



La biofumigation, une méthode de lutte contre les maladies du sol

V. MICHEL¹, H. AHMED et A. DUTHEIL², Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW, Centre des Fougères, CH-1964 Conthey

 E-mail: vincent.michel@acw.admin.ch
Tél. (+41) 27 34 53 511.

Introduction

Les maladies du sol sont des contraintes biologiques qui limitent la production de nombreuses cultures. Elles peuvent être causées par des champignons ou des bactéries. Dans les régions tempérées, les maladies fongiques prédominent. Les plus importantes appartiennent aux genres *Phytophthora*, *Verticillium*, *Fusarium*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Thielaviopsis*, *Pyrenochaeta* et *Sclerotinia*. Beaucoup de ces pathogènes attaquent de nombreuses plantes hôtes. La verticilliose par exemple, causée par *Verticillium dahliae* et *V. albo-atrum*, provoque des flétrissements sur tomate, poivron, pomme de terre, fraise, différentes plantes médicinales, abricotier, etc. (Pegg et Brady, 2002). En conséquence, une lutte contre les maladies du sol basée sur la rotation des cultures s'avère souvent difficile. D'autant plus que ces pathogènes forment des structures de survie telles que des (micro) sclérotés*, des chlamydospores* ou des oospores* qui persistent pendant des années dans le sol. Les autres moyens de lutte ont aussi leurs limites. Par exemple, l'utilisation de variétés résistantes est souvent limitée par leurs autres caractéristiques telles que le rendement ou la qualité, qui ne correspondent pas aux attentes de la production, du commerce ou des consommateurs. Quant aux méthodes de lutte physique, telles que la stérilisation à la vapeur ou la solarisation*, elles sont soit très coûteuses, soit

¹Avec la collaboration technique de R. Carron et M. Fellay.

²Etudiant à l'ENITA de Clermont-Ferrand, BP 35 - 63370 Lempdes, France.

*Les mots munis d'un astérisque sont définis dans l'encadré «Glossaire».

Résumé

La biofumigation est une méthode biologique visant à réduire le nombre de pathogènes, de ravageurs et de semences de mauvaises herbes dans le sol. Elle est basée sur l'utilisation de plantes riches en glucosinolates, principalement des crucifères. Lors de la décomposition de ces plantes, les glucosinolates sont transformés en isothio- et thiocyanates, molécules volatiles et toxiques pour certains organismes du sol. L'effet de la biofumigation contre la verticilliose, une maladie du sol, a été testé dans une série d'essais au champ et en pot. Les microsclérotés, forme de survie de la verticilliose dans le sol, ont pu être réduits de 19 à 74%. L'efficacité de la biofumigation dépend beaucoup de l'application correcte de cette méthode.

Glossaire

- Chlamydospore:** cellule à paroi épaisse (forme de résistance) chez certains champignons.
- Enzyme:** substance organique soluble qui catalyse une réaction biochimique.
- Fumigant:** substance utilisée pour la fumigation, une méthode de stérilisation basée sur des produits chimiques volatils et toxiques qui sont injectés dans l'espace à traiter (sol, local de conservation).
- Glucosinolate:** molécules organique qui contient du soufre, de l'azote et des dérivés de glucose.
- (Micro)sclérote:** chez certains champignons, organe de conservation de forme et de taille variables. Les microsclérotés sont des sclérotés de petites tailles.
- Mycélium:** appareil végétatif des champignons, formé de filaments ramifiés, généralement blancs.
- Oospore:** spore des champignons appartenant aux oomycètes pourvue d'une paroi épaisse lui permettant de survivre dans le sol.
- Solarisation:** méthode de stérilisation du sol basée sur l'augmentation de la chaleur en couvrant le sol avec un plastique transparent.
- Vacuole:** cavité du cytoplasme des cellules, renfermant diverses substances en solution dans l'eau.
- Xylème:** tissu végétal composé de cellules mortes avec la fonction de transporter la sève brute des racines aux feuilles.

pas praticables dans notre environnement (manque de soleil). Enfin, les produits phytosanitaires contre les maladies du sol sont très peu nombreux et leur efficacité est limitée.

Récemment, la recherche internationale s'est intensifiée afin de trouver de nouvelles méthodes de lutte contre les maladies et ravageurs du sol. L'élément déclencheur a été l'interdiction du bromure de méthyle, un fumigant* chimique très efficace (Ristaino et Thomas, 1997). Ce produit à large spectre permet de se débarrasser de la quasi-totalité des organismes nuisibles dans le sol tels que champignons, bactéries, insectes, nématodes et mauvaises herbes. Mais l'effet destructeur du bromure de méthyle sur la couche d'ozone a provoqué son interdiction dans les pays développés depuis le 1.1.2005 (Protocole de Montréal de 1997). Cette interdiction a fortement stimulé le développement d'alternatives, surtout dans des pays grands utilisateurs de bromure de méthyle. En Italie, deuxième consommateur de bromure de méthyle après les Etats-Unis, un grand intérêt pour des nouvelles méthodes de lutte existe (Gullino *et al.*, 2003). Parmi celles-ci figure la biofumigation, méthode développée dans plusieurs pays tels que l'Australie, les Etats-Unis et l'Italie (Kirkegaard et Matthiessen, 2004; Morra, 2004; Lazzeri *et al.*, 2004b). Actuellement, la biofumigation est fortement développée en Italie par l'institut de recherches ISCI (Istituto sperimentale per le colture industriali), à Bologne. Cet institut est également actif dans la sélection de variétés spécifiquement conçues pour la biofumigation. Elles sont commercialisées sous le label Bluformula (www.bluformula.com) par la maison Cerealtoscana à Livourne (Italie).

De 2003 à 2005, l'efficacité de la biofumigation contre la verticilliose du fraisier et du poivron a été testée par Agroscope Changins-Wädenswil, au domaine expérimental de Bruson et au Centre des Fougères, ainsi que chez deux producteurs à Riddes et à Saxon. Les résultats de ces essais sont présentés ici, avec des conclusions pour une application optimale de la biofumigation.

Matériel et méthodes

Principe de la biofumigation

La biofumigation est une méthode culturale qui permet de réduire le nombre de pathogènes (champignons, bactéries), de ravageurs (insectes, nématodes) et de semences de mauvaises herbes dans le sol. Elle est

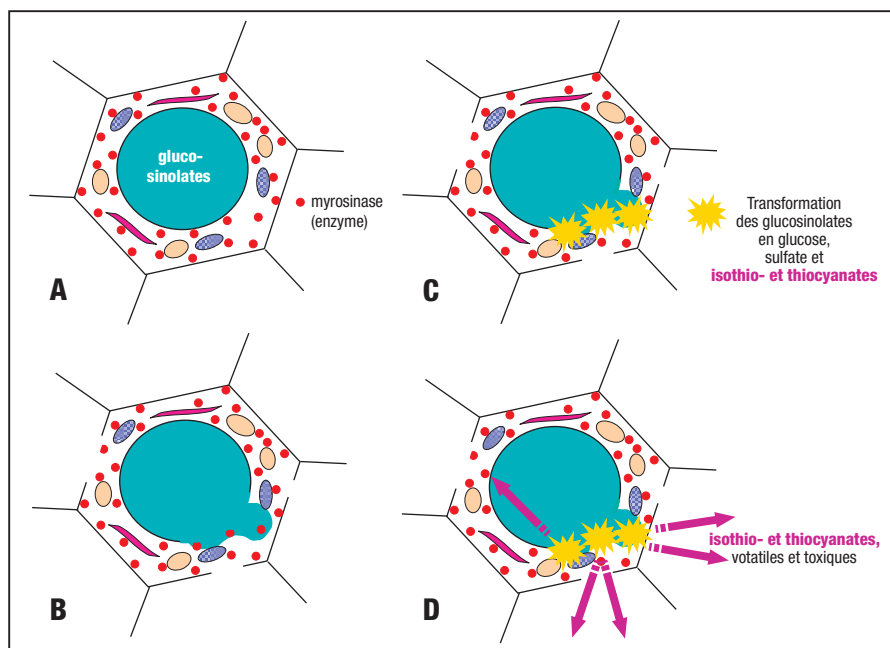


Fig. 1. Description schématique des processus amenant à l'effet de biofumigation au niveau d'une cellule végétale. A: cellule d'une crucifère avec la vacuole (au centre) contenant des glucosinolates et le cytoplasme contenant la myrosinase (un enzyme). B: lors de la dégradation de la plante, les parois cellulaires sont abîmées et les glucosinolates quittent la vacuole. C: en contact avec la myrosinase, les glucosinolates sont transformés en glucose, sulfate et isothio- et thiocyanates. D: les isothio- et thiocyanates, molécules toxiques et volatiles, quittent la cellule par des fissures dans la paroi cellulaire.

basée sur la libération de molécules toxiques et volatiles lors de la dégradation de certaines plantes. Les espèces végétales qui se prêtent spécialement pour la biofumigation appartiennent à la famille des crucifères (diverses moutardes, roquette, radis). Ces espèces contiennent une grande quantité de glucosinolates* dans la vacuole* cellulaire (fig.1a). La cellule contient également – mais dans un autre compartiment que les glucosinolates – l'enzyme* myrosinase. Lors de la dégradation de la cellule, les glucosinolates entrent en contact avec cette enzyme (fig.1b) et sont par la suite transfor-

més en isothio- et thiocyanates (fig.1c) et en deux autres groupes de molécules (Matile, 1980; Rollin et Palmieri, 2004). Les isothio- et thiocyanates sont toxiques et volatiles. Elles sortent des cellules par des fissures du tissu végétal et sont diffusées dans l'environnement (fig.1d). Lors d'une incorporation des plantes dans le sol, ces gaz pénètrent dans la terre environnante et y tuent certains pathogènes, ravageurs et semences de mauvaises herbes. La biofumigation a un effet sélectif, contrairement au bromure de méthyle. D'une part, les différentes espèces de plantes contiennent différents glucosino-



Fig. 2. Broyage avec un girobroyeur (A) et incorporation avec une fraise (B) de la moutarde jaune, une plante à biofumigation.

lates, mais seuls certains glucosinolates génèrent des isothio- et thiocyanates sous l'action de la myrosinase (Rollin et Palmieri, 2004). L'effet de biofumigation d'une plante est donc plus ou moins marqué selon la composition des glucosinolates qu'elle contient dans ses cellules (Kirkegaard et Matthiessen, 2004). D'autre part, les micro-organismes, champignons et bactéries, sont différemment affectés par les isothio- et thiocyanates. Par exemple, de faibles quantités de ces molécules suffisent pour tuer certains pathogènes tels que *Sclerotinia* ou *Pythium*, alors qu'il faut des doses trente fois supérieures pour venir à bout des *Trichoderma* (Kirkegaard et Matthiessen, 2004), des champignons dégradant la cellulose et connus comme antagonistes de certains pathogènes.

La technique de la biofumigation nécessite des variétés spécialement sélectionnées pour cet usage, telles que les variétés Blufomula. Ces variétés sont riches en glucosinolates; de plus, ces glucosinolates sont ceux qui se transforment en isothio- et thiocyanates lors de la transformation par la myrosinase. Lorsque les plantes ont accumulé la plus grande quantité de glucosinolates (stade de pleine floraison), elles sont broyées très finement pour accélérer le processus de la dégradation et mélangées avec le sol (fig. 2). Pour garantir une formation rapide des substances toxiques, le sol doit être humide et il est recommandé d'irriguer la parcelle. La vitesse de la formation d'isothio- et thiocyanates est primordiale pour l'efficacité de la biofumigation, qui dépend de la concentration maximale d'isothio- et thiocyanates obtenue dans le sol. Cette concentration est normalement atteinte un à deux jours après l'enfouissement des plantes de biofumigation. En raison de la nature volatile des isothio- et thiocyanates, leur concentration dans le sol diminue rapidement. Une semaine après l'enfouissement, il est alors possible de mettre la culture en place.

Biofumigation contre la verticilliose

La verticilliose

Verticillium dahliae et *V. albo-atrum*, les champignons causant la verticilliose, survivent dans le sol sous forme de microsclérotos (*V. dahliae*) ou de mycélium mélanique (*V. albo-atrum*) très résistants à la dégradation par d'autres micro-organismes du sol. Ces organes de survie germent lors d'un passage d'une racine d'une plante hôte à proximité et envahissent les racines de celle-ci. Ensuite, les champignons se répandent dans toute la plante par le biais du xylème*. Ce dernier, obstrué par le mycélium* des champignons, ne permet plus la circulation de la sève brute, avec comme conséquence des symptômes de flétrissement de la plante (fig. 3). Lors d'une forte attaque, les pathogènes peuvent provoquer la mort de la plante. Dans les débris de la plante, des microsclérotos ou du mycélium mélanique sont formés par les champignons. L'enfouissement des débris en fin de saison entraîne la contamination du sol par ces organes de survie des deux pathogènes et met en danger la culture suivante si elle est sensible à la verticilliose.



Fig. 3. Poivrons montrant des symptômes de flétrissement d'un stade avancé de la verticilliose.

Pour mesurer l'impact de la biofumigation sur la verticilliose, le nombre des organes de survie par gramme de sol a été déterminé. Les méthodes existantes se limitent au dénombrement de microsclérotos de *Verticillium dahliae* (Thermorshuizen *et al.*, 1998). Aucune méthode n'existe actuellement pour estimer les quantités de mycélium mélanique formées par *V. albo-atrum*. Deux méthodes et deux milieux sélectifs ont été testés en laboratoire avant le choix définitif d'une méthode (Dutheil, 2005). Basée sur nos résultats et les informations dans la littérature (Butterfield et DeVay, 1977), une méthode de répartition sèche du sol sur un milieu sélectif (Kabir *et al.*, 2004) a été utilisée pour nos travaux de recherche.

Essai en plein champ

Entre 2003 et 2005, l'efficacité de la biofumigation contre la verticilliose du fraisier et du poivron a été testée dans trois essais au champ.

Dans un premier essai à Brusson, la biofumigation a été comparée avec deux engrais verts exempts de glucosinolates (trèfle violet et seigle), deux composts (tabl.1) et deux témoins (avec et sans engrais azoté). Pour la biofumigation, Blufomula ISCI-20, une variété de moutarde brune (*Brassica juncea*)

riche en glucosinolates a été utilisée. L'essai a eu lieu dans une parcelle fortement contaminée avec *V. dahliae*. Chacun des sept procédés a été répété sur quatre microparcelles de 5 x 1,5 m chacune. En août 2003, la moutarde brune a été semée et en octobre de la même année, elle a été incorporée au stade pleine floraison dans le sol à l'aide d'une fraise montée sur un motocultivateur. Un premier passage avec la fraise a servi de broyeur alors que l'enfouissement des plantes proprement dit a été effectué lors d'un deuxième passage. Début avril 2004, le trèfle violet et le seigle ont été semés pour être incorporés mi-mai. Les deux composts ont été incorporés fin avril 2004. Fin mai 2004, vingt plantes de fraises (variété Elsanta, sensible à la verticilliose) ont été plantées par microparcelle, en utilisant des plants frigo. Pour déterminer le nombre de microsclérotos de *V. dahliae*, un échantillon de sol a été prélevé début mai 2005, composé de dix prélèvements de terre sur une profondeur de 20 cm par microparcelle. A la même date, l'état sanitaire des fraisiers a été noté et l'essai s'est terminé après la récolte en août 2005.

En 2005, deux essais ont été conduits chez des producteurs de poivron (*Capsicum annuum*) en Valais, Lionel Favre à Riddes (essai Favre) et Raymond Egg à Saxon (essai Egg). Sur les deux sites, des poivrons ont été cultivés en pleine terre sous tunnel froid.

L'essai Favre consistait en deux tunnels, un avec biofumigation et un témoin. Pour la biofumigation, la moutarde brune Blufomula ISCI-20 a été semée fin avril et incorporée avec une fraise mi-juin (fig. 2b). Immédiatement avant l'enfouissement, la moutarde, au stade pleine floraison, a été broyée finement avec un girobroyeur (fig. 2a). Une semaine plus tard, des poivrons de la variété Corne de bœuf rouge (sensible à la verticilliose) ont été plantés. Un échantillon de sol pour la détermination du nombre de microsclérotos a été prélevé dans les deux tunnels un jour avant la plantation. Dans chaque tunnel, des prélèvements de terre sur une profondeur de 20 cm ont été effectués tous les 5 m sur la longueur du tunnel (48 m) pour former un seul échantillon final. La profondeur de 20 cm correspondait à la hauteur des buttes sur lesquelles les poivrons ont été plantés par la suite. Les symptômes de flétrissement et le nombre de plantes mortes ont été notés mi-octobre.

Dans l'essai Egg, la moutarde brune Blufomula ISCI-20 a été semée début mai dans un tunnel. Le broyage et l'enfouissement ont eu lieu début juillet et des poivrons de la va-

Tableau 1. Description des deux composts utilisés (105 m³/ha) comme moyen de lutte contre la verticilliose du fraisier dans un essai au Domaine de Brusson (1080 m) en 2004.

	Compost jeune	Compost mûr
Matière organique	44,0%	40,5%
Matière sèche	58,4%	62,8%
C/N	13,1	24,3
Poids spécifique	571 kg MF/m ³	362 kg MF/m ³
pH (H ₂ O)	8,0	7,5
Salinité (H ₂ O)	3,21 m-S/cm	2,21 m-S/cm

riété Somborka (sensible à la verticilliose) ont été plantés une semaine plus tard. Pour combler l'absence d'un tunnel témoin, un échantillon de sol pour déterminer le nombre de microsclérotés a été prélevé un jour avant l'incorporation de la moutarde brune et un jour après la plantation des poivrons. Le prélèvement a été fait de la même façon que dans l'essai Favre. Les symptômes de verticilliose ont été notés mi-octobre.

Essai en pots

Au printemps 2006, un essai en pots a été conduit au Centre des Fougères pour comparer l'influence des variétés de moutarde sur l'effet de la biofumigation. Les deux variétés de moutarde brune Bluformula ISCI-20 (riche en glucosinolates) et ISCI-99 (très riche en glucosinolates) ainsi que la variété de colza (*Brassica napus*) Talent (variété type 00, pauvre en glucosinolates) ont été cultivées dans des pots contenant un substrat du commerce. Après deux mois de culture sous serre, les parties aériennes des plantes (stade début floraison) ont été coupées et fi-

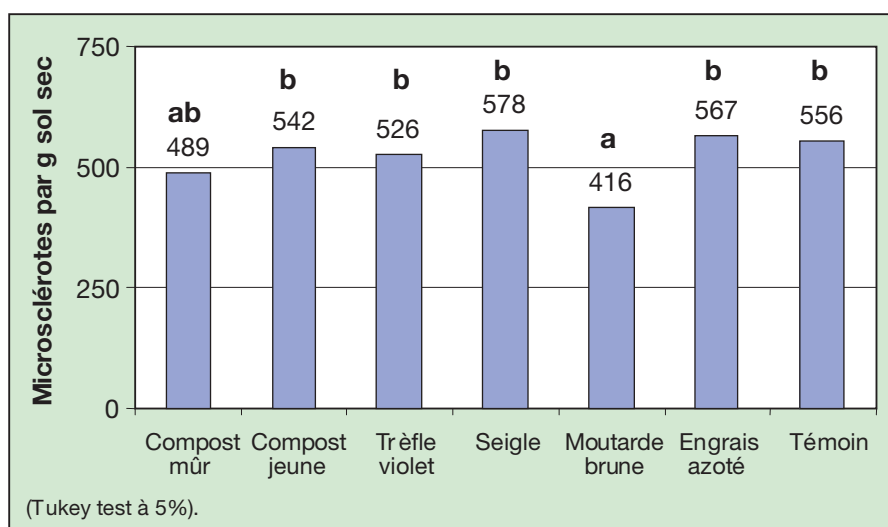


Fig. 4. Nombre de microsclérotés de *Verticillium dahliae* dans le sol après l'incorporation de différents engrais verts et composts dans une parcelle fortement contaminée à Bruson. Le procédé engrais azoté est le seul à avoir reçu 84 kg N/ha. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les procédés.

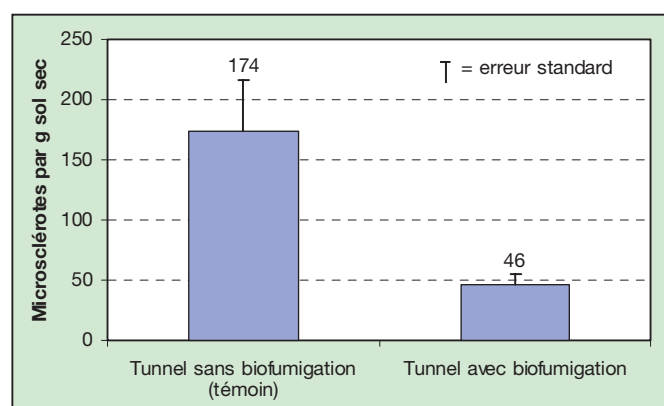


Fig. 5. Nombre de microsclérotés de *Verticillium dahliae* dans les deux tunnels de l'essai Favre à Riddes.

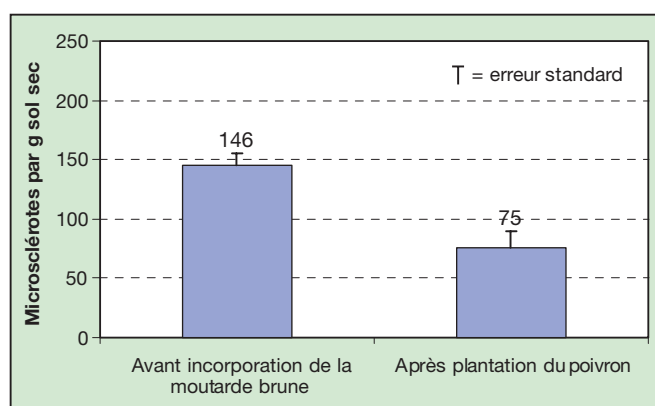


Fig. 6. Nombre de microsclérotés de *Verticillium dahliae* dans le tunnel de l'essai Egg à Saxon. L'incorporation a eu lieu le 1.7.2005 et la plantation le 7.7.2005.

nement hachées à l'aide d'un hachoir de cuisine Zyliss. Immédiatement après, 70 g de ces tiges et feuilles hachées ont été mélangés avec environ deux tiers de litre de la terre prélevée dans le tunnel témoin de l'essai Favre. Ce mélange a été placé dans des pots en plastique d'un litre à raison de quatre pots par variété. La terre sans plante servait comme témoin et tous les pots ont été arrosés avant d'être placés à l'obscurité pendant une semaine. Ensuite, un échantillon par pot a été prélevé pour déterminer le nombre de microsclérotés de *V. dahliae*.

Résultats et discussion

A Bruson, la biofumigation a été la méthode la plus efficace contre les microsclérotés dans le sol (fig. 4). Parmi les autres procédés, seule l'application d'un compost mûr a légèrement réduit le nombre de microsclérotés de *V. dahliae*, sans atteindre les 19% de réduction (comparé au témoin) de la biofumigation. La biofumigation a permis de réduire de 74% le nombre de micro-

sclérotés dans l'essai Favre (fig. 5) et de 49% dans l'essai Egg (fig. 6). Dans l'essai en pots, la variété ISCI-99, très riche en glucosinolates, a réduit de 66% le nombre de microsclérotés et la variété

ISCI-20, riche en glucosinolates, de 54% (fig. 7). En revanche, le colza, pauvre en glucosinolates, a obtenu un effet bien plus faible, avec une réduction de 33% du nombre de microsclérotés.

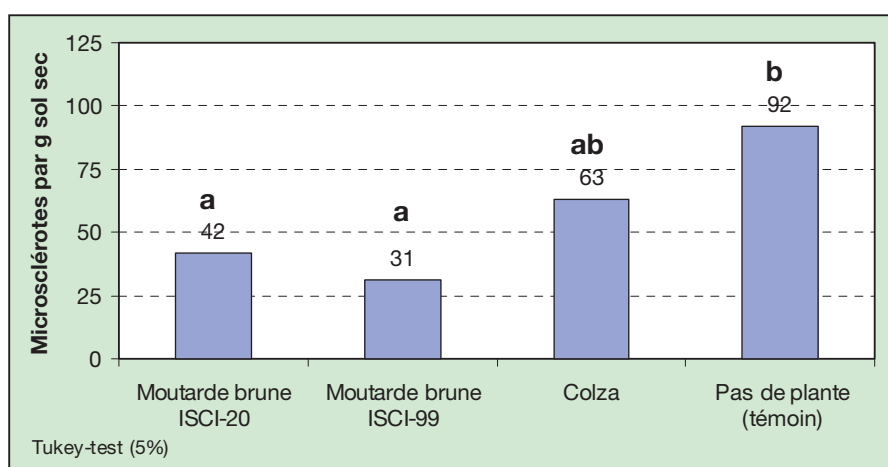


Fig. 7. Nombre de microsclérotés de *Verticillium dahliae* dans le sol après l'incorporation de différentes variétés de moutarde brune et de colza (variété Talent). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les procédés.

Tous ces résultats indiquent clairement qu'une réduction importante de *V. dahliae* peut être obtenue avec la biofumigation. L'efficacité relativement faible de cette nouvelle méthode de lutte observée à Bruson peut être expliquée par deux facteurs. Premièrement, le broyage des plantes, qui est d'une grande importance pour réussir la biofumigation, n'était pas assez fin. Pour obtenir un effet maximal, le broyage ne doit pas seulement couper les plantes le plus finement possible, mais idéalement écraser le plus grand nombre de cellules (Matthiessen *et al.*, 2004). Ce résultat peut être obtenu avec un girobroyeur à marteau ou une faucheuse équipée d'un éclateur (à rouleaux de préférence). Deuxièmement, l'incorporation en octobre était trop tardive. La transformation des glucosinolates en isothio- et thiocyanates est une réaction biochimique dont la vitesse est fortement influencée par la température. Plus le sol est froid, plus cette transformation se déroule lentement. Lors d'un enfouissement tardif dans un sol froid, les quantités d'isothio- et de thiocyanates formés peuvent s'avérer insuffisantes et surtout la vitesse de transformation trop lente pour obtenir un effet de biofumigation suffisant. Lors des essais chez les producteurs, ces deux erreurs dans l'application de la méthode commises à Bruson ont été évitées. Le broyage a été assez fin et la température au début de l'été suffisamment élevée pour obtenir un bon effet de biofumigation.

L'abondance de microscélérotés de *V. dahliae* à Bruson s'exprime par le taux élevé de plantes montrant des symptômes de verticilliose avant la récolte (tabl. 2). La faible réduction des microscélérotés par la biofumigation n'a pas suffi pour réduire l'incidence de verticilliose des fraisiers de manière significative. Dans l'essai Favre, un certain nombre de plants de poivrons ont été

Tableau 2. Taux de fraisiers montrant des symptômes de verticilliose (flétrissement des feuilles âgées, plantes mortes) en avril 2005.

Procédé	Plantes avec symptômes de verticilliose
Compost mûr	60% ¹
Compost jeune	61%
Trèfle violet	74%
Seigle	64%
Moutarde brune	57%
Engrais azoté	69%
Témoin	74%

¹Pas de différences significatives entre les procédés.

Conclusions

- ❑ La biofumigation est une méthode culturale qui permet de réduire considérablement le nombre de microscélérotés de *Verticillium dahliae* dans le sol. D'après la littérature, elle est aussi efficace contre d'autres maladies du sol.
- ❑ Pour que la biofumigation soit efficace, l'application correcte de cette méthode de lutte est indispensable:
 - utiliser des variétés sélectionnées pour la biofumigation, riches en glucosinolates
 - les incorporer au stade pleine floraison
 - broyer le plus finement possible les plantes avant l'incorporation
 - incorporer le plus profondément possible les plantes immédiatement après le broyage
 - après l'incorporation, le sol doit être bien humide. Irriguer en cas de sol sec, ou incorporer juste avant des précipitations
 - attendre une semaine avant la plantation ou le semis
 - appliquer la méthode pendant la période chaude de l'année (éviter une incorporation tard dans l'automne).

blessés lors de la plantation. Lors des notations de symptômes de verticilliose en octobre, il était impossible de savoir si les plantes mortes observées étaient victimes de ces blessures ou de la verticilliose. Pour cette raison, ces notations n'ont pas été incluses dans l'analyse de l'essai Favre. Dans l'essai Egg, aucune plante ne montrait des symptômes de verticilliose à l'intérieur du tunnel. A l'entrée du tunnel, trois plantes situées en bordure de la zone de traitement ont montré des symptômes de flétrissement, indiquant que la pression de la verticilliose était assez élevée avant la fumigation.

Ces premiers résultats dans l'utilisation de la biofumigation contre la verticilliose sont encourageants. Cette maladie est considérée comme plutôt résistante contre la biofumigation; d'autres pathogènes du sol sont plus sensibles aux substances toxiques libérées par la biofumigation (Kirkegard et Matthiessen, 2004). Des essais pour tester l'utilisation de cette méthode contre d'autres maladies du sol sont actuellement en cours à Agroscope Changins-Wädenswil.

L'amélioration de la méthode est un autre volet de recherches et de développement, aussi bien en Suisse qu'à l'étranger. Elle comprend la création de nouvelles variétés pour la biofumigation. La plus forte réduction de microscélérotés obtenue avec la variété Blufomula ISCI-99 par rapport à la plus ancienne variété, ISCI-20, démontre le potentiel d'amélioration de la méthode par la création de nouvelles variétés.

L'amélioration la plus récente consiste en l'utilisation des plantes de biofumigation sous forme de pellets (Lazzeri *et al.*, 2004a). Depuis février 2006, de tels

pellets sont commercialisés en Italie sous le nom de Biofence par Cerealtoscana à Livourne. Leur utilisation est actuellement testée à Agroscope Changins-Wädenswil.

Remerciements

Nous remercions chaleureusement M. L. Favre à Riddes et M. R. Egg à Saxon pour leur collaboration lors des essais conduits sur leurs parcelles.

Bibliographie

- Butterfield E. J. & DeVay J. E., 1977. Reassessment of soil assays for *Verticillium dahliae*. *Phytopathology* **67**, 1073-1078.
- Dutheil A., 2005. Composts et engrais verts: des alternatives pour le contrôle des maladies telluriques du fraisier. Cas des parasites fongiques *Verticillium* et *Phytophthora*. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Techniques Agricoles, ENITA Clermont-Ferrand.
- Gullino L. M., Camponogara A., Gasparrini G., Rizzo V., Clini C. & Garibaldi A., 2003. Replacing methyl bromide for soil disinfections: The Italian experience and implications for other countries. *Plant Dis.* **87**, 1012-1021.
- Kabir Z., Bhat R. G. & Subbarao K. V., 2004. Comparison of media for recovery of *Verticillium dahliae* from soil. *Plant Dis.* **88**, 49-55.
- Kirkegaard J. & Matthiessen J., 2004. Developing and refining the biofumigation concept. *Agroindustria* **3**, 233-239.
- Lazzeri L., Leoni O. & Manici L. M., 2004a. Biocidal plant dried pellets for biofumigation. *Industrial Crops Prod.* **20**, 59-65.
- Lazzeri L., Leoni O., Bernardi R., Malaguti L. & Cinti S., 2004b. Plants, techniques and products for optimising biofumigation in full field. *Agroindustria* **3**, 281-288.
- Matile P., 1980. «Die Senfölbombe»: Zur Kompartimentierung des Myrosinasesystems. *Biochem. Physiol. Pflanzen* **175**, 722-731.
- Matthiessen J., Warton B. & Shackleton M. A., 2004. The importance of plant maceration and water addition in achieving high *Brassica*-derived isothiocyanate levels in soil. *Agroindustria* **3**, 277-280.

- Morra M. J., 2004. Controlling soil-borne plant pests using glucosinolate-containing tissues. *Agroindustria* **3**, 251-256.
- Pegg G. F. & Brady B. L., 2002. Verticillium wilts. CABI Publishing, Wallingford (UK), 552 p.
- Ristaino J. B. & Thomas W. 1997. Agriculture, methyl bromide and the ozone hole. Can we fill the gaps? *Plant Dis.* **81**, 964-977.
- Rollin P. & Palmieri S., 2004. Sulfur-containing metabolites in Brassicales. *Agroindustria* **3**, 241-244.
- Thermorshuizen A. J., Davis. J. R., Gort G., Harris D. C., Huisman O. C., Lazarovits G., Locke T., Melero Vara J. M., Mol L., Paplomatas E. J., Platt H. W., Powelson M., Rouse D. I., Rowe R. C. & Tsror. 1998. Interlaboratory comparison of methods to quantify microsclerotia of *Verticillium dahliae* in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* **64**, 3846-3853.

Summary

Biofumigation, a control method for soil-borne diseases

The biofumigation is a biological method that aims the reduction of the number of pathogens, pests, and weed seeds in the soil. It is based on the use of plants with a high glucosinolate content, mainly cruciferous species. During the decomposition of these plants, glucosinolates are transformed in isothio- and thiocyanates. Latter substances are volatile and toxic to a number of soil organisms. The effect of the biofumigation on verticillium wilt, a soil-borne disease, was tested in a series of field and pot trials. The number of microsclerotia, organs of survival of verticillium wilt in the soil, was reduced between 19 and 74%. The factors influencing the efficacy of the biofumigation are discussed.

Key words: biofumigation, glucosinolates, isothio- and thiocyanates, soilborne diseases, verticillium wilt.

Zusammenfassung

Die Biofumigation, eine Methode zur Bekämpfung bodenbürtiger Krankheiten

Die Biofumigation ist eine biologische Methode zur Verringerung der Anzahl von Krankheitserregern, Schädlingen und Unkrautsamen im Boden. Sie stützt sich auf die Verwendung von Pflanzen mit einem hohen Glukosinolategehalt ab, hauptsächlich Kreuzblütler. Während dem Abbau der Pflanzen werden die Glukosinolate in Isothio- und Thiocyanate umgewandelt. Diese Substanzen sind gasförmig und für gewisse Bodenorganismen giftig. Die Wirkung der Biofumigation gegen die Verticilliumwelke, einer bodenbürtige Krankheit, wurde in einer Reihe von Feld- und Topfversuchen untersucht. Die Verringerung der Mikrosklerotien, den Dauerformen der Verticilliumwelke im Boden, betrug zwischen 19 und 74%. Die Faktoren, welche die Wirksamkeit der Biofumigation beeinflussen, werden diskutiert.

Riassunto

La biofumigazione, un metodo di lotta contro le malattie del suolo

La biofumigazione è un metodo biologico il cui scopo è la riduzione del numero di patogeni, di insetti dannosi e di semi di malerbe presenti nel suolo. È basata sull'utilizzazione di piante ricche di glucosinati e principalmente delle crocifere. Al momento della decomposizione di queste piante, i glucosinati sono trasformati in isothio- e thiocyanati. Queste sostanze sono delle molecole volatili e tossiche per certi organismi del suolo. L'effetto della biofumigazione contro la verticilliosi, una malattia del suolo, è stato testata in una serie di prove in campo e in vaso, ottenendo una riduzione del 19 al 74% del numero di microsclerosi, forma di sopravvivenza della verticilliosi nel suolo. L'efficacia della biofumigazione dipende molto dall'applicazione corretta di questa metodologia.