



**RAPPORT DE MISSION
EN GUADELOUPE
17 au 25 Mai 2008**



**Cette terre ! Cette terre qui s'étend, large de chaque côté,
grosse, lourde, avec sa charge d'arbres et d'eaux, ses fleuves
et ses ruisseaux, ses forêts, ses monts et ses collines (.....)
*Si c'était une créature vivante, un corps ? (Jean Giono, Colline, 1929)***

**L. Séguy
P. Guillaume**

SOMMAIRE

I	-INTRODUCTION	1
II	-RAPPEL DE QUELQUES POINTS FORTS UTILES POUR L'ACTION A L'ISSUE DU« TOUR DE PLAINE »	3
III	-SCHEMA CONCEPTUEL DES RECHERCHES	5
IV	-MODELISATION DES SYSTEMES BANANIERS EN SCV	10
	4.1. Dans le schéma I, relatif aux couverts permanents avec ou sans viviers	10
	4.2. Dans le schéma II, relatif aux couverts multifonctionnels sans vivriers associés	13
	4.3 Dans le schéma III, relatif aux couverts multifonctionnels avec vivriers associés	15
	4.4. Les bananeraies fleuries d'altitude	17
V	-MODELISATION DES SYSTEMES A BASE DE CANNE A SUCRE	18
VI	-POUR COMMENCER...	25
	6.1. Le couvert actuel de <i>Brachiaria decumbens</i>	25
	6.2. Soja pérenne	27
	6.3. Construire le système suivant	27
VII	-LES MOYENS MATERIELS ET RESSOURCES HUMAINES POUR AVANCER RAPIDEMENT	28
	7.1. Ressources humaines	28
	7.2. Equipements matériels incontournables pour pratiquer, maîtriser le semis direct et les couverts végétaux multifonctionnels	29
VIII	-MATERIEL VEGETAL A INTRODUIRE POUR CONSTRUIRE CE PROGRAMME	31
IX	- CONCLUSIONS	32
	ANNEXES I – Dossier Machinisme Agricole : équipement pour le semis direct	33
	ANNEXES II – ARTICLES SCIENTIFIQUES ET DE VULGARISATION INTERESSANTS.	49
	Annexe II.1 – Canne à sucre en semis direct	
	Annexe II.2. – Contrôle des nématodes	
	Annexe II.3. – Sols suppressifs, composts, activité et outils biologiques	

D) INTRODUCTION

(*) *Avis au lecteur : ma visite en Guadeloupe a été courte ; ce rapport a été rédigé en quelques heures ; le lecteur voudra bien être indulgent et prendre en compte davantage le fond que la forme.*

- Ce rapport est un document de travail à l'usage des chercheurs et des agronomes qui réunit et organise des propositions concrètes aussi bien pour la recherche que pour le développement, pour construire les bases de l'agriculture durable en Guadeloupe.
- Après un rapide "tour de plaine" qui fera état de quelques observations et indicateurs pertinents pour l'action relevés dans les systèmes de culture et les unités de paysage, seront abordées les propositions essentielles en matière de recherche (*concepts, méthodes, actions*) concernant les systèmes bananiers et à base de canne à sucre qui pratiquent¹ encore un travail intensif du sol et ces grandes monocultures sous une pluviométrie agressive (*entre 3 et 4 m d'eau à la station du Neuf Château*).
- Ces propositions, qui constituent «le champ des possibles²», sont organisées en systèmes de culture fortement contrastés, élaborés à partir de l'ingénierie écologique, qui induisent des impacts très différenciés sur leurs performances agronomiques, leur faisabilité technique, leur variabilité économique et leur reproductibilité environnementale. Cette dernière propriété devient une exigence d'autant plus pressante qu'une pollution pesticide des écosystèmes (*chlordecone*) est bien réelle à la Guadeloupe et est au cœur de très vives polémiques qui ont récemment défrayé la chronique, notamment pour ce qui concerne les conséquences négatives³ possibles de cette contamination pour la santé humaine.
- Une des fonctions principales de ces systèmes d'agriculture durable sera donc bien de tenter d'assainir-épurer rapidement et efficacement les sols fortement contaminés par le chlordecone, même si cette molécule semble à priori, "indestructible" au sein des sols travaillés. Un pouvoir dépolluant détoxifiant plus global et polyvalent à travers le développement d'une très forte activité biologique diversifiée et soutenue, sera également recherché pour minimiser, en même temps, les nuisances majeures du bananier que constituent le nématode *Radopholus similis*, le coléoptère ravageur des racines *Cosmopolites s.* et la cercosporiose.
- Cette construction de l'agriculture durable en Guadeloupe est aussi, au plan des méthodes d'intervention de la recherche, l'occasion de réconcilier l'approche réductionniste (*ou analytique, cartésienne*) avec l'approche holistique (*ou systémique, synthétique*). Si la première est bien fournie et de plus en plus riche en ressources humaines et moyens de qualité en Guadeloupe, la seconde fait cruellement défaut et pourtant elle constitue un outil particulièrement précieux et fédérateur pour construire des systèmes innovants complexes, car elle les considère comme des entités qui possèdent des caractéristiques émergentes liées à leur «totalité», propriétés qui ne sont pas réductibles à une simple addition de celles de leurs éléments (*Schwarz, 1997*). La complexité du fonctionnement du sol et notamment de son activité biologique et de son potentiel polyvalent *in situ*, face à notre immense ignorance, milite pour que les processus

¹ La France a pris beaucoup de retard sur l'agriculture durable.

² Elaboré à partir de systèmes de culture en Semis Direct bien maîtrisés au Brésil Cf. «La symphonie inachevée du Semis Direct » Mai 2008 sur site www.agroecologie.cirad.fr à la rubrique Brésil.

³ Même, si, selon les spécialistes, cette molécule est très peu mobile dans le bananier et n'atteint pas les fruits. Les tubercules sont par contre fréquemment contaminés et peuvent, de ce fait, servir d'indicateurs pertinents.

(*recherches thématiques*) soient replacés dans un contexte global (*systèmes de culture et de production, unités de paysage*) et ensuite analysés à l'échelle des mécanismes qui les expliquent. "Le vrai moyen de parvenir à bien connaître des objets complexes, même dans leurs plus petits détails, c'est de commencer par les envisager dans leur entier" (**Lamarck, 1809**).

• La structuration de nos propositions en dispositifs expérimentaux systémiques (*matrices des systèmes*), qui sont à l'amont les déterminants générateurs des recherches thématiques, permettrait :

- de mettre en place et de pérenniser de véritables «laboratoires de veille scientifique», en connexion directe avec les problématiques agricoles, car issus de ces problématiques réelles en constante évolution ;
- de garantir une pluridisciplinarité effective : des équipes de chercheurs de différentes spécialités intervenant sur un même support expérimental⁴ (*systèmes de culture contrastés à impacts différenciés*),
- d'être également porteuse d'une «bonne recherche», soit celle qui, simultanément, produit des connaissances scientifiques de qualité et construit des innovations systèmes plus performantes et appropriables par les agriculteurs.

• **Sur ces dispositifs systémiques pérennisés**, qui réunissent une très large gamme de scénarios contrastés de développement durable (*Semis direct sur Couverture Végétale permanente, gestion progressivement au plus près de "l'écologique"*), de nombreuses thématiques fondamentales⁵ conséquentes des impacts différenciés des systèmes peuvent être étudiées, au-delà des problématiques d'assainissement des sols précédemment citées (*agrottoxiques en général, Chlordécone, nématodes, coléoptères, cercosporiose*) :

- **Capacité de séquestration du carbone et dynamique de l'azote** (*organique ↔ minéral*), résilience, qualité biologique des sols au sens large ;
- **Contrôle naturel des adventices, des ravageurs et des maladies ;**
- **Bilans hydriques et minéraux** comparés : fonctionnement des systèmes en circuit "fermé" ou "ouvert" ;
- **Modes de gestion⁵ plus écologiques de la banane et de la canne à sucre**: de la gestion chimique actuelle à une gestion organo-biologique dominante qui garantit des productions, sols et eaux "propres", exempts de résidus agrottoxiques (*pesticides, nitrates*). Soit, mieux gérer les agro-écosystèmes actuels qui sont des consommateurs massifs "d'énergie culturelle industrielle" et les faire évoluer de manière structurée vers des "écosystèmes cultivés" construits de plus en plus à partir de "l'énergie culturelle biologique", issus de la gestion de la biodiversité qui peut fournir des services écologiques de plus en plus performants et gratuits.

⁴ Un dispositif expérimental systémique (*terrain – labo - terroir*) garantit la pluridisciplinarité effective et interactive, et la hiérarchisation permanente des composantes des systèmes au cours du temps, qui permet d'en assurer les progrès ; à l'inverse, la juxtaposition des disciplines cloisonnées, isolées, aussi brillantes et pointues soient-elles, ne conduit jamais à la pluridisciplinarité efficace et à l'émergence de systèmes cohérents, opérationnels et performants.

⁵ Cf. Document L. Ségué, S. Bouzinac et partenaires brésiliens « La symphonie inachevée du Semis Direct » - Mai 2008 sur site www.agroecologie.cirad.fr.

· Enfin, seront abordés : **quels outils immédiatement disponibles et transférables** peuvent faire avancer rapidement, et dès maintenant chez les agriculteurs, l'agriculture durable à la Guadeloupe :

- **Semoirs de semis direct** les plus performants pour semis des couverts végétaux multi-espèces, des cultures vivrières à haute valeur ajoutée dans les interlignes doubles des plantations bananières et en interculture de 2 cycles de canne ;
- **Outils combinés de plantation directe de la canne sur pailles résiduelles (monoculture)** : ouverture du sillon + Plantation en une seule opération sur 15 t/ha de paille ;
- **Les personnes ressources compétentes** pour amorcer dès maintenant la formation et la professionnalisation des divers acteurs (*agronomes, techniciens, agriculteurs*)
- **Le germoplasme d'espèces pourvoyeuses de très puissantes biomasses⁶** (*jusqu'à 25-32 t/ha de matière sèche annuelle*), génératrices d'une très forte activité biologique soutenue

(*)*Au-delà de la Guadeloupe, le développement de cette agriculture durable intéresse toutes les îles des Caraïbes, la Guyane, Haïti qui se trouve dans une situation désastreuse et qui pourrait bénéficier de la très puissante capacité de régénération des sols dégradés qu'offrent ces systèmes SCV, notamment pour la production vivrière.*

· **Mots-clefs** : Ingénierie écologique - Systèmes de culture sur Couverture Végétale permanente du sol (SCV) à base de bananiers, de canne à sucre, de vivriers – Multifonctionnalité des couverts végétaux – Phytoremédiation – Activité biologique – Contrôle naturel des adventices, des ravageurs, des maladies – Outils de l'écologie microbienne – Gestions chimique et organique de la banane, de la canne, des vivriers – Mécanisation de la canne en SCV.

II) RAPPEL DE QUELQUES POINTS FORTS UTILES POUR L'ACTION A L'ISSUE DU "TOUR DE PLAINE"

(*) *Le rapport de mission de Patrice Guillaume et L. Séguy du 30/05/2008, retrace le parcours de la mission et résume les principales réactions et réflexions faites au cours des visites.*

En résumé :

1/ Sur la flore adventice⁷ de la zone bananière sous très forte pluviométrie :

- Présence d'espèces caractéristiques des sols de rizières hydromorphes gérées avec lame d'eau : Cypéraceae du genre *Fimbristylis*, Piperaceae (*Peperomia p.*), Euphorbiaceae (*Caperonia palustris*), graminées des genres *Echinochloa*, *Brachiaria (mutica)*, etc. ... ⇒ Nécessité de créer une forte macroporosité fonctionnelle pour drainer très rapidement le profil cultural (*effet chasse d'eau*) et le ré-oxygéner (*meilleur fonctionnement physiologique du bananier → réduction de l'incidence des maladies telles que la cercosporiose, etc. ...*) ;

⁶ Cf. Document L. Séguy, S. Bouzinac et partenaires brésiliens « La symphonie inachevée du Semis Direct » - Mai 2008 sur site www.agroecologie.cirad.fr.

⁷ Toutes les espèces rencontrées sont connues comme les moyens de les contrôler avec des couvertures végétales (SCV).

- **Repérées sur la station de Neuf Château, des plantes utiles aux SCV dont parmi les légumineuses : *Pueraria phaseloides*, *Arachis pintoï*, un *Centrosema (pubescens ?)* ou un *Clitoria ?* ; les graminées : écotypes divers de *Cynodon d.* et *Axonopus c.* cette dernière est une des graminées à stolons et rhizomes à très forte dominance et qui supporte le mieux l'ombrage. Ces espèces déjà présentes seront utilisées dans la construction des SCV.**
- Dans les parcelles de l'agriculteur M. Tino Dambas, présence fréquente d'une magnifique légumineuse : *Sesbania*⁸ (*speciosa ? exaltata ?*), qui possède une très forte charge de nodosités fonctionnelles ⇒ à utiliser dans les SCV.

2/ Sur la gestion des sols

Les sols sont **encore et toujours travaillés** (voire "défoncés" sur 40 à 50 cm de profondeur dans les terres de canne de Gardel) entraînant un bilan de gestion des sols très négatif et non durable qui ne répond pas au critère de reproductibilité environnementale et reste un fort consommateur d'intrants chimiques :

- **Perte importante et continue de carbone** (Cf. article en annexe sur le potentiel de séquestration de carbone dans les systèmes à base de canne et le document L. Séguy et al «*La symphonie inachevée du Semis Direct*» - mai 2008), déprotection des matières organiques,
- **Perte temporaire et importante d'eau** de 60 à 100 mm durant le travail du sol,
- **Très forte consommation "d'énergie culturelle industrielle"**, en général,
- **Fonctionnement agronomique du système Sol-Cultures en circuit "ouvert"** aux pertes de nutriments (*érosion de la CEC, lixiviation et externalités*) qui nécessitent des apports massifs d'engrais et de molécules chimiques de compensation, remise en circulation d'agrottoxiques liés au complexe argilo-humique (« *déprotection* » des matières organiques sous travail intensif du sol)

3/ Sur la gestion des couverts végétaux

- Les couverts végétaux sont déjà des objets de recherche consistants et des résultats significatifs sont déjà diffusés avec succès chez les agriculteurs (*couverts de Brachiaria decumbens, soja pérenne chez M. Tino Dambas*).
- Cependant, ces travaux de recherche n'en sont qu'aux prémices, si l'on se réfère aux puissantes technologies SCV déjà disponibles au Brésil qui sont des objets systémiques de progrès continu⁹ depuis plus de 20 ans dans le Brésil Central : les progrès enregistrés sur l'ingénierie écologique, ses produits (*systèmes SCV de plus en plus performants*), et les machines agricoles qui permettent de les maîtriser et de les reproduire au moindre coût, sont directement transférables à la Guadeloupe (Cf. dossier *mécanisation en annexe*).
- Actuellement, les couverts végétaux évalués dans les systèmes bananiers et en voie de diffusion sont très peu diversifiés, sont implantés avec travail du sol et ne sont pas maîtrisés à leur optimum technico – économique ; de même, en zone plus sèche (*Station de Vieux Habitants*), sous agrumes, où la couverture de soja pérenne concurrence fortement les agrumes à la fois pour l'eau et les nutriments.

⁸ Ces espèces sont utiles pour le montage des systèmes bananiers, et déjà présentes sur place.

⁹ Cf. Document L. Séguy, S. Bouzinac et partenaires brésiliens « La symphonie inachevée du Semis Direct » - Mai 2008 sur site www.agroecologie.cirad.fr.

(*) Mais ce qu'il convient de retenir des expériences actuelles en matière de Semis Direct sur couverts végétaux, c'est avant tout la volonté, la prise de conscience de l'importance potentielle de ces couverts dans la gestion durable des divers systèmes de culture (les chercheurs de l'UR 26 Marc Dorel et Jean Michel Risède, les 2 sympathiques et passionnés VCAT de la station des Vieux Habitants, l'agriculteur Tino Dambas). L'absence d'outils et de machines adaptés au Semis Direct dans d'importantes biomasses végétales mortes ou vivantes constitue également un handicap majeur à l'avancée de ces techniques conservatoires de la ressource sol, aussi bien au niveau de la recherche que du développement (Cf. Chapitre sur les outils et annexe).

4/ Sur l'importance, pour la recherche, de s'investir davantage dans la complexité des écosystèmes naturels, source d'inspiration et de solutions pour l'agriculture

• L'exemple des bananeraies de montagne à Matouba, chez M. Francis Lignière, est éloquent à cet égard : ces magnifiques bananeraies conduites "au plus près du biologique", utilisent sous l'ombrage du bananier des couvertures de sol à base d'espèces natives, qui ont un effet positif visible sur la croissance et la production des bananiers :

- un couvert de fleurs : *Impatiens (balsamina ? walleriana ?)*,
- une variété de Philodendron (*scandens ? Scindapsus aureus ?*)

(*) Ces espèces, au-delà d'influencer positivement la production (par quels mécanismes ? L'*Impatiens* → exsudats racinaires ? Philodendron → séquestration C ? Contrôle des nématodes, de *Cosmopolites s. ?*) l'embellissent, apportant ainsi une forte valeur ajoutée à la beauté de l'environnement (écotourisme à développer).

III) SCHEMA CONCEPTUEL DES RECHERCHES :

Investir dans l'ingénierie écologique au service du développement

• **Le schéma de la page suivante résume la conception des différentes étapes de progrès** à parcourir en partant de la situation actuelle, applicable aussi bien aux systèmes bananiers qu'à ceux à base de canne. Il s'agit, en réalité, d'incorporer au sol, à travers une gestion en Semis Direct sous Couverture permanente (SCV), des fonctions biologiques de plus en plus puissantes, diversifiées et efficaces pour l'assainissement – épuration du complexe biologique nuisible actuel du sol : Chlordécone, nématodes (*Radopholus similis en priorité*), coléoptère ravageur des racines (*Cosmopolites s.*) et évaluer également leurs impacts sur la Cercosporiose du bananier.

• **C'est à travers ces fonctions biologiques cumulées et de plus en plus diversifiées** que l'on peut espérer un impact **positif global et durable**, dont la recherche démontrera ensuite les mécanismes d'action.

• **La matière première, qui va générer cette puissance biologique d'épuration est d'abord constituée de SCV¹⁰ très forts pourvoyeurs de biomasse annuelle diversifiée (critères quantité et qualité)**, qui seront gérés au cours des étapes, à la fois par voie

¹⁰ Issus de notre expérience maîtrisée en ZTH du Brésil, Cf. Document «La symphonie inachevée du Semis Direct». Il s'agit de réduire l'impact des nuisances chimiques sur les productions, les sols, les eaux, et dans le même temps, de diminuer significativement les coûts de production : produire « propre » et moins cher (*valeur ajoutée*).

chimique actuelle et par voies organique et chimique ($\frac{1}{2}$ organique + $\frac{1}{2}$ chimique) et qui pourront recevoir (ou non) des composts (de résidus végétaux divers) enrichis en Si (sous-produits de la canne) et l'appui d'outils issus de l'écologie microbienne (en traitement des semences des couverts).

- **Au plan de la recherche scientifique, les notions d'intensité et d'efficacité des impacts** pour les fonctions biologiques souhaitées, d'abord globales, sont fondamentales et dépendront à la fois de la nature des couverts et de leur durée d'occupation des sols (*intensité*) en utilisant des couverts à base de plantes annuelles et/ou pérennes (Cf. *Schémas I et II*).

- Il est évident qu'au-delà des objectifs d'épuration du sol recherchés, **les systèmes SCV proposés vont influencer différenciellement d'autres fonctions agronomiques majeures** des sols, essentielles à la durabilité et à la reproductibilité environnementale qu'il serait bien sûr souhaitable d'évaluer aussi dans le même temps : capacité de séquestration de C, qualité biologique (*dont résilience*), dont leur capacité à multiplier les organismes endogènes et exogènes favorables aux fonctions d'épuration, etc.

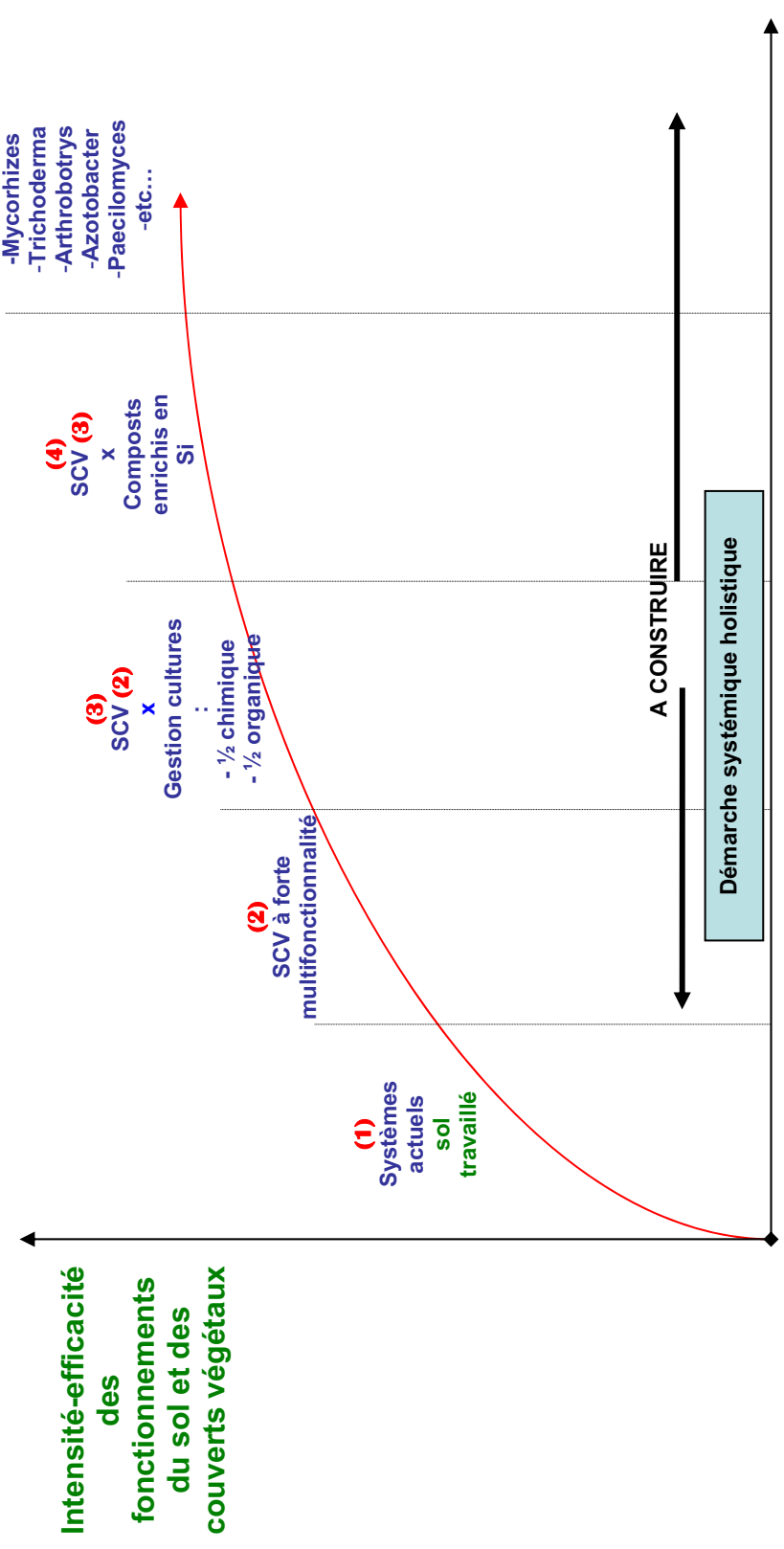
- **Dans la gestion pratique de ces systèmes**, il faut toujours prendre en compte dans les expérimentations :

- Que si l'eau n'est jamais un facteur limitant sous cette pluviométrie, la concurrence pour les nutriments entre couverts et bananes peut-être, au contraire importante au cours des phases physiologiques les plus sensibles (ex. : *période d'accumulation maximum des nutriments*). Pratiquement, pour réduire l'activité physiologique du couvert, un passage de rouleau à cornières, ou un herbicide de contact à faible dose (*type Diquat*) permettent d'atteindre cet objectif au moindre coût et moindre pollution ; la concurrence du couvert peut être ainsi éliminée ou très réduite \Rightarrow il sert alors de mulch protecteur contre l'évaporation et restitue des nutriments par la minéralisation partielle de ses tissus desséchés.
- Les couverts complexes proposés comportent, pour beaucoup d'entre eux, des espèces fortes fixatrices de N ; des expérimentations (*sous parcelles \rightarrow systèmes SCV splittés pour des courbes de réponse à N : de 0 à 400 kg de N/ha*) doivent être installées pour mieux circonscrire cet objectif de réduire les coûts et les nuisances environnementales (*nitrate*).

- **Dans la gestion scientifique de ces systèmes**, des expérimentations plus fines, conduites sur colonne de terre (*sol non remanié*) et couplées avec les expérimentations SCV au champ, permettront d'aborder scientifiquement le "démontage" des mécanismes déterminants des fonctions biologiques et agronomiques observées (Cf. *schémas III*)

(* *Les tubercules (igname, patate douce) pourraient servir, par exemple, d'indicateurs de pollution au chlordécone et autres agrototoxiques aussi bien sur colonnes de terre que dans les expérimentations au champ, in situ ; (Protocoles à aménager ultérieurement).*

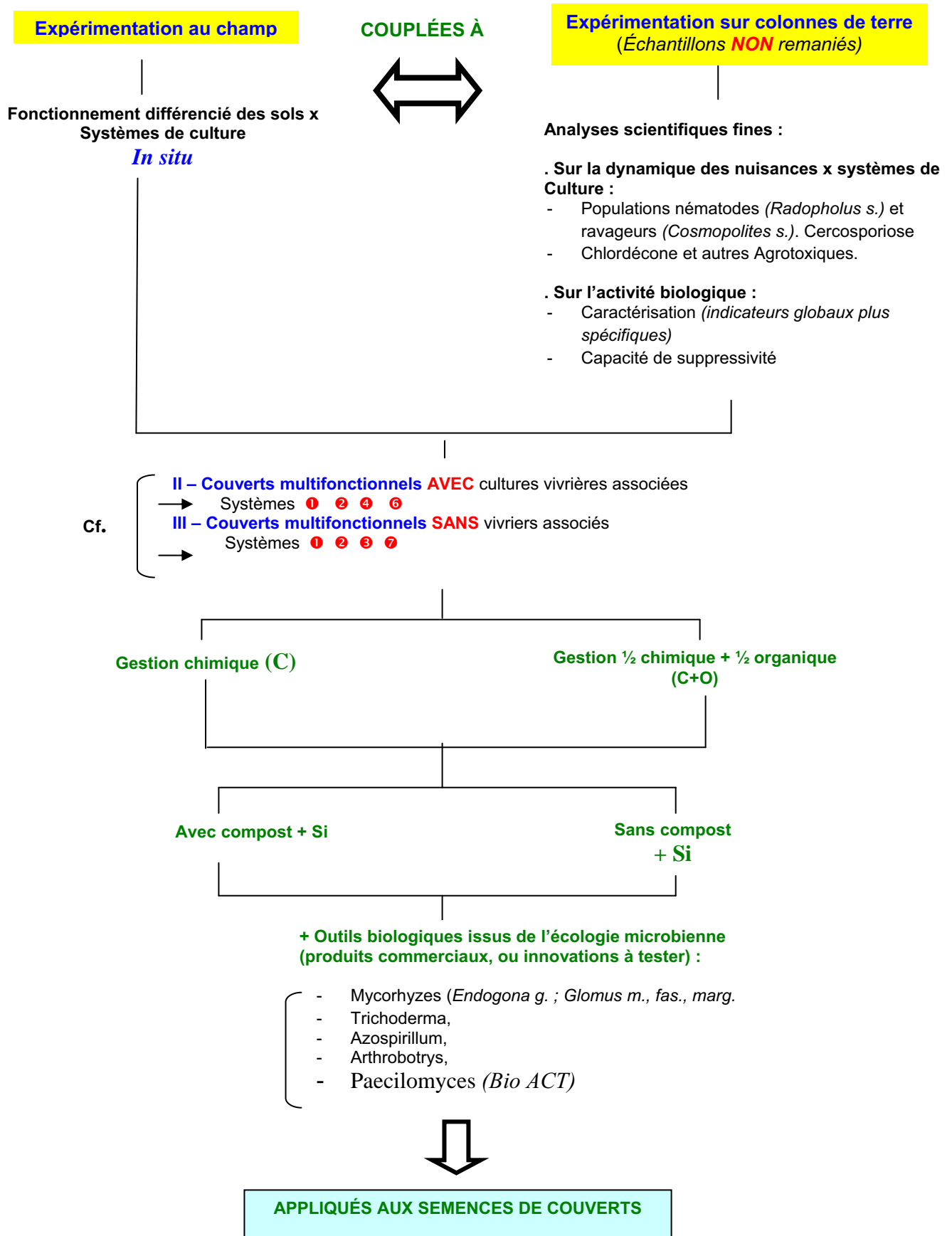
I - SCHEMA CONCEPTUEL DES RECHERCHES EN INGENIERIE ECOLOGIQUE OPERATIONNELLE AU SERVICE DU DEVELOPPEMENT (BANANE, CANNE)



1. Couverts végétaux multifonctionnels :
 « mini-forêts » à biodiversité fonctionnelle et efficacité croissantes pour les fonctions « d'assainissement et de régénération biologique » des sols :
 ➔ -Séquestration C, fixation N, activité biologique diversifiée
pouvoir épurateur, résilience, séq.C.

Étapes des progrès
 de la biodiversité x Modes de gestion
 des sols et des cultures (chimiques
 ➔ Chimique + Organique ➔ Organique)

II - OPÉRATION RECHERCHES
SUR MÉCANISMES D'ASSAINISSEMENT-ÉPURATION DES SOLS
FORTEMENT CONTAMINÉS (Phytoremédiation) : Chlordécone,
Nématodes (*Radopholus similis*), *Cosmopolites s.*

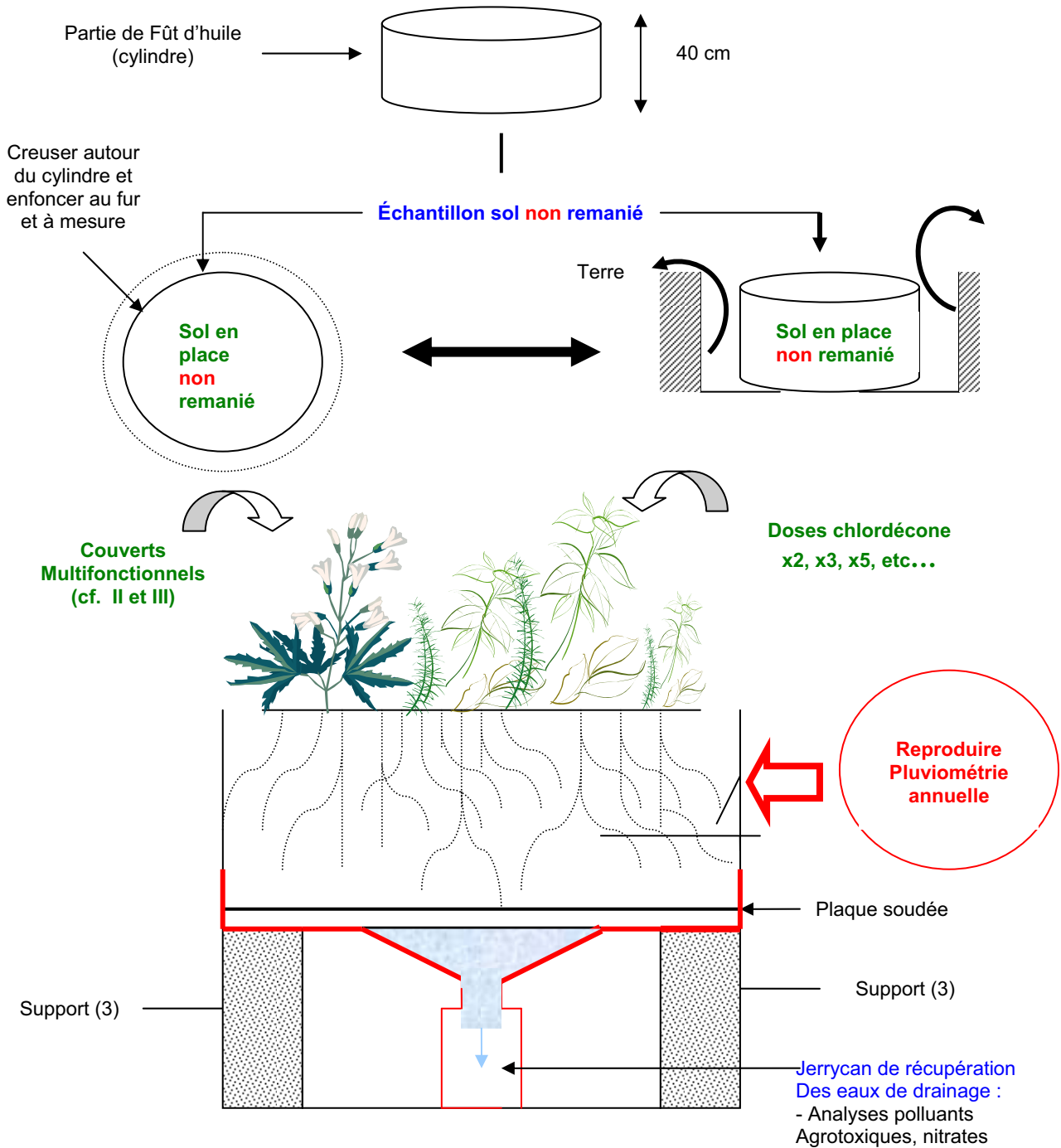


III - OUTILS SIMPLES POUR L'ÉTUDE SCIENTIFIQUE DES MÉCANISMES D'ASSAINISSEMENT DES SOLS SUR COLONNES DE TERRE

NON REMANIÉE

. Échantillons de sol fortement contaminés :

- Chlordécone
- Nématodes (*Radopholus similis*)
- Ravageurs des racines (*Cosmopolites s.*)



IV) MODÉLISATION DES SYSTÈMES BANANIERS EN SCV

(*) Ces propositions visent à conduire les systèmes bananiers en Semis Direct, le sol n'étant jamais travaillé et maintenu toujours protégé sous une couverture permanente.

De ce fait, des molécules, comme le chlordécone, (réputé "incassable" en molécules plus simples inoffensives), fortement fixées par le complexe argilo-humique (ou les gels mixtes de silice et d'alumine dans le cas des allophanes), seront encore mieux protégées d'un risque toujours plus élevé de remise en mouvement inhérent à un travail du sol, qui, suivant son intensité, "déprotège" les matières organiques préservées au sein des agrégats et peut ainsi les re-libérer dans l'environnement.

• **La modélisation des systèmes "possibles"** (ceux que nous maîtrisons en garantissant viabilité économique et reproductibilité environnementale) est exposée dans les schémas :

- **Schéma I**, qui traite des couverts permanents, **avec ou sans** vivriers associés ;
- **Schéma II**, des couverts multifonctionnels annuels **sans vivriers associés** (performances économiques plus modestes) ;
- **Schéma III**, des couverts multifonctionnels annuels **avec vivriers associés** (viabilité économique supérieure ⇒ vivriers à haute valeur ajoutée)

4.1 Dans le schéma I, relatif aux couverts permanents, avec ou sans vivriers associés :

- Les couverts permanents doivent être **impérativement installés** entre 12 et 18 mois avant la plantation directe de la banane ; une fois bien installés et fortement recouvrant du sol, ils pourront se maintenir sous l'ombrage des bananiers, quel que soit le type de peuplement de la banane, tout en maintenant leurs fonctions essentielles :
 - Zéro entretien de la plantation¹¹ (pas de sarclage ni d'herbicide) pour toutes les espèces proposées, ni détourage ;
 - Très forte capacité de séquestration du carbone¹¹ pour tous ces couverts ;
 - Très forte capacité de fixation gratuite de l'azote N grâce aux légumineuses, associée à une grande capacité de recyclage¹¹ des oligo-éléments, K, Ca et Mg ;
- Toutes les espèces retenues peuvent être implantées par semis (excepté l'écotype *L.Séguy d'Arachis repens*, très tolérant à l'ombrage → boutures) ;
- **Elles sont installées simultanément avec des cultures vivrières à haute valeur ajoutée**, diversifiées (riz aromatiques, maïs en épis verts), ce qui permet d'utiliser des herbicides efficaces spécifiques à ces cultures l'année qui précède la plantation de la banane ; ensuite, la parfaite couverture de ces plantes assure le contrôle naturel des adventices :

¹¹ Cf. Document L. Ségué, S. Bouzinac et partenaires brésiliens « La symphonie inachevée du Semis Direct » - Mai 2008 sur site www.agroecologie.cirad.fr.

- Les herbicides Alachlore et/ou Métolachlore sont recommandés pour l'installation des légumineuses simultanément **au maïs** (6-7 L/ha en PRE.) ;
 - Le même herbicide Alachlore peut également être utilisé sur soja ou vigna ;
 - **Dans le riz** sur couverture d'Arachis : utilisation du Diquat à faible dose pour effectuer le Semis Direct et ensuite contrôler le couvert jusqu'à l'ombrage complet par la culture ;
 - **Dans le soja** sur couverture de graminées pérennes : le glyphosate peut être utilisé pour les mêmes objectifs ou/et le Fusilade (très *faibles doses de matière active dans tous les cas pour maintenir ces couverts permanents vivants*).
- **Une fois les couvertures bien installées (*recouvrant 100% de la surface*)**, et la banane plantée en direct \Rightarrow Ces couverts peuvent être :
- **Soit laissés en l'état** sans cultures vivrières associées dans l'inter et l'entre lignes des bananiers (*bananeraies à lignes doubles*), soit très légèrement pâturés (*bœuf au piquet*) ;
 - **Soit cultivés avec des vivriers** à haute valeur ajoutée (*Riz aromatiques¹², Maïs en épis verts, etc. ...*)

Cf. Schéma I \Rightarrow Gestion des couverts permanents

- La bananeraie sera conduite :
 - Pour moitié en gestion chimique actuelle,
 - Pour l'autre moitié en Gestion $\frac{1}{2}$ chimique + $\frac{1}{2}$ organique (*valeur ajoutée : Label « banane propre »*)

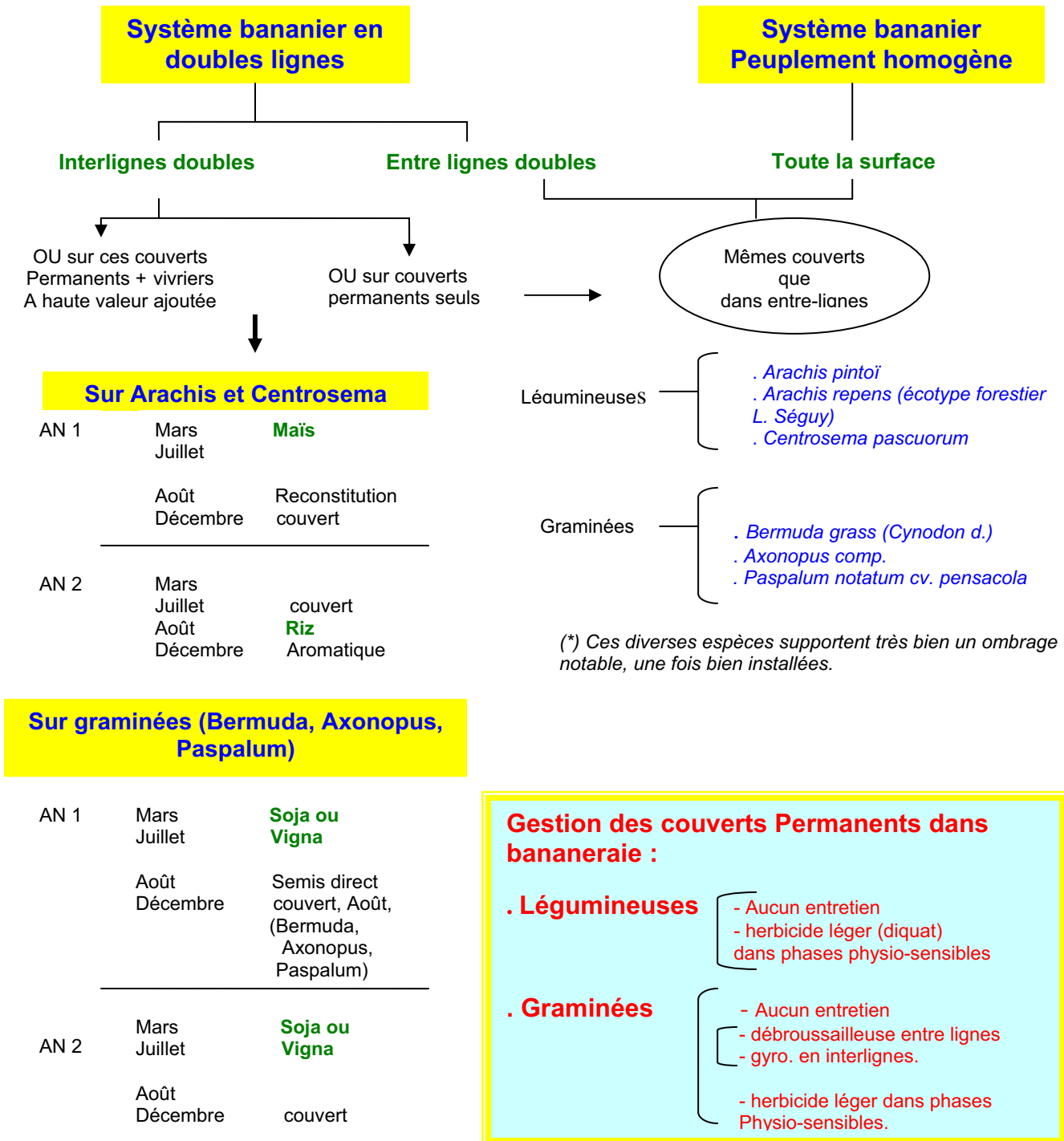
** à noter que les couverts vivants de graminées pérennes à base de Cynodon, Axonopus, Paspalum, pourraient être installées directement en « rouleaux de pelouse » comme le font les pépiniéristes pour les terrains de football, pour couvrir définitivement et sans aucun entretien ultérieur l'entre lignes doubles de la bananeraie. Des espèces comme Zoysia tenuifolia sont alors aussi très intéressantes ; ces rouleaux de pelouses pourraient être produits sur des sols moins argileux dans la zone moins arrosée (production de rente pour de petits pépiniéristes)*

¹² Riz SEBOTAS, poly-aptitudes : Cf. Document L. Séguy, S. Bouzinac et partenaires brésiliens « La symphonie inachevée du Semis Direct » - Mai 2008 sur site www.agroecologie.cirad.fr .

MODÉLISATION DES SYSTÈMES BANANIERS

Schéma I – Couverts permanents

(*) Espèces à forte dominance sur la flore adventice, qui sont donc exclusives des autres espèces, une fois installées → 1 seule espèce à gérer (faisabilité)



4.2 Dans le schéma II, relatif aux couverts multifonctionnels **sans** vivriers associés

· Ils sont construits, volontairement, à partir d'espèces annuelles ou d'espèces annuelles + pérennes (*Brachiaria ruziziensis*, *Cajanus cajan*, *Stylosanthes guyanensis* CIAT 184) pour évaluer les intensités des impacts sur les fonctions agronomiques des sols.

(*) *L'espèce **Brachiaria ruziziensis** est préférée à **Brachiaria decumbens** actuel, (sensible aux jassides) car plus appréciée, et ne nécessite que de 3 l/ha de Glyphosate pour son contrôle total, contre 5 L/ha pour le **Brachiaria decumbens** actuel.*

· Les espèces annuelles : **Mil, Sorghos** (blancs, sans tanins à forte valeur ajoutée), Eleusine, peuvent être récoltées pour l'alimentation animale.

· **La jachère naturelle sert de témoin de référence** à l'évaluation comparée des impacts différenciés des couverts.

· **En présence d'espèces pérennes, la gestion au rouleau à cornières** est recommandée pour contrôler la croissance (*son action peut être complétée par l'application, en séquence du passage du rouleau, d'une solution de KCl à 25%*).

· **Enfin, les mélanges complexes ⑤ et ⑥ peuvent être aussi pâturés** (*Bœuf au piquet → embouche sur un rythme d'une semaine de pâture pour 21 jours laissés en croissance ; après chaque pâture → 50 N + 50 K₂O /ha*).

· **Tous les mélanges proposés 2 à 7 contrôlent efficacement de nombreuses espèces de nématodes** (*genres **Meloidogyne, Rotylenchulus, Helicotylenchus**, etc. ... Cf. Doc. "Symphonie inachevée du Semis Direct"*).

(*) *Des fiches techniques précises pourront être fournies en fonction des possibilités de partenariats (intérêt des partenaires à engager cette coopération).*

· **La bananeraie**, comme dans le cas précédent des couverts permanents, sera gérée :

- **Pour moitié, en gestion chimique actuelle,**
- **Pour l'autre moitié : en gestion 1/2 chimique + 1/2 organique**
(*Production propre ⇔ label*)

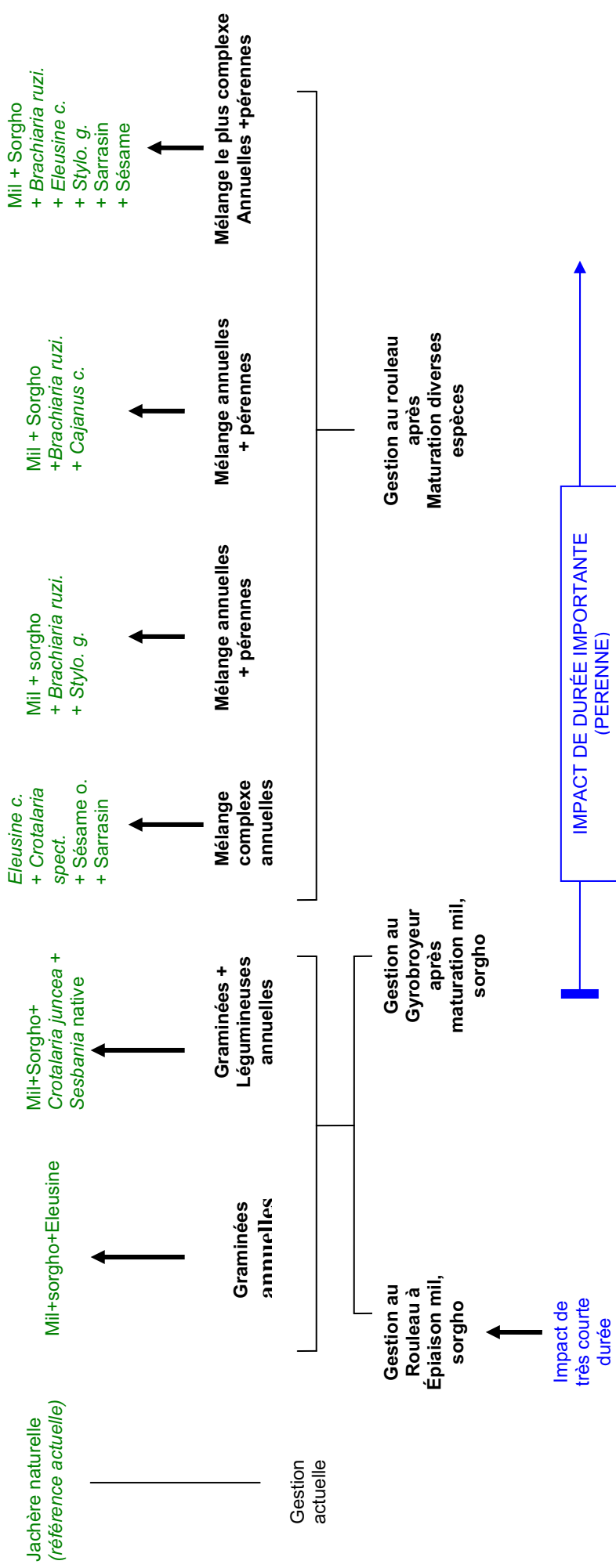
MODÉLISATION DES SYSTÈMES BANANIERS

Schéma II – Couverts multifonctionnels sans vivriers associés

(*) *Dans systèmes bananiers en doubles lignes → interlignes doubles*

. *Gestion des couverts au rouleau à cornières*

Petites graines dominantes dans les mélanges excepté Cajanus cajan.



1. Dans les entre lignes bananes → *Arachis* ou *Centrosema*, ou *Bermuda g.*, ou *Axonopus* ou *Paspalum n. Pensacola*.

(*) à noter que le *Bermuda g.* et l'*Axonopus* sont déjà présents dans les pelouses de la station

4.3 Dans le schéma III, relatif aux couverts multifonctionnels avec vivriers associés

- Les vivriers proposés sont :
 - **Les riz SEBOTAS** aromatiques, le riz permettant de réduire très fortement et rapidement les populations de *Radopholus similis* (Cf. expérience L. Séguy à l'IRFA de Nyombé au Cameroun dans les années 1972/73) → forte valeur ajoutée à exploiter ou directement par association de producteurs de riz (à créer) ou via les supermarchés des Caraïbes ;
 - **Le maïs** (récolte en épis, vendus à l'unité) ;
 - **Le sésame** (contrôle diverses espèces de nématodes → ses exsudats inhibent la pénétration des larves) qui contient 50 à 55% d'huile de très haute valeur, très recherchée, destinée aux comestiques et à la lubrification des moteurs d'avion.
 - **Le Vigna** ⇔ "Haricot" des régions humides → diverses variétés très fortes pourvoyeuses de biomasse, à niveau élevé de contrôle naturel des adventices, bonnes fixatrices de N ;
 - **Le soja** ⇔ alimentation des animaux, biocombustible, laisse des reliquats azotés conséquents dans le sol ;
 - **Le sarrasin** – Présent dans les mélanges ① et ⑦ → succédané du blé, fabrication de crêpes, aliments sans gluten, attractif des insectes auxiliaires et abeilles (production du miel), herbicide naturel puissant (par ses exsudats racinaires).

(*) A noter que le tournesol (variété de bouche) peut également faire partie de ces couverts végétaux complexes → systèmes ⑥ et ⑦, à la place ou en mélange avec le sorgho et l'Eleusine ⇔ destination: graines grillées à l'apéritif, huile de table, biocombustible ...

- Comme dans l'exemple des couverts du schéma II, sans vivriers associés, les systèmes SCV ② et ⑤ peuvent être pâturés (bœuf au piquet).
- De même, comme dans le cas des exemples I, II, III, la bananeraie sera gérée :
 - Pour moitié par la voie chimique actuelle,
 - Pour l'autre moitié : ½ chimique + ½ organique (label « propre »)

MODÉLISATION DES SYSTÈMES BANANIERS
III – COUVERTS MULTIFONCTIONNELS AVEC CULTURES VIVIÈRES ASSOCIÉES
 (*) Dans systèmes bananiers en doubles lignes → interlignes doubles¹³

	1	2	3	4	5	6	7
Jachère Naturelle (référence actuelle)	Mars-juillet	Mais (cueilli en épis verts+ Eleusine+ Crotalaria spect. + Sarrasin	Mais + Stylosanthes	Soja ou Vigna	Sésame ou Vigna	Soja ou Vigna	Soja ou Vigna
	Août-décembre	Couvert complexe	Couvert Stylo.	Riz aromatisé	Mais + Brachiaria r. + Stylo.	Sorgho + Crot. juncea + Sesbania n.	Eleusine + Crot. spect. + Sarrasin
AN 1	Mars - juillet	Couvert	Couvert Stylo.	Riz aromatisé	Couvert Stylo + Brach.	Couvert	Couvert
	Août / Décembre	Riz aromatique	Riz aromatique	Riz aromatique	Riz aromatique	Riz aromatique	Riz aromatique
AN 2	Mars - juillet	Couvert	Couvert Stylo.	Riz aromatisé	Sésame	Couvert	Couvert
	Août / Décembre	Riz aromatique	Riz aromatique	Riz aromatique	Riz aromatique	Riz aromatique	Riz aromatique

(*) **Gestion des couverts** avant vivriers, au rouleau à cornières + Kcl + faible dose glyphosate.
 . Plus la biomasse est importante, plus la dessiccation sera anticipée, par rapport au semis direct des vivriers → **30 à 40 jours** pour 15 t/ha de matière sèche.

. **Herbicides** → systèmes 3 5 6 7 sur Soja → Bentazone et fusilade
 1 2 sur Mais → Bentazone
 1 à 7 sur Riz → Bentazone + Clincher.

¹³ Dans les entre-lignes bananes → Arachis p. ou Centrosema p, Bermuda g. , Axonopus c., Paspalum p. pensacola (une espèce/entre ligne)

4.4 Les Bananeraies fleuries d'altitude (± 700 m) de Matouba

➤ Les gérer en "organique total", associer des fleurs à haute valeur ajoutée

- Ces exemples d'associations positives que la nature indique et qui peuvent être parachevées par l'homme (M. François Lignière) : Banane + Impatiens, Banane + Philodendron, ... mériteraient une vraie analyse scientifique \Rightarrow en quoi et par quels mécanismes ces associations sont-elles profitables au bananier (*aspects quantitatif mais aussi organoleptique*) ? Comment ça marche ?
- Ces exemples excitent l'imagination et montrent la voie :
 - L'espèce *Catharanthus roseus* (*pervenche de Madagascar*), Apocynaceae à fleurs roses et blanches, de port et couleurs assez semblable aux Impatiens natifs, contient des alcaloïdes oncolytiques (*vinblastine et vincristine*), efficaces dans la lutte contre certains cancers et leucémies, le diabète et l'asthme ; elle est très rustique et **préfère l'ombrage** à l'exposition plein soleil ; elle se multiplie aussi bien par graines que par boutures, et **contrôle diverses espèces de nématodes** (*les exsudats racinaires empoisonnent les larves*).
On pourrait ainsi créer des bananeraies fleuries avec, sous couvert des bananes, une très belle plante médicinale très prisée et recherchée, à haute valeur ajoutée.
- **La gestion totalement organique** de ces bananeraies (*à comparer à la gestion actuelle*) donnerait en outre toute sa force **à un label unique et exclusif**.

(*) *Les produits organiques que nous maîtrisons, agissent positivement sur :*

- *Le contrôle naturel des insectes et des nématodes* (dérivés concentrés de Neem, roténone et extraits de pyrolyse du bois),
- *Le contrôle des maladies* (éliciteurs, phytostimulants qui renforcent les "défenses immunitaires des cultures"),
- *La productivité des cultures et sur leur qualité.*

Cette opération de gestion organique + plante médicinale est très importante à mettre en place (en parler à F. Lignière).



Bananeraie d'altitude fleurie (Impatiens)

V) MODELISATION DES SYSTEMES A BASE DE CANNE À SUCRE

Partant de la gestion actuelle des systèmes à base de canne, le schéma "Modélisation des systèmes canne à sucre", page suivante, expose les voies possibles d'amélioration de ces systèmes dans le cadre d'une agriculture durable gérée progressivement "au plus près de l'écologique" :

- **Monoculture de canne implantée directement sur résidus de récolte** (± 15 t/ha). La forte couverture de pailles au-dessus du sol, les systèmes racinaires en place du cycle précédent de canne, et la bonne structure naturelle de ces sols (*vertisols*), doit permettre, sans prise de risque, de replanter immédiatement, directement et au moindre coût, le prochain cycle de canne ; par rapport au système actuel où le sol est bien souvent "défoncé", on peut attendre de ce système une forte baisse des coûts de production :

- Contrôle efficace des mauvaises herbes par la forte couverture en place (*contrôler la repousse de canne au glyphosate, avant la replantation directe nouvelle*) ;
- Economie d'eau (*mulch*) ;
- Forte réduction des coûts à la mise en place de la canne sur paille, en un seul passage (*CF. Dossier équipements combinés pour plantation directe sur paille DMB – Brésil – en annexe*)

- **Intercultures à haute valeur ajoutée entre 2 cycles de canne**, qui permettent :

- **D'assainir le profil cultural** issu du cycle de canne (*Rotations - diversification*) ;
- **D'installer des couvertures permanentes de légumineuses** en même temps que de produire des productions à haute valeur ajoutée (*marâchers, riz aromatiques, maïs en épis, etc. ...*) : *Arachis pintoï*, *Centrosema pascuorum*, *Stylosanthes g.* qui, une fois installées, peuvent se maintenir sous le couvert de la canne et assurer des fonctions essentielles et gratuites pour l'économie d'intrants coûteux :
 - Contrôle total des adventices (*zéro Herbicide*) ;
 - Forte fixation de N,
 - Recyclage efficace des nutriments,
 - Forte séquestration de C ; CEC et V % en hausse.

Ces intercultures occupent le sol entre 2 cycles de canne :

- **Soit entre 1 et 2 ans** (*Cf. Schéma IV*) dans le cas des vivriers et/ou des marâchers associés à des couverts de légumineuses, ce qui laissera à ces derniers le temps suffisant pour assurer une couverture parfaite du sol.
- **Soit 4 à 5 mois seulement** dans le cas des espèces annuelles *Crotalarias* associées (*juncea + spectabilis*) qui peuvent également intégrer dans le mélange l'Eleusine coracana ou le Sorgho guinea (*restructuration et portance accrûes du profil cultural + meilleur contrôle des adventices*).

Dans tous les cas (monoculture et intercultures), est proposée dès le départ, la double gestion de la canne à sucre :

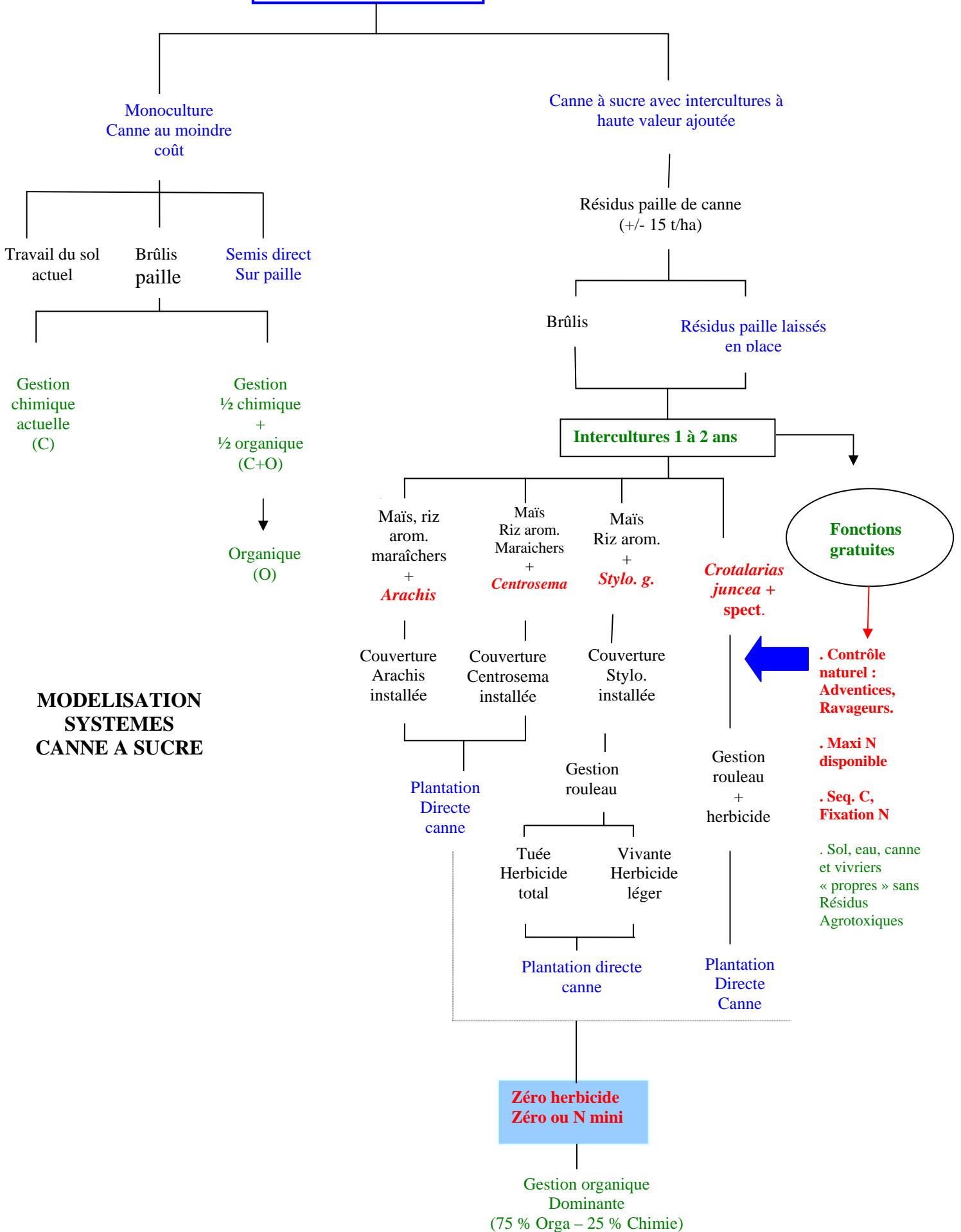
➤ **Gestion Chimique actuelle (C)**

➤ **Gestion organique dominante (O + C)**

Cette dernière devant alléger les risques de pollution environnementale et assurer des productions "propres" exemptes de résidus agrottoxiques (*sucre, jus de canne, ... Label*).

() Les outils de plantation directe de la canne sont indispensables à un tel programme de recherches. Il est étonnant que les départements français d'outre-mer et en particulier ceux des Caraïbes n'aient pas songé à établir un partenariat de recherche de qualité avec le Brésil, premier producteur mondial et le plus avancé en recherches, innovations et technologies sur cette production phare Brésilienne (Cf. Dossier machinisme DMB en annexe) , ou même que les grands producteurs de la Guadeloupe (Gardel) n'utilisent pas les innovations techniques de pointe de leur proche voisin, le Brésil.*

Système actuel



**MODELISATION
SYSTEMES
CANNE A SUCRE**



Structure remarquable vertisols (canne à sucre – Gardel)



Sol « défoncé » par labour profond (Gardel)



Discage + sillonnage en suivant (Gardel)

**Résidus de paille après récolte mécanique de la canne (Gardel) : couverture de sol parfaite
(15 t/ha M.S.) pour plantation directe nouvelle canne ou semis direct
intercultures vivriers + couverts permanents**





VI - POUR COMMENCER ...

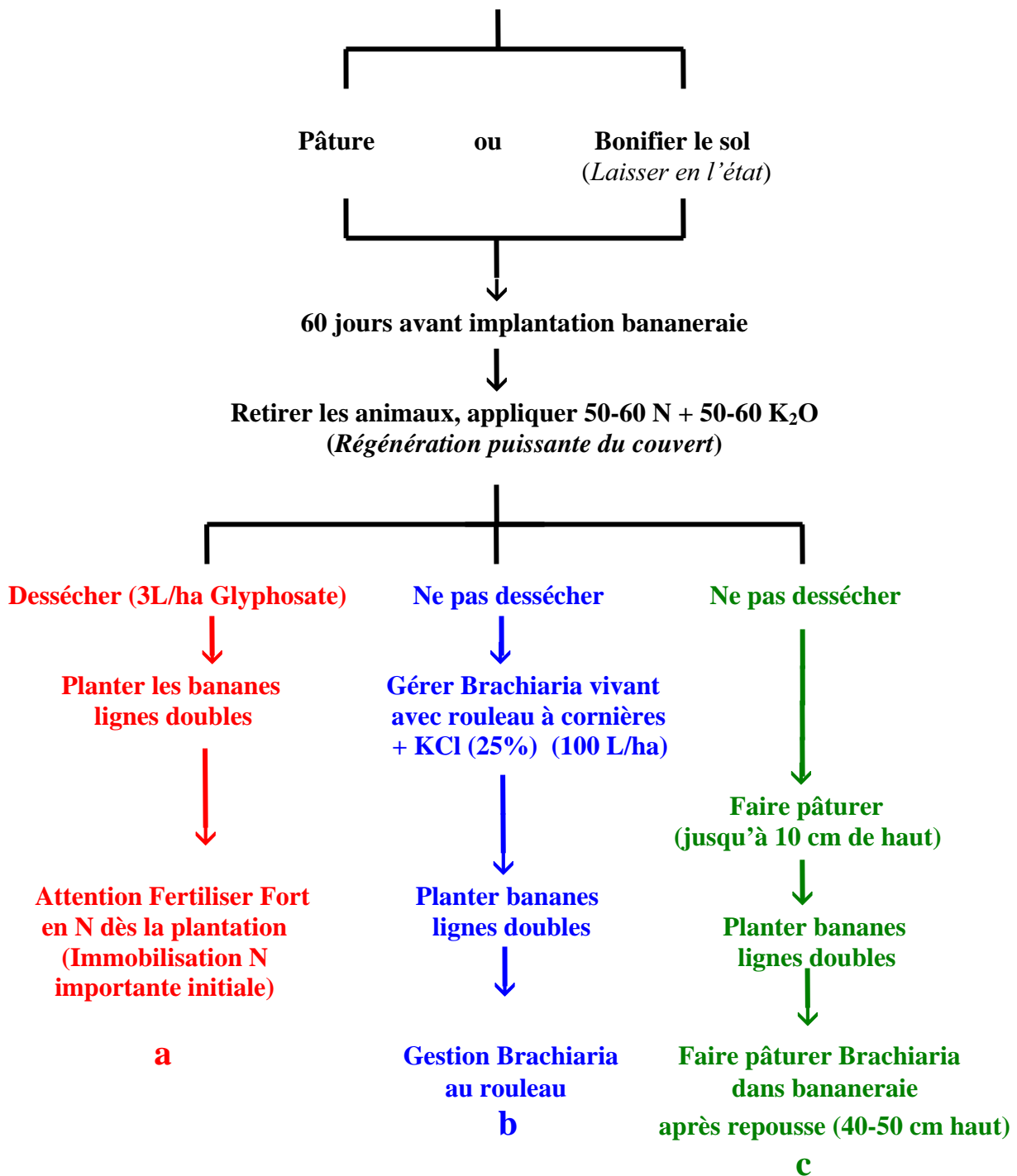
Les chapitres précédents donnent une image des possibilités de construction progressive des systèmes bananiers et de ceux à base de canne, plus performants (*critères : productivité et qualité, faisabilité technique, viabilité économique et reproductibilité environnementale*), dans le cadre d'une agriculture durable et propre. Ou **comment passer de systèmes forts consommateurs "d'énergie culturelle industrielle" à des agrosystèmes bâtis de plus en plus sur " l'énergie culturelle biologique"**, dans laquelle la gestion de la biodiversité (*sujet transversal de recherche*) peut fournir des services écologiques de plus en plus performants et gratuits ?

- L'ampleur des travaux de recherches à réaliser est énorme et mérite d'abord réflexion de la part des équipes en place avant de s'engager, puis des moyens en conséquences ensuite si la décision de se lancer dans cette aventure agronomique est prise.
- En attendant, les propositions techniques simples (*qui ne sont pas objet de recherche, mais objet de transfert-adaptation*) peuvent être directement transférées et appliquées, en partant des acquis déjà obtenus sur les couverts végétaux (*équipe de Marc Dorel*), qui vont faire progresser immédiatement les performances des systèmes bananiers.

6.1 Le couvert actuel de *Brachiaria decumbens*

- **Le couvert déjà en place** → le faire pâturer (*bœuf au piquet*) dès qu'il atteint 40 – 50 cm de hauteur ⇒ une semaine de pâture, apporter immédiatement 50 N + 50 K₂O par hectare, et laisser repousser 21 à 27 jours (*pâturage tournant*).
- **Couvert de *Brachiaria* à mettre en place** → substituer l'espèce *decumbens* par *ruziziensis* et l'installer en association avec du maïs (*IRAT 200, IRAT 340, CIRAD 412, tous composites*) qui sera récolté en épis verts ; après la récolte du maïs ⇒ pâture rapide au piquet possible, sinon laisser en l'état (*amélioration du sol*) ; cf. schéma ci-après :

Maïs + *Brachiaria ruzi.* ①



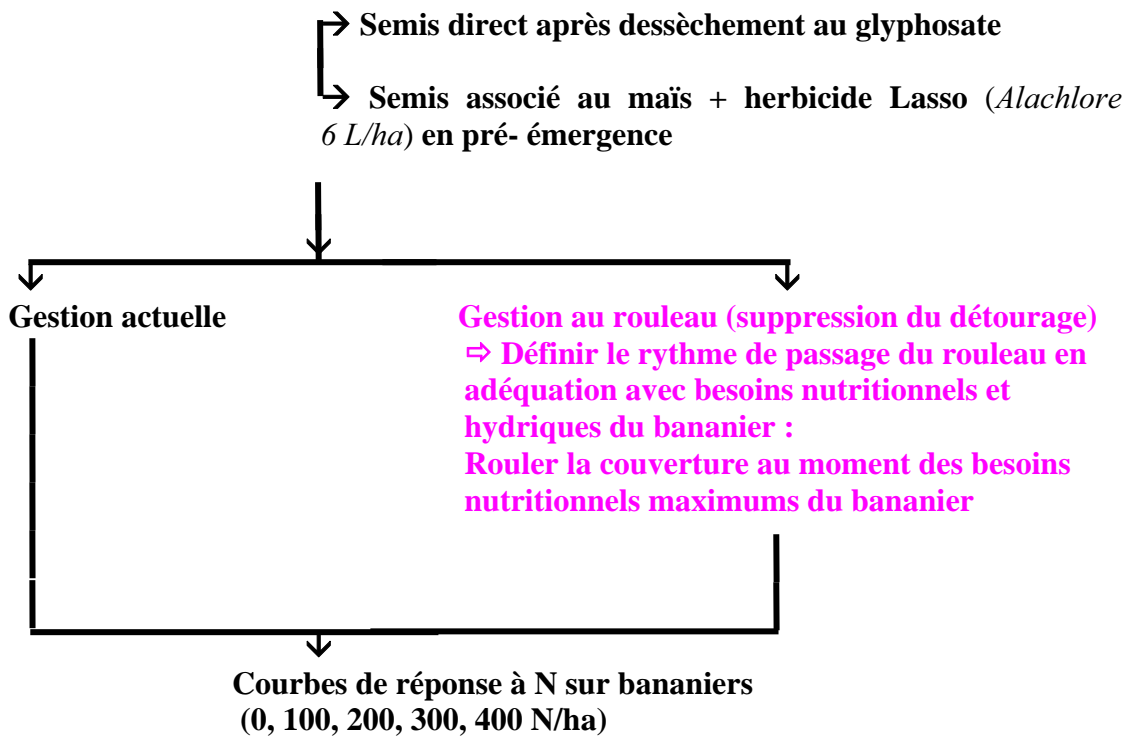
• Installer des mélanges plus performants (2) :

- *Brachiaria ruziziensis* + *Cajanus cajan* (lignes alternées – 45 cm)
- *Brachiaria ruziziensis* (10kg/ha) + *Stylosanthes guyanensis* (3 kg/ha)

- Mêmes modes de gestion **a**, **b**, **c** que ① (*Brachiaria ruziziensis* pur)
- Sur modes de gestion **a**, **b**, **c**, (2) ⇒ Courbes de réponse à N

6.2 Soja pérenne

- Implanter ce couvert par 2 techniques :



() Le soja pérenne peut être avantageusement substitué par les espèces *Pueraria phaseoloïdes* et *Stylosanthes guyanensis* cv. CIAT 184, qui sont de très puissantes fixatrices d'azote et permettent un contrôle naturel parfait des adventices sans herbicide => à mettre en place absolument.*

6.3 Construire le système suivant

- Cueillir les semences de l'espèce native de *Sesbania* (*speciosa* ? *exaltata* ?)

Implanter les couverts suivants :

- **Sesbania en culture pure** => rouler à floraison + KCl 25%, sans herbicide total
 - **Sesbania + Sorgho guinea**
 - **Sesbania + Mil + Sorgho guinea**
- contrôle du couvert à floraison des espèces Mil et Sorgho (60 jours), avec rouleau + KCl (25%), sans herbicide total

- Planter la banane directement dans les couverts desséchés.

() Des systèmes « patchwork » entre les propositions systèmes SCV 1 , II et III , peuvent être mises en œuvre en milieu contrôlé , avec randomisation et répétitions (dispositifs en split plots) pour répondre à la production scientifique de qualité (protocoles à définir ultérieurement) ; Il est évident que ces propositions systèmes ne pourront être mises en place que si l'équipe d'agronomes, de techniciens et d'agriculteurs dispose de machines de Semis Direct ; c'est l'objet du prochain chapitre.*

VII) LES MOYENS MATÉRIELS ET RESSOURCES HUMAINES POUR AVANCER RAPIDEMENT (*si les équipes en place et les autorités locales le souhaitent et le décident*)

7.1 RESSOURCES HUMAINES

Les propositions suivantes ne sont bien sûr que les premières pistes possibles qu'il conviendra d'affiner et de préciser en fonction des suites à données à ce dossier ; pour avancer rapidement, éviter d'essayer les "plâtres", assez évidents lorsqu'il se traite de maîtrise pratique de systèmes de culture qui font appel à un changement radical de paradigme, je propose une liste de personnes ressources compétentes qui pourront apporter leur aide en fonction de la nature des nécessités :

- **Lucien Séguy** : je peux appuyer ce programme fédérateur CIRAD/INRA par des missions d'appui dès lors que la demande des partenaires de s'engager sur 5 ans est ferme et que des perspectives d'extension de ce type de travail aux Caraïbes se profileront ;
- **Serge Bouzinac**, mon collègue et partenaire depuis 30 ans, peut également effectuer quelques missions d'appui en alternance avec moi ;
- **Stéphane Chouen**, jeune agronome français qui a implanté, avec succès, le Semis Direct en Tunisie et en Angola ; il est très compétent dans la maîtrise des possibilités techniques des semoirs de Semis Direct SEMEATO (*les plus performants*) qui sont présentés dans le dossier technique mécanisation en annexe ; il est également très compétent pour faire des démonstrations en milieu réel chez les agriculteurs. E-mail = "stephane Chouen" <stephane.chouen@semeato.com.br>
- **L'équipe de jeunes de l'entreprise brésilienne ZENITH ASSESSORIA EM IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA**, qui représente tous les fabricants de matériels brésiliens pour la petite agriculture familiale (*semoirs, rouleaux, pulvérisateurs, etc. ...*) et qui sont très compétents pour former et faire des démonstrations. Coordonnées :
ZENITH ASSESSORIA EM IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA
RUA EMILIO GRANDO, 457 - SALA 5
99.700-000 - ERECHIM/RS/BRASIL
Phone : 55 54 3321 9503
zenithtiago@gmail.com
carlazenith@hotmail.com
carla.zenith@brturbo.com.br
- **Patrick Techer**, technicien du Cirad Réunion, très compétent sur le Semis Direct puisqu'il a été un des principaux acteurs de la construction des SCV à l'île de La Réunion aussi bien dans le domaine des plantes à parfum, que des fruitiers (*orangerie*) et palmistes (*zone humide*) en équipe avec notre éminent collègue, très compétent sur ce thème des SCV, Roger Michellon, qui est également susceptible de donner un appui technico-scientifique, si nécessaire. L'idéal serait qu'un technicien de la capacité de Patrick Techer puisse être en poste en Guadeloupe ou qu'au minimum, il puisse effectuer des missions de longue durée dans la phase initiale du projet, de 1, 2 ou 3 mois.

(*) *Patrice Guillaume, qui connaît parfaitement la Guadeloupe et y est fortement apprécié et qui a lancé cette initiative, pourrait être, avec moi, un des animateurs de ce programme.*

7.2 ÉQUIPEMENTS MATÉRIELS INCONTURNABLES POUR PRATIQUER – MAÎTRISER LE SEMIS DIRECT ET LES COUVERTS VÉGÉTAUX MULTIFONCTIONNELS

7.2.1 Semoirs de Semis Direct, de dimensions adéquates pour le système entre-lignes doubles (± 4 m), à mon avis 2 types de semoirs sont indispensables :

- **Un pour la recherche**, qui permet de faire des semis de parcelles expérimentales sur couverts végétaux \Rightarrow *modèle SHP de Semeato* en annexe,
- **Un autre utilisable** aussi bien pour la recherche que pour le développement, d'environ 2 m de largeur (*Série SAM 200 de Semeato*), qui est équipé d'une troisième trémie pour petites graines et permet ainsi le semis direct de **couverts complexes** ("*mini-forêts de biodiversité*" à fort impact),
- **Des semoirs de Semis Direct pour motoculteurs et tracteurs de faible puissance** sont également disponibles et bon marché \Rightarrow Cf. animations mécanisation sur CD joint pour les petits agriculteurs et CUMAS ou autres types d'associations. Ils sont très fiables (*marques Knapick, Vence tudo, Fitarelli, etc. ...*)
- **si 1 choix unique devait être fait il vaudrait mieux choisir le modèle SAM 200, car beaucoup moins cher et passe partout** (recherche et développement).

(*) *Comme déjà mentionné, l'entreprise Zenith Assessoria em Exportação e Importação Ltda, représente et assiste la vente à l'extérieur des petits constructeurs brésiliens de semoirs de Semis Direct, de rouleaux, de pulvérisateurs, etc.... Cf. CD mécanisation joint).*

7.2.2 Rouleaux à cornières

Ces rouleaux disponibles en plusieurs largeurs, sont indispensables pour une gestion au moindre coût des puissantes couvertures vivantes volubiles (*type soja pérenne, Pueraria phaseoloïdes, Stylosanthes guyanensis*), sans herbicide total ; de même pour la gestion des couverts d'espèces annuelles, sans herbicide total, en les roulant à l'épiaison.

\Rightarrow Cf. Dossier mécanisation – Société AGRIMEC (*cliquer sur le rouleau*) et Cf. article : *Comment fabriquer un rouleau à cornières.*

7.2.3 Petits matériels de Semis Direct : cannes planteuses et roues semeuses

Ces outils sont très utiles chez les petits agriculteurs pour le Semis Direct dans les couvertures de pailles (*vivriers – maraîchers* \Rightarrow Cf. Document R.Michellon, P. Techer \Rightarrow *Petit guide de Semis Direct sur couverture végétale, 1996*), mais aussi en station expérimentale.

Notre ami Bernard van Arragon qui fabrique la roue semeuse, peut expédier par la poste directement ces équipements ; la roue semeuse coûte aux environs de 200 US\$ et les cannes planteuses (*engrais + semences de marque Krupp*) entre 15 et 30 US\$ suivant le fabricant.

Coordonnées de Bernard Van Arragon

Rua principal, s/n° CEP 84165-970

Castrolanda – PR / BRÉSIL

Tel.: (55) 42 3234 1274

Fax.: (55) 42 3234 8044

Courriel : b_arragon@yahoo.com

Une vue de ces petits équipements est donnée en annexe : Cf. annexe mécanisation, petits équipements.

7.2.4 Equipements pour le Semis Direct de canne à sucre

• **Utilisables aussi bien dans le système de monoculture** (*replantation directe sur le couvert de paille de la récolte mécanique du cycle précédent*) que **dans les systèmes** (*à construire*) **avec inter-cultures** (*vivriers, maraîchers sur couverts végétaux puissants fixateurs d'azote*).

• **Les équipements de la firme DMB** ont été mis au point pour répondre aux conditions de tous les systèmes de culture (*Cf. en annexe Dossier mécanisation DMB - clic sur "linha canavieira", clic sur "Plantadoras"; voir aussi "outros equipamentos"*) :

➤ **La planteuse PCI 4000** – 3^o génération en est un exemple, qui peut être utilisée pour le Semis Direct sur pailles ; si les pailles libres en surface issues de la récolte mécanique, risquent de bourrer, des roues étoiles peuvent être montées à l'avant du disque ouvreur du sillon ; ces roues étoiles dégagent la paille sur le chemin du disque ouvreur et éliminent toute possibilité de bourrage (*Cf. Roue étoile dans le Dossier mécanisation ⇒ Tracteur : 120 HP*)

➤ **À signaler la planteuse PCP 6000** qui permet de réaliser toutes les opérations de plantation en un seul passage ⇒ 1 ha/h (Gardel) ;

➤ **Ces mêmes équipements DMB** peuvent également servir à planter la canne en rangs jumelés (*Cf. ligne d'équipements DMB*) ; dans un tel système, les couvertures vivantes d'*Arachis*, *Centrosema*, *Stylosanthes* pourraient avoir des fonctions agronomiques plus performantes, car elles recevraient davantage de lumière (*fixation N, contrôle naturel d'adventices, recyclage nutriments, etc. ...*) ;

➤ Voir aussi dans la rubrique "outros equipamentos" tous les outils proposés dans la ligne canne à sucre par DMB.

(* *La réduction des flux de CO₂ vers l'atmosphère sont très importants avec la récolte mécanique de la canne et sa plantation directe comme le montrent les divers articles sélectionnés en annexe : la contribution positive*

au protocole de Kyoto de ces modes de gestion conservatoires du sol et de la culture de canne sont hautement significatifs par rapport aux modes de gestion classiques avec travail intensif du sol et brûlis de la canne !!

VIII) MATÉRIEL VÉGÉTAL À INTRODUIRE POUR CONSTRUIRE CE PROGRAMME

(*) Il est important, en premier lieu, de mentionner que pour de nombreuses espèces à introduire, des écotypes sont déjà présents dans la flore régionale : c'est le cas de divers écotypes de *Cynodon dactylon*, *Axonopus compressus* (dans la pelouse de la station de Neuf Château), *Arachis pintoï* cv. *Amarillo*, *Pueraria phaseoloïdes* (station de Neuf Château en bordure de forêt) ; parmi les graminées annuelles, le genre *Eleusine* (espèce indica) est également très représenté.

Parmi les légumineuses :

- *Arachis pintoï* cv. *Amarillo* (20 – 30 kg/ha) ; Semences : firme Matsuda, contact exportation Mme Edna Matsuda courriel : e.matsuda@uol.com.br ;
- *Arachis repens* (boutures de Madagascar) ;
- *Centrosema pascuorum*, *Stylosanthes guyanensis* cv. CIAT 184 ⇒ CIAT Colombie (3 – 5 kg/ha) ;

(*) Je peux aussi avoir d'excellentes semences de ces 2 espèces, en provenance de notre réseau SCV (Asie, Madagascar).

- *Pueraria phaseoloïdes* -Semences sur réseau SCV Asie ;
- **Soja** – variétés du Brésil ;
- **Vigna** (*ungiculata*) – variétés sur réseau SCV
- *Crotalaria Juncea* – Brésil – *Crotalaria spectabilis* et *retusa* déjà sur place ;

Parmi les graminées :

- Bermuda Grass, *Paspalum notatum* et *Axonopus compressus* ⇒ reproduction par semences. Disponibles au Brésil, firme **Sementes Globo Rural** site : www.sementesgloborural.com.br et Tel : (55) 62 3231 4919
- **Variétés de Mils, Sorghos** (*blancs sans tanins* => *alimentation humaine, bière, pâtes, alcools fins, fourrages, etc. ...*), Maïs (*IRAT 200, CIRAD 340 et 412*), *Eleusine coracana*, *Brachiaria ruziziensis* : cultivars du Brésil.

Parmi les autres espèces :

- **Sésame et Sarrasin** : Brésil ;
 - **Tagetes minuta** déjà sur place
 - **Catharanthus roseus** déjà sur place
- } ⇒ Plantes nématocides
- **Riz aromatiques SEBOTAS** : variétés à haut potentiel, résistantes aux maladies, aromatiques (*type Basmati*) = Brésil (*Collection SEguy – BOuzinac – TAillebois : SEBOTA*)

* *Catharanthus roseus* est exploité par le laboratoire Pierre Fabre (Toulouse) à Madagascar (Fort Dauphin) – courriel : françois.macarez@pierre-fabre.com

IX) CONCLUSIONS

L'ambition de ce court document est de montrer, en premier lieu, comment jeter les bases de l'agriculture de conservation en Guadeloupe (*avec extension possible aux îles des Caraïbes et à la Guyane*) d'abord pour les systèmes de culture à base de banane et de canne grâce à l'ingénierie écologique et la biodiversité fonctionnelle des couverts végétaux. Ces derniers sont la matière première des systèmes de culture sur couverture végétale permanente (SCV) et possèdent au-delà de leurs capacités inégalées de contrôle de l'érosion et des externalités, des fonctions agronomiques puissantes et gratuites. La fonction assainissement - épuration rapide des sols - en est une, comme le sont également la capacité de séquestration du carbone, la fixation d'azote, le contrôle naturel des maladies cryptogamiques, des ravageurs et des adventices, autant de propriétés très favorables à la production durable et "propre", au moindre coût, dans un environnement protégé.

La construction de ces nouveaux systèmes SCV durables peut intégrer des cultures vivrières à haute valeur ajoutée comme les riz aromatiques par exemple par exemple, des riz de haute qualité commerciale plus généralement, des légumineuses (*vignes, soja*) et de production de viande au sein des SCV bananiers et à base de canne.

La démarche scientifique proposée est systémique – holistique, appartient à la recherche-action et est fédératrice pour des recherches scientifiques plus pointues, en les réunissant dans le cadre de systèmes de culture diversifiés qui garantissent la pluridisciplinarité effective ; l'ambition de cette démarche est à la fois de produire des connaissances scientifiques innovantes, utiles et de grande qualité, et de fournir en continu des solutions techniques durables et rapidement appropriables pour les agriculteurs.

- L'action doit se situer, simultanément en milieux contrôlé et réel, itératifs et complémentaires.
- Les dispositifs expérimentaux en milieu contrôlé (*qui peut aussi se situer chez les agriculteurs*) doivent être conçus pour la production de publications scientifiques d'excellence.
- Les actions et opérations de recherches proposées, compte tenu de leur portée pour la promotion d'une agriculture durable et propre dans les Caraïbes, peuvent être éligibles à l'ANR.
- Des équipes de recherche «pointues» dans le domaine de la qualité biologique des sols pourraient (et devraient) être associées à ces travaux: l'équipe de l'INRA Dijon et l'équipe de l'INCA (*Cuba*), qui a beaucoup travaillé sur les outils de l'écologie microbienne du sol en sont deux exemples.
- Ce projet peut bénéficier des énormes acquis obtenus au Brésil en ZTH, aussi bien en matière de systèmes SCV performants, que d'outils et d'équipements pour les mettre en œuvre, les adapter et les maîtriser. Un temps précieux pourrait être gagné.
- Enfin, il est évident que des moyens financiers, matériels et humains vont devoir être trouvés, si l'on veut assurer, en même temps que la construction de ces scénarios de développement durable, la formation des divers acteurs de la recherche et du développement. La Guadeloupe pourrait devenir la première plateforme de création-diffusion-formation pour l'agriculture durable et propre dans la région Caraïbes.

ANNEXES I

DOSSIER MACHINISME AGRICOLE : ÉQUIPEMENTS POUR LE SEMIS DIRECT

- Semoirs SD SEMEATO SAM et SHP – Images et cotations.
- DMB – Équipements canne à sucre
- AGRIMEC – Rouleau à cornières
- Comment construire un rouleau à cornières ?
- Roue étoile – (*éviter les bourrages de pailles libres en SCV*)
- Petits équipements pour Semis Direct - Images

Quote Date: Jun 11st, 2008.

Multi-Funtion Planter/Seeder (Small and Large Grains)

Machine: SAM 135

SAM is a multiple seeder for small and large grains, versatile and efficient realize with precision the seeding during the winter, summer and pasture seasons. This machine represents a low investment for the farmer and provide a fast return on their investment.

- Small Grains (wheat, oat, barley, canola, rice, ...)
- Large Grains (corn, beans, soybean, cotton, sunflower, sorghum, ...)



Model: SAM 135/0703-7A

*with pantographic rows.

Spacing: - 07 rows x 17 cm for small seeds – wheat/sorghum;
- 03 rows x 43 cm for large seeds – soya;
- 02 rows x 90 cm for large seeds - maize;

- Carbon Fertilizer Box;
- Mechanical Seed Distribution system: by Alveolate Discs (plates);
- Fertilizer Distribution system: by Star feed wheels metering;
- Dephased Doble Disc at seed row;
- Guillotine knife at fertilizer row;
- Gauge depth control wheels;
- Closing/Press Wheels in "V";
- Mechanical Counter Hectare;
- Pasture Box set;

(Net Price – EXW) INVESTMENT: USD 12,618.00 unit.
INVESTMENT: EURO 7,914.96 unit.

Machine: SAM 200

SAM is a multiple seeder for small and large grains, versatile and efficient realize with precision the seeding during the winter, summer and pasture seasons. This machine represents a low investment for the farmer and provide a fast return on their investment.

- Small Grains (wheat, oat, barley, canola, rice, ...)
- Large Grains (corn, beans, soybean, cotton, sunflower, sorghum, ...)



Model: SAM 200/1105-7A

*with pantographic rows.

Spacing: - 11 rows x 17 cm for small seeds – wheat/sorghum;
- 05 rows x 40 cm for large seeds – soya;
- 03 rows x 80 cm for large seeds - maize;

- Carbon Fertilizer Box;
- Mechanical Seed Distribution system: by Alveolate Discs (plates);
- Fertilizer Distribution system: by Star feed wheels metering;
- Dephased Doble Disc at seed row;
- Guillotine knife at fertilizer row;
- Gauge depth control wheels;
- Closing/Press Wheels in "V";
- Mechanical Counter Hectare;
- Pasture Box set;

(Net Price – EXW) INVESTMENT: USD 19,212.00 unit.
INVESTMENT: EURO 12.051,00 unit.

Lucien e Sergé !

Segue as especificações técnicas da máquina **SHP**:

- **Números de linhas**: 09 linhas para grãos finos, 04 linhas para soja e 02 linhas para milho
- **Sistema de engate**: Acoplamento nos três pontos do trator (sistema hidráulico) com trator lastreado
- **Distribuição de adubo**: Através de rotores dentados e capacidade de 250 Kg
- **Caixa de câmbio**: possibilidade de 40 variações com regulagem do comprimento de parcelas de 3 a 25 metros
- **Sementes miúdas(cereais)**: As linhas podem ser montadas alinhadas ou desencontradas (melhorar o fluxo da palha), com espaçamento de 17cm entre linhas. Sulcadores com disco duplo defasados com 15" e 15.1/2" de diâmetro. Com aro limitador de profundidade fixo aos discos sulcadores, rodas compactadoras em forma em "V".
- **Distribuição de sementes**: Sistema de **cone** giratório, acionado por eixo cardan, acoplado a caixa de câmbio, distribuição através de rotor acionado por um motor elétrico que **distribui a sementes no difusor**.
- **Sementes graudas**: Espaçamento de 50cm para soja e de 70 a 120 para milho. Facão guilhotina para adubo e disco duplo defasado de 14" e 15" de diâmetro para linha de semente. Com rodas compactadoras em "V". Mesa central **com difusor** simples e acionamento manual.

OBS: Está máquina é destinada especificamente para pesquisas e desenvolvimentos de novas variedades de sementes e novos produtos. Não possui caixa de pastagem.

SHPM249|49-EA

Investimento de uma unidade EXW.....: US\$ 41.877,06

Investimento de uma unidade EXW: EUROS 26.272,68

Atentamente,

Carmen Galli Rebelatto

Gerente de Ventas - Comércio Exterior

SEMEATO S/A

Rodovia BR 285, Km 177 - Bairro Industrial

CEP: 99.040-610

Passo Fundo - RS/ BRASIL

☎ Tel.: + 55 54 3327-1811

☎ Fax: + 55 54 3327-3365

☎ Celular: + 55 54 9979-7372

✉ E-mail: carmen.galli@semeato.com.br

🌐 Home Page: www.semeato.com.br

🗣 Skype: carmengalli

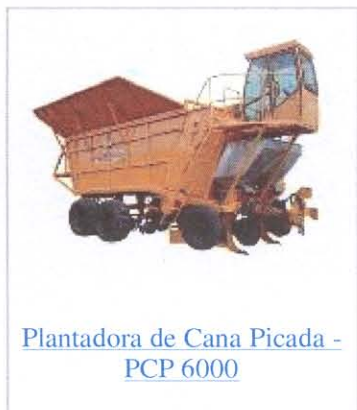
🗣 MSN: carmengallireb@hotmail.com



DMB - Máquinas e Implementos Agrícolas Ltda

Plantadoras

[Linha Canaveira](#) > Plantadoras



Av. Marginal Francisco Vieira Caleiro, 700 - Distrito Industrial - CEP 14171-200 - Sertãozinho - SP - Brasil
Fone: **55 16 3946-1800** - Fax: 55 16 3947-3809 - Cx Postal 515 - E-mail: dmb@dmb.com.br

www.DMB.com.br

ouvrir "Maquinas e implementos agricolas Ltda" :
cliquer sur "linha canaviera » et cliquer sur les différentes photos de
machines



AGRIMEC

[WWW.agrimec.com.br](http://www.agrimec.com.br)

Fabrica de implementos agrícolas – cliquer sur « ROLO FACA »

(Agrandir la photo en cliquant).

PREPARO DO
SOLO



Rolo Faca Arrozeiro

ROLO FACA ARROZEIRO

Aplicações:

É usado a partir da colheita para acamar a palha do arroz, evitando o rebrote e a conseqüente disseminação do arroz vermelho, bem como, para decompôr mais rapidamente os restos culturais da planta. A operação de rolagem deve ser feita durante ou após a chuva ou com a lavoura ainda irrigada, uma vez que recompõe o terreno dos rastros de esteira e pneus, e ainda devolve o aterro aos leiveiros de origem pela acomodação das taipas. Indispensável quando se deseja repetir o plantio na mesma área.

Vantagens

- Regulariza os sulcos resultantes da colheita;
- Acama a palha proporcionando a deteriorização imediata da mesma;
- Mata a "soca" impedindo o rebrote e a conseqüente sementação do arroz vermelho nas colheitas do cedo;
- Deixa a resteva pronta para receber novo plantio pelo sistema em mudas, pré-germinado ou plantio direto;
- Permite replantio sem outras operações.

Obs.: Outras dimensões sob consulta

Nº 18, dez/98, p.1-4



COMO CONSTRUIR UM ROLO-FACA: UM ALIADO NO MANEJO DO SOLO EM PEQUENAS PROPRIEDADES ¹

Tâmara Cláudia de Araújo Gomes²
Jessé Ad'Víncula Medeiros³
Kelceane de Souza Azevedo⁴
Raimundo Nonato de Souza Moraes⁴

O rolo-faca é um implemento agrícola simples e prático, que pode ser construído na propriedade rural e depende apenas de tração animal. A única restrição é que o terreno não pode possuir tocos. Por outro lado, ele apresenta outras vantagens: não agride o solo, pois só corta as plantas ou a palhada sem enterrá-las no chão; favorece a proteção do solo contra a força da chuva e contra os rigores do sol, pois o deixa coberto pelo material cortado; a cobertura do solo pela palhada também inibe a germinação das invasoras, conserva a umidade por mais tempo, além de favorecer o desenvolvimento de minhocas e microorganismos do solo.

Com a necessidade de reduzir os períodos de descanso da terra, o qual é tradicionalmente feito por meio do encapoeiramento da área, o rolo-faca adquire ainda mais importância. A Embrapa Acre tem estudado o uso da leguminosa puerária na recuperação de áreas abandonadas pela agricultura migratória. A função da leguminosa é descansar a terra em um tempo mais curto do que o faria a capoeira comum. Porém, terminado o período de descanso, como preparar a terra para plantar de novo? Como cortar tanta folhagem sem usar tanta mão-de-obra? Uma das alternativas é o uso do rolo-faca.

Dessa forma, para construir um rolo-faca, o primeiro passo é encontrar a madeira certa. Ela deve ser pesada, grossa, reta, lisa e resistente, não rachar depois de seca. É o caso do cumaru-de-cheiro, cumaru-ferro e do pau-d'arco.

Material utilizado para construir um rolo-faca

- 1 tronco de madeira com 1 a 1,10 m de comprimento, peso aproximado de 220 kg e diâmetro de 60 a 70 cm, serrado com capricho;
- 8 lâminas com: 1 a 1,10 m de comprimento (a mesma medida do tronco de madeira), 15 cm de largura e 3 mm de espessura. Recomenda-se o uso de lâmina de aço 1040, que

¹ Trabalho financiando parcialmente pelo Programa Alternativas para a Agricultura de Derruba e Queima – ASB/ICRAF.

² Eng.-Agr., M.Sc., Embrapa Acre, Caixa Postal 392, CEP 69908-970, Rio Branco, AC.

³ Ass.-Oper., Embrapa Acre.

⁴ Bolsistas do Programa RHAE/CNPq.

deve ser cortada nas pontas de acordo com a Figura 1. É necessário também fazer um fio bem afiado na parte que ficará fora do rolo. As oito lâminas foram calculadas para um tronco de 65 cm de diâmetro. Caso seja mais grosso, o número de lâminas pode aumentar;

- 4 lâminas de aço 1040 com 60 cm de comprimento e 8 cm de largura, para fixação dos eixos. Estas deverão ter um furo de 1 polegada no centro e soldadas em cruz, duas a duas;
- 2 pedaços de ferro maciço (eixos) de 1 polegada de diâmetro e 40 cm de comprimento. Deve-se apontar um dos lados de cada pino de ferro, como se fosse um prego. O pino deverá ser soldado nas lâminas descritas acima deixando-se 20 cm de cada lado;
- 2 rolamentos de 1 polegada para fixação nos vigotes de 1,50 m na passagem dos eixos;
- 2 vigotes de madeira de 1,50 m x 10 cm x 11 cm para a confecção da moldura;
- 3 vigotes de madeira de 1,30 m x 10 cm x 11 cm para a moldura, caso o tronco meça 1 m de comprimento; para cada centímetro a mais no tronco, é preciso acrescentar também 1 cm na medida dos três vigotes;
- 2 peças de madeira de 3,00 m x 5 cm x 4 cm para atrelamento do rolo ao animal;
- 6 parafusos de 12 cm com 6 porcas para fixação dos vigotes da moldura;
- 4 parafusos de 15 cm com 4 porcas para fixar as madeiras de atrelamento do animal;
- 24 parafusos de rosca soberba de 10 cm para fixação dos eixos;
- 8 parafusos de rosca soberba de 8 cm para reforço da moldura;
- 2 cintas de chapa, com tamanho equivalente ao diâmetro do tronco (Fig. 2), com os respectivos parafusos e porcas de fixação;
- 2 arruelas de madeira de 10 cm x 10 cm x 2 cm;
- Ferragens nas quais serão atrelados os arreios do animal de tração, com os respectivos parafusos e porcas para fixação.

Como montar um rolo-faca *

1. Fixe os pinos de ferro (já soldados nas lâminas de fixação) no centro do tronco (Fig. 3), batendo com marreta, até enterrá-los 20 cm (Fig. 4) e fixe as chapas de ferro do eixo com os parafusos de 10 cm. Para evitar rachaduras na madeira, coloque as cintas de chapa na hora de bater os eixos e retire-as em seguida;
2. Com uma serra, faça cortes de ponta a ponta no tronco (Fig. 3), 7 cm de profundidade. A distância entre um corte e outro é de 25 cm. Um tronco de 65 cm de diâmetro exigirá oito cortes;
3. Coloque as facas (lâminas de aço) nos cortes, com a parte maior para dentro e a menor (com fio bem afiado) para fora (Fig. 5);
4. Fixe as cintas de chapa, uma de cada lado do tronco, para impedir que as facas se desprendam;
5. Coloque as arruelas de madeira, uma em cada eixo;

*Figuras extraídas da Revista Globo Rural, v.1, n. 4, p.38-39, 1986, adaptadas pelos autores.

6. Monte a moldura conforme as Figuras 6 e 7, encaixando os dois eixos às traves que já deverão estar com os rolamentos. A moldura é fixada com os parafusos de 12 cm, colocando-se uma porca em cada um. Um detalhe importante é que o furo onde será encaixado o eixo não é no meio do vigote de 1,50 m de comprimento, mas deslocado para a parte de trás. A distância deve ser calculada de tal forma que as pontas das facas passem de 2 a 3 cm do vigote traseiro. Assim, se na hora de usar o rolo-faca alguma palha ficar retida na lâmina, ela se desprenderá batendo nesse vigote traseiro. Para um tronco de 70 cm de diâmetro, por exemplo, o furo do eixo deve ser localizado entre 56 e 57 cm da ponta do vigote lateral. O cálculo para se chegar a esse número é o seguinte: 11 cm referentes à largura do vigote traseiro + 2 a 3 cm de folga + 8 cm referentes à largura da faca + 35 cm de raio = 56 a 57 cm. Com o eixo deslocado, o esquadro do rolo-faca pesará sempre mais na parte da frente; isso servirá de "freio" natural do implemento, impedindo que ele rode sobre as patas do animal quando o trabalho for interrompido. Coloque as chapas de reforço em cada quina da moldura.
7. Parafuse as peças de madeira em que serão atrelados os arreios do animal (Fig. 7);
8. Se houver necessidade, o agricultor pode adaptar duas rodas de carroça no rolo-faca, facilitando o transporte pela fazenda.

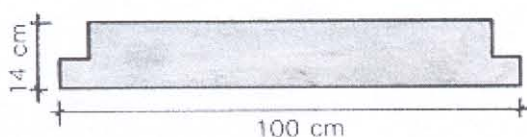


FIG. 1. Uma faca de aço já cortada: a parte que ficou mais larga será encaixada nos sulcos do rolo; no lado oposto, que vai ficar para fora do rolo, a faca recebe um fio bem afiado.

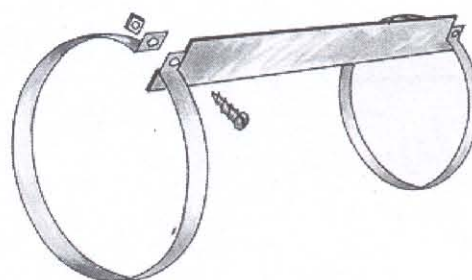


FIG. 2. As cintas de aço que prenderão as facas ao rolo, agarrando a madeira em toda a sua volta.

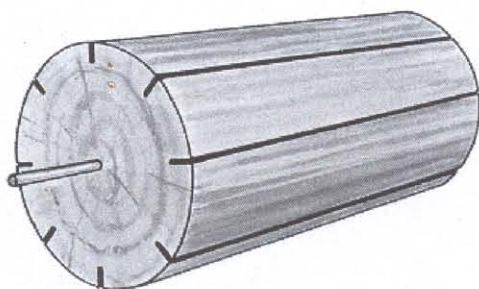


FIG. 3. Preparando o rolo: com uma serra, os sulcos são feitos de ponta a ponta, com 7 cm de profundidade.

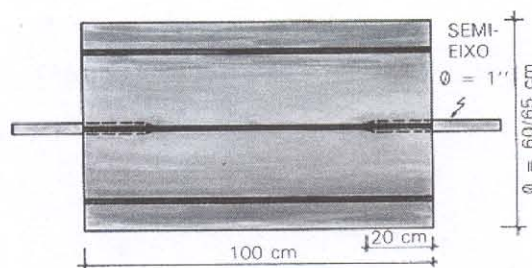


FIG. 4. Depois, pregam-se os pinos de ferro, enfiando-os 20 cm no centro da circunferência.

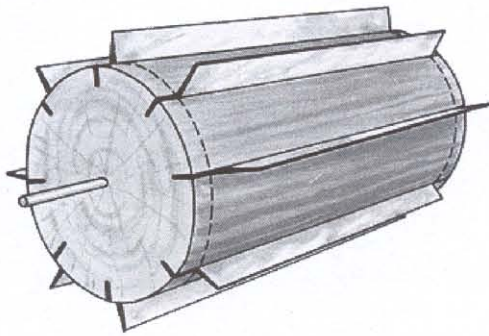


FIG. 5. Eis o rolo montado (as linhas pontilhadas são as cintas de aço).

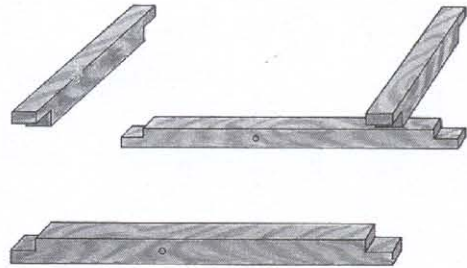


FIG. 6. Acima, as madeiras da moldura desmontada. Observe os encaixes.

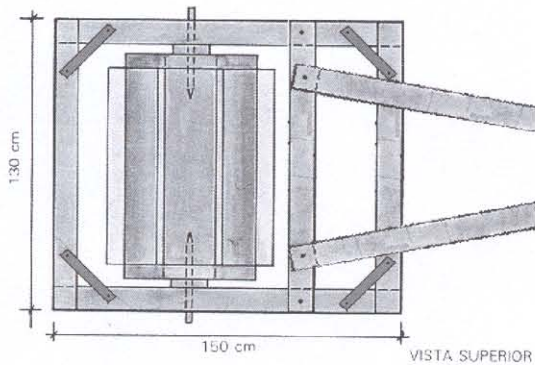


FIG. 7. A moldura tem que ser montada introduzindo-se os dois pinos de eixo do rolo nas traves laterais.

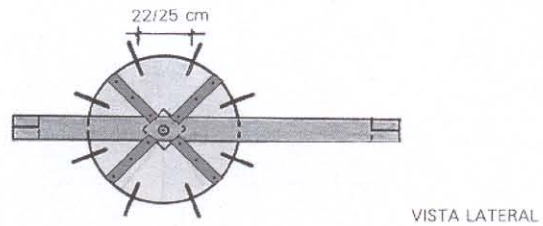
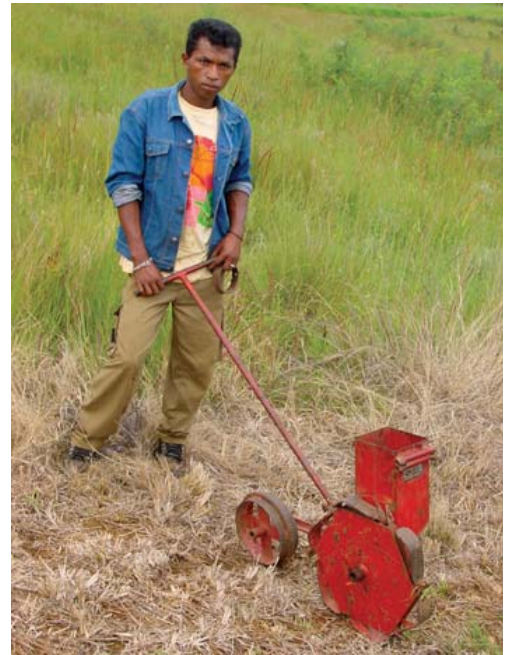


FIG. 8. Vista lateral do rolo-faca com as chapas de fixação dos eixos.





PETITS EQUIPEMENTS



Roue semeuse



Canne planteuse





**Semeadora Linear
de Parcelas**

Plantio Direto ou Convencional

SHP

236-249



Plantio Direto

**Vendas conforme projeto
Modelos sob consulta - várias configurações**

SHP 236-249

Semeadora Linear de Parcelas

Número de Linhas

NÚMERO DE LINHAS	SHP-236	SHP-249
Para Milho	02	02
Para Soja	03	04
Para Cereais	06	09

Sistema de Engate

Acoplamento nos três pontos (sistema hidráulico) do trator
Potência necessária:

65 HP para SHP-236

80 HP para SHP-249

O trator deve ser lastreado

Distribuição de Adubo

Através de rotores dentados. Reservatório de adubo com capacidade de:

175 litros (200 kg) para SHP-236

220 litros (250 kg) para SHP-249

Sementes Miúdas (Cereais)

Linhas de Plantio

As linhas podem ser montadas alinhadas ou desencontradas, com espaçamentos de 17 cm entre linhas. Sulcadores com discos duplos defasados com 15° e 15.1/2° de diâmetro. Acompanha o aro limitador de profundidade fixo aos discos sulcadores, e rodas compactadoras em forma de "V".



Opcionais



- Mesa Dupla

Possui dois cones giratórios, utilizado para plantio consorciado de duas variedades distintas.

Distribuição da Semente

A densidade de semente e o comprimento da parcela devem ser previamente conhecidos e o distribuidor é alimentado por um único operador.

Sistema de cone giratório, acionado por um eixo cardan, acoplado a caixa de câmbio (determina o comprimento da parcela). As sementes são lançadas a um rotor, acionado por um motor elétrico que distribui as sementes no difusor, selecionado conforme o número de linhas, e conduzidas até a unidade de semeadura por meio de um condutor. O sistema possui articulação manual, em dois sentidos, o que possibilita o nivelamento em terrenos inclinados.



O Marcador de Linhas é opcional e disponível para as duas versões: sementes miúdas e sementes graúdas.

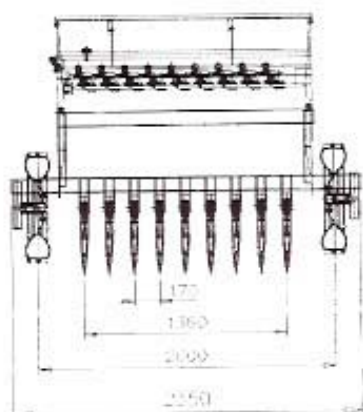


Plantio Direto

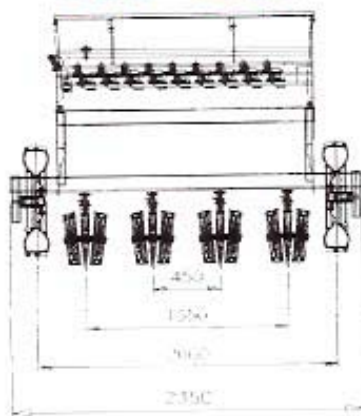
A SEMEATO reserva-se ao direito de alterar seu

Dimensões

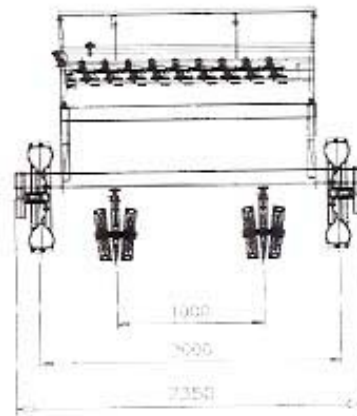
SHP 249



09 LINHAS COM 17 cm

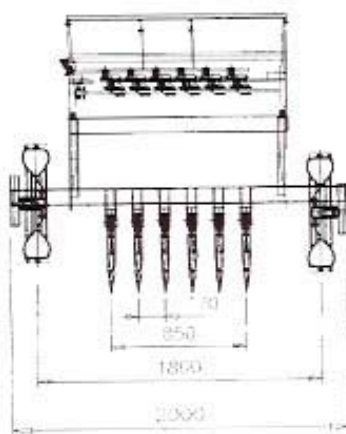


04 LINHAS COM 45 cm

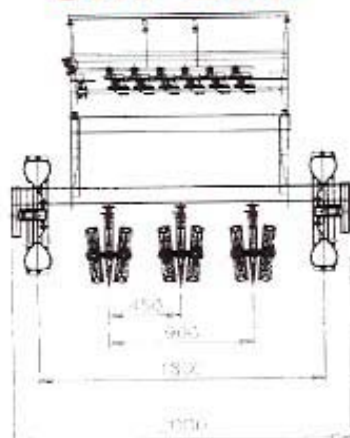


02 LINHAS COM 100 cm

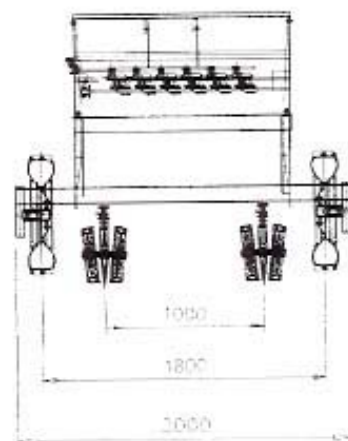
SHP 236



06 LINHAS COM 17 cm



03 LINHAS COM 45 cm



02 LINHAS COM 100 cm



SEMEATO S.A. IND. E COM.

Rua Camilo Ribeiro, 190 - Cx. Postal 559 - Tel. (0xx54) 315.1911
CEP 99060-000 - Passo Fundo - RS
e-mail: semeato1@pro.via-rs.com.br

SAC - Serviço de Atendimento ao Consumidor Final
Ligação Gratuita - 24 Horas - (0xx54) 800.3139

Vendas: (Discagem Direta Gratuita 24 hs)
Máquinas Agrícolas: Fone: (0xx54) 800.3173 - Fax: (0xx54) 800.3165
Pecas Originais: Fone: (0xx54) 800-3162 - Fax: (0xx54) 800.3164

ANNEXES II

ARTICLES SCIENTIFIQUES ET DE VULGARISATION INTÉRESSANTS

() Très important :*

Il est vivement conseillé de consulter le livre « Biological Approaches to sustainable soil systems » édité par Norman UPHOFF (2006), dans lequel Lucien Séguy a publié divers articles, et en particulier consulter la partie p. 479 à 575 où sont exposés de nombreux articles sur l'écologie microbienne.

ANNEXES II.1

- **Canne à sucre en Semis Direct (*Flux CO₂ x Systèmes de culture*)**

Potencial de Seqüestro de Carbono do Sistema Plantio Direto na Renovação de Cana Crua e Pastagem

Referencial Teórico

As Nações Unidas criaram, em 1988, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), reunindo 2500 cientistas para estudar o fenômeno de aquecimento global ou efeito estufa e suas relações com o aumento da concentração de gases na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono (CO_2). Os primeiros relatórios do IPCC realizados na década de 90, previram que a concentração de CO_2 dobraria em 100 anos, tendo como consequência um aumento na temperatura média do planeta entre 1,5 e 4,5°C, podendo chegar a 6°C e ocasionar sérias alterações na produção de alimentos e na qualidade de vida do planeta. O tema ganhou expressão na mídia a partir da Conferência Mundial realizada no Rio de Janeiro (1992) e do Protocolo de Kyoto (1997), o qual estabeleceu que, até 2012, os países industrializados deverão reduzir as emissões dos seis principais gases responsáveis pelo efeito estufa (CO_2 , N_2O , CH_4 , HFC, PFC e SF_6) em 5,2%, com base nas emissões de 1990. Dentre os gases mencionados, o de maior importância pela quantidade presente na atmosfera é o dióxido de carbono (CO_2), o qual teve a concentração aumentada em 3 bilhões de toneladas por ano, embora o óxido nitroso (N_2O) tenha um potencial cerca de 270 vezes superior quanto à retenção da energia solar refletida da terra. É importante ressaltar que o chamado efeito estufa é um fenômeno natural e imprescindível, pois caso não existisse, a temperatura do planeta estaria ap redor de 18°C negativos. A queima de combustíveis fósseis (petróleo e carvão) é considerada a principal causa do aumento das concentrações de CO_2 , representando entre 40 e 45% das emissões. Todavia, as práticas agrícolas e as mudanças no uso da terra contribuem com 22 e 14%, respectivamente, das emissões dos gases do efeito estufa (Cerri et al., 2003) e, por conseguinte, a agricultura é historicamente considerada uma fonte de CO_2 . Por outro lado, em décadas recentes, devido ao aumento da produtividade das culturas, aliado à manutenção de grandes quantidades de resíduos na superfície do solo pela adoção de sistemas de cultivo conservacionistas, a agricultura vem assumindo cada vez mais o papel de dreno do CO_2 atmosférico. Assim sendo, o processo básico denominado de seqüestro de carbono, oriundo da fixação do CO_2 do ar via fotossíntese, compreende a manutenção e lenta acumulação, em seus diversos compartimentos, da matéria orgânica do solo (MOS) oriunda da decomposição dos resíduos vegetais. No ciclo do carbono, o solo é um reservatório temporário, apresentando cerca de 2 a 2,5 vezes maior quantidade deste elemento que nos vegetais e no ar respectivamente. Dependendo do manejo pode se tornar um dreno ou uma fonte de carbono no ecossistema. Como resultado do preparo intensivo, em relação à condição virgem, os solos agrícolas tiveram seus conteúdos de carbono reduzidos de 30 a 50% (Amado et al., 2003). Segundo o consórcio norte americano para mitigação dos gases do efeito estufa (CASMGs - Consortium for Agricultural Soils Mitigation of Greenhouse Gases, 2004), composto por 10 universidades, as reduções das emissões proporcionadas pela agricultura podem ser estimadas em 20%, sendo que quando se utilizam sistemas de cultivo conservacionistas e manutenção de resíduos na superfície essa contribuição pode chegar a 49%. Dentre esses sistemas, destaca-se



Denizart



Brunini

o plantio direto, pois, além de proporcionar manutenção e até aumento da MOS (condições subtropicais e temperadas) pelo aporte contínuo de resíduos na superfície, reduz drasticamente as perdas por erosão. Reicosky & Lindstrom (1993), verificaram para as condições norte-americanas que o fluxo ou emissão de CO_2 nas primeiras 5 horas após o preparo foram 58,9; 31,7 e 1,4 g de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ respectivamente nos sistemas de cultivo convencional (aivecas), cultivo mínimo (subsolador) e plantio direto. A chave para responder à maior emissão quando se lavra o solo está relacionada com a ruptura dos agregados (ocasiona maior exposição da MOS ao ataque dos microorganismos), aumento da aeração e da oferta de fonte de substrato para os microorganismos. Em linhas gerais os estudos sobre seqüestro de carbono podem tanto avaliar as perdas por meio de medidas de fluxo ou emissões dos gases, como verificar quanto de carbono foi imobilizado nos diversos compartimentos da MOS. Serão apresentados a seguir resultados relativos a estudos de fluxo de CO_2 em diferentes sistemas de manejo do solo para dois importantes ambientes agrícolas nos quais o sistema plantio direto está se expandindo.

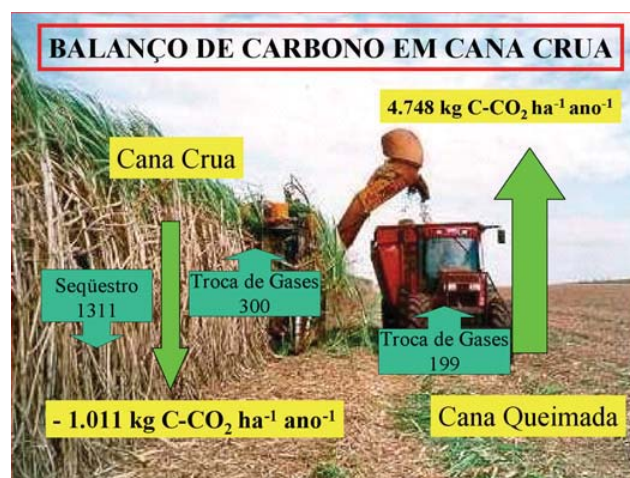


Figura 1. Balanço de gases do efeito estufa em área de cana crua. Valores referentes a 12 meses de amostragens, convertidos em equivalente C-CO_2 . Adaptado de Cerri et al. (2003)

Sistema Plantio Direto na Renovação de Cana Crua e Pastagens

A cana-de-açúcar apresenta grande potencial, considerando que pode fixar anualmente 80 t ha^{-1} de CO_2 , permitindo imobilizar durante seu ciclo de 25 a 30 t ha^{-1} de carbono, quando a colheita é realizada sem fogo prévio ou cana crua (Ayala et al., 2003). No Estado de São Paulo são estimados 3,6 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar, nos quais vem crescendo a utilização de colheita mecanizada de cana crua (mais de 370 mil hectares na safra 2000). A quantidade de palhicho remanescente neste tipo de colheita é em média 15 t ha^{-1} de matéria seca, que em razão de sua alta relação C/N (97/1) permanece na superfície do solo por longo período. Na figura 1 é possível verificar o balanço de gases nesse sistema de colheita, de acordo com Cerri et al. (2003). Convém salientar que, quando não são consideradas as perdas pela combustão do palhicho, as emissões totais de gases no sistema cana crua chegam a ser superiores à área com queima, devido principalmente às emissões de metano. Esses autores estimam que o setor sucroalcooleiro já é responsável por aproximadamente 19 milhões de toneladas de carbono seqüestrado, podendo ampliar para 48 milhões nos próximos 8 anos, caso seja ampliada em 50% as áreas com colheita de cana crua. As áreas com pastagens também contribuem sobremaneira para a captura de carbono devido ao grande aporte de resíduos, sobretudo pelo sistema radicular das gramíneas. *Brachiaria decumbens*, por exemplo, pode apresentar 20 t ha^{-1} de matéria seca nas raízes. No Estado de São Paulo estima-se a existência de mais de 7 milhões de hectares com pastagens, o que representa mais de 50% das terras agricultáveis.

Estes dois ambientes agrícolas - cana crua e pastagens - constituem, atualmente, as mais importantes fronteiras agrícolas no Estado de São Paulo para expansão da produção de grãos, por ocasião do período de renovação. Nessas áreas, a adoção do sistema plantio direto, além das vantagens técnicas já conhecidas, com destaque para o controle da erosão, poderá contribuir para a redução do efeito estufa. Nesse sentido, foram aproveitados experimentos sobre sistemas de cultivo para cultivares de amendoim na renovação de cana crua (Latossolo Vermelho eutroférico, Ribeirão Preto, SP) e pastagem (Argissolo Vermelho Amarelo, Pindorama e Mirassol, SP) para quantificar o fluxo de CO_2 . Nas figuras 2, 3 e 4 pode-se observar as características dos três sistemas de cultivo para área de cana crua. O tratamento cultivo mínimo foi realizado com arado escarificador Marchesan, ASTMATIC 450[®]. As emissões de CO_2 foram registradas com uma câmara de solos LI-6400-09 (LI-COR[®]) que é acoplada a um sistema portátil de análise de fotossíntese (LI-6400[®]). Procedeu-se diariamente às medidas através da colocação da câmara sobre um anel de PVC (100 mm de \varnothing). Concomitantemente

foram medidos os valores de T°C (sensor de 0-12 cm) e umidade (%; 0-12 cm) com TDR-Campbell[®]. As avaliações foram realizadas em um período de 27 dias (11/12/2003 a 6/01/2004), iniciando-se logo após a instalação dos preparos e terminando antes da semeadura do amendoim. Nessa área, que apresentava uma quantidade de palhicho de cana estimado em 17 t ha^{-1} de matéria seca e conteúdo de matéria orgânica de 32 e 22 g dm^{-3} respectivamente nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, os valores de fluxo de CO_2 foram sempre maiores no sistema convencional (Figura 6). As diferenças não foram significativas somente quando em virtude de um período de veranico (12 dias), os valores de umidade do solo (Figura 7) diminuíram a ponto de reduzir a respiração microbiana nos três sistemas. Após as primeiras chuvas as diferenças voltaram a ser significativas, permitindo inferir que a umidade do solo ajuda a explicar a variação temporal das emissões de CO_2 . Considerando o total de fluxo (área abaixo da curva) pode-se concluir que, em canaviais colhidos sem queima, a incorporação de 17 t ha^{-1} de matéria seca pelo preparo convencional resultou em emissão total (período de 27 dias) de $3,5$ e 9 t ha^{-1} de CO_2 , a mais que nos sistemas cultivo mínimo e plantio direto, respectivamente (Figura 8). As avaliações continuaram após a semeadura do amendoim, demonstrando haver grande contribuição da respiração das raízes e estruturas reprodutivas do amendoim nas leituras de fluxo de CO_2 .

As avaliações realizadas em pastagem com 18 anos de exploração (Estação Experimental de Mirassol) iniciaram-se após a semeadura das cultivares de amendoim (Figuras 9 e 10). Nesse experimento, iniciado em 14/01/2005, a câmara de solo utilizada para as medidas de fluxo de CO_2 foi igual (Projeto financiado pelo CNPQ) porém o modelo do medidor portátil de fotossíntese foi LI-COR 6200. Independentemente das interações com posição da leitura, as emissões no preparo convencional foram maiores que no plantio direto, nas três épocas de avaliação (Quadro 1). Convém salientar que, novamente a umidade auxilia na compreensão da variabilidade temporal das emissões de CO_2 pois, após um longo e pronunciado veranico (22 dias sem chuva), com o recomeço das chuvas os valores de fluxo retornam aos patamares iniciais. Vale ressaltar que a respiração das raízes e estruturas reprodutivas do amendoim contribui sobremaneira para aumentar as medidas de fluxo de CO_2 , porém as diferenças são mais notadas no sistema convencional (Figura 6). Portanto, em área de pastagem sob Argissolo com baixo conteúdo de matéria orgânica (10 e 7 g dm^{-3} , respectivamente para as camadas de 0-20 e 20-40 cm) cultivado com amendoim, o preparo convencional emitiu cerca de duas vezes mais CO_2 que os sistemas conservacionistas, mesmo após um período crítico de deficiência hídrica.



Figura 2. Amendoim no sistema plantio direto sobre palhicho de cana crua. Apta-Centro Leste, Ribeirão Preto, janeiro 2004



Figura 3. Amendoim semeado no sistema cultivo mínimo sobre palhicho de cana crua. Apta-Centro Leste, Ribeirão Preto, janeiro 2004



Figura 4. Amendoim no sistema convencional (arado de aivecas + gradagens) em área de cana crua. Apta-Centro Leste, Ribeirão Preto, janeiro 2004



Figura 5. Amendoim no sistema plantio direto sobre pastagem e destaque para equipamento LI-6400 para leitura do fluxo de CO_2 . Apta Centro-Norte, Pindorama, março de 2004

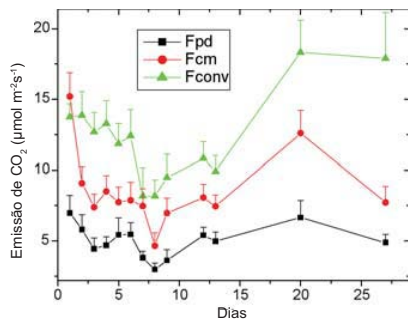


Figura 6. Média diária da emissão de CO₂ do solo (µmol de CO₂ m⁻² s⁻¹) em diferentes sistemas de cultivo sobre cana crua. Bolonhezi et al. (2004)

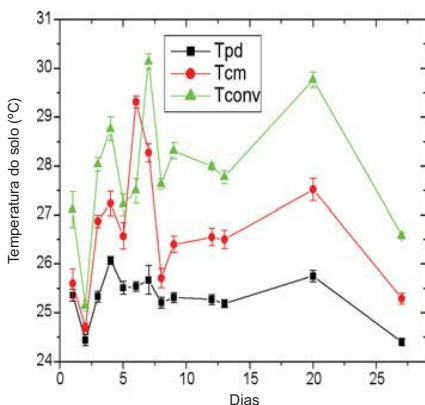
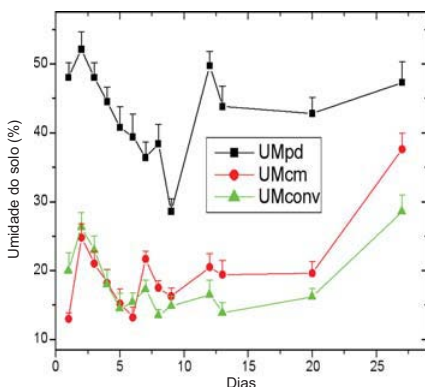


Figura 7. Valores de temperatura (°C) e umidade do solo (%) na profundidade 0-12 cm, obtidos em diferentes sistemas de cultivo sobre cana crua, ao longo dos dias estudados. Bolonhezi et al. (2004)

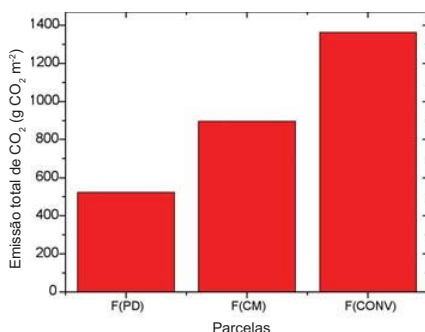


Figura 8. Emissão total de CO₂ (g CO₂ m⁻²) nos sistemas convencional (CONV), cultivo mínimo (CM) e plantio direto (PD) em condição de palhço de cana-de-açúcar. Período de 27 dias após o preparo do solo. Bolonhezi et al. (2004)

Quadro 1. Valores médios de fluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo na camada de 0-12 cm de profundidade, em Mirassol, SP, 2005. Bolonhezi et al. (dados não publicados)

Sistemas de Cultivo em Pastagem	Fluxo de CO ₂			Umidade do Solo			Temp. do Solo 12cm		
	µmol de CO ₂ .m ⁻² .s ⁻¹			-----%-----			-----°C-----		
	Dias após o Preparo do Solo								
	21	35	70	21	35	70	21	35	70
Convencional	31,8 a	8,9 a	30,1 a	13,8 a	4,4 a	12,5 a	30,1 a	36,3 a	27,8 a
Cultivo Mínimo	15,4 a	5,9 b	13,7 b	12,1 a	4,7 a	1,2 a	28,6 b	34,9 b	27,7 a
Plantio Direto	10,9 b	5,9 b	12,6 b	15,5 a	5,3 a	12,5 a	28,5 b	33,7 b	27,6 a

Médias seguidas de letras iguais, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Figura 9. Equipamento LI-6200 sobre sistema cultivo mínimo. Mirassol/SP, fevereiro 2005



Figura 10. Amendoim no sistema plantio direto sobre pastagem. Mirassol, fevereiro de 2005

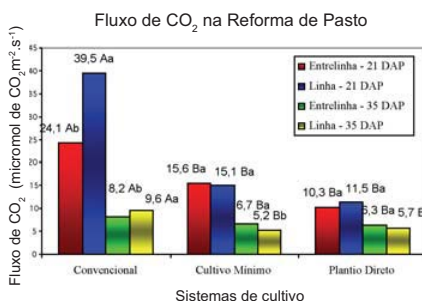


Figura 11. Desdobramentos das interações entre sistemas de cultivo e posição das medidas realizadas aos 21 e 35 DAP (dias após os preparos de solo). Letras maiúsculas comparam médias entre sistemas de cultivo e minúsculas entre posições, dentro de cada data de avaliação, conforme teste Tukey a 5%. Bolonhezi et al. (dados não publicados)

Referências Bibliográficas

- AMADO, T.J.C.; LOVATO, T.; SPAGNOL, E. Potencial de sistemas de manejo no sequestro de carbono. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. **Anais...** UNESP, Ribeirão Preto, 2003. [CD-Rom]
- AYALA, I.A.C.; ORTIZ, M.E.L.; RUIZ, A.G.; GÓMEZ, D.P.; DELGADO, R.V.; AGUILAR, I.S. Caña de Azúcar : Paradigma de Sostenibilidad. Cuba, INICA - Instituto Nacional de Investigaciones de La Caña de Azúcar, 2003. 175 p.
- BOLONHEZI, D.; LA SCALA, N.; MUTTON, M.A.; PANOSSO, A.R.; GENTILIN, O. Fluxo de CO₂ do solo nos preparos convencional, cultivo mínimo e plantio direto em áreas de colheita de cana crua. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., Cartagena, Colômbia. **Anais...** Bogotá, SCCS, 2004. [CD-Rom].
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CARVALHO, M.C.S. & VOLKOFF, B. Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem. Relatórios de Referência do Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2001. 41 p.
- REICOSKY, D.C. & LINDSTROM, M.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agronomy Journal*, 85: 1237-1243, 1993.
- SEGNINI, A.; SIMÕES, M.L.; SILVA, W.T.L.; MILORI, D.; GALETI, H.V.A.; CERDEIRA, A.L.; BOLONHEZI, D.; MARTIN NETO, L. Evaluation of carbon sequestration in Brazilian área of sugar cane under different tillage systems. In: INTERNATIONAL MEETING OF INTERNATIONAL HUMIC SUBSANCES SOCIETY, 12., Águas de São Pedro, Brasil, 2004. **Proceedings...** São Carlos, EMBRAPA-CNPDIA, 2004.

Denizart Bolonhezi⁽¹⁾, Emerson Alves da Silva⁽²⁾, Orivaldo Brunini⁽³⁾, Miguel Ângelo Mutton⁽⁴⁾, Newton La Scala Jr.⁽⁴⁾, Antonio Lúcio Mello Martins⁽⁵⁾, Célio Luiz Justo⁽⁵⁾

(1) APTA-Centro Leste, Ribeirão Preto.

(2) Instituto de Botânica.

(3) Instituto Agrônomo - Centro de Eco-fisiologia e Biofísica.

(4) UNESP - Campus de Jaboticabal.

(5) APTA - Centro Norte, Pindorama

fone: (16) 637-1091

endereço eletrônico: denizart@highnet.com.br

- Capa
- A Revista
- Como Ler
- Arquivo
- Exclusivo Online
- Assine
- Contato
- ASSINANTE
- Esqueceu A Senha?
- Peça Sua Senha!
- SERVIÇOS
- Classificados
- Livros
- Links
- Eventos



ASSINANTE

Usuário:
Senha:


BUSCA

Palavra-chave

Assunto:

 [Plantio Direto](#)
[HomePG](#)
 [Adicionar aos Favoritos](#)

Cana-de-Açúcar

 [Adicionar aos Meus Favoritos](#)

Sistema Santa Cana: tecnologia de manejo em fase inicial de estudo

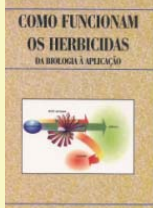
Waldo A. R. Lara Cabezas

APTA - Pólo Regional Noroeste Paulista, Votuporanga/SP - E-mail: waldolar@terra.com.br ou waldolar@apta regional.sp.gov.br

A região do Noroeste Paulista está enfrentando uma grande transformação no uso das terras agricultáveis, na medida em que a cultura da cana-de-açúcar volta à cena de forma sem precedentes. O incentivo na instalação de novas usinas para a produção de biocombustíveis é a principal causa desta revolução apoiada pelo Governo Federal, que visa no médio e longo prazo a substituição do petróleo por fontes de energia alternativa.

Esta situação não é somente local, mas de certa forma ocorre em todo o país, pois atinge outras regiões onde a cultura possa ser implantada. Conhecendo a crise que enfrenta o setor de grãos e fibras, é compreensível a tentação dos produtores em ceder suas terras e benfeitorias à "solução dos problemas conjunturais". Vê-se na realidade que até o genuíno sucesso do sistema de produção intitulado "Sistema Plantio Direto" precisa enfrentar todos os dias a lei do lucro fácil e de curto prazo, em detrimento dos aspectos ambientalmente corretos. Afinal de contas o dinheiro é a aparente solução para tanto problema, por que julgar a decisão do produtor que está cedendo suas terras a esta nova invasão "cultural"?

LIVROS



Como funcionam os herbicidas: da biologia à aplicação

Erivelton Scherer Roman, Hugh Beckie, Leandro Vargas, Linda Hall, Mauro Rizzardi e Thomas Wolf

R\$ 60,00

Compre Agora

Veja Outros Títulos



Figura 1. Brotamento da cana após uma semana do plantio, no estágio de seis a sete folhas de milho.

Qual é o caminho então, quando a pesquisa não acompanha a velocidade da moda e do lucro? Precisa de tempo para avaliar práticas de manejo, insumos e conhecer os processos de transformação no sistema solo-água-planta, daí então confirmar a melhor tecnologia e recomendá-la ao produtor. Feitas estas considerações, vemos oportuno apresentar idéias que estão sendo desenvolvidas na região do Noroeste Paulista, visando abrir novas alternativas que harmonizem a permanência do produtor no campo, na brecha da produção de alimentos, evitando a instalação de um grande canavial na região. Estamos preocupados principalmente, com os pequenos e médios produtores, que são a maioria.



Figura 2. Cana na entrelinha do milho, no estágio de 11 a 12 folhas.



Figura 3. Crescimento da cana após o término do ciclo de vida do milho.

A tecnologia em fase de desenvolvimento consiste em verificar a possibilidade técnica e econômica, de consorciar milho e cana-de-açúcar, denominado Sistema Santa Cana (SSC), em homenagem aos idealizadores do Sistema Santa Fé (consórcio milho–braquiária). Da mesma forma, que o pasto por longo tempo considerado cultura perene e extensiva, mudou para cultura anual ou bianual integrada a produção de grãos, por que não tentarmos com a cana? Respeitando o mesmo princípio, já que a região possui aptidão para o cultivo de milho, motivo pelo qual a cana consorciada entre as fileiras do mesmo, seria mais uma alternativa para a produção de pasto no inverno. A cana é uma cultura resistente à seca e palatável para consumo animal, que produz abundante massa de matéria seca e, que tratada como cultura anual, facilitaria a dessecação da touceira formada, deixando a área pronta para uma próxima safra com cultivo de grãos.



Figura 4. Altura da plataforma na colheita de milho



Figura 5. Situação da cana após a colheita de milho



Figura 6. Recuperação da cana, um mês após a colheita

Na seqüência são apresentados os primeiros testes realizados no campo, em pequena área, para conhecer a interação entre as duas culturas.

O solo foi caracterizado em maio de 2005 na camada de 0 a 20 cm, com pH(CaCl₂) 5,8; P(resina) 33 mg dm⁻³, K(resina) 1,4 mmolc dm⁻³, V de 71%, CTC de 51,4 mmolc dm⁻³ e MO 12 g kg¹. A dessecação da área experimental foi realizada em 26/10/05 com 2 L ha⁻¹ de glifosate + um L de 2,4 D por ha. O milho híbrido simples 30F35 (Pionner) foi semeado em 23/11/05,

emergindo em 27/11/2005 quando as chuvas começaram a regularizar-se. Foi semeado com espaçamento de 0,8m entrelinhas, para uma população projetada de 60.000 plantas ha⁻¹, com adubação de base de 370 kg ha⁻¹ de formulado 8-28-16 no sulco de semeadura. Foi utilizada semeadora PST2-Super Tatu Marchesan, para SPD de 4 linhas com haste escarificadora. A semente foi tratada com inseticida e feito controle de invasoras com herbicida pós-emergente em 25/11/2005 e posteriormente em 11/01/2006.



Figura 7. Desenvolvimento do sistema radicular

As mudas de cana, variedade forrageira IAC 86 – 2480, foram plantadas na entrelinha do milho, numa profundidade de 10 cm, sendo dispostas em sistema pé-ponta, 15 dias após a emergência do milho. Não foi adubada, nem recebeu tratamento fitossanitário. Os resultados preliminares são apresentados em forma visual. Nesta fase foi verificada a interferência da cana na produtividade do milho, crescimento em relação ao milho, efeito da colheita mecanizada do milho na cana e seu comportamento durante o outono-inverno de 2005.

Na safra 2006-2007 o consórcio será testado sob as normas de um experimento convencional, sendo efetuado o plantio antecipado, simultâneo e posterior à semeadura de milho em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Muita atenção será dada aos custos diretos envolvidos, e o tempo gasto nas operações para verificar a viabilidade de adoção pelo produtor.

Na figura 1 nota-se a brotação das gemas da cana, ocorrendo mais rápido que no plantio tradicional, pela menor profundidade usada. Apesar do sombreamento do milho a cana continuou crescendo de forma mais lenta (Ver figura 2). A figura 3 mostra que a cana alcançou a altura do milho pouco antes da colheita. Aparentemente, algo que deverá ser estudado nesta safra, não houve interferência da cultura na produtividade do milho, sendo similar à alcançada pelo milho exclusivo, cultivado no mesmo talhão: 5.977 kg ha⁻¹ de grãos. Na colheita do milho, como mostram as figuras 4 e 5, efetuada com a plataforma normal a altura do corte da espiga, a cana remanescente sofreu o corte da folhagem como esperado, sem afetar o colo da planta. A cana sem receber adubo mostrou rápida recuperação da folhagem, como mostra a figura 6. Neste período as chuvas tinham declinado (outono-inverno de 2006), mostrando a resistência da cana à falta de água superficial.



Figura 8. Sintomas de deficiência nutricional, seis meses após colheita de milho



Figura 9. Recuperação após adubação a lanço de sulfato de amônio e gesso.

A trincheira aberta em julho de 2006 mostra que as raízes se encontram profusamente distribuídas na sub-superfície, contornando a falta de água superficial (Figura 7). Em setembro a cana mostrou nítida deficiência nutricional, como não foi adubada, deve ter aproveitado o resíduo do adubo aplicado no milho, a cultura também sofreu com a falta de água neste período. Mesmo assim, a figura 8 mostra que a cana não paralisou seu crescimento. No início de outubro foi aplicado a lanço 40 kg ha⁻¹ de N-sulfato de amônio + 200 kg ha⁻¹ de gesso para fornecer enxofre. O resultado verificado três semanas após essa operação está demonstrado na figura 9. A cana recuperou a cor e retomou o crescimento, portanto, permanecendo em pé e ativa durante o período em que o solo fica em pousio na região. Estes resultados preliminares justificam a tentativa de estudar mais profundamente o manejo consorciado de ambas as culturas. Nas figuras 10, 11 e 12 verifica-se a disposição de plantio das mudas e o sulcamento da área, para o tratamento em pré-semeadura, do estudo a ser realizado na safra 2006-2007. Na colheita do milho desta safra, serão apresentados os resultados obtidos, mostrando as vantagens e desvantagens do sistema proposto. O maquinário utilizado para o sulcamento, deve ser substituído por um sistema de facões que provoquem menor movimentação do solo. Fica, portanto, em aberto uma idéia que merece ser estudada antes de negar antecipadamente sua viabilidade. Esperemos pelos resultados e estamos abertos a sugestões.



Figura 10. Disposição das mudas no sulco de plantio



Figura 11. Cultivador abrindo os sulcos para 8 a 10 cm de profundidade



Figura 12. Disposição das mudas na futura entrelinha de milho


Para finalizar, lembramos as palavras de Carl Sagan, citado por Alex S. Lennine Mota, especialista em divulgação científica: "Divulgar a ciência, pois, é igualmente uma satisfação, um dever moral, uma obrigação intelectual, um compromisso político e um ato de educação. A ciência precisa ser compreensível e estar próxima dos leigos, da sociedade de um modo geral, não apenas da comunidade científica".

Revista Plantio Direto, edição 97, janeiro/fevereiro de 2007. Aldeia Norte Editora, Passo Fundo, RS.

Este artigo está na versão completa.

Revista Plantio Direto / Aldeia Norte Editora - Desenvolvimento [FLYMD](#)

Este site é integralmente editado e atualizado pelo Departamento Editorial da Plantio Direto, utilizando o sistema: [FlyXpress](#) Desenvolvido por: [FlyMD](#)



ANNEXES II.2

- **Contrôle des nématodes**

La lutte biologique contre les Nématodes phytoparasites

- par Jean-Claude Cayrol, Caroline Djian-Caporalino et Elisabeth Panchaud-Mattei
Laboratoire de Biologie des Invertébrés INRA, BP 2078, 06606 Antibes



- [1. Les Champignons prédateurs](#)
 - [2. Les Champignons ovicides](#)
 - [3. Les Champignons nématophages à spores adhésives](#)
 - [4. Les endomycorhizes à vésicules et à arbuscules](#)
 - [5. Les Bactéries antagonistes des Nématodes](#)
 - [6. Les toxines de micro-organismes](#)
 - [7. Les plantes nématocides et leurs "toxines"](#)
- [En conclusion](#)

[Les Nématodes, en bref](#)

[L'attaque d'un Nématode par un Hirsutella](#)

[Références bibliographiques](#)

Les Nématodes phytophages, à l'inverse des Nématodes zooparasites connus depuis toujours, sont passés longtemps inaperçus, et le sont souvent encore, en raison de leur taille microscopique et du fait qu'ils se trouvent toujours cachés dans le sol ou à l'intérieur des tissus végétaux. On a souvent couvert l'ignorance de leur présence par le terme général de "fatigue des sols"

Les problèmes phytosanitaires causés par ces ravageurs ont une incidence économique très importante à l'échelle mondiale, car ils s'attaquent aussi bien aux grandes cultures qu'aux cultures maraîchères, florales et fruitières. En Europe, ils sont responsables de dégâts atteignant 10% de la production céréalière et entraînent des diminutions de récoltes de 20 à 30% dans les vergers d'agrumes méditerranéens. Les dommages qu'ils provoquent aux USA représentent annuellement 6 milliards de dollars. Dans les régions tropicales et tempérées chaudes, très favorables à leur développement, ils constituent l'un des principaux ennemis des plantations et cultures de Caféier, Cotonnier, Bananier, Ananas, Maïs, Sorgho, etc., bases principales du développement de ces pays. Les espèces les plus répandues et causant les plus gros dégâts dans le monde appartiennent au genre *Meloidogyne* (Anguillule ou de Nématode à galles des racines).

En raison de leur extrême résistance, de leur grande variabilité physiologique et de leur vie souterraine, il est très difficile de combattre les Nématodes. Les pratiques culturales (utilisation de variétés résistantes, rotations, longues jachères, déforestation pour mise en culture de terres neuves, etc.) et les moyens physiques (solarisation, désinfection à la vapeur, inondation des sols infestés) ne peuvent être employés que dans des cas exceptionnels. Aussi, bien qu'une lutte intégrant ces différentes méthodes non-chimiques (1) soit très séduisante, la lutte chimique reste-t-elle, pour des raisons essentiellement d'ordre économique et de facilité de mise en oeuvre, la méthode la plus employée. Elle consiste, soit à désinfecter les sols chaque année avant plantation avec des produits fumigants ou précurseurs de fumigants, dangereux pour l'homme et l'environnement, soit à traiter sur culture en place avec des produits systémiques, véhiculés par la sève (carbamates et organophosphorés) pour des productions non comestibles ou à récolte tardive (2).

Ces produits de synthèse présentent tous de sérieux inconvénients :

- ayant des spectres d'action très larges, ils perturbent les équilibres écologiques des milieux traités (compétitions entre ravageurs, action des hyperparasites, processus de biodégradation de la matière organique...);
- ils polluent l'environnement et les denrées alimentaires (accumulation de résidus dans les sols, les nappes phréatiques et les cultures traitées) : ainsi, santé animale et humaine sont concernées ;
- les résultats sont insuffisants : il faut répéter les traitements continuellement, ce qui entraîne également la sélection de résistances physiologiques des ravageurs à ces produits.

Pour les raisons qui viennent d'être évoquées, ces nématocides chimiques dangereux et polluants, sont progressivement mis à l'index dans certains pays (c'est le cas notamment de la Suisse, de l'Allemagne et des Pays-Bas) alors que les solutions de remplacement n'existent pas encore. Devant cette situation, les recherches sur la lutte biologique connaissent un regain d'intérêt et nous proposons ici un inventaire des principales voies d'études actuellement développées à l'échelle mondiale : Champignons prédateurs - qui piègent et capturent les Nématodes -, Champignons ovicides - qui tuent leurs oeufs -, Champignons à spores adhésives, endomycorhizes (Champignons vivant en symbiose avec les racines), Bactéries antagonistes, toxines produites par les microorganismes et les plantes.

[R] 1. Les Champignons prédateurs

Cette méthode de lutte repose sur un principe simple : l'existence dans le sol de Champignons qui ont la capacité de prendre au piège les Nématodes et de s'en nourrir.

C'est à la fin du XIXe siècle que les premiers d'entre eux ont été découverts et décrits. Ils diffèrent les uns des autres par leur mécanisme de piègeage : pièges en réseaux, en anneaux, boutons collants ou spires (fig. 1). Ces Champignons, présents naturellement dans le sol, n'y sont pas en assez grande quantité. De plus, ils sont spécifiques d'un très petit nombre d'espèces de Nématodes, phénomène dû à un mécanisme mis en évidence en 1979 par une nématologiste suédoise, Mme Nordbring-Hertz, basé sur une association entre un sucre sécrété par la cuticule du Nématode et une protéine (une lectine) émise par le Champignon. Depuis les années 40, de nombreux essais de lutte biologique au moyen de Champignons prédateurs ont été effectués, d'une part, dans le domaine de la prophylaxie vétérinaire où de bons résultats ont été obtenus contre les Strongles, et d'autre part, dans le domaine phytosanitaire, mais avec des résultats peu encourageants.

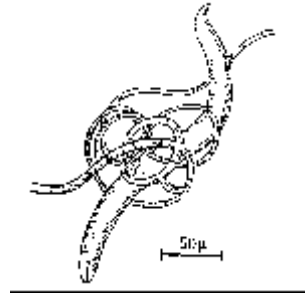


Figure 1. Nématode capturé dans le réseau engluant d'un Champignon prédateur

C'est en 1976 que le laboratoire de Nématologie de l'INRA d'Antibes s'est lancé dans l'étude de ces Champignons nématophages, comme moyen de lutte biologique contre les Nématodes à galles du genre *Meloidogyne*. De nombreux Champignons ont été essayés, en vue de sélectionner celui capable de piéger rapidement les larves infestantes des Nématodes mais aussi de se développer sans trop de problèmes dans nos sols et sous nos climats. *Arthrobotrys irregularis*, un Hyphomycète, fut choisi. Des expérimentations en laboratoire et au champ ont confirmé son efficacité, montrant par ailleurs sa préférence pour des sols de pH variant entre 6 et 8, l'effet néfaste d'une salinité excessive et sa résistance à des températures proches de -10° comme de 35°C , sa croissance optimale étant obtenue à 25°C . Un brevet fut déposé en 1978 (Cayrol et al.) et sa commercialisation a pu débuter en 1983, une fois les épreuves d'homologation et de toxicologie passées avec succès. La production du S350 (nom commercial de la préparation à base d'*A. irregularis*) fut confiée à un laboratoire fabricant du Erreur! Source du renvoi introuvable. de Champignon. Produit sur un milieu à base de seigle cuit, substrat habituellement utilisé pour l'obtention du mycélium du Champignon de couche, le S350 devait être conditionné en petites quantités (2 kg environ) de manière à éviter son échauffement. Le produit était soumis à certaines règles : produit Erreur! Source du renvoi introuvable. (stérile) et contenant 106 propagules/g, dose d'application au champ de 1,4 t/ha. Son utilisation par l'agriculteur était relativement facile, car celui-ci pouvait utiliser un épandeur d'engrais pour le traitement, suivi d'un griffage pour enfouir le grain. Cette spécialité commerciale, un produit vivant contenant 60% d'humidité, devait être distribuée et conservée jusqu'à l'épandage sans rompre la chaîne du froid. Cela entraînait des problèmes aussi bien au niveau de la distribution que de la conservation en chambre froide chez les agriculteurs. Les exigences de l'auxiliaire (pH, salinité, quantités de matière organique, nombre et pouvoir compétitif des antagonistes) ne lui permettaient pas de s'implanter aussi bien dans tous les types de sols. Faute de moyens techniques pour apprécier ces phénomènes, les premiers utilisateurs de ce moyen de lutte connurent des échecs. Des études sur la résistance du Champignon à la dessiccation ont permis d'arriver à une nouvelle formulation du produit de base. Le milieu de culture reste le même mais le produit fini, déshydraté grâce à un flux d'air (à une température de 25 à 30°C), a une teneur en eau de 6 à 10%. Cette nouvelle formulation, nommée T350, permet un transport et un entreposage faciles, sans contraintes exagérées. Pour que ce traitement puisse être appliqué non seulement dans le cadre de l'agriculture biologique mais aussi dans celui de la lutte intégrée - qui associe aussi harmonieusement que possible des interventions de divers types, y compris des applications de pesticides -, nous avons testé l'action des traitements chimiques les plus courants (fongicides et herbicides), de manière à pouvoir orienter le choix de l'utilisateur d'*A. irregularis*. Mais déjà de nouvelles souches et espèces de Champignons sont à l'étude : il s'agit de trouver des auxiliaires plus performants et efficaces dans d'autres types de sol que ceux qui correspondent aux exigences d'*Arthrobotrys irregularis*. On évalue également l'action de ces souches sur d'autres Nématodes que les *Meloidogyne*, pour être en mesure de répondre, dans un avenir proche, à l'interdiction de l'utilisation des nématicides chimiques sur la plupart des cultures.

[R] 2. Les Champignons ovicides

Ces Champignons ont la propriété de tuer les oeufs des Nématodes. A l'intérieur de ces derniers, on peut trouver de nombreuses espèces de Champignons (Tribe, 1980) (fig. 3) ; beaucoup d'entre eux vivent en saprophytes, envahissant secondairement des oeufs déjà morts. Seuls de véritables parasites sont à retenir en vue d'être utilisés comme agent de lutte biologique. Parmi eux, *Paecilomyces lilacinus* et *Verticillium chlamydosporium* ont fait l'objet d'études approfondies.

Paecilomyces lilacinus

Les filaments de *P. lilacinus* percent la coque de l'oeuf grâce à des enzymes appropriées, puis pénètrent à l'intérieur et parasitent l'embryon. Cette espèce a été éprouvée au Pérou par Jatala et al. (1979) sur Pomme de terre attaquée par *Meloidogyne incognita* et par *Globodera pallida*. Des essais en plein champ ont montré que l'apport de Champignon dans le sol réduisait davantage le nombre de galles de *Meloidogyne* que des traitements nématocides classiques.

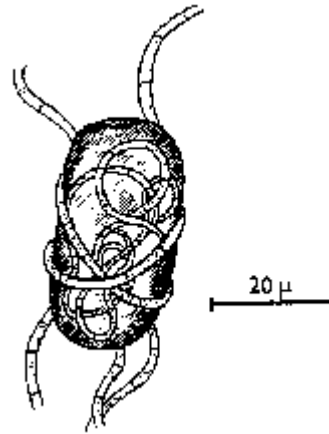


Figure 3. Oeuf de Nématode parasité par un Champignon ovicide

Une expérimentation en pots, conduite à l'INRA d'Antibes pendant 11 mois sur 3 cultures successives de Tomate infestées par *Meloidogyne arenaria* (Gomes Carneiro et Cayrol, 1991), a montré le Champignon régresse fortement dans le sol au cours du temps sous l'effet de la compétition exercée par les autres micro-organismes. Cette pression est typique de chaque situation et conduit finalement à l'installation du Champignon à un niveau d'équilibre propre à chaque sol. Pour que l'efficacité nématocide du Champignon soit correcte, il est nécessaire que sa densité s'établisse à 106 propagules/g de sol. Dans ces conditions, on observe un taux de parasitisme des oeufs voisin de 50%. Il semble que *P. lilacinus* soit mieux adapté aux conditions tropicales (températures élevées et pH acides) qu'aux conditions des pays tempérés, à preuve les résultats meilleurs obtenus au Pérou. Aussi cet agent biologique est-il désormais "fabriqué", aux Philippines, par BIO-AC Technologies, sous le nom de BIOACT. Son emploi est conseillé sur un grand nombre de cultures (Pomme de terre, cultures légumières, Bananier, Caféier, Agrumes, Canne à sucre, Papayer, Vigne, Fraisier et Soja), pour lutter contre *Meloidogyne*, *Globodera*, *Tylenchulus*, *Radopholus*, *Rotylenchulus*, *Pratylenchus*, *Helicotylenchus*, *Tylenchorynchus*, *Trichodorus*, *Rotylenchus* et *Hoplolaimus*, soit une vaste gamme de Nématodes phytoparasites. Le Champignon est cultivé sur un support nutritif, qui est ensuite déshydraté et broyé en poudre. L'application se fait soit par incorporation directe de la poudre dans le sol, soit par arrosage avec une suspension aqueuse préparée à partir de cette poudre.

Verticillium chlamydosporium

Signalé depuis déjà longtemps comme ennemi des oeufs d'*Heterodera*, c'est un parasite facultatif, capable de proliférer dans le sol même en l'absence de Nématodes. Les filaments pénètrent dans les oeufs en perforant la coque puis détruisent les embryons. Il s'attaque aussi bien aux oeufs d'*Heterodera* qu'à ceux de *Meloidogyne*.

Une propriété intéressante de ce Champignon réside dans son aptitude à former de nombreuses chlamydo-spores lorsqu'il se trouve placé en conditions défavorables (sécheresse, malnutrition). Ces chlamydo-spores, qui se présentent sous forme de mûres constituées de 5 à 20 cellules accolées entre elles, se conservent longtemps sans aucune précaution et peuvent germer une fois remises dans un sol humide. Elles apparaissent donc comme un moyen idéal de production industrielle du Champignon en tant qu'agent de lutte biologique.

Différentes souches de *V. chlamydosporium* ont été collectées et sélectionnées en Angleterre, non seulement pour leur aptitude à former de nombreuses chlamydo-spores, mais aussi pour leur aptitude à s'installer dans tous les sols et dans toutes les conditions et aussi pour leur résistance à la pression de sélection exercée par les autres micro-organismes du sol. La plus performante d'entre elles (souche CMI : CC334168) a fait l'objet d'un dépôt de brevet (Kerry & Deleij, 1991) pour son utilisation comme agent de lutte biologique contre les *Meloidogyne*.

Le Champignon est cultivé à 25°C sur un mélange constitué pour moitié de sable et de farine de Blé ou d'Orge. Le milieu de culture est agité vigoureusement pendant 5 jours puis laissé au repos. Au bout de 2 à 3 semaines, les cultures contiennent un maximum de chlamydo-spores qui sont récupérées par tamisage et lavage. Ce sont ces chlamydo-spores que l'agriculteur incorporera dans le sol de ses champs.

En fait, *V. chlamydosporium*, s'il apparaît comme un agent de lutte séduisant, ne permet en aucun cas de combattre de fortes attaques. Son aptitude parasitaire limitée aux premiers stades de l'embryogenèse du Nématode - qui, au delà, acquiert une coque résistante (Cayrol *et al.*, 1981 ; Irving et Kerry, 1986) - explique que nous n'ayons jamais obtenu plus de 43% de parasitisme dans les meilleures conditions, ce qui pourrait juste suffire pour maîtriser l'évolution d'une population limitée.

Il y a donc lieu pour l'instant de rester très prudent sur les possibilités d'emploi des Champignons ovicides comme agents de lutte biologique, et ceci d'autant plus qu'ils ne sont pas spécifiques et détruisent sans distinction les Nématodes nuisibles comme les Nématodes utiles (notamment les espèces libres associées aux Bactéries de la nitrification). En outre, les spores de résistance (chlamydospores) dont l'emploi est préconisé chez *V.*

chlamydosporium peuvent fort bien résister à des températures élevées (Barron, 1977), ce qui peut présenter des risques graves de parasitisme chez les animaux à sang chaud et notamment chez l'Homme. Pour cela, l'usage de ce Champignon sera irrévocablement interdit par les commissions de contrôle médical participant à l'homologation du produit.

[R] 3. Les Champignons nématophages à spores adhésives

Les Nématodes peuvent être parasités par des Champignons à spores adhésives appartenant à plusieurs classes : Oomycètes, Zygomycètes, Deutéromycètes, Basidiomycètes et Hyphomycètes.

Parmi les Oomycètes, on trouve *Catenaria anguillulae*, *Myzocyttium lenticulare* et *M. anomalum* qui forment des zoospores biflagellées, capables de se diriger vers les Nématodes et de se fixer sur leur cuticule en s'y enkystant. Ensuite, ces spores germent et pénètrent dans le corps de la proie où elles produisent un thalle infectieux qui donne naissance à des zoosporanges globuleux.

L'espèce de Zygomycètes la plus fréquente est *Meristacrum asterospermum*. Elle possède des conidies sphériques qui se collent sur le corps du Nématode. Après avoir produit un filament germinatif qui s'enfonce dans l'hôte, le Champignon y développe un thalle boursoufflé, puis germe en donnant de nouveaux conidiophores.

Chez les Deutéromycètes, on rencontre assez fréquemment *Meria coniospora*, dont les spores en forme de massue se fixent sur la cuticule de l'hôte par leur extrémité antérieure. Comme chez les Champignons précités, la spore produit une hyphé qui s'enfonce dans l'hôte puis génère un mycelium dense qui envahit le corps de la proie et fructifie sous forme de conidiophores sortant de la dépouille parasitée.

Les Basidiomycètes parasites des Nématodes sont représentés par l'espèce *Nematoctonus leiosporus*, qui possède aussi des spores adhésives en forme de bâtonnets se fixant sur la cuticule du Nématode par une de leurs extrémités et produisant un mycelium parasite qui envahit le corps de l'hôte.

Tous ces Champignons pourraient *a priori* devenir des agents de lutte biologique intéressants contre les Nématodes, compte tenu notamment de leur grande ubiquité et de leur polyphagie. Ils sont hélas des parasites obligatoires et toutes les tentatives faites pour les cultiver sur divers milieux synthétiques ont échoué, ce qui rend leur utilisation pratiquement impossible.

En revanche, des Hyphomycètes à spores adhésives, du genre *Hirsutella*, se cultivent aisément sur plusieurs milieux artificiels. Le parasitisme des Nématodes par les *Hirsutella* a été décrit pour la première fois par Sturhan et Schneider (1980) puis par Jaffee et Zehr (1982) et par Castet (1982). Il est résumé dans l'encadré ci-après. Beaucoup de travaux leur ont été consacrés depuis, dans le monde entier, mais aucune application industrielle n'est encore au point à ce jour.

[R] 4. Les endomycorhizes à vésicules et à arbuscules

Les mycorhizes sont des Champignons associés aux racines des végétaux. Certaines protègent la plante contre les Nématodes. Leur emploi en lutte biologique est à l'étude.

Les endomycorhizes à arbuscules et vésicules (*vesicular-arbuscular mycorrhizae*) forment une association symbiotique avec les racines des plantes. Elles ont une gamme d'hôtes très large comportant des plantes sauvages et des plantes cultivées. Ce sont des *Endogonaceae*, possédant un double réseau mycélien : un réseau externe dans le sol et un réseau interne dans les tissus de la racine-hôte (fig. 5).

Le réseau mycélien externe s'étend largement dans la rhizosphère et va exploiter un vaste volume de sol, assurant ainsi une nutrition abondante des racines-hôtes. Le potentiel assimilatif de la plante, aussi bien en ce qui concerne l'eau que les éléments nutritifs, se trouve ainsi fortement accru. Si le phosphore est vraisemblablement l'ion le plus concerné par l'appui symbiotique des endomycorhizes, d'autres éléments tels que le soufre, le cuivre, le potassium et le zinc sont également beaucoup mieux assimilés par les plantes mycorhizées. Le réseau mycélien interne se développe dans le cortex des racines où il forme des arbuscules et des vésicules. Les arbuscules sont des structures d'échange entre la plante et le Champignon tandis que les vésicules sont plutôt considérées comme des organes de réserve.

Comme la plupart des espèces de Nématodes phytophages vivent dans les racines, on conçoit qu'il existe une interaction constante entre elles et les mycorhizes. Cette interaction peut revêtir plusieurs aspects : compétition trophique intra-racinaire, plante rendue plus résistante grâce à l'amélioration nutritionnelle que lui confère la symbiose mycorhizienne, masquage du pouvoir attractif exercé par les racines vis-à-vis des Nématodes. Parmi les quelques travaux qui ont été effectués par les nématologistes pour préciser l'influence des mycorhizes, nous signalerons ici les

plus significatifs, qui concernent à la fois plusieurs espèces de Nématodes, plusieurs espèces de mycorhizes et aussi plusieurs types de cultures (Cayrol, 1991, 1992).

Une expérimentation classique, effectuée aux Etats-Unis sur Tabac, a montré que le nombre de femelles d'*Heterodera solanacearum* est réduit de 35% sur les plants mycorhizés par *Endogona gigantea*. En Allemagne, l'endomycorhize *Glomus mosseae*, inoculé à la Tomate, réduit les attaques de *Meloidogyne incognita* de 17%, tandisqu'elle diminue les dommages dûs à *Rotylenchulus reniformis* de 40% sur Concombre, Haricot et Melon. La même espèce associée à des *Citrus* permet une réduction appréciable (environ 50%) des dégâts de *Tylenchulus semipenetrans*. Sur Tomate mycorhizée avec un autre *Glomus* (*Glomus fasciculatus*), les populations de Nématodes parasites régressent de 59% tandis que *G. etunicatus*, utilisé sur *Citrus*, abaisse de moitié le nombre des *Radopholus similis*. On a montré par ailleurs qu'une mycorhization à l'aide d'un complexe de 4 espèces (*Glomus fasciculatus*, *G. mosseae*, *G. tenue* et *Gigaspora margarita*), sur Tomate et Trèfle blanc parasités par *Meloidogyne hapla*, permet des augmentations de rendement de 56% et 64%, respectivement.

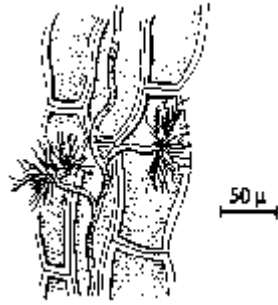


Figure 5. Arbuscules mycorhiziens dans les cellules de l'hôte végétal

Ces quelques essais illustrent parfaitement l'effet bénéfique de la mycorhization sur plusieurs cultures et vis-à-vis de plusieurs Nématodes phytophages. Mais on sait encore peu de choses du mode d'action des endomycorhizes sur les Nématodes. Une meilleure nutrition des plantes symbiotiques pourrait accroître leur résistance à l'égard des parasites, d'autres facteurs, liés à un antagonisme intraracinaire direct, pouvant être également impliqués dans l'effet nématocide. Les mycorhizes n'ont aucun effet répulsif vis-à-vis des Nématodes (Sikora et Schönbeck, 1975). Pour le reste, il s'agit d'hypothèses à vérifier.

Quand les recherches seront plus avancées et qu'on possédera, notamment, une meilleure compréhension des relations plante-hôte/Champignon (LeTacon, 1991), on pourra envisager d'utiliser les endomycorhizes de la même façon que l'on utilise le *Rhizobium* pour inoculer certaines Légumineuses.

[R] 5. Les Bactéries antagonistes des Nématodes

Un certain nombre de Bactéries sécrètent des métabolites toxiques pour les Nématodes ; on les évoquera plus loin, au chapitre consacré aux toxines produites par les micro-organismes.

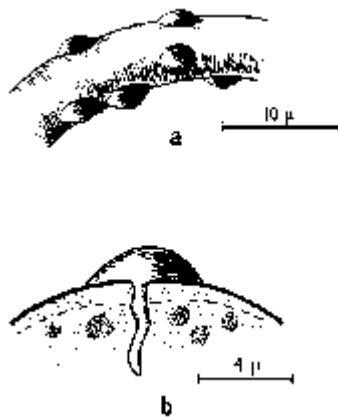


Figure 6. *Pasteuria penetrans*

a : spores bactériennes collées sur la cuticule du Nématode ; b : filament germinatif perforant la cuticule et s'enfonçant dans le corps de l'hôte.

Une seule Bactérie parasite de Nématodes, *Pasteuria penetrans* (3), est étudiée de façon approfondie par les nématologistes. Ses endospores, disséminées dans le sol, se fixent sur la cuticule des Nématodes quand ceux-ci les effleurent en se déplaçant dans la terre (fig. 6a). L'adhésion des endospores sur l'épiderme des Nématodes serait due à une interaction du type lectines-sucres. Le nombre d'endospores collées sur un Nématode peut varier de 2 ou 3 à une cinquantaine.

Le Nématode ne paraît pas affecté par ces spores adhésives, sauf si elles sont très nombreuses, auquel cas il devient

léthargique et peut mourir. En général, les Nématodes parasités parviennent à pénétrer dans les racines de la plante-hôte et les endospores fixées ne commencent à germer que 8 jours plus tard.

La spore produit un tube germinatif (fig. 6b) qui perfore la cuticule du Nématode grâce à des enzymes appropriées et arrive jusqu'à sa cavité générale (pseudocoelome) ; là, le tube germinatif se ramifie en une structure filamenteuse, grossièrement sphérique, qui constitue le thalle et qui s'élargit peu à peu pour se répandre en tous sens dans le corps du Nématode-hôte. La septation de ce thalle donne naissance à des spores qui remplissent le corps du Nématode. Celui-ci devient une sorte de conteneur, un "sac à spores". (pouvant en renfermer jusqu'à 2 millions) où tous les organes sont détruits. Ainsi, la reproduction des femelles est complètement arrêtée, par destruction de l'appareil génital. L'animal parasité éclate sous la pression des spores et les libère, disséminées dans le sol et prêtes à se fixer sur d'autres Nématodes. Le cycle est bouclé. Si aucun Nématode n'accroche immédiatement les spores, celles-ci peuvent rester viables dans le sol pendant plusieurs mois.

La répartition géographique de *P. penetrans* est très ubiquiste. On signale sa présence dans toutes les régions du globe. De même, elle se rencontre sur la plupart des espèces de Nématodes. Toutefois il s'avère que le parasitisme de *P. penetrans* est très spécifique, ce qui conduit à penser qu'il en existe de nombreuses souches, inféodées chacune à des espèces de Nématodes précises. Des spores de *Pasteuria penetrans* issues de *Pratylenchus penetrans* sont tout à fait incapables de parasiter les 10 autres espèces de *Pratylenchus* connues, et, à plus forte raison, tout autre genre de Nématode. Pour Sayre *et al.* (1991), il s'agirait d'espèces différentes de *Pasteuria*.

Cette spécificité très étroite, qui exige de sélectionner la bonne souche de *P. penetrans*, voire la bonne espèce de *Pasteuria* adaptée au Nématode cible, est un obstacle à l'utilisation pratique de cette Bactérie. Elle est en outre un parasite obligatoire, ce qui a interdit, jusqu'à ce jour, de la produire massivement sur milieu synthétique.

P. penetrans présente aussi plusieurs avantages : d'abord son efficacité parasitaire remarquable, qui permet de réduire les populations de Nématodes de plus de 80%, ensuite ses endospores sont d'une résistance exceptionnelle qui permet leur stockage pendant très longtemps sans aucun problème particulier. Aussi les travaux sur *Pasteuria penetrans* se multiplient-ils dans le monde entier et on peut penser que, d'ici peu, cette Bactérie deviendra un agent de lutte biologique fiable et parfaitement maîtrisé.

[R] 6. Les toxines de micro-organismes

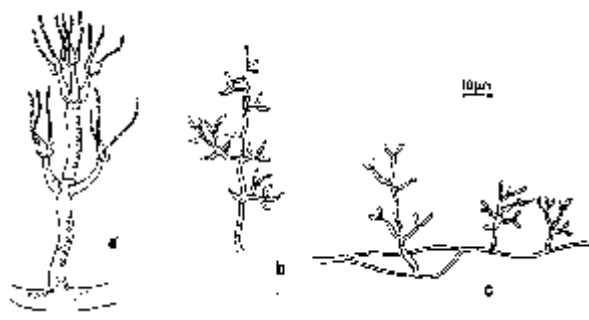


Figure 7. Champignons produisant des toxines nématicides

a : *Paecilomyces lilacinus* ; b : *Trichoderma longibrachium* ; c : *Fusarium roseum* var. *arthrosporioides*.

Les spécialistes des affections des plantes cultivées désignent par toxine une substance non-enzymatique, de faible poids moléculaire, produite par un micro-organisme et nocive à faible concentration. L'originalité des toxines "nématicides" réside dans leur activité, qui se manifeste par contact et non par ingestion, ce qui les distingue par exemple des mycotoxines insecticides, telles que les destruxines. Mais ce terme de nématicide est souvent employé au sens large pour désigner des substances nématifuges (répulsives), némastatiques (perturbant la reconnaissance de sa plante-hôte par le Nématode, ou bloquant le développement de l'oeuf ou de la larve, ou paralysant l'animal temporairement) et nématicides *sensu stricto* (ovicides, larvicides ou létales pour tous les stades).

Très peu de travaux font état de telles substances pour lutter contre des Nématodes phytoparasites.

Certains antibiotiques produits par des Bactéries du genre *Bacillus* et *Pseudomonas* ou par des Actinomycètes des genres *Actinomyces* et *Streptomyces*, de même que la toxine thermostable de *Bacillus thuringiensis*, ont une certaine efficacité *in vitro*. Une avermectine (l'abamectine B1), lactone pentacyclique produite par *Streptomyces avermitilis*, connue pour ses propriétés insecticides et acaricides et commercialisée sous le nom de Vertimec, possède également des propriétés larvicides et ovicides intéressantes vis à vis de *Meloidogyne* sp. (Cayrol *et al.*, sous presse) ; cette molécule, efficace en traitement du sol, est rapidement dégradée mais un des métabolites produit par une avermectine voisine (AVM B2) pourrait être nématicide pendant 2 mois (Putter *et al.*, 1981).

La recherche de toxines nématicides chez les Champignons a seulement consisté jusqu'à présent à tester l'effet nématicide *in vitro* de quelques filtrats de cultures (FC) (travaux principalement indiens). C'est le cas des FC de diverses espèces de Champignons du sol : *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotium*, *Penicillium*, et de quelques espèces de Champignons némato-phages : *Arthrobotryx*, *Nematoctonus*, *Dactylaria*, *Curvularia*. La toxicité de ces FC se manifeste, soit par une paralysie des larves de *Meloidogyne* après 1 à 2 jours d'immersion, soit, après 1 à 6 jours, par l'inhibition de l'éclosion des oeufs. Cianco *et al.* (1988) ont isolé et identifié 2 hétérocycles à

soufre (fusarénone et moniliformine), produits par *Fusarium spp.* et actifs vis-à-vis de *Meloidogyne sp.*

De même, lors de recherches réalisées au laboratoire de nématologie de l'INRA d'Antibes sur *Paecilomyces lilacinus* (cf. ci-dessus) (fig. 7a), il a été mis en évidence que cette espèce pouvait également agir sur les larves de stade II de *Meloidogyne* et d'*Heterodera* par l'intermédiaire d'une toxine paralysante (Cayrol *et al.*, 1989), purifiée et identifiée par Djian *et al.* (1990) : il s'agit d'un petit acide gras volatil, produit abondamment durant la croissance du Champignon sur milieu liquide. L'effet paralysant de cette toxine active sur les larves pourrait s'ajouter à l'action parasitaire "mécanique". du Champignon sur les oeufs, ce qui augmenterait l'effet global du Champignon. Cette molécule agit de façon spécifique sur les espèces de Nématodes phytophages parasites des racines des plantes : *Meloidogyne spp.* et *Heterodera spp.*, mais aussi *Pratylenchus penetrans* (parasite des plantes en pépinière), *Helicotylenchus multicinctus* et *Radopholus similis* (graves parasites des bananeraies en Afrique). Les espèces parasites des parties aériennes (genres *Aphelenchoides* et *Ditylenchus*), les espèces mycophages et saprophages, constituant une part importante de la microfaune utile du sol, ne sont pas atteintes.

Le même type d'activité et la même molécule ont été retrouvés dans les filtrats de cultures d'autres Champignons : *Trichoderma longibrachiatum* (Djian, 1989) et *Fusarium roseum* var. *arthrosporioides* Messian & Cassini (Cayrol & Djian, 1990) (fig. 7b et 7c). Une étude structure moléculaire / activité nématocide a permis de découvrir des molécules dérivées à activité nématocide décuplée mais conservant toujours le même spectre d'efficacité (Djian, 1989, Djian *et al.*, 1989). Elles ont fait l'objet d'un brevet INRA (contrat SOCOTRA-CORALYNE, groupe Tropical Green). Les premiers résultats des essais dans le sol réalisés avec quelques unes des molécules sur tomates sensibles infestées par *Meloidogyne sp.* (Djian *et al.*, 1989, Pellerin, 1991) montrent une réduction importante du taux de pénétration des larves de *Meloidogyne sp.* dans les racines de tomate. L'étude du mode d'action d'une de ces molécules sur les Nématodes suggère qu'elle pénètre par un transport actif et est accumulée dans les Nématodes. Erreur! Source du renvoi introuvable. alors que les espèces "sensibles", qui ne l'accumulent pas, relarguent rapidement des produits de sa métabolisation.

L'exploitation de ces différents travaux sur les toxines produites par des micro-organismes, c'est-à-dire la mise en évidence de nouvelles molécules nématocides, devrait permettre de déboucher sur la production industrielle de pesticides plus performants et surtout plus spécifiques.

[R] 7. Les plantes nématocides et leurs "toxines"

Chez les Algues, les Spongiaires et les Coraux, on connaît encore peu d'espèces à vertu nématocide : seul l'extrait aqueux de *Spateoglossum schroedi* (algue utilisée comme amendement organique) semble efficace contre *Meloidogyne sp.*, de même que les extraits aqueux de *Phormidium tenue* (Algue bleu-vert d'eaux thermales) et lipidique d'*Asterionella japonica* (Diatomée) testés *in vitro* vis-à-vis de larves de *Meloidogyne sp.*

La production de substances nématocides par des végétaux supérieurs est, en revanche, connue depuis très longtemps. Les données acquises sur le terrain par les nématologistes de l'ORSTOM (Office de recherche scientifique et technique en coopération) et au cours d'enquêtes ethnobotaniques démontrent l'efficacité de certains végétaux introduits traditionnellement (par des ethnies africaines ou des populations d'Asie et d'Amérique du Sud) dans les assolements, en culture intercalaires ou sous forme de broyats, pour lutter de façon empirique contre des Nématodes phytoparasites. A l'heure actuelle, plus de 200 espèces de plantes, appartenant à 80 familles différentes, sont étudiées pour leurs propriétés nématocides (publications principalement indiennes, japonaises et brésiliennes).

Ces végétaux peuvent nuire aux Nématodes de différentes manières. Les substances actives peuvent être exsudées des racines et agir soit en inhibant la pénétration des larves dans les racines - cas du Sésame *Sesamum orientale* (Pedaliaceae) -, soit en inhibant l'éclosion des oeufs - cas de *Eragrostis curvula* (Poaceae) -, soit en empoisonnant les Nématodes - cas de la Pervenche de Madagascar *Catharanthus roseus* (Apocynaceae) ou de l'Asperge *Asparagus officinalis* (Liliaceae). Elles peuvent aussi être synthétisées en réaction à l'infestation (ces substances sont alors des phytoalexines) et inhiber le développement des larves cas de dérivés du gossypol, de l'aldéhyde terpénoïque du Cotonnier *Gossypium hirsutum* var. Auburn 623 (Malvaceae) -, ou être déjà présentes dans les tissus au niveau des tiges, feuilles, fleurs, graines ou racines et agir soit en empoisonnant la larve dès sa pénétration dans la plante cas de l'Arachide *Arachis hypogaea* (Fabaceae) -, soit en bloquant son développement et sa multiplication - cas du Ricin *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) ou du Tagetes des parfumeurs *Tagetes minuta* (Asteraceae).

Certaines de ces plantes sont introduites dans les rotations en précédent cultural, comme engrais verts nématocides ou en association avec la culture sensible ; ce sont surtout des Fabaceae - Noix de cajou *Cajanus cajan*, Crotalaire *Crotalaria spp.* (fig. 8), *Stylosanthes gracilis* -, mais aussi des Asteraceae - *Tagetes spp.* (fig. 8), Cosmos *Cosmos bipinnatus* -, des Poaceae Panicums *Brachyaria spp.* et *Panicum maximum*, *Eragrostis chloromelas* -, et des Brassicaceae - Moutarde blanche *Sinapis alba* (var. Emergo) et *Radis Raphanus sativus* (var. Pegletta, Stobolt et Nemex -.

De nombreuses pratiques indigènes, en Afrique, en Inde, aux Philippines et en Amérique du Sud les utilisent également sous forme de préparations à base de broyats ou d'extraits qui sont incorporés aux sols cultivés et peuvent servir d'amendements organiques nématocides : racines d'une Euphorbe *Euphorbia hirta* (Euphorbiaceae), tiges de *Vernonia polyanthes* (Asteraceae), feuilles de Pervenche de Madagascar, de *Leucoena leucocephala* (Fabaceae),

feuilles composées d'un *Datura metel* (*Solanaceae*), fleurs de *Tagetes spp.* (*Asteraceae*), graines (tourteaux) de Lilas des Indes ou Margousier ou Neem *Azadirachta indica* (*Meliaceae*), de Quassia *Hannoa undulata* et *H. klaineana* (*Simarubaceae*).

L'analyse des substances produites lors de la décomposition de ces matières organiques dans les sols a permis d'identifier, en dernière phase de décomposition, outre les éléments N, P, K qui stimulent l'activité des parasites ou prédateurs naturels des Nématodes, différents acides gras volatils (AGV) à propriétés nématocides. L'effet nématocide de ces AGV s'ajouterait à celui des molécules contenues dans les tissus des plantes et libérées dans le sol après broyage, macération ou extraction.

Certains travaux sommaires, au Brésil mais surtout en Inde, ont consisté à tester *in vitro* les extraits aqueux, alcooliques et lipidiques des différents tissus de ces espèces nématocides sur les oeufs et larves de divers Nématodes, principalement *Meloidogyne sp.* Des investigations plus poussées (en Californie et au Japon notamment) ont déjà permis l'isolement et la caractérisation d'un certain nombre de principes actifs. Les structures chimiques de ces substances nématocides s'étendent très largement à diverses familles de molécules (Djian, sous presse)

- polyacétylènes isolés des extraits benzéniques du Carthame *Carthamus tinctorius* (*Asteraceae*) ou des extraits méthanoliques de racines d'*Erigeron Erigeron phyladelphicus* (*Asteraceae*) et d'Angélique *Angelica pubescens* (*Umbelliferaeae*);

- acides, esters carboxyliques et acides gras : acide asparagique extrait des racines, feuilles et tiges d'Asperge, di-n-butyl succinate extrait de l'Arachide, acides myristique et palmitique des racines de l'Iris du Japon *Iris japonica* (*Iridaceae*) ou oléique, linoléique, palmitique et stéarique dans l'huile d'un *Cyperus*, *Cyperus esculentus* (*Cyperaceae*), et *Lawsonia alba* (*Lythraceae*);

- acides aminés : dans les exsudats racinaires du Sésame et du Gombo *Abelmoschus esculentus* (*Malvaceae*), et protéines : lectine isolée de *Canavalia ensiformis* (*Fabaceae*) et du *Mucuna Stizolobium* (*Mucuna*) *deeringiana* (*Fabaceae*), protéine glycosylée dans les extraits aqueux de feuilles de Mouron *Anagallis arvensis* (*Primulaceae*);

- composés aromatiques : saponine extraite du Lierre *Hedera helix* (*Araliaceae*), pyrocatechol dans l'exsudat racinaire d'*Eragrostis curvula* (*Poaceae*);

- hétérocycles à oxygène, azote ou soufre : dérivés du bithienyl et de l'alpha-terthienyl des extraits d'Oeillet d'Inde *Tagetes patula*, d'Oeillet d'Inde mexicain *T. tenuifolia* et de Rose d'Inde *T. erecta* (*Asteraceae*), quassinoides des Quassias;

- alcaloïdes : éclipatine dans les extraits aqueux de l'Eclipta *Eclipta alba* (*Asteraceae*), sanguinarine, chélérythrine et bocconine extraits des racines du Macleya *Bocconia cordata* (*Papaveraceae*), dérivés cytisine et anagyrine des racines du Sophora *Sophora flavescens* (*Fabaceae*), pyrolizidine, dérivé de l'ornithine, chez la Crotalaire;

- terpénoïdes : odoracine et odratine, diterpènes extraits des racines de Daphné du Japon *Daphne odora* (*Thymelaceae*), nimbine et azadirachtine, triterpènes (limonoïdes) extraits des graines du Lilas des Indes, lactone terpénoïque extraite des feuilles et fleurs d'Armoise amère ou Absinthe *Artemisia maritima* (*Asteraceae*).

Il a été mis en évidence par Munakata (1979) que la plupart de ces substances naturelles nématocides peuvent avoir une activité systémique (le principe actif est transporté par la sève dans tous les organes de la plante), sont décomposables et non polluantes. Elles peuvent être utilisées comme base pour la synthèse de nouveaux nématocides ou dans la recherche de gènes de résistance aux Nématodes pour la création de nouvelles variétés.

Ne sont actuellement commercialisés que le *Tagetes* des parfumeurs sous le nom de Nemanon, utilisé en culture intercalaire pour lutter contre *Pratylenchus*, *Tylenchorynchus* et *Meloidogyne spp.*; Moutarde blanche et Radis (var. Pegletta, Stobolt et Nemex), utilisés comme engrais vert pour lutter contre *Heterodera schachtii*; des Crotalaires utilisées au Brésil comme engrais vert pour lutter contre *Meloidogyne spp.* Des études sont en cours sur les modalités d'utilisation des extraits du Lilas des Indes (nimbine et azadirachtine) en enrobage des semences, qui s'avèrent prometteurs pour lutter contre *Meloidogyne sp.* et d'autres Nématodes phytoparasites.

Au laboratoire de l'INRA d'Antibes, on étudie le mode d'activité des Crotalaires et des Oeillet d'Inde (*Tagetes spp.*) (Panchaud, 1990, Jeuffrault, 1991) à vertu nématocide en vue d'une exploitation biochimique ultérieure. De tels travaux se multiplient en Inde, au Japon et en Amérique et intéressent de nombreux pays où ces Nématodes prolifèrent et causent d'importants dommages. Une collaboration avec les centres ORSTOM d'Antibes, du Sénégal et de Nouméa est également engagée sur l'étude des propriétés nématocides de nouvelles plantes, la plupart originaires des pays tropicaux, pour une synergie des compétences dans le développement de ce programme de recherche sur les SNAN (substances naturelles à activité nématocide).

[R] En conclusion

Cet inventaire des moyens biologiques, déjà développés ou en cours d'étude, permet d'envisager l'avenir avec optimisme et d'éviter les vues "catastrophistes". selon lesquelles la disparition - par interdiction - des nématocides chimiques va conduire à de fortes diminutions des récoltes.

Toutefois, pour parvenir à maintenir une bonne situation, un certain nombre de conceptions nouvelles doivent être adoptées.

Tout d'abord, il semble opportun de développer au maximum la recherche sur les procédés "alternatifs". de lutte, qui devront impérativement être employés, du fait de la disparition de tout autre moyen de lutte. A ce propos, les

recherches poursuivies à l'INRA dans ce domaine ont une certaine Erreur! Source du renvoi introuvable., avantage qu'il serait dommage de ne pas mettre à profit, alors que des laboratoires partout dans le monde s'y investissent et risquent de nous concurrencer.

Ensuite, au niveau de l'application, il serait souhaitable que les industriels comprennent que la mise au point des découvertes de laboratoire exige un prédéveloppement long et onéreux et qu'il acceptent d'y participer plus activement sans chercher seulement à en tirer des profit immédiats.

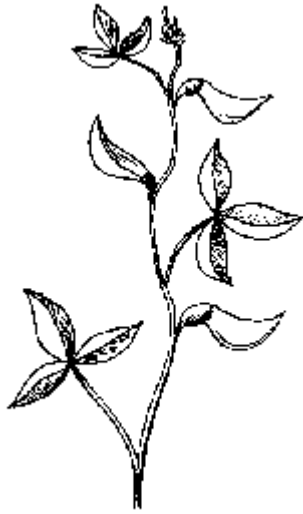


Figure 7. *Crotalaria* sp.



Figure 8. *Tagetes* sp.

Enfin, les vulgarisateurs, en contact direct avec le monde agricole, devraient favoriser un changement des mentalités et montrer que les problèmes nématologiques ne seront pas résolus par l'adoption d'une seule méthode, mais bel et bien par l'association de tous les moyens disponibles utilisés conjointement : assolements, variétés résistantes, Champignons nématophages, plantes mycorhizées, plantes nématicides, etc.

Cet ensemble de mesures "douces". pourra seul remplacer l'efficacité brutale et destructrice que procurent les nématicides chimiques. Espérons qu'à une époque où l'environnement semble concerner de plus en plus d'individus, notre modeste "charte". entrera en application.



[R] Les dessins de cet article sont de J.-C. Cayrol

[R] Les Nématodes, en bref

Les Nématodes (ou Nématelminthes) - les anciens "vers ronds" - forment un groupe zoologique homogène par leurs caractères anatomiques et morphologiques mais très diversifié par leurs modes de vie. Beaucoup vivent en parasites

des animaux, en particuliers les Strongles, Ankylostomes et autres *Ascaris* sont des ennemis de l'homme et des animaux domestiques bien connus. D'autres peuplent le sol ; parmi eux, ceux qui se nourrissent de végétaux - les Nématodes phytoparasites - intéressent les phytiatres (spécialistes de la protection des plantes, zoologistes en France, phytopathologistes au USA...).

Un Nématode est un animal vermiforme, très simple, constitué *grosso modo* d'un tube externe cuticule enveloppant 2 tubes internes superposés : le tube digestif et le tractus génital (mâle ou femelle). Les Nématodes phytoparasites possèdent, à la partie antérieure du tube digestif, un stylet perforant (fig. 2 ci-dessous) suivi d'un canal oesophagien (c) aboutissant à un bulbe musculéux (b) pompe aspirante et refoulante. La plante une fois perforée par le stylet, des enzymes digestifs produits par les glandes salivaires (g) y sont injectés par cette pompe, laquelle, ensuite, aspire le produit de la digestion le déverse dans l'intestin (i). Les dégâts directs sont avant tout un affaiblissement de la plante, parfois des déformations, décolorations, galles, etc. ; Les dégâts indirects consistent en l'aggravation de maladies à Champignons et en la transmission de maladies à virus.

Les Nématodes phytoparasites appartiennent à deux ordres, les Dorylaimides et les Tylenchides. leur détermination au niveau de l'espèce, est du ressort d'un spécialiste. Considérant leur mode de vie par rapport à la plante, on distingue les Nématodes des racines - dont tout le cycle a lieu dans le sol, certains étant mobiles à tous les stades, parasites externes (*Tylenchus*) ou internes (*Pratylenchus*), d'autres sédentaires : Nématodes à kystes (*Heterodera*, *Globodera*), des Nématodes à galles (*Meloidogyne*, etc.) et des Nématodes des parties aériennes, moins nombreux (*Ditylenchus*, *Aphelenchoides*).

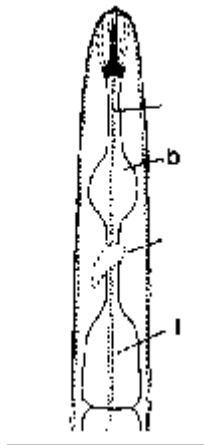


Figure 2. Schéma de l'extrémité antérieure d'un Nématode

[R] L'attaque d'un Nématode par un *Hirsutella*

On peut différencier 4 étapes dans l'évolution du parasitisme :

- D'abord une phase de fixation des conidies sur l'épiderme du Nématode-hôte. Il semble que cette adhérence s'effectue préférentiellement sur la tête de l'animal. Un point important est la spécificité ; il apparaît en effet qu'il existe plusieurs souches d'*Hirsutella rhossihensis* inféodées chacune à des espèces de Nématodes particulières. Ceci pourrait être imputable à une liaison du type lectine-sucre entre le corps du Nématode et la spore. Il apparaît aussi que les espèces d'*Hirsutella* parasites d'Insectes ou d'Acariens ne se fixent jamais sur les Nématodes (Castet, 1982).

On peut trouver des Nématodes couverts d'une centaine de spores ou bien des individus porteurs d'une seule spore. Cayrol et Frankowski (1986) ont montré que, dans tous les cas, le Nématode finira par mourir parasité.

- La deuxième phase du parasitisme est la phase de germination. La spore développe un filament germinatif qui pénètre l'hôte et se ramifie dans le corps de l'hôte.

- Au cours de la troisième étape, un développement mycélien intense parasite totalement le corps du Nématode-hôte dont tous les organes sont digérés et lysés.

- Enfin, le mycélium parasitaire se met à fructifier en formant des phialides qui sortent de la dépouille et qui libèrent des conidies dans le sol, prêtes à se coller sur d'autres Nématodes.



Figure 4. *Hirsutella*

- a : spores adhésives sur la cuticule d'un Nématode ;
b : filaments parasitaires envahissant le corps de l'hôte

[R] Notes

- (1) Voir, dans le Courrier de la cellule Environnement n°15, p.43, l'encadré2. [VU]
(2) Les caractéristiques chimiques, techniques et toxicologiques des matières actives et des spécialités nématicides sont répertoriées dans le Guide Phytosanitaire de l'ACTA, remis à jour chaque année (ACTA, 149, rue de Bercy, 75595 Paris cedex 12), ainsi que sur la base de données télématiques 3617 AGRITOX. [VU]
(3) Longtemps considéré comme un Protozoaire sous le nom de *Dusboscquia penetrans*, ce parasite n'a été définitivement classé comme Bactérie (*Pasteuria penetrans*) qu'en 1985 par Sayre et Starr en raison de sa similitude avec l'espèce *Pasteuria ramosa* décrite par Metchnikoff en 1888. [VU]

[R] Références bibliographiques

- Barron G.L., 1977. The nematode-destroying fungi. *Topics in Microbiology*, 1, Canadian Biological publications Ltd.
Caset R., 1982. *Contribution à l'étude des Champignons du genre Hirsutella (Hyphomycètes) parasites de Nématodes*. Mémoire DAA ENSFA Rennes, 30 pp.
Cayrol J.C., 1978. Agent nématophage, brevet INRA n°7817624 France & CEE.
Cayrol J.C., 1991. Propriétés nématicides de endomycorhizes à vésicules et arbuscules. *PHM, Rev. Hort.*, 321, 33-42.
Cayrol J.C., Djian C., 1990. Etude de la toxicité de *Fusarium roseum* var. *arthrosporioides* pour le Nématode *Meloidogyne arenaria*. *C.R. Acad. Agri.* présenté par M. Ritter.
Cayrol J.C., Djian C., Pijarowski L., 1989. Study of the nematocidal properties of the culture filtrate of the nematophagous fungus *Paecilomyces lilacinus*. *Rev. Nematol.* 12 (4), 331-336.
Cayrol J.C., Djian C., Frankowski J.P., 1992. Efficacy of Avermectins for the control of root-knot nematodes. *Nematologica* (sous presse)
Cayrol J.C., Frankowski J.P., 1986. Influence of the number of parasitizing conidia of *Hirsutella rhossiliensis* on the mortality of *Ditylenchus dipsaci*. *Revue Nématol.*, 9, 411-412.
Cayrol J.C., Velasquez-Dominguez M., Levaux P., 1981. Etude préliminaire sur les possibilités d'utilisation des Champignons parasites comme agents de lutte biologique. *Bull. OEPP*, 12(4), 497-503.
Cianco A., Logrieco A., Lamberti F., Bottalico A., 1988. Nematicidal effects of some *Fusarium* toxins. *Nematol. Med.* 16, 137-138.
Djian C., 1989. *Etude de nouvelles molécules nématicides spécifiques*. Rapport DEA Parasitologie USTL Montpellier, 30 pp.
Djian C., 1992. Etat actuel des connaissances sur les substances nématicides produites par des micro-organismes et des végétaux supérieurs. *Actes du IIIe Symposium sur les substances naturelles d'intérêt biologique*, Editions du CNRS. (sous presse)
Djian C., Cayrol J.C., Ponchet M., 1989. Produits nématicides. Brevet INRA n° 8911212 France, OAPI, n° 90402315.7 Europe, n° 071569438 USA.
Djian C., Pijarowski L., Ponchet M., Arpin N., Favre-Bonvin J., 1990. Acetic acid, a selective nematocidal metabolite from culture filtrates of *Paecilomyces lilacinus* (Thom) Samson and *Trichoderma longibrachiatum* Rifai. *Nematologica*, 37.
Gomes Carneiro R.M.D., Cayrol J.C., 1991. Relationship between inoculum density of the nematophagous fungus *Paecilomyces lilacinus* and control of *Meloidogyne arenaria*. *Revue Nematol.*, 14 4), 629-634.
Irving F., Kerry B.R., 1986. Variation between strains of the nematophagous fungus *Verticillium chlamydosporium* Goddard. II Factors affecting parasitism of cyst-nematode eggs. *Nematologica*, 32, 474-485.
Jaffe B.A., Zehr E.I., 1982. Parasitism of the nematode *Crimemella xenoplax* by the fungus *Hirsutella rhossiliensis*. *Phytopathol.*, 72, 1378-1381.
Jatala P., Kaltenbach R. & Bocangel M., 1979. Biological control of *Meloidogyne incognita acrita* and *Globodera pallida* on potatoes. *J. Nematol.*, 11, 303.
Jeuffraut E., 1991. *Etude des modalités d'utilisation en culture dérobée de Tagetes minuta*, plante nématicide. Mémoire DAA ENSA Montpellier, 30 pp.
Kerry B.R., DeLeij F., 1991. New nematocidal strain of *Verticillium chlamydosporium* for control of *Meloidogyne spp.*, well maintained in soil without damage to plants. Brevet Agric Genetics Co. n° WO9101642
LeTacon F., 1991. L'arbre en relation, Partenaires et adversaires, La forêt et le bois, Recherches. *Les Dossiers INRA*, 5, 34-37
Munakata K., 1979. Nematocidal Natural Products. In D.L. Whitehead & W.S. Bowers : *Natural products for innovative pest management*. Pergamon Press Oxford.
Nordbrink-Hertz B., Mattiasson B.O., 1979. Action of a nematode trapping fungus shows lectin-mediated host microorganism interaction. *Nature Lond.* 281.
Panchaud-Mattei E., 1990. *Etude de biotoxines nématicides*. Rapport DEA, Univ. Aix-Marseille III, 28 pp.
Pellerin B., 1991. *Etudes préliminaires sur le comportement dans le sol de nouvelles molécules nématicides (Brevet INRA n° 8911212)*. Mémoire DAA ENSA Montpellier, 30 pp.
Putter J.G., MacConnel F.A., Preiser F.A., Haidri A.A., Ristish S.S., Dybas R.A. (1981). Avermectins : novel insecticides, acaricides and nématicides from a soil microorganism. *Experientia*, 37, 963-964.
Sayre R.M., Wergin W.P., Sturhan D., 1991. Comparison of the fine structure of *Pasteuria sp.* from *Heterodera glycines* with a related bacterium parasitizing *Heterodera goettingiana*. *Nematologica*, 36, 390.
Sayre R.M., Starr M.P., 1985. *Pasteuria penetrans* (ex Thorne 1940) nom. rev., comb. n., sp. n., a mycelial and endospore-forming bacterium parasitic in plant-parasitic nematodes. *Proc. Helminthol. Soc. Wash.*, 52, 149.
Sayre R.M., Starr M.P., 1988. Bacterial diseases and antagonisms of nematodes. In G.O. Poinar & H.B. Jansson. *Disease of Nematodes*, 1, CRC Press Inc, Florida, 69-101.
Sikora R.A., Schonbeck F., 1975. *Biological and Genetic Control*, Reports of the VII International Plant Protection Congress, Moscou, 158-166.

- Sturhan D., Schneider R., 1980. *Hirsutella heteroderae*, ein neuer Nematoden parasitärer Pilz, *Phytopathol.*, Z, 99, 105-115.
- Tribe H.T., 1980. Prospects for the biological control of plant-parasitic nematodes. *Parasitology*, 81, 619-639.

Lutter contre les nématodes à galles en Agriculture Biologique

C. BERTRAND (GRAB).

Les nématodes à galles (*Meloïdogyne spp.*), aussi parfois appelés anguillules, sont des ravageurs du sol particulièrement difficiles à éliminer en agriculture biologique comme en agriculture traditionnelle. Ils provoquent des dégâts considérables sur les cultures maraîchères mais aussi sur les plants des pépinières fruitières et ornementales.

Qu'est-ce qu'un nématode à galles ?

Classification

Les nématodes phytophages (aussi appelés anguillules) sont longtemps passés inaperçus du fait de leur taille microscopique et de la non spécificité des symptômes qu'ils engendrent. En effet, on n'observe souvent qu'un dépérissement des parties aériennes alors que ce symptôme est commun à de nombreux stress pathologiques et physiologiques. On a donc couvert l'ignorance de leur présence par le terme général de " fatigue des sols ".

Les nématodes *Meloïdogyne* (Root-knot nématodes) sont des vers ronds de la famille des *Tylenchida*. Le genre *Meloïdogyne* se subdivise en de nombreuses espèces, toutes phytophages, dont les plus répandues sont, en France : *M. incognita*, *M. arenaria*, *M. hapla* et *M. javanica*. L'identification des espèces, assez ardue, se fait par observation microscopique de la figure périnéale (région postérieure) des femelles.

Caractéristiques biologiques

Morphologie

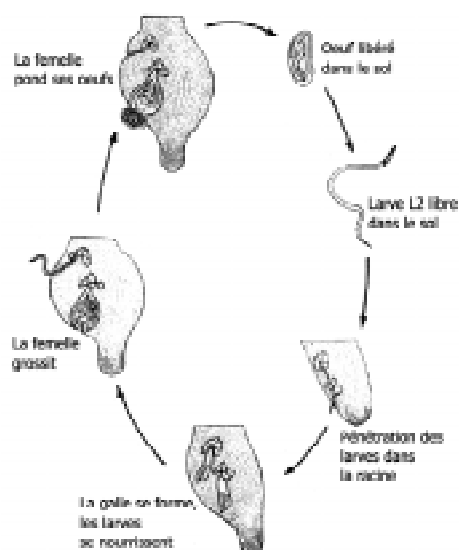
Les *Meloïdogyne* sont morphologiquement très simples. Ils sont filiformes et mesurent respectivement ~ 0.4 mm pour les femelles et 1mm pour les mâles. Les nématodes phytophages se caractérisent par un stylet piqueur qui permet de perforer les cellules des vaisseaux conducteurs de sève.



Biologie et cycle de développement

La forme de dissémination est la larve de stade L2. C'est la seule forme libre : elle se déplace dans le film d'eau recouvrant les particules de sol. Cette larve s'insinue dans la racine jusqu'aux faisceaux vasculaires qu'elle pique de son stylet. Elle se nourrit de la sève et perturbe la multiplication des cellules de la racine. Ceci aboutit à la formation d'une galle. La larve s'hypertrophie en évoluant par les stades L3 et L4 pour aboutir à la forme adulte sexuée. Le mâle reste filiforme et quitte la racine alors que la femelle, incapable de se mouvoir, reste incluse dans les tissus. Elle devient piriforme et continue à se nourrir aux dépens de la plante. Une fois fécondée, elle pond les œufs dans une sorte de sac de la taille d'une tête d'épingle à la surface de la racine (~ 300 œufs/masse).

Les œufs sont la forme de résistance. Leur évolution passe par la forme L1 qui reste incluse dans l'enveloppe de l'œuf. Au stade L2, la larve sort de l'œuf et va coloniser de nouvelles racines. La durée de ce cycle est très variable selon les conditions externes (de trois à huit semaines, six semaines à 25°C).



Ecologie

Le cycle de développement des nématodes à galles est très lié aux conditions du milieu.

La température joue un rôle fondamental : une température assez élevée (~ 25 °C) accélère le cycle, mais au-delà de 40°C, il est freiné (effet léthal, d'ailleurs utilisé lors des désinfections à la vapeur). Les attaques débutent donc autour de Mars et cessent généralement en Octobre.

De même, les excès d'eau ou les sécheresses sont néfastes aux nématodes, bien que dans ces cas, les masses d'œufs constituent une forme de résistance souvent efficace.

L'effet du sol : Les nématodes préfèrent les sols légers et aérés (déplacements facilités) aux sols lourds riches en argiles ou en matière organique.

Ce ravageur peut descendre profondément dans le sol (+ de 50 cm) : c'est cela qui rend la lutte très difficile.

Pourquoi une lutte contre les nématodes en maraîchage?

Les nématodes en maraîchage

Les cultures maraîchères sont attaquées par un grand nombre de nématodes, mais les nématodes à galles du genre *Meloidogyne* sont probablement les plus graves ennemis des maraîchers sous toutes les latitudes. Ils s'attaquent à la plupart des légumes avec une certaine prédilection pour les cucurbitacées (melons, concombres ...), les solanées (tomates, aubergines, poivrons ...) et les composées (laitues, chicorées).

Les dommages qu'ils occasionnent aux Etats-Unis sur fruits et légumes sont évalués à 6 milliards de dollars par an.

Les cultures en serres sont les plus touchées dans la mesure où les attaques sont aggravées par les hautes températures. Cette particularité fait que les *Meloidogyne* entraînent fréquemment des dommages considérables en climat chaud : cultures tropicales (tabac, café, coton ...), cultures méridionales et sous serres.

Les chutes de rendement sont rarement sensibles la première année d'infestation (population de nématodes trop faible). Par contre, si les cultures sensibles se succèdent pendant deux ou trois ans, la récolte peut se trouver gravement compromise dès la troisième année.

Il n'est pas rare d'observer des chutes de rendement de plus de 50 % en maraîchage.

Symptômes

Les symptômes d'une attaque de *Meloidogyne* sont caractéristiques et aisés à remarquer : le système racinaire est envahi de galles (jusqu'à 1 cm de diamètre) qui perturbent l'assimilation des nutriments. Ainsi, la première alerte est donnée par l'observation des symptômes classiques d'un dysfonctionnement racinaire : dépérissement des parties aériennes (chloroses, flétrissement), croissance réduite, petits fruits de mauvaise qualité ...

Le plus souvent, ces symptômes apparaissent par foyers ou en lignes (zones de dépérissement) dans la culture ; ces tâches (les zones peuplées de nématodes) s'agrandissent d'années en années jusqu'à finalement couvrir toute la culture.



Les méthodes de lutte

Les méthodes de lutte prophylactiques

■ **Bien gérer les rotations culturales** est un moyen de freiner une population mais rarement de l'éliminer. Elle consiste à **éviter le retour de plantes hôtes** pendant plusieurs années (5 à 6 ans). Le problème est que les *Meloidogyne* sont très polyphages : ils peuvent s'installer non seulement sur de nombreuses cultures mais aussi sur les adventices.

■ **Un labour en période très sèche** pour soumettre les nématodes à la dessiccation (efficacité non démontrée).

■ **Limiter au maximum l'inoculum** : en retirant le maximum de racines du sol en fin de culture ; en surveillant la **qualité de l'eau d'irrigation, des plants de pépinières et du terreau** ; et en nettoyant le matériel après un travail dans une parcelle contaminée.

Les méthodes de lutte thermique

Ces méthodes consistent à **élever la température du sol** à des niveaux létaux pour les nématodes (de 40°C à 60 °C).



Appareil de désinfection vapeur

■ **La désinfection vapeur** : elle est injectée sous une bâche étanche recouvrant le sol pendant 1h30 à 3h (consommation : 400l de fuel / 500m²). La profondeur traitée est de dix à vingt centimètres lorsque le sol est finement préparé.

Avantages : Efficace à court terme.

Inconvénients : **destruction de l'ensemble de la microfaune** du sol ; à répéter chaque année (seules les couches superficielles du sol sont nettoyées) ; coûte très cher (30 à 50 KF/ha) ; compter autour d'un mois pour traiter un hectare de tunnels.

■ **La solarisation** : utilisation des rayonnements solaires. Après avoir fait un travail fin du sol et l'avoir rempli à la capacité au champ, on couvre le sol avec une bâche plastique transparente pendant au moins cinq semaines. L'eau est ici le vecteur de l'échauffement du sol : un goutte à goutte est nécessaire pour maintenir l'humidité en sol léger et la bâche doit être plaquée au sol pour éviter les adventices. Cette technique utilisée seule est très peu efficace : la température n'est pas assez élevée et la profondeur atteinte est trop faible..

Utilisation de variétés résistantes en porte-greffe

L'hybride interspécifique type KNVF (pour Corky root, Nématodes, Verticillium, Fusarium) peut être utilisé comme porte greffe dans les cultures de tomates et d'aubergines. Issu du croisement de *Lycopersicon esculentum* avec *Lycopersicon hirsutum*, cet hybride est résistant aux *Meloidogyne* grâce à sa réaction d'hypersensibilité liée au gène "Mi".

Avantages : conférer une résistance complète au porte greffe et assainir le sol : les nématodes sont attirés et meurent sans pouvoir évoluer en adulte : le cycle du ravageur est coupé.

Cette **technique est très intéressante pour protéger les Tomates et Aubergines**. Il n'existe pour l'instant pas de porte greffe résistant pour les cucurbitacées et autres familles.

Variétés du commerce : Brigeor (Gautier) et Beauford (Ruiter).



Les méthodes de lutte microbiologiques

Il existe de façon naturelle dans le sol un nombre relativement important de champignons antagonistes des nématodes. L'inconvénient de cette technique réside dans les contraintes liées à son utilisation pratique (formulation, stockage, maintien dans le sol ...).

Les champignons prédateurs

Nématode piégé par un champignon



Le mycélium de ces champignons est pourvu de ramifications formant des boucles, boutons ou anneaux sécrétant une glu. Lors de ses déplacements, le nématode peut se trouver piégé dans ce réseau mycélien.

C'est l'INRA d'Antibes qui a promu l'utilisation d'un de ces champignons en France (*Arthrobotrys irregularis*, commercialisé sous le nom de S350 puis T350).

L'efficacité de ce produit est bonne si le champignon parvient à s'installer correctement dans le sol, mais ce n'est pas toujours le cas. Aucun produit commercial n'existe de nos jours mais plusieurs équipes de recherche travaillent sur le sujet.



"J'ai roulé sur un de ces champignons nématophages..."

Les bactéries antagonistes des nématodes



Spores bactériennes sur nématodes

Pasteuria penetrans est une bactérie qui parasite très efficacement les nématodes : la réduction de la population de ces ravageurs peut atteindre 80 %. Cependant, l'étroite spécificité des souches bactériennes et leur statut de parasite obligatoire sont des obstacles à leur utilisation pratique.

Utilisation de plantes nématicides

A l'heure actuelle, plus de deux cents espèces de plantes, appartenant à 80 familles différentes, sont étudiées pour leurs propriétés nématicides. C'est sur l'activité nématicide de certains végétaux que s'appuient les pratiques empiriques utilisées en Afrique, en Amérique du sud et en Asie pour protéger les cultures contre les nématodes.

Introduction de plantes nématicides dans les rotations

Beaucoup de ces plantes sont introduites en précédent cultural puis, pour certaines (les Fabaceae surtout) enfouies comme engrais vert : Crotalaire, Radis fourrager, Rue... D'autres plantes sont utilisées sans enfouissement : le *Cosmos*, le *Panicum sp*, *Eragrostis sp*, le *Tagetes (Tagetes sp)* sont autant de plantes ayant permis de réduire le nombre de gales sur les racines de tomates.

Dans de nombreux cas, l'action nématicide est due au piégeage des nématodes dans les racines.

Il faut aussi noter que la décomposition des engrais verts libère dans le sol différents acides gras volatiles dont l'effet nématicide pourrait s'ajouter à celui des molécules contenues dans les tissus des plantes enfouies.

Le Tagete (*Tagetes minuta*)

Le Tagete (ou œillet d'Inde) a déjà été très étudié et une méthode de lutte l'utilisant comme précédent cultural a été proposée. Il est produit par la société GSN et commercialisé sous le nom commercial de Nemanon. Pour lutter contre les nématodes à gales, l'espèce la plus efficace est le *Tagetes minuta*.



Utilisation : Semis mi Avril ; densité 800 gr/ha.

Inconvénients : Durée de culture d'au moins trois mois comme précédent cultural ; il devient rapidement envahissant (l'enfourer avant l'apparition des graines, sinon il se transforme facilement en adventice) ; risque d'allergie.

La crotalaire (*Crotalaria spp*)



Les agriculteurs des pays d'Amérique du sud et d'Asie l'utilisent traditionnellement dans leurs assolements pour abaisser les populations de parasites avec, semble-t-il, un certain succès.

La Crotalaire apprécie les sols légers et frais associés à un climat ensoleillé et chaud.

Utilisation : Semis de Mai à Juillet ; densité : 5 plants/m² ; ne pas trop arroser ; désherbage régulier ; attention aux acariens.

Inconvénients : En France, elle boucle difficilement son cycle et l'approvisionnement en graines reste la contrainte principale ; elle est très sensible à la concurrence des adventices en début de culture.

La Crotalaire constitue un engrais vert nématicide intéressant (comme c'est une légumineuse, son enfouissement constitue

une fumure azotée non négligeable). Il faut impérativement l'enfouir pour avoir une action nématicide.

Utilisation des tourteaux végétaux

Le Nématorg

Origine et utilisation : Le Nématorg est un tourteau végétal issu des graines de Neem.

C'est un fertilisant organique (3% d'azote ; 1.5% de phosphore et 1 % de potassium) à libération lente.

Il est épandu et enfoui comme tout fertilisant (action nématicide à 6 t/ha).

Activité nématicide : Utilisé traditionnellement en Inde et autres pays d'Asie pour lutter contre les nématodes, le Nématorg a fait l'objet de nombreux travaux qui ont confirmé son efficacité nématicide. En France, des expérimentations du GRAB ont montré que son épandage à 6 t/ha permettait de bien protéger les cultures sensibles de printemps.

Le Tourteau de Ricin (*Ricinus communis*)

Le Ricin (*Euphorbiacée*), culture oléagineuse assez commune, possède non seulement des propriétés de plante-piège mais aussi des propriétés ovicides intrinsèques.

Le tourteau de Ricin associé au Nématorg permet là aussi de contrôler les populations de nématodes à galles (2.5 t/ha de chaque tourteau).



Itinéraires techniques pour produire au mieux sur des parcelles infestées

Choix des variétés :

Dans le cas des solanées (tomates, aubergines), utiliser obligatoirement des plants greffés **sur porte-greffe résistant** (type KNVF). Le surcoût dû au greffage est compensé par une densité de plantation plus faible.

Dans le cas des concombres, éviter le concombre lisse, beaucoup plus sensible que l'épineux. Mais en règle générale, il faut **éviter la culture de concombre (et de melon) sur une parcelle infestée.**

Le greffage du melon et du concombre ne permet pas de lutter contre les nématodes : il n'existe pas de porte greffe de cucurbitacée résistant. Le greffage ne fait qu'apporter un surcroît de vigueur qui permet au plant de mieux « encaisser » l'attaque des nématodes. Porte greffe : Courge japonaise (RS 841).

GRAB

(Groupe de recherche en agriculture biologique)
Site Agroparc - BP 1222 - 84911 AVIGNON Cedex 9
Tél. : 04 90 84 01 70 - Fax : 04 90 84 00 37
E-mail : grab@wanadoo.fr

ITAB

(Institut technique de l'Agriculture Biologique)
149 rue de Bercy - 75595 PARIS Cedex 12
Tél. : 01 40 04 50 64 - Fax : 01 40 04 50 11

Fiche réalisée en collaboration avec J F LIZOT et C. MAZOLLIER (GRAB).

Choix des dates de plantation :

Pour les cultures de printemps, plus la date de plantation sera précoce (jusqu'à février), plus le plant aura le temps de bien s'implanter avant le réveil des populations de nématodes. De même, pour les cultures d'automne, les cultures plantées tardivement (à partir d'octobre) seront moins attaquées que les cultures précoces (août - Sept).

Les rotations :

Essayer d'alterner cultures sensibles et cultures non hôtes : comme les plants greffés, haricot, chou, pomme de terre... Il vaut mieux éviter de répéter des cultures sensibles sur une zone déjà infestée.

Fertilisation :

Utiliser des tourteaux nématicides avant les cultures sensibles. Sur les parcelles très infestées, le Nématorg épandu et enfoui à 6t/ha peut donner de bons résultats. Pour les traitements d'entretien, un mélange de 2.5 t/ha tourteau de Ricin plus 2.5 t/ha de Nématorg reste vraisemblablement satisfaisant et couvre les besoins en azote. Compléter si besoin en phosphore et potasse éventuellement en azote pour le début de culture.

Coût : 18 000 F/ha pour le Neem seul et 12 000 F/ha pour le mélange. Mais ce coût englobe le coût de fertilisation (~ 10 000 F/ha). **Le coût du traitement nématicide lui-même revient donc à 8000 F/ha pour le Nématorg et 2000 F/ha pour le mélange.**

Engrais vert d'été :

Privilégier l'utilisation d'engrais verts nématicides ou, au moins, d'engrais verts non hôtes (Sorgho, Phacelie). Des travaux restent à faire pour définir précisément les meilleures plantes nématicides, mais on peut citer le *Tagete minuta*, les *Crotalaires*, ...

Rappel : Les moutardes permettent de lutter contre les nématodes du genre *Heterodera* et non contre les *Meloidogyne*. Certains radis fourragers (semences Carneau) auraient une action contre les *Meloidogyne*.

Prophylaxie :

Attention de ne pas contaminer des parcelles saines avec des outils ayant travaillé sur des parcelles contaminées. Eliminer les racines à l'arrachage.

Quelques adresses :

- **Sopropêche (Nématorg et Ricin) :**
ZI Trésorerie - BP 275 - 62204 BOULOGNE / MER
tel : 03.21.32.27.27 ou 04.90.32.37.87 (Montfavet, 84)
- **GSN (Tagetes)**
BP 1 - Rte de Nogaro - 32 460 LE HOUGA
tel : 05.62.08.89.10
- **Carneau (Radis) :**
26, rue Leon Ruden - BP 8 - 59 310 ORCHIES
tel : 03.20.71.83.05

Quelques sites web sur les nématodes :

<http://www.antibes.inra.fr/unites/nematolo.html>
<http://perso.wanadoo.fr/grab/grab>
<http://nematode.unl.edu/wormhome.htm>
<http://www.schwekendiek.com/axel/plantparasitnematodes.html>
<http://www.ipm.ucdavis.edu/PMG/r783200111.html>
<http://www.aces.edu/departement/ipm/anr856.htm>

Janvier 2001

Tous droits de traduction, d'adaptation, et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous les pays.

O GÊNERO MELOIDOGYNE



INTRODUÇÃO

Ampla distribuição geográfica
Ampla gama de hospedeiros
Importância econômica

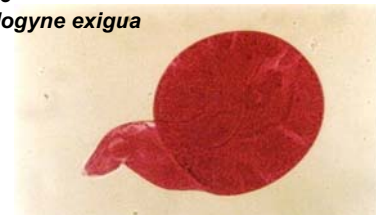


HISTÓRICO

1855 - Berkeley: primeiro relato de nematóide de galhas associado a raízes de pepino: "vibrios";
1887 - Goeldi: Usou o termo genérico *Meloidogyne* e descreveu *M. exigua* como espécie tipo;
1924 - Cobb: aponta diferenças entre nematóides de cistos e de galhas;
1932 - Goodey: denominou como *Heterodera marioni*;
1949 - Chitwood: reconsiderou o gênero *Meloidogyne* e descreveu cinco espécies de *Meloidogyne*;
1975 - Sasser: IMP (International *Meloidogyne* Project)

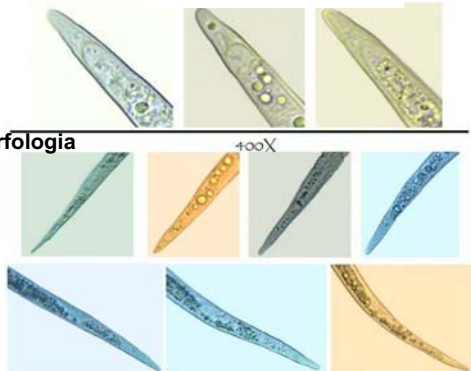
Posição taxonômica

Filo: Nemata
Classe: Secernentea
Ordem: Tylenchida
Família: Heteroderidae
Gênero: *Meloidogyne*
Espécie-tipo: *Meloidogyne exigua*

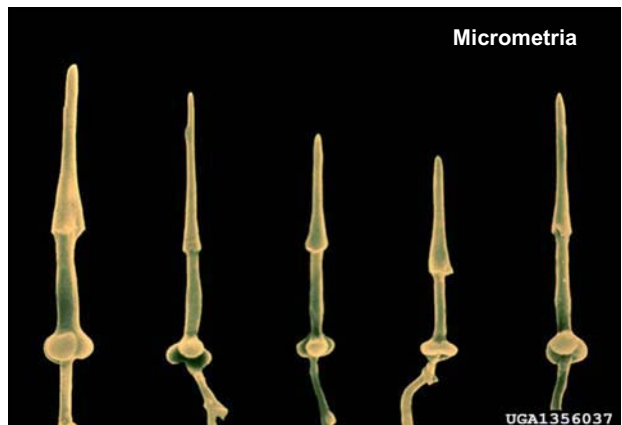


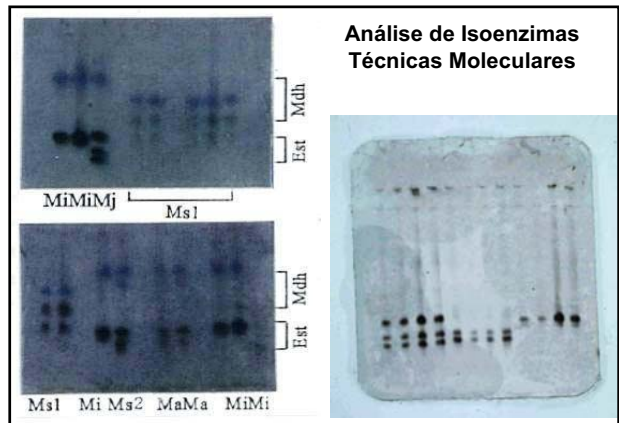
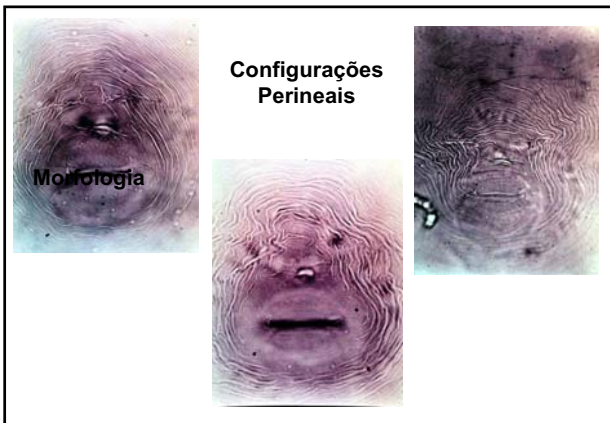
DIAGNOSE

Morfologia



Micrometria





HOSPEDEIROS DIFERENCIADORES

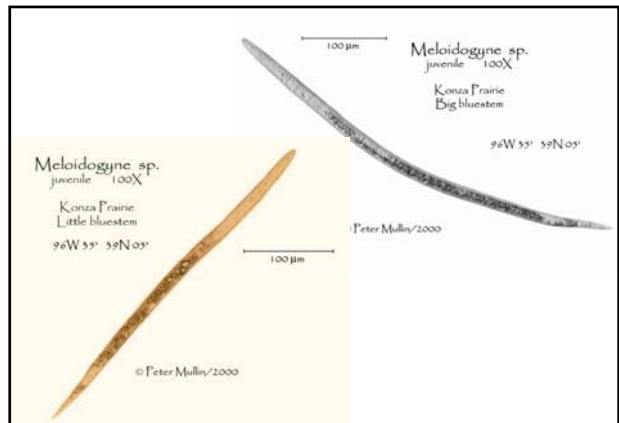
Nematóide/ Cultivares	Fumo NC-95	Algodão Deltapine 16	Pimenta California Wonder	Melância Charleston Gray	Amendoim Florunner	Tomate Rutgers
<i>Mi</i> raça 1	-	-	+	+	-	+
<i>Mi</i> raça 2	+	-	+	+	-	+
<i>Mi</i> raça 3	-	+	+	+	-	+
<i>Mi</i> raça 4	+	+	+	+	-	+
<i>Ma</i> raça 1	+	-	+	+	+	+
<i>Ma</i> raça 2	+	-	-	+	+	+
<i>Mj</i>	+	-	-	+	-	+
<i>Mh</i>	+	-	+	-	+	+

Principais gêneros no Brasil

- Meloidogyne incognita*
- M. javanica*
- M. exigua*
- M. paranaensis*
- M. coffeicola*
- M. arenaria*
- M. hapla*

CICLO DE VIDA

- Ovo**
 - Depositado pela fêmea no estado unicelular
 - Desenvolvimento embrionário = J1
- J1:** Sofre primeira ecdise no interior do ovo = J2
- J2:** Eclode livremente - forma infectante
 - Sofre mais duas ecdises = J3 e J4



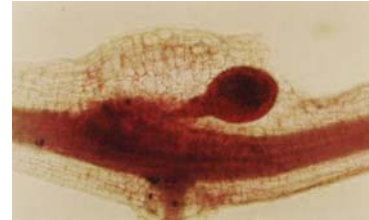
- **J3 e J4**

- Formato salsichóide
- Não se alimentam
- J4 - sofre a quarta ecdise = adulto

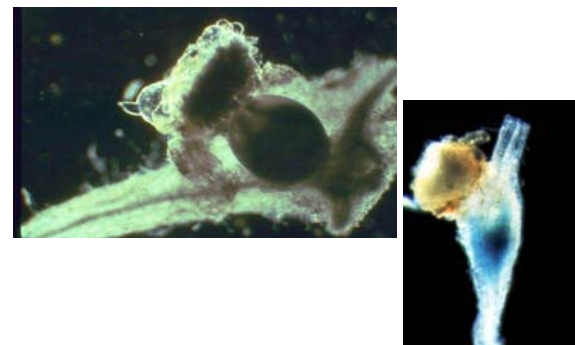
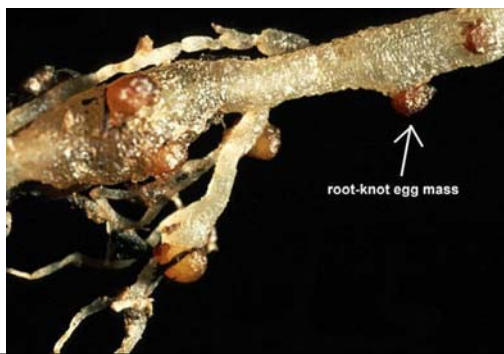


- **Fêmeas**

- Aumentam de tamanho
- Endoparasitos sedentárias
- Matriz gelatinosa de origem retal

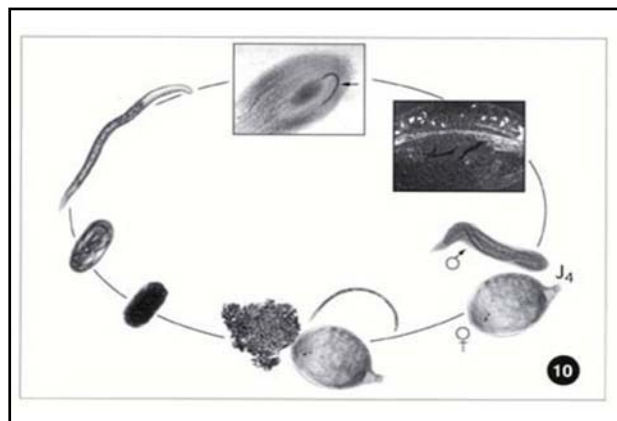


Alteração na coloração das massas de ovos
Aproximadamente 300 - 500 ovos



- **Machos**

- Geralmente ausentes
- Retornam a forma vermiforme e abandonam a raiz
- Não se alimentam: estilete presente, porém esôfago degenerado
- No caso de reprodução cruzada - fecundarão as fêmeas



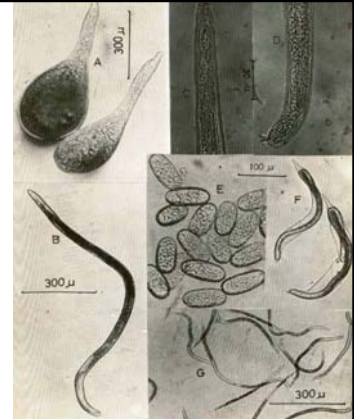
• Reprodução

- ANFIMIXIA
- Reprodução cruzada
- Ex: *M. caroliniensis*
- PARTENOGENÊSE MITÓTICA
- Ausência de machos
- Não há fecundação do óvulo
- Ex: *M. incognita*, *M. javanica*
- PARTENOGENÊSE MEIÓTICA FACULTATIVA
- Espécies geralmente anfimíticas
- Ocorre na ausência de machos
- Ex: *M. exigua*, *M. naasi*, *M. graminicola*



Duração do ciclo

- Aproximadamente quatro semanas
- Condições adversas: até 3 meses



Fatores que interferem no ciclo de vida

- Temperatura
- Ideal - aproximadamente 27 °C (25 - 35 °C)
- Umidade
- 40 - 60 % da capacidade de campo
- Textura do solo
- arenoso
- Outros fatores
- Adubação, pH, resíduos de agroquímicos, etc

RELAÇÃO NEMATÓIDE-HOSPEDEIRO

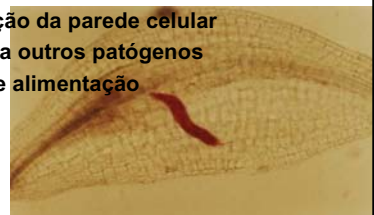
Eclosão do J2:

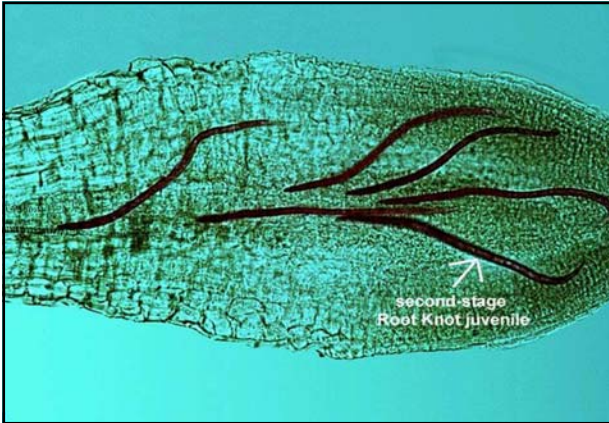
- Força física do estilete
- Atividade das glândulas esofagianas sub-ventrais
 - »Movimentação do J2 em direção ao hospedeiro
 - »Segue um gradiente de concentração



Penetração do J2

- Movimentação exploratória com a região cefálica
- Atividade das glândulas esofagianas subventrais
- Força mecânica do estilete
- Próximo à zona apical - região e alongação
- Movimentação do juvenis: Intercelular
- Secreções - dissolução da parede celular
- Porta de entrada para outros patógenos
- Formação do sítio de alimentação





Formação da célula gigante

Endoderme

Produtos da glândula esofágica dorsal

Células multinucleadas

Divisão nuclear, sem divisão celular

Citoplasma denso

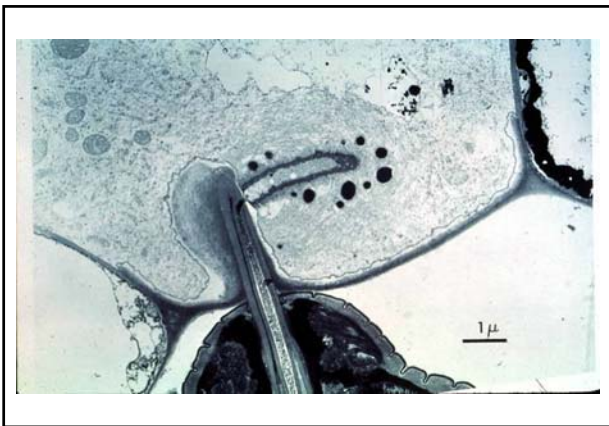
Vacúolos pequenos ou ausentes

Formação de galhas

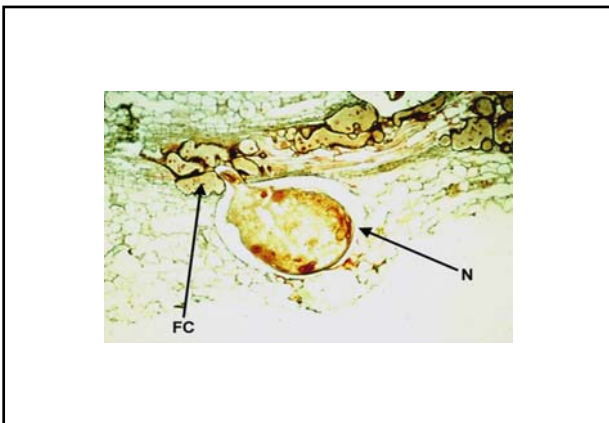
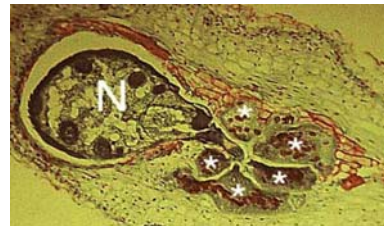
Hipertrofia celular - aumento do tamanho

Hiperplasia celular - maior divisão celular

tubo de alimentação



OBS: Galhas não são essenciais ao desenvolvimento dos nematóides; as células nutritoras são!



DISSEMINAÇÃO DO NEMATÓIDE

Ativa = ineficiente

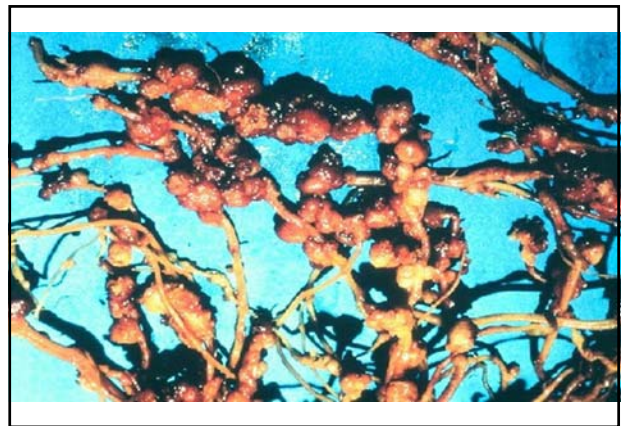
Passiva

- Homem
- material de plantio
- água
- maquinaria
- movimentação de solo, outros

SINTOMATOLOGIA

Sintomas diretos

Sistema radicular muito pobre e deficiente
Formação de galhas nas raízes ou tubérculos
("pipocas")
Necrose de órgãos subterrâneos
Raízes digitadas
Rachaduras e fendilhamentos



M. exigua



M. incognita



Sintomas reflexos

Tamanho desigual das plantas

Menor perfilhamento

Amarelecimento e queda prematura de frutos

Deficiência nutricional

Redução na produção



MÉTODOS DE CONTROLE

• EXCLUSÃO

Medidas quarentenárias

Leis governamentais

Medidas fitossanitárias

Cuidado com viveiros

Cuidado com movimentação de solo

Erradicações

Material de plantio sadio

Escolher viveiros fiscalizados

Aquisição de mudas com garantia

CONTROLE FÍSICO E CULTURAL

Remoção e destruição de restos culturais

Plantas - continuam vegetando após a colheita

Arrancar restos de raízes e queimá-las

Revolver o solo para exposição das raízes

Rotação de culturas

Limitação: gama de hospedeiros

Levantamento das espécies presentes na área

Algumas gramíneas forrageiras, como *Panicum maximum*, *Brachiaria brizantha*,

B. decumbens

Crotalaria spectabilis

Mucuna spp.

Tagetes erecta e *T. patula*



• Plantas antagônicas

Produzem substâncias ativas

Azadiractha indica - azadiractina

Mucuna spp. - L-dopa

Tagetes spp. - α -tertienil

Brássicas – glicosinolatos



• Plantas armadilha

Cultivo monitorado de uma espécie suscetível

Riscos

• Inundação

Fatores limitantes: água e topografia

Opção: cultivo de arroz

• Pousio ou alqueive

Controle de plantas daninhas

Necessita de um período prolongado

Não há retorno econômico

Erosão e degradação do solo



• Solarização

Cobertura do solo umedecido com filme de polietileno (4 a 8 semanas)

Eficiente no controle de diversos patógenos de solo

Limitações: Custo do plástico

Altas temperaturas

• Aplicação de matéria orgânica

Melhora nas características físicas, químicas e biológicas do solo

Fontes: esterco, resíduos industriais (álcool, açúcar, óleo, farinha de mandioca, pó de serra, palha de café, etc), resíduos do tratamento de esgoto, resíduos vegetais, resíduos de crustáceos (quitina)

Disponibilidade de material

Custo x benefício

• Tratamento do material de plantio

Ponto de inativação térmica

– Temperatura de 45 - 55 °C por 10 – 20 min.

– Eficiente no controle de

» batata semente

» estacas videira, cerejeira, pessegueiro

» rizoma de gengibre

» tubérculo de inhame

CONTROLE QUÍMICO - NEMATICIDAS

- **Fumigantes**
 - Gases ou líquidos (transformam em gases)
 - Ação biocida
 - Tratamento de solo para produção de mudas
 - Brometo de metila
 - Vapam, Basamid
- **Não fumigantes**
 - **Organofosforados:** Fenamifós (Nemacur), Terbufós (Counter)
 - **Carbamatos:** Aldicarb (Temik), Carbofuran (Furadan)
- **Limitações**
 - Custo elevado
 - Período residual

CONTROLE BIOLÓGICO

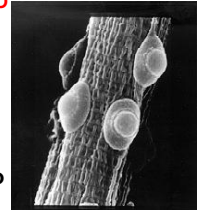
Bactérias

Pasteuria penetrans

- Alta eficiência
- Resultados promissores
- Maranhão: supressividade do solo

Rizobactérias

- Promovem o crescimento da planta
- Pode competir com o nematóide
- Produzir substâncias repelentes



Fungos

Arthrobotrys spp. (predador):
Nematus, Nemout

Paecilomyces lilacinus
oportunistista): Paecil, Bioact
Verticillium chlamydosporium
(oportunistista)

No Brasil:

Trabalhos desenvolvidos em laboratórios
Resultados inconsistentes no campo
Pesquisas: métodos de aplicação



USO DE VARIEDADES RESISTENTES

- Baixo custo
 - Ambientalmente seguro
 - Não requer, por parte do produtor, tecnologia, pessoal treinado, etc
 - Reduz o tempo de rotação
- #### LIMITAÇÕES
- Fontes de resistência
 - Resistência poliespecífica
 - Variabilidade genética do nematóide

Alguns Genes

- Gene *Mi* - *Lycopersicon peruvianum*
- *Meloidogyne incognita* e *M. javanica*
 - Limitação
- Gene *Me* - Pimentão "Yolo Wonder"
- *M. javanica*



EXEMPLOS

- **Soja:**
 - BRS-Raimunda *Mi* e *Mj*
 - RBS-Paraíso *Mi* e *Mj*
 - BRS 256 RR *Mi* e *Mj*
 - MG/BR-46 Conquista tolerante a *Mi* e *Mj*
 - M-SOY 7894 *Mj*
 - CD-216 *Mi*
- **Café**
 - Café Apoatã (*Coffea canephora*): *Mi*, *Mp*, *Me*
 - Café IAPAR 59 -*Me*

ANNEXES II.3

- **Sols suppressifs, composts, activité et outils biologiques**

Les engrais organiques – une vue générale



Engrais d'origine animale



Compost



Ordures ménagères organiques



Résidus agro-industriels



Humus des vers de terre



Résidus de bois

Algues et autres matières végétales aquatiques

La valeur des engrais organiques

Les engrais chimiques



- Contiennent des nutriments spécifiques et peuvent entraîner des déficiences
- Réduisent la composition de la matière organique du sol
- Gênent les organismes du sol
- Sont facilement lessivés
- Sont chers
- Exigent beaucoup d'énergie pour être produits
- Ne donnent pas souvent le succès escompté



Les engrais organiques

- Donnent tous les nutriments dont la plante a besoin
- Augmente la composition de la matière organique du sol
- Alimentent les organismes du sol
- Connaissent peu de risque de lessivage des nutriments
- Sont moins chers ou gratuits
- Sont dans la plupart des cas des ordures.
- Libèrent continuellement les nutriments sur une longue période



Traitement Approprié du Fumier de Ferme

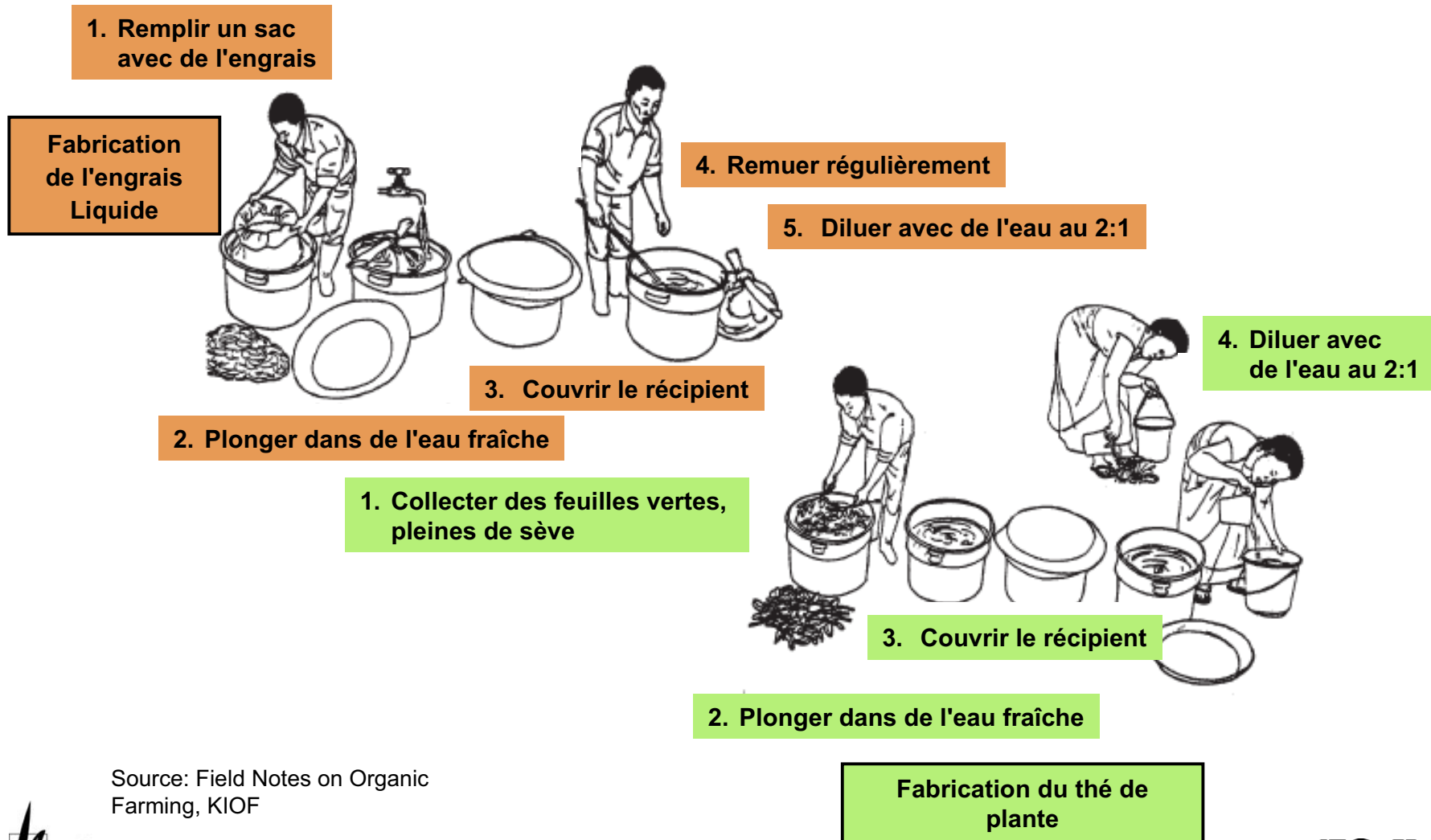
- Protéger-le du soleil et de la pluie
- Protéger-le du vent
- Mélanger-le avec de la paille
- Eviter l'accumulation d'eau
- Construire un barrage afin d'éviter les entrées et les sorties
- Compresser si c'est sec
- S'assurer que le sous-sol est solide
- Ajouter de l'eau si c'est nécessaire



Les engrais organiques commerciaux

Engrais	Éléments fertilisants	Disponibilité de l'azote	Source	Commentaires
Guano	N, P	●●●	Fientes sèches d'oiseaux marins	Teneur en P plus élevée que la demande
Farine de cornes et de sabots	N, P	●●●	Déchets d'abattoir	L'azote est plus rapidement disponible lorsque la mouture est fine
Algues	Minéraux			Suivant leur origine, elles peuvent contenir des métaux lourds
Tourteaux d'huile	N, P	●(●)	Sous-produits de préparation d'huile	Exemples: tourteau de ricin, de neem, de pois, de colza
Poils, laine, plume	N	●●(●)		
Matières premières agro-industrielles	N, P, K	●●		Sous produits provenant de brasserie, de distillerie, des industries textiles, des peaux et cosses, des transformations agro-alimentaires. La teneur en nutriments dépend du produit.

Comment réaliser votre propre engrais liquide



Source: Field Notes on Organic Farming, KIOF



Les engrais minéraux autorisés en agriculture biologique – une vue générale

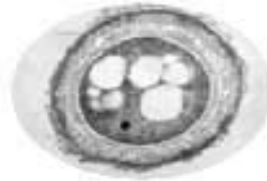
Circuits	Source	Caractéristiques	Application
Cendres de plantes	<ul style="list-style-type: none"> • Matière organique brûlée 	<ul style="list-style-type: none"> • Composition minérale similaire à celle des plantes • Absorption facile des minéraux • Cendres de bois riches en K et en Ca 	<ul style="list-style-type: none"> • Au compost (meilleure) • Autour de la base des plantes
Chaux	<ul style="list-style-type: none"> • Pierre à chaux, algue 	<ul style="list-style-type: none"> • pH tampon bas (la composition en Ca et Mg est secondaire) • Algue: riche en éléments à l'état de trace 	<ul style="list-style-type: none"> • Tous les deux ou trois ans quand le pH du sol est bas (éviter l'utilisation excessive: réduction de la disponibilité de P, davantage de déficiences de micro-nutriments)
Poudre de pierres	<ul style="list-style-type: none"> • Roche pulvérisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Eléments à l'état de trace (suivant la composition de la source) • Plus fine est la mouture, meilleure est l'absorption 	<ul style="list-style-type: none"> • Au fumier de ferme (réduit la volatilisation de N et facilite le processus d'enracinement)
Roche phosphatée	<ul style="list-style-type: none"> • Roche pulvérisée contenant le P 	<ul style="list-style-type: none"> • Facilement adsorbée en minéraux du sol • Faiblement adsorbée en matière organique • Réaction lente 	<ul style="list-style-type: none"> • Au compost • Pas sur les terres de barre (adsorption irréversible)

Quelques ingrédients actifs contenus dans les engrais microbiens



Rhizobium

- Une bactérie
- Vie dans le sol, autour et à l'intérieur des racines des légumineuses
- Forme une symbiose avec les plantes légumineuses
- Fixe l'azote atmosphérique



Azotobacter

- Une bactérie
- Vie dans le sol
- Peut fixer l'azote



Azospirillum

- Une bactérie
- Vie dans le sol
- Est capable de vivre seul dans le sol ou en association avec les racines des plantes
- A. Brasilense est capable de fixer l'azote



Pseudomonas

- Groupe diversifié de bactéries
- Peut occuper les grandes espaces de terres que dégagent les plantes lorsque leurs racines meurent ou disparaissent.
- Diverses fonctions (ex. la solubilisation du phosphore, rendre le phosphore disponible)



Mycorhize

- Une symbiose de type champignon-racine
- Vie avec les racines de presque toutes les plantes
- Vie dans les racines et s'étend dans le sol
- Aide les plantes en accumulant l'eau et les nutriments
- Améliore la structure du sol

Comment préparer votre propre bio-fertilisant

Une recette
bolivienne pour
préparer 1500
Kg de Bocashi

*(a adapter aux
conditions
locales)*



- 400 Kg de déjection d'animaux (bovin, volaille, lapin, caprin, ovin)
- 400 kg de paille de blé, de riz, d'avoine ou de seigle
- 400 Kg de sol provenant du champ, sans pierres ni touffes d'herbes
- 120 Kg de petits morceaux de charbon
- 20 Kg de son, concentré pour bovin ou farine
- 1 kg de chaux (dans les zones à sol acide)
- Quelques Kg de levure, de maïs fermenté ou de Bocashi déjà préparé
- 1 litre de mélasse de canne à sucre
- 225 litres d'eau

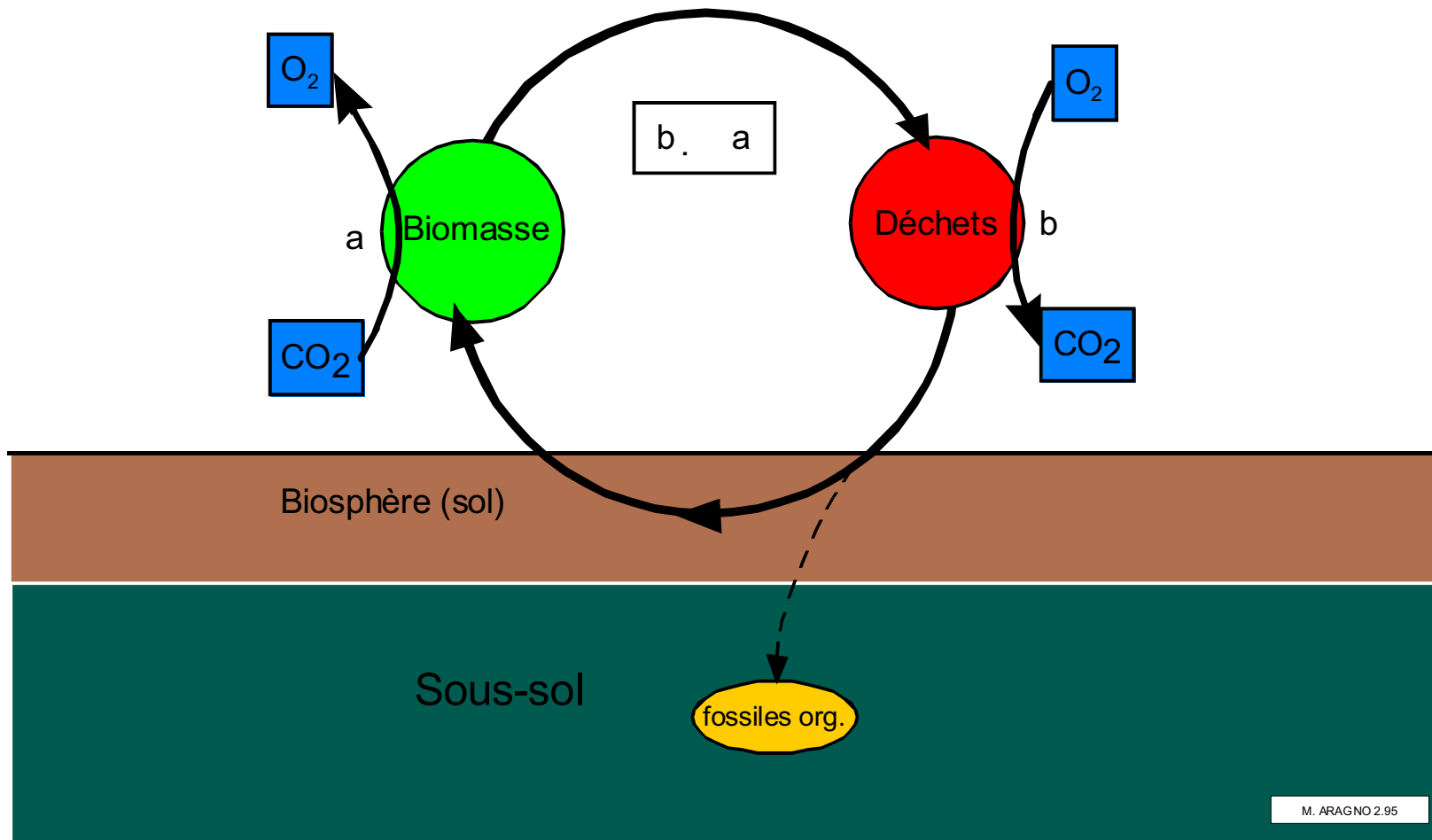
Université de Neuchâtel
Master de Biogéosciences

La bioremédiation des sols contaminés

Prof. Michel Aragno
Laboratoire de Microbiologie



Gestion « spontanée » cyclique des déchets de la biosphère (ex: sol de forêt)



Gestion, par l'homme, de ses déchets

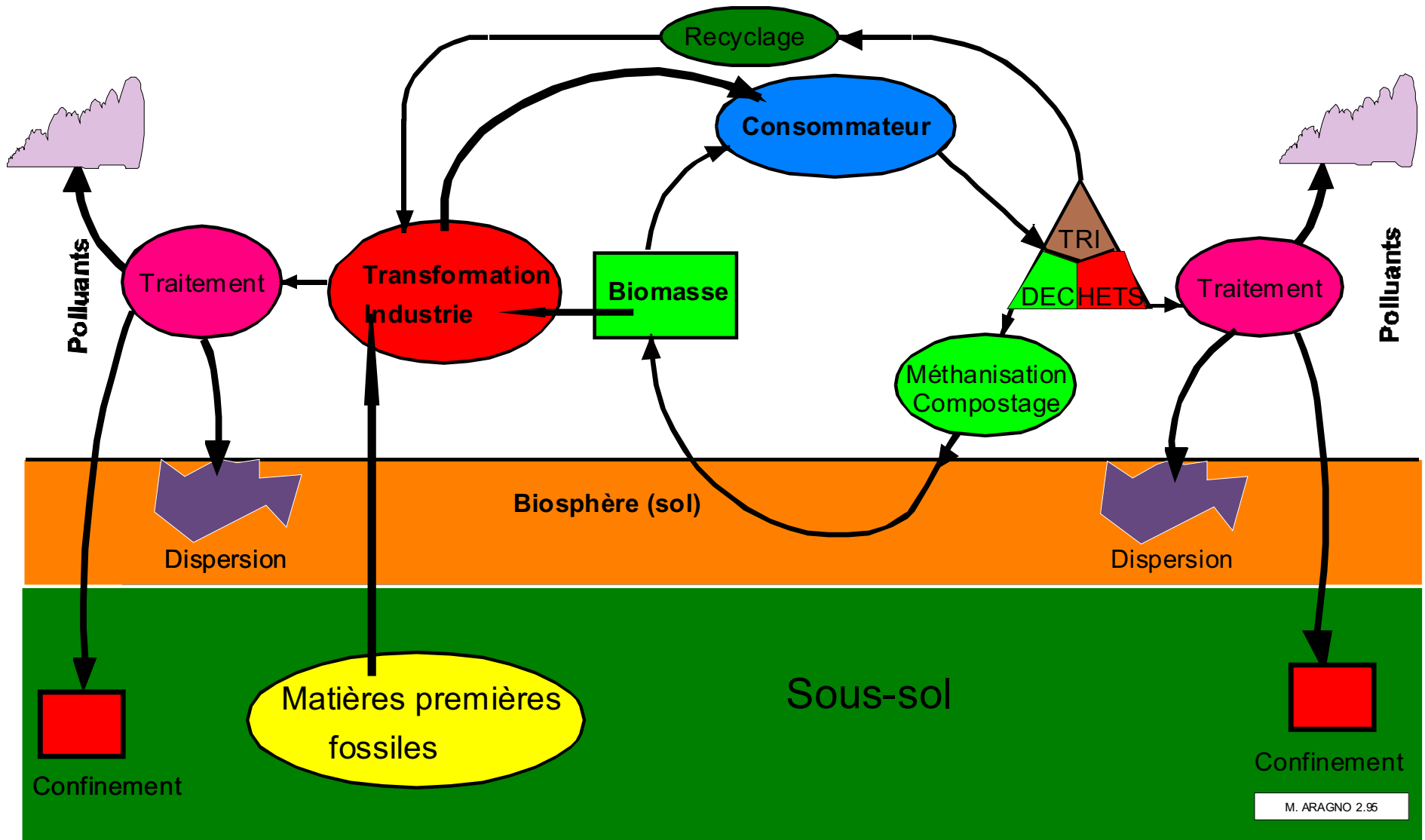


Tableau 11.1 Les principaux métaux lourds contaminants des sols et leurs concentrations limites indicatives, selon la législation suisse.

Métal lourd	Teneur (mg/kg de matière sèche)	
	Teneur totale	Teneur soluble
Chrome (Cr)	50	–
Nickel (Ni)	50	0.2
Cuivre (Cu)	40	0.7
Zinc (Zn)	150	0.5
Molybdène (Mo)	5	–
Cadmium (Cd)	0.8	0.02
Mercure (Hg)	0.5	–
Plomb (Pb)	50	–

Deux plantes hyperaccumulatrices



Alyssum saxatile:

Ni



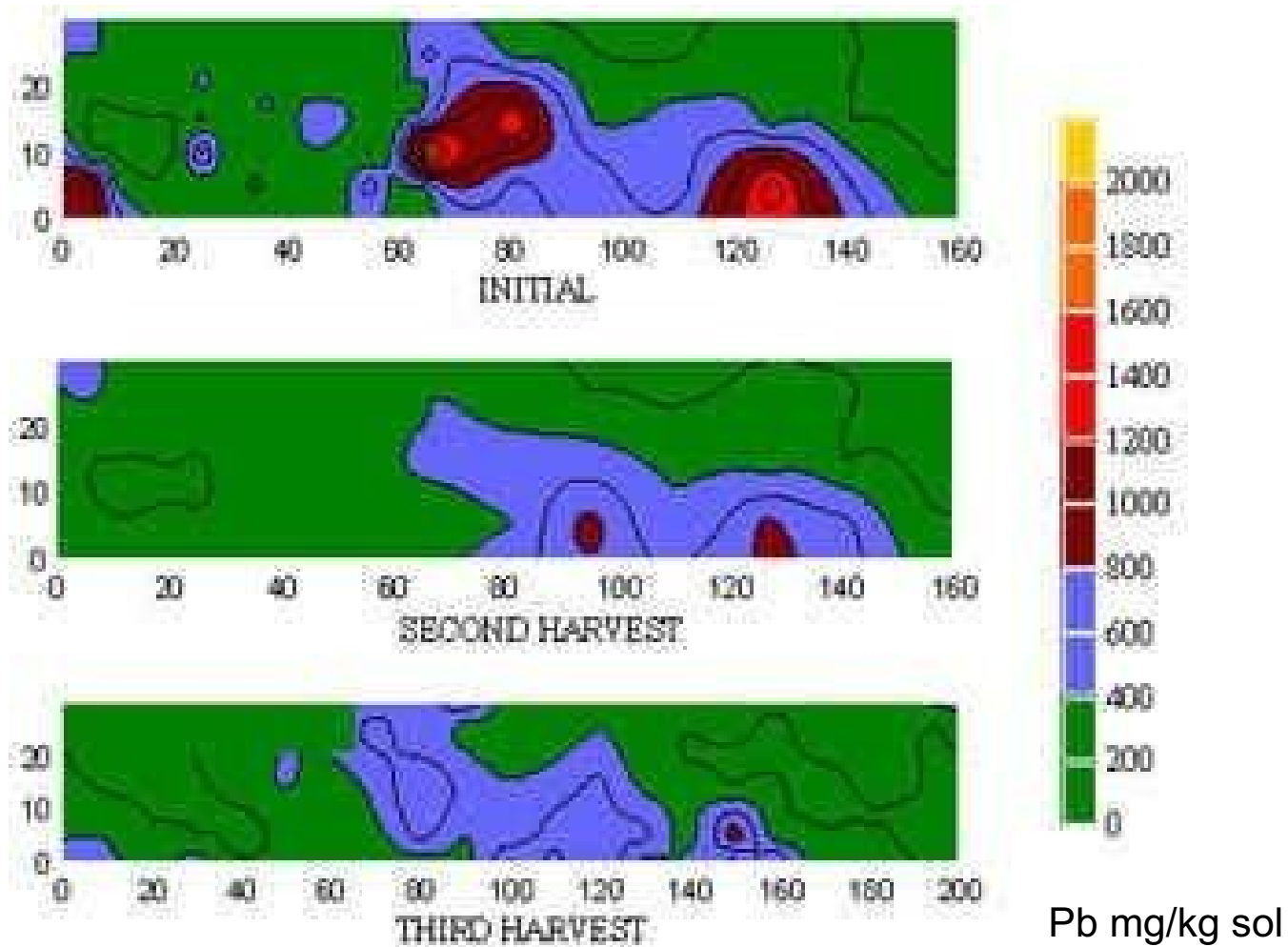
Thlaspi caerulascens:

Cd, Zn

Marais artificiels pour la rhizofiltration.
Umweltschutz Nord, Bremen



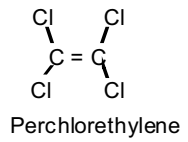
« Case study » de phytoremédiation du plomb



Classes de composants organiques susceptibles d'être éliminés par bioremédiation

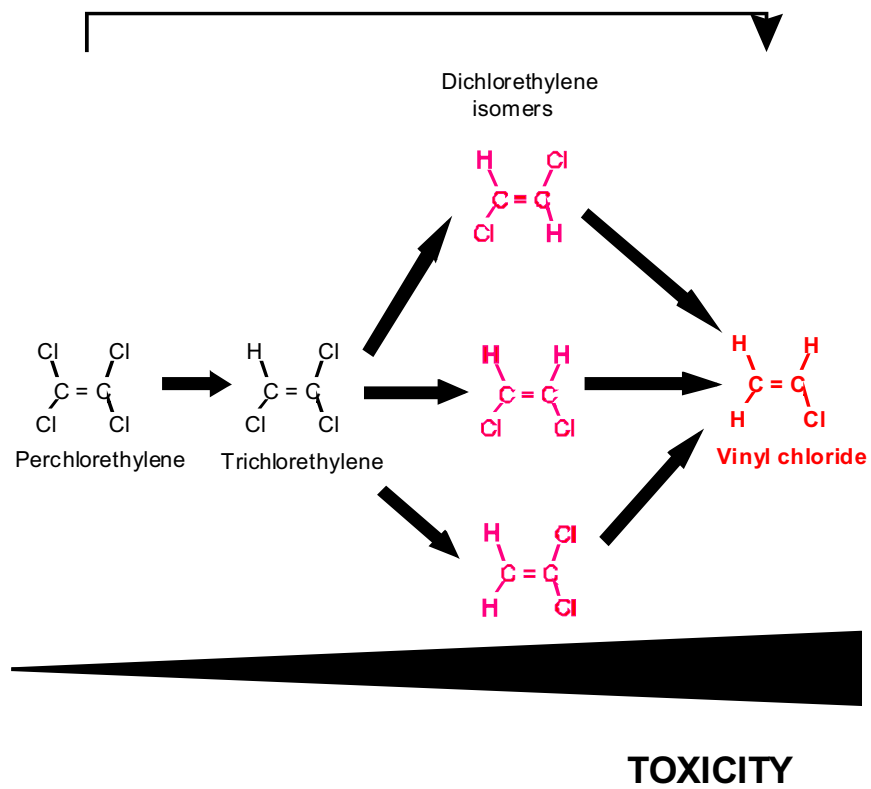
Classe	Exemple	Aérobie	Anaérobie
Composés aromatiques monochlorés	Chlorobenzène	+	-
Composés aromatiques	Benzène, toluène, xylène	+	+
Phénols non halogénés	2-méthyl-phénol	+	+
Hydrocarbures aromatiques polynucléaires	Créosote	+	-
Alkanes et alkènes	Pétrole	+	-
Biphényles polychlorés (PCB)	Trichlorobiphényle	+	+
Chlorophénols	Pentachlorophénol	+	+
Hétérocycles yzotés	Pyridine	+	+
Alkanes chlorés	Chloroforme	+	+
Alkènes chlorés	Perchloréthylène	-	+

Biodégradation du perchloréthylène (tétrachloréthène)

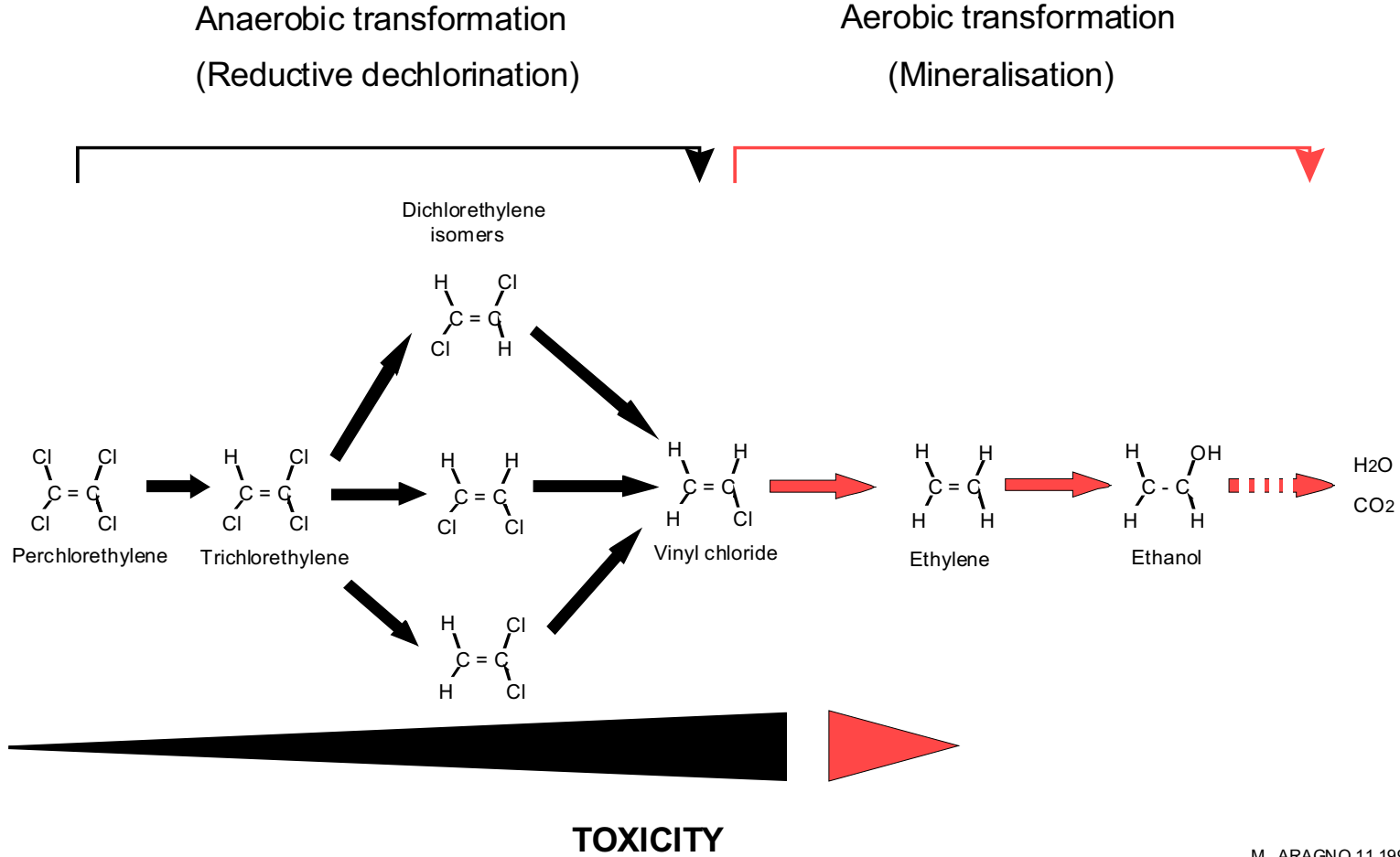


Biodégradation du perchloréthylène (tétrachloréthène)

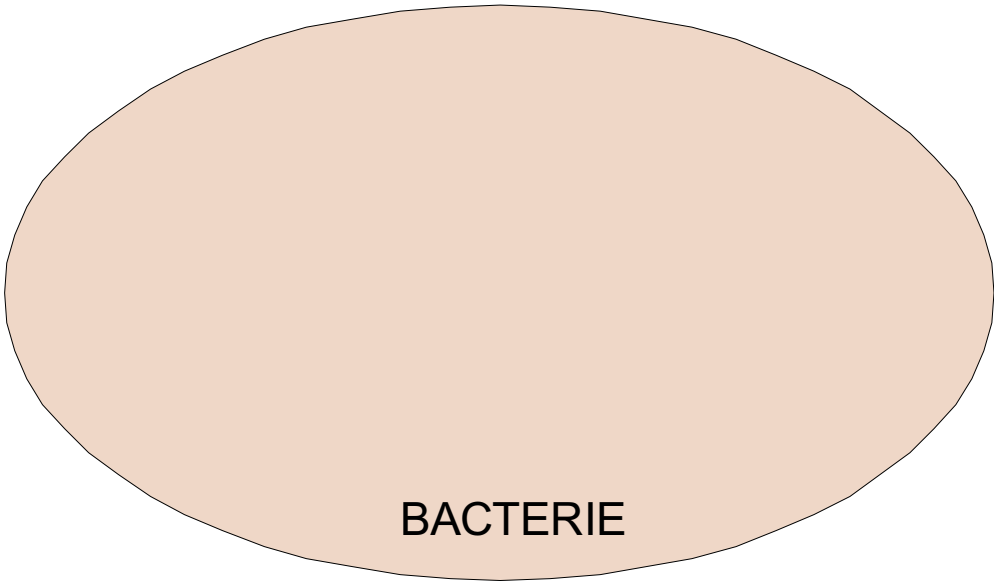
Anaerobic transformation
(Reductive dechlorination)



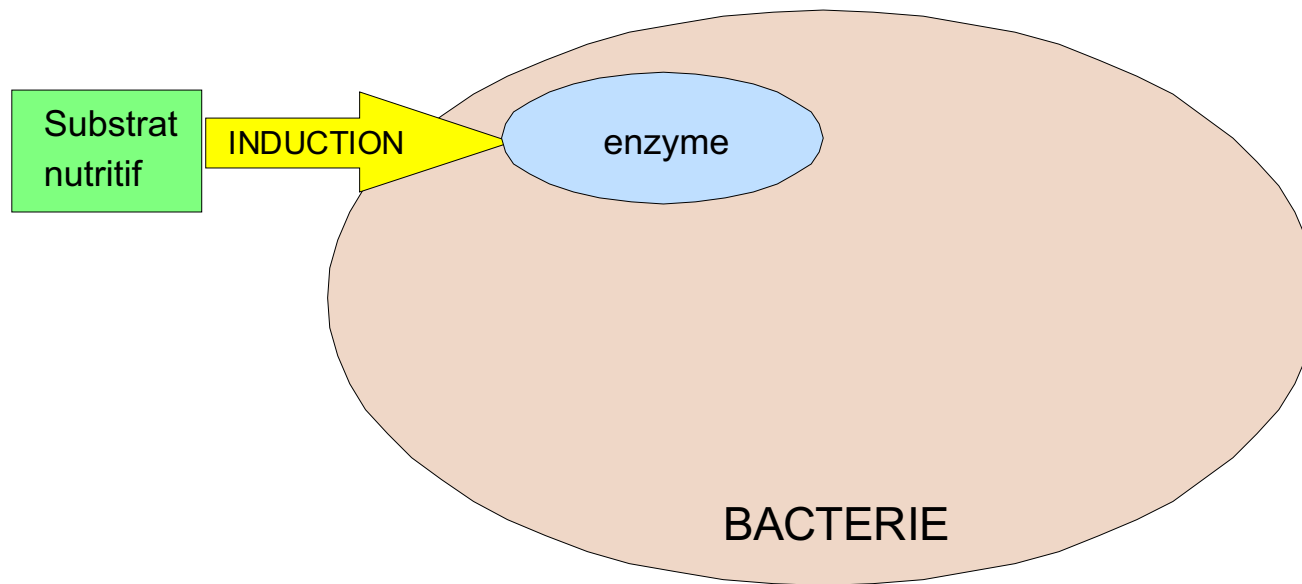
Biodégradation du perchloréthylène (tétrachloréthène)



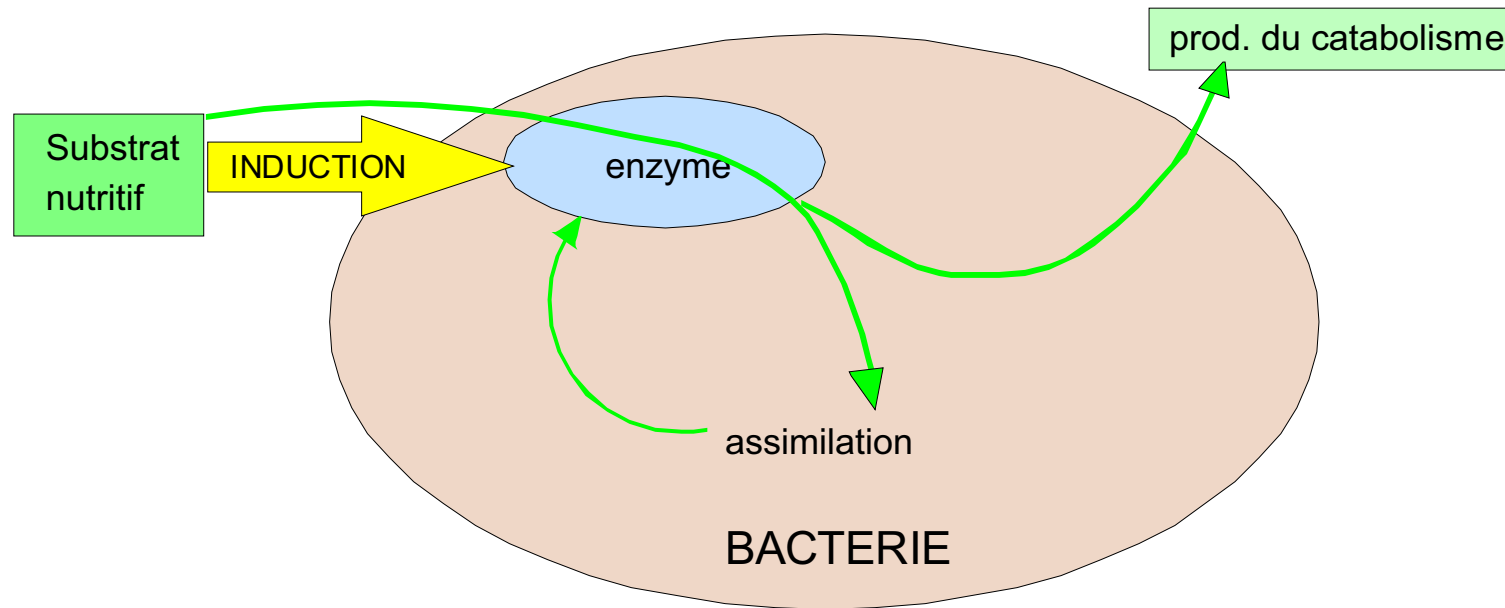
Substrat
nutritif



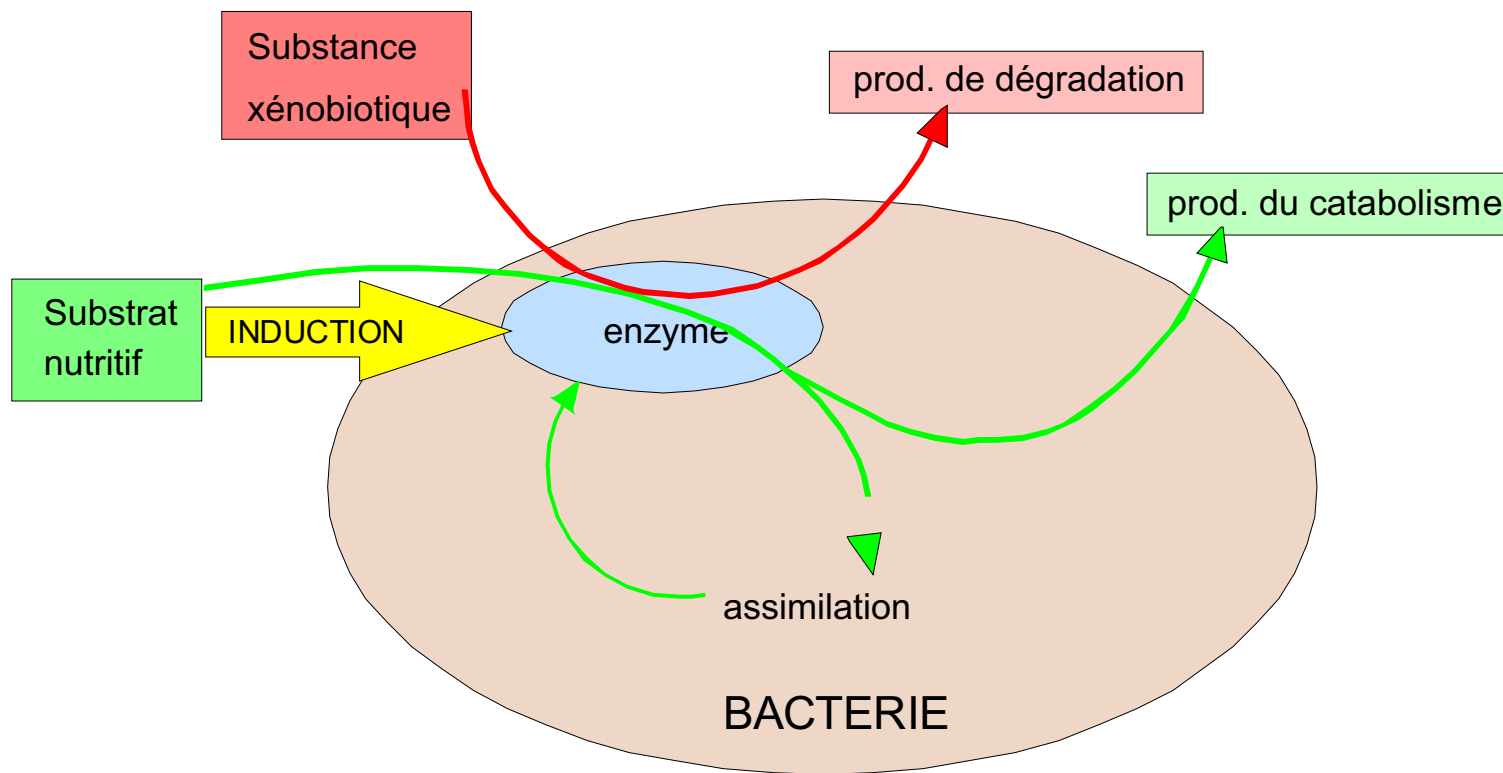
Principe du co-métabolisme



Principe du co-métabolisme



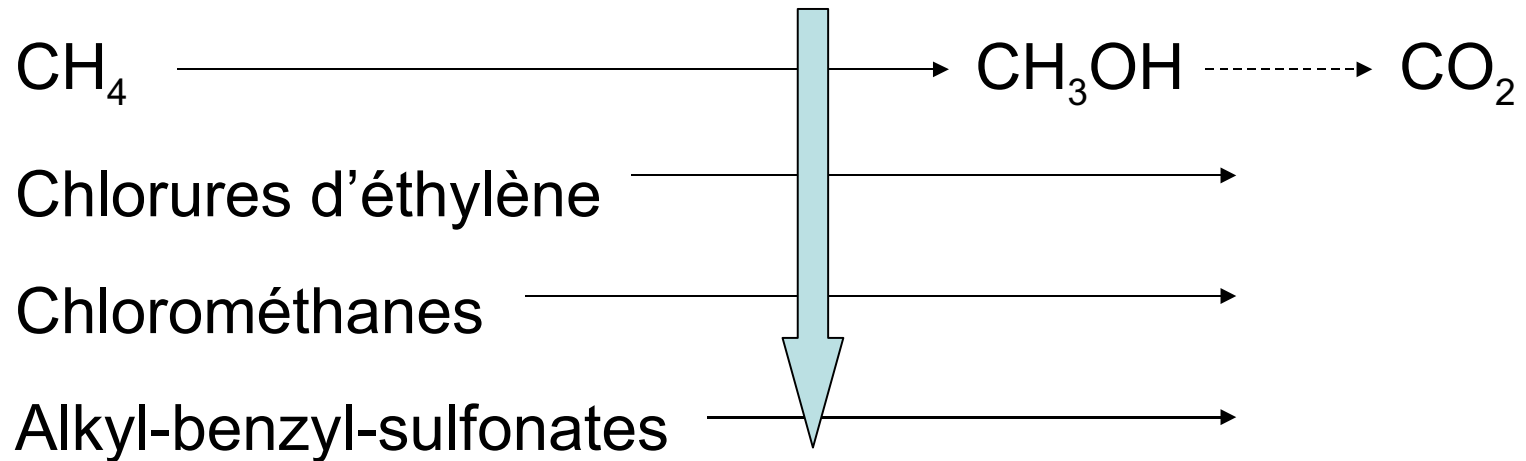
Principe du co-métabolisme



Principe du co-métabolisme

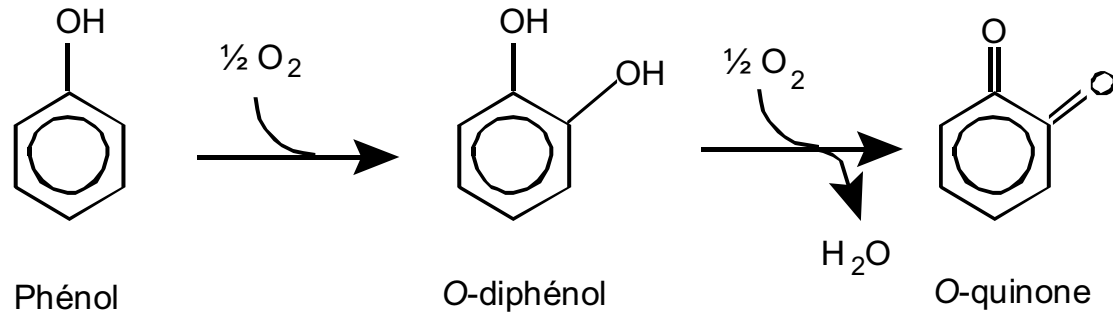
Bactéries méthanotrophes et co-métabolisme

Méthane-monooxygénase

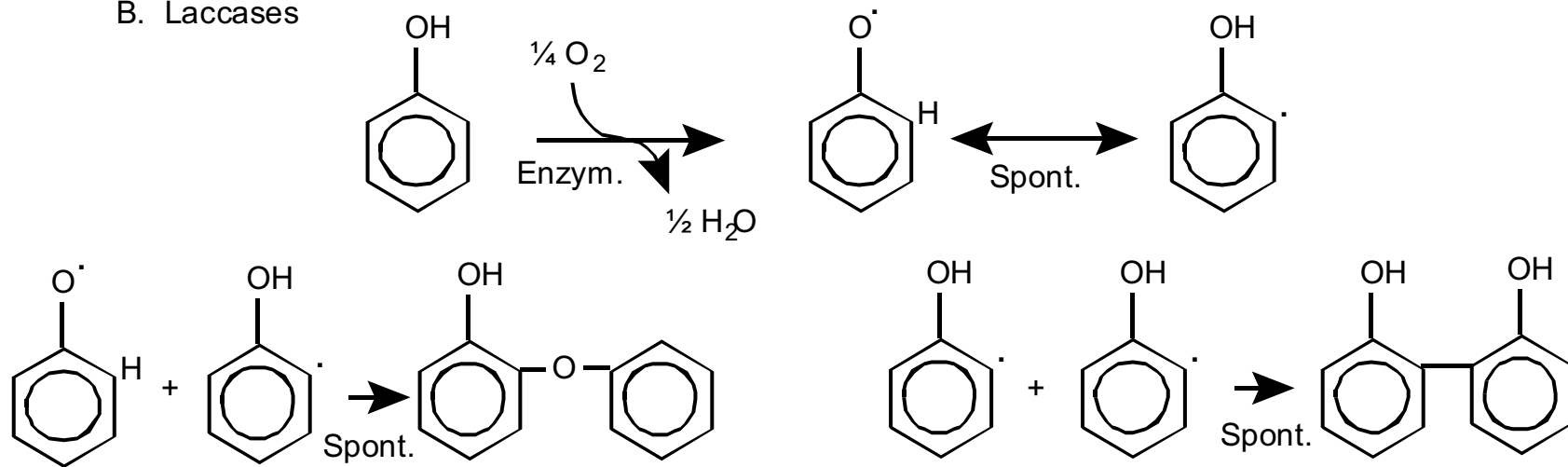


Exemples de réactions des polyphénol-oxydases

A. Tyrosinases

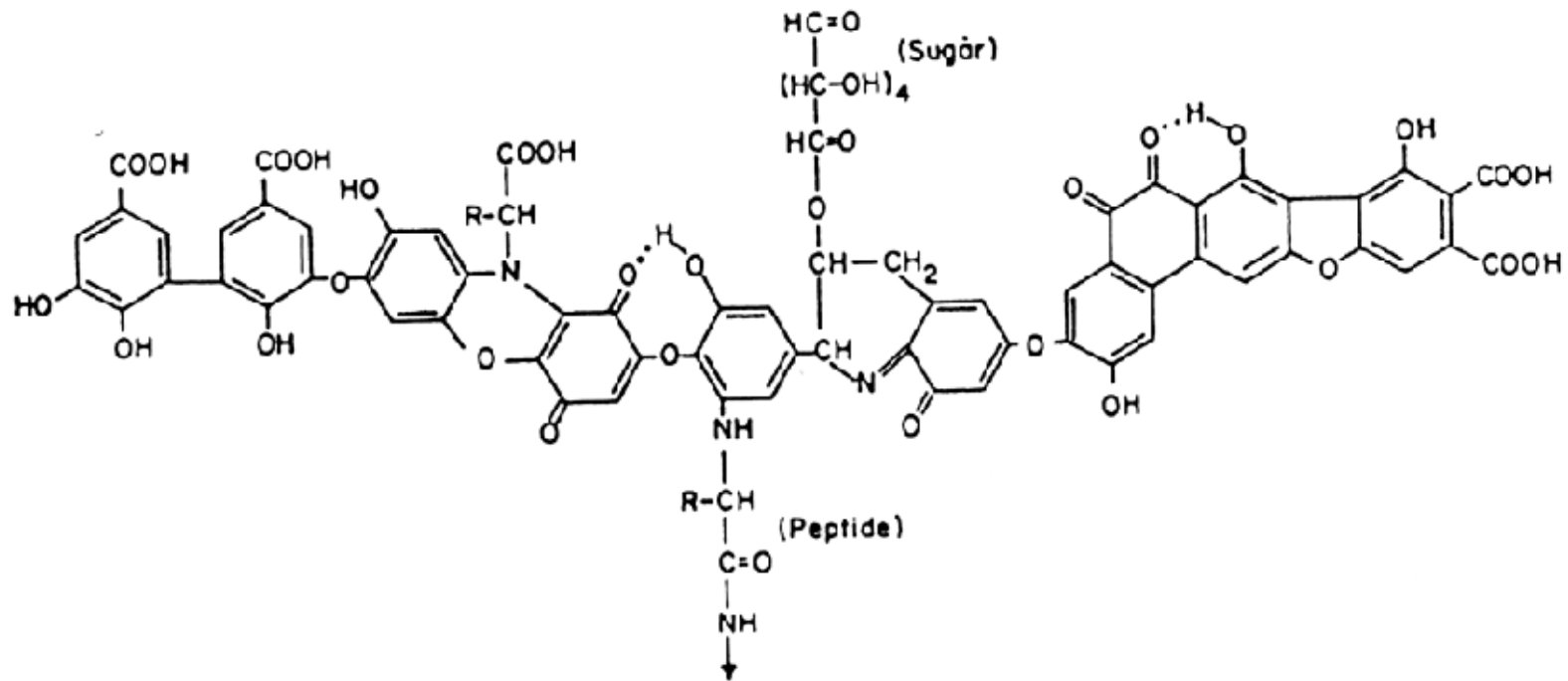


B. Laccases



Structure hypothétique d'un acide humique (minuscule)

d'après Stevenson (1976)



Amendments to create anaerobic conditions

Carbon sources:

Acetate

Propionate

Ethanol

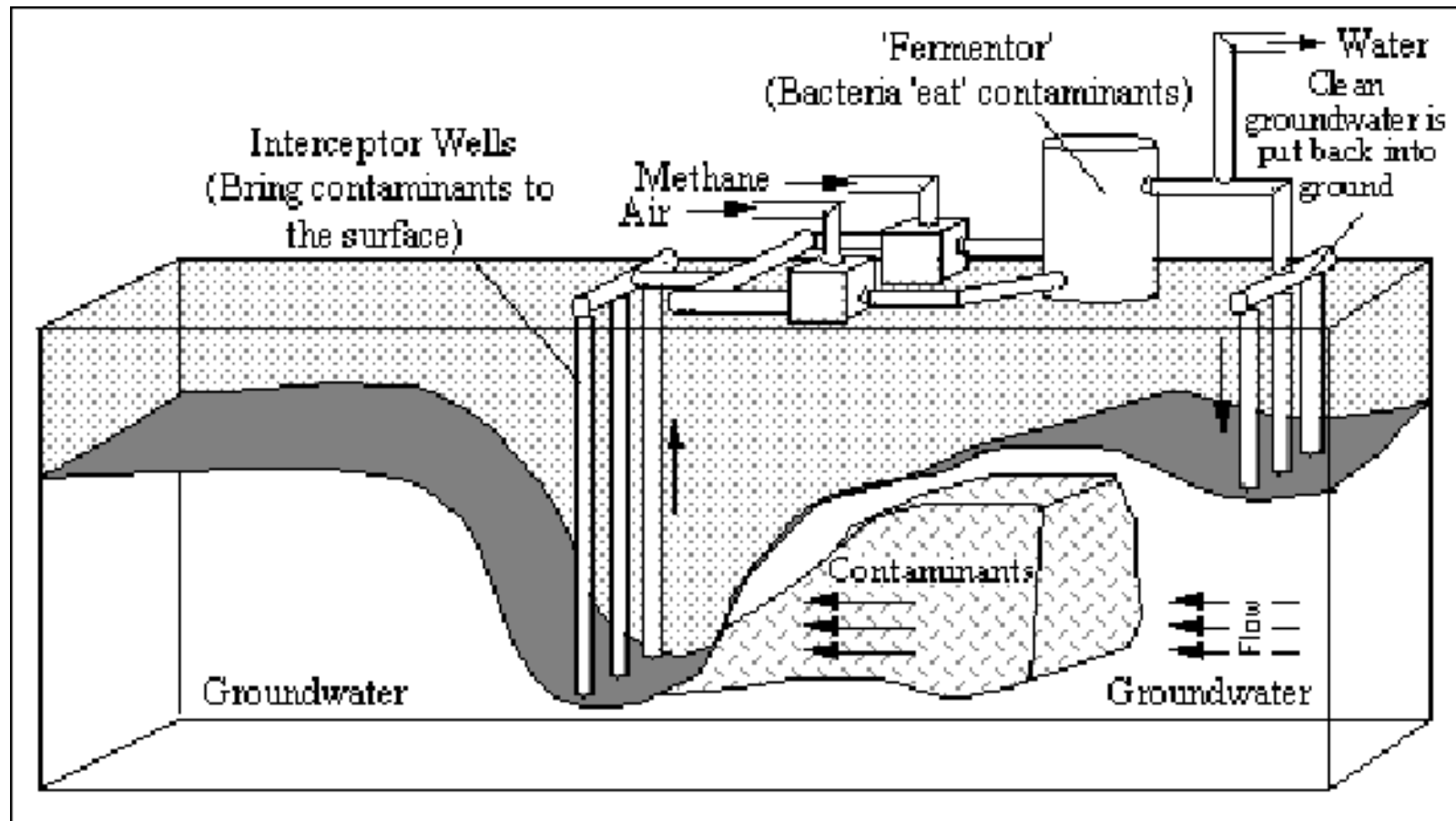
Lactate

Molasses

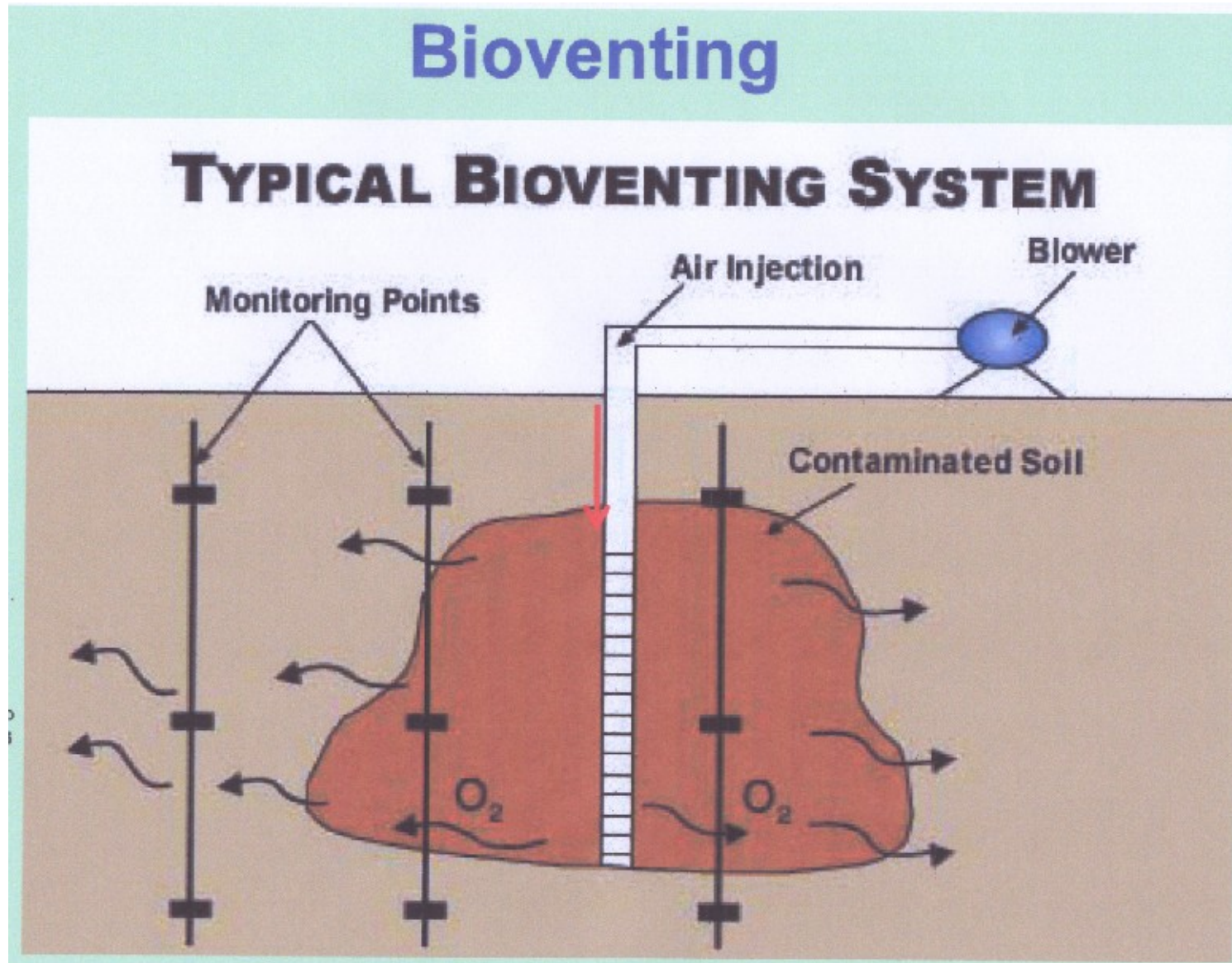
Vegetable oil

HRC (Lactic acid)

Principe d'un système de bioremédiation *in situ* d'un sous-sol, au moyen d'une percolation en continu et d'un bioréacteur externe



Injection d'air dans le sol pour favoriser l'aérobiose

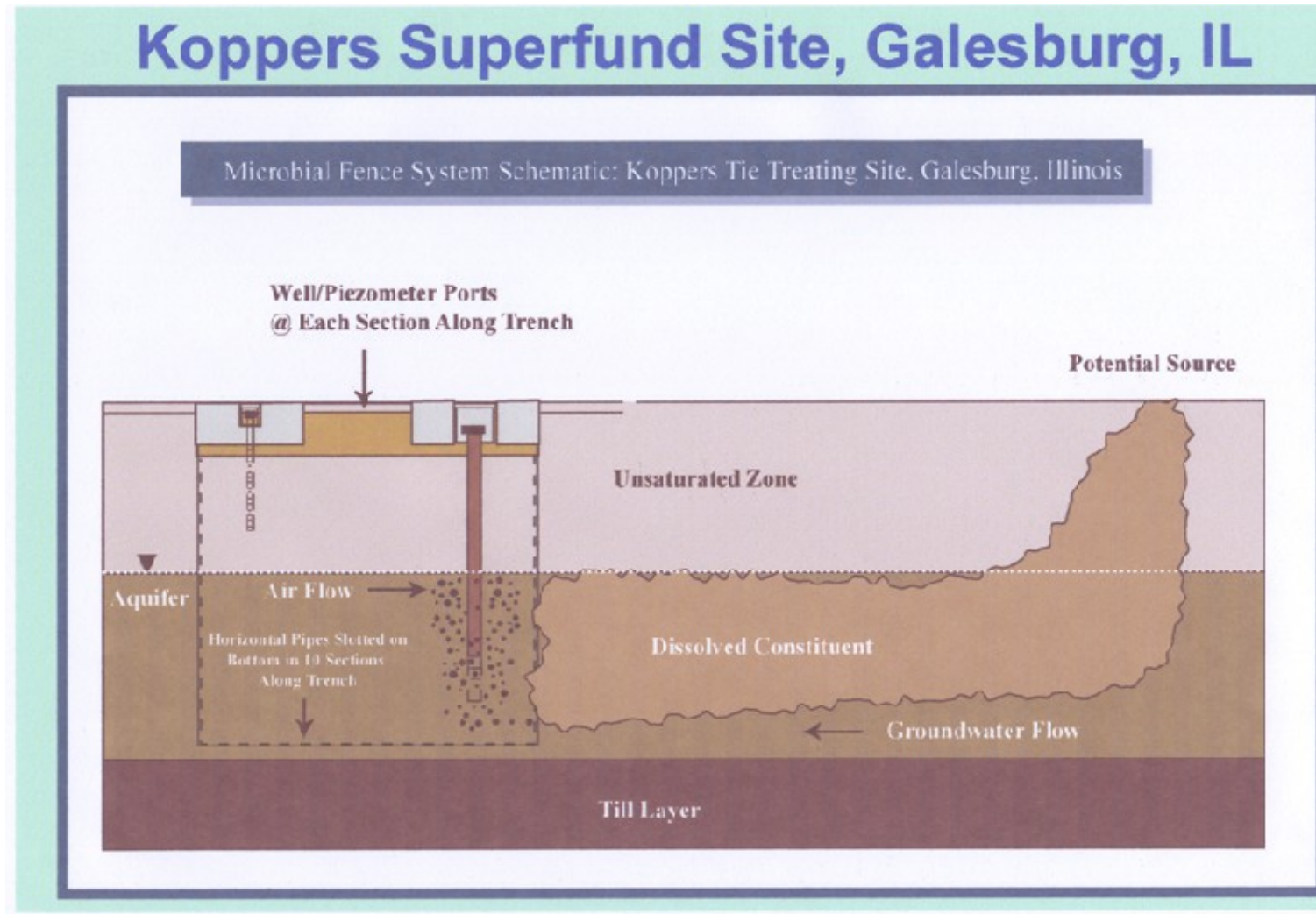


Injectons d'air dans le sol: quelques résultats

Bioventing

Site Name	Summary	Beginning Levels	1 Year Results	Costs
Fort Rucker SWMU 14	JP-4 fuel, motor oil, tanker truck washout fluids from a waste disposal pit.	TPH=25,000 mg/kg BTEX=10 mg/kg	Average TPH=16.9 mg/kg BTEX not detected	\$60K for 20,000 cubic yards of oxygenated soil (\$3/cubic yard)
Fort Carson Bldg. 8200	Petroleum contaminated soils from USTs at a former fueling system. Increased cost due to 12-inch concrete pad over the site.	BTEX=17 mg/kg TPH=1,350 mg/kg	TPH reduction rate of 170 mg/kg/yr.	\$119K for 6,500 cubic yards of oxygenated soil (\$18.31/cubic yard)
Fort Bliss Bldg. 675	Petroleum contaminated soils at 18 to 55 feet below ground from leaking UST.	Average BTEX=1,350 mg/kg	BTEX=690 mg/kg	\$73K for 12,700 cubic yards of oxygenated soil
Fort Drum Bulk Fuel Storage Area 1595	Pilot scale field test. Petroleum contaminated soil.	Average TPH=15,00 mg/kg BTEX=8.6 mg/kg	TPH=600 mg/kg BTEX=0.25 mg/kg	Not available

Etablissement d'une « barrière microbienne »



ORC: Oxygen Release Compound

Product

ORC is a proprietary formulation of phosphate-intercalated magnesium peroxide that time releases oxygen when hydrated.

Purpose

To supply oxygen to accelerate the rate of naturally occurring aerobic contaminant biodegradation in groundwater and saturated soils.

Functionality

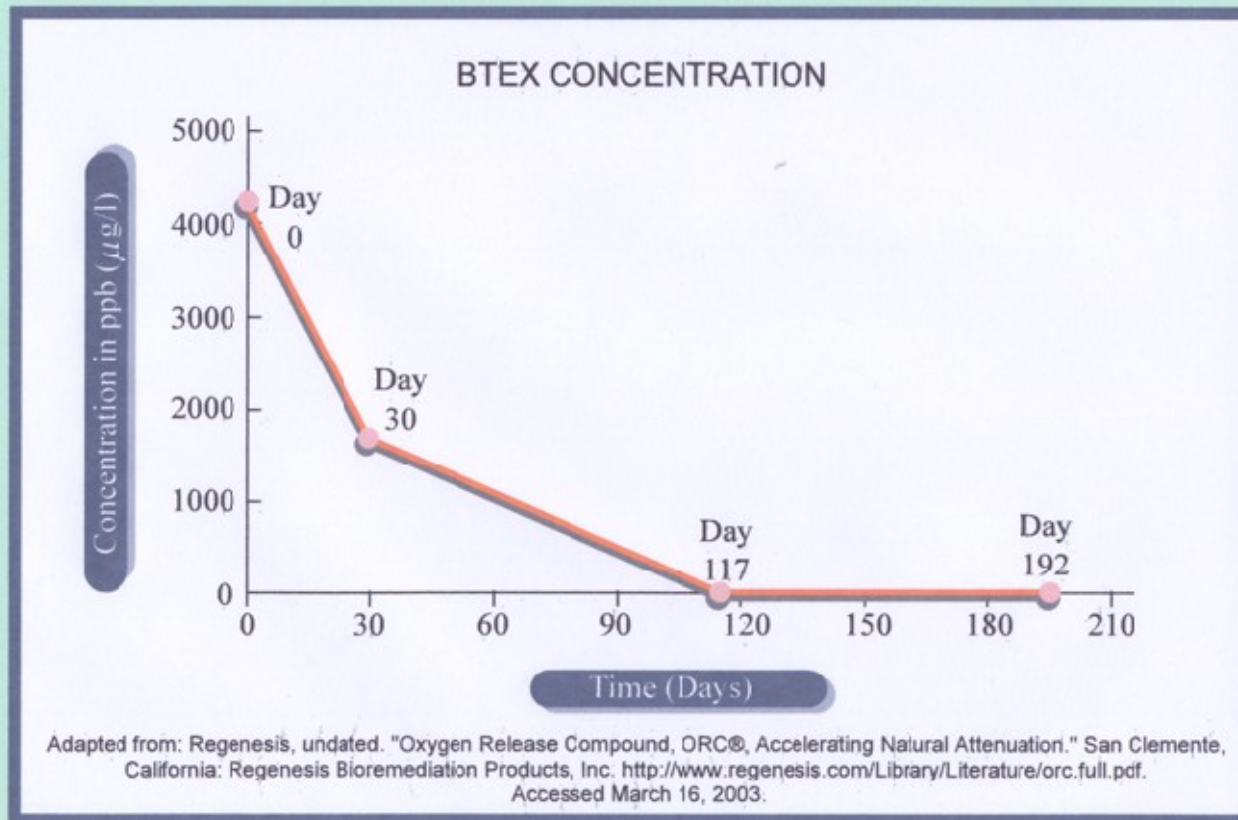
ORC is typically applied using direct-injection techniques. This process requires ORC to be mixed with water to form an injectable slurry which is then pressure injected (using a pump), into the zone of contamination. Once in the aquifer, ORC particles will sorb to or reside in the soil matrix and slowly release oxygen for periods of up to 1 year. ORC is also available in 2", 4" and 6" filter socks that can be emplaced in wells and removed when exhausted. Upon removal the old socks can be replaced with new ones to rejuvenate the oxygen supply and maintain aerobic biodegradation as needed.

Injection d'un oxydant

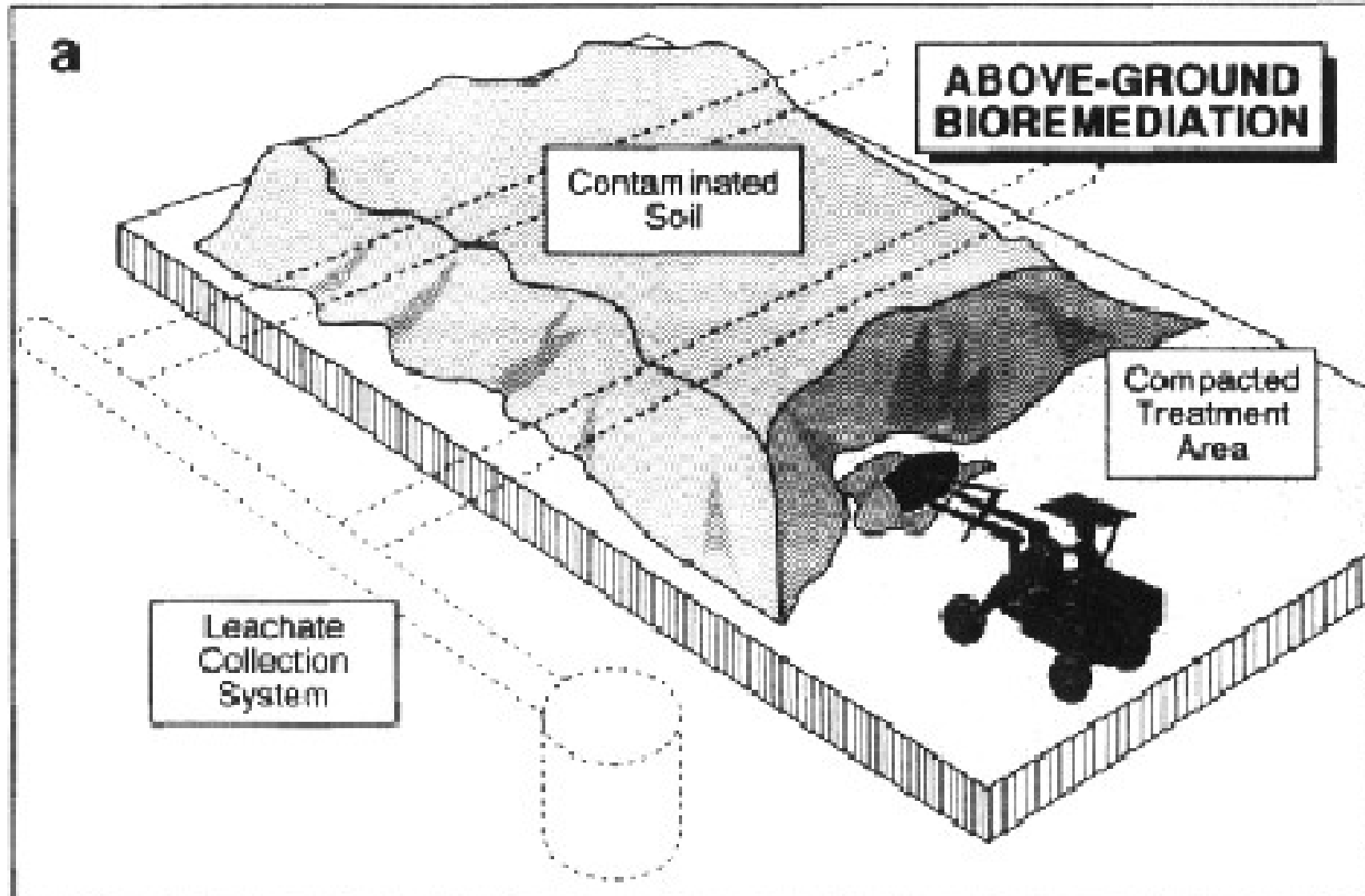


Décontamination de sols contaminés au pétrole, avec injection d'oxydants

ORC Performance at gasoline spill



Traitement d'un sol contaminé en andains

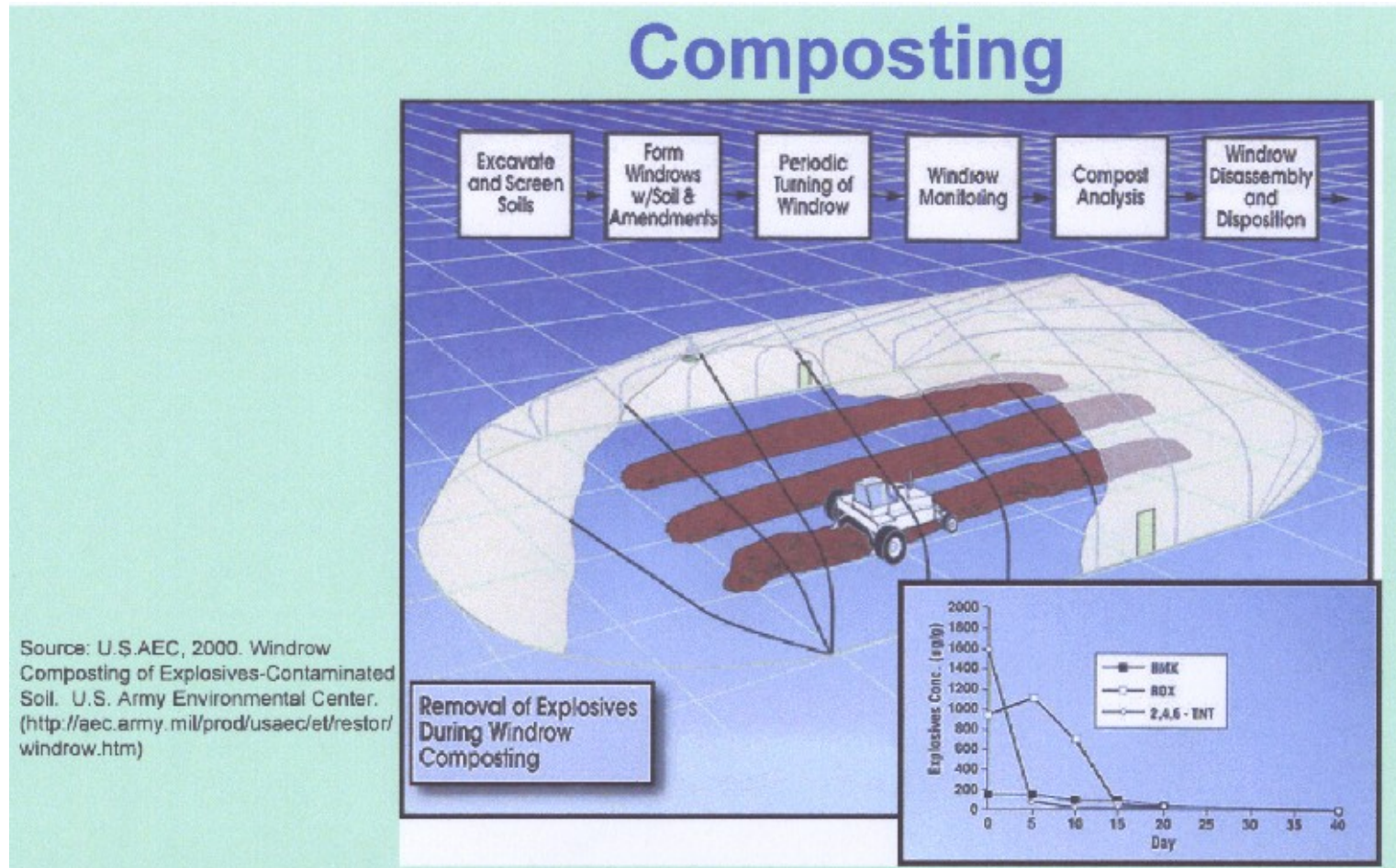


Traitement d'un sol en andains retournés



Impresa Umweltschutz Nord, Bremen

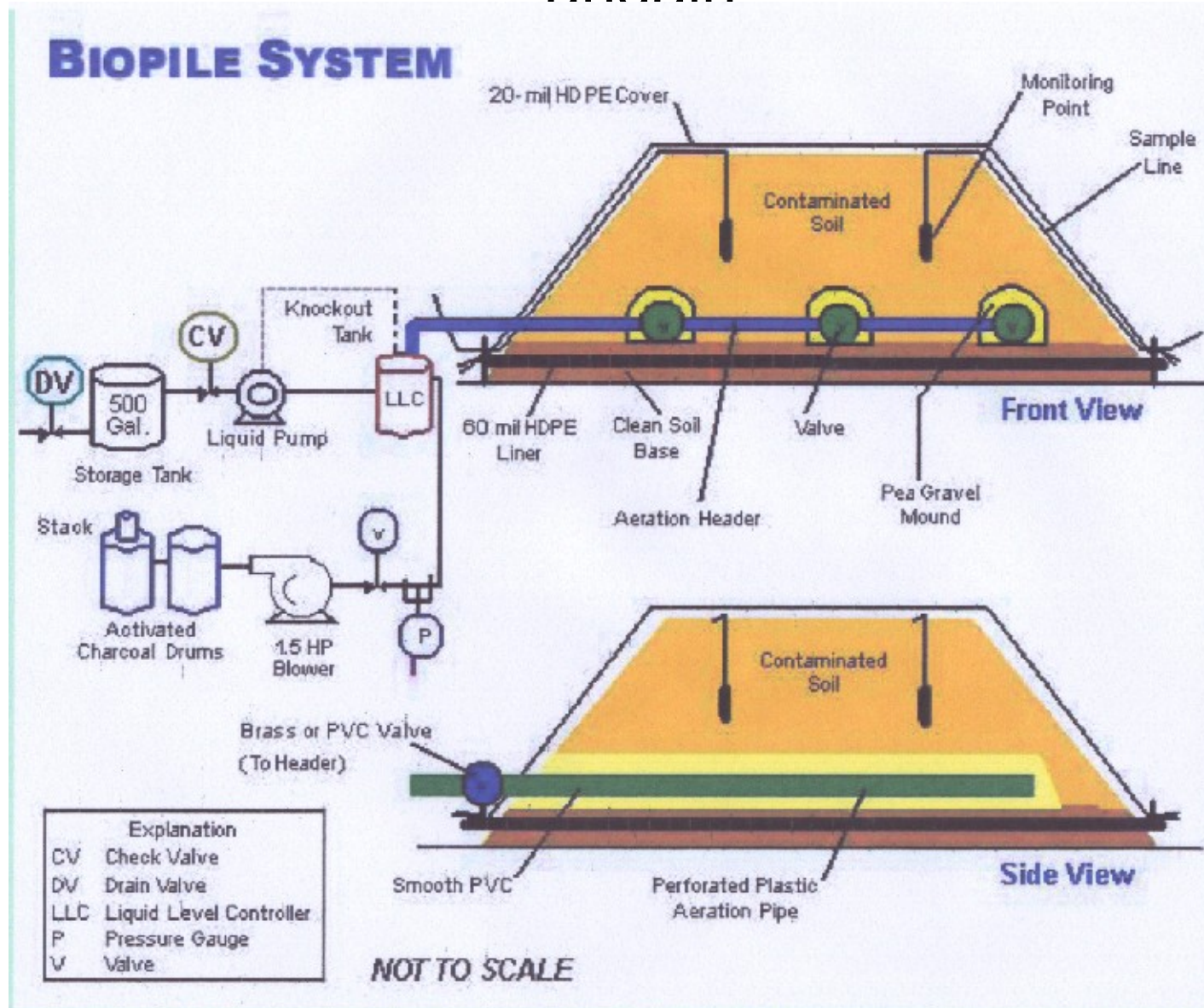
Elimination de contaminants organiques par compostage



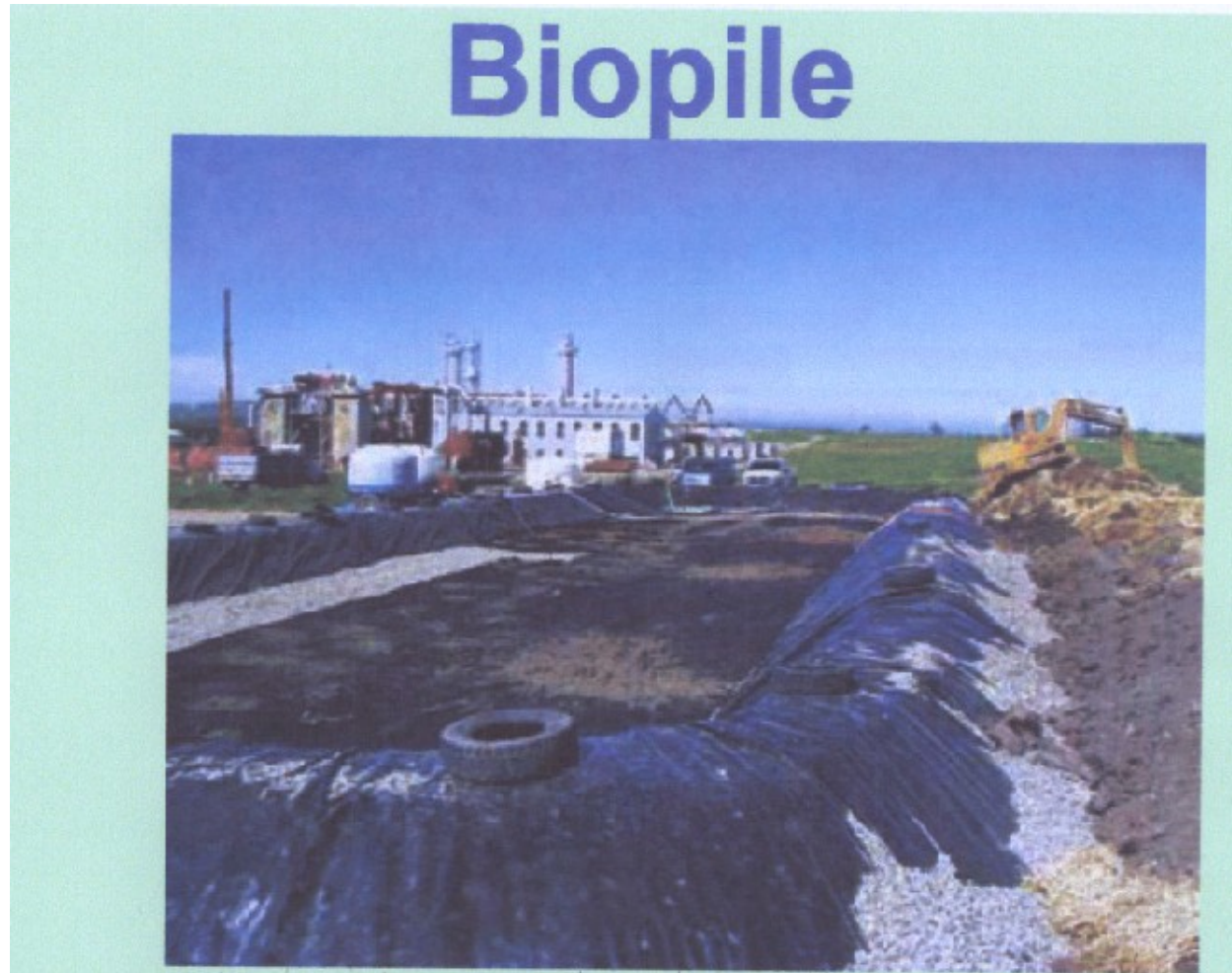
Systeme de retournement d'un compost en andains



Systeme de « biopiles »: aspiration à travers un andain



Systeme de « biopile » en action



Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming

P. Gosling^{a,*}, A. Hodge^b, G. Goodlass^c, G.D. Bending^a

^a Warwick HRI, University of Warwick, Wellesbourne, Warwick CV35 9EF, UK

^b Department of Biology, Area 2, PO Box 373, University of York, York YO10 5YW, UK

^c ADAS High Mowthorpe, Duggleby, Malton, North Yorkshire YO17 8BP, UK

Abstract

Symbiotic associations between arbuscular mycorrhizal fungi and plant roots are widespread in the natural environment and can provide a range of benefits to the host plant. These include improved nutrition, enhanced resistance to soil-borne pests and disease, improved resistance to drought, tolerance of heavy metals and better soil structure. Many agricultural crops are mycorrhizal and there is widespread if equivocal evidence that crop plants benefit from the arbuscular mycorrhizal (AM) association in the same way. However, many agricultural practices including use of fertilisers and biocides, tillage, monocultures and the growing of non-mycorrhizal crops are detrimental to arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). As a result, agroecosystems are impoverished in AMF and may not provide the full range of benefits to the crop. Organic farming systems may be less detrimental to AMF because they exclude the use of water-soluble fertilisers and most biocides and generally have diverse rotations. The evidence available suggests that this leads to increased AMF inoculum in soils, greater crop colonisation and enhanced nutrient uptake. AMF might therefore be able to substitute for reduced fertiliser and biocide inputs in organic systems, though there is little evidence for increased yield resulting from high rates of AMF colonisation in organic systems. This review examines the benefits that the AM association can have for agroecosystems and how farm management practices influence the AM association. Management options that may be employed to increase the benefits that AMF can bring to this type of farming system, such as changes to the rotation and careful use of tillage, are discussed.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi; Farm management; Organic farming

Contents

1. Introduction	18
2. The influence of arbuscular mycorrhizal fungi on agroecosystems	18
2.1. Crop nutrition	18
2.2. Crop pests and disease	19
2.3. Interaction with other soil microorganisms	20
2.4. Crop water relations	20
2.5. Soil structure	21
3. The influence of farming practice on arbuscular mycorrhizal fungi	21
3.1. Fertilisers	21
3.2. Biocides	22
3.3. Tillage	22
3.4. Crop rotations	23

* Corresponding author. Tel.: +44 24 76575021; fax: +44 24 76574500.

E-mail address: P.Gosling@warwick.ac.uk (P. Gosling).

4. Arbuscular mycorrhizal fungi in organic farming systems.	24
5. Managing organic agroecosystems to maximise benefits from the AM association.	25
5.1. Fertilisers and other soil amendments.	26
5.2. Biocides	26
5.3. Tillage	26
5.4. Crop rotations	26
5.5. Inoculation with AMF.	27
6. Conclusions.	28
Acknowledgements	28
References	28

1. Introduction

The symbiotic association between mycorrhizal fungi and the roots of plants is widespread in the natural environment. There are a number of different types of fungi that form these associations, but for agriculture, it is the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) of the Phylum Glomeromycota (Schussler et al., 2001) that are most important. AMF form a symbiotic association with more than 80% of land plant families. Included in these are many crop species, though crops in the Brassicaceae and the Chenopodiaceae generally do not form mycorrhizal associations (Newman and Reddell, 1987). The AMF consists of an internal phase inside the root and an external phase, or extraradical mycelium (ERM) phase, which can form an extensive network within the soil. Adequately defining the arbuscular mycorrhizal (AM) association has proved problematic. Fitter and Moyersoen (1996) provided a succinct definition—“a sustainable non-pathogenic biotrophic interaction between a fungus and a root”, but although having merit, it does not emphasise the importance of the extraradical phase (Hodge, 2000). Nor does it encompass the multifunctionality of the relationship. A widely accepted definition encompassing all aspects of the relationship between the host plant and the AMF has yet to appear in the literature.

AMF benefit their host principally by increasing uptake of relatively immobile phosphate ions, due to the ability of the fungal ERM to grow beyond the phosphate depletion zone that quickly develops around the root (Sanders and Tinker, 1971; Koide, 1991; George et al., 1995; Smith and Read, 1997). In return, the fungi receive carbon (C) from the host plant. Other benefits to the host that have been identified include: increased resistance to foliar-feeding insects (Gange and West, 1994), improved drought resistance (Augé et al., 1994), increased resistance to soil pathogens (Newsham et al., 1995; Lingua et al., 2002; Pozo et al., 2002) and increased tolerance of salinity and heavy metals (Shetty et al., 1995; Diaz et al., 1996; Al-Karaki et al., 2001; Feng et al., 2002; Mohammad et al., 2003). Increased uptake of macronutrients other than P, including nitrogen (N) potassium (K) and magnesium (Mg) has also been measured (Smith and Read, 1997; Clark and Zeto, 2000; Hodge et al., 2001) as well as increased uptake of some micronutrients

(Gildon and Tinker, 1983; Faber et al., 1990; Kothari et al., 1991a; Li et al., 1991; Azaizeh et al., 1995). In addition, mycorrhizas have been shown to play an important role in maintaining soil aggregate stability (Tisdall and Oades, 1979; Tisdall, 1991; Degens et al., 1996).

Though the AM association can offer multiple benefits to the host plant it may not be obviously mutualistic at all points in time, and it is possible under some conditions that the AMF may cheat their host plant into supplying C with no apparent benefit to the plant. In some cases, this can cause a decline in growth (Lerat et al., 2003). However, proving that AMF are actually cheating is difficult (Fitter, 2001) not least because of the wide range of benefits to the host, which may only become obvious at specific times or under certain environmental conditions or stresses.

This review will focus upon our current knowledge of the role that AMF play in agricultural systems and the impact agricultural practices have upon this relationship. The importance of AMF in organic agriculture (also known as biological and ecological agriculture) and the potential for farmers to enhance the benefits of the AM association in such systems will be discussed in more detail.

2. The influence of arbuscular mycorrhizal fungi on agroecosystems

2.1. Crop nutrition

Enhanced uptake of P is generally regarded as the most important benefit that AMF provide to their host plant, and plant P status is often the main controlling factor in the plant–fungal relationship (Thompson, 1987; Smith and Read, 1997; Graham, 2000). AMF can play a significant role in crop P nutrition, increasing total uptake and in some cases P use efficiency (Koide et al., 2000). This may be associated with increased growth and yield (Vosatka, 1995; Ibibijen et al., 1996; Koide et al., 2000). Where colonisation by AMF is disrupted, uptake of P, growth and in some cases yield can be significantly reduced (Thompson, 1987, 1991, 1994). However, there are examples where crops fail to respond to colonisation by native AMF, e.g. Ryan et al. (2002). In many cases, this is due to a high concentration of (phyto) available soil P (Bethlenfalvay and Barea, 1994; Hetrick et al., 1996;

Thingstrup et al., 1998; Sorensen et al., 2005). Under such conditions, the colonisation of roots by AMF is often suppressed (Jensen and Jakobsen, 1980; Al-Karaki and Clark, 1999; Kahiluoto et al., 2001). Where strong AMF colonisation still occurs under conditions of high soil P concentrations it may reduce crop growth (Gavito and Varela, 1995; Kahiluoto et al., 2001). Even on soils low in available P plants sometimes fail to respond to native AMF (Ryan et al., 2002), or inoculation with AMF (Sainz et al., 1998), though colonisation may be significantly increased, the reasons for which are not always clear.

Though P uptake usually dominates consideration of the AM association, it has become increasingly apparent that AMF can be important in the uptake of other nutrients by the host plant. Zinc (Zn) nutrition is most commonly reported as being influenced by the AM association, though uptake of copper (Cu), iron, N, K, calcium (Ca) and Mg have been reported as being enhanced (Smith and Read, 1997; Clark and Zeto, 2000). In some cases, it is the availability of these other nutrients, which control the formation/initiation of the symbiosis (Ryan and Angus, 2003). AMF may also enhance plant uptake of N from organic sources (Hodge et al., 2001) though more work is required to fully understand the mechanisms involved (Read and Perez-Moreno, 2003).

In many cases AMF cause a change in the absorption of several nutrients by the host simultaneously, though the effect on different nutrients is rarely the same (Lambert et al., 1979; Kothari et al., 1990; Wellings et al., 1991; Thompson, 1987, 1991, 1994; Azaizeh et al., 1995; Smith and Read, 1997; Srivastava et al., 2002; Mohammad et al., 2003). Colonisation by AMF may result in increased uptake by the host of one nutrient, but a reduction in another (Kothari et al., 1990), an effect which may be mediated by the concentration of other soil nutrients (Liu et al., 2000). A reduction in host plant manganese (Mn) absorption following AMF colonisation is especially common, even where uptake of other nutrients has increased (Kothari et al., 1991b; Azaizeh et al., 1995).

The apparently contradictory evidence regarding the effect of AMF on plant nutrient absorption may be connected to the increasing realisation that there is a degree

of selectivity between the host and the fungi and that different AMF have varying effects on different plant species, from strongly positive increases in nutrient uptake and or growth to strongly negative (Monzon and Azcon, 1996; Bever et al., 2001; van der Heijden, 2002; O'Connor et al., 2002; van der Heijden et al., 1998b, 2003; Vandenkoornhuyse et al., 2003; Munkvold et al., 2004). Thus, combinations of AMF and plants found in the field and especially those produced in experimental conditions may be ineffective at increasing nutrient uptake (Gavito and Varela, 1995; Scullion et al., 1998; Eason et al., 1999; Klironomos, 2003). In the case of experimental combinations, the AMF and plants used are often those that can be cultured easily and the AMF may not be the ones most appropriate for the specialised role being studied. Experiments must look at combinations of organisms and simulate conditions that are known to co-occur in the field if they are to provide useful information about the field performance of AMF (Mozafar et al., 2000; Gange and Brown, 2001). Further problems with experimental conditions include producing truly non-mycorrhizal controls (Kahiluoto et al., 2000) and accounting for the seasonal nature of the AM association (Galvez et al., 2001).

2.2. Crop pests and disease

Though nutrient uptake has been the focus of much research on the AM association there is evidence that AMF also play a role in the suppression of crop pests and diseases, particularly soil-borne fungal diseases (Schonbeck, 1979; Paulitz and Linderman, 1991; Linderman, 1994; Borowicz, 2001) and there have been a number of reviews of the subject, for example, Azcón-Aguilar and Barea (1996), Harrier and Watson (2004) and Whipps (2004). Table 1 shows some of the soil-borne diseases, which have been experimentally suppressed using AMF, a more complete list is given in Whipps (2004). Reductions in the severity of disease occur rather than total inhibition, but this can still result in a significant increase in yield over plants not inoculated with AMF, and occurs despite the fact that pathogen infection generally reduces AM colonisation (Torres-Barragán et al., 1996; Dar et al., 1997; Karagiannidis

Table 1
Selected soil-borne fungal diseases controlled by AMF

Pathogen	Disease	Crop	Reference
<i>Sclerotium cepivorum</i>	White rot	Onions (<i>Allium cepa</i>)	Torres-Barragán et al. (1996)
<i>Fusarium oxysporum</i>	Fusarium root rot	Asparagus (<i>Asparagus officinalis</i>) French bean (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Matsubara et al. (2001, 2002) Dar et al. (1997)
<i>Verticillium dahliae</i>	Verticillium wilt	Tomatoes (<i>Lycopersicon esculentum</i>) Aubergines (<i>Solanum melongena</i>)	Karagiannidis et al. (2002) Matsubara et al. (2000)
<i>Helicobasidium mompa</i>	Violet root rot	Asparagus	Kasiamdari et al. (2002)
<i>Rhizoctonia solani</i>	Root and stem rots	Mung bean (<i>Vigna radiate</i>)	Kjøller and Rosendahl (1996)
<i>Aphanomyces euteiches</i>	Root rot	Pea (<i>Pisium sativum</i>)	Bødker et al. (2002)

et al., 2002). In some cases, the apparent resistance of a plant to a pest or disease may be simply the result of improved nutrition (Cordier et al., 1996; Karagiannidis et al., 2002), though there is evidence for multiple mechanisms of resistance, probably operating simultaneously (Whipps, 2004). Perhaps the most important of these is exclusion, which seems to be a simple case of competition for space (Azcón-Aguilar and Barea, 1996). Once colonisation of a root cell by AMF occurs the pathogen is excluded from that cell. As a result, the most effective control is achieved when colonisation by AMF takes place before attack by the pathogen (Slezack et al., 1999; Matsubara et al., 2001; Sylvia and Chellemi, 2001). Other factors involved may be related to changes in root exudates (Filion et al., 1999; Norman and Hooker, 2000) which can cause changes in the rhizosphere microbial community (Dar et al., 1997), changes to the host root architecture (Yano et al., 1996; Vigo et al., 2000) or changes to root biochemistry connected with plant defence mechanisms (Azcón-Aguilar and Barea, 1996; Gianinazzi-Pearson et al., 1996). Changes to plant defence mechanisms or so-called *induced resistance* result from a priming effect of the AM colonisation, which does not in itself cause a significant defensive response by the plant but induces the plant to respond faster to infection by pathogenic fungi (Whipps, 2004).

Other types of pest and disease causing organism which may be suppressed by AMF include pathogenic nematodes (Jaizme-Vega et al., 1997; Vaast et al., 1998; Habte et al., 1999; Nagesh et al., 1999; Talavera et al., 2001), above ground fungal disease (West, 1995; Feldmann and Boyle, 1998) and herbivores (Gange and West, 1994; Gange et al., 2002). Though the mechanisms involved are complex, changes in nutritional status, resulting in changes to leaf defensive chemicals, are likely to be involved in above ground interactions with herbivores (Gange and West, 1994; West, 1995). As with soil fungal pathogens, colonisation by the AMF generally needs to occur before attack by the pathogen if control is to be effective.

Despite the results presented above, the evidence for pest and disease control is much more equivocal than that for enhanced nutrient uptake, with considerable contradiction in the literature (Gange and West, 1994; Carling et al., 1996; Garcia-Romera et al., 1998; Borowicz, 1997, 2001; Prados-Ligero et al., 2002; Gange et al., 2003, 2005; Whipps, 2004). Often the degree of control achieved with AMF varies between AMF species (Matsubara et al., 2000; Gange et al., 2003), which may be the result of host or disease/pest specificity. The effect may also be mediated by soil nutrient concentrations, though not in a predictable way (Vicari et al., 2002; Waceke et al., 2002). Many reported results also arise from simplified glasshouse experiments, which do not represent field conditions. The result is that attempts to reproduce promising glasshouse results in the field can meet with limited success (Bødker et al., 2002).

2.3. Interaction with other soil microorganisms

As well as interacting with disease causing soil organisms AMF also interact with a whole range of other microorganisms in soils. Bacterial communities and specific bacterial strains promote germination of AM fungal spores and can increase the rate and extent of root colonisation by AM (Johansson et al., 2004). Once the arbuscular symbiosis has developed, AM hyphae influence the surrounding soil, which has been termed the mycorrhizosphere (Linderman, 1988), resulting in the development of distinct microbial communities relative to the rhizosphere and bulk soil (Andrade et al., 1997). Within the mycorrhizosphere AMF interact with beneficial rhizosphere microorganisms including free living N fixing bacteria and general plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) (Arias et al., 1991; Requena et al., 1997; Galleguillos et al., 2000; Tsimilli-Michael et al., 2000; Biro et al., 2000). Large increases in yield over un-inoculated controls have been observed with some PGPR (Galleguillos et al., 2000) though the interaction with PGPR can be antagonistic as well as synergistic (Biro et al., 2000) and there seems to be a high degree of specificity between the plant, AMF and PGPR species involved in these interactions (Requena et al., 1997). The legume–rhizobium symbiosis is strongly influenced by AMF and there is some evidence to suggest that legume nodules contain AMF communities quite distinct from those found in the roots of legumes (Scheublin et al., 2004). The rhizobium symbiosis is dependant on high concentrations of P and so the enhanced P nutrition arising from the AM colonisation can result in an increase in nodulation and N₂ fixation (Ganry et al., 1985; Arias et al., 1991; Ibibijen et al., 1996; Vázquez et al., 2002).

2.4. Crop water relations

There is considerable evidence to suggest that AMF are able to increase the host plant's tolerance to water stress (Davies et al., 1992, 2002; von Reichenbach and Schonbeck, 1995; Smith and Read, 1997; Augé, 2004), including that caused by high salinity (Al-Karaki et al., 2001; Feng et al., 2002; Mohammad et al., 2003). Several mechanisms have been proposed to explain the effect, including increased root hydraulic conductivity, improved stomatal regulation, osmotic adjustment of the host and improved contact with soil particles through the binding effect of hyphae, enabling water to be extracted from smaller pores (Augé, 2001, 2004). Often both water and nutrient uptake are higher in drought stressed mycorrhizal plants than in non-mycorrhizal plants (Al-Karaki and Clark, 1999; Subramanian and Charest, 1997, 1999; Srivastava et al., 2002). However, AMF can only alleviate moderate drought stress, and in more severe drought conditions they become ineffective (RuizLozano and Azcon, 1995; Ryan and Ash, 1996; Bryla and Duniway, 1997). In some cases, AMF do not appear to increase drought tolerance at all (Ryan and Ash, 1996; Bryla and

Duniway, 1998). These apparent contradictions may be again the result of ineffective combinations of AMF and plant host, particularly in systems produced experimentally (Davies et al., 2002; Pande and Tarafdar, 2002).

2.5. Soil structure

Interest in AMF has tended to focus on their role in directly influencing the growth of the host plant. However, they also have a direct effect on soil structure, which is especially important in an agricultural context, where cultivations, trafficking and low levels of soil organic matter all tend to result in damaged soil structure. The host plant transfers as much as 20% of all fixed C to the fungal partner (Jakobsen and Rosendahl, 1990) and in agricultural soils AMF can produce significant biomass (Miller et al., 1995; Rillig et al., 1999). Olsson et al. (1999) found that AMF made up as much as 50% of the total soil microbial biomass on a sandy soil under linseed (*Linum usitatissimum*). This has a number of effects on soil structure. Like other soil fungi AMF bind soil microaggregates into larger macroaggregates through the enmeshing effects of their hyphae (Tisdall, 1991; Tisdall et al., 1997). Bethlenfalvay et al. (1999) demonstrated a direct relationship between the development of extraradical hyphae and soil aggregation in a pot experiment inoculated with AMF. In addition, AMF produce an extracellular glycoprotein called glomalin, which sticks hyphae to soil. Glomalin accumulates in soils (Rillig et al., 2001) and some, though not all work suggests that it exerts a strong influence on soil aggregate stability (Wright and Upadhyaya, 1998; Borie et al., 2000; Franzluebbers et al., 2000; Wright and Anderson, 2000; Rillig et al., 2003; Rillig, 2004). Whether glomalin is important or not, general hyphal exudation and rapid hyphal turnover (Johnson et al., 2002; Staddon et al., 2003) provide C to other soil microorganisms indirectly promoting aggregate stability (Jastrow et al., 1998). The overall effect of hyphal enmeshment and C inputs can be a significant increase in soil structural stability (Thomas et al., 1986; Bethlenfalvay and Barea, 1994; Bethlenfalvay et al., 1999), though the range of results, from positive, to neutral and negative suggests dependency on the host/fungal combination (Piotrowski et al., 2004).

3. The influence of farming practice on arbuscular mycorrhizal fungi

Crop management involves a range of practices which can impact on the AM association, both directly, by damaging or killing AMF and indirectly, by creating conditions either favourable or unfavourable to AMF. In general, agricultural practices have a negative impact on the AM association and agricultural soils are AMF impoverished, particularly in terms of numbers of species (Helgason et al., 1998; Menéndez et al., 2001).

3.1. Fertilisers

As a result of the strong influence that host P status has on the AM association, use of P fertilisers has a significant impact on the relationship between the plant and the fungus. In some areas of intensive agricultural production P fertiliser use has been well in excess of crop requirements, resulting in a build up of total and in some cases easily available P in the soil (Boehm and Anderson, 1997; Withers et al., 2001; De Clerck et al., 2003; Kogelmann et al., 2004). This has led, in turn, to less reliance of crops on the AM association and lower AM colonisation and propagule density. Kahiluoto et al. (2001) demonstrated reduced AM colonisation of roots and AMF spore density in soil with increasing P fertilisation for several crops on two soils with low and intermediate concentrations of available P. Jensen and Jakobsen (1980) examined AM colonisation of wheat (*Triticum aestivum*) and barley (*Hordeum vulgare*) at five sites in Denmark with varying concentrations of available soil P. AM colonisation was highest at the sites with lowest soil P and large applications of P fertiliser reduced AM colonisation and spore numbers at all sites. Martensson and Carlgren (1994) found even moderate amounts of P fertiliser (45 kg ha⁻¹ year⁻¹ P) reduced spore numbers by as much as 50% over five years. Similar results have been obtained by a range of authors (Sanders et al., 1975; Jasper et al., 1979; Thomson et al., 1986; Douds and Schenck, 1990; Braunberger et al., 1991; Bethlenfalvay and Barea, 1994; Martensson and Carlgren, 1994; Miller and Jackson, 1998; Thingstrup et al., 1998; Al-Karaki and Clark, 1999), though high levels of colonisation in soils high in available P and apparent insensitivity of AMF colonisation to application of P fertilisers have also been reported (Anderson et al., 1987; Khalil et al., 1992; Hamel et al., 1994; Vosatka, 1995; Ryan and Ash, 1999). As well as reducing colonisation and propagule numbers, fertilisation may also select AMF species that are inferior in terms of providing a benefit to the host (Johnson, 1993).

Use of other readily soluble fertilisers, particularly N fertilisers, has also been reported to have a negative impact on AM colonisation and/or diversity in some cases (Miller and Jackson, 1998; Liu et al., 2000; Burrows and Pflieger, 2002; Treseder and Allen, 2002), though not in others (Ryan and Ash, 1999; Jumpponen et al., 2005). Organic sources of nutrients, such as farmyard manure (FYM), compost and crop residues, and slow release mineral fertilisers such as rock phosphate do not seem to suppress AMF and may even stimulate them (Harinikumar and Bagyaraj, 1989; Ryan et al., 1994; Baby and Manibhushanrao, 1996; Dann et al., 1996; Douds et al., 1997; Kabir et al., 1998; Miller and Jackson, 1998; Joner, 2000; Alloush and Clark, 2001). However, overuse of organic amendments, especially those high in P, such as chicken manure, may impact negatively on AMF and the precise effect of organic amendments has been shown to be unpredictable on any given soil or with any particular amendment (Pasolon et al., 1993; Douds et al., 1997; Jordan et al., 2000).

Lime is a commonly used amendment to increase pH of soils, and though it has no direct effect on fertility can change the availability of some nutrients, including P, though there is no information to indicate the effect of this on the AM association. Liming acidic soils tends however to increase mycorrhizal population density (Hamel et al., 1994; Nurlaeny et al., 1996), and may result in a change in species dominance. But on soils closer to neutral there tends to be little change in the AMF species present (Wang et al., 1993; Bermudez and Azcon, 1996), though there may be a change in species dominance (Sano et al., 2002).

3.2. Biocides

The effect of biocides on the AM association is complex and not easily predictable (Perrin and Plenchette, 1993; Kurle and Pflieger, 1994; Schreiner and Bethlenfalvay, 1997). Even the effect of fungicides is not straightforward (Schreiner and Bethlenfalvay, 1997). Sreenivasa and Bagyaraj (1989) tested the effects of nine fungicides on *Glomus fasciculatum* in pot trials. At their recommended application rates all fungicides reduced root colonisation of rhodes grass (*Chloris gayana*) by between 12 and 25% and spore production by between 19 and 25%, but at half the recommended rate Captan (*N*-(trichloromethylthio) cyclohex-4-ene-1,2-dicarboximide) increased all measured mycorrhizal parameters. Pattinson et al. (1997) showed that the fungicides Terrazole (5-ethoxy-3-trichloromethyl-1,2,4-thiadiazole) and Terraclor (pentachloronitrobenzene) reduced AM colonisation in cotton (*Gossypium hirsutum*), but this effect was transitory and had disappeared after six weeks, with no long-term effect on cotton dry weight or P uptake. Udaiyan et al. (1999) looked at the effect of six fungicides on AMF colonisation and sporulation in three types of millet (*Eleusine coracana*, *Panicum miliaceum* and *Paspalum scrobiculatum*) under field conditions. At their recommended application rates some reduced AM colonisation and sporulation, while others had no effect or increased AM colonisation and sporulation, depending on the species of millet involved. Diedhiou et al. (2004) found that the two strobilurin fungicides azoxystrobin (methyl (*E*)-2-{2-[6-(2-cyanophenoxy) pyrimidin-4-yloxy]phenyl}-3-methoxycrylate) and kresoxim-methyl (methyl (*E*)-methoxyimino[α -(*o*-tolylxy)-*o*-tolyl]acetate), applied as a soil drench to five-week-old maize (*Zea mays*) plants completely inhibited AMF colonisation. However, when applied for control of leaf fungal diseases at their recommended rates they had no effect on mycorrhizal colonisation. Indeed paradoxically, some fungicides are regularly shown to have no deleterious effect on AMF and in some cases increase AM colonisation and nutrient uptake, especially at reduced application rates. Metalaxyl (methyl *N*-(methoxyacetyl)-*N*-(2,6-xylyl)-DL-alaninate) in particular, has been shown to enhance AM colonisation (Afek et al., 1991; Hwang et al., 1993).

Other types of biocide can have negative, neutral or positive effects on the AM association (Veeraswamy et al., 1993; Pattinson et al., 1997). Sreenivasa and Bagyaraj (1989) examined the effect of three nematicides on AMF in rhodes grass. All of them reduced AM colonisation and spore production at their recommended application rates, but at half the recommended rate all three increased spore production and had a neutral or positive effect on root colonisation. Pattinson et al. (1997) found that the nematicide Fenamiphos (ethyl 4-methylthio-*m*-tolyl isopropylphosphoramidate) increased mycorrhizal colonisation crop dry weight and P uptake of cotton. Ryan et al. (1994) found no effect of the herbicides *Hoegrass* (diclofop-methyl) (2-[4-(2,4-dichlorophenoxy) phenoxy] propanoic acid) and *Jaguar* (Bromoxynl + Diflufenican) (3,5-dibromo-4-hydroxybenzotrile, + 2',4'-difluoro-2-(α,α,α -trifluoro-*m*-tolylxy) nicotinilide) on levels of AM colonisation in wheat. Herbicides may have an indirect effect however, through elimination of weeds, which could otherwise act as AMF hosts, a factor that may be especially important in non-AM crops. The mechanisms involved in the direct action of non-fungicidal biocides are unclear, though they are known to alter root exudate type and quantity and this may be an important factor.

Though biocides can cause a significant reduction in AMF colonisation and sporulation there may be rapid recovery, depending on the species involved (An et al., 1993), making it difficult to assess the true effect of biocides. However, the main problem in trying to assess the effect of biocides on the AM association is that none of the studies conducted thus far assess realistic application programmes, which may involve a range of biocide applications during the crop lifecycle. Neither have they examined crop performance as a whole. Though the biocide may suppress the AMF if it also eliminates an important pest or disease the net effect may still be positive. Until these factors are accounted for it will remain difficult to determine the true effect of biocides on the AMF communities of agricultural soils and on crop performance.

3.3. Tillage

Contact with the common mycorrhizal network (CMN) is the main method by which seedlings are colonised by AMF in natural ecosystems (Read et al., 1976). Soil tillage causes severe disruption to the CMN (O'Halloran et al., 1986; Anderson et al., 1987; Evans and Miller, 1988), resulting in delayed or reduced root colonisation and a reduction in the volume of soil that is exploited by the AMF (Jasper et al., 1989a,b, 1991; Evans and Miller, 1990). This can in turn translate into reduced plant nutrient uptake (Evans and Miller, 1988), in some cases crop growth (McGonigle et al., 1990; Kabir et al., 1999) and sometimes though not always crop yield (Gavito and Miller, 1998b; Kabir et al., 1998). However, the effects on growth and nutrient uptake are in some cases only transitory (McGonigle and Miller, 1993)

and the exact effect of tillage on AMF may be dependant on soil type (Mulligan et al., 1985; Kabir et al., 1998). Deep inversion tillage is also likely to bury propagules below the depth of early seedling root growth, also delaying colonisation (Kabir, 2005).

Reducing tillage has been repeatedly shown to increase AM colonisation and nutrient uptake. Galvez et al. (2001) compared mouldboard ploughed soils with chisel disked and no-till soil. AMF spore numbers and colonisation of maize roots was highest in the no-till system (though phosphorus use efficiency was highest under the mouldboard plough system). Kabir et al. (1998) studied AMF hyphal density and nutrient content of maize in plots that had been managed under no-till, reduced till or conventional till for 11 years. AMF hyphal length densities were highest in the no-till plots and lowest in the conventional till plots, while the reduced till plots contained intermediate AMF hyphal length densities. The highest maize P, Zn and Cu concentrations were also observed in the no-till and reduced till plots. Similar results have been obtained with maize by O'Halloran et al. (1986), Evans and Miller (1988) and Miller (2000). The effect of tillage tends to be less pronounced with species which are less mycorrhizal dependant than maize. Mozafar et al. (2000) examined the effect of tillage on AM colonisation in wheat and maize in a nine-year-old tillage experiment. Zero till increased AM colonisation in maize but did not in wheat. Tillage also had an effect on nutrient content in maize, increasing P, Zn and Cu and reducing Mn and Ca, characteristic of AMF colonisation (see Section 2.1), with a much less clear effect in wheat. There was no effect of tillage on nutrient content of non-mycorrhizal oilseed rape (*Brassica napus*), suggesting that the effects seen were due to differences in AMF, not tillage directly. As well as influencing colonisation and growth of plants, tillage may also cause a shift in the AMF community structure (Jansa et al., 2002, 2003) and may favour species that colonise mainly from spores rather than other propagule sources, such as root fragments and the CMN. These may not be the most beneficial species for the host, as they divert a larger proportion of their resources to spore production (Johnson et al., 1992). However, though tillage is generally regarded as having a negative effect on the AM association it has a wide range of effects on agroecosystems, such as increased N mineralisation, increased soil temperature, reduced weed numbers and improved soil physical properties all of which may impact on the AM association. As such it does not always result in reduced AM colonisation, nutrient uptake or reduced yield (Gavito and Miller, 1998a; Mozafar et al., 2000; Galvez et al., 2001).

3.4. Crop rotations

Soils used for agricultural production have a low diversity of AMF compared with natural ecosystems (Menéndez et al., 2001) and are often dominated by *Glomus* species

(Daniell et al., 2001; Jansa et al., 2003; Oehl et al., 2003; Troeh and Loynachan, 2003; Sjöberg et al., 2004). One reason for this is the low diversity of hosts, which reaches its most extreme form in crop monoculture (An et al., 1993; Burrows and Pflieger, 2002; Oehl et al., 2003). Monoculture may select for AMF species that provide limited benefits to the host plant. Johnson et al. (1992) found that maize both yielded higher and had higher nutrient uptake on soils that had grown continuous soybean (*Glycine max*) for the previous five years than on soil that had grown continuous maize for the previous five years. Conversely, soybean yielded higher and had higher nutrient uptake on soil which had grown five years of maize than five years of soybean. The most abundant AMF species in the continuous maize soil was negatively correlated with maize yield, but positively correlated with soybean yield; there was a similar effect with soybean soil. They hypothesised that monocropping selects AMF species which grow and sporulate most rapidly and that these species will offer the least benefit to the plant because they divert more resources to their own growth and reproduction. The result being smaller and smaller benefits of AM colonisation to the host plant while monocropping continues.

Though increasing crop diversity is generally beneficial to AMF, adding a non-mycorrhizal host crop can have a strongly negative impact on AM colonisation, nutrient uptake and yield of subsequent AMF reliant crops (Black and Tinker, 1979; Harinikumar and Bagyaraj, 1988; Douds et al., 1997; Gavito and Miller, 1998a,b). Root and AMF hyphal fragments, which are important for early colonisation of the host plant, only survive for around six months in the soil (Tommerup and Abbott, 1981) and so during the growth of a non-mycorrhizal crop propagule numbers decline and AM colonisation of the subsequent crop will be both delayed and reduced in quantity. Miller (2000) examined AM colonisation of maize and showed that when maize followed non-mycorrhizal oilseed rape, AM colonisation was reduced along with early season P uptake, which in some cases resulted in yield reductions. Karasawa et al. (2002) also showed that AM colonisation and yield of maize decreased following non-mycorrhizal mustard (*Sinapis alba*) compared with mycorrhizal sunflower (*Helianthus annuus*). Cropping with a non-mycorrhizal crop can be more detrimental to a subsequent highly mycorrhizal dependant crop than either tillage or P fertilisation (Gavito and Miller, 1998a). Even crops which are mycorrhizal but only develop weak colonisation can have an effect on subsequent AM crops. For instance, Douds et al. (1997) showed consistently lower spore numbers in soil and lower AMF infectivity of the soil following weakly colonised spinach (*Spinacea oleraceae*) or pepper (*Capsicum annum*), compared with more strongly colonised maize, wheat or oats (*Avena sativa*). However, there are examples where non-mycorrhizal crops have little effect on the AM association in subsequent crops (Ocampo and Hayman, 1981; Powell, 1982). Sorensen et al. (2005) found that although growing a non-mycorrhizal crop

before leeks (*Allium porrum*) reduced early colonisation and nutrient uptake, the effect was only transitory. Pre-cropping with a non-mycorrhizal crop may even result in an increase in yield of the subsequent mycorrhizal crop, the reasons for which are not clear (Ryan and Graham, 2002).

Bare fallow periods have a similar effect to non-mycorrhizal crops, reducing propagule numbers, colonisation, nutrient uptake and in some cases yield of subsequent mycorrhizal crops. Troeh and Loynachan (2003) measured spore numbers after three years of continuous maize, soybean or fallow. Maize and soybean increased spore numbers, while under fallow, spore numbers declined during the first year, and then stabilised at a low level. Hamilton et al. (1993) showed that AM colonisation of beans (*Phaseolus vulgaris*) and Zn uptake was reduced if they followed a fallow compared with maize, beans or wheat. Cultivating the bare fallow can further reduce hyphal survival (Kabir et al., 1997). Such can be the detrimental affect of bare fallows on AMF that in Queensland, Australia, in areas where soils have low P availability, long bare fallows result in a recognised condition known as *long fallow disorder*, in which crops exhibit P and Zn deficiency. The severity of the long fallow disorder is directly related to AMF inoculum density (Thompson, 1987, 1991). The adverse effect of fallow periods on AMF inoculum potential can be avoided by growing a cover crop (Dodd and Jeffries, 1986; Galvez et al., 1995; Boswell et al., 1998). Boswell et al. (1998) found that a winter wheat cover crop could increase AM inoculum potential and the growth and yield of maize in the following season. Alternatively weeds can be as effective as a winter cover crop, providing an alternative host between AM dependant crops (Kabir and Koide, 2000).

4. Arbuscular mycorrhizal fungi in organic farming systems

Organic farming has developed from a wide number of disparate movements across the world into a more uniform group of farming systems, which operate broadly within the principals of the International Federation of Organic Agriculture Movements (Stockdale et al., 2001). Though the exact production methods vary considerably, general principals include the exclusion of most synthetic biocides and fertilisers, the management of soils through addition of organic materials and use of crop rotation (IFOAM, 1998).

The exclusion of soluble mineral fertilisers and the very limited use of biocides in organic agriculture mean that it is reliant largely on biological processes for supply of nutrients, including the reliance on N₂ fixation as the main source of N to crops, and for protection of crops from pests and disease. Indeed, it is one of the central paradigms of organic agriculture that an active soil microbial community is vital for functioning of the agroecosystem (Lampkin, 1990). Within this paradigm, AMF are usually considered to play an important role and it is assumed that they can compensate for the reduced use of P fertilisers (Galvez et al., 2001). Many authors report higher levels of AMF colonisation, higher propagule numbers or higher diversity in organic farming (see Table 2). However, the actual importance of AMF to the functioning of organic agroecosystems and in particular to crop performance remains to be determined.

Some evidence indicates that AMF are indeed capable of compensating for lower inputs of P fertiliser in organic systems. Kahiluoto and Vestberg (1998) found that AMF in an organically managed soil were as effective at increasing crop available P as superphosphate was on a conventional soil. However, this does not always translate into higher yields (Ryan et al., 1994; Galvez et al., 2001) even when phosphorus use efficiency is higher (Galvez et al., 2001). Prolific AM colonisation in organic systems may even be associated with reduced yield in some cases because of the carbon drain by the AMF (Dann et al., 1996). Other authors have found AMF to be no more effective, and in some cases less effective than rock phosphate at increasing crop growth on organically managed soils (Scullion et al., 1998). Dann et al. (1996) showed that even where there was good AM colonisation on an organically managed soil, crops responded positively to superphosphate fertiliser in a similar way to crops on conventional soil, suggesting that AMF do not provide a unique method of accessing P to the host plant, a conclusion also reached by Ryan and Ash (1999).

Determining the reason for the apparently poor performance of AMF in some organic systems is difficult because organic systems vary considerably in the detail of their management practices and the practices used prior to conversion. As a result, there are likely to be different reasons for poor performance of AMF in different systems. Long-term conventional, high input management reduces AMF diversity (Helgason et al., 1998; Daniell et al., 2001) and may favour inefficient AMF (Johnson et al., 1992;

Table 2

Examples of organic systems showing greater numbers of AMF propagules, diversity or root colonisation compared with conventional systems

Characteristic	Reference
Greater root colonisation on organic soil ^a	Bending et al. (2004), Douds et al. (1993, 1995), Eason et al. (1999), Kahiluoto and Vestberg (1998), Mäder et al. (2000), Ryan and Ash (1999), Ryan et al. (1994, 2000, 2004)
Larger number of AMF spores in organic soil ^a	Douds et al. (1993, 1995), Galvez et al. (2001), Kahiluoto and Vestberg (1998), Eason et al. (1999), Oehl et al. (2003, 2004)
Greater diversity of AMF in organic soil	Oehl et al. (2003, 2004)

^a Results may not be consistent between different experiments within the same reference.

Johnson, 1993). Thus, at conversion the AMF population may be reduced to a small number of species tolerant of intensive farming practices. Building up species diversity will be important to ensuring the development of an effective AMF community. However, there are no available data to indicate the mechanisms involved in the re-colonisation of agricultural land, the time required, or the most effective management options to accelerate the process. Some data have indicated that organic systems may fail to develop an effective AMF community even after several years (Scullion et al., 1998). This may be the result of management practices unfavourable to AMF. For instance, soil P concentrations may remain too high (Dekkers and van der Werff, 2001) if the P fertilisers permitted in organic production are used frequently (Scullion et al., 1998). Excessive tillage to control weeds and frequent cultivation of non-mycorrhizal crops could also hamper development of a diverse AM community. Unfavourable soil moisture and temperature, and plant disease, can also suppress the AM association (Ryan and Graham, 2002) and consequently community development.

Another reason for the failure of some organic systems to develop an effective AMF community may be the limited availability of AMF propagules of new species. Re-colonisation is likely to occur from adjacent natural and semi-natural habitats such as hedges, woodland and unmanaged grassland. The vectors of propagules may include animals, growing roots, agricultural machinery and soil eroded by wind and water (Warner et al., 1987). While root growth and movement by animals is likely to be slow and involve small numbers of propagules, tillage operations can move soil and propagules more than a meter in a single operation, depending on the machinery in question and the slope (Rew et al., 1996; Tsara et al., 2001; van Muysen and Govers, 2002; Quine et al., 2003). Single water erosion events can move soil several hundred meters (Morschel et al., 2004), while wind can disperse spores very large distances (Warner et al., 1987) as can farm machinery. Evidence from re-colonisation of abandoned agricultural land suggests large numbers of AMF species can establish after only two years (Hedlund, 2002; Hedlund and Gormsen, 2002). However, the early stages of re-colonisation of soils

are characterised by significant heterogeneity (Boerner et al., 1996), including areas with potentially very low infectivity. This is likely to be especially true of large fields where distance from the source of propagules may be large, or in intensively managed landscapes, where semi-natural habitats may be few in number.

Another factor that may help explain the poor performance of AMF in some organic systems is the suggestion that modern crop cultivars are not responsive to AMF and therefore receive little benefit from the AM association, even though colonisation with effective AMF may be high (Manske, 1990; Hetrick et al., 1996; Aguilera-Gomez et al., 1998). However, a wide degree of variation in AMF dependency in both modern and old cultivars has been demonstrated (Stoppler et al., 1990; Hetrick et al., 1993, 1996) suggesting that this is not the only factor. The apparent lack of benefit for the host crop may even be simply a result of the host crop receiving benefits other than those being measured.

5. Managing organic agroecosystems to maximise benefits from the AM association

Despite the fact that AMF found in organic agroecosystems do not always appear to be either highly efficient (Eason et al., 1999) or obviously beneficial in terms of yield (Ryan et al., 1994; Galvez et al., 2001) there are enough instances where AMF have been shown to have a beneficial effect to support encouraging an active AMF community, which is more likely to bring benefits than problems. Furthermore, the evidence available suggests that encouraging diversity in the AMF community may increase the chances of obtaining beneficial effects for crops (van der Heijden et al., 1998a). The first step in managing any agroecosystem to encourage the development of an effective AMF community is to avoid management practices that are harmful to the AM association and increase the use of those that are beneficial (see Table 3). However, this may not be as easy as it sounds, because management practices that encourage AMF may conflict

Table 3
Organic farm management practices^a and their effect on the AM association

	Effect
Beneficial practices	
Use of low solubility fertilisers	Low concentration of available nutrients in soil, encourages AMF colonisation
Exclusion of most biocides	Toxic effects of some biocides on AMF are avoided
Ley periods	Encourages build up of AMF propagule numbers
Diverse rotations	Encourages a diverse AMF community
Detrimental practices	
Mechanical tillage for weed control	Disrupts mycorrhizal hyphal network
Bare fallows	Lack of host plants results in decline in propagule numbers
Non-mycorrhizal crops	Lack of host plants results in decline in propagule numbers
Use of copper based fungicides	Directly toxic to AMF

^a May not be exclusive to organic farming systems.

with other beneficial farm management operations vital for optimising crop performance.

5.1. Fertilisers and other soil amendments

The use of readily soluble fertilisers is prohibited under organic regulations (IFOAM, 1998). Although others such as FYM, compost and slow release mineral fertilisers are permitted, and may actually benefit AMF (see Section 3.1), most organic farmers do not apply them regularly. As a result, organic systems often have lower concentrations of total and available soil P than equivalent conventional systems (Gosling and Shepherd, 2005). Some authors have suggested that differences in AM colonisation between conventional and organic systems can be explained by this difference in concentration of soil P (Scullion et al., 1998; Mäder et al., 2000; Ryan et al., 2000). Some intensive organic horticultural systems in contrast, import significant quantities of manures and composts as the nutrient requirements for such rotations cannot always be met by recycling nutrients within the farm system. Excessive use of even these organic sources of P can result in suppression of the AMF community (Jordan et al., 2000). Careful nutrient budgeting should enable this to be avoided, optimising fertility rather than maximising it.

5.2. Biocides

Use of biocides in organic farming is severely restricted (IFOAM, 1998), however, copper based fungicides, used in the production of grapes, fruit and potatoes can be detrimental to the AM association. Copper oxychloride is particularly damaging to AMF, even at below recommended application rates (Sreenivasa and Bagyaraj, 1989). It would therefore be wise to limit its use where possible. Biocontrol agents that may be used in organic systems to control pathogenic fungi do not appear to damage the AM association (Ravnskov et al., 2002; Gaur et al., 2004), though this is a new field and little research has been done thus far.

5.3. Tillage

Concerns about the effect of tillage on soil quality and the high cost of tillage operations has led to the increasing adoption of reduce till in many temperate regions (FAO, 2001). This has an incidental effect of increasing AMF hyphal density and crop colonisation (Anderson et al., 1987; Kabir et al., 1998; Galvez et al., 2001), which may benefit nutrient uptake and growth. However, tillage forms an important part of weed control strategies in organic systems (Bond and Grundy, 2001) and low or no-till can result in an increase in perennial weed numbers, which are difficult to control in the absence of herbicides (Kouwenhoven et al., 2002; Torresen et al., 2003; Håkansson, 2003). As a consequence, there is a limit to which tillage can be reduced

in organic systems while maintaining adequate weed control, something which must take precedence over the uncertain benefits of increased AMF colonisation. Where tillage is reduced for other reasons though, increased benefits from AMF can be expected, not only because of reduced disruption to the CMN but also because it is likely to lead to more weeds, which can provide valuable alternative AMF hosts, particularly in non-mycorrhizal crops.

5.4. Crop rotations

Crop rotation is one of the cornerstones of organic farming practice. Rotations generally consist of a period of fertility building ley followed by a period of cash cropping, before return to ley. A well-designed, diverse rotation, characteristic of many organic systems, can aid the management of crop nutrient requirements and pests and diseases. It will also result in variations in AMF inoculum potential. Accounting for this in the design of rotations could increase the benefits available from the AM association.

During the ley phase conditions are favourable for the AM association as there is no-tillage, organic amendments are often added and strongly mycorrhizal legumes such as clovers (*Trifolium* spp.) medics (*Medicago* spp.) and vetches (*Vicia* spp.) are usually included in the ley. The result is increased AMF inoculum potential in the soil (Menéndez et al., 2001; Oehl et al., 2003). Growing a crop that is strongly dependant on AMF immediately after the ley, such as potatoes (*Solanum tuberosum*) or maize will make the best use of this potential. However, in organic systems that include brassicas, these are often grown directly after a ley because they require a high concentration of soil mineral N. This wastes the potential benefit of enhanced AMF inoculum potential at this point in the rotation. Frequent mechanical weeding is also common in brassicas, which will damage the CMN and reduce colonisation of subsequent crops. Brassicas and other non-mycorrhizal or weakly mycorrhizal crops, such as beets (Chenopodiaceae), should ideally be grown later in the rotation, with their nutritional requirements met by manures or other amendments.

Though organic rotations are generally beneficial to AMF, the inclusion of bare fallows in the rotation to control perennial weeds is potentially highly detrimental, made worse by the fact that these fallows are tilled regularly, further damaging AMF (Kabir et al., 1997). They should be avoided where possible, or if unavoidable kept short to minimise the negative impact on AMF (Kabir et al., 1999). In contrast to bare fallows, including green manures and cover crops in the rotation, a practice encouraged in organic systems, can increase AM inoculum potential and the growth and yield of subsequent AMF dependant crops, provided they are themselves mycorrhizal (Dodd and Jeffries, 1986; Galvez et al., 1995; Boswell et al., 1998). Mustard, oilseed rape, stubble turnips (*Brassica rapa oleifera*) and buckwheat (*Fagopyrum* spp.) are commonly

used non-mycorrhizal green manures. After these, other non-mycorrhizal crops or a bare fallow, AMF inoculum potential will be reduced and growing a crop which is strongly dependant on AMF may lead to poor crop growth and low yield and should be avoided (Black and Tinker, 1979; Harinikumar and Bagyaraj, 1988; Douds et al., 1997; Miller, 2000; Karasawa et al., 2002).

5.5. Inoculation with AMF

Land which is converted from a conventional to an organic farming system, particularly where high rates of mineral fertilisers have been used in conjunction with monoculture, is likely to have an impoverished AMF community. Establishing a diverse and effective AMF community following conversion to organic management may take a long time (Scullion et al., 1998), particularly if the organic system has low crop diversity, is distant from natural sources of inoculum or where practices detrimental to AMF are used. In such cases, use of commercial inoculum may be the best way to diversify the AMF community (Eason et al., 1999).

Direct inoculation of either the host plant or the soil with AMF has been shown to be capable of increasing P uptake, and in some cases yield and reducing disease in AM dependant crops. Though many experiments have been conducted in the glasshouse (e.g. Xavier and Germida, 1997) and so have questionable relevance to the field situation, there are examples of field experiments where inoculation has successfully increased nutrient uptake and/or yield, or reduced disease severity (Vosatka, 1995; Torres-Barragán et al., 1996; Koch et al., 1997; Kahiluoto and Vestberg, 1998; Al-Karaki, 2002; Al-Karaki et al., 2004; Mohammad et al., 2004; Douds et al., 2005), though some of these have been on fumigated soil (Koch et al., 1997). The problem with inoculation is that there is little information to indicate which AMF species will be most effective with which crop species and there is also the problem of competition with the native AMF.

Inoculation experiments have shown that different AMF species produce a wide range of growth responses in the host plant, from significantly positive to significantly negative. Often the concentration of soil P influences the effectiveness of inoculation (Gavito and Varela, 1995; Xavier and Germida, 1997; Hamel et al., 1997; Al-Karaki, 2002). Though contrary to expectation, crops growing in soils high in available P may respond more favourably to inoculation than those growing in soil low in available P, because the native AM community is likely to be suppressed on soils high in available P (Hamel et al., 1997). However, the response is rarely predictable or consistent, even with the same plant species on the same soil (Hamel et al., 1997; Hernández et al., 2000; Charron et al., 2001a,b; Ortas et al., 2002; Douds and Reider, 2003; Klironomos, 2003). As a result, inocula need to be carefully selected to ensure that a compatible host/fungus/

substrate/inoculum type combination is used (Azcón-Aguilar and Barea, 1997; Klironomos and Hart, 2002). The task of selecting species to use in AMF inoculum is complicated by the fact that the most effective AMF species may differ between host plants and may depend on whether the main aim is nutrient uptake, increased pathogen resistance or improved water relations. Failure to find the most appropriate AMF/host/inoculation method may explain why some inoculants used thus far have failed to have a beneficial effect, even though degree of colonisation may be high. Even where an effective AMF/host/inoculation combination is identified, there remains the problem of competition with the native soil AMF.

Native AMF will be more adapted to the soil environment than introduced strains and as a result may out-compete the added AMF. Harinikumar and Bagyaraj (1996) added *Glomus intraradicis* to soil in the field and though there was an initial build up of the introduced AMF it only persisted for one season. Alternatively, the native mycorrhizal population may be as effective as the introduced inoculum, thereby negating any benefit of inoculation (Izaguirre-Mayoral et al., 2000; Klironomos, 2003). An introduced inoculum may even depress yield if the native AMF population is effective (Kahiluoto and Vestberg, 1998). Khaliq and Sanders (2000) measured a small (3–4%) reduction in the yield of barley in response to inoculation with a single AMF species. As well as difficulties in selecting the most appropriate inoculum there has been no research to indicate the best time in the rotation to add inoculum. Direct inoculation of plants grown in the glasshouse, which are then transplanted into the field, can be particularly successful at establishing strong mycorrhizal colonisation, and only requires small amounts of inoculum (Vosatka, 1995; Douds and Reider, 2003). It is also the most effective method of using AMF for disease control (Torres-Barragán et al., 1996), though it does not always result in increased yield (Hamel et al., 1997). However, pre-inoculation is not practical for broadacre crops. The most obvious place to add inoculum in broadacre production would be at the beginning of the ley period. Lack of tillage during the ley, combined with the presence of strongly mycorrhizal legumes should encourage the development of AMF. This should also have the secondary effect of boosting N₂ fixation, through contributing to adequate P nutrition of the legume. However, Kahiluoto et al. (1999) found that incorporation of clover residues suppressed mycorrhiza, indicating the potential pitfalls of this approach in some systems. Inoculum could also be added after growth of a non-mycorrhizal crop, either to aid the following crop directly or to boost AMF potential by growing a green manure before the next crop. However, use of inoculation remains something of a hit and miss process, and there remains much research to be done before it can be used routinely and effectively, either to increase the yield of individual crops or to diversify the mycorrhizal community as a whole.

6. Conclusions

Mycorrhizal colonisation of crop plants can offer considerable benefits in terms of growth, nutrient uptake and in some cases yield. However, though generally regarded as beneficial, the activity of mycorrhizal fungi in agroecosystems is neither easily predictable nor always beneficial. This applies to low input agroecosystems as well as intensively managed ones. Many experiments examining the effect of AMF on crops have produced ambiguous results, while many of those demonstrating a positive effect, particularly for pathogen control, have been done in the glasshouse using simplified systems, giving results which may not be easily reproducible in the field. Many farm management practices, such as use of water-soluble P fertilisers and biocides are also disruptive to the AM association, resulting in AM communities which are impoverished, both in terms of numbers of individuals and species diversity. Low input systems such as organic farming are generally more favourable to AMF and AMF have the potential to substitute for the fertilisers and biocides which not permitted in organic systems. However, the available evidence suggests that despite the use of generally favourable management practices organic agroecosystems do not always have large, diverse or efficient AMF communities. Changes to farm management practices or even introduction of commercial inoculum may be necessary for organic systems to fully exploit the AM association. However, there are considerable gaps in our understanding of the AM association, in particular, the importance of AMF species diversity in producing the full range of benefits possible and the effect of different agronomic practices on the ecology and function of AMF. If we are to achieve efficient use and manipulation of AMF for long-term agricultural stability and productivity in any form of agriculture, our understanding of their physiology and function and their interactions with crops and environmental conditions needs to be improved.

Acknowledgement

This review was produced as part of a project funded by the UK Department for the Environment, Food and Rural Affairs.

References

- Afek, U., Menge, J.A., Johnson, E.L.V., 1991. Interaction among mycorrhizae, soil solarization, metalaxyl, and plants in the field. *Plant Dis.* 75, 665–671.
- Aguilera-Gomez, L.I., Ramirez-Moreles, P., Frias-Hernandez, J.T., Chapa-Elizondo, A., Olalde-Portugal, V., 1998. Influence of *Glomus fasciculatum* on physiology and growth of three kinds of maize. *Phyton-Int. J. Exp. Bot.* 62, 101–107.
- Al-Karaki, G.N., 2002. Field response of garlic inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi to phosphorus fertilization. *J. Plant Nutr.* 25, 747–756.
- Al-Karaki, G.N., Clark, R.B., 1999. Varied rates of mycorrhizal inoculum on growth and nutrient acquisition by barley grown with drought stress. *J. Plant Nutr.* 22, 1775–1784.
- Al-Karaki, G.N., Hammad, R., Rusan, M., 2001. Response of two tomato cultivars differing in salt tolerance to inoculation with mycorrhizal fungi under salt stress. *Mycorrhiza* 11, 43–47.
- Al-Karaki, G.N., McMichael, B., Zak, J., 2004. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14, 263–269.
- Alloush, G.A., Clark, R.B., 2001. Maize response to phosphate rock and arbuscular mycorrhizal fungi in acidic soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32, 231–254.
- An, Z.Q., Hendrix, J.W., Hershman, D.E., Ferriss, R.S., Henson, G.T., 1993. The influence of crop-rotation and soil fumigation on a mycorrhizal fungal community associated with soybean. *Mycorrhiza* 3, 171–182.
- Anderson, E.L., Millner, P.D., Kunishi, H.M., 1987. Maize root length, density and mycorrhizal infection as influenced by tillage and soil phosphorus. *J. Plant Nutr.* 10, 1349–1356.
- Andrade, G., Mihara, K.L., Linderman, R.G., Bethlenfalvay, G.J., 1997. Bacteria from rhizosphere and hydrosphere soils of different arbuscular-mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 192, 71–79.
- Arias, I., Koomen, I., Dodd, J.C., White, R.P., Hayman, D.S., 1991. Growth-responses of mycorrhizal and nonmycorrhizal tropical forage species to different levels of soil phosphate. *Plant Soil* 132, 253–260.
- Augé, R.M., 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11, 3–42.
- Augé, R.M., 2004. Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. *Can. J. Soil Sci.* 84, 373–381.
- Augé, R.M., Duan, X., Ebel, R.C., Stodola, A.J.W., 1994. Nonhydraulic signalling of soil drying in mycorrhizal maize. *Planta* 193, 74–82.
- Azaizeh, H.A., Marschner, H., Römheld, V., Wittenmayer, L., 1995. Effects of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and other soil microorganisms on growth, mineral nutrient acquisition and root exudation of soil-grown maize plants. *Mycorrhiza* 5, 321–327.
- Azcón-Aguilar, C., Barea, J.M., 1996. Arbuscular mycorrhizas and biocontrol of soil-borne plant pathogens, an overview of the biological mechanisms involved. *Mycorrhiza* 6, 457–464.
- Azcón-Aguilar, C., Barea, J.M., 1997. Applying mycorrhiza biotechnology to horticulture, significance and potentials. *Sci. Hortic.* 68, 1–24.
- Baby, U.I., Manibhushanrao, K., 1996. Influence of organic amendments on arbuscular mycorrhizal fungi in relation to rice sheath blight disease. *Mycorrhiza* 6, 201–206.
- Bending, G.D., Turner, M.K., Rayns, F., Marx, M.C., Wood, M., 2004. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biol. Biochem.* 36, 1785–1792.
- Bermudez, M., Azcon, R., 1996. Calcium uptake by alfalfa as modified by a mycorrhizal fungus and liming. *Symbiosis* 20, 175–184.
- Bethlenfalvay, G.J., Barea, J.M., 1994. Mycorrhizae in sustainable agriculture. I. Effects on seed yield and soil aggregation. *Am. J. Altern. Agric.* 9, 157–161.
- Bethlenfalvay, G.J., Cantrell, I.C., Mihara, K.L., Schreiner, R.P., 1999. Relationships between soil aggregation and mycorrhizae as influenced by soil biota and nitrogen nutrition. *Biol. Fertil. Soil* 28, 356–363.
- Bever, J.D., Schultz, P.A., Pringle, A., Morton, J.B., 2001. Arbuscular mycorrhizal fungi: more diverse than meets the eye, and the ecological tale of why. *Bioscience* 51, 923–931.
- Biro, B., Koves-Pechy, K., Voros, I., Takacs, T., Eggenberg, P., Strasser, R.J., 2000. Interrelations between *Azospirillum* and *Rhizobium* nitrogen-fixers and arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of alfalfa at sterile, AMF-free or normal soil conditions. *Appl. Soil Ecol.* 15, 159–168.
- Black, R., Tinker, P.B., 1979. The development of endomycorrhizal root systems. II. Effect of agronomic factors and soil conditions on the

- development of vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in barley and on the endophyte spore density. *New Phytol.* 83, 401–413.
- Bødker, L., Kjølner, R., Kristensen, K., Rosendahl, S., 2002. Interactions between indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and *Aphanomyces euteiches* in field-grown pea. *Mycorrhiza* 12, 7–12.
- Boehm, M.M., Anderson, D.W., 1997. A landscape-scale study of soil quality in three prairie farming systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1147–1159.
- Boerner, R.E.J., DeMars, B.G., Leicht, P.N., 1996. Spatial patterns of mycorrhizal infectiveness of soils along a successional chronosequence. *Mycorrhiza* 6, 79–90.
- Bond, W., Grundy, A.C., 2001. Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Res.* 41, 383–405.
- Borie, F.R., Rubio, R., Morales, A., Castillo, C., 2000. Relationships between arbuscular mycorrhizal hyphal density and glomalin production with physical and chemical characteristics of soils under no-tillage. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 73, 749–756.
- Borowicz, V.A., 1997. A fungal root symbiont modifies plant resistance to an insect herbivore. *Oecologia* 112, 534–542.
- Borowicz, V.A., 2001. Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant–pathogen relations? *Ecology* 82, 3057–3068.
- Boswell, E.P., Koide, R.T., Shumway, D.L., Addy, H.D., 1998. Winter wheat cover cropping, VA mycorrhizal fungi and maize growth and yield. *Agric. Ecosyst. Environ.* 67, 55–65.
- Braunberger, P.G., Miller, M.H., Peterson, R.L., 1991. Effect of phosphorus nutrition on morphological characteristics of vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of maize. *New Phytol.* 119, 107–113.
- Bryla, D.R., Duniway, J.M., 1997. Effects of mycorrhizal infection on drought tolerance and recovery in safflower and wheat. *Plant Soil* 197, 95–108.
- Bryla, D.R., Duniway, J.M., 1998. The influence of the mycorrhiza *Glomus etunicatum* on drought acclimation in safflower and wheat. *Physiol. Plant.* 104, 87–96.
- Burrows, R.L., Pflieger, F.L., 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi respond to increasing plant diversity. *Can. J. Bot.* 80, 120–130.
- Carling, D.E., Roncadori, R.W., Hussey, R.S., 1996. Interactions of arbuscular mycorrhizae, *Meloidogyne arenaria*, and phosphorus fertilization on peanut. *Mycorrhiza* 6, 9–13.
- Charron, G., Furlan, V., Bernier-Cardou, M., Doyon, G., 2001a. Response of onion plants to arbuscular mycorrhizae. 1. Effects of inoculation method and phosphorus fertilization on biomass and bulb firmness. *Mycorrhiza* 11, 187–197.
- Charron, G., Furlan, V., Bernier-Cardou, M., Doyon, G., 2001b. Response of onion plants to arbuscular mycorrhizae. 2. Effects of nitrogen fertilization on biomass and bulb firmness. *Mycorrhiza* 11, 145–150.
- Clark, R.B., Zeto, S.K., 2000. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *J. Plant Nutr.* 23, 867–902.
- Cordier, C., Trouvelot, A., Gianinazzi, S., Gianinazzi-Pearson, V., 1996. Arbuscular mycorrhiza technology applied to micropropagated *Prunus avium* and to protection against *Phytophthora cinnamomi*. *Agronomie* 16, 679–688.
- Daniell, T.J., Husband, R., Fitter, A.H., Young, J.P.W., 2001. Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi colonising arable crops. *FEMS Microbiol. Ecol.* 36, 203–209.
- Dann, P.R., Derrick, J.W., Dumaresq, D.C., Ryan, M.H., 1996. The response of organic and conventionally grown wheat to superphosphate and reactive phosphate rock. *Aust. J. Exp. Agric.* 36, 71–78.
- Dar, G.H., Zargar, M.Y., Beigh, G.M., 1997. Biocontrol of *Fusarium* root rot in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by using symbiotic *Glomus mosseae* and *Rhizobium leguminosarum*. *Microb. Ecol.* 34, 74–80.
- Davies, F.T., Olalde-Portugal, V., Aguilera-Gomez, L., Alvarado, M.J., Ferrera-Cerrato, R.C., Boutton, T.W., 2002. Alleviation of drought stress of Chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico. *Sci. Hortic.* 92, 347–359.
- Davies, F.T., Potter, J.R., Linderman, R.G., 1992. Mycorrhiza and repeated drought exposure affect drought resistance and extraradical hyphae development of pepper plants independent of plant size and nutrient content. *J. Plant Physiol.* 139, 289–294.
- De Clerck, F., Singer, M.J., Lindert, P., 2003. A 60-year history of California soil quality using paired samples. *Geoderma* 114, 215–230.
- Degens, B.P., Sparling, G.P., Abbott, L.K., 1996. Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates. *Appl. Soil Ecol.* 3, 149–159.
- Dekkers, T.B.M., van der Werff, P.A., 2001. Mutualistic functioning of indigenous arbuscular mycorrhizae in spring barley and winter wheat after cessation of long-term phosphate fertilization. *Mycorrhiza* 10, 195–201.
- Diaz, G., Azcon-Aguilar, C., Honrubia, M., 1996. Influence of arbuscular mycorrhizae on heavy metal (Zn and Pb) uptake and growth of *Lygeum spartum* and *Anthyllis cytisoides*. *Plant Soil* 180, 241–249.
- Diedhiou, P.M., Oerke, E.C., Dehne, H.W., 2004. Effects of the strobilurin fungicides azoxystrobin and kresoxim-methyl on arbuscular mycorrhiza. *Z. Pflanzenk. Pflanzenz.* 111, 545–556.
- Dodd, J.C., Jeffries, P., 1986. Early development of vesicular-arbuscular mycorrhizas in autumn sown cereals. *Soil Biol. Biochem.* 8, 149–154.
- Douds, D.D., Janke, R.R., Peters, S.E., 1993. VAM fungus spore populations and colonization of roots of maize and soybean under conventional and low-input sustainable agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* 43, 325–335.
- Douds, D.D., Galvez, L., Janke, R.R., Wagoner, P., 1995. Effect of tillage and farming system upon populations and distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Agric. Ecosyst. Environ.* 52, 111–118.
- Douds, D.D., Galvez, L., Franke-Snyder, M., Reider, C., Drinkwater, L.E., 1997. Effect of compost addition and crop rotation point upon VAM fungi. *Agric. Ecosyst. Environ.* 65, 257–266.
- Douds, D.D., Nagahashi Jr., G., Pfeffer, P.E., Kayser, W.M., Reider, C., 2005. On-farm production and utilisation of arbuscular mycorrhizal fungus inoculum. *Can. J. Plant Sci.* 85, 15–21.
- Douds, D.D., Reider, C., 2003. Inoculation with mycorrhizal fungi increases the yield of green peppers in a high P soil. *Biol. Agric. Hortic.* 2, 91–102.
- Douds, D.D., Schenck, N.C., 1990. Increased sporulation of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi by manipulation of nutrient regimens. *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 413–418.
- Eason, W.R., Scullion, J., Scott, E.P., 1999. Soil parameters and plant responses associated with arbuscular mycorrhizas from contrasting grassland management regimes. *Agric. Ecosyst. Environ.* 73, 245–255.
- Evans, D.G., Miller, M.H., 1988. Vesicular-arbuscular mycorrhizas and the soil-disturbance-induced reduction of nutrients absorption in maize. 1. Causal relations. *New Phytol.* 110, 67–74.
- Evans, D.G., Miller, M.H., 1990. The role of the external mycelial network in the effect of soil disturbance upon vesicular-arbuscular mycorrhizal colonisation of maize. *New Phytol.* 114, 65–71.
- Faber, B.A., Zasoski, R.J., Burau, R.G., Uriu, K., 1990. Zinc uptake by corn as affected by vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Plant Soil* 129, 121–130.
- FAO, 2001. Food and Agriculture Organisation. Summary, Conservation Agriculture, Matching Production with Sustainability, http://www.fao.org/ag/ags/agse/agse_e/general/OBJECT.htm.
- Feldmann, F., Boyle, C., 1998. Concurrent development of arbuscular mycorrhizal colonization and powdery mildew infection on three *Begonia hiemalis* cultivars. *Z. Pflanzenk. Pflanzenz.* 105, 121–129.
- Feng, G., Zhang, F.S., Li, X.L., Tian, C.Y., Tang, C., Rengel, Z., 2002. Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars in roots. *Mycorrhiza* 12, 185–190.
- Filion, M., St.-Arnaud, M., Fortin, J.A., 1999. Direct interaction between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and different rhizosphere microorganisms. *New Phytol.* 141, 525–533.
- Fitter, A.H., 2001. Specificity links and networks in the control of diversity in plant and microbial communities. In: Press, M.C., Huntly, N.J., Levin, S. (Eds.), *Ecology, Achievement and Challenge*. Blackwell, Oxford, UK, pp. 95–114.
- Fitter, A.H., Moyersoen, B., 1996. Evolutionary trends in root-microbe symbioses. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 351, 1367–1375.

- Franzluebbers, A.J., Wright, S.F., Stuedemann, J.A., 2000. Soil aggregation and glomalin under pastures in the southern Piedmont, USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1018–1026.
- Galleguillos, C., Aguirre, C., Barea, J.M., Azcon, R., 2000. Growth promoting effect of two *Sinorhizobium meliloti* strains (a wild type and its genetically modified derivative) on a non-legume plant species in specific interaction with two arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Sci.* 159, 57–63.
- Galvez, L., Douds, D.D., Wagoner, P., Longnecker, L.R., Drinkwater, L.E., Janke, R.R., 1995. An overwintering cover crop increases inoculum of VAM fungi in agricultural soil. *Am. J. Altern. Agric.* 10, 152–156.
- Galvez, L., Douds Jr., D.D., Drinkwater, L.E., Wagoner, P., 2001. Effect of tillage and farming system upon VAM fungus populations and mycorrhizas and nutrient uptake of maize. *Plant Soil* 118, 299–308.
- Gange, A.C., Brown, V.K., 2001. All mycorrhizas are not equal. *Trends Ecol. Evol.* 16, 671–672.
- Gange, A.C., Bower, E., Brown, V.K., 2002. Differential effects of insect herbivory on arbuscular mycorrhizal colonization. *Oecologia* 131, 103–112.
- Gange, A.C., Brown, V.K., Aplin, D.M., 2003. Multitrophic links between arbuscular mycorrhizal fungi and insect parasitoids. *Ecol. Lett.* 6, 1051–1055.
- Gange, A.C., Brown, V.K., Aplin, D.M., 2005. Ecological specificity of arbuscular mycorrhizae: evidence from foliar- and seed-feeding insects. *Ecology* 86, 603–611.
- Gange, A.C., West, H.M., 1994. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and foliar-feeding insects in *Plantago lanceolata* L. *New Phytol.* 128, 79–87.
- Ganry, F., Diem, H.G., Wey, J., Dommergues, Y.R., 1985. Inoculation with *Glomus mosseae* improves N₂ fixation by field grown soybeans. *Biol. Fertil. Soil* 1, 15–23.
- García-Romera, I., García-Garrido, J.M., Martín, J., Fracchia, S., Mujica, M.T., Godeas, A., Ocampo, J.A., 1998. Interactions between saprotrophic *Fusarium* strains and arbuscular mycorrhiza of soy bean plants. *Symbiosis* 24, 235–245.
- Gaur, R., Shani, N., Kawaljeet, K., Johri, B.N., Rossi, P., Aragno, M., 2004. Diacetylphloroglucinol-producing pseudomonads do not influence AM fungi in wheat rhizosphere. *Curr. Sci.* 86, 453–457.
- Gavito, M.E., Miller, M.H., 1998a. Changes in mycorrhiza development in maize induced by crop management practices. *Plant Soil* 198, 185–192.
- Gavito, M.E., Miller, M.H., 1998b. Early phosphorus nutrition, mycorrhizae development, dry matter partitioning and yield of maize. *Plant Soil* 199, 177–186.
- Gavito, M.E., Varela, L., 1995. Response of criollo maize to single and mixed-species inocula of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 176, 101–105.
- George, E., Marschner, H., Jakobsen, I., 1995. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in uptake of phosphorus and nitrogen from soil. *Crit. Rev. Biotech.* 15, 257–270.
- Gianinazzi-Pearson, V., Dumas-Gaudot, E., Gollotte, A., Tahiri-Alaouia, A., Gianinazzi, S., 1996. Cellular and molecular defense related root responses to invasion by arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* 133, 45–57.
- Gildon, A., Tinker, P.B., 1983. Interactions of vesicular-arbuscular mycorrhizal infections and heavy metals in plants. II. The effects of infection on uptake of copper. *New Phytol.* 95, 263–268.
- Gosling, P., Shepherd, M., 2005. Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium. *Agric. Ecosyst. Environ.* 105, 425–432.
- Graham, J.H., 2000. Assessing cost of arbuscular mycorrhizal symbiosis in agroecosystems. In: Podila, G.K., Douds, Jr., D.D. (Eds.), *Current Advances in Mycorrhizal Research*. APS Press, St. Paul, NM, pp. 127–140.
- Habte, M., Zhang, Y.C., Schmitt, D.P., 1999. Effectiveness of *Glomus* species in protecting white clover against nematode damage. *Can. J. Bot.* 77, 135–139.
- Håkansson, S., 2003. *Weeds and Weed Management on Arable Land—An Ecological Approach*. CABI Publishing, UK.
- Hamel, C., Dalpé, Y., Furlan, V., Parent, S., 1997. Indigenous populations of arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregate stability are major determinants of leek (*Allium porrum* L.) response to inoculation with *Glomus intraradices* Schenck & Smith or *Glomus versiforme* (Karsten) Berch. *Mycorrhiza* 7, 187–196.
- Hamel, C., Dalpé, Y., Lapierre, C., Simard, R.R., Smith, D.L., 1994. Composition of the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi population in an old meadow as affected by pH, phosphorus and soil disturbance. *Agric. Ecosyst. Environ.* 49, 223–231.
- Hamilton, M.A., Westermann, D.T., James, D.W., 1993. Factors affecting zinc uptake in cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 1310–1315.
- Harrier, L.A., Watson, C.A., 2004. The potential role of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the bioprotection of plants against soil-borne pathogens in organic and/or other sustainable farming systems. *Pest Manage. Sci.* 60, 149–157.
- Harinikumar, K.M., Bagyaraj, D.J., 1988. Effect of crop rotation on native vesicular-arbuscular mycorrhizae in soil. *Plant Soil* 110, 77–80.
- Harinikumar, K.M., Bagyaraj, D.J., 1989. Effect of cropping sequence, fertilizers and farmyard manure on vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in different crops over three consecutive seasons. *Biol. Fertil. Soil* 7, 173–175.
- Harinikumar, K.M., Bagyaraj, D.J., 1996. Persistence of introduced *Glomus intraradices* in the field as influenced by repeated inoculation and cropping system. *Biol. Fertil. Soil* 21, 184–188.
- Hedlund, K., 2002. Soil microbial community structure in relation to vegetation management on former agricultural land. *Soil Biol. Biochem.* 34, 1299–1307.
- Hedlund, K., Gormsen, D., 2002. Mycorrhizal colonization of plants in set-aside agricultural land. *Appl. Soil Ecol.* 19, 71–78.
- Helgason, T., Daniell, T.J., Husband, R., Fitter, A.H., Young, J.P.W., 1998. Ploughing up the wood-wide web? *Nature* 394, 431.
- Hernández, G., Cuenca, G., García, A., 2000. Behaviour of arbuscular-mycorrhizal fungi on *Vigna luteola* growth and its effect on the exchangeable (³²P) phosphorus of soil. *Biol. Fertil. Soil* 31, 232–236.
- Hetrick, B.A.D., Wilson, G.W.T., Cox, T.S., 1993. Mycorrhizal dependence of modern wheat cultivars and ancestors—a synthesis. *Can. J. Bot.* 71, 512–518.
- Hetrick, B.A.D., Wilson, G.W.T., Todd, T.C., 1996. Mycorrhizal response in wheat cultivars, relationship to phosphorus. *Can. J. Bot.* 74, 19–25.
- Hodge, A., 2000. Microbial ecology of the arbuscular mycorrhiza. *FEMS Microbiol. Ecol.* 32, 91–96.
- Hodge, A., Campbell, C.D., Fitter, A.H., 2001. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. *Nature* 413, 297–299.
- Hwang, S.F., Chakravarty, P., Prevost, D., 1993. Effects of rhizobia, metalaxyl, and VA mycorrhizal fungi on growth, nitrogen-fixation, and development of pythium root-rot of sainfoin. *Plant Dis.* 77, 1093–1098.
- Ibibijen, J., Urquiaga, S., Ismaili, M., Alves, B.J., Boddey, R.M., 1996. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition and nitrogen fixation of three varieties of common beans (*Phaseolus vulgaris*). *New Phytol.* 134, 353–360.
- IFOAM, 1998. *IFOAM Basic standards for Organic Production and Processing*. IFOAM Publications, Germany.
- Izaguirre-Mayoral, M.L., Carballo, O., Carreno, L., de Mejia, M.G., 2000. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, yield, nitrogen, and phosphorus nutrition of nodulating bean varieties in two soil substrates of contrasting fertility. *J. Plant Nutr.* 23, 1117–1133.
- Jaizme-Vega, M.C., Tenoury, P., Pinochet, J., Jaumot, M., 1997. Interactions between the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* and *Glomus mosseae* in banana. *Plant Soil* 196, 27–35.
- Jakobsen, I., Rosendahl, L., 1990. Carbon flow into soil and external hyphae from roots of mycorrhizal cucumber plants. *New Phytol.* 115, 77–83.

- Jansa, J., Mozafar, A., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I.R., Frossard, E., 2002. Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza* 12, 225–234.
- Jansa, J., Mozafar, A., Kuhn, G., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I.R., Frossard, E., 2003. Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots. *Ecol. Appl.* 13, 1164–1176.
- Jasper, D.A., Abbott, L.K., Robson, A.D., 1989a. Soil disturbance reduces the infectivity of external hyphae of VA mycorrhizal fungi. *New Phytol.* 112, 93–99.
- Jasper, D.A., Abbott, L.K., Robson, A.D., 1989b. Hyphae of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus maintain infectivity in dry soil, except when the soil is disturbed. *New Phytol.* 112, 101–107.
- Jasper, D.A., Abbott, L.K., Robson, A.D., 1991. The effect of soil disturbance on vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in soil from different vegetation types. *New Phytol.* 118, 471–476.
- Jasper, D.A., Robson, A.D., Abbott, L.K., 1979. Phosphorus and the formation of vesicular arbuscular mycorrhizas. *Soil Biol. Biochem.* 11, 501–505.
- Jastrow, J.D., Miller, R.M., Lussenhop, J., 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biol. Biochem.* 30, 905–916.
- Jensen, A., Jakobsen, I., 1980. The occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhiza in barley and wheat grown in some Danish soils with different fertiliser treatments. *Plant Soil* 55, 403–414.
- Johansson, J., Paul, L.R., Finlay, R.D., 2004. Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiol. Ecol.* 48, 1–13.
- Johnson, N.C., 1993. Can fertilisation of soil select less mutualistic mycorrhizae? *Ecol. Appl.* 3, 749–757.
- Johnson, N.C., Copeland, P.J., Crookston, R.K., Pflieger, F.L., 1992. Mycorrhizae—possible explanation for yield decline with continuous corn and soybean. *Agron. J.* 84, 387–390.
- Johnson, D., Leake, J.R., Ostle, N., Ineson, P., Read, D.J., 2002. In situ ¹³C₂ pulse-labelling of upland grassland demonstrates a rapid pathway of carbon flux from arbuscular mycorrhizal mycelia to the soil. *New Phytol.* 153, 327–334.
- Joner, E.J., 2000. The effect of long-term fertilization with organic or inorganic fertilizers on mycorrhiza-mediated phosphorus uptake in subterranean clover. *Biol. Fertil. Soil* 32, 435–440.
- Jordan, N.R., Zhang, J., Huerd, S., 2000. Arbuscular-mycorrhizal fungi, potential roles in weed management. *Weed Res.* 40, 397–410.
- Jumpponen, A., Trowbridge, J., Mandyam, K., Johnson, L., 2005. Nitrogen enrichment causes minimal changes in arbuscular mycorrhizal colonisation but shifts community composition—evidence from rDNA data. *Biol. Fertil. Soil* 41, 217–224.
- Kabir, Z., 2005. Tillage or no-tillage: impact on mycorrhizae. *Can. J. Plant Sci.* 85, 23–29.
- Kabir, Z., Koide, R.T., 2000. The effect of dandelion or a cover crop on mycorrhiza inoculum potential, soil aggregation and yield of maize. *Agric. Ecosyst. Environ.* 78, 167–174.
- Kabir, Z., O'Halloran, I.P., Hamel, C., 1997. Overwinter survival of arbuscular mycorrhizal hyphae is favored by attachment to roots but diminished by disturbance. *Mycorrhiza* 7, 197–200.
- Kabir, Z., O'Halloran, I.P., Hamel, C., 1999. Combined effects of soil disturbance and fallowing on plant and fungal components of mycorrhizal corn (*Zea mays* L.) *Soil Biol. Biochem.* 31, 307–314.
- Kabir, Z., O'Halloran, I.P., Fyles, J.W., Hamel, C., 1998. Dynamics of the mycorrhizal symbiosis of corn (*Zea mays* L.), effects of host physiology, tillage practice and fertilization on spatial distribution of extra-radical mycorrhizal hyphae in the field. *Agric. Ecosyst. Environ.* 68, 151–163.
- Kahiluoto, H., Ketoja, E., Vestberg, M., 2000. Creation of a non-mycorrhizal control for a bioassay of AM effectiveness. 1. Comparison of methods. *Mycorrhiza* 9, 241–258.
- Kahiluoto, H., Ketoja, E., Vestberg, M., Saarela, I., 2001. Promotion of AM utilization through reduced P fertilization. 2. Field studies. *Plant Soil* 231, 65–79.
- Kahiluoto, H., Vestberg, M., 1998. The effect of arbuscular mycorrhiza on biomass production and phosphorus uptake from sparingly soluble sources by leek (*Allium porrum* L.) in Finnish field soils. *Biol. Agric. Hortic.* 16, 65–85.
- Kahiluoto, H., Vestberg, M., Olesen, J.E., Eltun, R., Gooding, M.J., Jensen, E.S., Kopke, U., 1999. Impact of cropping systems of mycorrhizae. In: *Designing and Testing Crop Rotations for Organic Farming. Proceedings from an International Workshop Danish Centre for Organic Farming (DAECOF)*, Tjele, Denmark, pp. 305–309.
- Karagiannidis, N., Bletsos, F., Stavropoulos, N., 2002. Effect of *Verticillium* wilt (*Verticillium dahliae* Kleb.) and mycorrhiza (*Glomus mosseae*) on root colonization, growth and nutrient uptake in tomato and eggplant seedlings. *Sci. Hortic.* 94, 145–156.
- Karasawa, T., Kasahara, Y., Takebe, M., 2002. Differences in growth responses of maize to preceding cropping caused by fluctuation in the population of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* 34, 851–857.
- Kasiandari, R.S., Smith, S.E., Smith, F.A., Scott, E.S., 2002. Influence of the mycorrhizal fungus, *Glomus coronatum*, and soil phosphorus on infection and disease caused by binucleate *Rhizoctonia* and *Rhizoctonia solani* on mung bean (*Vigna radiata*). *Plant Soil* 238, 235–244.
- Khalil, S., Loynachan, T.E., McNabb, H.S., 1992. Colonization of soybean by mycorrhizal fungi and spore populations in Iowa soils. *Agron. J.* 84, 832–836.
- Khalil, S., Sanders, F.E., 2000. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation on the yield and phosphorus uptake of field-grown barley. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1691–1696.
- Kjøller, R., Rosendahl, S., 1996. The presence of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* influences enzymatic activities of the root pathogen *Aphanomyces euteiches* in pea roots. *Mycorrhiza* 6, 487–491.
- Klironomos, J.N., 2003. Variation in plant response to native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecology* 84, 2292–2301.
- Klironomos, J.N., Hart, M.M., 2002. Colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi using different sources of inoculum. *Mycorrhiza* 12, 181–184.
- Koch, M., Tanami, Z., Bodani, H., Wininger, S., Kapulnik, Y., 1997. Field application of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi improved garlic yield in disinfected soil. *Mycorrhiza* 7, 47–50.
- Kogelmann, W.J., Lin, H.S., Bryant, R.B., Beege, D.B., Wolf, A.M., Petersen, G.W., 2004. A statewide assessment of the impacts of phosphorus-index implementation in Pennsylvania. *J. Soil Water Conserv.* 59, 9–18.
- Koide, R., 1991. Nutrient supply, nutrient demand and plant-response to mycorrhizal infection. *New Phytol.* 117, 365–386.
- Koide, R.T., Goff, M.D., Dickie, I.A., 2000. Component growth efficiencies of mycorrhizal and nonmycorrhizal plants. *New Phytol.* 148, 163–168.
- Kothari, S.K., Marschner, H., Römheld, V., 1990. Direct and indirect effects of VA mycorrhizal fungi and rhizosphere micro-organisms on acquisition of mineral nutrients by maize (*Zea mays* L.) in a calcareous soil. *New Phytol.* 116, 637–645.
- Kothari, S.K., Marschner, H., Römheld, V., 1991a. Contribution of the VA mycorrhizal hyphae in acquisition of phosphorus and zinc by maize grown in calcareous soil. *Plant Soil* 131, 177–185.
- Kothari, S.K., Marschner, H., Römheld, V., 1991b. Effect of a vesicular arbuscular mycorrhizal fungus and rhizosphere micro-organisms on manganese reduction in the rhizosphere and manganese concentrations in maize (*Zea mays* L.) *New Phytol.* 117, 649–655.
- Kouwenhoven, J.K., Perdok, U.D., Boer, J., Oomen, G.J.M., 2002. Soil management by shallow mouldboard ploughing in The Netherlands. *Soil Tillage Res.* 65, 125–139.
- Kurl, J.E., Pflieger, F.L., 1994. The effects of cultural practices and pesticides on VAM fungi. In: *Pflieger, F.L., Linderman, R.G. (Eds.), Mycorrhizae and Plant Health*. APS Press, Minnesota, pp. 101–132.

- Lambert, D.H., Baker, D.J., Cole Jr., H., 1979. The role of mycorrhizae in the interactions of phosphorus with zinc, copper and other elements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, 976–980.
- Lampkin, N., 1990. *Organic Farming*. Farming Press Books, Ipswich, UK.
- Lerat, S., Lapointe, L., Piché, Y., Vierheilig, H., 2003. Variable carbon-sink strength of different *Glomus mosseae* strains colonizing barley roots. *Can. J. Bot.* 81, 886–889.
- Li, X.L., Marschner, H., George, E., 1991. Acquisition of phosphorus and copper by VA-mycorrhizal hyphae and root-to-shoot transport in white clover. *Plant Soil* 136, 49–57.
- Linderman, R., 1988. Mycorrhizal interactions with the rhizosphere microflora: the mycorrhizosphere effect. *Phytopathology* 78, 366–371.
- Linderman, R.G., 1994. Role of VAM in biocontrol. In: Pflieger, F.L., Linderman, R.G. (Eds.), *Mycorrhizae and Plant Health*. APS Press, St. Paul, NM, USA, pp. 1–26.
- Lingua, G., D'Agostino, G., Massa, N., Antosiano, M., Berta, G., 2002. Mycorrhiza-induced differential response to a yellows disease in tomato. *Mycorrhiza* 12, 191–198.
- Liu, A., Hamel, C., Hamilton, R.I., Ma, B.L., Smith, D.L., 2000. Acquisition of Cu, Zn, Mn and Fe by mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in soil at different P and micronutrient levels. *Mycorrhiza* 9, 331–336.
- Mäder, P., Edenhofer, S., Boller, T., Wiemken, A., Niggli, U., 2000. Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation. *Biol. Fert. Soil* 31, 150–156.
- Manske, G.G.B., 1990. Genetic-analysis of the efficiency of VA mycorrhiza with spring wheat. *Agric. Ecosyst. Environ.* 29, 273–280.
- Martensson, A.M., Carlgrén, K., 1994. Impact of phosphorus fertilization on VAM diaspores in 2 Swedish long-term field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 47, 327–334.
- Matsubara, Y., Hasegawa, N., Fukui, H., 2002. Incidence of Fusarium root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 71, 370–374.
- Matsubara, Y., Kayukawa, Y., Yano, M., Fukui, H., 2000. Tolerance of asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus to violet root rot caused by *Helicobasidium mompa*. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 69, 552–556.
- Matsubara, Y., Ohba, N., Fukui, H., 2001. Effect of arbuscular mycorrhizal fungus infection on the incidence of fusarium root rot in asparagus seedlings. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 70, 202–206.
- McGonigle, T.P., Miller, M.H., 1993. Mycorrhizal development and phosphorus absorption in maize under conventional and reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 1002–1006.
- McGonigle, T.P., Evans, D.G., Miller, M.H., 1990. Effect of degree of soil disturbance on mycorrhizal colonisation and phosphorus absorption by maize in growth chambers and field experiments. *New Phytol.* 116, 629–636.
- Menéndez, A.B., Scervino, J.M., Godeas, A.M., 2001. Arbuscular mycorrhizal populations associated with natural and cultivated vegetation on a site of Buenos Aires province, Argentina. *Biol. Fert. Soil* 33, 373–381.
- Miller, M.H., 2000. Arbuscular mycorrhizae and the phosphorus nutrition of maize. A review of the Guelph studies. *Can. J. Plant Sci.* 80, 47–52.
- Miller, R.L., Jackson, L.E., 1998. Survey of vesicular-arbuscular mycorrhizae in lettuce production in relation to management and soil factors. *J. Agric. Sci.* 130, 173–182.
- Miller, R.M., Reinhardt, D.R., Jastrow, J.D., 1995. External hyphal production of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities. *Oecologia* 103, 17–23.
- Mohammad, M.J., Malkawi, H.I., Shibli, R., 2003. Effects of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization on growth and nutrient uptake of barley grown on soils with different levels of salts. *J. Plant Nutr.* 26, 125–137.
- Mohammad, A., Mitra, B., Khan, A.G., 2004. Effects of sheared-root inoculum of *Glomus intraradices* on wheat grown at different phosphorus levels in the field. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103, 245–249.
- Monzon, A., Azcon, R., 1996. Relevance of mycorrhizal fungal origin and host plant genotype to inducing growth and nutrient uptake in *Medicago* species. *Agric. Ecosyst. Environ.* 60, 9–15.
- Morschel, J., Fox, D.M., Bruno, J.F., 2004. Limiting sediment deposition on roadways, topographic controls on vulnerable roads and cost analysis of planting grass buffer strips. *Environ. Sci. Policy* 7, 39–45.
- Mozafar, A., Anken, T., Ruh, R., Frossard, E., 2000. Tillage intensity, mycorrhizal and non-mycorrhizal fungi, and nutrient concentrations in maize, wheat, and canola. *Agron. J.* 92, 1117–1124.
- Mulligan, M.F., Smucker, A.J.M., Safir, G.F., 1985. Tillage modifications of dry edible bean root colonisation by VAM fungi. *Agron. J.* 77, 140–144.
- Munkvold, L., Kjøller, R., Vestberg, M., Rosendahl, S., Jakobsen, I., 2004. High functional diversity within species of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* 164, 357–364.
- Nagesh, M., Reddy, P.P., Kumar, M.V.V., Nagaraju, B.M., 1999. Studies on correlation between *Glomus fasciculatum* spore density, root colonization and *Meloidogyne incognita* infection on *Lycopersicon esculentum*. *Z. Pflanzenk. Pflanzenz.* 106, 82–87.
- Newman, E.I., Reddell, P., 1987. The distribution of mycorrhizas among the families of vascular plants. *New Phytol.* 106, 745–751.
- Newsham, K.K., Fitter, A.H., Watkinson, A.R., 1995. Multi-functionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. *Trends Ecol. Evol.* 10, 407–411.
- Norman, J.R., Hooker, J.E., 2000. Sporulation of *Phytophthora fragariae* shows greater stimulation by exudates of nonmycorrhizal than by mycorrhizal strawberry roots. *Mycol. Res.* 104, 1069–1073.
- Nurlaeny, N., Marschner, H., George, E., 1996. Effects of liming and mycorrhizal colonization on soil phosphate depletion and phosphate uptake by maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.) grown in two tropical acid soils. *Plant Soil* 181, 275–285.
- Ocampo, J.A., Hayman, D.S., 1981. Influence of plant interactions on vesicular-arbuscular mycorrhizal infections. II. Crop rotations and residual effects of non-host plants. *New Phytol.* 87, 333–343.
- O'Connor, P.J., Smith, S.E., Smith, F.A., 2002. Arbuscular mycorrhizas influence plant diversity and community structure in a semiarid herbland. *New Phytol.* 154, 209–218.
- Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mader, P., Boller, T., Wiemken, A., 2003. Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of central Europe. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 2816–2824.
- Oehl, F., Sieverding, E., Mader, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., Wiemken, A., 2004. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia* 138, 574–583.
- O'Halloran, I.P., Miller, M.H., Arnold, G., 1986. Absorption of P by corn (*Zea mays* L.) as influenced by soil disturbance. *Can. J. Soil Sci.* 66, 287–302.
- Olsson, P.A., Thingstrup, I., Jakobsen, I., Baath, F., 1999. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1879–1887.
- Ortas, I., Ortakci, D., Kaya, Z., 2002. Various mycorrhizal fungi propagated on different hosts have different effect on citrus growth and nutrient uptake. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33, 259–272.
- Pande, M., Tarafdar, J.C., 2002. Effect of phosphorus, salinity and moisture on VAM fungal association in neem (*Azadirachta indica* L.). *Symbiosis* 32, 195–209.
- Pasolon, Y.B., Hirata, H., Barrow, N.J., 1993. Effect of white clover (*Trifolium repens* L.) intercropping on growth and nutrient uptake of upland rice (*Oryza sativa* L.) in relation to VA-mycorrhizae and soil fertility. *Dev. Plant Soil Sci.* 54, 331–334.
- Pattinson, G.S., Warton, D.I., Misman, R., McGee, P.A., 1997. The fungicides Terrazole and Terraclor and the nematicide Fenamiphos have little effect on root colonisation by *Glomus mosseae* and growth of cotton seedlings. *Mycorrhiza* 7, 155–159.
- Paulitz, T.C., Linderman, R.G., 1991. Mycorrhizal interactions with soil organisms. In: Arora, D.K., Rai, B., Mukerji, K.G., Knudsen, G. (Eds.), *Handbook of Applied Mycology*. Dekker, New York, pp. 77–129.

- Perrin, R., Plenchette, C., 1993. Effect of some fungicides applied as soil drenches on the mycorrhizal infectivity of 2 cultivated soils and their receptiveness to *Glomus-intraradices*. *Crop Prot.* 12, 127–133.
- Piotrowski, J.S., Denich, T., Klironomos, J.N., Graham, J.M., Rillig, M.C., 2004. The effects of arbuscular mycorrhizas on soil aggregation depend on the interaction between plant and fungal species. *New Phytol.* 164, 365–373.
- Powell, C.L., 1982. Effect of kale and mustard crops on response of white clover to VAM inoculation in pot trial. *N. Z. J. Agric. Res.* 25, 461–464.
- Pozo, M.J., Cordier, C., Dumas-Gaudot, E., Gianinazzi, S., Barea, J.M., Azcón-Aguilar, C., 2002. Localized versus systemic effect of arbuscular mycorrhizal fungi on defence responses to *Phytophthora* infection in tomato plants. *J. Exp. Bot.* 53, 525–534.
- Prados-Ligero, A.M., Bascon-Fernandez, J., Calvet-Pinos, C., Corpas-Hervias, C., Ruiz, A.L., Melero-Vara, J.M., Basallote-Ureba, M.J., 2002. Effect of different soil and clove treatments in the control of white rot of garlic. *Ann. Appl. Biol.* 140, 247–253.
- Quine, T.A., Basher, L.R., Nicholas, A.P., 2003. Tillage erosion intensity in the South Canterbury Dowlands, New Zealand. *Aust. J. Soil Res.* 41, 789–807.
- Ravnskov, S., Larsen, J., Jakobsen, I., 2002. Phosphorus uptake of an arbuscular mycorrhizal fungus is not effected by the biocontrol bacterium *Burkholderia cepacia*. *Soil Biol. Biochem.* 34, 1875–1881.
- Read, D.J., Koucheki, H.K., Hodgson, J., 1976. Vesicular-arbuscular mycorrhizas in natural vegetation systems. I. The occurrence of infection. *New Phytol.* 77, 641–653.
- Read, D.J., Perez-Moreno, J., 2003. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems—a journey towards relevance? *New Phytol.* 157, 475–492.
- Requena, N., Jimenez, I., Toro, M., Barea, J.M., 1997. Interactions between plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR), arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* spp. in the rhizosphere of *Anthyllis cytisoides*, a model legume for revegetation in Mediterranean semi-arid ecosystems. *New Phytol.* 136, 667–677.
- Rew, L.J., Froud-Williams, R.J., Boatman, N.D., 1996. Dispersal of *Bromus sterilis* and *Anthriscus sylvestris* seed within arable field margins. *Agric. Ecosyst. Environ.* 59, 107–114.
- Rillig, M.C., 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Can. J. Soil Sci.* 84, 355–363.
- Rillig, M.C., Field, C.B., Allen, M.F., 1999. Soil biota responses to long-term atmospheric CO₂ enrichment in two California annual grasslands. *Oecologia* 119, 572–577.
- Rillig, M.C., Maestre, F.T., Lamit, L.J., 2003. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin, and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes. *Soil Biol. Biochem.* 35, 1257–1260.
- Rillig, M.C., Wright, S.F., Nichols, K.A., Schmidt, W.F., Torn, M.S., 2001. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant Soil* 233, 167–177.
- RuizLozano, J.M., Azcon, R., 1995. Hyphal contribution to water uptake in mycorrhizal plants as affected by the fungal species and water status. *Physiol. Plant.* 95, 472–478.
- Ryan, M.H., Angus, J.F., 2003. Arbuscular mycorrhizae in wheat and field pea crops on a low P soil, increased Zn-uptake but no increase in P-uptake or yield. *Plant Soil* 250, 225–239.
- Ryan, M.H., Ash, J., 1996. Colonisation of wheat in southern New South Wales by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi is significantly reduced by drought. *Aust. J. Exp. Agric.* 36, 563–569.
- Ryan, M.H., Ash, J., 1999. Effects of phosphorus and nitrogen on growth of pasture plants and VAM fungi in SE Australian soils with contrasting fertiliser histories (conventional and biodynamic). *Agric. Ecosyst. Environ.* 73, 51–62.
- Ryan, M.H., Graham, J.H., 2002. Is there a role for arbuscular mycorrhizal fungi in production agriculture? *Plant Soil* 244, 263–271.
- Ryan, M.H., Chilvers, G.A., Dumaresq, D.C., 1994. Colonisation of wheat by VA-mycorrhizal fungi was found to be higher on a farm managed in an organic manner than on a conventional neighbour. *Plant Soil* 160, 33–40.
- Ryan, M.H., Derrick, J.W., Dann, P.R., 2004. Grain mineral concentrations and yield of wheat grown under organic and conventional management. *J. Sci. Food Agric.* 84, 207–216.
- Ryan, M.H., N/orton, R.M., Kirkegaard, J.A., McCormick, K.M., Knights, S.E., Angus, J.F., 2002. Increasing mycorrhizal colonisation does not improve growth and nutrition of wheat on vertosols in south-eastern Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 53, 1173–1181.
- Ryan, M.H., Small, D.R., Ash, J.E., 2000. Phosphorus controls the level of colonisation by arbuscular mycorrhizal fungi in conventional and biodynamic irrigated dairy pastures. *Aust. J. Exp. Agric.* 40, 663–670.
- Sainz, M.J., Taboada-Castro, M.T., Vilarino, A., 1998. Growth, mineral nutrition and mycorrhizal colonization of red clover and cucumber plants grown in a soil amended with composted urban wastes. *Plant Soil* 205, 85–92.
- Sanders, F.E., Tinker, P.B., 1971. Mechanism of absorption of phosphate from soil by *Endogone* mycorrhizas. *Nature* 233, 278–279.
- Sanders, F.E., Mosse, B., Tinker, P.B., 1975. *Endomycorrhizas*. Academic Press, New York.
- Sano, S.M., Abbott, L.K., Solaiman, M.Z., Robson, A.D., 2002. Influence of liming, inoculum level and inoculum placement on root colonization of subterranean clover. *Mycorrhiza* 12, 285–290.
- Scheublin, T.R., Ridgway, K.P., Young, J.P.W., van der Heijden, M.G.A., 2004. Nonlegumes, legumes, and root nodules harbor different arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Appl. Environ. Microbiol.* 70, 6240–6246.
- Schonbeck, F., 1979. Endomycorrhiza in relation to plant diseases. In: Schippers, B., Glams, W. (Eds.), *Soil Borne Plant Pathogens*. Academic Press, New York, pp. 271–292.
- Schreiner, R.P., Bethlenfalvay, G.J., 1997. Mycorrhizae, biocides, and biocontrol. 3. Effects of three different fungicides on developmental stages of three AM fungi. *Biol. Fertil. Soil* 24, 18–26.
- Schussler, A., Schwarzott, D., Walker, C., 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycol. Res.* 105, 1413–1421.
- Scullion, J., Eason, W.R., Scott, E.P., 1998. The effectivity of arbuscular mycorrhizal fungi from high input conventional and organic grassland and grass-arable rotations. *Plant Soil* 204, 243–254.
- Shetty, K.G., Hetrick, B.A.D., Schwab, A.P., 1995. Effects of mycorrhizae and fertilizer amendments on zinc tolerance of plants. *Environ. Pollut.* 88, 307–314.
- Sjoberg, J., Persson, P., Martensson, A., Mattsson, L., Adholey, A., Alstrom, S., 2004. Occurrence of Glomeromycota spores and some arbuscular mycorrhiza fungal species in arable fields in Sweden. *Acta Agric. Scand. Sec. B Soil Plant Sci.* 54, 202–212.
- Slezack, S., Dumas-Gaudot, E., Rosendahl, S., Kjoller, R., Paynot, M., Negrel, J., Gianinazzi, S., 1999. Endoproteolytic activities in pea roots inoculated with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and/or *Aphanomyces euteiches* in relation to bioprotection. *New Phytol.* 142, 517–529.
- Smith, S.E., Read, D.J., 1997. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, London.
- Sorensen, N., Larsen, J., Jakobsen, I., 2005. Mycorrhiza formation and nutrient concentration in leeks (*Allium porrum*) in relation to previous crop and cover crop management on high P soils. *Plant Soil* 273, 101–114.
- Sreenivasa, M.N., Bagyaraj, D.J., 1989. Use of pesticides for mass production of vesicular mycorrhizal inoculum. *Plant Soil* 119, 127–132.
- Srivastava, A.K., Singh, S., Marathe, R.A., 2002. Organic citrus, soil fertility and plant nutrition. *J. Sustain. Agric.* 19, 5–29.
- Staddon, P.L., Ramsey, C.B., Ostle, N., Ineson, P., Fitter, A.H., 2003. Rapid turnover of hyphae of mycorrhizal fungi determined by AMS microanalysis of C-14. *Science* 300, 1138–1140.
- Stockdale, E.A., Lampkin, N.H., Hovi, M., Keatinge, R., Lennartsson, E.K.M., Macdonald, D.W., Padel, S., Tattersall, F.H., Wolfe, M.S., Watson, C.A., 2001. Agronomic and environmental implications of organic farming systems. *Adv. Agron.* 70, 261–325.

- Stoppler, H., Kolsch, E., Vogtmann, H., 1990. Vesicular-arbuscular mycorrhiza in varieties of winter-wheat in a low external input system. *Biol. Agric. Hortic.* 7, 191–199.
- Subramanian, K.S., Charest, C., 1999. Acquisition of N by external hyphae of an arbuscular mycorrhizal fungus and its impact on physiological responses in maize under drought-stressed and well-watered conditions. *Mycorrhiza* 9, 69–75.
- Subramanian, K.S., Charest, C., 1997. Nutritional, growth, and reproductive responses of maize (*Zea mays* L.) to arbuscular mycorrhizal inoculation during and after drought stress at tasselling. *Mycorrhiza* 7, 25–32.
- Sylvia, D.M., Chellemi, D.O., 2001. Interactions among root-inhabiting fungi and their implications for biological control of root pathogens. *Adv. Agron.* 73, 1–33.
- Talavera, M., Itou, K., Mizukubo, T., 2001. Reduction of nematode damage by root colonization with arbuscular mycorrhiza (*Glomus* spp.) in tomato-*Meloidogyne incognita* (Tylenchida, Meloidognidae) and carrot-*Pratylenchus penetrans* (Tylenchida, Pratylenchidae) pathosystems. *Appl. Entomol. Zool.* 36, 387–392.
- Thingstrup, I., Rubaek, G., Sibbesen, E., Jakobsen, I., 1998. Flax (*Linum usitatissimum* L.) depends on arbuscular mycorrhizal fungi for growth and P uptake at intermediate but not high soil P levels in the field. *Plant Soil* 203, 37–46.
- Thomas, R.S., Dakessian, S., Ames, R.N., Brown, M.S., Bethlenfalvay, G.J., 1986. Aggregation of a silty clay loam soil by mycorrhizal onion roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1494–1499.
- Thompson, J.P., 1987. Decline of vesicular-arbuscular mycorrhizae in long fallow disorder of field crops and its expression in phosphorus deficiency of sunflower. *Aust. J. Agric. Res.* 38, 847–867.
- Thompson, J.P., 1991. Improving the mycorrhizal condition of the soil through cultural practices and effects on growth and phosphorus uptake in plants. In: Johansen, C., Lee, K.K., Sahrawat, K.L. (Eds.), *Phosphorus Nutrition of Grain Legumes in the Semi Arid Tropics*. ICRISAT Publishing, India, pp. 117–137.
- Thompson, J.P., 1994. Inoculation with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi from cropped soil overcomes long-fallow disorder of linseed (*Linum usitatissimum* L.) by improving P and Zn uptake. *Soil Biol. Biochem.* 26, 1133–1143.
- Thomson, B.D., Robson, A.D., Abbott, L.K., 1986. Effects of phosphorus on the formation of mycorrhizas by *Gigaspora calospora* and *Glomus fasciculatum* in relation to root carbohydrates. *New Phytol.* 103, 751–765.
- Tisdall, J.M., 1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Aust. J. Soil Res.* 29, 729–743.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1979. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Aust. J. Soil Res.* 17, 429–441.
- Tisdall, J.M., Smith, S.E., Rengasamy, P., 1997. Aggregation of soil by fungal hyphae. *Aust. J. Soil Res.* 35, 55–60.
- Tommerup, I.C., Abbott, L.K., 1981. Prolonged survival and viability of VA mycorrhizal hyphae after root death. *Soil Biol. Biochem.* 13, 431–433.
- Torres-Barragán, A., Zavale-Tamejia, E., Gonzalez-Chavez, C., Ferrera-Cerrato, R., 1996. The use of arbuscular mycorrhizae to control onion white rot (*Sclerotium cepivorum*) under field conditions. *Mycorrhizae* 6, 253–257.
- Torresen, K.S., Skuterud, R., Tandsaether, H.J., Hagemo, M.B., 2003. Long-term experiments with reduced tillage in spring cereals. I. Effects on weed flora, weed seedbank and grain yield. *Crop Prot.* 22, 185–200.
- Treseder, K.K., Allen, M.F., 2002. Direct nitrogen and phosphorus limitation of arbuscular mycorrhizal fungi, a model and field test. *New Phytol.* 155, 507–515.
- Troeh, Z.I., Loynachan, T.E., 2003. Endomycorrhizal fungal survival in continuous corn, soybean, and fallow. *Agron. J.* 95, 224–230.
- Tsara, M., Gerontidis, S., Marathanou, M., Kosmas, C., 2001. The longterm effect of tillage on soil displacement of hilly areas used for growing wheat in Greece. *Soil Use Manage.* 17, 113–120.
- Tsimilli-Michael, M., Eggenberg, P., Biro, B., Koves-Pechy, K., Voros, I., Strasser, R.J.S., 2000. Synergistic and antagonistic effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Azospirillum* and *Rhizobium* nitrogen-fixers on the photosynthetic activity of alfalfa, probed by the polyphasic chlorophyll a fluorescence transient O-J-I-P. *Appl. Soil Ecol.* 15, 169–182.
- Udaiyan, K., Greep, S., Muthukumar, T., Chitra, A., 1999. Effect of fumigation and pesticide drenches on VAM status and growth in cereals. *J. Environ. Biol.* 20, 167–175.
- Vaast, P., Caswell-Chen, E.P., Zasoski, R.J., 1998. Influences of a root-lesion nematode, *Pratylenchus coffeae*, and two arbuscular mycorrhizal fungi, *Acaulospora mellea* and *Glomus clarum* on coffee (*Coffea arabica* L.) *Biol. Fertil. Soil* 26, 130–135.
- Vandenkoornhuise, P., Ridgway, K.P., Watson, I.J., Fitter, A.H., Young, J.P.W., 2003. Co-existing grass species have distinctive arbuscular mycorrhizal communities. *Mol. Ecol.* 12, 3085–3095.
- van der Heijden, M.G.A., 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi as determinant of plant diversity, in search for underlying mechanisms and general principles. In: van der Heijden, M.G.A., Sanders, I.R. (Eds.), *Mycorrhizal Ecology, Ecological Studies*, vol. 157. Springer Verlag, Berlin, Germany, pp. 243–265.
- van der Heijden, M.G.A., Klironomos, J.N., Ursic, M., Moutoglis, P., Streitwolf-Engel, R., Boller, T., Wiemken, A., Sanders, I.R., 1998a. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* 396, 69–72.
- van der Heijden, M.G.A., Boller, T., Wiemken, A., Sanders, I.R., 1998b. Different arbuscular mycorrhizal fungal species are potential determinants of plant community structure. *Ecology* 79, 2082–2091.
- van der Heijden, M.G.A., Wiemken, A., Sanders, I.R., 2003. Different arbuscular mycorrhizal fungi alter coexistence and resource distribution between co-occurring plant. *New Phytol.* 157, 569–578.
- van Muysen, W., Govers, G., 2002. Soil displacement and tillage erosion during secondary tillage operations, the case of rotary harrow and seeding equipment. *Soil Tillage Res.* 65, 185–191.
- Vázquez, M.M., Barera, J.M., Azcón, R., 2002. Influence of arbuscular mycorrhizae and a genetically modified strain of *Sinorhizobium* on growth, nitrate reductase activity and protein content in shoots and roots of *Medicago sativa* as affected by nitrogen concentrations. *Soil Biol. Biochem.* 34, 899–905.
- Veeraswamy, J., Padmavathi, T., Venkateswarlu, K., 1993. Effect of selected insecticides on plant-growth and mycorrhizal development in sorghum. *Agric. Ecosyst. Environ.* 43, 337–343.
- Vicari, M., Hatcher, P.E., Ayres, P.G., 2002. Combined effect of foliar and mycorrhizal endophytes on an insect herbivore. *Ecology* 83, 2452–2464.
- Vigo, C., Norman, J.R., Hooker, J.E., 2000. Biocontrol of *Phytophthora parasitica* by arbuscular mycorrhizal fungi is a consequence of effects on infection loci. *Plant Pathol.* 49, 509–514.
- von Reichenbach, H.G., Schonbeck, F., 1995. Influence of VA-mycorrhiza on drought tolerance of flax (*Linum usitatissimum* L.). 2. Effect of VA-mycorrhiza on stomatal gas exchange, shoot water potential, phosphorus nutrition and the accumulation of stress metabolites. *J. Appl. Bot.* 69, 183–188.
- Vosatka, M., 1995. Influence of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and mycorrhizal infection of transplanted onion. *Agric. Ecosyst. Environ.* 53, 151–159.
- Waceke, J.W., Waudu, S.W., Sikora, R., 2002. Effect of inorganic phosphatic fertilizers on the efficacy of an arbuscular mycorrhiza fungus against a root-knot nematode on pyrethrum. *Int. J. Pest Manage.* 48, 307–313.
- Wang, G.M., Stribley, D.P., Tinker, P.B., Walker, C., 1993. Effects of pH on arbuscular mycorrhiza. 1. Field observations on the long-term liming experiments at Rothamsted and Woburn. *New Phytol.* 124, 465–472.
- Warner, N.J., Allen, M.F., Macmahon, J.A., 1987. Dispersal agents of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in a disturbed arid ecosystem. *Mycologia* 79, 721–730.
- Wellings, N.P., Wearing, A.H., Thompson, J.P., 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhizae (VAM) improve phosphorus and zinc nutrition and growth of pigeonpea in a vertisol. *Aust. J. Agric. Res.* 42, 835–845.

- West, H.M., 1995. Soil phosphate status modifies response of mycorrhizal and nonmycorrhizal *Senecio-vulgaris* L. to infection by the rust, *Puccinia-lagenophorae* Cooke. *New Phytol.* 129, 107–116.
- Whipps, J.M., 2004. Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Can. J. Bot.* 82, 1198–1227.
- Withers, P.J.A., Edwards, A.C., Foy, R.H., 2001. Phosphorus cycling in UK agriculture and implications for phosphorus loss from soil. *Soil Use Manage.* 17, 139–149.
- Wright, S.F., Anderson, R.L., 2000. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains. *Biol. Fertil. Soil* 31, 249–253.
- Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198, 97–107.
- Xavier, L.J.C., Germida, J.J., 1997. Growth response of lentil and heat to *Glomus clarum* NT4 over a range of P levels in a Saskatchewan soil containing indigenous AM fungi. *Mycorrhiza* 7, 3–8.
- Yano, K., Yamauchi, A., Kono, Y., 1996. Localized alteration in lateral root development in roots colonized by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Mycorrhiza* 6, 409–415.

Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes



Survol de la bibliographie actuelle – Résumé

Editeurs: Jacques G. Fuchs, Markus Bieri, Marc Chardonens

Publié par



Sur mandat de



Bundesamt für Landwirtschaft
Office fédéral de l'agriculture
Ufficio federale dell'agricoltura
Uffizi federal d'agricoltura



Jacques G. Fuchs, Markus Bieri, Marc Chardonnens (Editeurs.)

Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes. Survol de la bibliographie actuelle

= Résumé de l'étude bibliographique:

Jacques G. Fuchs, Markus Bieri, Marc Chardonnens (Editeurs.) (2004) Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit. Zusammenfassende Übersicht der aktuellen Literatur. Forschungsinstitut für biologischen Landbau, FiBL-Report, Frick, Schweiz ISBN 3-906081-52-4. <http://orgprints.org/2631/>. L'étude complète en allemand peut être commandée pour 25 francs suisses (+ frais d'envoi) auprès du FiBL (numéro de commande FiBL: 1336). Voir aussi: la boutique de FiBL, adresse internet: <http://www.fibl.org/francais/shop/index.php>

Auteurs:

- Alfred Berner, FiBL, CH-Frick
- Markus Bieri, Ecobel GmbH, CH-Rüschlikon
- Ulrich Galli, TerraNova - Conseils en environnement Sàrl, CH-Breitenbach
- Jacques G. Fuchs, FiBL, CH-Frick
- Jochen Mayer, FAL, CH-Zürich
- Konrad Schleiss, Conseils en environnement et compostage, CH-Grenchen

Sur mandat de

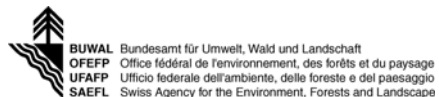


Table des Matières

1 Résumé de la revue de la littérature actuelle	3
1.1 Législation et standards internationaux	3
1.2 Influence de l'application du compost en agriculture sur les paramètres physiques et chimiques du sol	3
1.3 Influence de l'utilisation du compost sur la nutrition et la croissance des plantes	6
1.4 Influence du compost sur les organismes du sol	7
1.5 Influence de l'utilisation du compost sur la santé des plantes	10
9.6 Conclusions	16

1 Résumé de la revue de la littérature actuelle

1.1 Législation et standards internationaux

En Suisse, seules les valeurs limites pour les métaux lourds et les modalités de remise du compost et du digestat sont réglementées explicitement (Ordonnance sur les substances). On distingue entre les *engrais de ferme* provenant d'installations pratiquant la garde d'animaux, sous forme traitée ou non traitée, et les *engrais de recyclage*, d'origine végétale, animale, microbienne ou minérale.

Le compost, digestat et eau de pressage ne peuvent être remis à des tiers que si les valeurs limites suivantes (en g/t MS) ne sont pas dépassées: *plomb (Pb)* 120, *cadmium (Cd)* 1, *cuivre (Cu)* 100, *nickel (Ni)* 30, *mercure (Hg)* 1, *zinc (Zn)* 400, *hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)* 4, *dioxines (PCDD)* et *furanes (PCDF)* 0.20.

Ainsi, les valeurs limites suisses comptent parmi les plus sévères de la zone européenne. Elles garantissent de ce fait que seules des matières premières biodégradables collectées séparément peuvent être employées. Les USA par contre tolèrent des taux de polluants environ 20 fois plus élevés. Le débat se concentre là sur certains herbicides difficilement dégradables (comme par exemple le Chlorpyralide et le Picloram).

En Suisse, les engrais azotés ne peuvent être épandus que pendant les périodes où les plantes absorbent l'azote. Pour les engrais liquides le sol doit aussi être apte à les retenir et à les accumuler. Pour les engrais de recyclage, l'épandage maximum autorisé sur trois ans est de 25 t MS de compost ou de digestats, ou de 100 m³ de jus de pressage, par hectare. Sur dix ans, il n'est en outre pas permis d'utiliser plus de 100 t MS de compost ou de digestats.

Les exigences en matière d'hygiène sont actuellement en révision. Les températures minimales exigées durant une période déterminée varient peu d'un pays européen à l'autre. En Suisse, on exige une température supérieure à 55°C pendant 3 semaines, alors que la plupart des pays ne prévoient que 2 semaines.

La production de compost en Suisse est financée principalement par les taxes de réception des biodéchets. Du point de vue de l'optimisation des bénéfices, ceci n'est pas favorable à une promotion durable de la qualité. Cependant, l'impulsion pour une production de qualité doit venir des producteurs eux-mêmes, s'ils ne veulent pas courir le risque que leurs produits continuent à être considérés comme des déchets.

En principe, pour tous les produits, la législation devrait réglementer les aspects fondamentaux, tels les valeurs limites pour les métaux lourds et pour les polluants, les critères d'hygiénisation et les taux de corps étrangers. Les exigences de qualité plus spécifiques devraient être formulées dans des documents orientés clients et utilisations. Des modèles semblables sont actuellement en discussion au sein des instances législatives de l'UE.

1.2 Influence de l'application du compost en agriculture sur les paramètres physiques et chimiques du sol

Tests des effets de l'application du compost sur les paramètres du sol

Les effets de l'application du compost en général et en comparaison avec ceux d'autres fertilisants organiques (engrais de ferme, boues d'épuration, etc.) ont fait l'objet de diverses études. Ces tests se sont souvent déroulés dans des conditions extrêmes (sols lourds ou légers), respectivement dans des cultures à assolement court ou intensif (cultures agricoles uniquement), ou dans le cadre de la remise en état de sols

(industrie minière), ou dans des cultures maraîchères intensives. Il manque des études sur les effets du compost en combinaison avec des engrais de ferme ou avec des engrais organiques intensifs (poudre de corne, tourteau de ricin, etc.). De même, il n'y a que peu d'études des effets de l'application du compost dans les conditions d'assolement plutôt extensives des cultures mixtes ou fourragères.

Propriétés et qualité de la matière organique du compost

Lors du compostage, la matière organique (déchets de taille, déchets des bennes vertes, fumier, déchets de papier, etc.) est dégradée par des micro-organismes aérobies en CO_2 , H_2O et en sous-produits intermédiaires. Ceux-ci sont utilisés par d'autres groupes de micro-organismes pour la synthèse de substances humiques complexes. Ceci a pour conséquence la réduction du rapport C:N de son niveau initial de 25 – 35 jusqu'à environ 17.

Qualité de l'humus

La matière organique du compost diffère de celle du sol dans presque tous ses paramètres. Le compost provenant de déchets de jardin et de cuisine montre des valeurs nettement plus élevées que le sol pour des paramètres tels que le C_{org} , le N_{tot} , le pH, les carbonates, la capacité d'échange cationique (CEC), la salinité, les chlorures et les sulfates. Il est donc facile à comprendre que l'application de substances organiques stabilisées aura pour conséquence une modification de la composition de la matière organique du sol, et que celle-ci dépendra de la qualité du compost et du lieu de l'application. L'augmentation caractéristique du contenu en lignine et en composés carbonés aromatiques du compost, par rapport aux résidus de récolte et de racines, s'explique par la proportion accrue d'éléments ligneux. Ainsi, l'accroissement de la teneur en composés aromatiques observée après l'application de compost ne doit pas être automatiquement attribuée à une humification plus avancée. De manière générale, le site et les propriétés intrinsèques du sol influencent les caractéristiques humiques de sa fraction organique de manière plus durable que la fertilisation, et recouvrent partiellement les effets liés à l'utilisation du sol.

Carbone organique et azote total

Dans la plupart des essais, l'utilisation de compost en agriculture ou en horticulture a résulté en une augmentation de la teneur en carbone organique (C_{org}) et en azote total (N_{tot}) dans l'horizon supérieur du sol durant de nombreuses décennies, jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. On a généralement observé une étroite corrélation entre les quantités de matière organique apportées par le compost et l'accroissement du C_{org} dans le sol. Le niveau d'équilibre est essentiellement influencé par les facteurs locaux (sol, climat), les modes d'exploitation (travail du sol, assolement) et les quantités épandues, ainsi que par la qualité du compost.

pH

L'apport de compost conduit généralement à une élévation ou à une stabilisation du pH d'un sol cultivé. Selon la qualité de ce dernier (taux de carbonates), l'utilisation de compost peut permettre l'économie de quantités non-négligeables d'amendements calcaires.

Capacité d'échange de cations

En général, la CEC de la matière organique décomposée d'un sol est nettement plus élevée que celle des minéraux argileux. L'enrichissement d'un sol en matière organique peut donc contribuer à une élévation significative de la CEC, surtout dans les sols légers, à faible capacité d'absorption.

L'accroissement du taux de matière organique grâce à l'amendement en compost est en règle générale lié à une élévation de la CEC dans les horizons supérieurs, comme cela a pu être démontré dans plusieurs études. En corrélation avec l'élévation du pH et de la CEC, une augmentation du taux de saturation a

également été observée. Aucune étude n'est disponible concernant l'effet de l'application du compost sur l'absorption des anions.

Salinité, conductibilité électrique

Lors d'une étude de fertilisation sur 3 ans dans un sol sableux du Nord de l'Allemagne, avec du fumier, du compost de déchets de cuisine ou du compost de déchets de jardin, on a observé des taux de salinité augmentés dans la variante amendée avec le compost de déchets de cuisine. Dans les régions de climat humide, ceci ne devrait pas porter à conséquence, en raison du lessivage relativement rapide, alors qu'il faut compter avec une augmentation de la salinité du sol dans les régions de climat aride ou semi-aride.

Potentiel redox

Aucune étude n'existe concernant l'influence de l'application de compost sur le potentiel redox du sol. De nouvelles recherches sont ici nécessaires.

Stabilité des agrégats

L'augmentation de la matière organique du sol, l'élévation du pH, du contenu en calcium, ainsi que de la biomasse microbienne et de son activité, s'accompagnent aussi de la formation d'agrégats plus gros et plus stables. L'application de compost a généralement des effets positifs sur la stabilité des agrégats à plutôt court-terme (< 3 ans). Celle-ci se maintient aussi lors d'applications continues. L'utilisation de "compost mûr" améliore la stabilité des agrégats nettement plus que celle de "compost jeune".

Densité du sol et porosité

En parallèle à la croissance de la stabilité des agrégats, on a observé une diminution de la densité du sol. Cependant, celle-ci n'apparaît pas aussi rapidement que l'amélioration de la stabilité des agrégats. Ainsi, dans les études s'étendant sur 3 ans ou moins, seule une tendance à la diminution de la densité du sol a pu être démontrée, alors que les effets sur la stabilité des agrégats apparaissaient clairement.

Capacité de rétention et infiltration d'eau

La plupart des études ont montré une nette augmentation de la capacité de rétention en eau du sol après l'application de compost. Cet effet semble cependant n'apparaître qu'après un certain temps. Alors que sur un site caractérisé par un sol léger on a observé une augmentation de la capacité au champ, l'application de compost sur un sol lourd a conduit à une réduction de cette capacité.

On a pu aussi démontrer que l'amendement en compost a permis d'augmenter l'infiltration de l'eau dans ces sols. Ces effets clairement positifs apparaissent avant tout dans les études de longue durée.

Résistance à l'érosion

De manière générale on a aussi pu observer une plus grande résistance à l'érosion, respectivement une diminution de la tendance à l'érosion. L'apport de compost a amélioré la résistance à l'érosion tant hydrique qu'éolienne.

Bilan de température

Les parcelles amendées avec du compost montrent un bilan radiatif journalier de moindre amplitude. La fertilisation au compost d'un sol brun lessivé a eu pour effet une température superficielle tendanciellement plus élevée par rapport à la parcelle fertilisée avec un engrais minéral. Seules les températures minimales du sol de la parcelle fertilisée au compost étaient légèrement plus élevées. Ces résultats ne se basent que sur une seule étude. Des recherches supplémentaires sont nécessaires.

Les gaz du sol

Dans des études menées en Suisse sud-occidentale, après 9 ans de fertilisation au compost sur 5 sites, on a observé une augmentation moyenne de l'aération du sol de 15 % par rapport au témoin non traité. L'augmentation de la respiration du sol qui est fréquemment observée est due à la modification des activités microbiennes et n'est pas directement liée au métabolisme gazeux du sol (comportement d'échange gazeux). Des recherches plus détaillées sont ici nécessaires.

1.3 Influence de l'utilisation du compost sur la nutrition et la croissance des plantes

Effets sur le rendement

Les essais en pleins champs décrits dans la littérature concernant le compost donnent une image très peu homogène. Il manque souvent des données sur le compost utilisé, par ex. sur les matériaux de départ, la conduite de la fermentation, ou sur les paramètres de qualité. Il n'est souvent pas non plus précisé quelle quantité de fertilisant minéral a été ajouté comme complément. Fréquemment, les auteurs se déclarent contents lorsque, avec une quantité de fertilisant normale et un apport supplémentaire de compost, ils n'observent pas de diminution du rendement!

Compost de fumier

Dans le cas d'essais décrits comme étant réalisés avec du compost de fumier, il s'agit souvent en réalité d'un pur épandage de fumier. Dans ces cas, de très grandes quantités de fumier sont épandues, qui sur plusieurs années conduiront sans aucun doute à un enrichissement excessif du sol en éléments nutritifs. Les travaux sur ce thème proviennent très fréquemment de la région américaine ou asiatique.

Effets sur le lessivage d'éléments nutritifs

Dans un essai sur cinq ans, avec des lysimètres caractérisés par un même niveau de N_{tot} , on a constaté que l'intensité du lessivage des nitrates décroissait dans l'ordre suivant: NPK > compost de fumier > compost de déchets de cuisine > témoin > compost de bois déchiqueté.

Essais en pots

Dans des cultures d'orge, le lessivage de N dans les pots fertilisés avec du compost était plus bas que dans le témoin, le lessivage du P était en revanche plus élevé.

Simulations avec le modèle danois

Les données d'un essai de 4.5 ans d'utilisation du compost ont été utilisées pour simuler un emploi sur 50 ans, à l'aide du modèle danois de simulation de la dynamique de l'azote (DAISY). Différentes applications de compost ont produit des différences conséquentes dans un sol sableux, mais pas dans un sol argileux. De hauts rendements et des taux de nitrates réduits ont été atteints chez le blé d'hiver avec 10 t de compost /ha et an, tout comme avec une fertilisation azotée correspondant à un N_{min} de 20 kg N/ha.

Recommandations pour la prise en compte de l'azote du compost lors du bilan de fumure

L'amélioration à plus long terme du sol grâce à l'effet du compost devrait être davantage prise en compte dans les plans de fumure, en tant que bonification de la parcelle. Afin de ne pas trop accroître le pool d'azote organique dans le sol par l'azote du compost, on peut limiter quantitativement les apports du

compost. En Suisse, on se base pour cela sur le bilan de phosphore de l'exploitation, à travers les règles techniques relatives aux prestations écologiques requises (PER), une méthode qui a fait ses preuves.

Effets des composts sur la qualité des plantes

De manière générale, on constate que les plantes fertilisées avec du compost contiennent moins de nitrates dans leur biomasse. Par contre, des accumulations de nitrates ont aussi été observées dans des légumes, lorsque la concentration de nitrates dans le compost dépassait le 5 % du N total. De même, on a souvent trouvé des concentrations de vitamine C plus élevées dans les légumes fertilisés avec du compost.

Effet de la maturité du compost (âge) sur la minéralisation des éléments nutritifs et les qualités de rendement des plantes

Suite à une fertilisation avec du compost mûr provenant à 100 % de déchets de jardin, ou avec des composts frais à 70 et 100 % de déchets de jardin, le ray-grass a eu un rendement en matière sèche inférieur par rapport à une fertilisation avec d'autres types de compost. Les quantités nettes assimilées étaient clairement inférieures - pour le compost mûr uniquement pour celui constitué à 100 % de déchets de jardin. A partir de la 3^e coupe, on n'observait plus de différence entre le compost frais et le compost mûr. L'assimilation totale du N a atteint au maximum 7 % de la quantité totale d'azote amenée par le compost.

Tests d'incubation

Des tests d'incubation de composts de maturité différente, conduits à des températures du sol de 5° et 14°C durant 552 jours, n'ont pas montré de différence dans la minéralisation, mais par contre dans la dynamique de celle-ci. Pour les composts utilisés à des fins de fertilisation, la minéralisation est un des critères de qualité les plus importants. Pour les composts qui sont utilisés en plus grandes quantités comme améliorants du sol, voir comme composants des terreaux, ce sont d'autres produits de dégradation, de nature organique et ayant une influence sur les plantes, tels les acides gras à bas poids moléculaire, qui constitueront des paramètres importants du succès cultural.

Effets des composts sur les caractéristiques du sol

Le rapport $N_2:N_2O$ mesuré lors de la dénitrification est positivement corrélé avec le rapport carbone/nitrate dans l'eau du sol. Plus ce rapport est élevé, plus la libération de N_2O est faible lors de conditions anaérobies dans le sol.

1.4 Influence du compost sur les organismes du sol

Influence du compost sur la biomasse microbienne

L'effet d'un apport de matière organique dépend d'une part de la dose employée, mais aussi très fortement de la qualité de la matière organique utilisée. Un bon indicateur est constitué par la mesure de l'augmentation du carbone disponible dans le sol suite à l'apport de matière organique, en fonction de sa quantité et de sa qualité. Ainsi, il a été constaté qu'une croissance du taux de carbone soluble à l'eau chaude dans le sol correspond à une augmentation linéaire de l'azote de la biomasse. On a pu démontrer que le compost de boues d'épuration stabilisé sous aérobose favorise les microorganismes du sol plus fortement et plus durablement que des boues stabilisés sous anaérobose, en fonction de la qualité du

matériel organique. L'effet de l'apport du compost dans le sol semble donc être plus durable que celui de la matière organique stabilisée sous anaérobiose.

Influence du compost sur la diversité microbienne

L'apport de matière organique dans le sol influencera fortement et différemment les divers microorganismes. Ceci dépend d'une part de la dose, mais aussi du type de substance apportée. Ainsi le compost stabilisé de manière aérobie accroîtra plutôt la population bactérienne aérobie. Ceci est surtout valable pour les microorganismes dégradant la cellulose.

L'analyse de profils d'acides gras des phospholipides, qui fournissent des informations sur la diversité de la microflore, a permis de mettre en évidence de nettes différences entre les sols de parcelles cultivées de manière bio-organique par rapport à celles traitées de manière conventionnelle. Chose intéressante, le profil du sol traité avec des fertilisants organiques, peu d'engrais minéraux et un apport réduit de pesticides, se situait entre ceux des modes de traitement extrêmes. Sur la base des différences significatives observées entre les modes de traitement, on peut conclure que le type de fertilisation exerce une influence importante sur la composition de la communauté microbienne. De nombreuses études montrent que l'ajout de matière organique disponible dans le sol accroît l'abondance des acides gras mono-insaturés dans les profils d'acides gras, ceux-ci étant plutôt typiques des bactéries aérobies.

Influence du compost sur l'activité microbienne

Paramètres globaux

Il ne suffit pas de connaître la quantité ou la diversité des microorganismes du sol pour définir leur importance écologique. Il est tout aussi essentiel de déterminer leur activité. Ceci peut être réalisé à l'aide de la respiration du sol ou du quotient métabolique spécifique (qCO_2). Le qCO_2 est un paramètre très sensible pour percevoir des effets agissant négativement sur l'activité microbienne, car un qCO_2 plus élevé signifie une utilisation moins efficace du substrat organique, ce qui est souvent lié au stress. Plusieurs études ont montré que plus le substrat organique est facilement dégradable, plus le quotient métabolique spécifique croît. Ce n'est qu'avec l'ajout de compost hautement stabilisé biologiquement (à maturité élevée) que l'on a observé une diminution immédiate du qCO_2 . Le lien entre l'accroissement du qCO_2 et les facteurs de stress a aussi pu être démontré dans des essais impliquant du compost de déchets urbains chargé en cadmium.

En outre, le qCO_2 plus bas dans les sols traités avec des engrais organiques montre que ces communautés microbiennes sont capables de mieux utiliser la matière organique du sol pour leur croissance et nécessitent moins d'énergie pour leur maintien

Activités spécifique

Outre les paramètres sus-mentionnés, l'activité des microorganismes d'un sol peut être mesurée à l'aide d'activités enzymatiques spécifiques, qui interviennent en général dans les métabolismes du carbone, de l'azote ou du phosphore. Les microorganismes du sol contribuent de manière importante à rendre les éléments nutritifs provenant des engrais organiques disponibles pour les plantes et à les réintroduire dans le cycle de la matière. Ceci est de la plus haute importance pour l'agriculture biologique, car seuls des engrais organiques peuvent y être employés.

Des études sur diverses activités enzymatiques montrent que les apports de compost accroissent principalement l'activité des enzymes du sol spécifiques de la dégradation, et que l'effet des jeunes composts est plusieurs fois plus élevé que celle des composts plus âgés. C'est en particulier l'activité de

déshydrogénase, un indicateur des systèmes redox microbiens, qui peut être considérée comme une mesure de l'intensité des métabolismes microbiens dans le sol.

A plusieurs reprises, une gradation nette des paramètres enzymatiques du sol ne s'est dessinée que lors d'essais à long-terme. L'activité de la β -glucosidase, un indicateur de la dégradation des liaisons carbonées, montre une augmentation par paliers sous l'effet d'apports annuels de compost.

Puisque dans la plupart des sols le phosphore se trouve principalement sous forme organique, les phosphatases ont une importance particulière pour la nutrition des plantes. Les composts peuvent favoriser les phosphatases, que ce soit de manière directe, par l'accroissement de l'apport en matière organique, ou alors indirectement, par une amélioration de la disponibilité de l'eau. Le métabolisme du phosphore par la biomasse microbienne est en général plus rapide dans les sols traités écologiquement avec des apports de compost.

Influence du compost sur la dégradation de composés organiques toxiques

La dégradation de xénobiotiques est améliorée par le compost. L'ajout de matière organique au sol améliore souvent le taux de dégradation des pesticides et des hydrocarbures aromatiques polycycliques, en fonction du type et de la réactivité de la matière organique et de son effet sur les microorganismes.

Effet du compost sur les arthropodes

Plusieurs études ont montré que le nombre de collemboles est étroitement corrélé à l'augmentation du taux de carbone total qui est dû aux apports de compost. On observe une évolution marquée de la diversité en faveur des collemboles vivant près de la surface, de type héli-édaphique et épigé. Dans le cas des acariens par contre, les effets sont en général nettement moins sensibles.

Effet du compost sur les vers de terre (Lombricidés)

Etant donné le rôle central dans les processus de formation du sol joué au sein de la macrofaune du sol par les vers de terre (Lombrics), l'apport de compost doit être vu comme particulièrement positif de ce point de vue. En effet, le nombre de vers de terre dépend fortement des façons culturales et de la gestion de l'humus, et peut donc être notablement augmenté par un apport de compost.

Ainsi c'est dans des champs de blés fertilisés avec du compost que l'on a trouvé à la fois le plus grand nombre et la biomasse la plus importante de vers de terre, suivi par les parcelles fertilisées avec une variante organo-minérale. On a observé les mêmes résultats lors d'un essai comparatif sur huit ans avec des légumes et des pommes, cultivés de manière bio-dynamique ou conventionnelle. Lors d'essais de fertilisation avec du lombricompost, on a constaté que toutes les espèces de vers de terre n'étaient pas stimulées de la même façon. Ici aussi, l'apport de compost a causé un changement dans la diversité des espèces.

Effet du compost sur les nématodes

L'action antagoniste du compost sur les populations de nématodes a été démontrée à maintes reprises. Cet effet pourrait être dû à plusieurs facteurs: soit à des substances nématocides et à des toxiques produits lors de la poursuite de la dégradation de la matière organique dans le sol, ou alors à une amélioration de la tolérance des hôtes, ou encore à un changement dans la population microbienne du sol et de son activité, en particulier si l'apport de compost y a introduit ou stimulé des microorganismes nématophages.

Il est en outre intéressant de constater que dans de nombreuses études les nématodes non parasites ont été stimulés par les apports de compost. On peut supposer que les composts favorisent des nématodes prédateurs et des champignons parasites, qui détruisent spécifiquement les oeufs de certains nématodes. Ceci pourrait être exploité dans la lutte contre ces parasites.

L'effet inhibiteur du compost sur les nématodes pourrait aussi être dû à des facteurs chimiques: lors d'essais *in-vitro*, outre l'ammonium, les aldéhydes et les acides gras, les phénols ont aussi montré avoir des propriétés fortement nématicides. De même, les acides organiques des composts employés semblent aussi avoir de tels effets.

A côté de nombreuses publications qui, en démontrant leur action inhibitrice sur le développement de nématodes parasites, illustrent un des effets positifs importants de l'utilisation des composts, il existe aussi certains travaux qui montrent que le compost ou d'autres substances organiques exercent un effet faible, nul, voire même stimulant sur les nématodes.

1.5 Influence de l'utilisation du compost sur la santé des plantes

Les interactions entre les composts et la santé de plantes sont variées et complexes. Elles comprennent l'inactivation d'agents pathogènes durant la fermentation, l'influence des interactions entre les plantes et leurs agents pathogènes à l'aide de composts, ainsi que la production et l'utilisation d'infusions et d'extraits de compost dans la protection des plantes contre les maladies foliaires.

L'hygiénisation naturelle pendant le processus de compostage

Presque tous les agents pathogènes, que cela soit des champignons, des bactéries ou des virus, sont tués durant le processus de compostage. Le processus d'hygiénisation a lieu durant la première phase du compostage. Lors de la phase suivante de maturation, les pathogènes ne sont par contre plus tués.

Le paramètre le plus important pour assurer l'hygiénisation du matériel organique est la température, à condition que l'humidité dans la masse en fermentation soit suffisante.

Le compost et les pathogènes telluriques

Il y existe aussi de nombreux exemples de composts qui sont en mesure de protéger différents types des plantes contre certains parasites.

Ces effets ne se limitent pas à de simples observations en laboratoire, mais peuvent aussi être démontrés dans la pratique. En choisissant les bons composts, ces effets peuvent aussi être répétés de manière ciblée. Lorsque l'on utilise des composts contre les maladies des plantes, il faut aussi tenir compte des autres aspects liés à la fertilité du sol. Il est en effet possible que d'autres facteurs, comme par exemple un excès de compost, puissent avoir un impact négatif.

Un autre point important à prendre en compte est que tous les composts ne possèdent pas la capacité d'inhiber efficacement les phytopathologies. La forte variabilité des effets observée entre différents échantillons est assurément le plus gros écueil à l'utilisation à large échelle des composts pour des mesures ciblées de protection des plantes. La production de composts possédant des qualités définies et constantes est une nécessité indispensable pour satisfaire les attentes des utilisateurs de composts dans ce domaine.

Modes d'actions

Les mécanismes de protection par lesquels un compost agit pourront varier selon l'organisme cible. Ainsi, alors que l'inhibition du *Rhizoctonia* semble être le fait de microorganismes, ce sont probablement des substances fongostatiques résistantes à la chaleur qui agissent contre *Fusarium sp.*

Le mécanisme de protection principal contre les maladies des plantes semble cependant clairement dépendre de l'activité microbienne du compost. De nombreux travaux montrent qu'un traitement par la chaleur, qui tue la flore microbienne du compost, réduit aussi à néant les effets suppressifs. Le traitement d'un compost d'écorces mature durant six jours à 60°C suffit pour détruire son potentiel d'action contre les maladies.

L'effet suppressif du compost et de ses activités microbiennes est en outre souvent corrélé à la vitesse d'hydrolyse de l'acétate de fluorescéine. Les organismes suivants ont été régulièrement isolés de composts à effets suppressifs: *Trichoderma asperellum*, qui agit contre la fusariose de la tomate; *Acromonium sp.* provenant d'un compost de déchets et qui parasite *Phytophthora nicotianae*; *Bacillus subtilis*, survit à la phase chaude de la dégradation; *Aspergillus sp.*, *Geotrichum sp.* et *Pythium sp.* non sporulant. Divers antagonistes efficaces ont été isolés de composts d'écorces, par ex.: *Trichoderma sp.*, *Gliocladium sp.*, *Penicillium sp.*, *Mortierella sp.*, *Paecilomyces sp.*, *Geomyces sp.*, *Ophiostoma sp.*

Les composts peuvent dans certains cas agir aussi directement contre les pathogènes, c'est-à-dire qu'ils en compromettent la survie aussi en l'absence de la plante hôte, en empêchant le développement de la population de pathogènes. Dans d'autres cas, le compost n'agit sur les pathogènes qu'en présence de l'hôte.

Paramètres chimiques et physiques

Outre les activités biologiques, certaines propriétés chimiques des composts peuvent aussi contribuer à son potentiel suppressif. La baisse de la concentration en carbone est corrélée à l'augmentation du potentiel suppressif. Les substrats à suppressivité augmentée se reconnaissent souvent à leur faible disponibilité des éléments nutritifs et à leur population importante de microorganismes mésophytes fortement actifs.

Outre l'activité microbienne du compost, le taux de nitrates dans le sol semble aussi avoir une certaine influence: des taux élevés de nitrates peuvent diminuer l'activité suppressive.

On connaît aussi des exemples qui montrent que c'est avant tout l'offre globale en éléments nutritifs et l'amélioration des propriétés physiques du sol qui agissent de manière bénéfique sur la santé des plantes, permettant de diminuer les dégâts dus aux pestes fongiques.

Stimulation de l'activité microbienne du sol

Le compost agit vraisemblablement autant à travers son activité microbienne intrinsèque que par la stimulation des activités microbiennes du sol. Des apports de compost dans un sol augmentent l'effet suppressif existant contre *Fusarium oxysporum* f.sp. *lini* sur le lin. Cet effet est proportionnel à la quantité de compost administré. Du compost autoclavé exerce le même effet dans un sol non traité, mais pas dans un sol autoclavé.

Différence entre le compost et d'autres engrais organiques

La différence principale entre les composts et les autres engrais organiques réside dans la composition particulière des populations microbiennes des composts. Ainsi, on a pu montrer que des apports de paille de riz amenaient de l'énergie et des éléments nutritifs autant aux pathogènes qu'aux saprophytes telluriques. Les taux de respiration étaient beaucoup plus bas après des apports de compost de paille mûr dans un sol, qu'après des apports de paille. Le risque de favoriser des agents pathogènes était nettement moindre avec les apports de compost qu'avec la paille. Des résultats semblables ont été obtenus avec des

écorces fraîches et compostées. Ceci est probablement dû à l'apport supplémentaire de cellulose que fournit la matière organique fraîche, que les parasites peuvent utiliser pour leur croissance. Dans le compost, il y a nettement moins de cellulose disponible.

Importance de la composition des intrants

L'importance des intrants pour l'effet suppressif des composts a été étudiée par divers auteurs.

L'impression générale qui se dégage des travaux analysés est que la composition du mélange de départ ne joue qu'un rôle indirect. Le degré de maturité physiologique des composts, les différences au niveau de la population microbienne, ainsi que la disponibilité de l'azote semblent exercer la plus grosse influence. Quelques auteurs ont pu expliquer à l'aide de ces facteurs les différences d'efficacité contre les maladies des plantes constatées entre les composts. Seul l'ajout de matériaux contenant de la lignine durant la phase de maturation, comme par exemple des fibres de chanvre comme succédané de la tourbe, a permis d'augmenter nettement le potentiel suppressif des composts, vraisemblablement par stimulation de la population de *Trichoderma* spp.

Quantité administrée

L'effet suppressif des composts est en général proportionnel à la quantité administrée. Comme le compost est fortement tamponné du point de vue des microorganismes, il est cependant possible qu'en cas d'apports trop élevés, on observe plutôt une inhibition de la croissance, en raison d'une salinité trop élevée ou d'un excès d'éléments nutritifs, dont les effets s'opposeraient à l'action contre les pathogènes.

Degré de maturité du compost

On distingue entre effet suppressif "général" et "spécifique", c'est à dire entre effet "quantitatif" et "qualitatif". L'origine de ces différents types d'effet est à rechercher dans les populations microbiennes qui colonisent le compost et qui évoluent tout au long du processus de dégradation. Des composts d'âge différent pourront donc avoir des effets différents sur des agents pathogènes.

De nombreux auteurs ont pu démontrer que le degré de dégradation du matériel organique joue un rôle déterminant. Les composts très jeunes montrent en général un effet suppressif très faible. Des taux trop élevés en substances nutritives et énergétiques (glucose, acides aminés, etc.) dans des matériaux organiques frais peuvent inhiber la synthèse d'enzymes essentiels chez les organismes antagonistes.

Plus la maturation avance, plus l'effet suppressif augmente. Une fois que la maturité a dépassé un certain seuil, lorsque la matière organique a atteint un haut niveau de stabilité, l'activité microbienne décroît et le compost perd de son effet suppressif.

Dans certains cas, les composts jeunes sont plus efficaces que les composts murs. Ainsi, il a été possible de protéger avec succès des plantes de choux de l'attaque de *Plasmodiophora brassicae* à l'aide de différents jeunes composts. L'effet protecteur diminuait avec l'augmentation du degré de maturité du compost.

Pour certains agents pathogènes, l'influence du degré de maturité n'est pas connue.

Mesures permettant d'augmenter le potentiel suppressif du compost

Divers auteurs propagent l'idée d'une inoculation ciblée du compost avec des antagonistes choisis, ce qui permettrait d'en garantir une qualité stable. Une inoculation avec *Trichoderma harzianum* augmente effectivement l'effet suppressif des composts après la phase chaude.

D'autres possibilités sont offertes par les techniques de compostages à plusieurs phases. Ainsi on a pu augmenter fortement la proportion de dérivés chitineux à pouvoir suppressif dans le compost, grâce à des déchets de crabes.

L'ajout de matériaux riches en lignine durant la phase de maturation a stimulé les champignons lignolytiques, tels que *Trichoderma* spp.

Effets à long terme / application pratique

Aujourd'hui il existe suffisamment de travaux fondés qui confirment que les effets positifs des composts sur la santé des plantes ne sont pas uniquement des phénomènes de laboratoire. Ainsi, grâce à l'application de compost de déchets de jardin dans des cultures de framboises (20 l par mètre linéaire au printemps et en automne), il a été possible de combattre efficacement la pourriture des racines (*Phytophthora fragariae* var. *rubi*).

L'effet en plein champ n'est cependant pas toujours aussi spécifique que dans le cas des framboisiers, mais la croissance et la santé des plantes sont favorisées de manière globale. Ainsi dans une étude, la quantité de pommes de terre commercialisables a pu être accrue de manière significative par l'apport de fumier de champignonnière.

L'effet positif des composts en plein champ repose probablement sur plusieurs facteurs: la fertilisation azotée des plantes, la stimulation de l'activité microbienne du sol, ou l'activité des microorganismes du compost lui-même.

Dans la pratique, les composts pourraient offrir une alternative aux traitements au bromure de méthyle. Mais pour que cette méthode soit efficace, il faut prêter une attention particulière à la qualité des composts. Les paramètres importants sont le bilan azoté, la maturité et la stabilité des composts, ainsi que le moment de l'application. En Suisse, le compost est appliqué avec succès après la stérilisation à la vapeur du sol, afin de rendre la vie au sol, d'accroître l'efficacité du traitement et de garantir sa durabilité.

Compost et résistance induite

Les composts n'influencent pas la santé des plantes seulement dans le cas des pathogènes telluriques. Lors d'essais sur des racines, où seule la moitié avait été traitée avec du compost, celui-ci a induit une résistance à *Pythium ultimum* dans des plants de concombres. Ces effets étaient perdus par la stérilisation du compost.

Non seulement les composts, mais aussi leurs extraits peuvent induire une résistance dans les plantes. Dans ces cas, les mécanismes d'induction sont alors résistants à la chaleur.

Différents extraits de compost et des applications de compost dans le sol ont protégé des plantes d'orge de l'attaque d'*Erysiphe graminis* f.sp. *hordei*. Un effet additif a été observé lors de l'utilisation combinée de ces deux méthodes.

La résistance induite par le compost paraît se baser plus sur un renforcement des réactions de défense des plantes contre les infections que sur une activation d'organismes antagonistes.

Extraits de compost et maladies foliaires

Comme cela a été déjà mentionné, les extraits aqueux de compost peuvent être vaporisés directement sur les feuilles comme les fongicides habituels, afin de protéger les plantes des maladies. De nombreux travaux citent de tels effets. Une présentation de la littérature actuelle concernant ces techniques vient d'être publiée.

Choix des composts

La question des meilleurs composts pour la fabrication d'extraits n'a pas encore été clarifiée en détail; il subsiste encore des contradictions. Sur la base d'une étude, il semble que les extraits de compost de marc de raisin soient plus efficaces que ceux de compost fabriqué à partir de fumier de mouton ou d'un mélange de fumier de poule et de mouton. En effets, ces derniers perdent leur effet de protection des poivrons contre *Botrytis* sp. lorsque les extraits sont dilués 5 ou 25 fois, alors que ce n'est pas le cas des extraits fabriqués à partir de compost de marc de raisin.

Outre la composition des matériaux de départ, la degré de maturité du compost joue aussi un rôle dans l'efficacité de l'extrait. Les composts stockés depuis longtemps, qui sont stabilisés physiologiquement, se montrent moins efficaces que ceux plus jeunes.

Influence de la durée de l'extraction

La durée du processus d'extraction influence l'efficacité de l'extrait. Avec du fumier de champignonnière par exemple, l'efficacité de l'extrait croît avec la durée de l'extraction et atteint son maximum après 5 à 9 jours. La durée minimum de l'extraction nécessaire pour protéger la vigne contre *Botrytis cinerea* est d'au moins 10 jours.

D'autres auteurs ont trouvé que l'inhibition de la germination des spores et de la croissance mycélienne de *Botrytis cinerea* était indépendante de la durée de l'extraction. L'effet *in vivo* de l'extrait était le plus fort pour une durée d'extraction de trois à huit jours.

Une réduction du potentiel dans des extraits à longue durée d'extraction a aussi été observée. L'étude portait sur l'effet suppressif d'extraits de compost sur la pourriture des racines du gazon causée par *Pythium graminicola*. L'effet suppressif maximal de la maladie était atteint avec un temps d'extraction de quatre jours. Après quatorze jour d'extraction, l'effet suppressif était perdu. On a aussi trouvé que la température de l'eau utilisée pour l'extraction influence les résultats: en-dessous de 20°C, l'effet de l'extrait diminue.

Sensibilité de l'extrait à la chaleur

La plupart des rapports mentionnent qu'un traitement à la chaleur cause la perte de l'effet suppressif des composts. Cependant, de nombreux auteurs ont observé au contraire que l'activité des extraits de compost est conservée aussi après un traitement à la chaleur, même après que la solution ait été filtrée à travers une membrane de 0.2 µm. Il semble d'ailleurs que le principe actif des extraits de fumier de champignonnière repose sur de petites molécules stables à la chaleur, qui ne sont pas de nature protéique et sont produites par des microorganismes anaérobies.

La situation à cet égard n'est pas claire. Il existe aussi des observations où des extraits de compost ont perdu leur efficacité après stérilisation. Les auteurs en ont alors déduit que le mécanisme de protection était de nature microbienne.

Ces données contradictoires indiquent qu'il y a probablement différents principes actifs responsables de la protection des plantes contre les maladies dans les extraits de compost. Il est vraisemblable que certains métabolites secondaires excrétés par les microorganismes durant l'extraction sont responsables de la protection des plantes. Selon le stade physiologique dans lequel l'extrait est utilisé, la mort des microorganismes pourrait perturber ce processus. Des recherches ultérieures sont nécessaires pour éclaircir ces questions.

Effets microbiens des extraits

Les effets d'extraits de compost sur l'équilibre microbien de la phyllosphère ont été décrits à maintes reprises. On a aussi mis en évidence des corrélations claires entre les activités microbiennes dans la

phyllosphère et la suppression des maladies. L'effet protecteur provient de l'inhibition de la germination des spores, d'antagonismes et de concurrence avec les agents pathogènes, ainsi que de l'induction de réactions de résistance dans les plantes hôtes.

Le fait que la stérilisation de certains extraits de compost n'a pas pour conséquence de réduction d'efficacité, parle en faveur de la thèse de l'apport en matières nutritives.

Influences sur les agents pathogènes

Dans certaines expériences, on a pu observer une inhibition directe de champignons parasites par des extraits de compost de fumier. C'est pourquoi on a considéré la résistance induite comme le mécanisme de protection le plus vraisemblable chez les plantes supérieures. De nombreux autres auteurs ont cependant aussi constaté une inhibition des sporanges, de la germination des conidies, et aussi de la croissance mycélienne de plusieurs champignons (chez *Plasmopara viticola*, *Venturia inaequalis*, *Botrytis cinerea*, *Cochiobolus carborum*, ainsi que *Sphaeropsis sapinae*).

Résultats des tests en pleins champs

Dans des conditions contrôlées, des pommiers ont pu être protégés efficacement de la tavelure du pommier (*Venturia inaequalis*) à l'aide d'extraits de compost. En pleins champs, cette protection s'est révélée insuffisante, probablement en raison de la pression très forte de la maladie, due aux conditions atmosphériques humides qui régnaient. Lors d'autres essais, il a été possible, grâce à un traitement hebdomadaire des pommiers, de réduire de façon significative la tavelure sur les feuilles, mais il n'en fut pas de même sur les fruits.

Des applications réussies d'extraits de compost en plein champ ont été décrites sur la vigne. Ketterer and Weltzien ont obtenu un bon contrôle du rougeot (*Pseudopeziza tracheiphila*), ainsi que du mildiou et de l'oïdium de la vigne (*Plasmopara viticola* et *Uncinula necator*) avec cinq traitements à l'extrait de compost. Le dernier des auteurs mentionnés décrit aussi une protection efficace des pommes de terre, obtenue en plein champ contre *Phytophthora infestans*, surtout lorsque les extraits de compost avaient été enrichis avec des microorganismes antagonistes. Il existe aussi un rapport du même auteur concernant une utilisation réussie dans la culture des fraises contre *Botrytis cinerea*.

Des utilisations réussies d'extraits de compost sont aussi connues dans la culture maraîchère. Une application hebdomadaire d'extrait de compost de fumier de mouton sur des tomates a permis non seulement de réduire l'atteinte par *Alternaria solani*, mais aussi d'augmenter le rendement de la récolte. Une réduction significative des dommages dus au *Botrytis* et à l'oïdium de la tomate (agent pathogène: *Leveillula taurica*) a été obtenue dans des cultures commerciales sous serre, avec des extraits de compost de fumier de mouton. Avec la même fréquence hebdomadaire de traitement appliquée à des salades, il n'a pas été possible de diminuer l'incidence du *Botrytis*, mais l'intensité de la maladie a cependant été réduite. Ceci a permis de commercialiser un nombre nettement supérieur de salades.

Dans des essais en plein champ, on a procédé à une désinfection des semis de blé à l'aide de lait maigre en poudre, de farine de blé et de poudre d'algue, et réduit ainsi fortement les atteintes dues à la carie du blé (*Tilletia caries*). L'emploi d'extrait de compost comme agent adhésif a accru l'efficacité des préparations testées.

Accroissement de l'efficacité

L'adjonction de substances nutritives dans les extraits n'en a pas amélioré l'efficacité. Par contre, l'adjonction de 0.5 % de caséine améliorait l'efficacité des extraits de compost, bien que celle-ci seule ne

montre aucune action inhibitrice contre les maladies. Un même effet a été obtenu avec de l'huile d'aiguille de pin (0.05 %).

Un épandage de compost sur le sol et le traitement des feuilles d'orge avec des extraits de compost protègent efficacement la plante contre *Erysiphe graminis* f.sp. *hordei*. En combinant les deux méthodes on a observé un effet additif.

9.6 Conclusions

Les composts peuvent améliorer durablement les propriétés du sol. Diverses études ont montré qu'avec le temps, les apports de composts accroissent la stabilité des agrégats et la porosité des sols qui en avaient reçus. Dans les deux cas, il s'agit de caractéristiques du sol qui en augmentent la valeur d'un point de vue cultural. Les sols dont les agrégats sont plus stables se désagrègent moins facilement et bénéficient d'un échange gazeux accru, ainsi que d'une meilleure percolation des eaux de pluie dans les horizons supérieurs. Une porosité augmentée améliore l'échange gazeux dans les horizons plus profonds, permettant une percolation facilitée des eaux de surface vers les couches plus profondes du sol.

Les composts peuvent être considérés comme des améliorants génériques du sol. Bien qu'il ne faille pas sous-estimer l'importance du recyclage des éléments nutritifs lors du compostage, il ne faut en aucun cas comparer directement les composts avec les engrais minéraux. On ne peut attendre un effet rapide que de composts particuliers, caractérisés par une proportion élevée de nitrates d'origine bactérienne. La majorité des composts se signale par leur teneur en substances ligneuses relativement élevée (en cas de forte proportion de bois dans les intrants). Si la fermentation est bien conduite, ces substances contribuent de façon importante à élever le taux d'humus du sol. A l'exception des sols tourbeux, on cherche généralement à obtenir un taux d'humus plus élevé et donc plus "stable". Ceci permet d'augmenter notablement dans le sol, tant la capacité de stockage des substances nutritives, que leur disponibilité pour les plantes. Cet effet est encore plus accentué dans les sols tropicaux. Une bonne gestion de l'humus permet d'y éviter l'empoisonnement par l'aluminium. Dans de tels sols, il est possible d'obtenir beaucoup par une gestion pointue du compost. De ce point de vue, il est essentiel pour l'utilisateur de pouvoir évaluer correctement la valeur du compost directement au moment de sa production. On ne peut donc renoncer à la mise au point de paramètres fiables et simples qui permettent une prédiction des effets du compost sur le sol et les plantes cultivées.

Il n'est pas non plus étonnant que l'apport de matière organique stimule aussi la faune et la flore du sol. On trouve beaucoup d'études qui indiquent que l'utilisation du compost stimule globalement les vers de terre. L'importance de ceux-ci pour l'agriculture a déjà été discutée en détail ailleurs.

Les effets suppressifs sur les phytopathologies et les nématodes phytophages, souvent observés lors de l'utilisation du compost, ouvrent, eux, des perspectives entièrement nouvelles. On connaît aussi en partie quels sont les organismes qui vivent dans le compost et sont en mesure d'inhiber les maladies fongiques telluriques et les nématodes phytophages. Cependant ce n'est que petit à petit que l'on commence à comprendre dans quelles conditions ils peuvent se développer dans le compost. Il en ressort que le compostage, respectivement une conduite appropriée de la fermentation, consiste avant tout en un pilotage des organismes fermentatifs. Afin de progresser dans ce domaine, il va falloir se pencher de plus près sur les processus microbiens durant le compostage. Dans ce domaine aussi, le compost possède un potentiel intéressant d'accroissement de sa valeur, ce qui pourrait lui octroyer une place très prééminente dans une agriculture durable.

Cette étude de la littérature a permis de mettre en évidence les lacunes dans les connaissances actuelles, ainsi que les questions restant ouvertes, qui doivent trouver réponse dans l'intérêt de la branche du

compostage. Ces questions concernent entre autres la dynamique des éléments nutritifs pour les plantes, les mécanismes responsables de la protection contre les phytopathologies et les nématodes phytophages, l'utilisation combinée avec des engrais de ferme et d'autres engrais organiques, la combinaison d'apports de compost avec d'autres méthodes de culture et de production végétale, les effets du digestat et du compost de digestat. Dans tous ces domaines, il subsiste un besoin notable en matière de recherche.

Alfred Berner, FiBL

Markus Bieri, Ecobel GmbH

Ulrich Galli, TerraNova Umweltberatung GmbH

Jacques G. Fuchs, FiBL

Jochen Mayer, FAL

Konrad Schleiss, Umwelt und Kompostberatung

Les mycorhizes

Une fascinante biocénose en forêt

Simon Egli et Ivano Brunner



Fig. 1. L'Hébélome à centre sombre (*Hebeloma mesophaeum*) colonise principalement les racines des plantules, comme celles de ce jeune épicéa (en haut). Il entoure d'un épais manteau fongique l'extrémité des racelles (en bas).

Introduction

Chacun sait que l'on trouve des champignons en forêt. Mais ce qui est moins connu, c'est pourquoi ils poussent principalement en forêt et quelles fonctions ils y remplissent.

Les champignons présents dans la litière et le bois favorisent la décomposition des feuilles, des aiguilles et du bois et la réintégration de leurs éléments dans la chaîne trophique. Les champignons mycorhiziens, c'est-à-dire les champignons vivant en symbiose avec les arbres de la forêt, jouent un rôle tout autant important pour l'écosystème forestier. Cette symbiose est bénéfique aussi bien à l'arbre qu'au champignon.



Fig. 2. Le champignon et l'arbre vivent en partenariat symbiotique.

Le champignon – Considérations d'ordre général

Dans le langage populaire, les champignons représentent ce que l'on cueille en forêt et que l'on met dans son panier. Au sens strict du terme, cette définition n'est pas correcte car le produit de la récolte n'est que la **fructification** du champignon. La partie principale, le **mycélium**, est un lacs de filaments ouateux qui pousse dans le sol où il vit, invisible à nos yeux. Ce mycélium forme des fructifications si les conditions y sont favorables.

Les mycéliums peuvent atteindre une taille considérable et vivre longtemps. Une colonie d'armillaires (*Armillaria bulbosa*) a été examinée à l'aide de méthodes moléculaires. Elle occupe 5 ha, pèse dix tonnes et a 1500 ans, selon les estimations. Ainsi, les champignons font partie **des plus gros et des plus vieux organismes vivants**.

Aujourd'hui, quelque 70 000 espèces fongiques ont été recensées: on estime à plus d'un million le nombre d'espèces existant sur notre planète. Elles sont beaucoup plus nombreuses que les plantes à fleurs. Les champignons présentent des formes les plus diverses: de l'unicellulaire aux pluri-

cellulaires, ils sont composés de structures complexes. Il existe en Suisse 6000 espèces de **macromycètes** (fructifications de champignon visibles à l'œil nu).

Les champignons constituent un règne autonome, le règne fongique, car ils n'appartiennent ni au règne végétal ni au règne animal. Leur comportement alimentaire les rend davantage semblables aux animaux qu'aux plantes. Tout comme les animaux, ou comme nous, les êtres humains, ils sont **hétérotrophes vis-à-vis du carbone**, c'est-à-dire qu'ils ont besoin d'une source de carbone organique externe pour arriver à s'alimenter, contrairement aux plantes vertes qui produisent elles-mêmes ces éléments grâce à la photosynthèse.

D'après la provenance de leur nourriture, les champignons se divisent en trois groupes: les **champignons symbiotiques** (ils vivent en symbiose avec des plantes vivantes; ce sont p. ex. les champignons mycorhiziens ou les champignons lichéniques), les **champignons saprophytes** (ils décomposent la matière organique) et les **champignons parasites** (ils vivent au dépens d'organismes vivants).

Qu'est-ce qu'une mycorhize?

La mycorhize (du grec «mukês» pour champignon et «rhiza» pour racine) est l'association symbiotique d'un champignon avec les racines d'une plante. En d'autres termes, c'est une racine colonisée par un champignon mycorhizien qui en a modifié la morphologie. En effet, le champignon entoure d'un épais tissu de filaments (appelé le mycélium) l'extrémité des radicelles. C'est ainsi qu'apparaît le manteau fongique (fig. 1). L'aspect des racines mycorhizées varie largement d'un champignon à l'autre (fig. 4).

Près d'un tiers des macromycètes (fructifications de champignon visibles à l'œil nu) de nos forêts sont des champignons mycorhiziens. Nous en comptons quelque 2000 espèces, dont de nombreux champignons comestibles très appréciés, comme les Truffes, le Bolet cèpe, le Bolet bai, la Russule charbonnière, le Lactaire délicieux, ou la Chanterelle. Mais beaucoup de champignons vénéneux en font aussi partie; ce sont entre autres l'Amanite tue-mouches, l'Amanite phalloïde, le Bolet satan ou le Cortinaire couleur de rocou. Bon nombre de champignons

mycorhiziens sont tributaires d'hôtes spécifiques, c'est-à-dire qu'ils colonisent des espèces ligneuses bien déterminées et qu'on ne les trouve que sur ces arbres (comme le Bolet du mélèze ou le Lactaire sanguin de l'épicéa). D'autres ne sont présents que dans des forêts de feuillus ou de résineux. Les pessières en comptent plus de 150 espèces, les chênaies plus de 100 et les aulnaies une cinquantaine. Le système racinaire d'un seul arbre abrite généralement plusieurs espèces de champignons mycorhiziens. Certains, comme les Hébélomes (*Hebeloma* sp.) ou les Laccaires (*Laccaria* sp.), ne symbiotisent que les plantules et les jeunes arbres de l'âge des fourrés. D'autres ne se trouvent que dans des futaies, comme les Bolets (*Boletus* sp.) et les Russules (*Russula* sp.).

Dans nos régions, toutes les racines des arbres forestiers sont mycorhizées. Ce sont généralement des mycorhizes ectotrophes ou ectomycorhizes. On les reconnaît par la présence d'un épais manteau fongique qui entoure les radicelles et progresse entre les cellules corticales (fig. 7).



Fig. 3. Contrairement aux racines non mycorhizées qui ont des poils absorbants (en haut: racine d'épicéa stérile), les racines mycorhizées (en bas: racines d'épicéa mycorhizées par un Hébélome) sont entourées d'un manteau fongique à partir duquel les hyphes se répandent dans le sol.



Fig. 4. Fructifications et mycorhizes (d'en haut en bas) de la Russule ocre et blanchâtre (*Russula ochroleuca*); du Cortinaire à odeur d'anis (*Cortinarius odorifer*), un représentant du genre le plus riche en espèces symbiotiques; du Laccaire améthyste (*Laccaria amethystina*), qui colonise principalement les racines des plantules de jeunes arbres; de la fructification souterraine de *Arcangeliella borziana*; et de la Truffe du Périgord (*Tuber melanosporum*).

Fonctions de la mycorhize

a) Un échange d'éléments nutritifs vitaux

La mycorhize est un organisme dans lequel l'arbre et le champignon mycorhizien s'échangent des matières – un peu comme à la bourse. Tandis que l'arbre fournit au champignon les sucres élaborés lors de la photosynthèse, ce dernier lui offre en échange des éléments nutritifs, comme l'azote (N) et le phosphore (P), qu'il a prélevés dans de minuscules espaces poreux du sol, à l'aide de ses hyphes fins. Étant donné que les hyphes se répandent largement dans le sol, la surface d'absorption est beaucoup plus grande que celle occupée par les poils absorbants des plantes non mycorhizées (fig. 6). Ainsi, les tissus des plantes mycorhizées contiennent souvent des concentrations accrues d'azote et de phosphore (fig. 5). L'échange de ces éléments entre le champignon et l'arbre passe par une zone spécifique appelée le réseau intercellulaire de Hartig (d'après T. Hartig, botaniste forestier allemand). Ce réseau est composé d'un épais tissu fongique qui s'installe entre les cellules racinaires et les radicelles, assurant ainsi un contact étroit entre les deux partenaires. Si l'on observe au microscope la coupe transversale d'une mycorhize, on voit que son tissu fongique ressemble à un filet, d'où le nom de réseau de Hartig. Le manteau fongique et le réseau de Hartig ont la particularité d'emmagasiner le phosphore et de l'accumuler sous forme de polyphosphates à longue chaîne, ou granules de polyphosphates, qui sont stockés dans les cellules fongiques sous forme solide.

Le développement d'une mycorhize dure de quelques jours à quelques semaines. Il a pour effet de stopper la croissance longitudinale des radicelles et d'inhiber la formation des poils absorbants (fig. 3). Les hyphes de la mycorhize prélèvent alors pour les racines les éléments nutritifs et l'eau nécessaires à l'arbre. Une mycorhize vit généralement durant une ou deux périodes de végétation. Mais sa présence n'empêche pas les racines, au printemps, de s'extraire du manteau fongique qui les entoure ni d'être colonisées par un nouveau champignon mycorhizien.

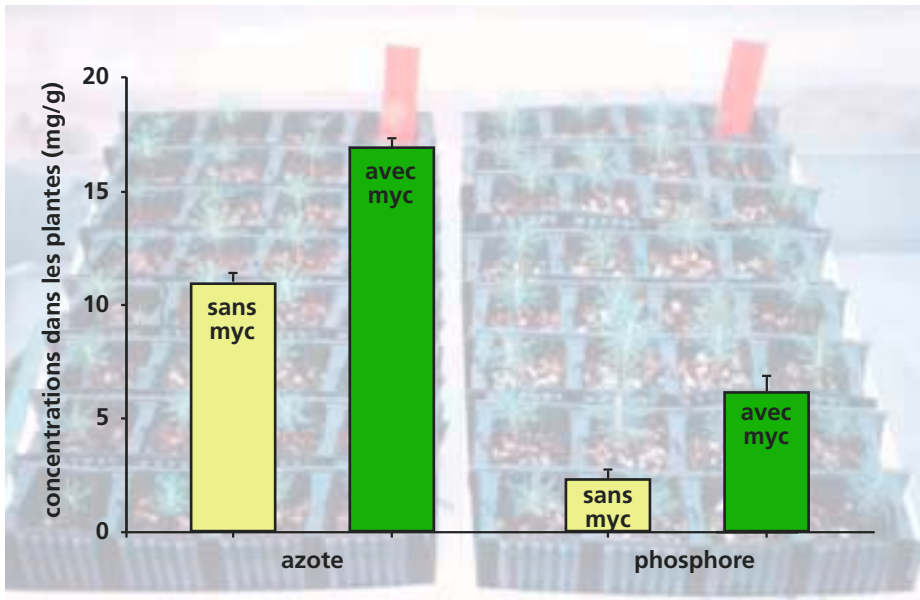


Fig. 5. Les plantes mycorhizées (avec myc), comme cette plantule d'épicéa en symbiose avec le *Laccaria laqué*, contiennent des concentrations d'azote et de phosphore élevées, ce qui n'est pas le cas chez les plantes non mycorhizées (sans myc).



Fig. 6. Les hyphes d'un champignon mycorhizien se répandent largement dans le sol et augmentent ainsi la surface d'absorption d'eau et d'éléments nutritifs. Ces derniers sont transportés directement aux mycorhizes par la voie des rhizomorphes (cordon composé d'hyphes mycorhiziens).

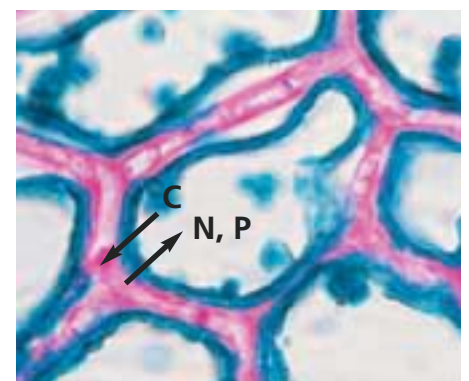
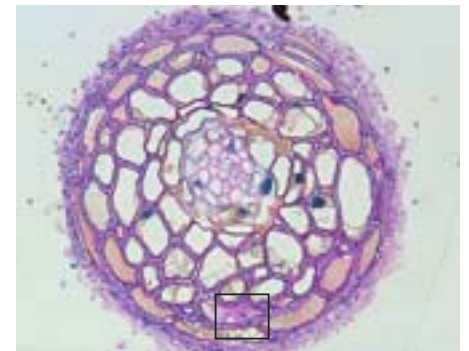


Fig. 7. Cette plantule d'épicéa mycorhizée illustre la structure d'une mycorhize (figure supérieure). On distingue, dans la coupe transversale, un épais manteau fongique et le réseau de Hartig à l'intérieur de la mycorhize (figure du milieu). L'échange de carbone (C) et d'éléments nutritifs (N, azote; P, phosphore) se fait principalement entre le réseau de Hartig (en rouge) et les cellules corticales (en bleu; figure inférieure)

b) Protection contre les polluants

Les mycorhizes protègent aussi l'arbre des effets toxiques des polluants. Depuis le début de l'industrialisation au 19e siècle, les émissions de polluants contiennent entre autres des métaux lourds qui se déposent aussi en forêt. Si certains de ces éléments, tels le fer, le zinc ou le cuivre, sont indispensables à la plante, d'autres sont toxiques, comme le plomb, le cadmium, le nickel, le mercure ou le chrome. Les métaux lourds n'étant pas décomposables, ils s'accumulent dans la biosphère et constituent ainsi un danger croissant pour les organismes vivants. Mais une partie des champignons mycorhiziens y résistent particulièrement bien, même lorsque leurs teneurs dans le sol sont élevées. Tout comme l'aluminium, certains métaux lourds se fixent dans le mycélium; on les trouve dans les granules de polyphosphates, à l'intérieur des cellules, sur les parois et noyaux cellulaires ainsi que dans des protéines spéciales (fig. 8). Chez les plantes mycorhizées, ils sont retenus dans le manteau fongique déjà et ils ne parviennent à la racine de la plante qu'en quantités réduites. Ici, la mycorhize est comparable à un filtre. Le revers de la médaille: ces métaux lourds s'accumulent dans les fructifications du champignon, au risque de rendre les champignons comestibles impropres à la consommation.

Les substances radioactives ont un comportement semblable. Elles sont aussi véhiculées par l'air et se déposent en forêt. Du césium radioactif fut identifié pour la première fois après les essais nucléaires dans les années 50 et 60. En Europe, la principale source de radioactivité a été créée par la catastrophe de Tchernobyl, en 1986. Tout comme le strontium, le césium fait partie des substances radioactives les plus significatives, notamment à cause de sa longue demi-vie biologique (30 ans). Dans nos sols forestiers, les teneurs en césium radioactif varient largement. Les valeurs les plus élevées ont été mesurées au Tessin. Le césium contenu dans le sol se fixe aux champignons et aux bactéries. C'est pour cela que les plantes n'en absorbent que de petites quantités et qu'il ne peut être éliminé de l'écosystème. Au même titre que les métaux lourds, le césium s'accumule dans les hyphes; ses concentrations sont par-

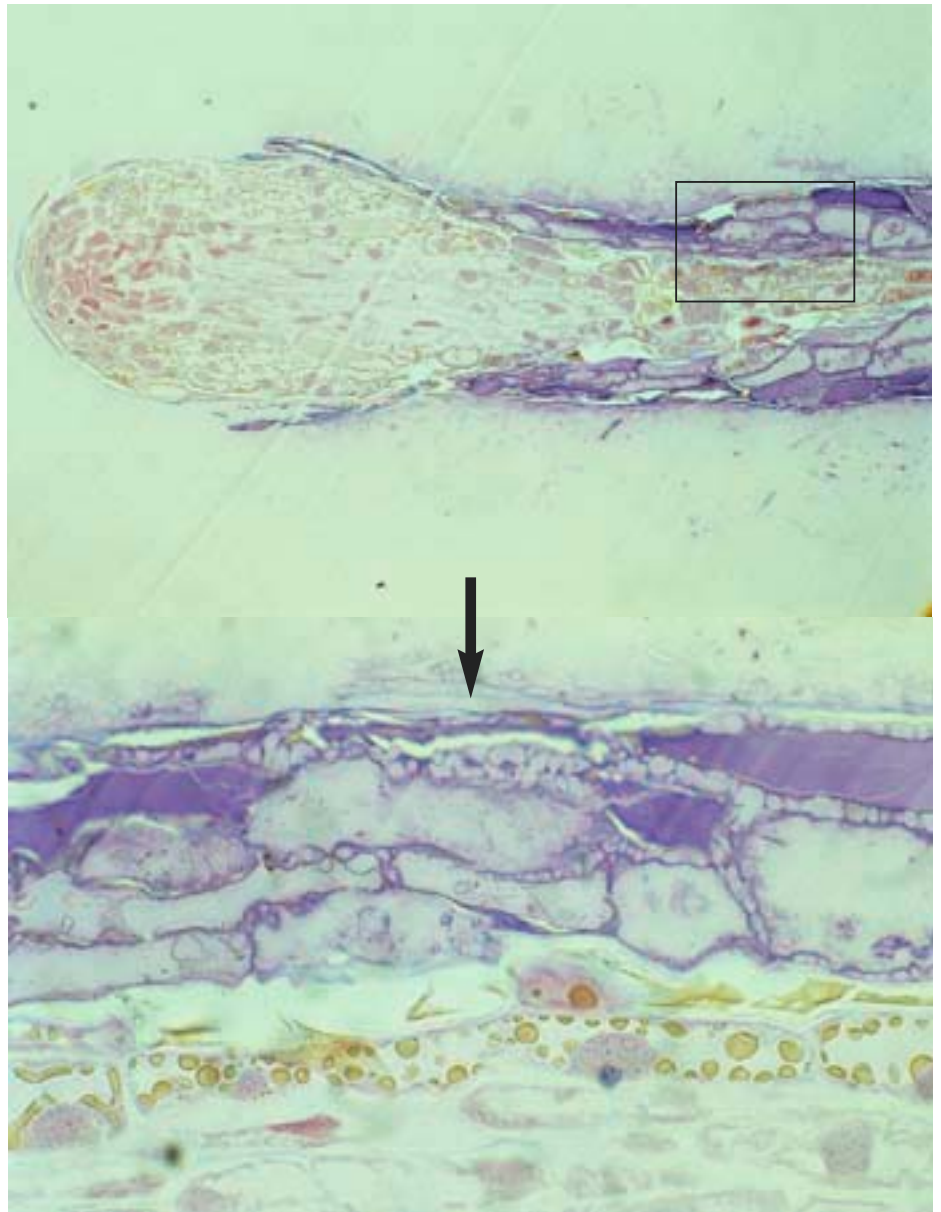


Fig. 8. On remarque dans cette coupe longitudinale d'une mycorhize d'épicéa que la plupart de l'aluminium toxique (en bleu) est contenue dans le champignon (en haut). L'aluminium se fixe principalement aux parois du manteau fongique et dans le réseau de Hartig (en bas).

fois très élevées, notamment dans les fructifications de certains champignons mycorhiziens.

c) Autres fonctions des mycorhizes

Comme nous l'avons déjà mentionné, les mycorhizes favorisent l'absorption par les racines des éléments nutritifs et de l'eau et améliorent la protection de la plante contre les polluants. Par ailleurs, les plantes mycorhizées tolèrent mieux les facteurs stressants d'ordre abiotique et biotique. Le champignon élabore des sucres, comme le mannitol ou l'arabitol, qui rendent les

racines plus résistantes au gel. En outre, il synthétise des antibiotiques, induit la formation du tanin et favorise la flore microbienne dans le manteau fongique, ce qui augmente le pouvoir défensif des plantes contre les pathogènes contenus dans le sol. Enfin, les phytohormones formées par les champignons mycorhiziens (p. ex. auxine, gibbérelline, cytokinine, éthylène) favorisent la croissance des plantes.

L'azote – une menace pour les champignons mycorhiziens

Depuis des décennies, les émissions polluantes produites par les activités humaines sont en augmentation et donc aussi les apports acides et azotés qui se déposent en forêt. En Suisse, l'agriculture, l'industrie, les chauffages et le trafic émettent dans l'atmosphère entre 20 et 80 kg d'azote par hectare et par année. L'azote est un élément nutritif nécessaire à la plante certes; mais en teneurs élevées, il peut être néfaste aux arbres car il freine la croissance des champignons mycorhiziens dans le sol – des expérimentations l'ont prouvé (fig. 9).

Les observations sur le terrain et les essais de fumure nous ont appris que les dépôts accrus d'azote réduisent considérablement la diversité des champignons ectomycorhiziens – évaluée à l'aide des fructifications – tandis que celle des champignons saprophytes reste la même. Un changement dans la composition des espèces de champi-



Fig. 9. Des concentrations accrues d'azote dans le sol entravent le développement des hyphes, ce qui n'est pas le cas dans des conditions normales (à gauche); sous cet effet, le substrat se désagrège (à droite).

gnons mycorhiziens a également été décelé en examinant des mycorhizes dans le sol. Sous l'effet de fortes teneurs en azote, une partie de ces champignons ne forment plus de mycorhizes. Devant ces résultats, la disparition de certaines espèces fongiques est à craindre. Les effets que pourraient avoir de tels changements pour les arbres forestiers symbiotisés est encore difficile à estimer à l'heure actuelle.

Les concentrations élevées d'azote sont aussi défavorables à la formation des structures de la mycorhize. Si ces structures se modifient, le champignon et l'arbre s'échangent moins d'éléments nutritifs et d'hydrates de carbone. La santé de l'arbre et la formation de fructifications des champignons mycorhiziens peuvent en subir les conséquences.

Fig. 10. Les mycorhizes peuvent être produites en laboratoire. On inocule un champignon mycorhizien à la racine d'une plantule. Il arrive même parfois que des fructifications se forment, comme chez cet *Hebelome*.

Pas de forêt, pas de champignon – Pas de champignon, pas de forêt?

Sans la forêt, il n'y aurait certainement aucun champignon mycorhizien et nous chercherions en vain des champignons comestibles, comme les Bolets, les Chanterelles, les Russules, les Lactaires et les Truffes. Et si la forêt n'avait pas de champignons mycorhiziens? Notre expérience n'est pas assez large pour vraiment répondre à cette question car, par chance, nos forêts contiennent encore suffisamment de champignons mycorhiziens. Mais il est certain que sur les sols pauvres en éléments nutritifs, les arbres ne pourraient pas prélever suffisamment d'éléments minéraux sans l'aide de leur partenaire symbiotique. Des recherches expérimentales nous ont appris qu'en l'absence de mycorhizes, les arbres forestiers ne pourraient pas se défendre contre les agents pathogènes présents dans leurs racines et qu'ils seraient davantage sensibles à la sécheresse, au gel ou aux influences néfastes de l'environnement. En conséquence, les champignons mycorhiziens sont indispensables aux arbres forestiers et l'on peut supposer que s'ils n'existaient pas, nos forêts auraient un tout autre aspect.

Les champignons mycorhiziens et les interventions sylvicoles

Les champignons mycorhiziens et les arbres forestiers vivent en interdépendance. Si l'un des partenaires est en mauvaise santé, l'autre en souffre. Ain-

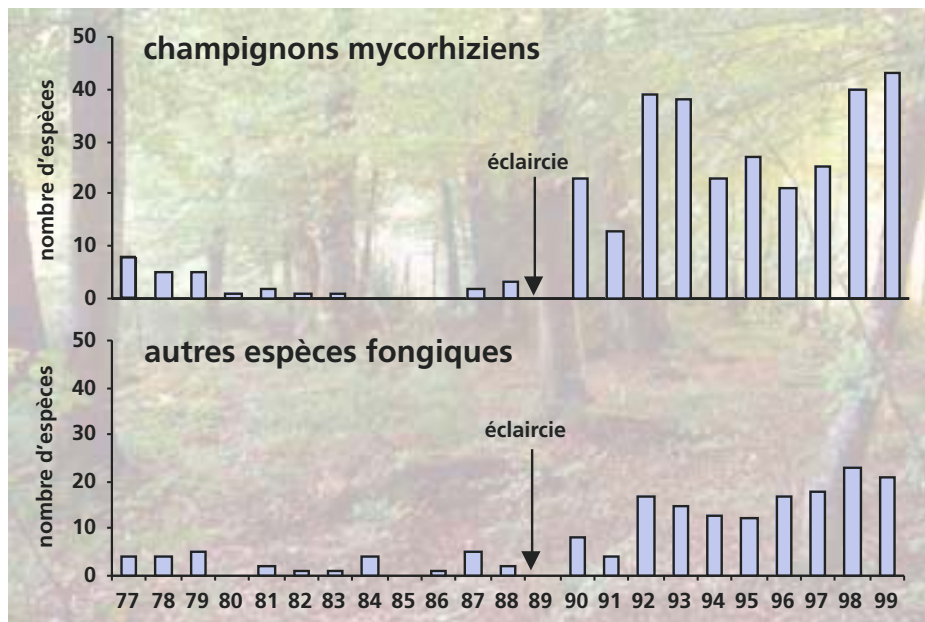


Fig. 11. La coupe d'éclaircie a un effet positif sur la composition de la flore fongique (champignons mycorhiziens et autres espèces fongiques). Une éclaircie de forte intensité (réduction de 35% du nombre de tiges) a été réalisée en hiver 1989 dans une forêt mixte densément peuplée de vieux arbres dans la réserve mycologique de La Chanéaz (FR).

si, dès qu'un arbre est abattu par le vent ou récolté lors d'une coupe de réalisation, le champignon mycorhizien ne fructifie plus car son partenaire ne lui fournit plus les hydrates de carbone dont il a besoin. Si le champignon ne trouve pas un nouveau partenaire, il peut encore vivre quelques années grâce aux réserves d'hydrates de carbone présentes dans le rhizome. Mais ces ressources ne sont pas suffisantes pour qu'il puisse former des fructifications.

Une étude réalisée dans la réserve mycologique de La Chanéaz a montré que certaines interventions sylvicoles peuvent favoriser la flore fongique (fig. 11). A la suite d'une importante coupe d'éclaircie exécutée dans une forêt mix-

te densément peuplée de vieux arbres pauvres en champignons, la flore fongique a carrément explosé. Cette réaction pourrait être due au fait que les couronnes des arbres restants ont eu davantage de place, ce qui a favorisé leur croissance – une analyse des cernes l'a démontré. Il est probable que les mycéliums restés sous-alimentés dans le sol pendant des années ont retrouvé une nouvelle énergie grâce à l'apport d'hydrates de carbone qui aura stimulé leur fructification. A la suite de cette éclaircie, certains champignons comestibles, comme le Bolet commun, le Bolet bai ou la Russule charbonnière, ont été récoltés pour la première fois sur cette parcelle.

Des mesures concrètes en faveur des champignons mycorhiziens

- Les éclaircies de vieux peuplements sombres et denses favorisent la biodiversité et la production des fructifications de champignons mycorhiziens.
- Plus les essences peuplant une forêt sont diverses, plus la diversité des champignons mycorhiziens est grande; chaque arbre a ses propres partenaires symbiotiques.
- Que faire lorsque des arbres sont abattus par vent? Lors du déblaiement de ces zones, le plus grand soin devrait

être accordé aux jeunes arbres encore sur pied. Ils sont un véritable refuge pour les champignons mycorhiziens qui ont perdu leur partenaire et ils les aident à s'implanter dans la nouvelle génération d'arbres.

- Par égard pour le champignon, il serait utile de renoncer à brûler en forêt les rémanents de coupes issus de la récolte des bois. Il est souhaitable de laisser sur place les branches de bois mort car elles favorisent le développement d'espèces fongiques rares.

Remarques finales

Si l'on considère toute l'importance que revêtent les champignons mycorrhiziens pour l'arbre – ils lui fournissent des éléments nutritifs, augmentent sa résistance au stress et favorisent la cohésion mécanique du sol – la diminution de ces organismes est un phénomène à prendre au sérieux. Il est donc essentiel de sauvegarder la flore fongique et sa diversité. Cet impératif s'impose tant sous l'aspect de la protection de la nature qu'au point de vue forestier. Une protection adéquate de la flore fongique se justifie donc largement.

Traduction: Monique Dousse

Bibliographie:

- BRUNNER, I. 2001. Ectomycorrhizas: their role in forest ecosystems under the impact of acidifying pollutants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 10, 13–27.
- BRUNNER, I., BRODBECK, S. 2001. Response of mycorrhizal Norway spruce seedlings to various nitrogen loads and sources. *Environmental Pollution* 114, 223–233.
- BRUNNER, I., FREY, B. 2000. Detection and localization of aluminum and heavy metals in ectomy-

- corrhizal Norway spruce seedlings. *Environmental Pollution* 108, 121–128.
- EGLI, S., F. AYER, S. LUSSI, B. SENN-IRLET, P. BAUMANN 1995. Pilzschutz in der Schweiz. Ein Leitfaden für Behörden und interessierte Kreise. – Protezione dei funghi in Svizzera, Guida per autorità e cerchie di interessati. – La protection des champignons en Suisse. Un aide-mémoire à l'intention des autorités et des milieux intéressés. *Merkbl. Prax. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch.* 25.
- HEIJDEN VAN DER, M.G.A., SANDERS, I.R. (eds.) 2002. *Mycorrhizal Ecology*. Ecological Series 157, Springer Verlag, Berlin.
- PETER, M., AYER, F., AND EGLI, S. 2001. Nitrogen addition in a Norway spruce stand altered macrofungal sporocarp production and below-ground ectomycorrhizal species composition. *New Phytologist* 149:311–325.
- SMITH, S.E., READ, D.J. 1997. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, London.
- WERNER, D. 1987. *Pflanzliche und mikrobielle Symbiosen*. Thieme, Stuttgart.

Adresse des auteurs:

Dr Simon Egli
Dr Ivano Brunner
Institut fédéral de recherches WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
simon.egli@wsl.ch
ivano.brunner@wsl.ch



Fig. 12. L'amanite vineuse (*Amanita rubescens*) se trouve souvent dans les forêts d'épicéa, comme celle figurant sur ce timbre-poste de Roumanie (Collection K. Häne).

Notice pour le praticien ISSN 1012-6554

Concept

Les résultats de la recherche sont élaborés pour constituer des pôles de savoir et des guides d'action à l'intention des acteurs de la pratique. Cette série s'adresse aux milieux de la foresterie et de la protection de la nature, aux autorités, aux écoles ainsi qu'aux non-initiés.

Les versions allemandes de cette série sont intitulées

Merkblatt für die Praxis ISSN 1422-2876

Les éditions italiennes paraissent occasionnellement dans le périodique

Sherwood, Foreste ed Alberi Oggi.

Derniers numéros parus

- no 34: NIERHAUS-WUNDERWALD, D., 2001: Le bombyx disparate (*Lymantria dispar* L.). 8 p.
- no 33: SCHIEGG PASINELLI, K.; SUTER, W., 2000: Le bois mort – un habitat. 6 p.
- no 32: NIERHAUS-WUNDERWALD, D., 2000: Les rouilles de l'épicéa. 8 p.
- no 31: NIERHAUS-WUNDERWALD, D.; FORSTER, B., 2000: Les insectes corticoles des pins. 12 p.
- no 30: FORSTER, B.; BUOB, S.; COVI, S.; OEHRY, E.; URECH, H.; WINKLER, M.; ZAHN, C.; ZUBER, R., 1998: Nettoyement du parterre de coupe. 4 p. Version électronique (PDF, 332 Kb)
- no 29: NIERHAUS-WUNDERWALD, D., 1998: Biologie et régulation naturelle des hyponomeutes. 8 p.
- no 28: NIERHAUS-WUNDERWALD, D.; LAWRENZ, P., 1997: Biologie du gui. 8 p.

Managing Editor

Dr Ruth Landolt
Institut fédéral de recherches WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
E-mail: ruth.landolt@wsl.ch
www.wsl.ch/lm/publications/

Impression:
Bruhin AG, Freienbach

Mycor® pro S 5000 bio fertilisation

Engrais organique azoté norme N FU 42001
Utilisable en agriculture biologique
Conformément à l'annexe II A du règlement CEE
N° 2029 91



Conditionné en sac de 25 Kg = 50 litres
Palette de 500 Kg (20 sacs de 25 Kg)

A appliquer toute l'année lors des plantations et semis en pleine terre ou en jardinières.

Plantation et semis pour pleine terre ou jardinières



Exemple de trou de plantation avec tarière

Un dosage simple...

Quantités de MYCOR PRO S en L	Volume du contenant de la plante à mycorhizer ou trou de plantation
0,01 L (1 sac de 50 litres = 5000 Godets)	godets 7x7x8
0,1 L (1 sac de 50 litres = 500 Plantes)	1 Litre
0,4 L	5 Litres
0,7 à 1,4 L / Plante suivant nature du sol	10 Litres
1,5 à 3 L / Plante suivant nature du sol	20 Litres
0,20 Litre / Plante	Arbustes en racines nues
0,5 à 3 Litres suivant taille de l'arbre	Arbres en racines nues
1 % du volume de la motte	Arbres en mottes



Mise en place du Mycor® pro S 5000 à l'aide d'un doseur juste avant plantation

8, rue Le Nôtre - 49066 ANGERS
Tél. : 02 41 72 14 27 - Fax : 02 41 87 18 54
e-mail : contact@iftech.fr - www.iftech.fr

la nature protège la nature



Distribué par:

Mycor® pro S 5000 bio fertilisation

Engrais Organique Mycorhizé



Spécial bio fertilisation

Les mycorhizes sont des associations bénéfiques entre une plante et un champignon qui s'établissent pour toute la vie de la plante.

«Ces symbioses sont équilibrées, durables et très anciennes...»
(B. Boullard, 1968)

MYCOR PRO S 5000

est un engrais organique azoté 100% naturel à base de racines mycorhizées et de corne broyée.

Des résultats prouvés :

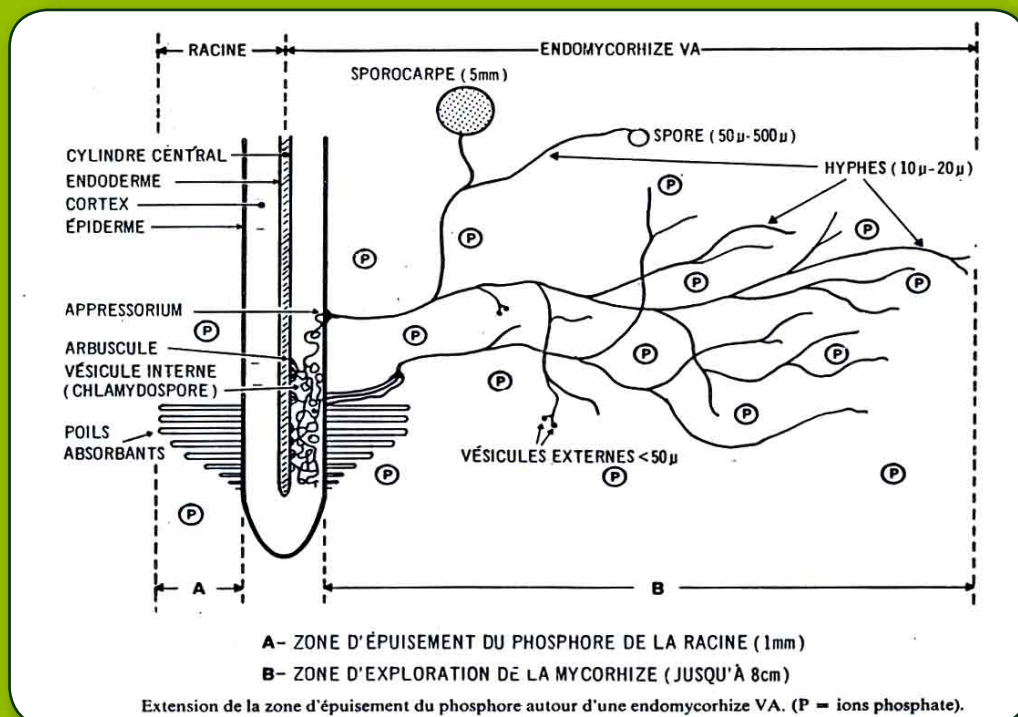
Amélioration du développement et de la croissance de la plante.

«la stimulation de croissance observée atteint en effet un gain de 20 à 40 % en plantation» (Le Tacon & al.)

Meilleure résistance au stress hydrique et salin.

Schéma comparatif de l'exploration mycorhizienne du sol

C PLENCHETTE 1982



Par une racine à gauche (A = dimension de poils absorbants)

Par une mycorhize (B = zone d'exploration de la mycorhize)

La mycorhize a une surface absorbante plusieurs dizaines de fois supérieure à la racine et donc exploite un bien plus grand volume de sol pour sa nutrition.

LA SUPPRESSION NATURELLE DES MALADIES: UNE MISE-À-JOUR TECHNIQUE

Journée des producteurs en pépinières, 31 janvier 2008, Drummondville Québec

Mario Lanthier

CropHealth Advising & Research, Kelowna, Colombie-Britannique (www.crophealth.com)

En 1996, les chercheurs de l'université de l'état d'Ohio ont publié une étude remarquable.

Lorsque des plants de concombre poussent dans un mélange contenant du compost d'écorce, puis sont infectés par la maladie anthracnose, ces plants expriment moins de symptômes de maladie que des plants similaires qui poussent dans un mélange fait de tourbe agée. De plus, les plants dans le mélange de compost d'écorce montrent une activité plus élevée de peroxidase, une molécule associée à la résistance systémique acquise chez les plantes ¹.

Ce travail par l'équipe du Dr Harry Hoitink était le premier rapport scientifique montrant un lien direct entre le milieu de croissance des racines et la suppression d'une maladie sur les feuilles. Depuis, il y a eu beaucoup de progrès pour clarifier les mécanismes en jeu. Aujourd'hui, ce phénomène naturel peut être stimulé pendant la préparation et l'utilisation des mélanges à empoter, des paillis et des amendements de sol.

I. LE COMPOST ET LES POURRIDIES DE RACINE

Le compostage est un procédé biologique contrôlé pour décomposer la matière organique. Il y a habituellement 3 étapes dans le compostage ².

- Une étape initiale de 1 ou 2 journées avec températures très hautes (jusqu'à 70°C);
- Puis, plusieurs semaines pendant lesquelles le matériel se maintient entre 45 et 65°C;
- Un curage final lorsque la température est légèrement plus élevée que l'air ambiant.

Lorsque le compostage est bien fait, les températures élevées contribuent à éliminer les microbes qui sont responsables des maladies de plante ³. Par contre, un compost mal géré peut encore contenir ces organismes pathogènes, incluant ceux qui déclenchent la pourriture des racines ⁴.

De façon routinière, notre compagnie teste les mélanges à empoter et les paillis utilisés par nos clients pour vérifier la présence des organismes pathogènes de racine. Le tableau ci-dessous présente les résultats pour 5 produits différents. Notez que les produits #1, #2 et #3 sont d'excellente qualité, mais les produits #4 et #5 sont de mauvaise qualité.

Présence d'organismes pathogènes de racine dans cinq composts de source commerciale

Produit testé	<i>Phytophthora</i>	<i>Pythium</i>	<i>Fusarium</i>	<i>Rhizoctonia</i>
Paillis de sapin et de pruche	0	Très peu	0	0
Écorce de sapin	0	0	0	0
Compost #1 sapin et pruche	0	0	0	0
Compost #2 sapin et pruche	0	Très élevé	Peu	Modéré
Sol pour plantation d'arbres	0	Très élevé	Modéré	Modéré

Évaluation basée sur le nombre de propagules par gramme de sol. Tests à Ribeiro Plant Lab Inc., Seattle

II LE COMPOST SUPPRESSIF AUX MALADIES

Les matériaux bien compostés sont exposés à des températures entre 45 and 65°C, ce qui est habituellement suffisant pour détruire les organismes pathogènes. Cette période, qui dure de 2 à 3 mois, est suivie par un curage qui stabilise la décomposition des matériaux ².

La période de curage est critique pour la suppression naturelle des maladies. Après les températures élevées, plusieurs microorganismes colonisent le matériel, incluant *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Streptomyces* et *Trichoderma*, tous des parasites des organismes pathogènes ⁵.

Deux facteurs peuvent être manipulés par les personnes désirant tirer profit de ce processus.

Sélectionnez des composts produits près de la forêt. La qualité finale est supérieure lorsque le compost est colonisé par les microorganismes bénéfiques qui sont natifs de la région. Par exemple, le *Trichoderma* est généralement abondant sur le plancher des forêts ⁶.

Maintenez de l'humidité sur la surface extérieure des piles. Un film d'eau doit être présent sur la surface pour que les microbes, spécialement les bactéries, puissent coloniser le matériel pendant le curage. Un contenu en eau de 40 à 50% est nécessaire pour obtenir un compost suppressif. Un compost trop sec (moins de 35% en eau) est propice aux maladies de *Pythium* ⁵.

Les composts produits de cette façon sont généralement suppressifs au *Pythium* et *Phytophthora*. La quantité et la variété de microorganismes présents dans le compost créent une compétition qui empêche les organismes pathogènes de sporuler ou d'infecter les racines. Les mêmes mécanismes se retrouvent dans les sols de fermes biologiques qui ont peu de maladie de racines ².

Il est plus difficile de stimuler la suppression naturelle des maladies causées par le *Rhizoctonia*. Ce pathogène peut survivre dans la matière organique fraîche et, de ce fait, évite la compétition directe qui fonctionne si bien contre le *Pythium* et le *Phytophthora*. Pour obtenir la suppression du *Rhizoctonia*, il faut d'abord un compostage adéquat pour réduire la matière organique qui nourrit l'organisme pathogène, puis une colonisation du compost par des microorganismes bénéfiques spécifiques. Cette colonisation est aléatoire et inconsistante. Pour garantir la suppression des maladies causées par le *Rhizoctonia*, il faut ajouter les microorganismes bénéfiques au compost ⁸.

LA SUPPRESSION DES MALADIES PAR LES COMPOSTS ⁷

La plupart des composts peuvent prévenir les pourridiés de racine.

Les microorganismes bénéfiques utilisent la nourriture autour des racines de la plante.
Ce mécanisme (compétition directe) aide à prévenir le *Pythium* et le *Phytophthora*.

Quelques composts peuvent prévenir la fonte des semis.

Des microorganismes spécifiques attaquent et se nourrissent des organismes pathogènes.
Ce mécanisme (mycoparasitisme) aide à prévenir le *Rhizoctonia* et le *Fusarium*.

Peu de composts peuvent prévenir les maladies de feuillage.

Certains microbes présents sur les racines peuvent empêcher les maladies en surface.
Ce mécanisme (Résistance Systémique Induite) stimule les gènes encodés de défense.

III. LES MICROBES DISPONIBLES COMMERCIALEMENT

Il est maintenant possible d'acheter des produits faits à base de microorganismes bénéfiques. Ces biofongicides sont excellents pour prévenir plusieurs maladies. D'autres produits sont en cours d'homologation, incluant la bactérie *Bacillus subtilis* et le champignon *Gliocladium c.*⁹.

Les produits qui suivent sont approuvés par OMRI (Organic Materials Review Institute, l'Institut de révision des matériaux biologiques) et peuvent être utilisés en production biologique¹⁰.

Mycostop (Streptomyces griseoviridis strain K61)

L'ingrédient actif, *Streptomyces*, est une bactérie actinomycète qui se retrouve abondamment dans les sols. C'est un colonisateur reconnu des racines de plantes, se nourrissant des exudats. La souche de ce produit génère un métabolite antifongique qui détruit la membrane cellulaire du pathogène. Plusieurs études montrent aussi une amélioration dans la croissance de la plante¹¹.

L'homologation de 2005 inclue la suppression de la fonte des semis et du pourridié du col causé par *Fusarium*, *Pythium* et *Phytophthora* dans la production en serre de légumes et plantes ornementales. C'est un produit à utiliser en prévention, principalement sur les jeunes semis¹².

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués au pays. Les scientifiques d'Agriculture et Agro-alimentaire Canada, à la station de Vineland, ont conclu que Mycostop était «aussi efficace» que Ridomil (ingrédient actif métalaxyl) pour réduire les symptômes causés par *Pythium* dans la production de poinsettia en contenant¹³. À l'université Simon Fraser, en Colombie-Britannique, les chercheurs ont travaillé avec des semis de concombre. Ils ont appliqué Mycostop à la semence puis 11 jours plus tard, avant d'infecter les racines avec du *Pythium*. Les résultats indiquent que l'utilisation du produit était efficace contre cette maladie¹⁴.

Rootshield (Trichoderma harzianum strain KRL-AG2)

L'ingrédient actif, *Trichoderma*, est un champignon commun dans les sols, surtout dans la couche d'humus à la surface des sols de forêts. Le champignon se développe vers le pathogène, sécrète des enzymes qui dégradent la membrane cellulaire, puis envahi le pathogène pour se nourrir des métabolites cellulaires. Pour *Rhizoctonia*, *Pythium* et *Fusarium*, les chercheurs rapportent une suppression des maladies plutôt qu'un control complet¹⁵.

Le produit est homologué pour la suppression de *Pythium*, *Rhizoctonia* et *Fusarium* dans la production en serre de légumes et plantes ornementales¹⁶. Il y a une grande quantité d'articles scientifiques sur le mode d'action et l'impact de *Trichoderma harzianum* (la souche T-22). Beaucoup de ce travail a été effectué à l'université de Cornell¹⁷.

Produits à base de champignons mycorhiziens

Les champignons mycorhiziens sont des organismes spécialisés qui vivent en relation symbiotique avec les racines de plantes. Ces champignons sont fréquents dans la nature mais peu présents dans les sols agricoles ou les mélanges à empoter. Les plantes colonisées par les champignons mycorhiziens ont une plus grande tolérance aux stress environnementaux causés par la sécheresse, le froid, un sol pauvre, ou la présence des agents pathogènes de racine¹⁸.

Il y a une amélioration marquée dans la croissance des racines lorsque les plantes sont produites en présence de ces champignons¹⁹. Plusieurs produits commerciaux sont disponibles²⁰.

IV. RÉSISTANCE AUX MALADIES DU FEUILLAGE

Plus récemment, les chercheurs ont identifié des composts qui peuvent prévenir les maladies du feuillage. Pour ce faire, des microorganismes spécifiques doivent être présents autour des racines pour déclencher la production de protéines à l'intérieur de la plante qui, par exemple, forment une barrière physique au site d'infection au moment de l'attaque par l'agent pathogène²¹.

Ce mécanisme est appelé «Résistance Systémique Induite». C'est un mécanisme différent de la «Résistance Systémique Acquise», lorsque les protéines sont produites *avant* l'infection du feuillage par le pathogène, donc à un grand coût énergétique pour la plante⁷.

Dans une étude publiée en 2003, seulement un compost commercial sur 79 pouvait supprimer la tache bactérienne chez le radis. Onze microorganismes ont été identifiés, tous capables d'induire la résistance systémique, les plus efficaces étant les souches de *Bacillus* et de *Trichoderma*²².

Pour s'assurer des résultats, les microorganismes bénéfiques doivent être introduits dans le mélange à empoter, dans le paillis ou dans l'amendement du sol. Les scientifiques vérifient présentement l'efficacité de ces composts «fortifiés» sur les maladies de feuillage²³.

Les premiers rapports sont encourageants. Un groupe de chercheurs à l'université d'Ohio a récemment conclu que le compost «fortifié» par *Trichoderma hamatum* souche 382, puis utilisé comme ingrédient du mélange à empoter, pouvait supprimer plusieurs maladies de feuillage:

- l'alternariose du concombre causé par *Phytophthora capsici*²⁴;
- la nervation noire de plusieurs légumes causée par *Xanthomonas campestris*²⁵;
- la brûlure des feuilles chez le bégonia causée par *Botrytis cinerea*²⁶.

Résultats sur l'efficacité d'un compost enrichi avec *Trichoderma* dans la production en pots⁷

Plante testée	Maladie	Mélange à potter régulier	Même mélange plus <i>T. 382</i>
<i>Myrica pennsylvanica</i>	Botryosphaeria de la tige	21 % mortalité	6 % mortalité
<i>Pieris japonica</i>	Phytophthora de la tige	24 % mortalité	4 % mortalité
<i>Rhododendron Roseum</i> E.	Phytophthora de la tige	84 % mortalité	72 % mortalité
<i>Begonia</i> cv. Barbara	Oïdium blanc	Sévérité 1402	Sévérité 100

Plusieurs facteurs sont importants pour assurer les résultats. Premièrement, cette approche ne fonctionnera pas avec les cultivars hautement susceptibles à la maladie ou avec les cultivars qui n'ont pas les «gènes de résistance» à la maladie⁷.

Deuxièmement, le substrat ou le sol du champ doivent contenir la nourriture qui supporte la colonisation du milieu et la croissance des microbes bénéfiques. Cette nourriture consiste généralement de matériaux récalcitrants à la décomposition, par exemple les hydrates de carbone dans la tourbe et la cellulose protégée par la lignine dans l'écorce des arbres. Cette «capacité à supporter les microbes» peut être utilisée pour prédire la durée de la suppression des maladies²⁷.

Ces mécanismes naturels peuvent être utilisés en production commerciale. Les programmes fonctionnent bien en prévention mais ne sont pas fiables en situations très favorables à la maladie. Pour le moment, les producteurs doivent maintenir l'utilisation des fongicides⁷.

V. QUELQUES “RECETTES”

Jardin à la maison

*Les produits compostés contiennent les microbes bénéfiques utiles pour le sol*²⁸.

- La surface du sol peut être couverte avec 2,5 cm (1 pouce) de compost en voie de curage.
- Une application à l’automne permettra le lessivage dans le sol pendant l’hiver.

Les paillis d’aménagements paysagers

*Il y a plusieurs considérations importantes pour une utilisation correcte des paillis*²⁹.

- Un paillis de matière organique décomposée est placé en surface et couvert de copeaux de bois.
- L’épaisseur totale doit être 10 à 15 cm sur les sols lourds ou en région de pluies fréquentes.
- L’épaisseur totale doit être 15 à 20 cm sur les sols légers ou en région de climat plus sec.
- Un paillis de plus de 20 cm empêche l’oxygénation du sol et crée des problèmes de racines.

*Le compost légèrement immature est le plus riche en microbes bénéfiques*³⁰.

- Il ne faut pas utiliser des paillis non-compostés, qui peuvent contenir des agents pathogènes.
- Un mélange de retailles de pelouse, de fumier et d’urée peut être composté pendant 6 semaines.
- Le taux d’eau doit être maintenu à 40% durant le compostage, l’entreposage et l’application.
- Il faut éviter de placer le paillis contre le tronc, ce qui crée une condition propice aux maladies.

Production au champs

*Le compost peut être utilisé comme amendement du sol*³¹.

- L’application ne doit pas excéder 50 tonnes sèches à l’acre, ou 4 verges cubes par 1000 pi².
- Pour un compost contenant 50% d’eau, 50 tonnes sèches équivaut à une épaisseur de 1 pouce.
- Il est plus facile d’épandre le compost lorsque le taux d’eau est de moins de 40%.
- De 8 à 12% de l’azote dans le compost est disponible pour la plante la première année.
- Une fertilisation supplémentaire doit être faite pour les récoltes demandant beaucoup d’azote.

*L’utilisation du compost doit être balancée avec les besoins du sol et de la récolte*²⁸.

- Fumier et biosolide (haute teneur en azote), une couche de 2.5 cm est enfouie à 10 cm de sol.
- Résidu de plantes (faible teneur en azote), une couche de 10 à 15 cm est enfouie à 20 cm de sol.
- Le compost doit être enfoui plusieurs semaines avant la plantation des espèces susceptibles aux conditions salines, et plusieurs mois avant la plantation des espèces susceptibles à la pourriture.
- L’épandage à l’automne ou pendant l’hiver permet le lessivage et la décomposition des résidus.

*La matière organique légèrement décomposée est le moteur de la suppression*³¹.

- Les sols pauvres ou à faible teneur en matière organique sont propices aux maladies de racine.
- Ces sols n’offrent pas le milieu de croissance nécessaire aux microorganismes bénéfiques.
- Ces sols deviennent suppressifs aux maladies après une application “riche” de compost (20 à 30 tonnes sèches par hectare), ou après 2 applications “moyennes” (10 à 16 tonnes sèches / hectare).
- Une application réduite, mais annuelle, est généralement plus économique et plus soutenable.

*Il faut éviter l’utilisation des matériaux “frais” ou des composts immatures*²⁷.

- Un matériel non-composté contient la nourriture favorisant la croissance des agents pathogènes.
- Les résidus de récolte doivent être mêlés à du fumier de poulet ou enfouis avant la plantation.
- Les engrais verts doivent être enfouis 10 à 14 jours avant la plantation pour compléter la décomposition, tandis que les composts doivent être enfouis 4 à 6 semaines avant la plantation.

Production en pépinière ou en serre

Les mélanges à empoter sont souvent suppressifs aux maladies causés par le Pythium ⁸.

- La suppression vient de matière organique légèrement décomposée qui est colonisée par une flore microbienne.
- La suppression dure quelques semaines pour la tourbe, de 9 mois à 2 ans pour l'écorce d'arbre.
- La suppression peut être "fortifiée" en traitant avec des biofongicides ou du thé de compost.

Des microorganismes spécifiques sont nécessaires pour prévenir la fonte des semis ²⁴.

- Ces agents de biocontrôle doivent être introduits dans le compost pendant le curage.
- Une deuxième option consiste à ajouter au mélange à empoter, après l'addition des fertilisants.
- La prévention de la maladie est systémique et transférée d'une racine à une autre racine.

Le mélange à empoter doit être préparé avec des matériaux de haute qualité ³².

- La tourbe fibreuse de couleur pâle peut réduire les maladies de racine pour une période allant jusqu'à 6 mois. La tourbe fine de couleur foncée peut accroître les maladies de racine.
- L'écorce du pin, résistante à la décomposition, peut constituer de 65 à 100% du mélange. Le matériel doit d'abord être composté pour éviter l'immobilisation de l'azote et maintenu à un taux d'eau de 50 à 60% pendant le compostage pour éviter la prolifération des pathogènes.
- L'écorce de bois dur doit être compostée avant l'utilisation. Ce matériel a les meilleures propriétés pour soutenir la suppression des maladies. Il est utilisé à 15% du mélange à empoter.
- Le compost de biosolide est une excellente source de minéraux. Il ne doit pas être utilisé à plus de 20% du mélange pour éviter les problèmes de fertilité excessive ou de toxicité d'ammonium.
- Le compost des résidus de plantes est un matériel idéal pour les aménagements paysagers. Il peut être utilisé à 15 ou 20% du mélange à empoter sans causer d'immobilisation d'azote.
- Le fumier composté varie en contenu d'azote. Ce matériel peut être appliqué à la surface des contenants ou utilisé dans une proportion de 15% ou moins dans le mélange à empoter.
- Le mélange à empoter final doit être testé pour ces propriétés physiques d'aération et de rétention d'eau. Le taux d'aération doit être supérieur à 20% pour la plupart des récoltes et supérieur à 25% pour les récoltes susceptibles aux maladies de racine.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- 1) Zhang W., W. Dick, H.A. Hoitink. 1996. *Compost-Induced Systemic Acquired Resistance in Cucumber to Pythium Root Rot and Anthracnose*. Phytopathology 86:1066-1070
- 2) Keener H.M., W.A. Dick, H.A.J. Hoitink. 2001. *Composting and Beneficial Utilization of Composted By-Product Materials*. In: Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-Products. Soil Science Soc America
- 3) Bollen G.J., D. Volker, A.P. Wijnen. 1989. *Inactivation of soil-borne plant pathogens during small-scale composting of crop residues*. Netherlands J Plant Pathology. 95: 19-30.
- 4) Agrios G.N. 1988. *Plant Pathology*. Third Edition. Academic Press, Inc. Page 150.
- 5) Hoitink H.A., A. Stone, D. Han. 1997. *Suppression of Plant Diseases by Composts*. HortScience 32(2):184-187.
- 6) Kuter G.A. et al. 1983. *Fungal populations in container media amended with composted hardwood bark suppressive and conducive to Rhizoctonia damping-off*. Phytopathology 73:1450-1456.
- 7) Hoitink H.A.J. et al. 2006. *Systemic Resistance Induced by Trichoderma spp.: Interactions Between the Host, the Pathogen, the Biocontrol Agent, and Soil Organic Matter Quality*. Phytopathology 96:186-189.
- 8) Stone A.G., S.J. Scheuerell, H.M. Darby. 2004. *Suppression of Soilborne Diseases in Field Agricultural Systems: Organic Matter Management, Cover Cropping, and Other Cultural Practices*. In: Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture. CRC Press LLC, Lewis Publishers, Boca Raton.
- 9) Paulitz TC, RR Belanger. 2001. *Biological Control in Greenhouse Systems*. Ann Rev Phytopathol. 39:103-133.

- 10) Organic Materials Review Institute, Eugene OR. Liste accédée en février 2007 à www.omri.org.
- 11) Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire. 2003. *Mycostop Biofungicide Streptomyces griseoviridis souche K61*. Projet de décision réglementaire document PRDD2003-07. Disponible au www.pmra-arla.gc.ca.
- 12) Plant Products Co. Ltd. *Mycostop Biofungicide*. Loi sur les produits antiparasitaires No d'homologation 26265.
- 13) Gracia-Garza J.A. et al. 2003. *Efficacy of various biological control agents and biorationals against Pythium rot rot in Poinsettia*. HortTechnology 13(1): 149-152.
- 14) Punja Z.K. and R. Yip. 2003. *Biological control of damping-off and root rot caused by Pythium aphanidermatum on greenhouse cucumbers*. Can J Plant Pathol. 25:411-417.
- 15) Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire. 2007. *RootShield Biological Fungicide Trichoderma harzianum Rifai souche KRL-AG2*. Projet de décision réglementaire document PRDD2007-01. Disponible au www.pmra-arla.gc.ca.
- 16) BioWorks Inc. *RootShield granules fungicide biologique*. Loi sur les produits antiparasitaires No d'homologation 27116.
- 17) Harman. 2000. *Changes in Perceptions Derived from Research on Trichoderma harzianum T-22*. Plant Disease. 84(4):377-393.
- 18) Maronek D.M., J.W. Hendrix and J. Kiernan. 1981. *Mycorrhizal Fungi and Their Importance in Horticultural Crop Production*. Horticultural Reviews, Volume 3.
- 19) Davies F.T. 2000. *Benefits and opportunities with mycorrhizal fungi in nursery propagation and production systems*. Comb Proc Intl Plant Prop Soc. 50:482-489.
- 20) Premier Tech Biotechnologies. *Myke Pro*. Voir le site web <http://www.premiertech.com/myke/mycorise/>.
- 21) Pharand B., O. Carisse, N. Benhamou. 2002. *Cytological aspects of compost-mediated induced resistance against Fusarium crown and root rot in tomato*. Phytopathology. 92:424-438.
- 22) Krause M.S. et al. 2003. *Isolation and Characterization of Rhizobacteria from Composts That Suppress the Severity of Bacterial Leaf Spot of Radish*. Phytopathology 93:1292-1300.
- 23) Zinati G.M. 2005. *Compost in the 20th Century: A Tool to Control Plant Diseases in Nursery and Vegetable Crops*. HortTechnology. 15(1): 61-66.
- 24) Khan et al. 2004. *Systemic Resistance Induced by Trichoderma hamatum 382 in Cucumber Against Phytophthora Crown Rot and Leaf Blight*. Plant Dis. 88:280-286.
- 25) Aldahmani J.H. et al. 2005. *Reduction of bacterial leaf spot severity on radish, lettuce, and tomato plants grown in compost-amended potting mixes*. Can J Plant Pathol. 27:1286-1293.
- 26) Horst L.E. et al. 2005. *Suppression of Botrytis Blight of Begonia by Trichoderma hamatum 382 in Peat and Compost-Amended Potting Mixes*. Plant Dis. 89:195-1200.
- 27) Krause M.S., L.V. Madden and H.A.J. Hoitink. 2001. *Effect of Potting Mix Microbial Carrying Capacity on Biological Control of Rhizoctonia Damping-Off of Radish and Rhizoctonia Crown and Root Rot of Poinsettia*. Phytopathology 91:1116-1123.
- 28) Hoitink H.A.J. 2006. *Compost Use for Disease Suppression*. Presentation at "Washington Organic Recycling Council 2006 Meeting". Seattle, WA.
- 29) Hearms D., M. Gleason, J. Iles. D. Lewis, H. Hoitink and J. Hartman. 2001. *Using Mulches in Managed Landscapes*. Iowa State University Bulletin SUL12, The Ohio State University Extension Bulletin 894.
- 30) Hoitink H.A.J. and M.S. Krause. 1998. *Control of Nuisance and Detrimental Molds (Fungi) in Mulches and Composts*. Annual Reports and Research Reviews. Special Circular 165-99. The Ohio State University.
- 31) Rynk R. editor. 1992. "On-Farm Composting Handbook". Northeast regional Agricultural Engineering Service. Cooperative Extension. Ithaca, NY. Pages 80-81.
- 32) Hoitink H.A.J., M.A. Rose, R.A. Zondag. 1997. *Properties of Materials Available for Formulation of High-Quality Container Media*. Annual Reports and Research Reviews. Special Circular 154. The Ohio State University.



Journée des producteurs en pépinière 2008

31 janvier 2008
Hôtel Le Dauphin, Drummondville

Encore une fois, l'IQDHO organise l'événement annuel tant attendu des pépiniéristes du Québec !

- Des recettes pour faire la guerre aux organismes nuisibles
- Quels sont les résultats du projet plantes-trappes
- Retour sur les tournées de pépinières : en Ontario et en Colombie-Britannique
- Comment réduire vos coûts par la méthode du *leanflow*
- Le système *MOST* à la Pépinière Sheridan
- Des nouveautés concernant la lutte intégrée
- Aménagement des berges : la production des plantes et leur effet sur l'environnement



IQDHO

Institut québécois du développement
de l'horticulture ornementale

www.iqdho.com

Cette journée est en partie réalisée dans le cadre du programme « Initiative d'appui aux conseillers agricoles » selon les termes de l'entente Canada-Québec sur le Renouveau du Cadre stratégique agricole.



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

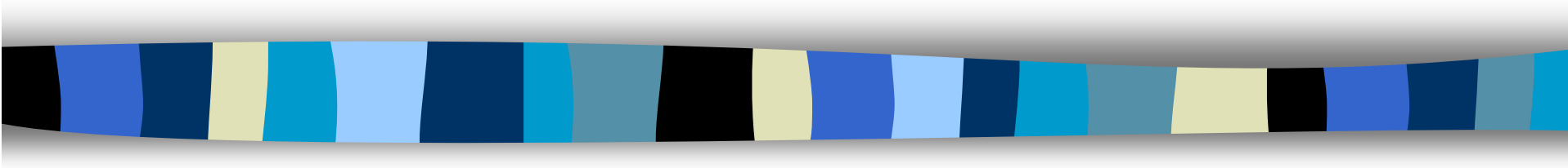
Agriculture, Pêcheries
et Alimentation

Québec

Pour renseignements : IQDHO

Téléphone : 450-778-6514 • Télécopieur : 450-778-6537 • Courriel : info@iqdho.com

Investigação de Biomoléculas Existentes no Extrato Aquoso de Sementes de Plantas Antagonistas com Efeito Nematicida sobre Juvenis de Segundo Estádio de *Meloidogyne incognita* raça 3



Evaristo, R.G.S^{1,3}.; Almeida, C.D.S^{1,2}.; Magalhães, J.C.C¹.; Franco, P¹.; Salomão, D¹.; Randig, O¹.; Carneiro, R.M.D.G¹.; Grossi de Sá, M.F¹.; Rocha, T.L¹.

¹EMBRAPA - Recursos genéticos e biotecnologia;

²UnB - Universidade de Brasília, Faculdade de agronomia e medicina veterinária.

³FTB - Faculdade da Terra de Brasília, Faculdade de Ciências Biológicas



Introdução

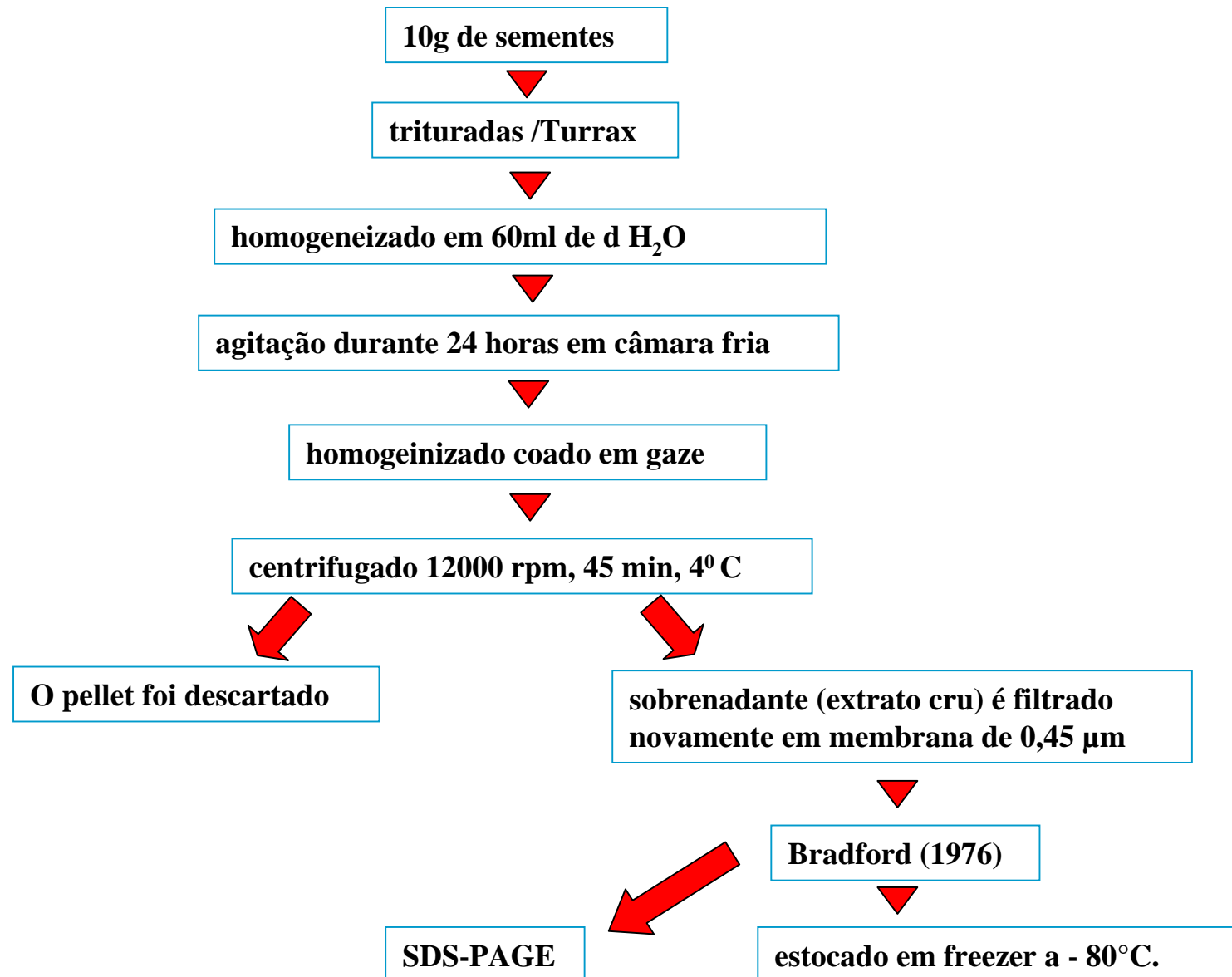
- **Meloidoginose** doença causada por fitonematóides a várias culturas – redução de produtividade – morte da planta
- Dentre os fitonematóides, os do **gênero *Meloidogyne*** possuem uma ampla disseminação e um alto poder de destruição;
- Representa assim um **grave problema às agriculturas brasileira e mundial** (Dufour *et. al.*, 2003; Amaral *et. al.*, 2002);
- As perdas anuais provocadas por ***Meloidogyne spp.*** a culturas como algodão, café e cana-de-açúcar atingem patamares de bilhões de dólares;
- **Metodologias de controle do parasita:** nematicidas, rotação de culturas, o uso de variedades resistentes, controle biológico e a utilização de **plantas antagonistas**, entre outras (Dufour *et. al.*, 2003; Amaral *et. al.*, 2002; Insunza *et. al.*, 2001; Ferraz & Freitas, 2000; Walla *et. al.*, 1999);
- Sementes de plantas antagonistas escolhidas ***Canavalia ensiformes***, (feijão de porco), ***Crotalaria***, (*C.juncea*), ***Crotalaria paulinea*** (*C.paulinea*), ***Crotalaria spectabilis*** (*C.spectabilis*), ***tagets minuta spectabilis*** (*C.spectabilis*), ***tagets minuta*** (cravo de defunto) e ***Mucuna pruriens*** (mucuna preta);
- **a respeito da natureza e dos mecanismos de ação** destas moléculas bioativas sobre os nematóides;
- **O isolamento e a caracterização destes compostos** /desenho de novas estratégias biotecnológicas a



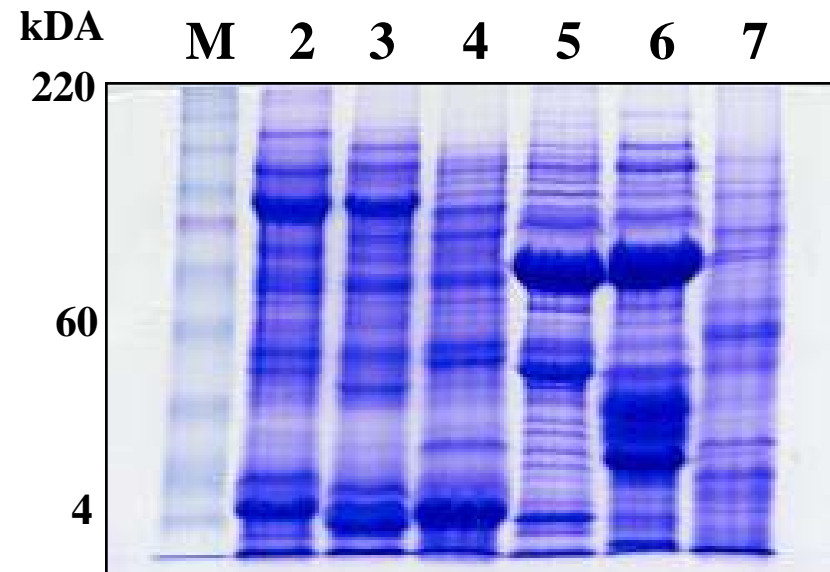
Objetivos

- Avaliar a ação nematicida e / ou nematostática de extratos aquosos de sementes de plantas antagonistas em bioensaios contra juvenis de segundo estágio de *M. incognita* raça 3
- Purificar e caracterizar os compostos bioativos encontrados

Extração aquosa de proteínas de sementes de plantas antagonistas



Análise eletroforética dos extratos aquosos



Extração de Juvenis de estágio 2 de *M. incognita* raça 3

Plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum*)
infectadas com J₂ de *M. incognita* em casa de vegetação



Após 3 meses coletar as plantas



Lavar as raízes, secciona em pequenos pedaços



Triturar as raízes em liquidificador numa
solução de hipoclorito de sódio 0,5%



Filtrar as raízes trituradas em
peneiras de 50, 100 e 500



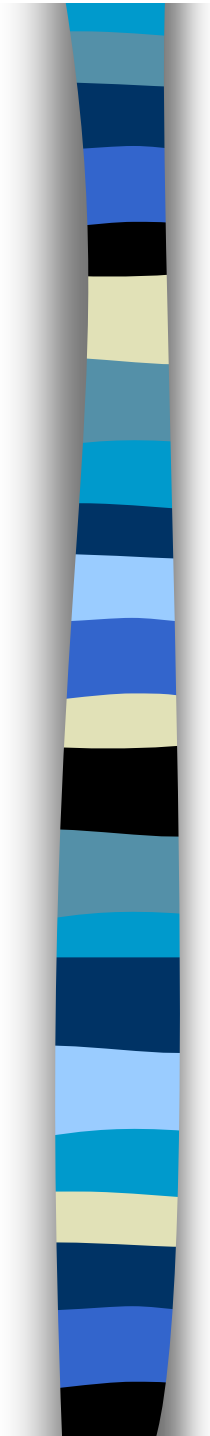
Transferir a massa de raízes
para câmara de eclosão



Obtenção de J₂ após 48 horas



Bioensaios



- Teste biológico → extrato aquoso de sementes de plantas antagonistas

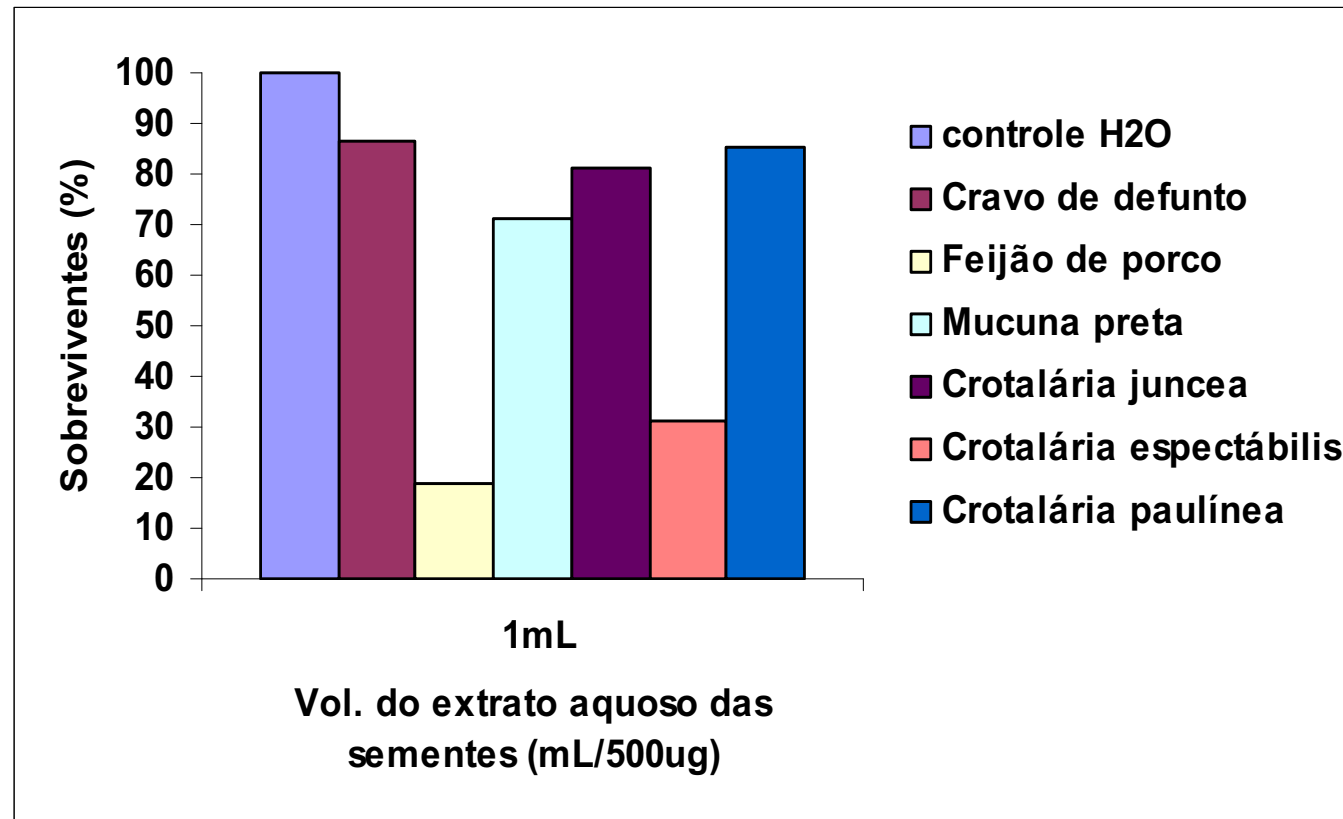


Figura 3. Análise do efeito nematicida de extratos aquosos de sementes de plantas antagonistas contra *J*₂ de *Meloidogyne incognita* raça 3

Estratégias para separação das biomoléculas

↳ cromatografia de exclusão molecular

- Amostra: 12mg (Extrato Aquoso de feijão de porco)
- Fluxo: 0,2mL/min
- Fração: 3mL/tubo

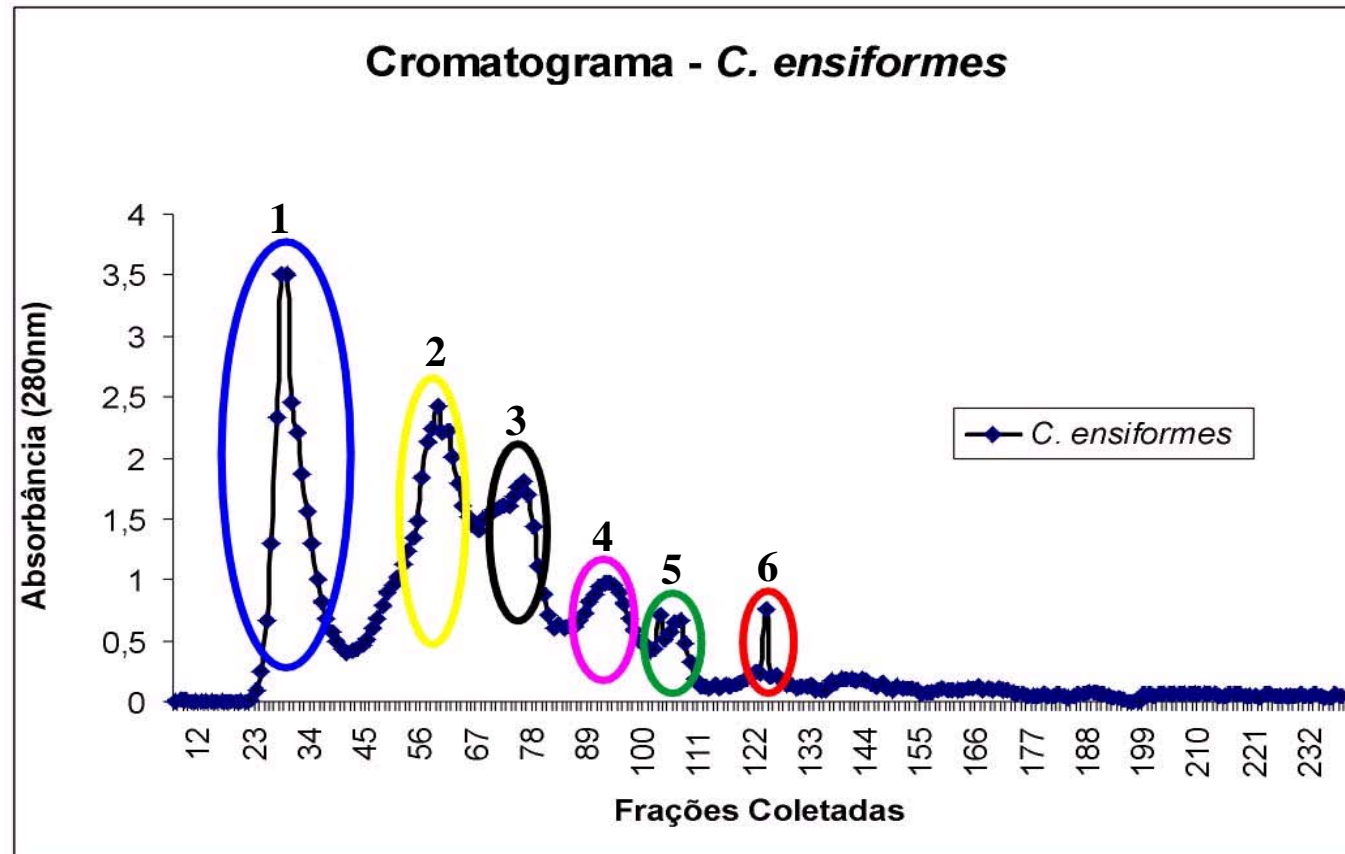


Figura 4. Picos obtidos a partir da cromatografia de exclusão molecular usando Sephacryl S 300

Teste biológico dos picos cromatográficos

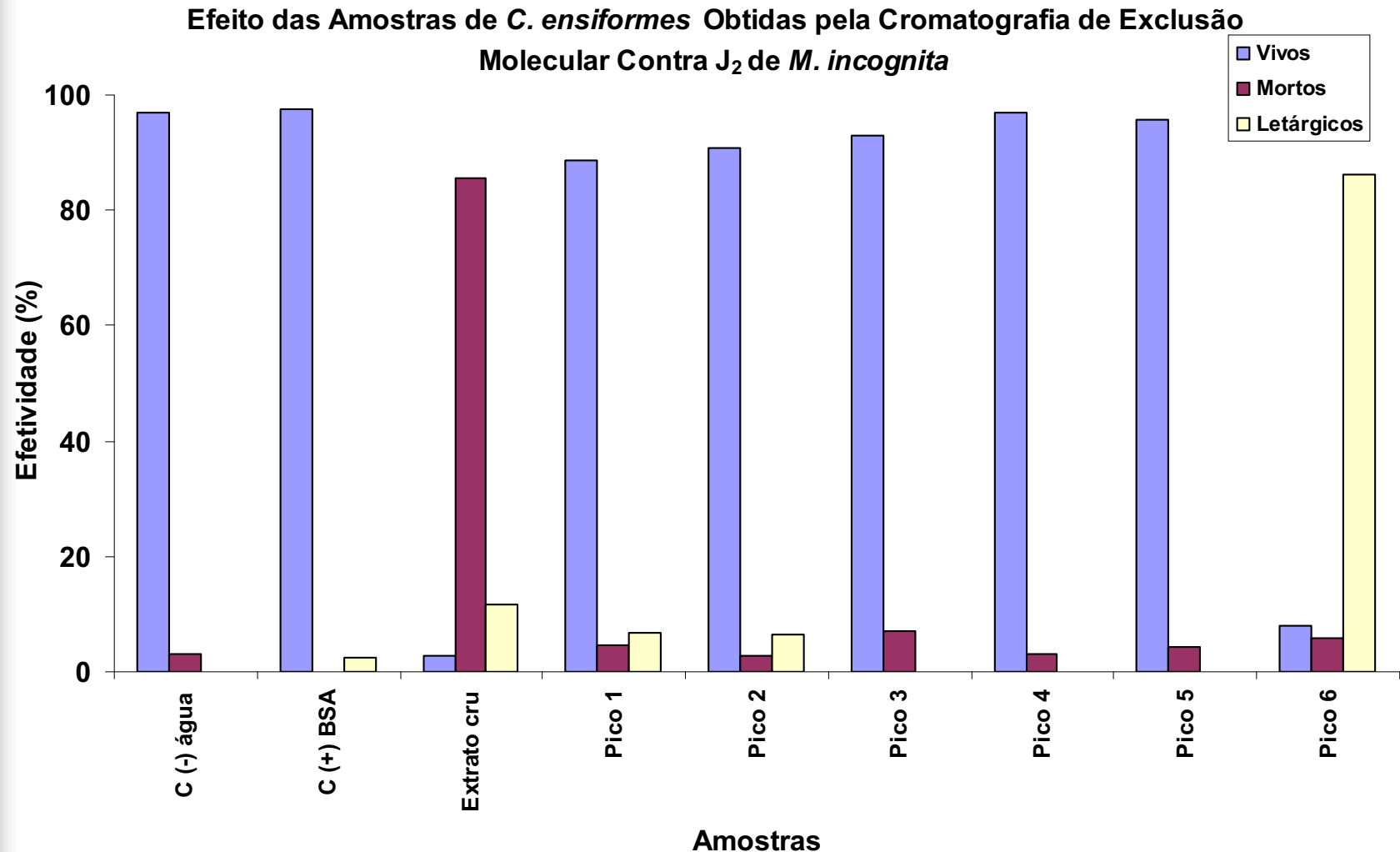


Figura 6. Gráfico mostrando a avaliação do efeito nematocida e nematostático dos 06 picos obtidos da cromatografia de exclusão molecular sobre J_2 de *M. incognita* raça 3. A concentração de cada um dos picos analisados foi de 300ug. Foram utilizados controles negativo com água e protéico com BSA.

↳ Diálise

- Amostra: 12mg de extrato aquoso de sementes de feijão de porco
- Separação de fitocomposto/peptídeos dos polipeptídeos
- Saco de diálise com poros (cut off) de 3.5kDa
- Material dialisado contra água

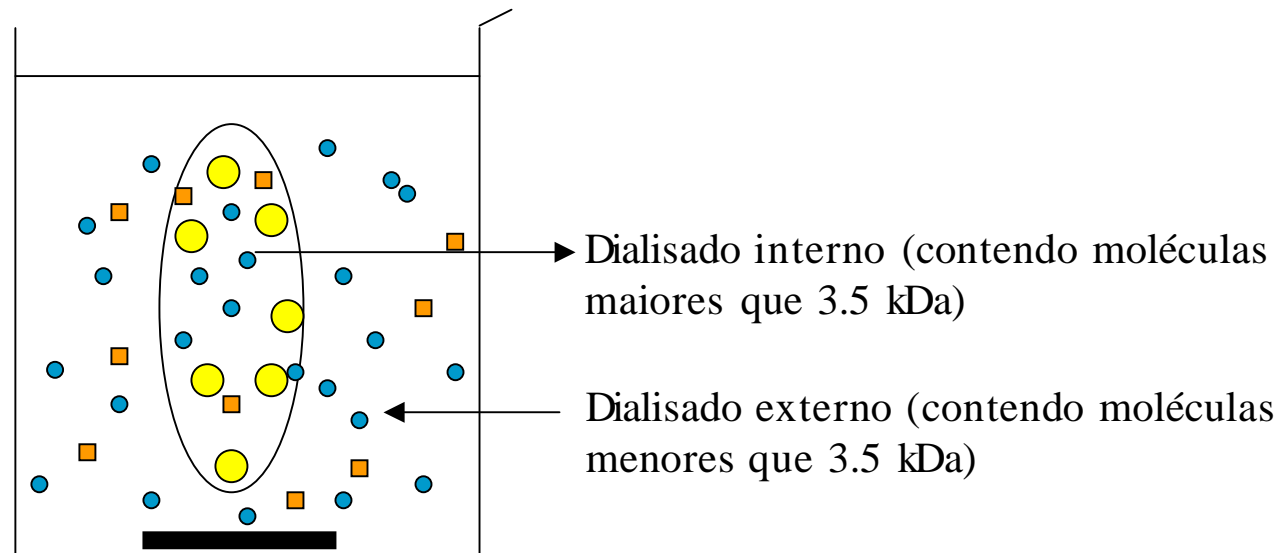


Figura 5. Esquema mostrando a técnica de diálise

Teste biológico do dialisado interno e externo

Efeito das Amostras de *C. ensiformes* Obtidas pela Diálise Contra J_2 de *M. incognita*

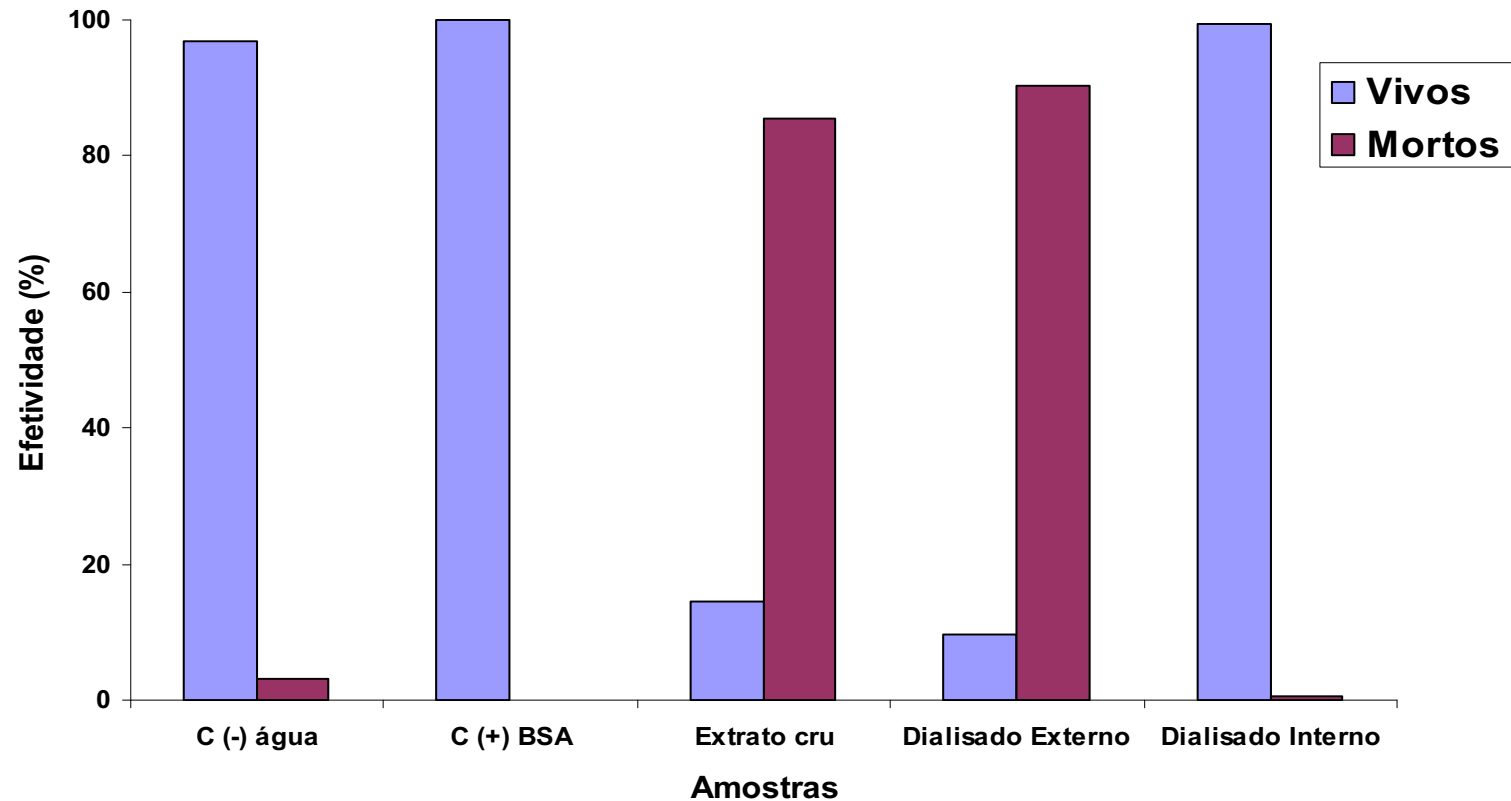


Figura 7. Gráfico mostrando a avaliação do efeito nematocida das amostras do dialisado interno e externo sobre J_2 de *M. incognita*. A concentração das amostras analisadas foi de 300ug. Foram utilizados controles negativo com água e protéico com BSA.

Cromatograma do dialisado externo do extrato aquoso de sementes de *C.ensiformes* em HPLC

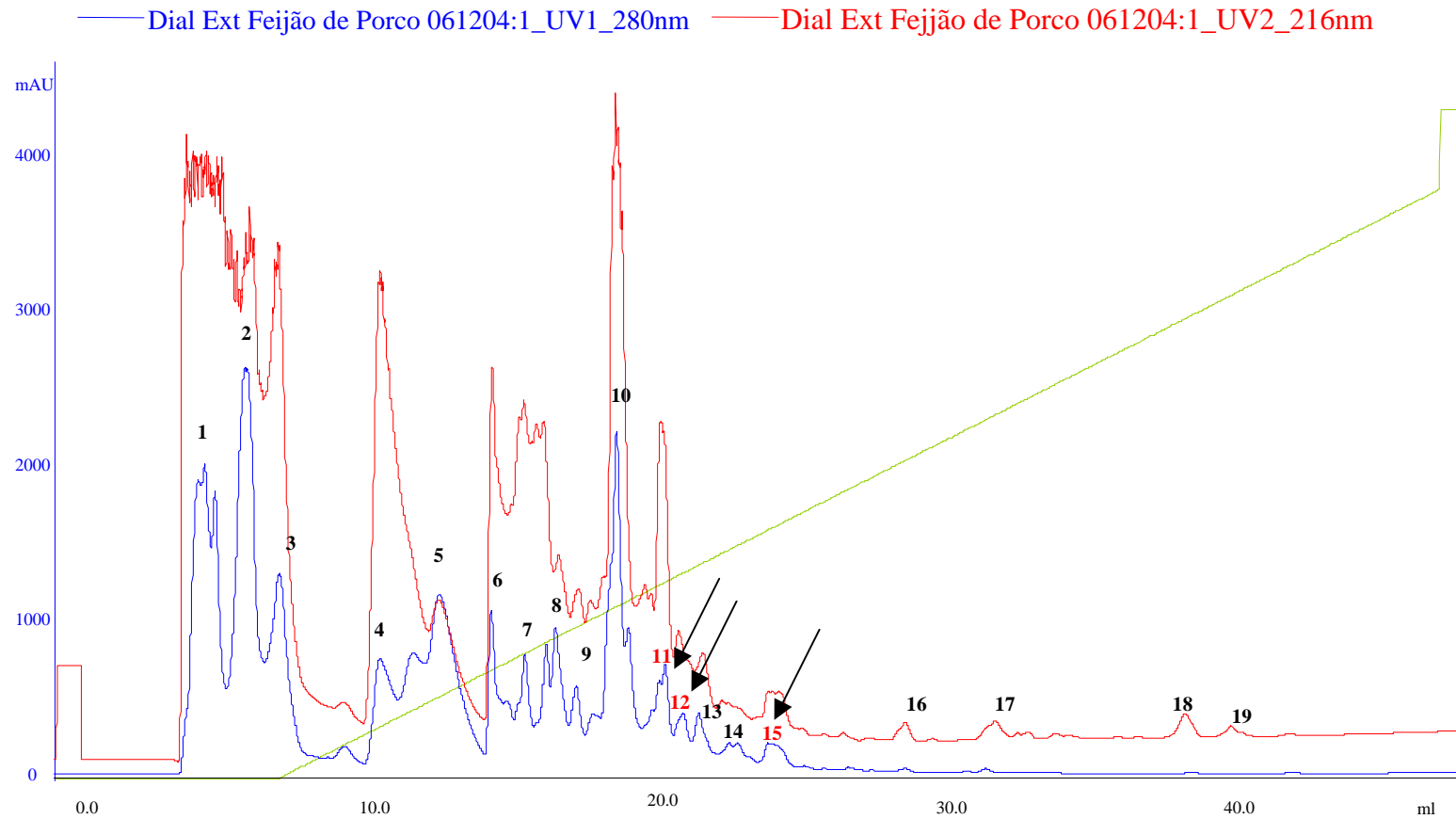


Figura 7. Separação cromatográfica do dialisado externo do extrato aquoso de sementes de feijão de porco contendo 2 mg em HPLC utilizando coluna de Fase Reversa C18 com fluxo de 0.2 mL/minuto.

Análise dos picos obtidos em HPLC por Espectrometria de massa

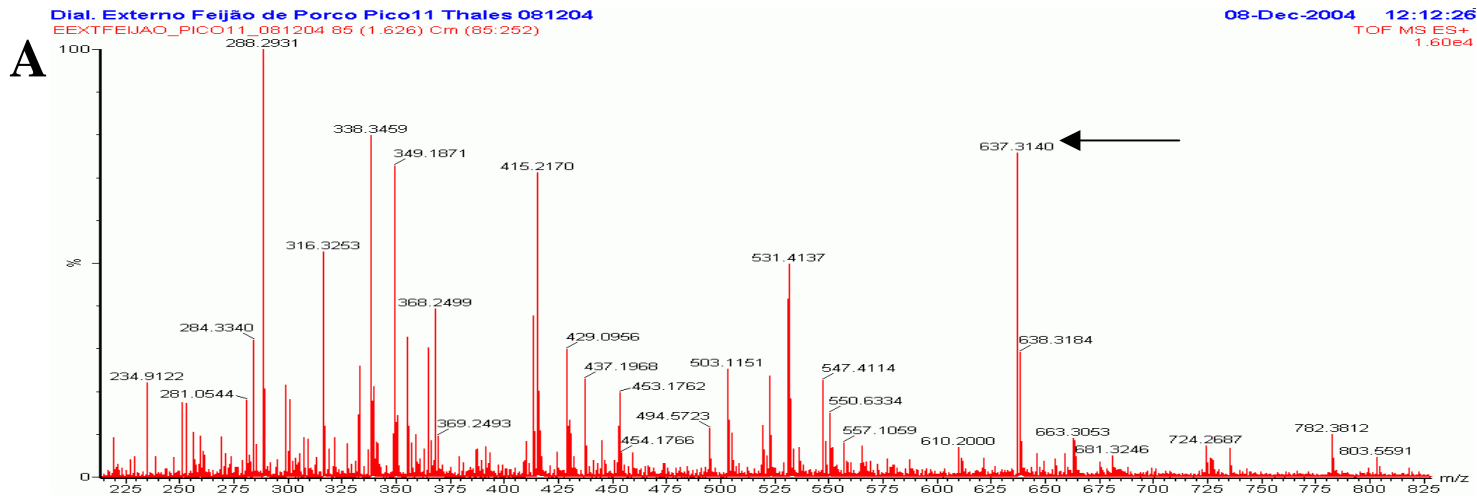


Figura 8 A. Análise em Q-TOF do pico 11 obtido em HPLC mostrando um amplo espectro de massas moleculares.

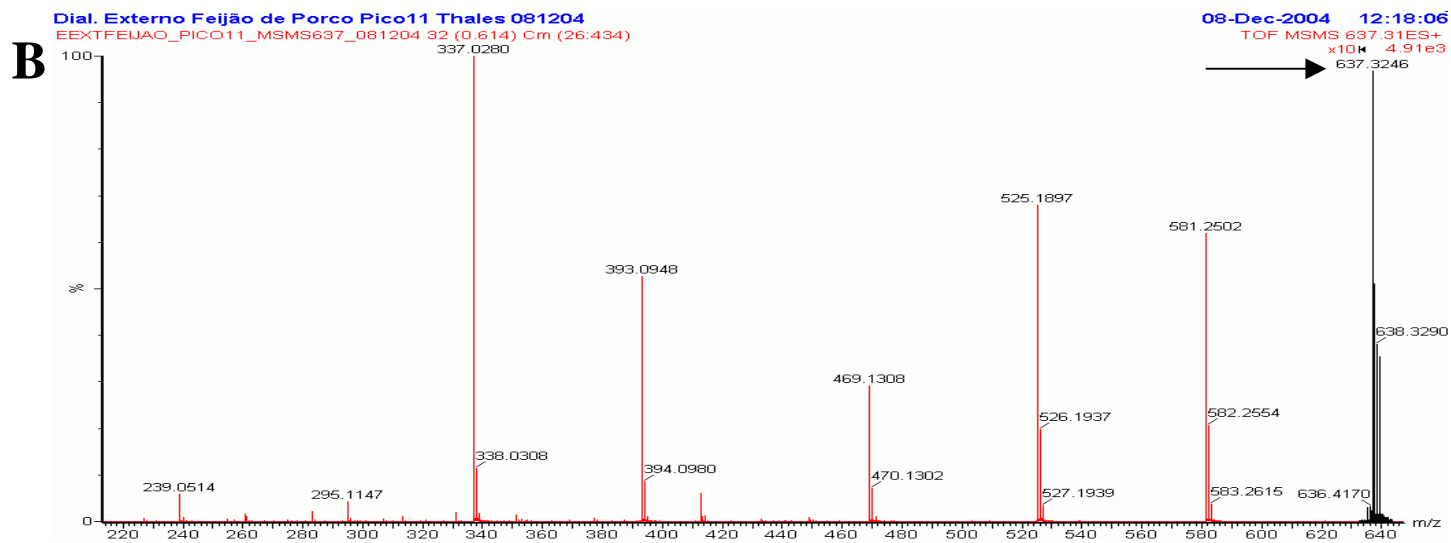


Figura 8 B. Fragmentação do pico com massa de 637.3246 indicando ser um fito composto e não um peptídeo.

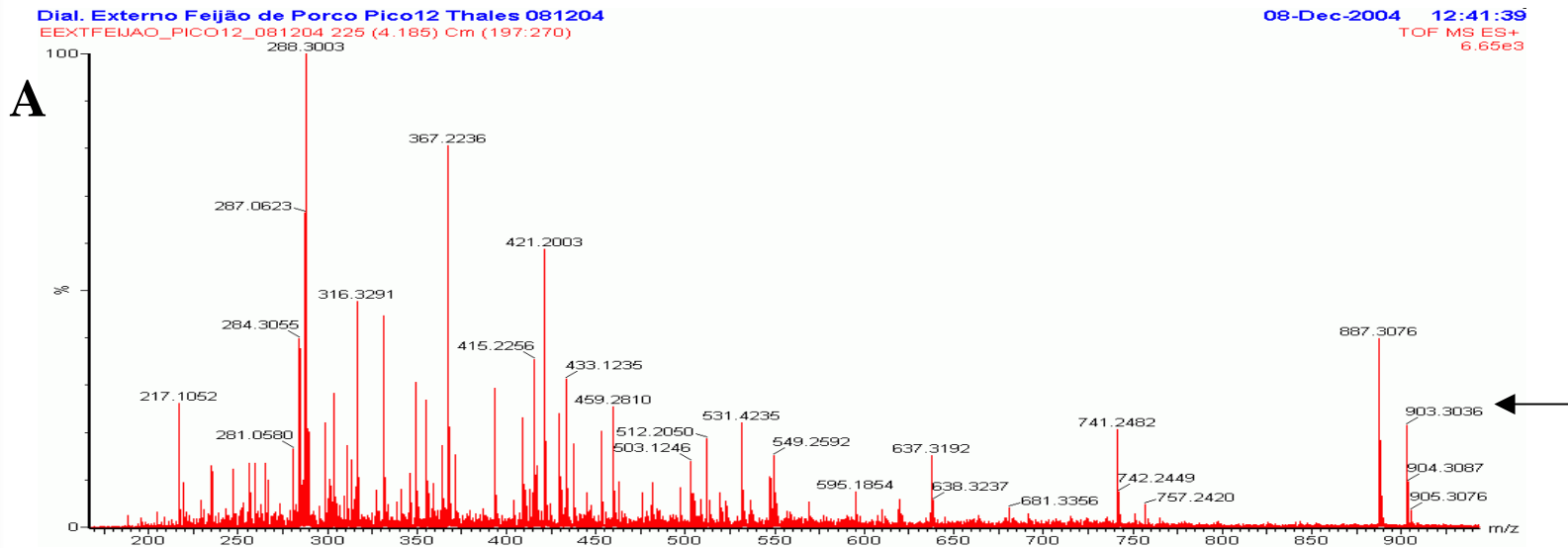


Figura 8 A. Análise em Q-TOF do pico 12 obtido em HPLC mostrando um amplo espectro de massas moleculares.

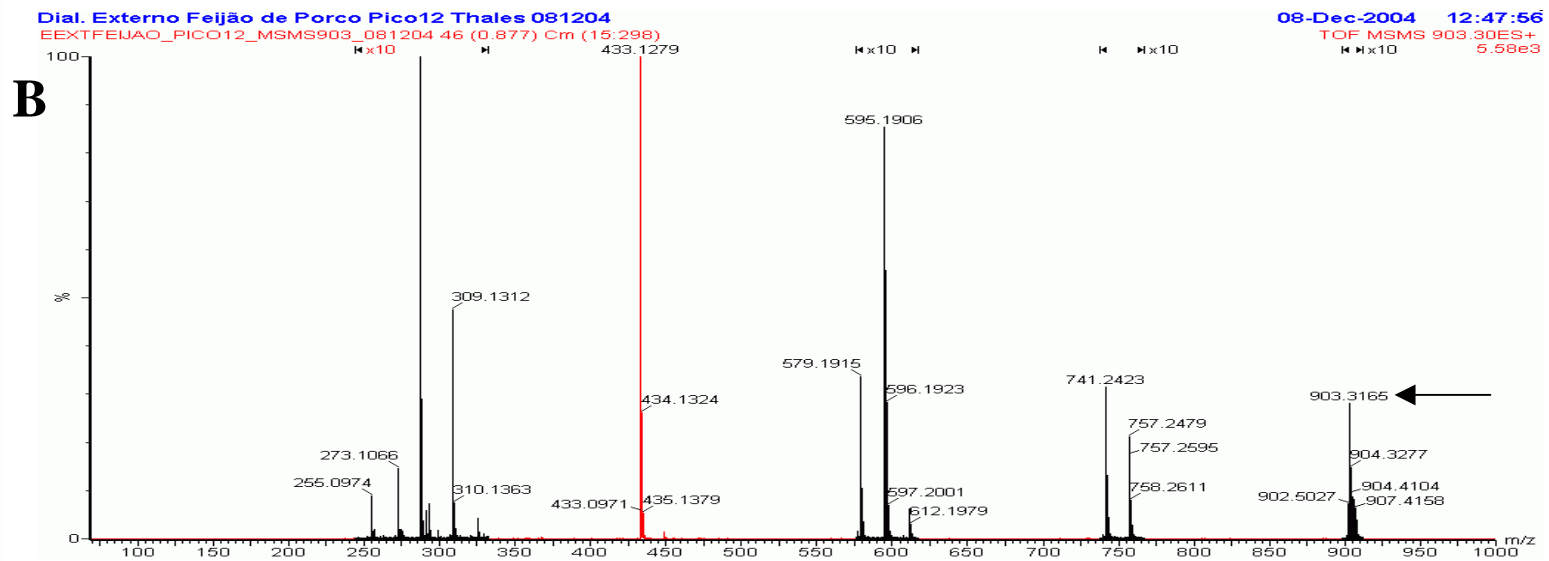


Figura 8 B. Fragmentação do pico com massa de 903.3165 indicando ser um fito composto e não um peptídeo.

Dial. Externo Feijão de Porco Pico15 Thales 081204

EEXTFEJAO_PICO15_081204 275 (5.109) Cm (261:364)

08-Dec-2004 13:02:36

TOF MS ES+
1.62e4

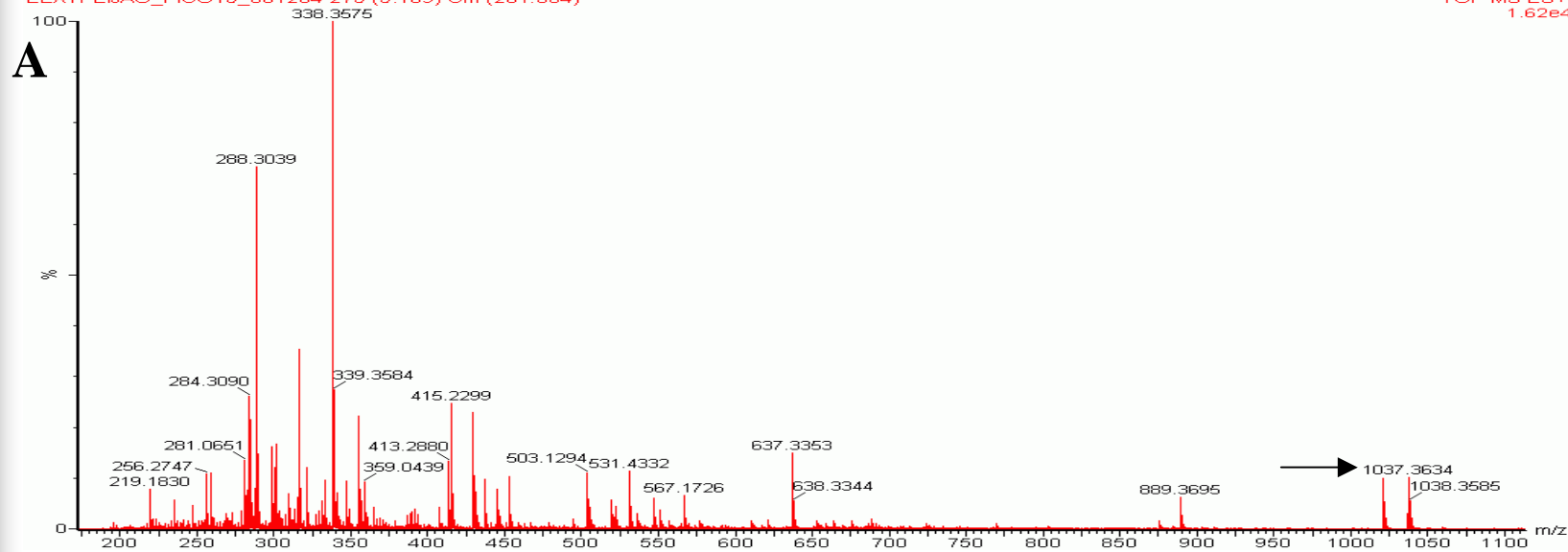


Figura 8 A. Análise em Q-TOF do pico 15 obtido em HPLC mostrando um amplo espectro de massas moleculares.

Dial. Externo Feijão de Porco Pico15 Thales 081204

EEXTFEJAO_PICO15_MSMS1037_081204 117 (2.218) Cm (101:400)

08-Dec-2004 13:09:56

TOF MSMS 1037.35ES+
1.11e4

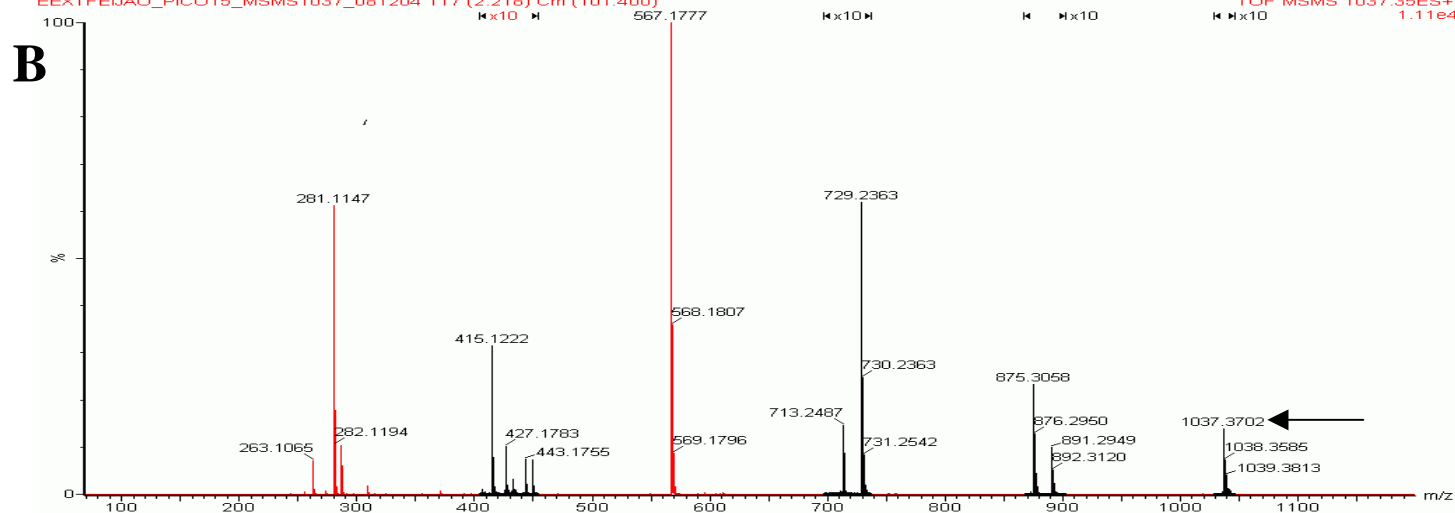


Figura 8 B. Fragmentação do pico com massa de 1037.3702 indicando ser um fito composto e não um peptídeo.



Trabalhos futuros

- Terminar de analisar os picos provenientes da separação em HPLC do dialisado externo de sementes de feijão de porco via espectrometria de massa (Q-TOF) e analisa-los também em MALDI-TOF;
- Repetir varias corridas em HPLC utilizando o dialisado externo proveniente do extrato aquoso de sementes de feijão de porco e coletar todos os picos obtidos da separação;
- Avaliar em bioensaios o efeito nematicida dos picos separados pelo HPLC sobre J₂ de *M.incognita* raça 3 e paralelamente testa-los utilizando métodos colorimétricos para identificação das diferentes classes de fitocompostos;
- Isolar e caracterizar as moléculas bioativas (fitocompostos e ou peptídeos) e disponibilizalas como ferramentas biotecnologicas.

L'activité biologique des sols • Méthodes d'évaluation¹

TECHNITAB
viticulture

L'activité biologique des sols

Qu'est-ce que l'activité biologique?

La plupart des transformations d'intérêt agronomique dans le sol sont d'origine biochimique. Leur déroulement est conditionné par la présence d'êtres vivants et par leurs enzymes. Ces réactions sont aussi impliquées dans les processus de formation du sol (pédogenèse) et de la nutrition des plantes.

Un sol n'existe que lorsque des organismes vivants et des matières organiques s'ajoutent aux minéraux issus de la décomposition de la roche. Ce système complexe (organismes vivants, matières organiques, minéraux) contribue activement aux processus d'altération des roches, de formation des agrégats, de migrations, autrement dit à la pédogenèse.

La nutrition des plantes dépend aussi de réactions biochimiques. En effet, les microorganismes, loin d'être répartis de manière homogène dans le sol, forment autour des moindres racines une sorte de film continu (la rhizosphère). C'est à ce niveau qu'ont lieu les échanges entre les matières organiques et minérales du sol et la plante.

La connaissance de l'activité biologique d'un sol permet donc d'approcher la dynamique d'évolution du sol et les capacités d'échanges entre le sol et la plante.

Quelles approches possibles?

Le fonctionnement général des sols ainsi que certaines de leurs propriétés agronomiques, sont liés plus ou moins directement à l'activité des très nombreux êtres vivants qu'ils contiennent. Il est donc tout à fait légitime, surtout en agriculture biologique, de chercher à utiliser des mesures biologiques pour



Prélèvement d'échantillons de sol dans une vigne biologique
(essai sur les effets du cuivre sur les microorganismes du sol)

mieux connaître et gérer les sols dans une perspective agronomique.

Quelles sont les mesures biologiques et biochimiques opérationnelles, c'est-à-dire véritablement utilisables pour juger des effets des pratiques agricoles sur la qualité des sols et de l'environnement ? Ces mesures peuvent-elles être utilisées en agriculture biologique comme outil d'aide à la décision, pour évaluer les potentialités des sols ou aider à gérer la fertilisation ?

Il faut reconnaître qu'aujourd'hui encore très peu de grandeurs biologiques ou biochimiques sont à la fois mesurables aisément et interprétables en termes agronomiques. Nous présentons dans cette fiche les principales méthodes de laboratoire, applicables à des échantillons de sols et susceptibles d'apporter des informations utiles sur certaines propriétés agronomiques des parcelles dont les échantillons sont issus.

Cette démarche analytique est complémentaire de l'observation agro-pédologique de terrain. Les mesures biologiques complètent les mesures classiques, elles ne peuvent s'y substituer.

En effet, pour interpréter correctement les résultats des déterminations biologiques, il est nécessaire de disposer des résultats de l'analyse de terre classique, sur le même prélèvement.

Les indicateurs de l'activité biologique

Les approches globales indicatrices de l'activité biologique

■ La biomasse microbienne

La notion de biomasse microbienne recouvre l'ensemble des microorganismes du sol : bactéries, champignons, etc. La méthode utilisée pour évaluer la biomasse microbienne du sol consiste à mesurer le carbone (ou l'azote) qu'elle contient. La technique la plus utilisée est la fumigation-extraction, qui fait appel aux vapeurs de chloroforme et au dosage du carbone solubilisé par ce traite-

¹ Fiche rédigée à partir du document sur les méthodes d'évaluation de l'activité biologique de l'ITAB, consultable sur le site de l'ITAB : www.itab.asso.fr à la rubrique agronomie.

ment. La différence du carbone organique soluble entre les échantillons fumigés et non fumigés donne la quantité de carbone extractible d'origine microbienne.

Cette quantité est directement proportionnelle à la biomasse. La biomasse microbienne est donc une mesure globale, représentant une quantité de carbone vivant dans le sol. Le résultat peut être exprimé en valeur absolue (mg de C par kg de sol), mais également en pourcentage du carbone organique total du sol.

Cette méthode présente l'avantage d'être universelle (applicable à tous types de sol), pratiquement "normalisée" et relativement facile à mettre en œuvre. Elle donne des résultats parfaitement reproductibles et avec une précision rarement atteinte en biologie. Grâce à cela, elle a détrôné les numérations de germes qui étaient autrefois utilisées.

■ Le pool de matières organiques du sol

La matière organique du sol ne forme pas un ensemble homogène : il s'agit au contraire d'un mélange de différents composés, plus ou moins complexes au

Qu'est-ce qu'un bon indicateur ?

Dans la pratique, pour être véritablement opérationnel, un paramètre biologique doit répondre à au moins trois critères.

- Etre **pertinent** par rapport à une composante identifiée de la qualité biologique des sols et faire explicitement référence.
- Etre **mesurable** de façon fiable, reproductible et accessible à un coût abordable.
- Le résultat doit être **interprétable**, ce qui sous-entend de disposer d'un référentiel d'interprétation. A défaut, seule une comparaison en valeurs relatives est possible, pour comparer des traitements d'un même essai par exemple. L'interprétation des résultats peut donner des indications pour modifier les pratiques culturales afin de corriger le dysfonctionnement ou de s'adapter au type de fonctionnement particulier du sol de la parcelle, en fonction des objectifs de l'agriculteur.

plan biochimique et plus ou moins biodégradables au plan biologique.

La majeure partie de la matière organique du sol est très stable et ne participe pratiquement pas aux cycles biogéochimiques. La fraction vivante (la biomasse microbienne) a un taux de renouvellement important mais ne représente qu'un faible pourcentage (1 à 3 %) de la matière organique totale.

Entre la biomasse microbienne et l'humus très stable, on peut imaginer l'existence d'une fraction organique intermédiaire dite "pool labile", qui va jouer un rôle important dans les cycles biogéochimiques.

Pour quantifier cette fraction organique (pool labile), plusieurs approches complémentaires sont possibles.

• Extraction à l'eau chaude

Il s'agit d'une approche biochimique en cohérence avec l'approche biologique préalable.

Les matières organiques extraites (16 heures à 80°C minimum) correspondent à des matières organiques de genèse récente, mal définies chimiquement, mais qui semblent jouer un rôle dans l'agrégation des particules de sol et la stabilité des agrégats. Pour un type de sol donné, ce pool de matière organique est généralement bien corrélié à la taille de la biomasse microbienne dans des systèmes à l'équilibre.

• Fractionnement granulométrique

Cette approche, de type physique, consiste à évaluer les stocks de carbone et d'azote organique associés aux différentes fractions granulométriques du sol. Les fractions grossières (> 50 µm) sont formées de matières organiques reconnaissables : résidus d'origine végétale ou provenant d'amendements organiques non décomposés ou en cours de décomposition, parfois partiellement humifiés, débris racinaires ...

Les fractions fines (<50 µm) contiennent une matière organique non reconnaissable liée aux limons et aux argiles, incluant la matière organique humifiée ou en voie d'humification et une partie de la biomasse microbienne. Le fractionnement granulométrique du sol permet donc l'accès à des fractions de matières organiques de natures différentes qui ont une signification fonctionnelle en terme d'effets sur les

propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols.

• Méthode Hérody

Cette méthode d'analyse consiste à identifier la fraction non humifiée des matières organiques. Il s'agit d'une fraction constituée de molécules subissant uniquement des phénomènes de minéralisation. Ces molécules sont facilement utilisables par les micro-organismes. En tant que nourriture pour les organismes vivants du sol, elles participent et sont indispensables à l'humification.

■ La minéralisation du carbone et de l'azote

Cette méthode consiste à mesurer la minéralisation du carbone et de l'azote en conditions contrôlées, (proches de l'optimum biologique) : les échantillons de sol sont incubés durant 28 jours à 28°C et à une teneur en eau voisine de la capacité au champ.

Lors de cette incubation, la minéralisation du carbone lorsqu'elle est rapportée à la taille de la biomasse microbienne donne la "respiration spécifique". Cette mesure très simple complète utilement la détermination de la biomasse, puisqu'elle permet d'évaluer le renouvellement de celle-ci.

Parallèlement, l'azote minéral présent dans l'échantillon de sol peut être déterminé avant et après l'incubation. Ces déterminations s'avèrent très utiles pour caractériser des échantillons de sol. Elles prennent tout leur intérêt lorsqu'il s'agit de comparer des traitements différents sur un même type de sol.

Il est par ailleurs possible d'extrapoler au champ les observations de laboratoire, c'est-à-dire de transformer des vitesses de minéralisation exprimées en mg N/kg/jour en kg N/ha produit pendant une période donnée.

Les activités enzymatiques du sol

Les déterminations quantitatives de nombreuses activités enzymatiques sont possibles sur des échantillons de sol. La présence et l'activité d'êtres vivants dans le sol se traduit par la synthèse de toutes sortes d'enzymes :

- localisées à l'intérieur des cellules (intracellulaires) ou à l'extérieur (extracellulaires),

- adsorbées sur des matières organiques ou minérales (argiles, etc.),
- formant des co-polymères avec des substances humiques.

Les activités les plus couramment mesurées sont les suivantes.

Oxydo-réductases

Il s'agit d'enzymes de type respiratoire, dont la plus courante est la déshydrogénase. Cette mesure est parfois incluse dans des tests écotoxicologiques pour une estimation rapide de l'activité globale du sol ; toutefois les résultats sont assez variables en fonction des conditions opératoires.

Hydrolases

La plupart des enzymes du sol (estérasés, phosphatases, sulfatases...) appartiennent à ce groupe et les activités qui s'y rattachent correspondent fréquemment à des transformations d'intérêt agronomique.

La méthode consistant à mesurer l'hydrolyse du FDA (di-acétate de fluorescéine), présente l'avantage de concerner plusieurs groupes d'enzymes différentes (protéases, lipases, etc.). Elle permet une mesure plus globale de l'activité enzymatique microbienne.

Deux inconvénients majeurs affectent les mesures d'activités enzymatiques.

- D'une part, elles sont souvent pratiquées dans des conditions standard qui ne sont pas forcément celles régnant *in situ*. Par exemple, l'hydrolyse du FDA est pratiquée à pH 7.6, quel que soit le pH initial du sol étudié.
- D'autre part, leur spécificité très étroite rend difficile l'interprétation des mesures et leur utilisation pratique lorsque plusieurs activités enzymatiques différentes sont utilisées pour comparer deux échantillons de sol différents, il est souvent difficile de conclure.

Au total, malgré la grande diversité des déterminations enzymatiques possibles, il s'avère difficile de traduire ces mesures en termes de fertilité.

Mesures de populations microbiennes particulières

Ces méthodes sont pratiquées pour évaluer l'abondance de microorganismes particuliers, comme les fixateurs libres ou symbiotiques de l'azote.

Les populations de *Rhizobium*, capables de noduler telle ou telle Légumineuse, peuvent être dénombrées de cette façon. Le cas particulier des champignons mycorhiziens est développé cidessous. D'autres méthodes de caractérisation des populations microbiennes existent mais restent pour l'instant réservées au domaine de la recherche. Elles concernent notamment l'estimation de la diversité génotypique ou phénotypique. Mais on est encore très loin de tout connaître sur les relations entre biodiversité microbienne et fonctionnement des agrosystèmes !

Les mycorhizes

Les mycorhizes sont des associations symbiotiques entre des champignons du sol et les racines des plantes. Il en existe deux principaux types, les ectomycorhizes (externes aux racines) et les endomycorhizes (internes aux racines).

Les mycorhizes qui concernent les plantes cultivées sont les endomycorhizes à vésicules et à arbuscules. Seules les Crucifères (comme le colza) et les Chénopodiacées (comme la betterave) en sont dépourvues.

La mycorhization des racines améliore l'alimentation hydrique et minérale de la plante. Le premier bénéfice de la symbiose est donc d'ordre nutritif. On peut utiliser l'évaluation de la mycorhization comme un indicateur de fertilité biologique du sol. Il existe deux types d'analyses.

■ Mesure du taux d'endomycorhization des racines

On mesure le niveau de mycorhization des racines des plantes durant la culture. Il est exprimé en % de longueur de racine où la symbiose mycorhizienne est présente. Ce taux de mycorhization est fonction des plantes, des variétés, des conditions de culture (fertilisation, fongicides, travail du sol, ...) et de la richesse en mycorhizes du sol de départ.

■ Analyse du Pouvoir Endomycorhizogène du sol : le PEM

Elle consiste à estimer la richesse en champignons endomycorhiziens du sol (nombre de propagules de champignon capables d'engendrer une mycorhization des racines par kilogramme de sol). Le PEM permet de mettre en évidence un

état biologique de la parcelle et peut servir d'indicateur biologique pour gérer la parcelle. Un PEM élevé est le reflet d'un bon état biologique du sol. Le PEM est jugé acceptable autour de 1500, et trop faible en dessous de 500.

Il est bien entendu plus faible après une culture non mycotrophe (colza, betterave) qu'après une culture mycotrophe.

En vigne, compte tenu du caractère pérenne de la plante et de la difficulté à prélever des racines, il est difficile d'évaluer le taux d'endomycorhization.

L'analyse du PEM est possible mais son interprétation agronomique reste délicate.

Comment réaliser l'échantillonnage ?

Chaque analyse nécessite un contact préalable avec le laboratoire pour bien réaliser la prise d'échantillon (nombre, répartition) qui convient à l'analyse en question.

Horizon de prélèvement

Sauf cas particuliers, les échantillons sont prélevés dans la couche superficielle du sol (0-20 cm). L'activité biologique est maximale dans l'horizon de surface et décroît plus ou moins rapidement avec la profondeur.

Epoque

Pour des mesures en routine (annuelles par exemple), il faut choisir un moment de référence indépendant des perturbations liées aux pratiques culturales (labour, fertilisation, semis, binages) et des aléas climatiques (par exemple une sécheresse marquée).

Conservation des échantillons

L'idéal est de travailler sur sol frais ou conservé au réfrigérateur (3 à 4°C). Le séchage des échantillons tue une partie de la microflore et rend impossible la détermination de la biomasse par fumigation-incubation (voir plus loin), même après réhumectation des sols avant analyse.

Il devient très difficile sinon impossible de comparer des échantillons frais et séchés.

Il faut s'assurer que l'échantillon est transporté dans des délais rapides au laboratoire.

Fonctionnement macro-biologique des sols

Des méthodes de mesure des activités macrobiologiques des sols existent, notamment pour déterminer l'importance et la diversité des populations de lombriciens (masse, nombre d'individus, espèces) mais elles sont assez lourdes et donc difficilement envisageables en routine. Elles sont cependant de plus en plus utilisées au niveau expérimental.

■ Les lombrics

Le rôle de la diversité sur le fonctionnement des agrosystèmes peut être abordé au travers des communautés lombriciennes. En effet, les peuplements de vers de terre ont la particularité de présenter une diversité fonctionnelle importante et relativement bien caractérisée sur le plan écologique et biologique.

Ces organismes ingèrent et brassent de la matière organique et de la matière minérale du sol. Les boulettes fécales ainsi créées participent à la formation de macro-agrégats qui permettent la création de structures stables. Les lombrics sont à l'origine de grandes structures, comme les réseaux de galeries ou de chambres qui ont un impact sur la porosité et la densité du sol.



Ver de terre

Il existe trois techniques classiquement utilisées pour le prélèvement des lombriciens.

• Le tri manuel du sol

Cette technique consiste à creuser le sol et à séparer les lombriciens tout en oubliant généralement les individus de plus petite taille et tous les cocons. Cette méthode est difficile à utiliser en sol humide ou argileux et de surcroît est coûteuse en temps. Elle est pratiquement inutilisable pour de grands échantillons.

Pourtant, le tri manuel de sol effectué sur une profondeur de 60 cm est considéré comme étant la méthode la plus exhaustive et sert de référence.

• L'extraction par arrosage du sol avec une substance chimique

Elle est basée sur la réaction des vers de terre à une agression épidermique par une substance chimique. Afin de se soustraire à celle-ci, les lombriciens fuient vers la surface, où ils sont alors collectés.

L'extraction chimique au formol présente une bonne efficacité pour les espèces de surface (les épigées et certains anéciques). Le pourcentage d'individus des couches profondes du sol (certains anéciques et les endogés) captés par cette méthode est très variable. Cette méthode présente un avantage en terme de temps de prélèvement et donc de coût. Cependant, il existerait des variations saisonnières du taux de capture des espèces lombriciennes.

• Le lavage - tamisage

C'est un prélèvement de sol qui, après un traitement chimique, est lavé pour éliminer la terre fine (argiles, limons, sables). Il ne reste plus qu'à trier au laboratoire les vers de terre et leurs cocons parmi les cailloux et les racines. Cette méthode a l'avantage d'un tri de bonne qualité et permet de corriger efficacement les estimations des densités et biomasses lombriciennes. Toutefois, elle est pratiquement inutilisable pour de grands échantillons.

Quelles utilisations ?

Pour le moment, les indicateurs d'activités biologiques des sols sont principalement utilisés dans le cadre d'expérimentations.

En effet, l'absence de référentiel incite à une grande prudence quant à leur utilisation pour le diagnostic et le conseil parcellaire.

Toutefois, les résultats expérimentaux acquis depuis plusieurs années sont encourageants. Il est possible d'identifier l'effet des pratiques culturales viticoles sur les caractéristiques du sol.

Pour aller plus loin, vous trouverez sur le site de l'ITAB (www.itab.asso.fr), à la rubrique "agronomie" une liste de liens avec des laboratoires proposant des analyses d'activités biologiques.



Motte de ver de terre



ITAB : 149, rue de Bercy
75595 PARIS CEDEX 12
Tél : 01 40 04 50 64 - Fax : 01 40 04 50 66
eMail : itab@itab.asso.fr
www.itab.asso.fr

Synthèse de Eric Chantelot (ITV) à partir du "Guide des Matières Organiques" (Blaise Leclerc, ITAB) - **Relecteurs** : Rémi Chaussod (INRA Dijon), Richard Doughy (Vigneron en Bergeracois), Olivier Durand (Vigneron en Languedoc), Nathalie Goma-Fortin (Chambre d'Agriculture de l'Hérault), Monique Jonis (ITAB), Blaise Leclerc (ITAB), Alain Réaut (Vigneron en Champagne)



Prix :
3€
octobre 2003