, **32**, 335-46 (1954)
130. Richardson, L. T., Effect of insecticide-fungicide combinations on emergence of peas and growth of damping-off fungi, *Plant Disease Repr.*, **44**, 104-8 (1960)
131. Richardson, L. T., and Munnecke, D. E., Inoculum potential and effective fungicide dosage in soil, *Phytopathology*, **53**, 1141, (1963)
132. Roth, L., and Bruhn, C., Effectiveness of methylisothiocyanate as a general soil fumigant under tropical conditions, *Phytopathology*, **53**, 25 (1963)
133. Rusdhi, M. H. K., and Jeffers, W. F., Effect of some soil factors on efficiency of fungicides in controlling *Rhizoctonia solani*, *Phytopathology*, **45**, 466 (1955)
134. Sampson, R. E., and Ludwig, R. A., Laboratory studies on the evaluation and activity of antifungal fumigants, *Can. J. Botany*, **34**, 37-43 (1956)

135. Scheffer, R. P., and Haney, W. J., Causes and control of root rot in Michigan greenhouses, *Plant Disease Repr.*, **40**, 570-79 (1956)
136. Schmitt, C. G., Comparison of volatile soil fungicides, *Phytopathology*, **39**, 21 (1949)
137. Schneider, W., Methoden zum Nachweis von Traxep in Erden, *Gesunde Pflanzen*, **13**, 14-17 (1961)
138. Sciaroni, R. H., and McCain, A. H., Allylidene diacetate—an experimental soil fungicide, *Plant Disease Repr.*, **47**, 372-73 (1963)
139. Shatla, M. N., and Sinclair, J. B., Tolerance to PCNB and pathogenicity correlated in natural occurring isolates of *Rhizoctonia solani*, *Phytopathology*, **52**, 752 (1962)
140. Shatla, M. N., and Sinclair, J. B., Tolerance to pentachloronitrobenzene among cotton isolates of *Rhizoctonia solani*, *Phytopathology*, **53**, 1407-11 (1963)
141. Spanis, W. C., and Munnecke, D. E., Bacterial inactivation of organic fungicides, *Phytopathology*, **52**, 356 (1962)
142. Spanis, W. C., Munnecke, D. E., and Solberg, R. A., Biological breakdown of two organic mercurial fungicides, *Phytopathology*, **52**, 455-62 (1962)
143. Stark, Ch., *Untersuchungen über die fungiziden und phytotoxischen Eigenschaften des Chlorpikrins als Bodenentseuchungsmittel*, (Dipl. Arbeit, Univ. Hamburg 1956)
144. Stark, F. L., Investigations on chloropicrin as a soil fumigant, *Cornell Univ. Agr. Expt. Sta., Mem.*, **278**, 1-61 (1948)
145. Stelmach, Z., Bromine retention in some soils and uptake of bromine by plants after soil fumigation, *Soil Sci.* **88**, 61-6 (1959)
146. Stoddard, E. M., and Miller, P. M., Effects of fungicidal drenches on root infestation by *Rhizoctonia solani* and incidence of two-spotted spider mites on strawberries, *Plant Disease Repr.*, **46**, 258-59 (1962)
147. Stotzky, G., Martin, W. P., and Mortensen, J. L., Certain effects of crop residue and fumigant applications on the decomposition of an Ohio muck soil, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **20**, 392-96 (1956)
148. Streckler, B., Untersuchungen über die Einwirkung von organischen Fungiziden auf Bodenpilze, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **64**, 9-35 (1957)
149. Takeuchi, H., and Ide, H., Studies on the soil fungicides, I., Fungicidal action of the organic mercury compounds in the soil, *Ann. phytopathol. Soc. Japan.*, **22**, 197-200 (1957); *Abst. Rev. Appl. Mycol.*, **37**, 758 (1958)

siologie. La respiration du sol est toujours une indication de son activité. L'utilisation de méthodes respiratoires (mesure de l'absorption de O<sub>2</sub> ou de production de CO<sub>2</sub>) a permis d'obtenir les résultats suivants : la respiration du sol est inhibée un court moment après l'application de fumigants de sol. Puis les micro-organismes survivants recouvrent très tôt leur activité et le degré respiratoire s'élève jusqu'à des valeurs importantes et excède même parfois ceux d'un sol non traité. Curieusement, le phénomène se reproduit de manière identique avec des fungicides s. s. non spécifiques (36). Dans les quelques exemples étudiés jusqu'à présent (captane, sublimé, méthylarsinesulfure) la respiration du sol s'est accrue dans les sols traités après une phase dépressive de vingt-quatre heures. La dernière phase du niveau respiratoire dépend de la concentration du fongicide appliqué. Les fungicides à action spécifique (P. C. N. B., Dexon) n'ont aucune influence sur la respiration du sol. Ceci permet de penser que sur un sol cultivé, les champignons du sol ne contribuent que faiblement à la respiration du sol. Ceci montre aussi que certains fungicides ont une action remarquable sur les bactéries du sol.

Des changements considérables, au sein de la population des micro-organismes du sol, apparaissent lorsque le « vide » biologique est de nouveau comblé. On doit se souvenir que les données respiratoires n'offrent seulement qu'une image globale des processus oxydatifs du sol. Elles ne contiennent pas d'information sur les groupes d'organismes qui participent à ces processus (154). C'est pour cette raison qu'il est intéressant d'étudier l'influence de ces processus sur les modifications de la matière organique du sol. L'utilisation des techniques respiratoires sur un sol traité par un fongicide, et amendé simultanément par des substrats organiques définis, offre une indication permettant une vision nouvelle de l'action fongicide dans un sol. Il a été possible de déterminer, pour différents processus de décomposition, les concentrations fongicides « critiques ». Parmi les processus les plus sensibles, il faut indiquer la décomposition de la cellulose, et celle de la cutine. Les processus de décomposition, du glucose, de l'amidon, des tannins, de l'esculine, des pectines, de la chitine, sont seulement retardés pour une courte période. La période « dépressive » peut être déterminée par l'étude du délai nécessaire pour une décomposition maximum dans un sol donné. La relation existante peut être formulée par une équation mathématique (36, 37).

La possibilité pour les micro-organismes du sol de construire des agrégats est un autre aspect de leur activité. Les agrégats formés par les organismes apportés dans un sol après fumigation (chloropicrine) ont été moins nombreux que ceux obtenus dans un sol traité à la vapeur (98). Dans d'autres essais, avec du D-D fumigant, de la chloropicrine, du dibromure d'éthylène et d'autres produits, les effets sur les agrégats n'ont pas été significatifs (92). On a pu noter, en relation avec la distribution des fumigants dans les différents horizons du sol, que les effets sur les agrégats variaient aux différentes profondeurs du sol (55).

On ne connaît pas encore, jusqu'à quel point le développement des mycorhizes dans les jeunes arbres peut être inhibé par les fungicides de sol. Il est probable que la croissance de ces jeunes plantes peut être améliorée par un traitement rationnel du sol infesté (114, 169). Par la suite, les applications à forte dose de certains produits divers (calomel, formaldéhyde) peuvent exercer une influence défavorable (124, 174, 180).

En général, la biophasse d'un sol se caractérise par une tendance marquée à l'auto-régulation. Ainsi, dans le cycle du carbone, aucun substrat après un certain délai, ne demeure intact, sous l'influence des fungicides. Mais dans certains cas, la respiration totale après 500 à 1 000 heures, peut être inférieure à celle d'un sol non traité (36). Il n'est pas possible encore de décider si cette action est désavantageuse, car toute action de protection de la fraction « humique » de la matière organique du sol peut être envisagée comme une action bénéfique à attribuer aux fungicides de sol (147).

Par comparaison avec les méthodes physiologiques du type mentionné ci-dessus, les déterminations *in vitro* des tolérances sur milieu artificiel, semblent être de peu d'importance.

## MODE D'ACTION

On peut constater que les publications dans la littérature phytopathologique traitant des relations entre la structure chimique des fungicides de sol s. l. et leur toxicité, sont rares. Les renseignements acquis à partir de l'action nématocide des halogénures organiques, sont aussi probablement applicables aux champignons : les composés qui possèdent des taux élevés dans les réactions de déplacement nucléophiles bimoléculaires, et une faible activité dans les réactions unimoléculaires, sont plus toxiques que ceux qui présentent une réactivité inverse (100). Les halogénures et les alcools contenant une liaison non saturée en  $\gamma$  et en  $\beta$  présentent une forte toxicité. Le degré de toxicité des halogénures s'établit ainsi iode > brome > chlore (102). En tant que fungicides de contact (contact direct entre le produit et le champignon sur milieu solide), les diméthyl et éthylène bisdithiocarbamates sont effectivement plus actifs que les monoalcoyle dithiocarbamates substitués qui sont caractérisés par une phase vapeur remarquable (71).

Il a été souligné depuis longtemps et à de nombreuses reprises que les interrelations nombreuses présentes dans le sol, rendaient difficile une analyse de l'action des fungicides dans le sol. Il en est de même lorsqu'on considère leur mode d'action. Dans les paragraphes suivants, l'étude procédera de l'action sur des espèces individuelles, à l'action sur des populations d'organismes du sol.

### Métabolisme du champignon.

Lorsqu'on considère l'action sur le métabolisme des seuls champignons pathogènes, on doit se souvenir que les fongicides de sol sont dans de nombreux cas les mêmes que ceux utilisés comme fongicides foliaires. On ne les mentionne pas dans cet article chaque fois qu'ils sont identiques. D'autre part, le mécanisme d'action des fongicides de sol n'a pas été très étudié. De plus, il est particulièrement difficile de manipuler des produits à forte tension de vapeur dans des expériences physiologiques. Le N-méthyl dithiocarbamate de sodium et l'isothiocyanate de méthyle inhibent la production de CO<sub>2</sub> à partir de glucose par le *Rhizoctonia solani*. Le premier de ces deux produits augmente nettement la perméabilité mycélienne par action sur les membranes des cellules vivantes. Des concentrations accrues du dithiocarbamate impliquent une inhibition progressivement plus faible, alors que l'inverse se produit pour l'isothiocyanate de méthyle (171).

Le principe toxique de l'alcool allylique est probablement un produit d'oxydation, l'acroléine. L'acroléine est un inhibiteur puissant du groupement SH et c'est ce qui le rend toxique vis-à-vis de *Rhizoctonia solani* à 5 p. p. m. (85).

Le chlorure mercurique (HgCl<sub>2</sub>) provoque une baisse marquée de la respiration à la fois de *Rhizoctonia solani* et de *Fusarium culmorum*. En même temps, la croissance, l'absorption de N minéral et la synthèse des sucres sont réduites. Ces effets sont neutralisés par la cystéine mais renforcés par la méthionine (156, 157).

Dans les expériences avec le Dexon, le 3, 3, 4, 4 tétrachlorotétrahydrothiophène-1,1-dioxyde, le 5 chloro-4-phényl-1, 2-dithiol-3-one, et le 1 fluoro-2, 4-dinitrobenzène, l'absorption de O<sub>2</sub> des mycéliums moribonds des différents champignons tests, alimentée par le glucose ou les acides du cycle de Krebs, est inhibée à des concentrations supérieures à celles requises pour inhiber la croissance (159).

Le Dexon est un inhibiteur efficace du système mitochondrial DPNH-cytochrome-C-reductase, de *Pythium*, mais il n'affecte pas le système correspondant des betteraves sucrières. Le *Rhizoctonia* et les betteraves sucrières possèdent un système mitochondrial qui décompose le Dexon en présence de DPNH (158).

Le Dexon, l'éthionine (acide 4-ethylthio-2-aminobutyrique) et le o, o, o-triméthylphosphorothioate, sont trois exemples de produits ayant un effet chemothérapeutique sur les champignons du sol (185, 187). Le Dexon migre vers le haut aussi bien que vers le bas (62, 63).

L'inhibition des enzymes pectolytiques de *Fusarium oxysporum* f. *lycopersici*, est à la base du mode d'action de l'acide rufianique (acide 1, 4-dioxyanthraquinone sulfonique). Et une application après l'infection est plus efficace qu'une application préventive (54).

Les composés aminés possédant des groupes méthyle dans leur molécule constituent un autre groupe intéressant de nouveaux produits. Quelques-uns d'entre eux limitent très efficacement les pourritures radiculaire causées par *Aphanomyces euteiches* du pois, ou celles causées par *Phytophthora cinnamomi* de l'avocatier (101, 115, 116). Dans certains cas, corrélativement à la suppression de l'infection, la germination des zoospores et la croissance mycélienne sont stimulées. Le mécanisme d'action est encore inconnu, mais il semble qu'il s'agisse d'une modification dans le métabolisme de la plante hôte (éventuellement en relation avec les réactions de transméthylation). Les substances de ce type ne sont pas « toxiques » au sens habituel. Elles sont cependant très intéressantes pour les développements futurs. De même, le dibenzothiophène présente une action similaire, en accroissant la résistance de l'hôte vis-à-vis de *Rhizoctonia solani*, sans avoir d'effet direct sur champignon (163, 164).

### Populations de champignons pathogènes.

On ne peut obtenir qu'occasionnellement seulement, un contrôle à cent pour cent de la population naturelle des pathogènes du sol. Lorsqu'on analyse un échec ou un résultat insuffisant, deux causes peuvent être invoquées : « la résistance » du pathogène ou, dans le cas ou celui-ci est cependant détruit, son remplacement par un autre (« disease trading »).

Des comportements différents, à l'intérieur d'une même espèce peuvent faire apparaître des souches résistantes après des applications répétées. Lorsque différents isolats de *Rhizoctonia solani* sont exposés à l'action du P. C. N. B., on peut observer trois types de réactions : sensibilité, tolérance moyenne, forte tolérance. Une relation positive entre la résistance au P. C. N. B. et la virulence semble exister (139, 140). Des résultats similaires ont été obtenus en séparant quatre races différentes de *Rhizoctonia solani*, à partir d'un seul lot de culture. L'une des races était plus résistante à l'effet du captane, alors que les deux autres y étaient totalement sensibles. On estime qu'une estimation fine de la résistance de *Rhizoctonia solani* aux fongicides doit être fondée sur l'analyse des réactions en isolements purs (153). Dans les épreuves même avec *Sclerotium rolfsii*, des souches résistantes au P. C. N. B. et à l'oxychlorure de cuivre, sont apparues à partir des isolements parentaux (45). Des souches choisies de *Rhizoctonia* présentent des réponses différentes au P. C. N. B., au Dexon, à un mélange des deux produits, ainsi qu'au T. M. T. D., mais il n'y a pas de corrélation entre le pouvoir pathogène (pour le cotonnier) et la sensibilité à ces produits (90). *Rhizoctonia solani* a aussi présenté une tolérance s'adaptant aux concentrations croissantes de dichlone, de manèbe, de P. C. N. B., de captane et de T. M. T. D. (38, 39). L'adaptation était spécifique vis-à-vis du P. C. N. B. et du manèbe, mais pas vis-à-vis du captane et du dichlone. Seule la souche tolérante au dichlone a conservé sa tolérance après trois repiquages sur milieu gélosé sans fongicide (40). Des indications sur les tolérances accrues au formaldéhyde, ont été aussi recueillies à propos d'isolements de *Fusarium oxysporum* de sols traités au formaldéhyde (16).

150. Tammen, J., Muse, D. P., and Haas, J. H., Control of *Pythium* root diseases with soil fungicides, *Plant Disease Repr.*, **45**, 858-63 (1961)
151. Thayer, P. L., and Wehlberg, C., A method for evaluating soil fungicides, *Phytopathology*, **53**, 891 (1963)
152. Thomas, W. D., Jr., A soil-column apparatus for the study of soil fungicides, *Phytopathology*, **47**, 535 (1957)
153. Thomas, W. D., Jr., Reaction of biotypes of *Rhizoctonia solani* to different fungicides, *Phytopathology*, **52**, 366 (1962)
154. Thornton, G. D., Some effects of D-D, EDB and chloropicrin on microbiological action in several Florida soils, *Soil Crop Sci. Soc. Florida, Proc.*, **12**, 68-71 (1952)
155. Tobolsky, I., and Wahl, I., Effectiveness of various soil treatments for the control of *Fusarium* wilt on tomatoes in the greenhouse, *Plant Disease Repr.*, **47**, 301-7 (1963)
156. Tolba, M. K., and Salama, A. M., Studies on the mechanism of fungicidal action of mercuric chloride on mycelial felts of *Rhizoctonia solani*, *Arch. Mikrobiol.*, **43**, 349-64 (1962)
157. Tolba, M. K., and Saleh, A. M., The fungicidal action of mercuric chloride, *Proc. Iraqi Sci. Soc.*, **2**, 25-36 (1958). *Abst. Rev. Appl. Mycol.* **39**, 214 (1960)
158. Tolmsoff, W. J., Biochemical basis for biological specificity of Dexon (*p*-dimethylamino-benzenediazo sodium sulfonate) as a fungistat, *Phytopathology*, **52**, 755 (1962)
159. Torgeson, D. C., Effect of fungicides on the respiration of three species of soil fungi, *Phytopathology*, **53**, 891 (1963)
160. Turner, N. J., and Corden, M. E., Decomposition of sodium N-methyl dithiocarbamate in soil, *Phytopathology*, **53**, 1388-94 (1963)
161. Turner, N. J., Corden, M. E., and Young, R. A., Decomposition of vapam in soil, *Phytopathology*, **52**, 756 (1962)
162. Urbschat, E., Gegen Boden- und Blattpilze hochwirksame Azoverbindungen, *Angew. Chem.*, **72**, 981-85 (1960)
163. Vaartaja, O., Chemotherapeutic action of dibenzothiophene against *Rhizoctonia solani*, *Can. Dep. Agr. Forest Biol. Div. Bimon. Progr. Rept.*, **11**, 2 (1955)
164. Vaartaja, O., Principles and present status of chemical control of seedling diseases, *Forestry Chron.*, **32**, 45-48 (1956)
165. Vaartaja, O., Chemical treatment of seedbeds to control nursery diseases, *Botan. Rev.*, **30**, 3-91 (1964)
166. Valášková, E., Testing of fungicides for soil disinfection, *Acta Pruhonic.*, **1962**, 61-71 (1962). *Abst. Rev. Appl. Mycol.*, **42**, 370 (1963)

167. Vermeire, A., and Welvaert, W., Werkingduur van fungiciden in de bodem, *Verh. Rijksstat. Plantenz. Gent*, **13**, 1-30 (1962)
168. Vermeire, A., and Welvaert, W., The phytotoxic action of several organic mercury compounds in the soil, *Verh. Rijksstat. Plantenz. Gent*, **17**, 1-55 (1962)
169. Volger, C., Verfahren der Bodenentseuchung und ihre Bedeutung für die Anzucht von Forstpflanzen, *Schriftenreihe Forstl. Fak. Univ. Göttingen*, **26**, 1-83 (1962)
170. De Vries, M. L., Effect of biocides on biological and chemical factors of soil fertility, *Dissertation Abstr.*, **23**, 1145-46 (1962)
171. Wedding, R. T., and Kendrick, J. B., Jr., Toxicity of N-methyl dithiocarbamate and methylisothiocyanate to *Rhizoctonia solani*, *Phytopathology*, **49**, 557-61 (1959)
172. Welvaert, W., Grondontsmetting met vapam, *Verh. Rijksstat. Plantenz. Gent*, **3**, 45 p. *Abst. Rev. Appl. Mycol.*, **39**, 379 (1960)
173. Welvaert, W., Bijdrage tot de studie van de bestrijding van fytopathogene bodenschimmels door grondontsmetting, *Mededel. Landbouwhogeschool Opzoekingsstat. Gent*, **27**, 1631-1789 (1962)
174. Wilde, S. A., and Persidsky, D. J., Effect of biocides on the development of ectotrophic mycorrhizae in Monterey pine seedlings, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **20**, 107-10 (1956)
175. Wilhelm, S., Control of *Pythium* damping off of melons by simultaneous seeding and soil fumigation with chloropicrin, *Phytopathology*, **53**, 1144 (1963)
176. Wilhelm, S., and Ferguson, J., Soil fumigation against *Verticillium albo-atrum*, *Phytopathology*, **43**, 593-96 (1953)
177. Wilhelm, S., Storkan, R. C., and Sagen, J. E., *Verticillium* wilt of strawberry controlled by fumigation of soil with chloropicrin and chloropicrin-methyl bromide mixtures, *Phytopathology*, **51**, 744-48 (1961)
178. Willenbrink, J., Schulze, E., and Junkmann, K., Über die Abgabe von <sup>35</sup>S-markiertem Methylsenföhl aus dem Boden an die Luft und seine Aufnahme in die Tomatenpflanze, *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, **68**, 92-98 (1961)
179. Wilson, J. D., Initial and subsequent control of radish yellows by various treatments during eight successive plantings, *Phytopathology*, **47**, 538 (1957)
180. Yatazawa, M., Persidsky, D. J., and Wilde, S. A., Effect of allyl alcohol on micropopulation of prairie soils and growth of tree seedlings, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **24**, 313-16 (1960)

Des recherches fondamentales intéressantes ont été réalisées sur l'adaptation aux fongicides de quelques champignons ne se trouvant pas dans le sol (tels que *Penicillium notatum*, *P. roqueforti*, *Sclerotinia fructigena*, *Slemphyllium sarcinaeforme*, *Botrytis cinerea*) vis-à-vis des produits tels que : le sulfate de cuivre, le chlorure mercurique, l'acétate de phénylmercure, la Glyodine (ou 2-heptadécylglyoxalidine acétate), le captane, le T. M. T. D., le Ziram, le ferbame, le Nabame, le zinèbe (9, 119, 120, 121, 122). Dans la plupart des cas, les champignons développent une tolérance vis-à-vis du fongicide et gardent cette tolérance après transfert sur des milieux gélés sans fongicides.

Cependant, dans quelques cas, la souche adaptée montre une viabilité plus faible que la souche parente. Certains pensent que les souches possédant une tolérance marquée vis-à-vis des fongicides, ne peuvent pratiquement pas survivre dans le sol, car elles présentent aussi un faible pouvoir compétitif vis-à-vis de la souche parentale. Mais les recherches, dans ce domaine important, sont aussi jeunes que le sont les fongicides de sol. En intensifiant les efforts pour étudier les problèmes de la résistance aux fongicides, on doit, dans l'avenir, être en mesure de prévenir certains phénomènes naturels.

Outre l'apparition de souches résistantes au sein d'une même espèce, les actions sélectives sur des mélanges de pathogènes sont importantes. Les problèmes du remplacement d'une maladie par une autre (« disease trading ») ou « d'effets boomerang », appartiennent aux conséquences négatives graves des applications de fongicides. Quelques exemples : la diminution de *Rhizoctonia* et de *Pythium* occasionne des dégâts accrus, imputables aux espèces *Fusarium* (10) ; augmentation des pourritures sur gousses d'arachides, et de la fonte des semis de pins (causée par les *Pythium*) après application de P. C. N. B. (44, 49).

Toute augmentation de la population de champignons pathogènes, après application de fongicides, peut être occasionnée par l'élimination d'espèces concurrentes, par action spécifique du « mauvais » produit, ou par les effets stimulants de faibles doses des produits toxiques. Jusqu'à maintenant, les effets « anormaux » des traitements du sol n'ont pas été systématiquement étudiés (48, 52, 126, 155). De larges groupes de fongicides très puissants ou de combinaisons de fongicides, ont été recommandés afin d'éviter des échecs de cette nature. Ceci est, bien sûr, en contradiction avec les efforts nombreux faits pour découvrir davantage de meilleurs fongicides sélectifs. Il est cependant évident qu'aucun avis décisif satisfaisant toutes les exigences ne peut être prononcé. Les réponses à ce problème résident probablement dans une connaissance fondée de la situation biologique du lieu même de l'application, et dans une idée précise du but recherché par les mesures de lutte. En ce qui concerne la « situation biologique » au lieu de l'application, les phytopathologistes commencent tout juste à entrevoir qu'une forte proportion des pathogènes du sol sont associés d'une manière ou d'une autre aux nématodes du sol (25, 125). Il n'est pas impossible de contrôler des maladies complexes de cette nature, mais l'importance des besoins futurs apparaît.

#### Recolonisation.

Le principe général des fumigants est d'éliminer les champignons pathogènes du sol. Mais en même temps, on réduit la faune et la microflore totale du sol. Les organismes non atteints ou les microbes occupant les couches les plus profondes du sol, non traitées, et renfermant des parasites survivants, peuvent facilement recoloniser le nouveau « vide biologique ». Actuellement, on possède plus de données théoriques sur ce phénomène que de données provenant de travaux expérimentaux. On doit tout d'abord distinguer entre la recolonisation par les micro-organismes du sol, et la recolonisation par les champignons parasites. La fumigation du sol ne conduit que très rarement à une stérilisation totale du sol. Comme il a été mentionné précédemment, quelques heures après le traitement, les sources d'énergies « libres » à tirer de la matière organique du sol, sont recolonisées par les micro-organismes survivants. La nature du produit utilisé, sa concentration, et la composition de la microflore survivante, sont les facteurs déterminants de l'établissement d'une nouvelle population dans les microhabitats. Étant donné la complexité de cette situation, on peut s'attendre autant à des résultats positifs que négatifs. Il semble clair que l'introduction de champignons pathogènes soit accidentellement par manipulations peu soigneuses d'un sol traité, soit par inoculations expérimentales délibérées (20), annulent tous les efforts de désinfestation en établissant des conditions de croissance sans aucun antagonisme. Le problème central est la relation même existant entre les organismes « bénéfiques » et les pathogènes. D'un point de vue théorique, il pourrait être utile d'introduire des organismes « bénéfiques » dans un sol traité au fumigant. Mais toutes les tentatives dans cette direction seront vouées à l'insuccès, aussi longtemps qu'on ignorera quels sont les substrats libres dans un sol traité, et par quels organismes ces substrats sont préférentiellement colonisés. Il est impossible d'introduire un organisme dans un nouvel habitat, contre la vocation du substrat (81).

Il nous faut, de plus, prendre en considération que les organismes ainsi appelés « bénéfiques » ne sont pas simplement actifs par leur présence. Dans la plupart des cas, ils sécrètent des substances physiologiquement actives, capables de causer des dégâts radiculaires aux plantes (34, 35), ou qui accroissent la sensibilité des cultures aux infections par les pathogènes des racines (59), et pour tout cela, elles doivent être convenablement actives.

#### Approche conjuguée.

Cette considération conduit à la discussion finale : effets des fongicides sur la population totale des micro-organismes du sol.

Il est surprenant que les champignons saprophytes du sol soient en général moins facilement détruits par les fongicides que les pathogènes (26, 77). Ceci est d'ailleurs en accord avec les notions de compétition saprophytique, selon lesquelles les organismes bons compétiteurs sont relativement fortement résistants aux substances antibiotiques. Cette notion biologique semble permettre une approche conjuguée intéressante pour mener un contrôle chimique et biologique des pathogènes du sol (lutte intégrée).

Bien qu'un sol infesté diffère d'un sol « sain » par une prédominance relative d'organismes phytopathogènes, les fongicides peuvent agir par une régulation de l'équilibre perturbé. Dans ce cas, il n'est pas absolument nécessaire d'éliminer le pathogène. Il est suffisant de réduire le potentiel d'inoculum du pathogène pour faire pencher l'équilibre en faveur des saprophytes du sol. Il est très probable que ce principe, même si nous ne sommes pas avertis de ces faits, soit mis en pratique dans la plupart des expériences efficaces de lutte (27, 30, 129, 177).

Un exemple bien connu est la prédominance de *Trichoderma viride* dans les sols traités aux fongicides. En dépit des propriétés antagonistes de ce champignon, il est peu douteux que l'importance de celui-ci dans les sols non acides est largement surestimée. Sur vingt-quatre espèces étudiées, *Trichoderma viride* présente un degré de tolérance faible vis-à-vis de CS<sub>2</sub>, mais une très forte activité de recolonisation. On a pu montrer aussi expérimentalement que la dose optimum de CS<sub>2</sub> permettant la recolonisation était en général inférieure à la dose maximum permettant la survie. Ceci montre que les organismes compétiteurs aussi, sont probablement incapables, après les effets des fumigants, d'atteindre à nouveau un certain niveau, si le potentiel d'inoculum se trouve réduit au-dessous d'une certaine valeur critique (104). On peut indiquer une autre observation intéressante : les extraits de sol non stérile ont un effet léthal sur *Rhizoctonia* en présence de P. C. N. B., sur milieu gélosé. Par contre le P. C. N. B. seul, ou les extraits de sol stérile, permettent la croissance de colonies viables (46). On ne connaît pas les processus responsables de cette action synergique, mais très certainement l'activité chimique du P. C. N. B. est renforcée par quelque influence biologique.

Il n'est pas dans l'esprit de cet article de parcourir le vaste domaine du contrôle biologique des champignons du sol, mais il doit être noté que des comparaisons directes entre les mesures de contrôle chimique et celles du contrôle biologique, dans un même sol, apportent des informations valables pour les recherches futures (117).

## BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE

- ALEXANDER, M., Persistence and biological reactions of pesticides in soils, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29, 1-7 (1965).
- ANDREEVA, E. I. et OBOLENSKOVA, L. B., Résultats des essais du pentachloronitrobenzène (PCNB) comme fongicide de sol dans les semis de cotonnier (en russe), *Khim. sel'sk. Khoz.*, 3, 30-31 (1965).
- ASHWORTH jr., L. J. et AMIN, J. V., A mechanism for mercury tolerance in fungi, *Phytopath.*, 54, 1459-1463 (1964).
- BARTHA, R. et PRAMER, D. Features of a flask and method for measuring the persistence and biological effects of pesticides in soil, *Soil Sci.*, 100, 68-70 (1965).
- BAULING, J. A. et LINN, M. B., Compatibility of certain soil fungicides with the nodule bacterium, *Rhizobium leguminosarum*, *Phytopath.*, 54, 887-888 (1964).
- BOERNER, H., The decomposition of afalon [N-(3, 4-dichlorophenyl)-N'-methoxymethylurea] and aresin [N-(p-chlorophenyl)-N'-methoxy-N'-methylurea] in the soil (en allemand), *z. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz*, 9, 516-531 (1965).
- BROGDON, J. L., DAWSON, E. H., BENSON, A. P. et MURPHY, E. F. Effect of pentachloronitrobenzene (PCNB) soil treatment on flavor of potatoes, *Amer. Potato J.*, 42, 29-36 (1965).
- BUSH, L. P. Toxicity of soil fumigants in relation to seed dormancy, *Dissertation Abstr.*, 25, 6175-6176 (1965).
- CARLSTROM, R. C. et POWELSON, R. L. Influence of soil type on the fungicidal activity of soil fumigants against *Verticillium dahliae*, *Phytopath.*, 54, 1932 (1964).
- CORDEN, M. E. et YOUNG, R. A. Changes in the soil microflora following fungicide treatments, *Soil Sci.*, 99, 272-277 (1965).
- DOMSCH, K. H. The effect of captan on the decomposition of glucose, aesculin, chitin and tannin in soil (en allemand), *Phytopath. Z.*, 52, 1-18 (1965).
- DOMSCH, K. H. Der Einfluss von fungiziden Wirkstoffen auf die Bodenatmung, *Phytopath. Z.*, 49, 291-302 (1964).
- ELSAID, H. M. et SINCLAIR, J. B., Adapted tolerance to organic fungicides by isolates of *Rhizoctonia solani* from seedling cotton, *Phytopath.*, 54, 518-522 (1964).
- GOOD, J. M. et CARTER, R. L., Nitrification lag following soil fumigation, *Phytopath.*, 55, 1147-1150 (1965).
- HAGLUND, W. A., Greenhouse evaluation of soil fungicides for the control of pea root rot, *Plant Disease Repr.*, 49, 793-796 (1965).
- HASHIMOTO, Y. et OKADA, H. Effect of pentachlorophenol (PCP) on rice plants supplied with compound fertilizer (en japonais), *J. Sci. Soil Tokyo*, 35, 80-94 (1964).
- KIMURA, Y. et MILLER, V. L., The degradation of organomercury fungicides in soil, *J. Agric. Food Chem.*, 12, 253-257 (1964).
- LAMBERT, S. M., PORTER, P. E. et SCHIEFERSTEIN, R. H., Movement and sorption of chemicals applied to the soil, *Weeds*, 13, 185-190 (1965).
- MISRA, S. G. et MISRA, A. L., A note on the adsorption of thiocyanate ions by soils and compost, *Proc. nat. Acad. Sci. India*, 32 A, 360-364 (1962).
- MOJE, W., MUNNECKE, D. E. et RICHARSON, L. T. Carbonyl sulphide, a volatile fungitoxicant from nabam in soil. *Nature*, 202, 831-832 (1964).
- MUNNECKE, D. E. et MARTIN, J. P., Release of methylisothiocyanate from soils treated with Mylone (3,5-dimethyltetrahydro-1, 3, 5, 2 H-thiadiazine-2-thione), *Phytopath.*, 54, 941-945 (1964).
- NOSE, K., SUZUKI, T. et FUKUNAGA, K., Pentachlorophenol (PCP) adsorption on soil. 1. Variety of PCP adsorption (en japonais), *J. Sci. Soil Tokyo*, 34, 243-246 (1963).
- NOSE, K., SUZUKI, T. et FUKUNAGA, K., Pentachlorophenol (PCP) adsorption on soil. 2. Effects of humus, pH and exchangeable cations upon PCP adsorption by soil (en japonais), *J. Sci. Soil Tokyo*, 34, 291-295 (1963).
- NOSE, K., SUZUKI, T. et FUKUNAGA, K., PCP adsorption on soil. 3. Some correlation between PCP adsorption, heat of wetting and cation exchange capacity (en japonais), *J. Sci. Soil Tokyo*, 34, 367-370 (1963).
181. Ylimäki, A., Additional experiments on the chemical control of clover rot, *Publ. Finnish State Agr. Res. Board*, 148, 31-45 (1956)
182. Young, R. A., and Tolmsoff, W. J., Current season and residual effects of vapam soil treatments for control of *Verticillium* wilt of potatoes, *Plant Disease Repr.*, 42, 437-40 (1958)
183. Zentmyer, G. A., A laboratory method for testing soil fungicides, with *Phytophthora cinnamomi* as test organism, *Phytopathology*, 45, 398-404 (1955)
184. Zentmyer, G. A., and Erspamer, J. L., Vapam as a soil fumigant and as a chemotherapeutant, *Phytopathology*, 47, 38-39 (1957)
185. Zentmyer, G. A., and Gilpatrick, J. D., Soil fungicides for prevention and therapy of *Phytophthora* root rot of avocado, *Phytopathology*, 50, 660 (1960)
186. Zentmyer, G. A., and Kendrick, J. B., Fungicidal action of volatile soil fumigants, *Phytopathology*, 39, 864 (1949)
187. Zentmyer, G. A., Moje, W., and Mircetich, S. M., Ethionine as a chemotherapeutant, *Phytopathology*, 52, 34 (1962)

POLYAKOV, I. M., VLADIMIRSKAYA, M. E. et SHMETTSE, N. V. Effect of soil conditions on phytotoxicity of fumigants (en russe), *Trudy vsesojuz. nauch.-issled. Inst. Zashch. Rast.*, 20, 21-23 (1964).

RAABE, R. D. et HURLIMANN, J. H., Penetration of Dexon into greenhouse soil mixes, *Abstr. in : Phytopath.*, 55, 1072 (1965).

SEIDEL, D., Relationships between the recolonization of partially sterilized soil and *Pythium debaryanum* incidence in seedlings (en allemand), *Zbl. Bakt.*, 118, 500-506 (1964).

SHATLA, M. N. et SINCLAIR, J. B., Effect of pentachloronitrobenzene on *Rhizoctonia solani* under field conditions, *Plant Disease Repr.*, 49, 21-23 (1965).

SMITH, D. H., Effect of fumigants on the soil status and plant uptake of certain elements, *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 27, 538-541 (1963).

SMITH, L. R. et ASHWORTH jr., L. J., A comparison of the modes of action of soil amendments and pentachloronitrobenzene against *Rhizoctonia solani*, *Phytopath.*, 55, 1144-1146 (1965).

## COLLOQUE INTERNATIONAL SUR L'ÉVOLUTION ET LA MODERNISATION DE LA DOCUMENTATION SCIENTIFIQUE

En octobre 1964, le Centre de Documentation de l'*Institut Français de Recherches Fruitières Outre-Mer*, a organisé un colloque international dans la salle des conférences du C. N. R. S., sur l'*Évolution et la modernisation de la documentation scientifique*.

Le volume des actes du Colloque vient de paraître. Il comprend, en particulier, les rapports et communications soumis au colloque, et le compte-rendu *in-extenso* des débats des trois séances : la première, présidée par M. DROUINEAU, inspecteur général de l'I. N. R. A., était consacrée au journal de résumés ; la seconde, présidée par M. POINDRON, chef du service technique à la Direction des bibliothèques, aux index ; la troisième, présidée par M. BASTARDIE, chef du service photographique du C. N. R. S., aux problèmes de microcopie et de reprographie.

198 pages -:- 3 dépliant hors texte

**Prix 50 F**

**I. F. A. C., 6, rue du Général-Clergerie, Paris, 16<sup>e</sup>**