



Fertilité des sols :

Les produits biologiques:

bien les connaître

pour mieux les utiliser !

Dr. Jacques G. FUCHS, Biophyt SA

en collaboration avec Jean-Michel HERISSE, AGREF

Cours dispensé les 18 & 19 janvier 1999 à Paris

Organisation du cours:

AGREF-Formation, Boîte postale 307, F-64208 Biarritz Cedex

biophyt sa, la qualité pour assurer l'avenir !

biophyt sa, Dr. J. Fuchs, Schulstrasse 13, CH-5465 Mellikon

☎ 056/250'50'42, natel 079/216'11'35, fax 056/250'50'44, e-mail: biophyt@pop.agri.ch



Les produits biologiques:

bien les connaître pour mieux les utiliser !

Dr. Jacques FUCHS, Biophyt SA

en collaboration avec Jean-Michel HÉRISSE, AGREF

	page
<u>1. Le sol, centre de vie</u>	<u>1</u>
1.1. Les microorganismes du sol	3
1.1.1. Les bactéries	4
1.1.2. Les champignons	6
<u>2. Les cycles des éléments</u>	<u>8</u>
2.1. Le cycle du carbone	10
2.2. Le cycle de l'azote	11
2.3. Le cycle du phosphore	12
2.4. Le cycle du soufre	13
2.5. Le cycle du fer	14
<u>3. L'humus</u>	<u>15</u>
3.1. L'humus: qu'est-ce que c'est ?	15
3.2. La formation des humus	16
3.3. Le rôle de l'humus	17
<u>4. La rhizosphère, lieu de rencontre entre la plante et les microorganismes</u>	<u>17</u>
4.1. La rhizosphère et l'effet rhizosphère	17
4.2. Les microorganismes de la rhizosphère	19
4.2.1. Les mycorhizes	21
4.2.2. Les bactéries fixatrices d'azote	22



<u>5.</u>	<u>Les agents pathogènes des racines</u>	<u>22</u>
5.1.	Les différentes relations hôtes-pathogènes	23
5.2.	Caractéristiques importantes des champignons pathogènes	24
5.3.	Caractéristiques importantes des bactéries pathogènes	25
5.4.	Les maladies importantes du gazon	26
<u>6.</u>	<u>Champignons et bactéries au service de la santé des plantes</u>	<u>27</u>
6.1.	Les différents modes d'action	28
6.2.	Présentation de quelques champignons antagonistes importants	29
6.3.	Présentation de quelques bactéries antagonistes importants	30
<u>7.</u>	<u>Interactions entre les microorganismes, les plantes et le milieu</u>	<u>31</u>
7.1.	Actions des microorganismes sur le milieu	31
7.2.	Actions du milieu sur les microorganismes	32
7.3.	Les plantes entre les microorganismes et le milieu	33
<u>8.</u>	<u>Utiliser les capacités des antagonistes</u>	<u>34</u>
8.1.	Favoriser et stimuler les antagonistes du sol	34
8.2.	Emploi de microorganismes cultivés	35
8.2.1.	Choix des organismes	36
8.2.2.	Multiplication des microorganismes	37
8.3.3.	Stratégies d'applications	38
<u>9.</u>	<u>Conclusions</u>	<u>40</u>
<u>10.</u>	<u>Données bibliographiques</u>	<u>41</u>
<u>11.</u>	<u>Annexe: Influence de la qualité biologique des composts sur les plantes et leur santé</u>	A1-A13



Biophyt SA: brève présentation !

Biophyt SA est un institut privé de recherches et de consultations en agronomie et en écologie appliquées. Il est domicilié à Mellikon (CH), un petit village au bord du Rhein, à une trentaine de kilomètres de Zurich. Parmi ses spécialités on trouve les domaines suivants:

- qualité microbiologique des composts, de la production à l'utilisation
- fertilité des terres, interactions entre les divers habitants du sol
- développement de biotests pour la caractérisation des interactions entre microorganismes et plantes
- phytopathologie végétale

Dans ces domaines, il réalise sous mandats divers travaux de recherches et de développement, élabore, met en place et supervise des concepts d'assurance de qualité, planifie, dirige et réalise divers projets, ...

Biophyt SA est aussi très actif dans le domaine de la consultation et du suivi de diverses exploitations, et dispense divers cours et conférences dans les domaines cités.

Pour plus de renseignements sur les activités de Biophyt SA vous pouvez prendre directement contact avec nous:

Biophyt SA

Dr. J. Fuchs

Schulstrasse 13

CH-5465 Mellikon

☎ 056/250'50'42, fax 056/250'50'44, Natel 079/216'11'35

e-mail : jacques.fuchs@biophyt.ch

De plus, vous avez la possibilité de mieux nous connaître en consultant notre site internet:

www.biophyt.ch



Les produits biologiques: bien les connaître pour mieux les utiliser !

1. Le sol, centre de la vie

Le sol est un milieu complexe au sein duquel de nombreux éléments s'influencent mutuellement. Les réactions que l'on y observe sont de natures chimiques, physiques et biologiques. On peut grossièrement diviser le sol en cinq compartiments (fig. 1.1). En plus des interactions entre ces différents compartiments, le sol dans son ensemble est également influencé et réagit avec l'extérieur, c'est à dire l'atmosphère.

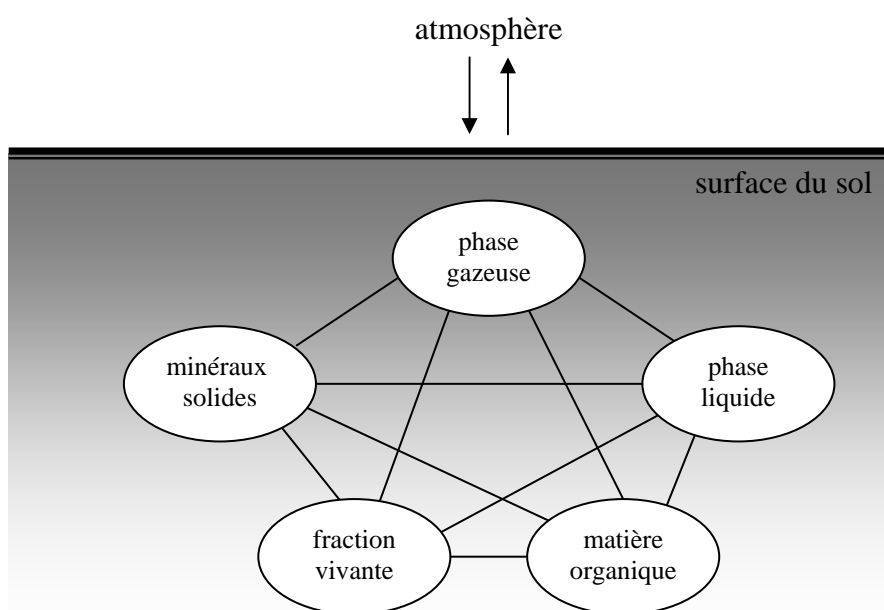


Fig. 1.1. Les 5 compartiments du sol. Chacun des traits symbolise une possibilité d'interaction (d'après Morel, 1989).

La matière vivante, visible ou non à l'oeil nu, représente une quantité pas toujours facile à réaliser. Dans les sols, on trouve par exemple:

des bactéries	2,5 à 10 tonnes par hectare de biomasse
des champignons:	1 à 10 tonnes par hectare de biomasse
des algues:	100 à 500 kg pro hectare de biomasse
des protozoaires:	150 à 700 kg par hectare de biomasse
des nématodes:	150 à 400 kg par hectare de biomasse
des acariens:	environ 3 kg par hectare de biomasse
des collemboles:	environ 2 kg par hectare de biomasse
des racines:	2 à 12 tonnes par hectare de biomasse (matière sèche)

(estimations d'après Davet, 1996)



Les divers éléments constituant la matière vivante passent, au cours des étapes du cycle de la matière organique, parmi les divers compartiments du sol. Celui-ci remplit une fonction tampon essentielle, et est le siège de maintes réactions fondamentales de ce cycle, la microfaune et les microorganismes du sol jouant un rôle prépondérant dans le déroulement de ces réactions (fig. 1.2).

Sa complexité et à la diversité de ses différents constituants donnent au sol une grande stabilité et une capacité importante à réagir aux diverses atteintes naturelles ou humaines dont il est l'objet. Toutefois, une fois son équilibre trop fortement perturbé, il peut se dégrader très rapidement et de manière pratiquement irrémédiable. C'est pourquoi il est indispensable, en mieux connaissant les lois et mécanismes qui le régissent, d'en prendre soin afin qu'il ne perde pas, une fois ses limites atteintes, sa fertilité et son pouvoir régulateur vital.

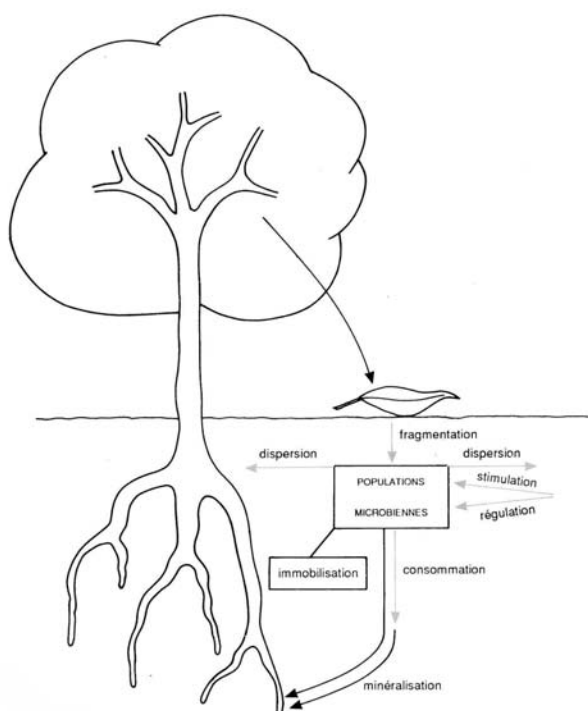


Fig. 1.2. Participation de la microfaune et microflore du sol au recyclage de la matière organique. Les micro-arthropodes détritvres fragmentent les débris végétaux, ce qui augmente considérablement les surfaces de contact avec les microorganismes. Les Nématodes et les micro-arthropodes, en se déplaçant, contribuent à la dispersion des Bactéries et des spores de Champignons présentes sur leurs téguments et dans leur excréments. En consommant les colonies bactériennes ou fongiques, ils stimulent leur activité enzymatique tout en maintenant l'équilibre des populations et, d'autre part, ils remettent en circulation les éléments minéraux immobilisés dans la biomasse microbienne. Celle-ci joue un rôle essentiel en décomposant les molécules organiques complexes et rendant ainsi les éléments à nouveau assimilables par les divers organismes vivants. (d'après Davet, 1996).



1.1. Les microorganismes du sol

La fraction vivante du sol est extrêmement variée (fig. 1.3). Elle est composée aussi bien d'organismes très simples (comme les bactéries) que d'organismes évolués (comme la microfaune). Certains organismes ne vivent que partiellement dans le sol, comme les plantes dont seules les racines s'y développent. Chaque sol possède une fraction vivante différente qui évolue également avec le temps. Son activité caractérise la fertilité du sol et son pouvoir à s'adapter et/ou à résister aux influences externes. Les microorganismes jouent un rôle essentiel à ce niveau. Ils influencent directement ou indirectement la croissance des plantes et leur santé. Alors que certains microorganismes agissent négativement sur la vitalité de la plante (par exemple les agents pathogènes), certains autres favorisent positivement leur développement (comme les mycorhizes ou les antagonistes). Les interactions entre ces différents acteurs – microorganismes «négatifs», microorganismes «positifs» et plantes – déterminent, sous l'influence des compartiments inertes du sol, la fertilité du sol. De part de son activité et des techniques de culture qu'il emploie, l'homme peut influencer grandement ces interactions.

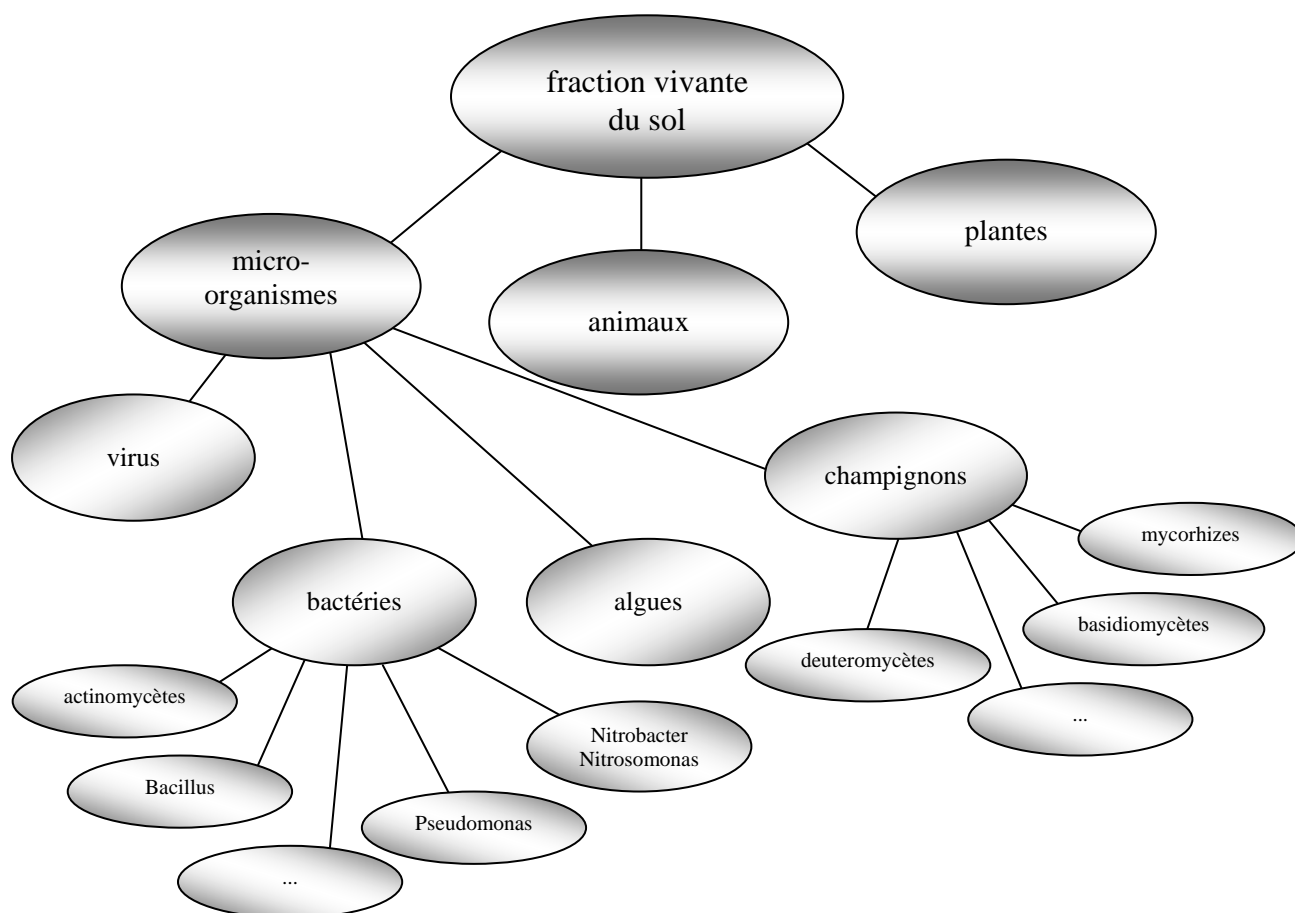


Fig. 1.3. Les divers partenaires vivants des sols



1.1.1. Les bactéries

Les bactéries font partie des **procaryotes**, c'est à dire des organismes dont le chromosome n'est pas séparé du cytoplasme par une membrane nucléaire. Le cytoplasme des bactéries est délimité par une membrane cellulaire semi-perméable, à l'extérieure de laquelle se trouve presque toujours une paroi rigide protégeant la cellule. Chez les bactéries mobiles, des cils ou des flagelles provenant du cytoplasme leurs permettent de se déplacer.

Les bactéries: généralités

La prise de conscience actuelle sur les enjeux posés par la défense de l'environnement place les micro-organismes sur le devant la scène. Dans un sol ordinaire, nous rencontrons des bactéries (Archaeobactéries et Eubactéries), des algues, des protozoaires, des champignons. Les bactéries ont un fort particularisme physiologique et de régulation dont elles sont le siège. Nous devons admettre que chaque bactérie fonctionne comme une usine chimique pilotée par ordinateur. L'étude du monde bactérien a fait d'énormes progrès depuis 10 à 15 ans et il faut admettre la complexité de la tâche. Dans la nature, les bactéries sont rarement autonomes. Elles échangent entre elles et avec d'autres espèces des substrats et des signaux chimiques susceptibles de modifier leur comportement. Depuis peu, on sait que les bactéries ont des récepteurs à leur surface qui les renseignent sur leur environnement et qui leur permettent d'effectuer des migrations dans une direction préférentielle, soit pour trouver un milieu favorable, soit pour s'éloigner d'une zone toxique.

Vous connaissez tous les vives préoccupations qui ont été soulevées lors des premières expériences du génie génétique, car on craignait la fabrication de souches dangereuses. Ces craintes sont retombées depuis car on s'est aperçu que les souches génétiquement modifiées étaient en général moins virulentes et performantes dans la nature que les souches sauvages. Il faut également savoir que la communauté scientifique est d'accord pour maintenir une surveillance vigilante sur les risques de manipulation et en particulier sur l'épandage de nouvelles souches dans l'environnement.

Il arrive parfois que les conditions de vie deviennent impossibles pour des bactéries; celles-ci ont alors la capacité de modifier leurs patrimoines génétiques; c'est un peu comme au loto: la colonie compte sur les milliards de bactéries de sa population pour que quelques-unes survivent. Une autre particularité des bactéries est la puissance de leur métabolisme; la consommation d'oxygène peut-être jusqu'à 50 fois supérieure à une cellule animale, et une bactérie peut avoir un temps de doublement cellulaire de 20 minutes alors qu'une cellule cancéreuse en culture nécessite 20 heures. Les microorganismes sont souvent soumis à une concurrence très forte, et ce sont ceux qui s'adaptent le mieux et au moindre coût qui survivent (un peu comme chez les animaux ou les hommes). Les bactéries maintiennent avec leur milieu des relations qui sont soit de contact (bactéries fixées sur un support) ou de détection lorsqu'elles s'y déplacent. Il faut savoir qu'une bactérie peut adhérer à un support grâce à des interactions ioniques ou par l'intermédiaire de protéines spécifiques appelées adhésines.

L'étude complexe du monde bactérien n'est pas le sujet de ces journées de formation, cependant il faut de souvenir de plusieurs choses essentielles qui nous permettrons de mieux comprendre (bien que pas complètement) comment fonctionne un sol et comment se comportent les bactéries que nous essayons d'y implanter. Une bactérie est en fait un organisme vivant doté de pouvoirs extraordinaires ; ce sont quelques 600 gènes différents qui analysent, produisent, décident et adaptent la bactérie à son milieu dans un seul but: survivre et se multiplier.

Les bactéries, qui sont unicellulaires, n'ont pas de bouches pour se **nourrir**! Leurs nutriments doivent traverser la paroi puis la membrane cytoplasmique, ce qui n'est possible que pour des molécules relativement petites. Les molécules trop grosses doivent être tout d'abord fragmentées



par des enzymes avant de pénétrer dans la cellule. Tout ceci est impossible dans un milieu sec. On comprend ainsi mieux pourquoi les bactéries sont surtout actives dans les milieux humides! La majorité des bactéries est hétérotrophe, c'est à dire qu'elle a besoin de carbone organique pour se développer.

Beaucoup de bactéries peuvent diriger leurs déplacements selon un gradient de concentration chimique (**chimiotaxie**). Ainsi, elles peuvent par exemple trouver la rhizosphère d'une plante. D'autres bactéries peuvent de la même manière réagir à des gradients d'oxygène ou de température.

Les bactéries: déplacement

Le mode de déplacement («nage») des bactéries est effectué grâce à leur leurs cils ou à leurs flagelles qui fonctionnent comme les hélices d'un hors bord (10 à 50 tours secondes). Ce mouvement très rapide est associé à des échanges ioniques. Les Pseudomonas les plus rapides peuvent atteindre 30 à 40 fois la longueur de leur cellules en une seconde.

La diversité des bactéries est très grande, si bien que l'on peut en trouver pratiquement partout: à très basse température ou dans des sources brûlantes, à l'air libre ou en absence d'oxygène, à des pH très élevés ou très acides, ... Toutefois, chaque bactérie a des exigences relativement précise, et une bactérie aérobie du compost peut par exemple ne pas survivre le passage par une phase de fermentation anaérobie. De nombreuses bactéries du sol revêtent une importance particulière pour la production végétale.

Diverses bactéries sont capables de **fixer l'azote atmosphérique** et de le rendre ainsi disponible pour les plantes. Certaines vivent pour cela en symbiose avec des plantes: *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Frankia*, etc, alors que d'autres vivent librement dans le milieu, comme *Azotobacter*, *Azospirillum* et les Cyanobactéries dans les rizières.

D'autres bactéries jouent également des rôles prépondérants dans les cycles de certains éléments fertilisants, comme les **bactéries nitrifiantes** *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* ou les **bactéries acidifiantes du cycle du soufre** *Thiobacillus*.

Certaines bactéries sont extrêmement importantes de part leur réaction effet sur la santé des plantes. Diverses bactéries sont **pathogènes** et peuvent causer de gros dégats aux cultures: *Erwinia carotovora* sur carottes, *Xanthomonas fragariae* sur fraisiers, *Pseudomonas syringae* sur curcubitacées, *Streptomyces scabies* sur pommes de terre, *Agrobacterium tumefaciens* sur diverses plantes, etc. D'autres bactéries protègent par contre les plantes contre des agents pathogènes: *Actinomycetes*, *Streptomyces*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas cepacia*, *Bacillus subtilis*, etc. Ces bactéries sont appelées **antagonistes**. Elles sont très importantes pour l'équilibre microbien des sols. La plupart de ces bactéries produisent des antibiotiques qui semblent jouer un rôle non négligeable dans les mécanismes de protection des plantes.



Contrairement aux *Pseudomonas* qui se protègent en se liant aux argiles, les *Bacillus* produisent des **spores de résistances** leur permettant de survivre longtemps des conditions environnementales défavorables. Ces spores peuvent revêtir une importance particulière dans la production de préparations commerciale d'antagonistes, car ces bactéries sont ainsi beaucoup plus faciles à stocker et à conserver que des bactéries ne formant pas de spores.

Les actinomycètes

Les véritables actinomycètes sont des bactéries gram+ qui se développent en formant un mycélium. L'odeur caractéristique qui émane d'un sol fraîchement labouré est dû à des composés élaborés par les streptomycètes (géosmine). Les streptomycètes produisent de nombreux antibiotiques (streptomycine, chloromyténicol, l'auréomycine, ...).

Les streptomycètes sont aérobies. La majorité d'entre eux dégradent la cellulose. Ils préfèrent en général les sols neutres à alcalins et résistent relativement bien à la sécheresse. Plus de 500 espèces de streptomycètes ont été répertoriés. Avec les arthrobactères, se sont de précieux auxiliaires de l'environnement grâce à leur capacité de biodégradation.

1.1.2. Les champignons

Les champignons font partie des eucaryotes, c'est à dire des microorganismes dont les chromosomes sont séparés du cytoplasme par une membrane cellulaire. Certains champignons sont unicellulaires (les levures), mais la plupart sont filamenteux. Ils forment des hyphes, sortes de tuyaux plus ou moins large contenant le cytoplasme. Les hyphes se développent par croissance de leurs extrémités. Elles se ramifient et forment ainsi une sorte de toile colonisant le substrat où elle vit: le **mycélium**. Les champignons se multiplient en général avec des spores. Ces spores sont de deux types: les spores asexuées, servant la plupart du temps à la prolifération en masse du champignon, et des spores sexuées, souvent spores de résistance permettant au champignon de survivre des périodes désavantageuses. Tous les champignons ne forment toutefois pas les deux types de spores, certains ne vivant même qu'à l'état de mycélium sans jamais ne produire de spores.

Les champignons ont besoin de composés organiques comme sources de carbone. Tout comme chez les bactéries, seules les molécules de tailles relativement petites peuvent franchir les parois et gagner le cytoplasme. La **digestion** commence donc dans le milieu extérieur. Les champignons produisent de nombreux **enzymes** ce qui leur permet d'utiliser des substrats complexes tels la cellulose, la lignine, la kératine, les acides humiques, etc. Le transport des aliments absorbés dans les hyphes peut être réalisé sur de relatives longues distances. Certains champignons, comme ceux décomposant les arbres forestiers, forment des **rhizomorphes** - organes constitués d'hyphes assemblées parallèlement et liées les unes aux autres – leurs permettant d'aller



à la recherche d'une autre source de nourriture en traversant d'importantes distances dépourvues de ressources nutritives. Des travaux signalent même un cas où un seul individu d'*Armillaria bulbosa* (basidiomycète) s'étendait sur plus de 15 hectares !

Les exigences en **humidité** des champignons est moins importante que celles des bactéries, même si certains champignons inférieurs comme les *Pythium* et les *Phytophthora*, qui forment des zoospores pouvant nager, sont favorisés par de telles conditions. La plupart des champignons ont besoin d'**oxygène** pour se développer et être actifs, même si une majorité peut survivre une certaine période anaérobie. De manière générale, les champignons apprécient des **températures** entre 10 et 40 °C. Ils supportent mal les températures trop élevées.

Tout comme les bactéries, les champignons jouent des rôles importants dans l'écosystème sol (fig. 1.4). Alors que certains d'entre eux peuvent influencer positivement la croissance des plantes, d'autres peuvent nuire à leur santé.

Comme vu plus haut, certains champignons jouent un rôle prépondérant dans les **cycles des éléments** en dégradant des molécules complexes. Sans eux, de nombreuses molécules organiques complexes plus utilisées ne pourraient guère être décomposées et ainsi leurs éléments rendus à nouveau disponibles pour être réassimilés par d'autres organismes.

Certains champignons, les **mycorhizes**, forment des associations symbiotiques avec les racines de plantes. Ici, le champignon collecte des sels minéraux et les transmet à la plante. Grâce à ses hyphes qui colonisent le sol, le champignon mycorhize multiplie considérablement le volume de sol exploré par les racines de la plante hôte, et de ce fait lui permet de s'alimenter avec une quantité d'éléments nutritifs que la plante seule ne pourrait jamais capter.

Un rôle également important de certains champignons sur la fertilité des sols est leur action sur la **structure du sol**. Par leur structure ramifiée de leurs myceliums, ils augmentent la cohésion des particules du sol.

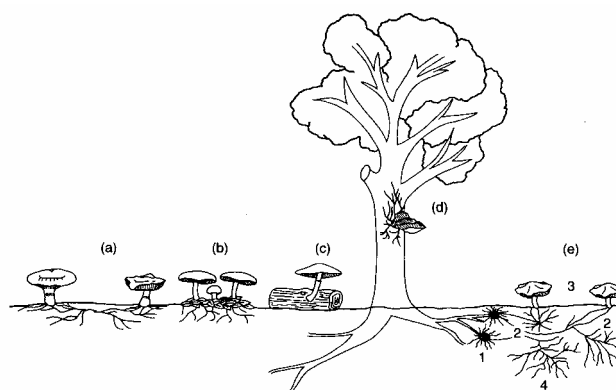
Tous ces effets influencent indirectement la **santé des plantes**. Certains champignons influencent toutefois également directement celle-ci. De très nombreux champignons sont pathogènes et peuvent causer d'importants dégâts aux plantes, comme les agents pathogènes responsables de diverses pourritures des racines. En opposition, d'autres champignons sont antagonistes de ces pathogènes et protègent les plantes contre leurs attaques. L'équilibre entre ses divers organismes détermine l'état de santé des plantes croissant dans ce milieu.



Fig. 1.4. Fonctions principales des champignons dans le sol :

- (a) champignon humicole (ex. formation de ronds de sorcières)
- (b) champignons saprophytes de la litière
- (c) champignons saprophytes lignicoles (destruction du bois mort)
- (d) champignon parasite
- (e) champignon mycorhizien : 1. mycorhyze (échanges avec le végétal) ; 2. cordons d'hyphes translocatrices ; 3. fructifications (carpophores) ; 4 : mycélium diffus (absorption des ions et de l'eau dans le sol)

d'après Gobat et al., 1998



2. Les cycles des éléments

Tous les éléments nutritifs des organismes passent régulièrement d'une forme à une autre. Ils sont tantôt intégrés dans la matière organique, tantôt inertes dans la nature sous formes minérales. Certaines formes minérales peuvent être assimilées par les plantes, alors que d'autres non. Comme déjà mentionné plus haut, les rôles des microorganismes dans ces cycles naturels sont extrêmement importants.

Tab. 2.1. Les bioléléments dans le sol et dans la plante (d'après Gobat et al., 1998).

Elément	Forme dans le sol	Concentration dans le sol (S) et dans la plante (P) (‰ mat. sèche)	Rôles principaux dans la plante carence, toxicité
N	<ul style="list-style-type: none"> ▪ organique : plus de 95% du total ▪ NH_4^+ : forme transitoire, retenue sur le complexe ▪ NO_3^- : principale source d'azote pour les plantes ; facilement lixivié 	<p>S : 3,3 à 3</p> <p>P : 5 à 50</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ constituant des acides aminés, des protéines, des acides nucléiques et des lipides ▪ favorise la multiplication cellulaire et celle des chloroplastes ▪ favorise la synthèse des glucides ▪ forme des réservoirs dans les graines ▪ constituant d'hormones
P	<ul style="list-style-type: none"> ▪ organique : dans les débris de la litière ▪ minéral : constituant non assimilable de certains minéraux (ex. apatite) ▪ PO_4^{3-} adsorbé ; peu assimilable ▪ HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^- libres 	<p>S : 0,1 à 1</p> <p>P : 1 à 5</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ constituant principal des protéines phosphorées (ex. lécithines) ▪ constituant de l'ADN, de l'ARN et des lipides phosphorés ▪ rôle dans le métabolisme des glucides et dans la mise à fruit ▪ transport d'énergie dans la cellule (ADP, ATP) ▪ migre en fin de saison vers les organes de réserve
S	<ul style="list-style-type: none"> ▪ minéral des roches gypseuses, pyrite ▪ oxydé en sulfate par des bactéries, à partir de sulfures ou de soufre élémentaire ▪ H_2S provenant des matières organiques décomposées ou de la sulfatoréduction bactérienne 	<p>S : 0,1 à 1</p> <p>P : 0,5 à 5</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ constituant des acides aminés soufrés (méthionine, cystéine) ▪ constituant de certains cofacteurs enzymatiques ▪ toxique en excès, avec espèces résistantes par accumulation jusqu'à 7% de la matière sèche ou par limitation à l'absorption



Tab. 2.1. Les bioléléments dans le sol et dans la plante (d'après Gobat et al., 1998) – suite 1.

Elément	Forme dans le sol	Concentration dans le sol (S) et dans la plante (P) (‰ mat. sèche)	Rôles principaux dans la plante carence, toxicité
K	<ul style="list-style-type: none"> constituant des silicates (micas, feldspaths) : 95 à 98% du K d'un sol rétrogradé dans les argiles rétrogradé dans les argiles fixé (faiblement) sur le complexe adsorbant libre dans la solution du sol 	<p>S : 2 à 30</p> <p>P : 5 à 50</p>	<ul style="list-style-type: none"> se trouve à l'état soluble, très mobile régulateur principal de la pression osmotique, donc du transit de l'eau et de la phase passive de l'adsorption activateur d'enzymes favorise la synthèse des glucides et leur stockage très facilement lixivié des feuilles par la pluie
Ca	<ul style="list-style-type: none"> constituant des roches calcaires «actif», en poudre fine de CaCO₃ échangeable sur le complexe adsorbant libre dans la solution du sol 	<p>S : 2 à 15</p> <p>P : 0,5 à 50</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant des parois cellulaires qu'il rend rigides et résistantes activateur d'enzymes favorise la maturation des fruits neutralise les acides organiques formés par le métabolisme s'accumule dans les organes âgés (écorce, bois, ...)
Mg	<ul style="list-style-type: none"> constituant des dolomies échangeable sur le complexe adsorbant libre dans la solution du sol 	<p>S : 1 à 10</p> <p>P : 1 à 10</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant de la chlorophylle activateur d'enzymes évite la chlorose (non formation de la chlorophylle) sélectionne les espèces si sa concentration est élevée dans le sol
Fe	<ul style="list-style-type: none"> plus de 20 composés minéraux : hémanite, goethite, lépidocrite, hydroxydes, etc. constituant du complexe argilo-humique chélaté à la manière organique forme ionique en solution (Fe²⁺ dans les sols anoxiques) 	<p>S : jusqu'à 40000 ppm</p> <p>P : 50 à 1000 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> évite la chlorose effectueur des processus d'oxydoréduction constituant et activateur d'enzymes chélaté par les sidérophores, transporteurs cellulaires régulateur de la réduction des nitrites et de la fixation d'azote constituant de la chlorophylle
Mn	<ul style="list-style-type: none"> semblables à celles du fer 	<p>S : 200 à 4000 ppm</p> <p>P : 20 à 200 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> favorise la croissance et évite la chlorose carence possible sur sols basiques et toxicité sur sols acides constituant et activateurs d'enzymes rôle dans l'oxydation de l'eau lors de la photosynthèse
Cu	<ul style="list-style-type: none"> constituant de minéraux (ex. chalcopryrite CuFeS₂) chélaté à la matière 	<p>S : 5 à 100 ppm</p> <p>P : 2 à 200 ppm (Cuprophytes jusqu'à 1600)</p>	<ul style="list-style-type: none"> régulateur des processus d'oxydoréduction constituant d'enzymes assurant la synthèse de la lignine stimulation de la croissance toxique à hautes concentrations, sauf pour des plantes adaptées
Zn	<ul style="list-style-type: none"> constituant de silicates ferromagnésiens très peu de Zn²⁺ en solution 	<p>S : 10 à 300 ppm</p> <p>P : 10 à 100 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant d'enzymes d'oxydation (oxydases) synthèse et protection des hormones de croissance aide à la synthèse de la chlorophylle
Mo	<ul style="list-style-type: none"> constituant de minéraux MoO₄²⁻ ou HMoO₄⁻ fixés sur le complexe adsorbant ou libres dans la solution du sol 	<p>S : 0,5 à 5 ppm</p> <p>P : 0,2 à 10 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> nécessaire au métabolisme de l'azote (constituant de l'enzyme nitrate réductase, ainsi que du complexe de la nitrogénase)



Tab. 2.1. Les bioléléments dans le sol et dans la plante (d'après Gobat et al., 1998) – suite 2.

Elément	Forme dans le sol	Concentration dans le sol (S) et dans la plante (P) (‰ mat. sèche)	Rôles principaux dans la plante carence, toxicité
B	<ul style="list-style-type: none">constituant des silicates (ex. 3-4 % de la tourmaline)	S : 5 à 100 ppm P : 2 à 100 ppm	<ul style="list-style-type: none">constituant d'enzymesaide à la synthèse de la chlorophyllecarences fréquentes, amenant par exemple le pourrissement du coeur de la betterave ou des lésions de l'écorce du pommier
Al	<ul style="list-style-type: none">constituant de de bases des minéraux, avec Si (8% de la lithosphère)formes nombreuses en fonction de l'acidité du sol, entre $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)_2^+$ et Al^{3+} (ion libre)	S : 50 à 200 ppm P : 2 à 3 ppm	<ul style="list-style-type: none">favorise, à très faibles concentrations, la production d'espèces cultivéestrès vite toxique dès que le pH du sol est inférieur à 5,5action de sélection des espèces sur sol acide, seules les aluminotolérantes résistent (ex. Ericacées)

2.1. Le cycle du carbone

Lors de la photosynthèse, les plantes produisent des sucres et de l'oxygène à partir de gaz carbonique et de l'eau. Le carbone organique peut alors être absorbé par les animaux. Une partie du carbone retourne directement dans l'atmosphère comme produit de la respiration, le reste étant incorporées et utilisée pour l'édification des composante cellulaires. Les matières organiques mortes sont décomposées par des microorganismes. En présence d'oxygène, la quasi-totalité du carbone organique est finalement transformé en gaz carbonique, alors qu'en conditions anaérobies du méthane est produit. La majorité du carbone organique est sous forme végétale (près de 90%).

La décomposition et minéralisation de la matière morte est réalisée par étapes par divers microorganismes. Tout d'abord les substances solubles et de poids moléculaires peu élevés sont consommées, puis les molécules plus complexes. Alors qu'une flore variée peut consommer les substances simples, seuls des microorganismes spécialisés peuvent s'attaquer aux molécules complexes telles la cellulose ou la lignine. Cette dernière ne peut être décomposée qu'en conditions aérobies par des champignons, Basidiomycètes supérieurs et quelques Ascomycètes. On peut observer leur masse fibreuse blanchâtre sur le bois en décomposition.

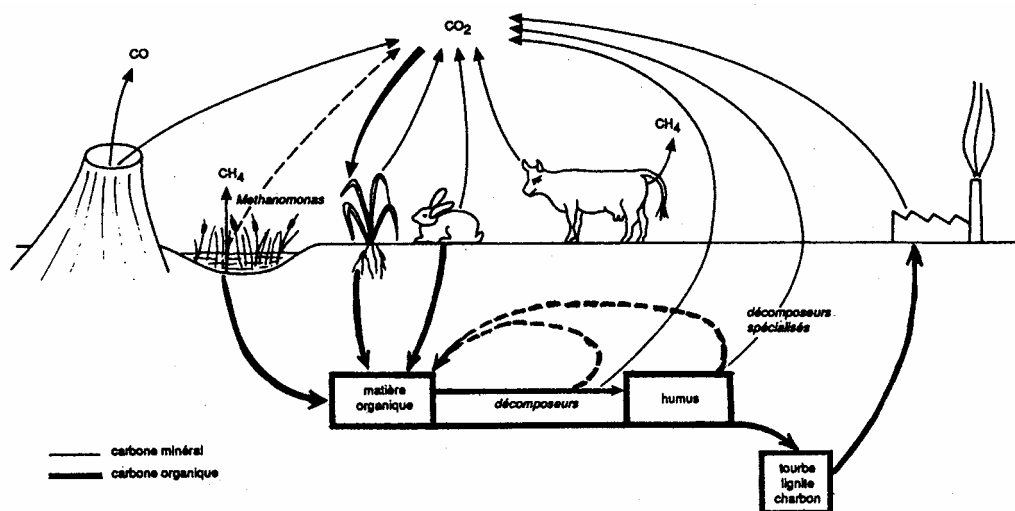


Fig. 2.1. Le cycle du carbone. Ce graphique ne prend pas en compte les océans, qui jouent un rôle considérable dans les bilans de dioxyde de carbone, et qui produisent du méthane. (d'après Davet, 1996).

2.2. Le cycle de l'azote

L'azote atmosphérique ne peut être assimilé ni par les plantes ni par les animaux. Les microorganismes fixateurs d'azote jouent ainsi un rôle primordial dans le cycle naturel de l'azote. Ces microorganismes vivent soit en symbiose avec des plantes (bactéries *Frankia*, *Rhizobium*, ...), soit librement dans les sols (*Azotobacter*, *Clostridium*, *Azospirillum*,...). Ces microorganismes produisent de l'ammoniac à partir de l'azote atmosphérique. Cette forme d'azote peut être assimilée par les microorganismes et par les plantes, bien que de nombreuses plantes l'assimilent relativement mal; elles préfèrent l'azote sous forme nitrate.

La transformation de l'ammoniac en nitrate, en passant par le nitrite, est une réaction extrêmement importante: la nitrification. L'azote ammoniacal est transformé par des bactéries en azote nitrique. Cette réaction est principalement réalisée par des bactéries chimioautotrophes strictement aérobies de la famille des *Nitrosomonas*. Ce nitrite est alors transformé en nitrate par d'autres bactéries, des *Nitrobacter*. Cette réaction peut être inversée. On parle alors de dénitrification. La réduction des nitrates en nitrites peut être effectuée par de nombreux microorganismes lorsque la teneur en oxygène du sol, du substrat ou de partie de ces éléments est insuffisante. Ces nitrites peuvent ensuite être convertis en ammoniac.

L'azote nitrate assimilé par la plante sert de base à la construction des acides aminés et des protéines. L'azote est ainsi un élément essentiel de la vie, et si sa disponibilité pour les plantes n'est plus assurée, il devient rapidement un élément limitant de la croissance. Toutefois, si il est disponible en trop grande quantité, il peut déséquilibrer le métabolisme de la plante et la rendre moins résistante aux facteurs extérieurs, qu'ils soient biologiques ou physiques.

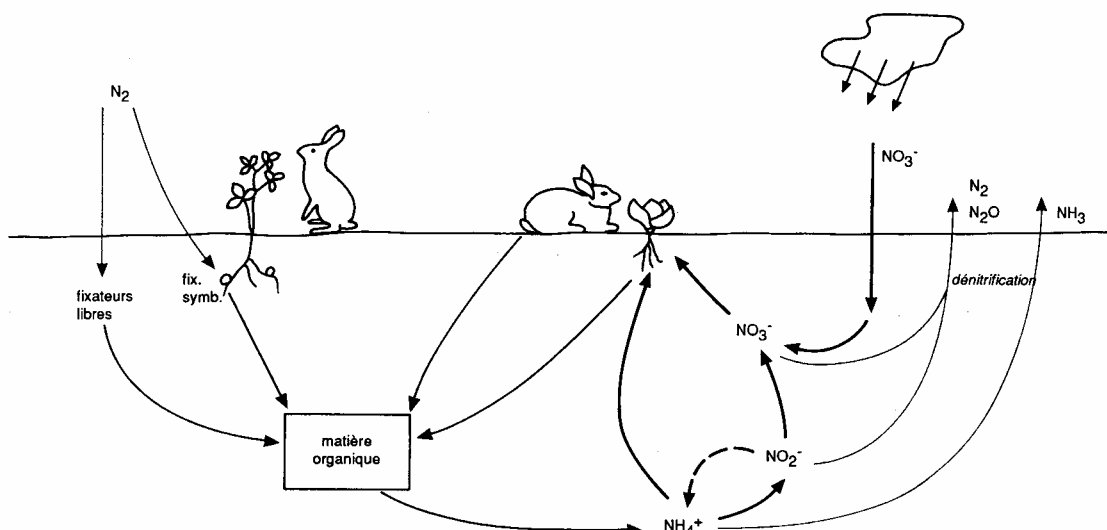


Fig. 2.2. Schéma du cycle naturel de l'azote (d'après Davet, 1996).

Dans le sol, il existe également un équilibre entre l'azote de la matière organique, morte ou vivante, et l'azote minéral. L'azote organique représente la plus grande partie de l'azote dans le sol, à savoir plus de 95%. Ainsi, sa minéralisation par les microorganismes est un mécanisme essentiel. Les microorganismes qui décomposent la matière organique ont besoin d'azote pour leur propre métabolisme. Ils immobilisent ainsi une quantité d'azote qui peut être très importante si le taux de matière organique à décomposer est important. Cependant, en décomposant la matière organique, ils minéralisent et ainsi rendent assimilable pour les plantes l'azote qu'elle contient. Cet équilibre est très important et est influencé par de nombreux facteurs: température, taux d'oxygène disponible, et surtout la composition de la matière organique. Plus celle-ci est pauvre en azote (par exemple les matières ligneuses), plus les microorganismes la décomposant doivent immobiliser l'azote minéral ambiant pour faire leur travail. Ainsi, on peut observer dans certains cas un grave déficit en azote disponible pour la plante, bien que l'azote total soit en grande quantité présent dans le sol.

2.3. Le cycle du phosphore

Contrairement à d'autres éléments comme l'azote ou le carbone, le phosphore ne se trouve que dans le sol. Malheureusement, la plus grande partie du phosphore du sol, minérale ou organique, est insoluble. Il se peut donc que le sol soit très (trop) riche en phosphore, mais que celui-ci ne soit pas assez disponible pour la plante et qu'ainsi des manques puissent être observés. Le phosphore minéral insoluble est constitué de phosphates souvent fluorés, de calciums (sols neutres ou alcalins), de fer et d'aluminium (sols acides). Les mycorhizes sont des auxiliaires irremplaçables dans cette problématique.

La solubilisation du phosphore insoluble peut être réalisée par les phosphatases des racines, mais les microorganismes jouent aussi un rôle non négligeable, grâce aux acides organiques ou aux chélates qu'ils excrètent. Le phosphore mis en solution provient aussi bien des réserves minérales du sol et du recyclage du phosphore organique.

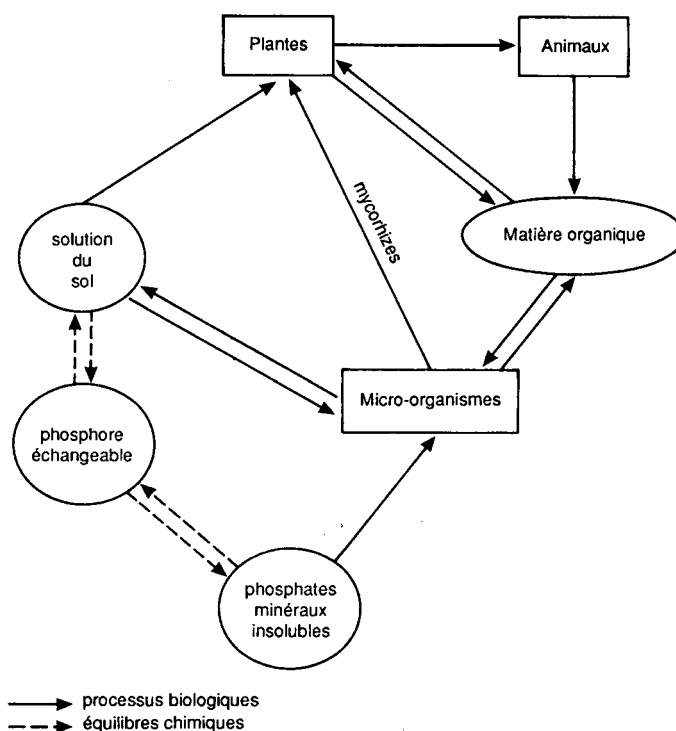


Fig. 2.3. Le cycle du phosphore (d'après Davet, 1996).

2.4. Le cycle du soufre

Le soufre est un élément essentiel des êtres vivants que l'on trouve dans divers acides aminés, dans des vitamines et dans d'autres composés organiques importants. Des traces de soufre sont présentes dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de soufre que les plantes peuvent absorber par les feuilles. La principale source d'approvisionnement est toutefois constituée par les sulfates, ceux-ci représentant une petite partie des réserves du soufre dans le sol. L'essentiel de la teneur en soufre totale d'un sol est sous forme organique pas directement assimilables. La minéralisation du soufre est réalisée par de nombreux microorganismes. En conditions aérobies, le soufre est généralement oxydé en sulfates, alors qu'en conditions anaérobies seuls des sulfures sont produits. Comme pour le phosphore et l'azote, l'évaluation de la teneur totale en soufre d'un sol ne donne guère d'informations sur sa disponibilité.

Dans les roches sédimentaires, le soufre est présent dans des minéraux sulfatés, en particulier le gypse. Dans les roches cristallines, il se trouve sous la forme de sulfure métalliques, comme la pyrite. Le sulfate est la forme la plus oxydée, et il sert de source de soufre aux plantes et à de nombreux microorganismes. Les sulfures sont oxydés par deux groupes de bactéries qui les transforment en soufre élémentaire puis en sulfate.

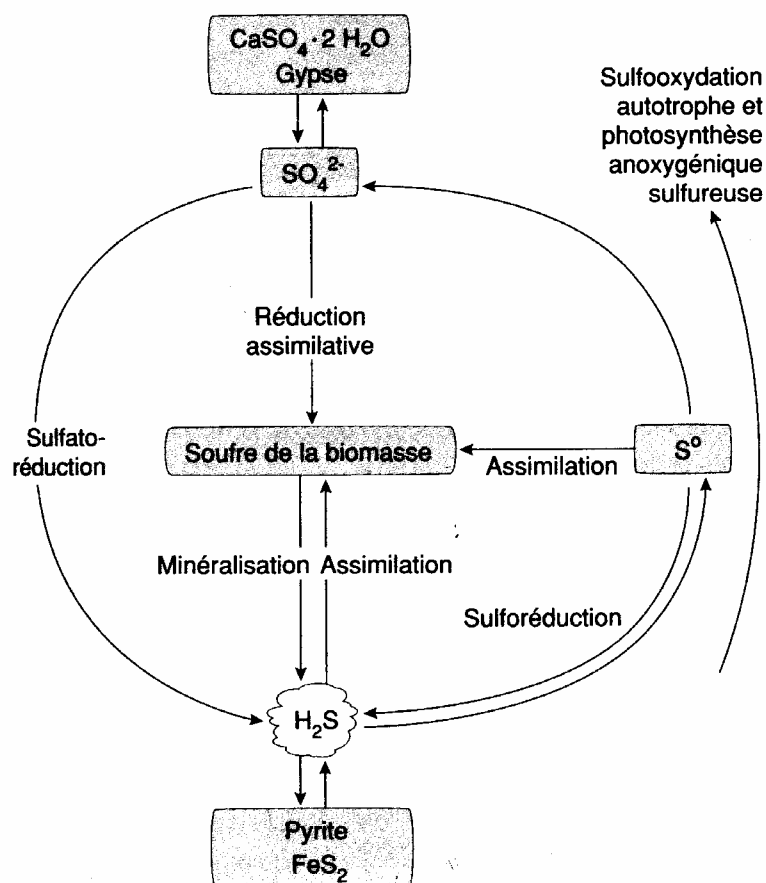


Fig. 2.4. Le cycle biologique du soufre (d'après Gobat et al., 1998).

2.5. Le cycle du fer

Les réservoirs principaux de fer sont représentés par le fer sédimentaire, principalement sous forme d'hydroxydes et d'oxydes ferriques (ex. hématite), et par le fer des roches cristallines, surtout sous forme de fer bivalent, à l'exemple de la pyrite.

En conditions aérobies, le fer n'est solubilisé sous forme d'ions ferriques qu'en milieu très acide. Au voisinage de la neutralité, sa solubilisation exige l'intervention de sidérophores, chélates qui le complexent. L'oxydation du fer ferreux peut se faire spontanément sans la participation d'organismes vivants. Toutefois, la présence de bactéries accélèrent considérablement le processus.

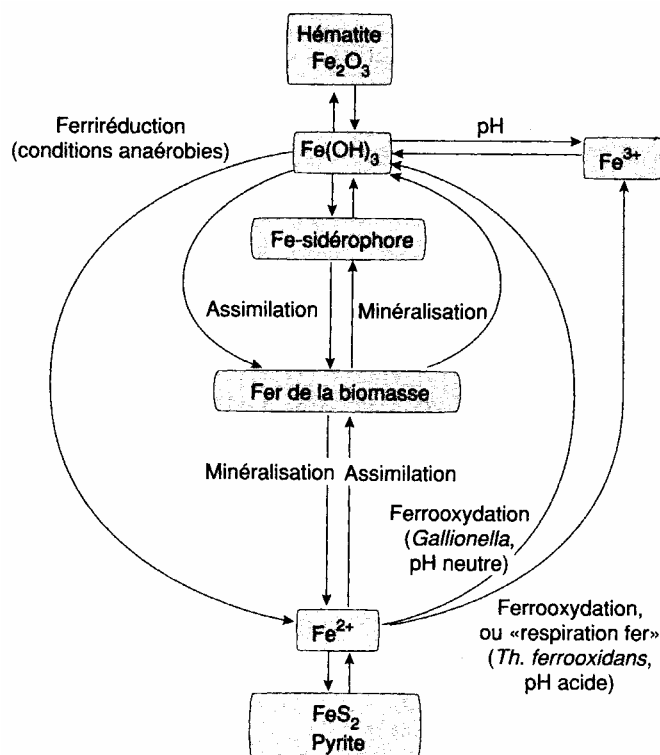


Fig. 2.5. Le cycle biologique du fer (d'après Gobat et al., 1998).

3. L'humus

3.1. L'humus: qu'est-ce que c'est ?

Dans le sol, les matières organiques du sol peuvent être regroupées en quatre classes: la matière organique vivante, la matière organique fraîche (débris végétaux, cadavres, excréments d'animaux), les composés organiques intermédiaires (produits transitoires) et les composés organiques stabilisés: les matières humiques ou humus. Dans le sol, la matière organique n'est jamais à l'état pur. Elle est toujours associée à des matières minérales solubles (ions, éléments, ...) ou particulières (minéraux des sols comme les argiles). Les complexes argilo-humiques que l'on peut observer dans le sol sont très importants pour la structure du sol et pour la vie microbienne en général. Leurs caractéristiques dépendent des propriétés de ses deux constituants: humus et argiles.

Il n'existe pas un humus, mais divers humus qui varient selon leur degré d'évolution. Les humus peuvent être en gros classés selon leurs masses moléculaires. Les acides créniques sont formés par la polycondensation de deux ou trois noyaux aromatiques. Un peu plus gros on trouve les acides humatomélaniques. Plus importants et plus connus sont les acides fulviques et les acides humiques. Les premiers comportent de longues chaînes latérales autour d'un petit noyau, et sont très réactifs par leurs groupes $-COOH$ qui leur fournissent, par leur électronégativité, une bonne



aptitude à la liaison avec les cations bi- ou trivalents. Les acides humiques ont de plus courtes chaînes autour d'un noyau plus gros.

Enfin, nous avons l'humine avec un très gros noyau et de courtes chaînes. L'humine se fixe solidement sur les argiles ou les gels colloïdaux garantissant une structure très stable et persistante. Elle n'est pas soluble. Elle représente l'humus le plus évolué.

3.2. La formation des humus

Dans le sol, la matière organique fraîche est, comme on l'a vu plus haut, en partie minéralisée par divers microorganismes. Ainsi, les divers éléments peuvent à nouveau être assimilés par les organismes sous forme minérale: CO_2 , NO_3^- , SO_4^{--} , PO_4^{---} , ... Une autre partie est assimilée par les microorganismes et incorporées dans leurs cellules. Enfin, le reste n'est pas utilisé. Il s'agit de molécules difficilement dégradables comme des tanins, de résidus polyphénoliques des lignines, etc. Ces précurseurs phénoliques, liés à des produits du métabolisme microbien, se condensent progressivement et forment des acides fulviques. Les hydroxydes de fer et d'aluminium jouent dans ce processus un rôle essentiel de catalyseurs et assurent une fixation très stable des acides fulviques sur les argiles. Les vers de terre jouent également un rôle important en brassant dans leur tube digestif les argiles et les substances humiques. Les remaniements et les phénomènes de condensation de poursuivent et il se forme des acides humiques de poids moléculaires de plus en plus élevés. Grâce à l'incorporation des dérivés de l'activité microbienne, les substances humiques sont fortement enrichies en azote par rapport aux matériaux initiaux.

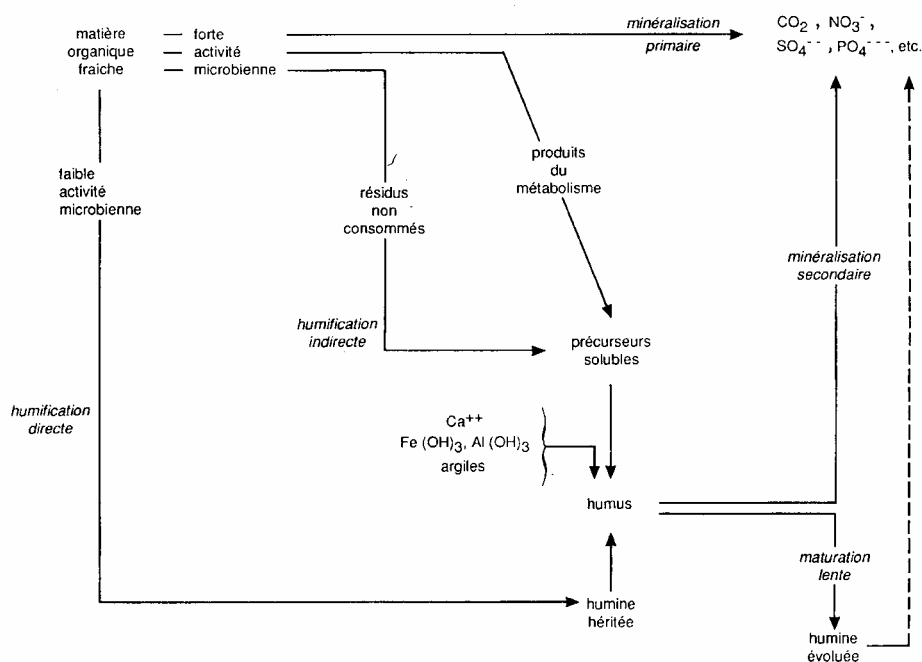


Fig. 3.1. Les principales voies de la transformation de la matière organique en humus et de sa minéralisation (d'après Davet, 1996, adapté de Duchaufour, 1980).



A côté de cette humification (dite **indirecte** parce qu'elle passe par des étapes d'activité biologique intermédiaire), une **humification directe** peut se dérouler dans les régions ne permettant pas un développement très actif de la microflore. Dans ce cas, les composés humiques produits ont un poids moléculaire assez bas et sont pauvres en azote.

Bien que stable, l'humus est également biodégradable. Cette **minéralisation secondaire** fait que l'humus ne s'accumule pas indéfiniment. Un équilibre s'établit en chaque lieu entre l'humification et les pertes dues à la minéralisation secondaire. Certaines actions humaines peuvent toutefois changer cet équilibre, comme la mise en culture d'un sol de forêt ou de prairie qui accélère la minéralisation de la matière organique.

3.3. Le rôle de l'humus

L'humus joue un rôle essentiel dans la fertilité des sols. Et ceci à tous les niveaux: physiques, chimiques et biologiques. Les humus sont très importants pour la structure du sol. De part de leur liaisons stables avec les particules minérales, ils assurent une bonne stabilité de la structure du sol, ce qui garantit sa bonne aération, et le rend plus résistant à l'érosion. D'autre part, les humus améliorent considérablement la pouvoir de rétention en eau des sols. En effet, ils peuvent emmagasiner jusqu'à 20 fois leur poids en eau.

Du point de vue chimique, les humus, en général chargés négativement, peuvent attirer réversiblement les cations. La capacité d'échange des humus est très importante, et ils jouent ainsi un rôle régulateur essentiel. Ils ont également un grand pouvoir tampon, aidant ainsi à stabiliser le pH des sols.

Toutes ces caractéristiques influencent indirectement également fortement la biologie des sols. L'humus joue également un rôle direct sur la microbiologie du sol, étant source de nourriture et refuge pour de nombreux microorganismes. Les complexes argileux-humiques sont le siège d'une vie microbienne importante.

4. La rhizosphère, lieu de rencontre entre la plante et les microorganismes

4.1. La rhizosphère et l'effet rhizosphère

La rhizosphère est la région du sol directement influencée par les racines. Elle représente le lieu d'échange essentiel entre la plante et le sol. On y observe une présence importante de microorganismes liés les uns aux autres par de complexes réactions de guerre et de paix. On



observe souvent dans la rhizosphère une quantité de microorganismes au moins 1000 fois plus importante que dans le sol ambiant non influencé par les racines.

Cette population importante de microorganismes dans la rhizosphère est due aux substrats énergétiques abondants qui s'y trouvent. Une fraction importante de la matière produite par la photosynthèse est émise par les racines sous forme de:

- **exsudats:** diffusion passive hors des cellules de composés solubles de faible poids moléculaire, comme sucres ou acides aminés
- **sécrétions et excrétiens:** processus actif consommant de l'énergie ; concernent généralement des composés de poids moléculaires élevés, comme enzymes ou mucilages. Les cellules peuvent également excréter activement des protons ou des acides organiques pour maintenir leurs équilibres ioniques
- **cellules mortes et lysats:** les cellules de la coiffe et les poils absorbants ont une durée de vie très limitée, celles du manteau et du cortex racinaire externe dégènèrent plus ou moins rapidement. Ces cellules desquamées représentent un apport parfois très important de matière organique.

On trouve dans ces produits une grande quantité de carbone organique, source d'énergie pour les microorganismes.

La quantité de produits émis par les racines n'est pas homogène tout au long de la racine. Un gradient y est observé. La coiffe est une sorte de bouclier de cellules protégeant l'apex. Au contact du sol, les cellules externes de la coiffe se détachent et sont continuellement remplacées par des nouvelles. La coiffe produit également une quantité relativement importante de mucilages jouant un rôle de lubrifiant facilitant la pénétration des racines. Ils sont importants pour l'agrégation des microorganismes et des particules de sol. L'autolyse des tissus rhizodermiques et corticaux libèrent des lysats appréciés des bactéries saprophytes. Les exsudats représentent la partie la plus importante des substances libérées par les racines, surtout dans la région apicale. C'est également celle la plus rapidement métabolisée par les microorganismes. Sa **composition** contient des sucres, des acides aminés, des acides organiques des facteurs de croissance et des hormones. Certains de ses composants, volatiles, servent de signaux aux microorganismes, leur permettant de se diriger vers les racines. Par exemple, *Sclerotium cepivorum* arrive à «sentir» la plante jusqu'à une distance de plus d'un centimètre !

Le **pH** de la rhizosphère est également différent de celui du sol ambiant. La différence peut atteindre deux unités. Cette différence de pH, observable principalement à l'extrémité des racines, joue un rôle important et influence particulièrement la solubilité et ainsi la disponibilité de divers éléments nutritifs.

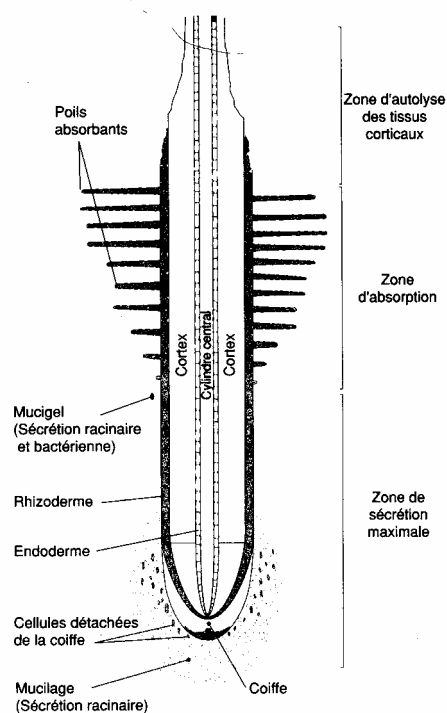


Fig. 4.1. Diagramme d'une racelle et de son environnement (d'après Gobat et al., 1998).

Les substances libérées par les racines varient aussi bien quantitativement que qualitativement d'une variété de plante à l'autre, et elles sont également facteurs de l'état physiologique de la plante. Elles sont d'autre part fortement influencées par tous les facteurs influençant l'activité photosynthétique et la croissance de la plante: lumière, température, teneur en eau du sol, structure du sol, nutrition, maladies et autres stress, ... Des herbicides, antibiotiques ou engrais solubles pulvérisés sur le feuillage peuvent également être partiellement transférés dans les racines et apparaître dans la rhizosphère ou modifier la nature des exsudats.

4.2. Les microorganismes de la rhizosphère

L'activité microbiologique dans la rhizosphère est de grande importance et a diverses conséquences pour les plantes. Tout d'abord, elle joue un rôle important dans le **recyclage des éléments minéraux**, entraînant alors presque toujours leur meilleure assimilation par les plantes. D'autre part, de part la respiration des racines et des microorganismes qui consomment de grandes quantités d'oxygène, elle provoque une **diminution du potentiel d'oxydo-réduction**, ce qui peut favoriser l'absorption de certains cations par les plantes, tels le fer et le manganèse. De même, les sidérophores, **agents chélateurs** synthétisés par les microorganismes, peuvent également favoriser ou freiner l'assimilation d'éléments comme le fer, le manganèse et le zinc. Certains microorganismes produisent également des **régulateurs de croissance** qui peuvent influencer le métabolisme de la plante. D'un autre côté, la **production de composés toxiques** par certains



microorganismes ou la capacité de **détoxification** par exemple de composés phénoliques par d'autres peuvent directement agir positivement ou négativement sur la physiologie de la plante.

Alors que l'effets stimulant des produits solubles de la rhizosphère sur de nombreux microorganismes est important à une distance allant de 1 à 3 mm de la racine, un habitat particulier est constitué par la surface de la racine elle-même de la racine: le rhizoplan. Sa colonisation commence très tôt, mais elle n'est de loin jamais complète. La microflore du rhizoplan est constituée d'un ensemble de communautés indépendantes implantées préférentiellement dans les régions où l'exsudation est la plus intense: à la jonction des cellules épidermiques et à la base des poils absorbants, les sites d'émergence des racines latérales et les lésions causées par l'abrasion mécanique et par des parasites animaux ou microbiens. Certains microorganismes ne restent pas confinés dans le rhizoplan, mais pénètrent plus avant à l'intérieur des racines.

Il est évident que tous les microorganismes ne sont pas attirés de la même manière par les racines. Parmi les bactéries, alors que les gram-positives comme les *Bacillus* ne sont guère influencées par la rhizosphère, les gram-négatives tels les *Pseudomonas* y répondent très fortement. De même, certains champignons sont très bien représentés dans la rhizosphère: *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Gliocladium*, ... D'autre part, comme les exsudats des racines varient d'une espèce de plante à l'autre, il n'est également pas étonnant que la composition et la quantité des microorganismes s'y trouvant varient également.

De manière globale et simplifiée, on peut diviser les microorganismes des racines en trois groupes: ceux étant **bénéfiques** pour la plante, comme les mycorhizes et les endophytes fixatrices d'azote, ceux lui étant **négatifs**, comme de nombreuses bactéries et champignons pathogènes, et ceux lui étant **indifférents**. Parmi les bénéfiques, on trouve également les antagonistes qui peuvent protéger les plantes contre les attaques des microorganismes pathogènes.

Les bactéries: protéines sécrétées

Les bactéries sécrètent diverses substances (protéines) dans l'environnement (toxines, enzymes ...). Xanthomonas campestris produit plusieurs enzymes: une amylase, une protéase, une polygalacturonate lyase, une endoglucanase. La production de protéase et d'alpha amylase par des souches de Bacillus subtilis peut s'élever à 15 g/1 litre de culture. Les bactéries gram + sont les championnes de production. Bacillus subtilis fabrique six protéases différentes dont la subtilisine (incorporée à la lessive par procter & gamble ; celle-ci contient 275 acides aminés).



4.2.1. Les mycorhizes

Les mycorhizes sont le résultat de l'association d'une racine et d'un champignon. Les champignons mycorrhizogènes vivent en partie à l'intérieur des tissus de la plante et en partie à l'extérieur où leurs filaments prospectent un volume de sol très important. Les champignons reçoivent de la plante des substrats carbonés simples et des substances de croissance et sont à l'abri des compétiteurs. Les plantes bénéficient de l'amélioration de leur nutrition en divers éléments peu solubles, comme surtout le phosphore. Une assimilation accrue du zinc et de l'azote par des plantes mycorhizées a également été observées. La rhizosphère d'une racine mycorhizée est différente que celle d'une plante non mycorhizée, et on parle ainsi de **mycorrhizosphère**. L'effet mycorrhizosphère se traduit souvent par une résistance plus grande des racines contre un grand nombre de parasites telluriques. D'autre part, la structure du sol peut être également nettement améliorée par des racines mycorhizées.

On distingue deux groupes de mycorhizes: les **endomycorhizes à arbuscules et vésicules (VAM)** et les **ectomycorhizes**. Les **VAM** sont les plus communs et sont présents dans la plupart des familles botaniques. Les champignons des VAM sont des Zygomycètes qui se conservent dans le sol sous formes de spores de résistance. Ces spores germent et forment un appressorium à la surface d'une racine hôte, y pénètrent et progressent dans le parenchyme de la racine. le champignon forme des suçoirs ramifiés à l'intérieur des cellules, les arbuscules. C'est là que des échanges intenses ont lieu entre le champignon et la plante.

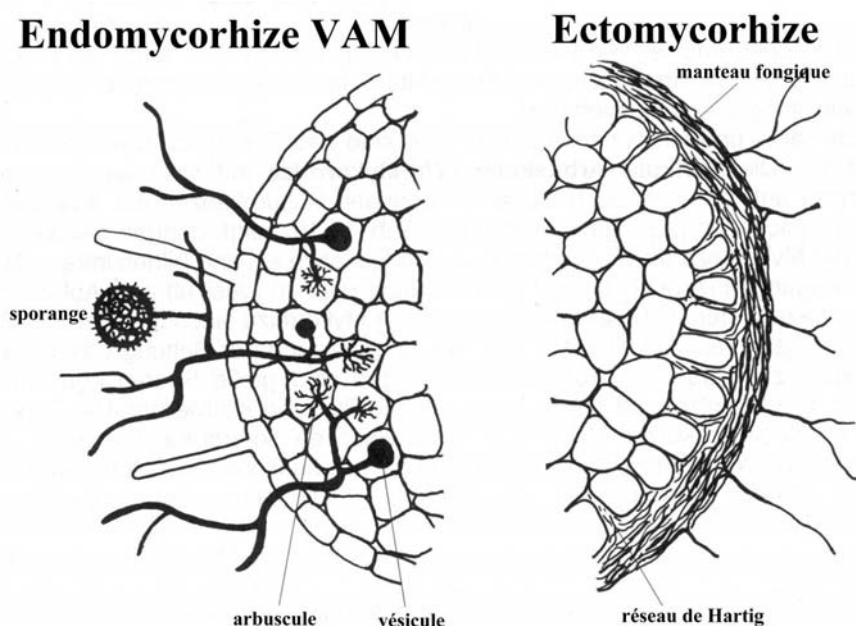


Fig. 4.2. Types de mycorhizes. (d'après Fritsche, 1998).



Les **ectomycorhizes** sont constituées par des racines courtes et d'aspect renflé, ramifiées et complètement entourées d'une gaine d'hyphes entrelacées, le manteau fongique. Les hyphes s'insinuent entre les cellules des assises externes de parenchyme cortical sans pour autant les pénétrer. Les ectomycorhizes existent seulement chez une faible partie des Phanérogrames. On ne connaît pas d'ectomycorhizes chez les Monocotylédones. Elles sont toutefois mieux connues du grand public ne serait-ce qu'à cause du chène truffier.

4.2.2. Les bactéries fixatrices d'azote

En gros, on peut différencier entre les bactéries fixatrices d'azote **symbiotiques** et **celles non symbiotiques (libres)**.

Les bactéries symbiotiques sont bien connues et, comme les *Rhizobium*, commercialisées et utilisées à grande échelle pour améliorer la fixation d'azote des légumineuses. D'autres bactéries symbiotiques peuvent former des nodosités fixatrices d'azote sur diverses familles botaniques, comme les *Frankia* sur diverses espèces commerciales.

D'autres bactéries rhizosphériques revêtent un intérêt certain: celles qui peuvent fixer l'azote atmosphérique de manière non symbiotique: *Azospirillum lipoferum*, *A. brasilense*, *Klebsiella pneumoniae*, ... Les bactéries phototrophes fixatrices d'azote peuvent jouer un rôle agronomique très important par exemple dans les rizières. Les performances des bactéries libres fixatrices d'azote est très variable selon les lieux et les conditions climatiques: l'apport annuel, en général de quelques kilos par hectare, peut atteindre une trentaine de kg dans certains cas, et même entre 30 et 70 kilos par hectare et an en milieu liquide par les cyanobactéries.

Certaines souches d'*Azospirillum* étroitement associées aux racines de la plupart des Graminées, ont pu, introduites dans la rhizosphère de plantes cultivées, obtenir des augmentations de rendement significatives. Toutefois, il semble que les stimulations observées soient plus vraisemblablement dues à la production d'hormones de croissance par ces bactéries que par la fixation d'azote.

5. Les agents pathogènes des racines

Comme déjà vu, le sol en général et la rhizosphère en particulier regorgent d'innombrables microorganismes dont une partie peut directement attaquer les racines et leur causer des dégâts plus ou moins importants pouvant conduire jusqu'à la mort de la plante: les agents pathogènes. Ceux-ci appartiennent à trouver dans pratiquement toutes les familles de champignons et de bactéries. Souvent, la plante n'est pas attaquée par un seul pathogène mais par un complexe parasitaire.



La microflore générale, mais également l'état physiologique de la plante et les conditions environnementales jouent un rôle important dans l'attaque d'une racine par un pathogène donné. Certains microorganismes peuvent, sous certaines conditions, être bénéfiques ou sans influence sur la santé de la plante, alors que dans certaines situations, le même agent pathogène peut causer d'importants dégâts à cette même plante.

5.1. Les différentes relations hôtes-pathogènes

Les microorganismes du sol parasites se nourrissent à partir des parties vivantes de la plante. La plupart d'entre eux peuvent toutefois également vivre de manière saprophyte, c'est à dire de se maintenir et de se développer sur des débris organiques en absence de la plante hôte. Ces microorganismes **pathogènes facultatifs** restent généralement présents dans les sols et peuvent être trouvés, tels les *Pythium*, dans la plupart des champs cultivés. Souvent, ils ne sont pas des pathogènes très agressifs et ne causent d'importants dégâts aux plantes que lorsque les conditions sont défavorables à ces dernières.

En opposition à ces microorganismes, on trouve les agents **pathogène obligatoires**. Ceux-ci ne peuvent se développer qu'en présence de leur plante hôte. En absence de celle-ci, ils peuvent subsister dans le sol pendant une certaine période grâce à des formes de résistances; toutefois, celles-ci ne restent pas indéfiniment viables et, comme ils ne peuvent se développer sans la plante hôte, ne sont plus observable dans une terre n'ayant pas hébergé la plante hôte pendant un certain temps. Lorsque la plante hôte est présente, ces agents pathogène sont souvent très agressifs et peuvent causer de très important dégâts même si les conditions de croissance de la plante sont bonne. Ces microorganismes sont souvent la cause de la **fatigue des sols** et du fait qu'il n'est pas possible de cultiver plusieurs années de suite les mêmes plantes sur la même parcelle. Un exemple typique de cela est l'hernie du chou: l'agent pathogène, *Plasmodiophora brassicae*, se développe sur les racines des crucifères et cause des excroissances importantes sur les racines. Si on cultive plusieurs années de suite des crucifères dans le même champs, l'inoculum de ce champignon se développe de telle façon qu'une culture de variété sensible n'est plus possible. Comme les spores de résistances qu'il forme peuvent survivre plus de dix ans dans le sol, une longue pause sans culture de crucifères est alors nécessaire.

Alors que longtemps on ne considérait comme néfastes que les microorganismes pathogènes causant des symptômes clairs sur les plantes, on s'est par la suite rendu compte que de nombreux microorganismes de sol peuvent réduire la production végétale sans causer véritablement de symptômes typiques sur les plantes, mais en les affaiblissent ou en les stressant un peu. On parle alors de pathogènes mineurs. Suivant les conditions environnementales ou l'état physiologique de la



plante, certains de ces pathogènes peuvent alors également devenir des «pathogènes typiques». *Pythium ultimum* est un exemple de cela. Ce champignon peut causer de très gros dégâts aux très jeunes plantes et causer la fonte des semis. A partir d'un certain âge, la plante devient cependant résistante et peut se développer malgré la présence de ce champignon. Celui-ci continue toutefois à influencer négativement la croissance de la plante et, sans causer de véritables symptômes, réduire le rendement des plantes.

Les divers agents pathogènes se différencient également de part de leur spectre des plantes qu'ils attaquent. Certains, comme les responsables des fontes de semis *Pythium et Rhizoctonia*, peuvent attaquer des plantes de diverses familles. D'autres, comme le piétin échaudage *Gaeumannomyces graminis var. tritici*, n'attaque qu'une espèce de plantes. D'autres enfin, comme les fusarioses vasculaires, sont extrêmement spécialisées et chacune de leurs souches ne causent des dégâts qu'à certaines variétés de la plante hôte.

Il est essentiel de tenir compte de ces caractéristiques pour les divers agents pathogènes en cause afin de pouvoir pratiquer des modes de cultures permettant d'éviter au maximum leur développement.

5.2. Caractéristiques importantes des champignons pathogènes

Les caractéristiques générales des champignons ont été présentées au chapitre 1.1.2. Du point de vue du développement ou non d'une maladie, il est important de savoir comment le champignon survit et se propage dans le sol, comment et où il attaque les plantes et comment il se reproduit. En connaissant ces paramètres, il nous devient possible de mettre en place des stratégies permettant de casser le cycle de l'agent pathogène et ainsi l'empêcher de causer de gros dégâts.

Les champignons pathogènes peuvent survivre de différentes façon dans le sol: sous forme saprophyte, avec des spores de résistances (oospores, chlamydospores, ...), avec des sclérotés (ramifications intensives du mycélium) ou en formant des rhizomorphes leurs permettant d'aller d'une plante-hôte à l'autre. Chaque champignon a sa propre stratégie, stratégie adaptée à son mode de vie. Il est clair qu'un champignon pathogène facultatif pouvant attaquer de nombreuses plantes comme le *Pythium* a moins besoin de former des spores de résistances restant viables pendant quinze ans, alors qu'une longue période de survie des spores d'un champignon pathogène obligatoire spécialisé est indispensable.

La plupart des champignons pathogènes du sol attaquent les plantes par les racines, alors que quelques-uns pénètrent par l'hypocotyle ou le collet. Dans le sol, la desquamation des poils absorbants et des cellules corticales, l'émission de racines secondaires, les déchirures provoquées par le frottement sur les particules du sol, les blessures faites par d'autres microorganismes ou par



des nématodes, etc., sont des brèches dans l'enveloppe protectrice des tissus. Aussi les champignons parasites des racines peuvent s'insinuer entre les cellules épidermiques des jeunes racines, coloniser les parties sénescents du cortex puis se développer plus avant dans les tissus de la plante. Tous les champignons n'attaquent toutefois pas les racines de la même manière et aux mêmes emplacements. Alors que les champignons à croissance rapide attaquent principalement les extrémités des racines, d'autres, plus lents, attaquent plutôt des régions déjà différenciées.

Pendant que certains champignons restent au niveau des racines, d'autres gagnent le xylème des plantes et se développent systématiquement dans celles-ci, par exemple dans le cas des fusarioses vasculaires. Alors que dans le premier cas un nombre important d'attaques est nécessaire pour faire dépérir la plante, une seule attaque d'un *Fusarium* peut théoriquement conduire à la mort de la plante.

De nombreux champignons produisent plusieurs types de spores. Pendant que les unes, en général produites de manière asexuée, servent à la propagation rapide de l'agent pathogène pendant la culture, les autres, souvent produites de manière sexuée en fin de vie de la plante hôte, sert de spore de résistance.

5.3. Caractéristiques importantes des bactéries pathogènes

Les bactéries du sol peuvent être grossièrement divisées en deux groupes: celles produisant des spores de résistances (les Grams-positifs tels les *Bacillus*) et celles n'en produisant pas (comme les Gram-négatives, par exemple les *Pseudomonas*). Il est évident que ceci joue un rôle important sur le mode de survie des bactéries. Celles ne produisant pas de spores sont plus sensibles et peuvent se protéger en se liant aux argiles en petit amas de plusieurs cellules.

Du point de vue pathologique, les bactéries jouent surtout un rôle dans les situations très humides et chaudes. En effet, elles sont liées au milieu liquide de part leur mode de vie et de déplacement. Certaines bactéries pénètrent les racines, principalement par des blessures, et se développent ensuite dans les vaisseaux de la plante, pouvant causer sa mort (*Xanthomonas fragariae* sur fraisiers). D'autres peuvent causer de gros dégâts aux plantes en créant une macération des tissus végétaux avec des enzymes (comme *Erwinia carotovora* sur carotte).

Les bactéries sont très importantes dans la rhizosphère des plantes, où elles peuvent jouer un rôle important, soit en affaiblissant la plante avec des sécrétions de toxines ou d'enzymes de macération, soit au contraire en protégeant les plantes contre d'autres prédateurs.



Les bactéries: acquisition de la virulence

Des bactéries réputées en d'autres lieux comme inoffensives peuvent devenir pathogènes. La température, la pression osmotique, le taux d'oxygène, le manque de fer ou de calcium sont autant de facteurs liés au milieu et dont nous devons nous préoccuper. C'est un peu comme un individu dont, si les besoins élémentaires (nourriture, sécurité et confort) sont satisfaits, on rencontre alors un personnage plaisant. gai et courtois, et on peut dire sans crainte que c'est grâce à l'abondance de nourriture (merci Parmentier) que depuis plusieurs siècles il n'y a plus de famine en Europe et des modèles démocratiques ont pu voir le jour. Supprimer un de ces éléments à tout citoyen aujourd'hui et vous voyez apparaître de véritables démons capables de s'étripier entre eux. Il en est de même avec plusieurs bactéries. Tant que la nourriture est abondante et que le milieu est agréable, elles se reproduisent sans difficultés et sans devoir se livrer une bataille sans merci pour trouver leur énergie. (Ne fait-on pas la même chose sur la planète ?) Par conséquent, des déséquilibres peuvent avoir lieu dans les différents substrats car le monde biologique n'est pas stable. Il est en constante évolution et nous devons essayer de le stabiliser par différents moyens: fumure, amendements, travaux du sol, ... Les bactéries naissent, vivent et meurent. Il faut éviter les variations brutales de nourritures, comme par exemple ne donner qu'une fois par ans une couche de terreau ou de fortes quantités de fertilisant. Il faut donc apporter régulièrement les éléments au sol.

Certains agronomes ont démontrés une amélioration des conditions de vie des plantes et des animaux en régulant la vie microbienne, c'est à dire en supprimant les éléments qui «dopent» les bactéries, comme le phosphore qui déclenche de véritables euphories biologiques conduisant à la prolifération d'algues et cause la pollution des lacs. Le phosphate est une source très précieuse pour les bactéries qui disposent de plusieurs mécanismes pour le récupérer et l'utiliser pour leur métabolisme et la fabrication d'enzymes. Imaginez un instant que l'on ne contrôle plus la natalité et que nous soyons doués d'une reproduction extraordinaire: dans quelques temps, des désordres liés à la place et à la nourriture apparaîtraient. Il en est de même pour les microorganismes. Il ne faut donc pas les doper.

5.4. Les maladies importantes du gazon

Le plus grand nombre des maladies importantes des gazons sont causées par des agents pathogènes fongiques. Les divers agents pathogènes importants se succèdent pendant l'année et suivant les conditions climatiques. *Fusarium nivale* cause par exemple des dégâts pendant des périodes froides ou fraîches, alors que *Rhizoctonia cerealis* est principalement actif pendant les saisons chaudes. On ne va pas ici énumérer les nombreuses maladies que l'on observe dans les gazons, une bonne présentation de celles-ci pouvant être trouvée dans le livre de Dehaye: «Les maladies cryptogamiques des gazons».

Les conditions environnementales influencent considérablement le développement des maladies, et de ce fait celles-ci varient en intensité d'année en année. L'intensité d'utilisation du gazon joue un rôle également important pour les agents pathogènes. Ainsi, les plantes d'un green de golf sont constamment blessées et stressées, et elles sont ainsi des proies de choix pour certains pathogènes comme *Pythium*. Il est donc particulièrement important d'essayer de fortifier le plus possible ces plantes par les techniques culturales à disposition en leur créant malgré les contraintes



d'utilisation les conditions de vie les plus propices possible. Ici aussi, la devise «prévenir vaut mieux que guérir» a tout son sens et devrait conditionner toute action culturale entreprise.

6. Champignons et bactéries au service de la santé des plantes

Comme déjà mentionné plus haut, de nombreux microorganismes travaillent pour la santé des plantes et les protègent contre ceux qui les rendent malades. Ces microorganismes utiles, champignons ou bactéries, appartiennent en partie aux mêmes familles que certains microorganismes pathogènes: *Fusarium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, ... La liste de ces organismes utiles, appelés **antagonistes**, est longue, et depuis quelques années de nombreuses recherches sont entreprises pour pouvoir les employer à grande échelle dans les cultures. Les premiers produits commerciaux de lutte biologiques contre les maladies sont depuis peu sur le marché, et de grands espoirs sont mis dans cette nouvelle stratégie et philosophie de lutte. Son but n'est pas de détruire chaque germe non désiré de chaque pathogène, mais de créer un équilibre de façon à ce que les agents pathogènes ne puissent s'exprimer et créer des dégâts plus importants qu'un **seuil de tolérance** déterminé. Ainsi, on cherche à réaliser un mode de production durable en augmentant et en assurant à long terme la fertilité des sols.

Il est important de noter que, comme chez l'homme pas tous peuvent être Einstein, Maradona ou Martina Hingins, pas tous les *Pseudomonas* fluorescents ou que tous les *Trichoderma* sont des antagonistes efficaces. Parmi toutes les souches d'une espèce de microorganismes, certaines sont très efficaces alors que d'autres ne montrent aucune action bénéfique sur la santé des plantes, ou même dans certains cas peuvent lui être néfaste. Ainsi, la première difficulté que l'on rencontre quand on veut protéger ses plantes avec des antagonistes, c'est de sélectionner les bonnes souches. Ceci nécessite des recherches relativement fastidieuses et demande des biotests en conditions naturelles, car des organismes efficaces en laboratoire dans des conditions contrôlées ne sont pas forcément actifs en milieu naturel en présence de la microflore du sol.

Il faut également observer qu'une souche très efficace dans des conditions données peut montrer un effet moindre dans d'autres circonstances. En utilisant en parallèle plusieurs souches d'antagonistes, on peut agir à l'encontre de ce fait, une souche moins efficace dans une certaine situation pouvant être secondée par une autre alors plus effective.



6.1. Les différents modes d'action

Les modes d'actions des microorganismes sont nombreux. Certains mécanismes protègent indirectement les plantes en renforçant sa vitalité et/ou ses mécanismes de défenses, alors que d'autres modes d'actions sont directement dirigés sur les microorganismes néfastes pour la santé de la plante.

Les mécanismes de protection des antagonistes comprennent des phénomènes de compétition (lutte pour le fer, pour les sites d'infection, pour les nutriments), le parasitisme, la production de cyanide ou d'antibiotiques, production de substances de croissance de la plante, induction de résistance dans la plante, dégradation des toxines du pathogène. L'action d'un antagoniste efficace ne repose en général pas sur un seul mode d'action, mais sur la combinaison de plusieurs mécanismes. L'action de la souche Fo47 de *Fusarium oxysporum*, qui protège par exemple diverses plantes contre des fusarioses vasculaires, agit par concurrence pour le site d'infection, par compétition pour le fer et le carbone, et en plus par résistance induite dans la plante.

Tab. 6.1. Bactéries antagonistes protégeant des plantes contre différentes maladies d'origine tellurique.
Liste non exhaustive.

Antagonistes	Agents pathogènes	Plantes hôtes
<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Fusarium roseum</i>	Maïs
	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>dianthi</i>	Oeillet
	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>radici-lycopersici</i>	Tomate
	<i>Fusarium solani</i>	Haricot
	<i>Phomopsis sclerotioides</i>	Concombre
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Coton
<i>Bacillus pumilis</i> et <i>B. mycooides</i>	<i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i>	Blé
<i>Pseudomonas</i> ssp. fluorescents	<i>Erwinia carotovora</i>	Pomme de terre
	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp.	Oeillet, radis, tomate, lin
	<i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i>	Blé
	<i>Phomopsis sclerotioides</i>	Concombre
	<i>Pythium</i> spp.	Diverses
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Coton
	<i>Thielaviopsis basicola</i>	Tabac
	<i>Verticillium dahliae</i>	Pomme de terre
	<i>Xanthomonas citri</i>	Citrus spp.
<i>Rhizobium melliloti</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lycopersici</i>	Tomate
<i>Streptomyces</i> spp.	<i>Fusarium</i> sp-	Narcisse
	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lycopersici</i>	Tomate
	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>vasinfectum</i>	Sésame
	<i>Phytophthora nicotiana</i> var. <i>parasitica</i>	Sésame



Tab. 6.2. Champignons antagonistes protégeant des plantes contre différentes maladies d'origine tellurique.
Liste non exhaustive.

Antagonistes	Agents pathogènes	Plantes hôtes
<i>Chaetomium globosum</i>	<i>Fusarium</i> sp.	Maïs
<i>Coniothyrium minitans</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Céleri et laitue
<i>Fusarium oxysporum</i> non pathogènes	<i>Fusarium oxysporum</i> f.spp.	Concombre, oeillet, fraise, tomate
	<i>Verticillium dahliae</i>	Tomate
<i>Gliocladium virens</i>	<i>Fusarium</i> sp.	Narcisse
	<i>Fusarium oxysporum</i> f.spp	Concombre, tomate
	<i>Macrophomina phaseolina</i>	Moutarde
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Tomate, coton
<i>Glomus intraradices</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>radicis-lycopersici</i>	Tomate
<i>Glomus leptotichum</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Tomate
<i>Penicillium oxylicum</i>	Complexe <i>Aphanomyces-Fusarium-Pythium-Rhizoctonia</i>	Pois
<i>Pythium</i> sp.	<i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i>	Blé
<i>Trichoderma hamatum</i>	<i>Fusarium</i> sp.	Narcisse
	<i>Rhizoctonia</i> sp.	Haricot
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Tomate
<i>Trichoderma harzianum</i>	<i>Fusarium</i> sp.	Narcisse
	<i>Fusarium oxysporum</i> f.spp.	Concombre, tomate
	<i>Macrophomina phaseolina</i>	Moutarde
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Céleri, laitue
<i>Trichoderma viride</i>	<i>Fusarium</i> sp.	Narcisse

6.2. Présentation de quelques champignons antagonistes importants

Alors que de nombreuses formes spéciales de *Fusarium oxysporum* sont connues comme des pathogènes importants de nombreuses plantes, certaines souches non pathogènes de ce champignon, comme la souche Fo47, ont la particularité de protéger les plantes contre les souches pathogènes de ce même champignon. Comme mentionné plus haut, plusieurs mécanismes de protection semblent impliqués. La particularité de ces souches antagonistes est qu'elles sont relativement spécifique, ne protégeant pratiquement les plantes que contre les fusarioses vasculaires.

Les *Trichoderma* font également certainement partie des champignons antagonistes les plus connus, et ils sont l'objet de recherches intensives depuis de nombreuses années. Ces champignons habitent la plupart des sols et montrent une action contre un grand nombre de champignons parasites. Ils produisent une grande variété d'antibiotiques jouant un rôle important dans la protection des plantes. De plus, ils peuvent, grâce à la production d'enzymes (chitinases et glucanases), parasiter directement les hyphes des champignons qu'ils combattent, les pénétrer et provoquer la lyse de leurs cellules.



Penicillium oxalicum, utilisé en traitement des semences, protège les plantes par exemples de pois contre les maladies de la levée. Dans des essais en serres, une protection des plantules aussi bonne qu'un traitement avec le fongicide Captan a été obtenu avec ce champignon.

D'autres champignons prometteurs, comme *Gliocladium virens* ou *Chaetomium*, font l'objet de recherches intenses. Une des plus grandes difficultés rencontrée est le manque de constance des résultats obtenus. Dans certains essais, une protection presque parfaite des plantes peut être observée lors d'une répétition de l'essai, alors qu'une répétition ultérieure du même essai ne peut confirmer ces résultats. Une connaissance plus précise des mécanismes de protection et des facteurs les influençant est encore nécessaire pour mieux maîtriser cette méthode de lutte.

6.3. Présentation de quelques bactéries antagonistes importants

Les bactéries de loin les plus connues comme antagonistes sont les *Pseudomonas* fluorescents, les *Bacillus*, (comme *B. subtilis*) et certains actinomycètes (comme *Streptomyces* spp.).

Les bactéries: sporulation

Les bactéries ont des formes de résistances variables. Conidies chez les actinomycètes, spores chez les Bacillus, exospores, cystes, ... Les endospores sont des cellules dormantes à l'intérieure d'une autre cellule. Cela se passe généralement après une division spéciale où la cellule parentale dégénère. La spore redonne ensuite, après germination lorsque les conditions de développement deviennent favorables, une cellule normale. La longévité des spores peut être impressionnante: on a retrouvé après 68 ans des spores viables dans un échantillon préparé par Pasteur à partir d'une conserve de viande vieille de 118 ans, ainsi que des spores viables provenant d'herbiers vieux de plusieurs siècles. Des carottages de fonds marins ont rapporté des sédiments âgés de 5'800 ans qui contenaient encore 25 à 75 bactéries viables par gramme. D'autre part, des spores de bactéries pourraient très bien survivre très longtemps dans l'espace interstellaire, car leur coque est résistante aux UV.

Le Bacillus subtilis peut être conservé sans problèmes 16 ans dans de l'eau à 4°C. Des chercheurs estiment qu'en de bonnes conditions de frois, la durée de vie d'une spore peut atteindre plusieurs milliers d'années.

Chez Bacillus substilis, la sporulation répond à une crise due à une période de conditions difficiles. 80 gènes sont impliquées dans la sporulation.

Les *Pseudomonas* sont des colonisateurs de la rhizosphère très efficaces. Ils sont efficaces contre de nombreux agents pathogènes telluriques, et ceci grâce à divers mécanismes. Certaines souches sont efficaces grâce à la production de cyanide et de divers antibiotiques, d'autres grâce à la production de sidérophores chélatant le fer et le rendant ainsi indisponible pour les agents pathogènes. Il a également été démontré que certaines souches de *Pseudomonas* peuvent induire une résistance dans les plantes. Les *Pseudomonas* sont faciles à multiplier; toutefois, elles ne



forment pas de spores, et de ce fait leur formulation pour la commercialisation pose quelques difficultés.

Un grand avantage des *Bacillus* et des actinomycètes est qu'ils produisent des spores, ce qui facilite leurs formulations. Surtout les spores de *Bacillus* sont extrêmement résistantes. Ces bactéries peuvent, outre produire diverses toxines, également provoquer la lyses des spores de champignons.

7. Interactions entre les microorganismes, les plantes et le milieu

Les interactions entre les microorganismes, les plantes et le milieu sont complexes et réciproques. Nous avons vu que les microorganismes interagissent entre eux. Ces interactions peuvent être influencée par les conditions extérieures (température, humidité, pH, ...) qui peuvent déplacer les équilibres vers l'un ou l'autre des microorganismes. Ceux-ci peuvent cependant également agir sur les conditions extérieures par exemple en influençant le pH du milieu, en modifiant la structure du sol ou en minéralisant la matière organique. On a d'autre part vu que les plantes croissant dans le sol sont bien évidemment influencées aussi bien par le milieu que par les microorganismes.

7.1. Actions des microorganismes sur le milieu

Les microorganismes agissent à divers niveaux sur leur milieu. Nous avons déjà vu les rôles essentiels qu'ils jouent dans les cycles des **éléments nutritifs** et dans la **formation de l'humus**. Ils sont également primordiaux par exemple pour la **biodégradation** des produits étrangers xénobiotiques comme les pesticides. Ainsi, plusieurs matières actives de synthèse pour la protection des plantes pourraient voir leur efficacité pratique compromise par une biodégradation accélérée provoquée par leur utilisation répétée.

L'effet des microorganismes du sol sur la **structure du sol** est également très important. Grâce aux liants qu'ils produisent et aux hyphes des champignons qui agissent comme une sorte de filet, la structure du sol peut être nettement améliorée et stabilisée. Ceci a un effet positif sur l'aération du sol et sur son équilibre hydrique, et d'autre part protège le sol contre l'érosion.

Enfin, ponctuellement, certains microorganismes sont également capable de modifier le **pH** du sol, ce qui influence la solubilité de certains éléments nutritifs.



7.2. Actions du milieu sur les microorganismes

Les microorganismes sont fortement dépendant et ainsi influencés par la régulation des **disponibilités en eau et en oxygène** du sol. De manière générale, l'activité microbienne diminue avec la disponibilité de l'eau, les bactéries y étant plus sensibles que les champignons; toutefois, il existe de fortes variations selon les groupes taxonomiques. La réhumectation d'un sol sec entraîne une rapide reprise de l'activité microbienne qui est pendant quelques temps très intense et se traduit par une forte minéralisation du carbone et de l'azote organique. Cette activité microbiologique accrue est due à la consommation de matériaux qui n'étaient pas disponibles avant la phase de dessiccation. Dans le cas d'une submersion du sol, les équilibres biologiques sont fortement bouleversés. Les champignons régressent et les bactéries prennent le dessus. Si la situation se prolonge, une situation anaérobie apparaît, ce qui provoque, en plus d'une asphyxie des racines et une diminution des microorganismes aérobies, suivies de l'apparition de divers substances toxiques.

Le **pH** du sol a également une influence sur la vie microbienne. En gros, les champignons sont généralement dominants dans les sols acides et les bactéries dans les sols neutres ou alcalins. Cependant, le pH optimal pour les diverses phases de croissance (par exemple germination des spores et croissance mycélienne) d'un organisme peut varier. L'influence du pH est particulièrement importante pour divers agents pathogènes. Ainsi, l'agent pathogène de la gale argentée de la pomme de terre n'est dangereux qu'en sol alcalin, alors que celui de l'hernie du chou ne cause des dégâts importants que dans les sols acides.

Les **argiles**, grâce à leur effet structural, leur effet tampon et leur effet réservoir, jouent un rôle important pour la vie microbienne. Plus leur capacité d'échange est élevée, leur surface développée plus grande et leur aptitude à gonfler en présence de l'eau est importante, plus ce rôle est marqué. Ainsi, l'activité biologique de la montmorillonite est plus importante que celle de la kaolinite. Ils agissent aussi bien sur la quantité des microorganismes et sur leur activité. Les argiles et leur nature jouent un rôle important sur le pouvoir infectieux de divers pathogènes.

La **température** joue également un rôle important sur les équilibres microbiens du sol, tous les microorganismes n'ayant pas les mêmes optimums. On ne peut certes pas influencer la température qui règne dans les champs, mais tenir compte des conditions climatiques lors du choix de microorganismes auxiliaires et de leur application peut augmenter les chances de succès.

La **fertilisation du sol** peut également influencer fortement les équilibres microbiologiques du sol. Suivant les engrais azotés apportés, on peut influencer par exemple le pH de la rhizosphère. Le développement de certains champignons pathogènes du sol peut être inhibé avec une fertilisation



azotée amenée sous forme ammoniacale ou d'urée. Il semble que la fumure phosphatée et potassiques n'influencent pas fortement le développement des maladies même si quelques maladies peuvent être favorisées par un apport élevé de phosphore. Certains microéléments jouent un rôle important dans les interactions entre microorganismes, comme le fer dont nous avons déjà parlé.

Enfin, il ne faut pas oublier les **composés xénobiotiques**, c'est à dire qui n'existent pas à l'état naturels (comme les pesticides), et qui influencent, de manière voulue ou non, les équilibres microbiens dans le sol. Après l'emploi d'un tel produit, on observe tout d'abord un effet dépressif sur l'activité des populations microbiennes, effet négatif qui ensuite disparaît avec le temps. Le temps de rétablissement de l'activité microbienne est une valeur très importante pour juger de l'effet de ces produits.

De nombreux **pesticides** sont employés dans les cultures. Ils sont soit mélangés directement dans le sol ou épandus à sa surface, soit pulvérisés sur le feuillage d'où une partie retombe dans la terre soit immédiatement soit après une pluie. Certains pesticides, surtout ceux de la première génération, ont un spectre d'action très large et ainsi perturbent grandement les populations microbiennes, agissant indépendamment sur les organismes nuisibles ou les organismes utiles. L'emploi intensif de tels pesticides détruit ainsi la capacité des sols à réagir aux atteintes dont ils sont l'objet. Plus un pesticide est sélectif et moins il est persistant, moins il perturbe l'équilibre global de la population microbienne. D'autre part, plus celle-ci est diversifiée, moins elle est perturbée, dans sa globalité, par l'emploi d'un pesticide.

Outre l'action directe des pesticides contre les microorganismes du sol, ils peuvent les influencer également indirectement, par exemple en modifiant les exsudats des plantes.

7.3. Les plantes entre les microorganismes et le milieu

Comme déjà vu plus haut, les plantes ont une action directe sur les microorganismes du sol de part les substances diverses qu'elles apportent dans le sol, principalement au niveau de la **rhizosphère**. Ces substances influencent et sont influencées par le milieu et par les microorganismes du sol.

Tout comme chez l'homme, plus une plante est forte et a des conditions de croissance optimales, et moins elle est sensible aux maladies. Stressée, elle arrive moins à se défendre et est beaucoup plus rapidement attaquée par divers agents pathogènes. Certains champignons et bactéries ne causent des dégâts aux plantes que lorsque celles-ci sont très affaiblies.



Ainsi, créer les conditions les meilleures possibles pour la croissance d'une plante donnée et le choix de variétés particulièrement bien adaptées aux circonstances présentes est la première mesure à prendre pour protéger les plantes contre les maladies.

Les **monocultures**, c'est à dire des champs cultivés années après années avec la même culture, posent des problèmes spéciaux du point de vue phytopathologique. La culture en place emploie le sol de manière unilatérale et lui apportent également une palette relativement réduite de substances comme les exsudats. Ainsi, la diversité biologique du sol s'amenuise, les microorganismes les plus adaptés à l'écosystème de cette plante prenant le dessus, les autres disparaissant avec les années. On obtient ainsi un nouvel équilibre entre plantes sol et microorganismes. De part son manque de diversité, cet équilibre est relativement fragile et peu ou pas tamponné. Les agents pathogènes de la culture donnée peuvent également se développer et, comme la plante-hôte est toujours présente, elle peut y subsister et s'y étendre continuellement. Souvent, l'équilibre entre ces agents pathogènes, les plantes et les antagonistes éventuels devient tel que les dégâts causés par les pathogènes sont nettement en-dessus du seuil de tolérance. Il faut alors prendre des mesures pour les combattre, soit en employant des fongicides, soit en ayant recours à la lutte biologique en essayant d'établir et de maintenir un équilibre microbien avec lequel les dégâts causés par les pathogènes ne dépassent le seuil de tolérance donné.

8. Utiliser les capacités des antagonistes

La seule solution pour augmenter et maintenir à long terme la fertilité du sol est de travailler en accord avec les microorganismes antagonistes. Cette collaboration homme-microorganismes est à deux niveaux. Dans le **premier niveau**, il s'agit de prendre toutes les mesures possibles pour favoriser et stimuler les microorganismes auxiliaires déjà présents dans ce sol. Au **deuxième niveau**, on peut envisager l'emploi direct de microorganismes antagonistes sélectionnés et multipliés par l'homme. Alors que la mise en place du premier niveau n'implique pas forcément l'emploi direct de microorganismes, cette dernière mesure n'a pas de sens si l'on ne prend pas toutes les mesures possible pour avantager les microorganismes du sol, car dans ce cas, les conditions requises pour le succès de la lutte biologique n'étant pas données, même l'emploi des meilleures souches connues d'antagonistes a peu de chances de succès.

8.1. Favoriser et stimuler les antagonistes du sol

De manière générale, créer des conditions générales favorables pour la plante favorise également les antagonistes par rapport aux agents pathogènes. Assurer une bonne aération du sol, et un bon drainage tout en assurant une humidité suffisante de la terre crée certainement des conditions favorables pour les microorganismes auxiliaires. L'amélioration de la structure du sol,



indispensable pour arriver au résultat désiré, peut être obtenue, suivant les cas, avec divers moyens: travail du sol, emploi d'argiles ou de sables, emploi d'amendements organique. L'apport de matière organique dans un sol a très souvent des effets bénéfiques sur l'état racinaire des racines. En particulier le compost de haute qualité possède des capacités souvent insoupçonnées à ce sujet. Non seulement il peut fortement améliorer, grâce à ses complexes argilo-humique stables, la structure du sol. Il a également un fort pouvoir régulateur aussi bien pour l'eau que pour les éléments nutritifs importants, et est surtout très intéressant grâce à son activité microbiologique. En effet, un compost produit selon les règles de l'art contient une population variée de microorganismes antagonistes, et son emploi dans les sol permet de tamponner celui-ci microbiologiquement.

Pour obtenir un équilibre durable de la microflore du sol, il est important, surtout dans un écosystème très simplifié, d'éviter tous stress inutile. Pour cela, il faut employer des méthodes de travail douces. Par exemple, il vaut mieux fertilisé souvent avec des doses faibles plutôt que de vouloir livrer toute la quantité d'azote annuelle nécessaire en une fois au début de la saison! De même, il faut essayer d'assurer le plus possible une humidité suffisante de la terre.

L'emploi de pesticides ne doit être réalisé qu'en ultime recours. Le choix des pesticides est important, et il faut autant que possible choisir des pesticides très spécifiques et vite dégradés.

C'est surtout pendant les périodes critiques, lorsque la plante est faible, qu'il faut être très attentif aux mesures à prendre afin de déplacer le plus possible l'équilibre entre les bons et les méchants microorganismes du côté des auxiliaires.

8.2. Emploi de microorganismes cultivés

La manière la plus simple d'amener une flore antagoniste dans son sol en y incorporant du compost de qualité. Ceci est particulièrement bénéfique et à recommander lorsque le sol que l'on a à traiter est microbiologiquement vide: terre traitée à la chaleur ou avec un fumigeant, substrat tourbeux, sol minéral neuf, etc. On arrive ainsi à tamponner microbiologiquement le sol avec une multitude de microorganismes qui occupent, grâce à leur diversité, les différentes niches écologiques présentes.

Réactiver des sols stérilisés avec les microorganismes du compost

L'emploi de composts après le traitement d'un sol ou d'un substrat à la vapeur apporte d'importants avantages inégalés à ce jour. Grâce à son activité microbiologique, le compost assure une détoxification rapide du sol, le libérant des substances nocives se développant pendant ou juste après le traitement. De plus, il le tamponne microbiologiquement. Ainsi, des agents pathogènes ne peuvent que très difficilement coloniser cette terre. De cette manière, le sol peut être planté ou semé plus rapidement et moins de problèmes de maladies sont à déplorer grâce à un emploi judicieux du compost.



Une fois une population microbiologique de base établie dans un sol, on peut chercher à l'améliorer en y ajoutant de façon ciblée des microorganismes choisis. Ceux-ci, champignons ou bactéries, sont multipliés dans des milieux de cultures appropriés puis donnés au sol, par exemple par arrosage. On peut, de cette manière, donner régulièrement des microorganismes antagonistes et ainsi, surtout dans des cultures très unilatérales, maintenir leurs populations à un niveau suffisamment élevé pour qu'elles empêchent les agents pathogènes de causer trop de dégâts.

8.2.1. Choix des organismes

Divers microorganismes sont actuellement offerts sur le marché. Ils ont été pour la plupart sélectionnés en fonction de buts assez précis et testés contre un ou quelques agents pathogènes. Les méthodes de sélections et de tests sont extrêmement importantes, et il est conseillé à chaque utilisateur de microorganismes de se renseigner auprès des maisons en offrant sur le marché au sujet des méthodes de sélections utilisées. En effet, les résultats obtenus en laboratoire ou dans des conditions contrôlées sont certes intéressants sur le plan de la recherche et des premières étapes de la sélections, mais ils sont absolument insuffisants pour pouvoir prédire l'effet du même microorganisme dans les conditions naturelles. En effet, il est alors soumis à une concurrence très importante et doit se montrer très compétitif. De plus, les conditions environnementales naturelles ne sont en général pas optimale, et ainsi un organisme ayant des exigences relativement précises pour être efficace a peu de chance de succès. C'est pourquoi il est nécessaire, pour pouvoir juger de l'aptitude d'un microorganisme d'être performant dans la pratique, de disposer d'essais en champs réalisés de manière sérieuses (c'est à dire avec plus de trois plantes !).

Un point très important à souligner à ce sujet est que chaque souche de microorganisme est différente de l'autre, et qu'ainsi l'utilisateur ne doit pas choisir d'utiliser un *Pseudomonas*, mais il doit choisir d'utilisé la souche xy123 d'un *Pseudomonas*. Il est certes actuellement encore difficile pour le praticien de choisir ses souches d'antagonistes, car le recul nécessaire qu'offrirait des années d'utilisation des microorganismes manque. Ainsi, il serait utile que des associations de producteur s'organisent et échangent leurs expériences avec telle ou telle souche ou préparation.

Il est conseillé, si l'on veut stabiliser microbiologiquement l'écosystème de son sol avec des microorganismes, d'utiliser plusieurs souches de microorganismes différents. De part les modes d'action différents des divers microorganismes, ils peuvent se compléter et ainsi un effet additif ou synergique peut être observé, et surtout une stabilité de l'effet peut ainsi être atteinte. Il est sensé d'utiliser des microorganismes ayant une action positive relativement large, comme les *Pseudomonas*, avec d'autres microorganismes plus dirigés vers les problèmes spécifiques des cultures à traiter, comme par exemple une souche non-pathogène de *Fusarium* contre une fusariose



vasculaire. D'autre part, il est intelligent de combiner un microorganisme très compétitif dans la rhizosphère comme un *Pseudomonas* avec un autre actif dans le sol non rhizosphérique comme un *Bacillus*.

Il faut, avant de choisir les microorganismes que l'on veut utiliser, se poser clairement la question de ce que l'on veut atteindre comme but (quelle plante, quelles maladies, quelles conditions particulière existent dans le cas précis, ...), et à partir de là planifier une stratégie avec les organismes à disposition.

8.2.2. Multiplication des microorganismes

La multiplication des microorganismes antagoniste est en général relativement facile, ces organismes croissant pour la plupart sur des substrats relativement simples. La fermentation en milieu liquide est bien connue et maîtrisée. La production industrielle en masse de la plupart des auxiliaires biologiques est réalisable avec cette technique. Le point critique de la production d'un inoculum est le conditionnement de la biomasse produite. Le conditionnement poursuit deux but principaux: le stockage des produits et leur application.

Pour pouvoir stocker les organismes, il faut les sécher. En général on les mélange alors à une substance porteuse pour les stabiliser. Un soin particulier doit être pris pour le séchage des organismes. Il ne doit être ni trop rapide, afin de ne pas faire trop baisser la viabilité des particules, ni trop lent pour éviter les contamination. Les divers organismes réagissent différemment à ce traitement. Alors que les microorganismes qui forment des spores de résistances sont relativement facile à traiter, ceux qui ne produisent que des conidies ou pas de spores du tout sont beaucoup plus délicats à conditionnés. Certains ne peuvent être pratiquement stockés qu'à très basses températures ou sous forme lyophilisée, procédés très coûteux et pas toujours possibles à grande échelle. Une méthode qui pourrait avoir un bon avenir pour ces microorganismes délicats est celle d'en stocker seulement des petites quantités utilisées comme inoculum pour une multiplication de masse par l'utilisateur lui-même juste avant l'emploi du produit.

Les bactéries: leur multiplication par le praticien

Tout le monde sait que le moyen le plus simple de faire une culture bactérienne est d'ensemencer un certain volume composé d'un milieu nutritif (souvent à base de glucose) et de laisser les bactéries se multiplier jusqu'au niveau désiré. Les germes peuvent alors être récupérés par filtration ou centrifugation. La concentration bactérienne est alors mesurée à partir de la densité optique qui croît avec le nombre de bactéries. Les actinomycètes ont des structures filamenteuses qui rend inapplicable cette mesure et leur multiplication et utilisation est difficile, car elles peuvent conduire à l'obturation des buses de pulvérisation ou des filtres.



Les microorganismes les plus simples à utiliser sont certainement les bactéries comme les *Pseudomonas*, car elle peuvent sans problème être données avec le système d'irrigation ou par pulvérisation avec un appareil classique. Les actinomycètes et les champignons peuvent poser des problèmes car, de par la production de mycels, ils peuvent suivant les cas boucher les buses d'arrosage, surtout dans des techniques d'arrosage fines comme les systèmes gouttes à gouttes. Une application sous forme sèche avec diverses méthodes d'épandage peut être par contre réalisées avec ces produits. Pour cela, un mode de production très pratique de champignons tels les *Trichoderma* peut être réalisé en inoculant des restes organiques comme des glumes d'avoine stérilisées avec des spores de ces auxiliaires. Ces derniers peuvent très bien se développer sur ce substrat. On peut ensuite stocker un certains temps cette culture et l'utiliser par épandage manuel ou mécanique au moment désiré.

Les bactéries: les cultures mixtes

On peut également en cultures reproduire les phénomènes de compétition ou de collaboration entre souches différentes. Cependant, nous apprenons très vite que:

- *le maintien d'une co-existence stable est précaire voir impossible ; au bout d'un certain temps l'une va dominer et éliminer l'autre.*
- *un changement même mineur (par ex. température du milieu) peut provoquer un renversement des tendances. Dans le cas de bactéries dépendantes l'une de l'autre, l'une utilise certes pour se développer des substances produites par l'autre, mais en même temps perturbe sa multiplication par des toxines. Ceci nous amène à la réflexion bien connue des biologistes concernant l'évolution au cours du temps de populations de prédateurs en fonction de celle de leurs proies.*

Lors de l'emploi de plusieurs antagonistes en parallèle, il est important de multiplier chaque antagoniste séparément, et, le cas échéant, de les mélanger seulement après au moment de l'application. Ceci est particulièrement important pour les cultures liquides de microorganismes. En effet, il est pratiquement impossible de dominer une culture mixte de microorganismes. Ainsi, avec les mêmes populations mixtes de départ, on obtient à l'arrivée des mélanges complètement différents suivant les charges. Un changement même minime des conditions de cultures peuvent faire basculer l'équilibre entre les microorganismes. De plus, de nombreux microorganismes produisent en culture liquide des quantités importantes d'antibiotique pouvant influencer les autres microorganismes croissants dans le même milieu.

8.2.3. Stratégies d'applications

Pour être couronnée de succès, l'utilisation des microorganismes auxiliaires doit être intégrée dans le concept global de la conduite des cultures. Il n'est en effet pas sensé de vouloir lutter



biologiquement contre les agents pathogènes telluriques en continuant par exemple à compacter son sol en employant des engins lourds lorsque le sol est trop humide.

Avant toute chose, la planification de la stratégie d'application des microorganismes utiles doit commencer par la détermination des buts recherchés et des problèmes à combattre: quelles sont les maladies les plus importantes, quand sont mes plantes les plus faibles, etc. Pour réaliser ceci, une bonne connaissance et l'expérience gagnée par une bonne observation de ses cultures sont importantes. Une fois la situation analysée, la deuxième étape est de planifier les mesures pouvant être prises pour améliorer la vigueur des plantes et stimuler les microorganismes antagonistes déjà présent dans ses sols: amélioration de la structure du sol, planification d'une fertilisation «douce», choix de variétés de plantes particulièrement bien adaptées aux conditions climatiques locales, ...

Une fois ces démarches faites, on peut commencer à planifier l'emploi direct de microorganismes. Comme déjà mentionné, l'utilisation de plusieurs microorganismes (entre 3 et 5 ou plus) en parallèle est à conseiller. Un emploi plus intense pendant les périodes critiques (par exemple au début du printemps) est à planifier. Une fois une population de microorganismes établie au début de la saison, seuls des traitement «d'entretien» sont normalement nécessaire. Pour ceux-ci, il faut tenir compte de l'intensité et du stress causé aux cultures (plus une culture est stressée, plus elle est sensible aux maladie, et plus il faut la présenter). Pour planifier le nombre de traitement, il faut également tenir compte des caractéristiques des microorganismes. Les *Pseudomonas* sont par exemple de très bons colonisateurs de la rhyzosphère, et ils peuvent s'y maintenir en grande quantité pendant très longtemps, si aucun choc n'est à déplorer (par exemple un stress hydrique important). Les indications données sur les caractéristiques propre à chaque auxiliaire microbien à ce sujet par le fournisseur des antagonistes sont à observer et, suivant ses propres expériences, les adapter, le cas échéant, pour ses conditions particulières.

Différents modes d'application des microorganismes s'offrent à l'utilisateur, et le choix de l'un ou de l'autre varie selon les conditions de traitement, le but recherché et le microorganisme lui même. Lorsque l'on prépare un nouveau substrat ou par exemple le sol d'une serre, le plus efficace est d'incorporer directement les auxiliaires dans le sol afin de pouvoir bien les répartir dans toute la terre utilisée par les racines. L'apport de microorganismes peut se faire sous forme liquide ou solide. Pour ce traitement de base, l'incorporation de composts de haute qualité, avec son complexe d'organismes bénéfiques, est particulièrement appropriée.

L'apport inondatif ou par arrosage permet un apport homogène de l'antagoniste sur toute la parcelle. Lorsque des systèmes d'arrosage à duses fines ou au goutte à goutte sont utilisés, il faut être particulièrement attentif à éviter l'obstruction des buses à cause du mucilage ou du mycelium des microorganismes. L'avantage de cette technique est sa simplicité d'application, mais nécessite



une quantité de microorganismes relativement importante. Elle est particulièrement adaptée pour le traitement de petites surfaces, par exemple en pépinières, maraîchage, horticulture, ... Une réduction de la quantité de microorganismes nécessaire peut être obtenue en déposant directement l'auxiliaire dans le sillon au moment du semis ou en l'appliquant directement sur les graines par enrobage ou pelliculage.

L'emploi de préparations sèches de microorganismes peut être également utilisé pour un traitement de surface. Il est conseillé, après l'épandage des préparations, de les incorporer légèrement dans le sol, soit mécaniquement, soit par arrosage (ou pluie si on réalise l'épandage des produits juste avant un orage).

9. Conclusions

On ne connaît à l'heure actuelle que quelques bribes de la complexité du sol et de sa vie microbienne qu'il contient. A cause de cette complexité, les recherches dans ce thème sont extrêmement ardues, vu le nombre de paramètres réagissant entre eux. Toutefois, on a quand même déjà fait de grands progrès dans la compréhension de cette problématique ces dernières années, ce qui nous permet de pouvoir maintenant élaborer des stratégies et prendre des mesures actives pour augmenter et garantir de façon durable la fertilité des sols.

Pour pouvoir atteindre le but recherché, il est nécessaire de penser globalement et de considérer ses cultures dans leur entier, en essayant de prévoir quelles conséquences chaque action prise aura sur les autres paramètres. Il est évident que la manière de penser provenant du «tout chimique» était radicalement différente; en effet, on y travaillait plutôt au coup par coup, c'est à dire que l'on essayait de résoudre ponctuellement un problème (par exemple combattre une maladie) sans s'occuper trop des conséquences sur les autres paramètres, cherchant plus tard un autre médicament pour résoudre les nouveaux problèmes apparaissant alors. Il faut toutefois reconnaître que cette manière de penser est en train de changer depuis le développement du concept de la production intégrée.

Il est devenu clair pour chacun qu'une production végétale basée sur les pesticides chimiques n'a pas d'avenir durable, car on se trouve ainsi dans une spirale, la solution de chaque problème en amenant un autre plus important. Cette prise de conscience a stimulé les recherches sur les méthodes de productions plus respectueuses des équilibres biologiques naturels. C'est seulement ainsi que l'on va pouvoir créer des systèmes stables et durables. Ceci est certainement un déficit important, et ceci d'autant plus que la culture est plus intensive. C'est maintenant à nous de relever le déficit. Pas à pas, nous devons nous diriger vers le but recherché. En travaillant ensemble, nous en sommes capables.



10. Données bibliographiques

Le présent script a été préparé principalement sur la base des livres suivants:

- Bruehl, G. W. 1987. Soilborne Plants Pathogens. Macmillan Publishing Compagny, New York, ISBN 0-02-949130-4, 368 pp.
- Corbaz, R. 1990. Principes de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne, ISBN 2-88074-201-3, 286 pp.
- Davet, P. 1996. Vie microbienne du sol et production végétale. Institut national de la Recherche Agronomique, INRA, 75338 Paris Cedex 07, ISBN 2-7380-0648-5, 383 pp.
- Dehaye, A. 1991. Les maladies cryptogamiques des gazons, biologie et contrôle. Editeur AGREF, Centre de Golf d'Ilbarritz, avenue de la Reine Nathalie, F-64210 Bidart, 127 pp.
- Fritsche, W. 1998. Umweltmikrobiologie, Grundlagen und Anwendungen. Gustav Fischer Verlag Jena, D-07745 Jena, ISBN 3-437-35008-0, 252 pp.
- Gisi, U., Schenker, R., Schulin, R., Stadelmann, F.X., & Sticher, H. 1990. Bodenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, ISBN 3-13-747201-6, 304 pp.
- Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. 1998. Le sol vivant. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne, ISBN 2-88074-367-2, 519 pp.
- Mustin, M. 1987. Le compost, gestion de la matière organique. Editions François Dubusc, Paris, ISBN 2-864-72008-6, 954 pp.

biophyt sa



Institut de recherches et de consultations en agronomie et écologie appliquées

Annexe

biophyt sa, la qualité pour assurer l'avenir !

biophyt sa, Dr. J. Fuchs, Schulstrasse 13, CH-5465 Mellikon

☎ 056/250'50'42, natel 079/216'11'35, fax 056/250'50'44

biophyt sa



Institut de recherches et de consultations en agronomie et écologie appliquées

Influence de la qualité biologique des composts sur les plantes et leur santé

Dr. Jacques Fuchs

Biophyt SA

Juin 1996

biophyt sa, la qualité pour assurer l'avenir !

biophyt sa, Dr. J. Fuchs, Schulstrasse 13, CH-5465 Mellikon

☎ 056/250'50'42, natel 079/216'11'35, fax 056/250'50'44



Influence de la qualité biologique des composts sur les plantes et leur santé

Dr. Jacques G. Fuchs, ing. agr. dipl. EPFZ, Biophyt SA *

Sommaire

	page
1. Introduction	A1
2. Qu'est-ce que la qualité d'un compost ?	A1
2.1. Compost: un substrat microbiologiquement actif	A2
2.2. Influence de composts sur la santé des plantes	A2
2.3. Comment peut-on évaluer la qualité des composts ?	A4
2.4. Quels paramètres influencent la qualité des composts ?	A4
2.4.1. Influence du degré de maturité des composts sur son potentiel suppressif	A5
2.4.2. Influence du stockage sur le pouvoir suppressif des composts	A7
2.5. Comment produire des composts de haute valeur biologique ?	A8
3. Avantages de l'utilisation de composts de qualité	A9
3.1. Emploi de composts dans les substrats de culture	A9
3.2. Influence positive de composts de qualité dans les champs	A10
4. Conclusions	A12
4.1. Vision: le compost au 21ème siècle	A13

biophyt sa, la qualité pour assurer l'avenir !

biophyt sa, Dr. J. Fuchs, Schulstrasse 13, CH-5465 Mellikon

☎ 056/250'50'42, natel 079/216'11'35, fax 056/250'50'44, e-mail: biophyt@pop.agri.ch



1. Introduction

Le compost est un produit qui gagne toujours plus en importance de nos jours. Les raisons de ce fait sont d'une part la gestion actuelle des déchets qui recherche des moyens sensés pour recycler les matières ou pour les éliminer à bon marché, et d'autre part les producteurs de cultures végétales qui sont toujours plus conscients des avantages que peut apporter l'emploi de composts de qualité pour leurs cultures. Nous avons ainsi deux fronts qui se rencontrent: les **“industriels des déchets”**, qui veulent par le compostage éliminer le meilleur marché possible les déchets verts, et les **producteurs de plantes**, qui veulent améliorer et assurer à long terme la fertilité de leurs sols grâce à du compost de qualité. Il n'est pas difficile de comprendre que ces deux groupes d'intérêt n'aient pas les mêmes exigences concernant la qualité du produit fini. Toutefois, afin d'une part d'assurer à long terme la fertilité des sols et d'autre part de garantir les débouchés pour le compost, il devient de plus en plus urgent que ces deux fronts s'assoient à une même table afin de réciproquement mieux comprendre leurs besoins et leurs possibilités.

Il est pour cela extrêmement important que toutes les parties en présence connaissent bien les caractéristiques du compost, comprennent sa complexité et reconnaissent ses possibilités. Dans ce but, **BIOPHYT SA** conduit depuis plusieurs années des travaux de recherches et de développement dans le domaine de la qualité des composts. Bien des connaissances ont pu déjà être obtenues grâce à ces travaux scientifiques. Dans cette brochure, quelques-uns des plus importants résultats vont être présentés et expliqués. Il est clair que le but recherché n'est pas encore atteint avec les résultats présentés ici. De nombreux travaux sont encore nécessaires afin de mieux comprendre et de mieux maîtriser la complexité du compostage. Nous y travaillons ! Les faits présentés ici donnent toutefois une bonne idée sur les possibilités et les limites de l'emploi de composts.

2. Qu'est-ce que la qualité d'un compost ?

Les **exigences de qualité légales** pour les composts sont connues de tous. Celles-ci ne contiennent pratiquement que des exigences du point de vue physique ou chimique. Les paramètres biologiques ne sont que faiblement mentionnés, et ne livrent à l'utilisateur aucun renseignement utilisable sur la qualité biologique des composts. Ces critères de qualités “officiels” peuvent être appelés paramètres négatifs, c'est à dire des paramètres caractérisant ce que le compost ne doit pas contenir ou ne doit pas être. Il est incontestable que ces exigences minimales exigées sont importantes et doivent être respectées afin que l'emploi de compost ne cause pas de dégâts grave à l'environnement. Elles sont toutefois **insuffisantes pour l'utilisateur professionnel de compost**. Pour lui, les paramètres biologiques sont beaucoup plus importants: **phytotoxicité, absence d'agents pathogènes, qualité microbiologique, activité biologique du compost et son effet sur la croissance des plantes et sur leur santé**. Ces paramètres ne sont toutefois malheureusement pas considérés ou connus par de nombreux producteurs de composts.



2.1. Compost: un substrat microbiologiquement actif

D'innombrables microorganismes vivent dans le compost. Ils en influencent la qualité et peuvent agir aussi bien positivement que négativement sur la santé des plantes. Le compostage est un procédé dynamique; on y observe un changement continu de la composition de sa flore microbienne. Deux points sont à ce sujet particulièrement importants pour la qualité du compost: premièrement la destruction de tout germe pathogène, et deuxièmement l'établissement d'une microflore active et bénéfique pour la santé des plantes.

Les agents pathogènes et les mauvaises herbes peuvent être éliminés grâce aux processus physiques, chimiques et biologiques se déroulant pendant le compostage. La composition de la substance organique, la température de compostage, le taux d'oxygène et la technique de travail y jouent un rôle important.

Moins connu par la majorité des gens est **la capacité qu'un compost de qualité peut avoir de protéger les plantes contre diverses maladies telluriques** (= liées au sol). Cet effet phytosanitaire est dû à la présence de microorganismes antagonistes dans ce compost.

2.2. Influence de composts sur la santé des plantes

Un compost peut agir **indirectement** et **directement** sur la santé des plantes. Son action indirecte est due à son influence sur la structure du sol et sur son apport équilibré d'aliments nutritifs, en particulier les micro-éléments. Toutefois, l'action directe du compost sur la santé des plantes, due à sa microflore bénéfique, est la plus importante.

Des analyses ont montré que **chaque compost n'est pas exempt d'agents pathogènes et/ou peut protéger les plantes contre les maladies**. La figure 2.1 montre l'effet protecteur de trois différents composts. Dans ce biotest, l'agent pathogène de la fonte des semis, *Pythium ultimum*, a été mélangé à la terre; la capacité des composts à protéger des plantes de concombre contre cette maladie a alors été testée. Il est clairement visible que les trois composts testés n'ont pas la même capacité à protéger les plantes contre les maladies: **il y a compost et compost**.

Cette capacité à protéger les plantes contre les maladies est due à des **micro-organismes utiles** qui sont présents en grande quantité dans les composts de haute qualité. Ceci est mis en évidence dans la figure 2.2.

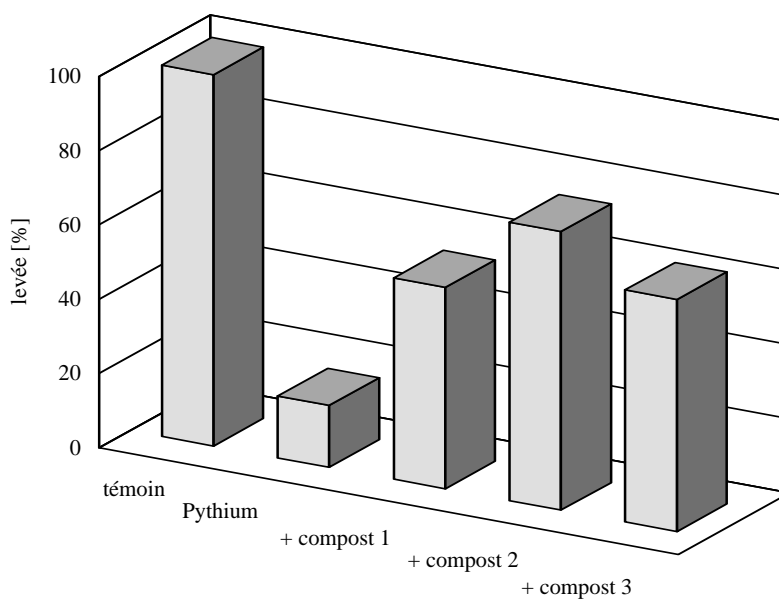
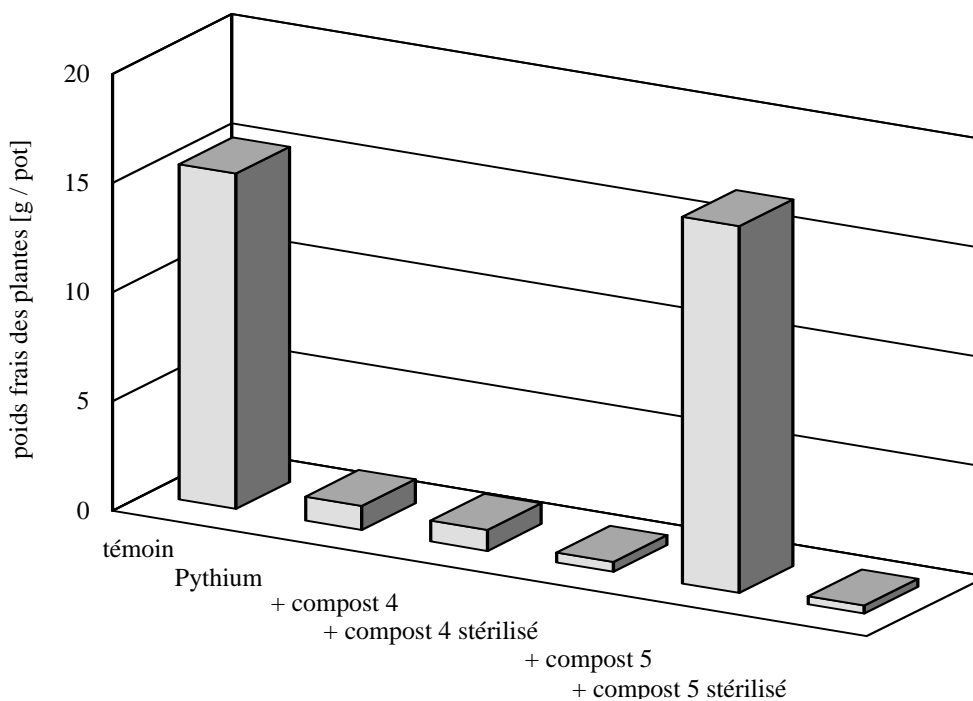


Figure 2.1. Capacité de trois composts à protéger des plantes de concombre contre la maladie de la fonte des semis, agent pathogène *Pythium ultimum*. La terre d'essai a été amendée avec 10% de compost avant l'adjonction de l'agent pathogène.



Figur 2.2. Capacité de deux composts, traités ou non à la chaleur, à protéger du cresson contre la maladie de fonte des semis causée par *Pythium ultimum*. La terre d'essai a été amendée avec 20% de compost avant l'adjonction du pathogène.



Le compost 4 ne protège pas le cresson contre la fonte des semis. Il provoque même des lésions et des nécroses sur les racines. Le compost 5 protège par contre pratiquement complètement les plantes contre la maladie. Toutefois, si le compost 5 est traité à la chaleur, c'est à dire après destruction de sa flore microbienne, cet effet de protection disparaît complètement. Le compost stérilisé augmente même le développement de la maladie. Ce biotest met en évidence deux points importants. (1): la capacité d'un compost de qualité à protéger les plantes est due à son activité microbiologique. Le traitement du compost à la chaleur détruit sa microflore utile et ainsi son effet protecteur. (2): l'emploi de compost stérilisé est dangereux, car des agents pathogènes peuvent facilement s'y développer et s'y multiplier.

2.3. Comment peut-on évaluer la qualité des composts ?

Les analyses chimiques et physiques, exigées par la loi, livrent des renseignements sur la composition chimique des composts (salinité, pH, teneur en métaux lourds, teneur totale en éléments nutritifs, ...). Ces données sont importantes aussi bien pour l'environnement que pour l'utilisateur, mais ne suffisent de loin pas. Il manque, pour l'utilisateur, des données sur la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes et surtout sur la qualité biologique des composts.

La qualité biologique des composts ne peut actuellement être jugée valablement qu'avec des biotests: tests de phytotoxicité, tests de suppressivité (= test de la capacité des composts à protéger les plantes contre les maladies), ... Des mesures comme la teneur ATP ou la production de CO₂ donnent également des renseignements sur l'activité microbiologique globale des composts, mais ne disent pas si cette activité est positive ou négative. Car les agents pathogènes respirent aussi !

Au sujet des biotests, il est important de réaliser des tests appropriés et non de faire simplement un test comme alibi ! Par exemple, il arrive souvent que seulement le test simple du cresson soit réalisé, et que sur cette base la qualité du compost est déterminée. Or, le cresson est très peu sensible à la qualité des composts, et il n'est influencé dans sa croissance que si le compost est d'extrême mauvaise qualité. Il n'est donc pas possible de juger la qualité biologique des composts sur la base de ce seul biotest !

BIOPHYT SA a développé divers biotests afin de déterminer les divers paramètres de la qualité biologique des composts (tests de phytotoxicité, tests de suppressivité, tests de réceptivité). Ces tests sont également appropriés pour définir des composts pour des utilisations spéciales (par exemple pour la production de substrats).

2.4. Quels paramètres influencent la qualité des composts ?

Les facteurs influençant la qualité biologique des composts se trouvent dans tout le procédé du compostage. Le **concept de la récolte des déchets organiques influence déjà la qualité**, car le matériel brut à composter dépend directement de ce concept. La **composition du matériel brut**, le **système de compostage** et surtout la **conduite de l'installation** jouent également des rôles



déterminants. Enfin, il ne faut surtout pas oublier le **stockage du produit fini**. Ce dernier point est beaucoup trop souvent négligé.

Deux points (le degré de maturité du compost et le stockage du produit fini) vont ici être, comme illustration, traités plus en détail.

2.4.1. Influence du degré de maturité des composts sur son potentiel suppressif

L'influence du degré de maturité des composts sur leur potentiel suppressif a été étudiée dans un système de compostage en tas et dans un système en box.

Au début de la décomposition, l'activité microbiologique dans le tas est très intense. Ceci se traduit par une bonne protection des plantes contre les maladies (figure 2.3). Ce potentiel suppressif est visible aussi bien dans de la terre naturelle que dans de la terre stérilisée. Pendant cette phase, la décomposition des matières organiques se trouve en pleine action, ce qui est lié à une population très haute de micro-organismes. Cette quantité énorme de micro-organismes est très vraisemblablement responsable pour la capacité de ce jeune compost à protéger les plantes. Dans les semaines qui suivent, cette propriété positive disparaît tout d'abord, puis réapparaît lorsque le compost se trouve dans un état de maturité avancé (figure 2.3). Il semble donc que, après la phase de décomposition intensive, l'on ait dans le compost d'abord un "trou" microbiologique. Pendant cette période, le compost ne protège plus efficacement les plantes.

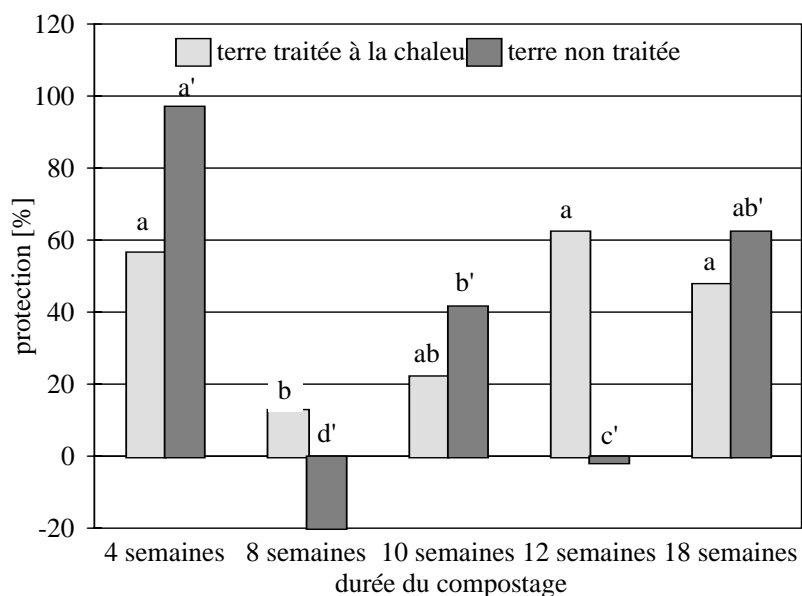


Figure 2.3. Influence de la **durée du compostage** dans un **système en tas** sur le potentiel d'un compost à protéger des plantes de concombre contre la maladie de la fonte des semis, agent pathogène *Pythium ultimum*. L'essai a été réalisé dans de la terre des champs non traitée ou traitée à la chaleur, avec un amendement de 20% de compost. Chaque valeur correspond à la moyenne des analyses de six tas de compost différents. Les colonnes avec la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le *t*-test de Student ($P=0,05$).



Lors de la phase de maturation, une autre population micro-biologique se développe. Cette population n'a plus un caractère quantitatif mais qualitatif. En effet, le nombre total de micro-organismes est alors au moins 100 fois inférieur à celui lors de la phase de décomposition intense (données non montrées). Ainsi, à la fin de la maturation, un compost stable et montrant un bon pouvoir suppressif se développe. Le fait que les micro-organismes présents dans ce compost sont responsables pour cette suppressivité a déjà été montré dans des essais précédents (figure 2.2). En effet, en traitant le compost à 80°C, et en détruisant ainsi une grande partie de sa microflore, l'on anéantit également la capacité du compost à protéger les plantes contre les maladies.

Le même phénomène est observable dans le système de compostage en box. Une augmentation nette du potentiel suppressif lors de la maturation est visible (figure 2.4).

Le fait qu'un pouvoir suppressif stable est atteint avec un degré de maturation élevé a une signification importante pour la pratique. En raison du sous-dimensionnement de nombreuses places, les composts sont souvent utilisés après seulement peu de semaines de compostage. Ceci conduit à l'emploi d'un compost de moindre qualité. A ce sujet, l'on parlait jusqu'ici seulement de la problématique de l'azote disponible. Nous montrons en plus que la qualité du compost est fortement réduite, suite à un manque de maturité, également du point de vue microbiologique. Ceci laisse particulièrement songeur, car ce sont ces caractéristiques biologiques positives qui peuvent contribuer à l'amélioration et au maintien à long terme de la fertilité des sols.

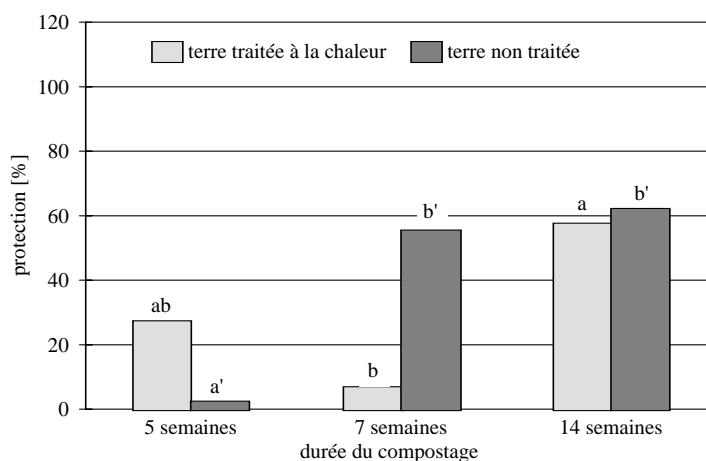


Figure 2.4. Influence de la **durée du compostage** dans un **système en box** sur le potentiel d'un compost à protéger des plantes de concombre contre la maladie de la fonte des semis, agent pathogène *Pythium ultimum*. L'essai a été réalisé dans de la terre des champs non traitée ou traitée à la chaleur, avec un amendement de 20% de compost. Chaque valeur correspond à la moyenne des analyses de cinq boxes différents. Les colonnes avec la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le *t*-test de Student ($P=0,05$).



2.4.2. Influence du stockage sur le pouvoir suppressif des composts

Un stockage approprié des composts est très important du point de vue de leur qualité. Même un compost de très bonne qualité peut perdre rapidement ses bonnes propriétés s'il est mal stocké. Divers changements chimiques peuvent être observés. Par exemple on peut observer, si l'apport d'oxygène est insuffisant, une augmentation importante du taux de nitrite dans un court laps de temps (données non montrées). Il est de ce fait très important de se demander si la qualité du stockage peut également influencer l'activité biologique du compost.

Le potentiel de suppressivité du compost diminue radicalement si le tas de stockage du compost n'est pas aéré (figure 2.5). Or, beaucoup de places de compostages stockent le compost en faisant des immenses tas non aérés. Ces places pourraient, moyennant une investissement modeste, agir contre une perte rapide et importante de la qualité du compost pendant le stockage.

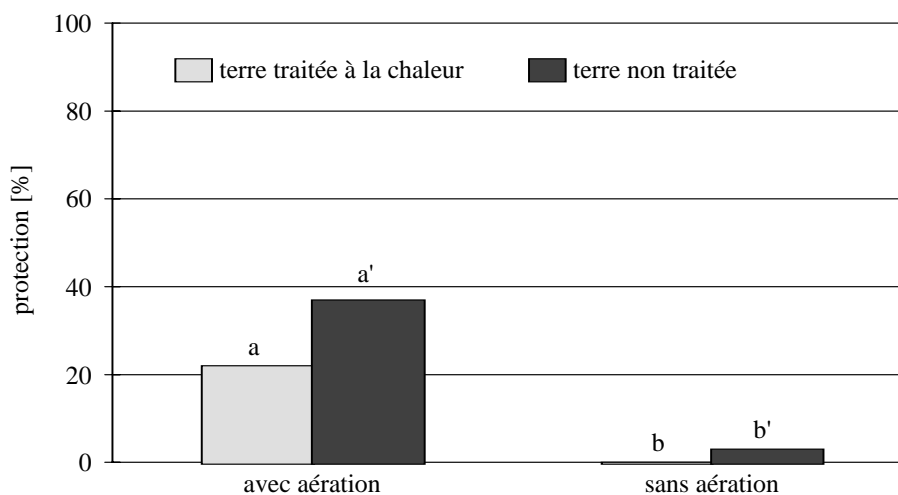


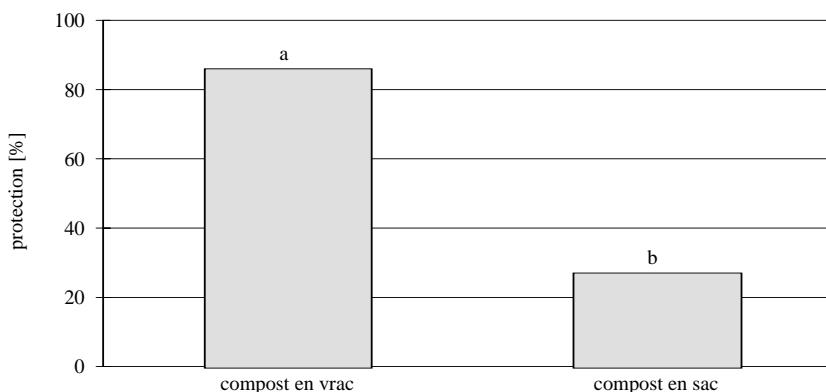
Figure 2.5. Influence de l'aération du compost pendant le stockage sur sa capacité à protéger des plantes de concombre contre la maladie de la fonte des semis, agent pathogène *Pythium ultimum*. L'essai a été réalisé dans de la terre des champs non traitée ou traitée à la chaleur, avec un amendement de 20% de compost. Chaque valeur correspond à la moyenne de six pots avec quatre plantes de concombre chacune. Les colonnes avec la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le *t*-test de Student ($P=0,05$).

Une autre pratique douteuse et relativement souvent observée est celle d'emballer le compost dans des sacs en plastique afin de faciliter le transport et les acheminer vers les points de vente. L'apport d'air dans ces sacs, souvent empilés sur des palettes, n'est naturellement pas garanti! Même quelques trous "d'aération" dans les sacs sont totalement insuffisants pour permettre un échange d'air acceptable. Les conséquences négatives de cet emballage sont également visibles concernant le potentiel suppressif de ces composts (figure 2.6).

Une détérioration de la qualité du compost à cause d'un stockage inadéquat est logique. Les composts sont microbiologiquement actifs: les micro-organismes présents ont besoin d'oxygène. Si



l'oxygène vient à manquer, les micro-organismes aérobies souhaités sont supplantés par des anaérobies. Sur ce point, les composts se distinguent fondamentalement des autres substrats comme la tourbe ou la liane de bois. Ces derniers sont pratiquement stériles, c'est à dire libres de tous micro-organismes, et n'ont ainsi pas besoin d'oxygène.



Figur 2.6. Influence de l'ensachage du compost sur sa capacité à protéger des plantes de concombre contre la maladie de la fonte des semis, agent pathogène *Pythium ultimum*. L'essai a été réalisé dans de la terre des champs traitée à la chaleur, avec un amendement de 20% de compost. Chaque valeur correspond à la moyenne de six pots avec quatre plantes de concombre chacune. Les colonnes avec la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le *t*-test de Student ($P=0,05$).

Il faut encore remarquer que la détérioration nette de la qualité du compost pendant un stockage non approprié ne concerne pas seulement le pouvoir suppressif du compost, mais également sa phytotoxicité.

2.5. Comment produire des composts de haute valeur biologique ?

Il n'existe toutefois pas de recettes universelles pour produire un compost de haute qualité. Il y a bien des principes de base à respecter, mais, comme chaque place de compostage possède ses propres caractéristiques (système de compostage, matériel à composter, conduite du procédé, ...), chaque situation doit être analysée individuellement et des **mesures d'optimisation spécifiques** doivent être élaborées.

Il est possible de produire du compost de qualité avec de nombreux systèmes de compostage. Mais avec tous les systèmes, il est aussi possible de produire un produit de qualité moindre qui ne mérite de loin pas le nom "compost". Pour cette raison, il est de première importance d'optimiser chaque place de compostage de manière à atteindre la qualité souhaitée pour le produit fini. Pour cela, de bonnes connaissances, beaucoup d'expérience et du doigté sont nécessaires.

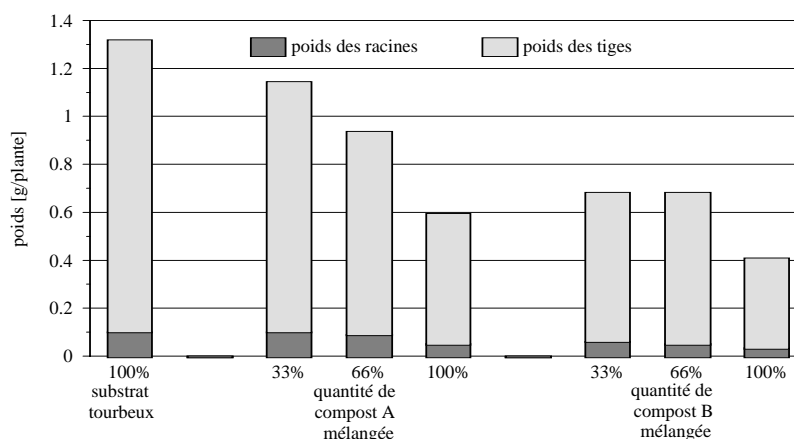


3. Avantages de l'utilisation de composts de qualité

Comme déjà mentionné, l'emploi de compost de qualité apporte à l'utilisateur de nombreux avantages. Il n'économise non seulement de l'engrais, mais produit des plantes plus robustes et plus saines. Ces aspects positifs de l'emploi de composts de qualité dans la pratique vont être illustrés à l'aide de deux exemples d'utilisation de compost dans des domaines différents.

3.1. Emploi de composts dans les substrats de culture

Seuls des composts de haute qualité biologique peuvent être pris en considération pour un emploi dans la production de jeunes plants. Le taux de salinité dans le compost est certainement un facteur limitant, car de nombreuses plantes y sont très sensibles. Il n'est toutefois pas possible de prédire, en se basant seulement sur les caractéristiques chimiques, si le compost se prête à la production de planton. Le recours aux biotests est indispensable. Divers tests de phytotoxicité ainsi que des tests de suppressivité livrent de bons résultats. Suivant la qualité du compost employé, la quantité que l'on peut mélanger aux substrats commerciaux peut varier fortement (figure 3.1).



Figur 3.1. Aptitude de deux composts à être utilisé comme composante de terreau de semis pour la production, en procédé de mottes pressées, de jeunes plants de salade.

Il est clair que l'emploi de compost permet une **réduction de l'emploi de tourbe** et un **recyclage sensé de la biomasse**. Toutefois, les substrats avec un taux de compost important sont **plus difficiles à maîtriser que les substrats tourbeux conventionnels**, et ceci surtout dans le système des mottes pressées. La quantité d'eau dans le mélange de substrat et la force de pressage doivent être réglées précisément, afin que les mottes tiennent bien ensemble mais ne soient pas trop dures. De plus, il faut être très attentif à l'alimentation azotée des plantes. Ces problèmes sont toutefois largement compensés par le **tamponnage microbiologique** que le compost amène au substrat. Les substrats tourbeux sont microbiologiquement inactifs et de ce fait sont très sensibles aux agents pathogènes. Ceux-ci peuvent causer des pertes énormes tant chez le producteur de jeunes plants que chez le maraîcher. En culture conventionnelle, l'emploi de produits chimiques



contre ces maladies est répandu. Ceci n'est toutefois pas possible en culture biologique. Or, il a été possible de montrer clairement qu'un compost de qualité peut empêcher les agents pathogènes de coloniser le substrat, et ainsi permettre la production de jeunes plants robustes et sains (figure 3.2).

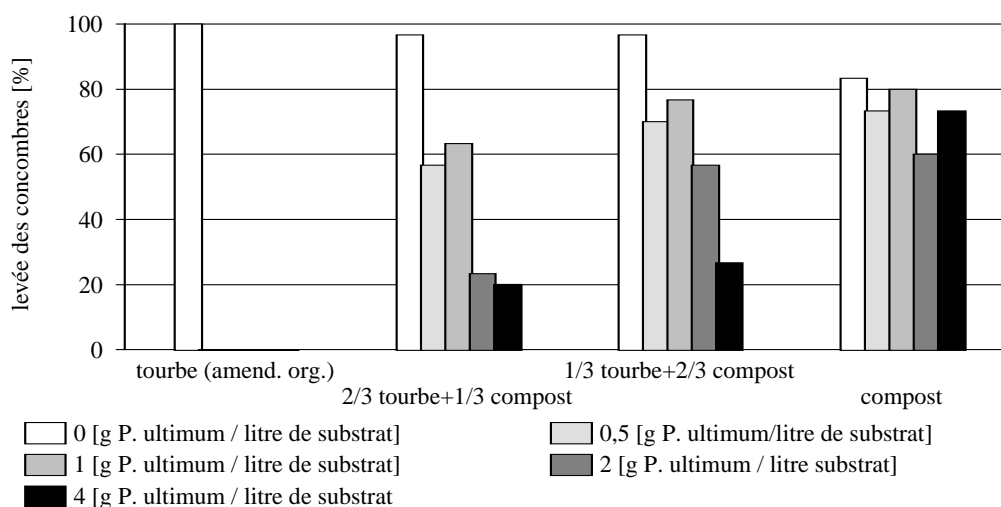


Figure 3.2. Influence de compost sur la levée de plantes de concombre dans des terreaux de semis en présence d'une pression croissant de la maladie de la fonte des semis, agent pathogène *Pythium ultimum*.

Donc, en plus des économies de tourbes, le compost offre la possibilité de tamponner microbiologiquement le substrat, de manière que moins de problèmes de maladies apparaissent dans les cultures de jeunes plants, permettant ainsi une économie de produits chimiques. Ainsi, un compost de qualité est une aide précieuse pour le producteur de plantons et devrait dans le futur prendre un rôle prépondérant dans la production de plants biologiques.

3.2. Influence positive de composts de qualité dans les champs

BIOPHYT SA a développé pour ces travaux des tests de réceptivité. Des quantités croissantes d'agents pathogènes sont données dans des échantillons de sol; ainsi une série avec une pression de maladie croissante est produite. Le développement des maladies est alors observé dans les diverses terres. Trois champs, dont une moitié reçoit chaque année du compost depuis 1989, ont été étudiés (étude réalisée en collaboration avec CompostDiffusion, VD).

Le champ de Saint-Sulpice (VD) appartient à un domaine travaillé en mode conventionnel. Afin d'obtenir, dans la terre provenant de la moitié de champ amendée avec du compost, le même développement de pourriture des racines de salade que dans la terre n'ayant jamais reçu de compost, une quantité environ deux fois supérieure de l'agent pathogène, *Rhizoctonia solani*, a du être mélangée à la terre (figure 3.3).

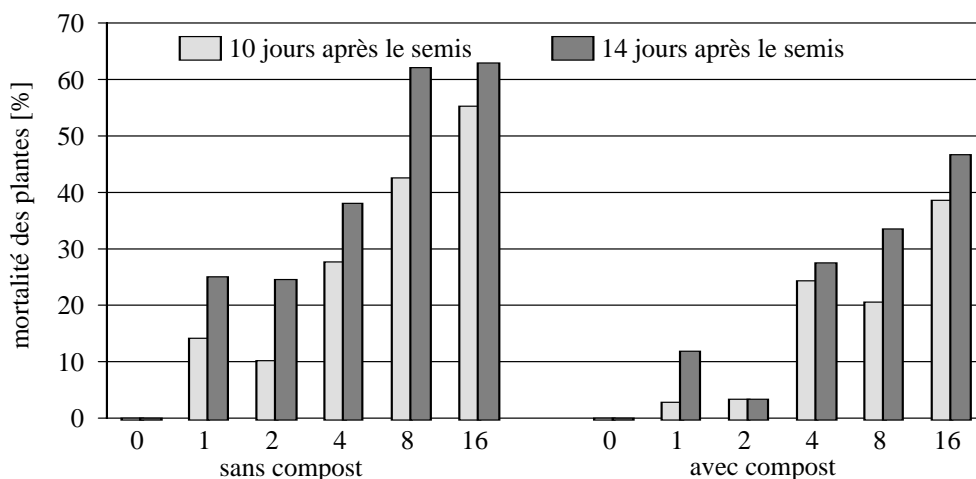


Figure 3.3. Influence d'un amendement annuel en compost sur la mortalité de plantes de salade due à une quantité croissante de *Rhizoctonia solani*, agent pathogène de la pourriture des racines. 0, 1, 2, 4, 8, 16: unités de *R. solani* par litre de terre. Cet essai a été réalisé dans le cadre d'une étude mandatée par CompostDiffusion (Lausanne-VD).

Le deuxième couple de terre étudié, avec et sans amendement de compost, provient d'un champ de Fehraltorf (ZH) appartenant à une entreprise maraîchère. Dans ce cas, environ quatre fois plus de *Pythium ultimum* a dû être donné à la terre amendée pour obtenir le même développement de la maladie de fonte des semis que dans la terre n'ayant jamais reçu de compost (figure 3.4).

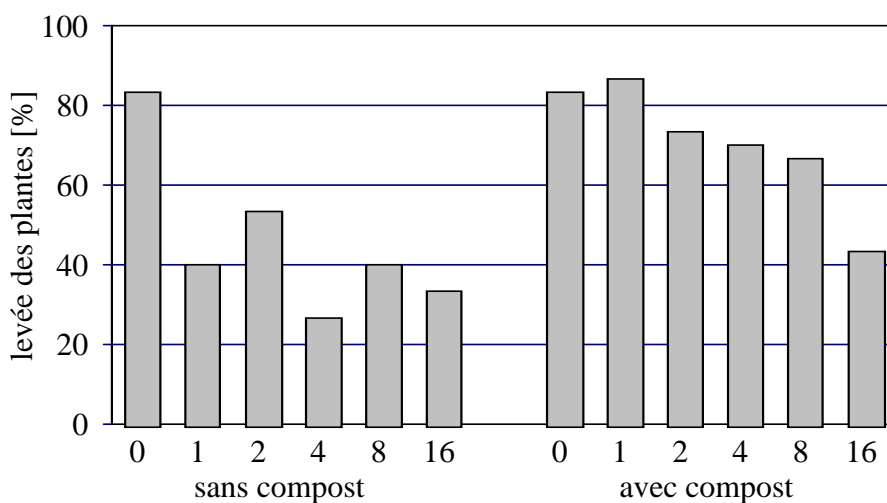


Figure 3.4. Influence d'un amendement annuel en compost sur la levée de plantes de concombre en présence d'une quantité croissante de *Pythium ultimum*, agent pathogène de la fonte des semis. 0, 1, 2, 4, 8, 16: unités de *P. ultimum* par litre de terre. Cet essai a été réalisé dans le cadre d'une étude mandatée par l'entreprise de maraîchage Gerber (Fehraltorf-ZH).

Moins évidente a été la différence de développement de piétin-échaudage dans un champ de Saint-Oyens (figure 3.5). La cause de cette moindre différence est probablement due au fait que ce champ est travaillé depuis des années en mode biologique. Ainsi, il possède déjà un équilibre microbiologique développé, et de ce fait le compost n'apporte qu'une faible amélioration de celui-ci.

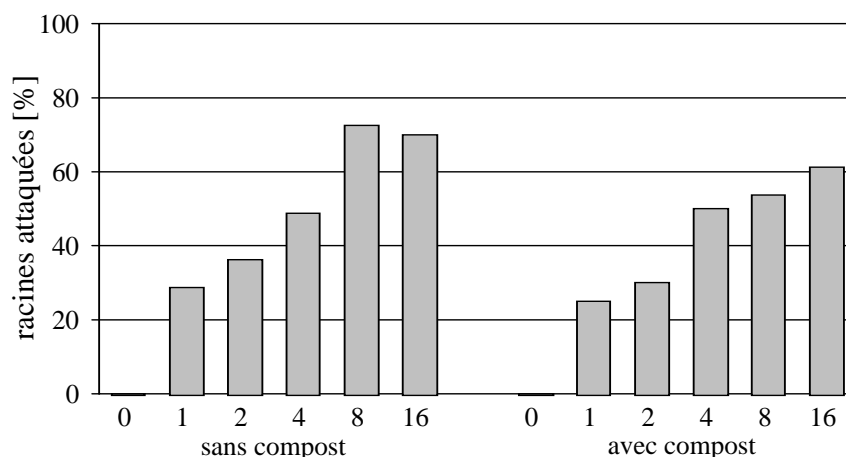


Figure 3.5. Influence d'un amendement annuel en compost sur le développement du piétin-échaudage dû à une quantité croissante de son agent pathogène, *Gäumannomyces graminis*. 0, 1, 2, 4, 8, 16: unités de *G. graminis* par litre de terre. Cet essai a été réalisé dans le cadre d'une étude mandatée par CompostDiffusion (Lausanne-VD).

Les résultats présentés montrent clairement qu'un compost de qualité n'est pas seulement un engrais, mais également un substrat microbiologiquement actif qui favorise la fertilité du sol et la santé des plantes. Grâce à son utilisation, le producteur de plantes dispose d'un moyen pour augmenter et assurer à long terme la fertilité de ses sols, ce qui est de plus en plus important, surtout dans les sols utilisés de manière intensive et de ce fait déséquilibré microbiologiquement.

4. Conclusions

Les interactions qui influencent l'activité microbiologique des composts sont complexe et pas encore complètement comprises. Divers projets sont actuellement en cours afin de pouvoir mieux comprendre et maîtriser le procédé du compostage.

Il est toutefois déjà maintenant évident que la qualité microbiologique des composts et leur activité prennent une signification importante pour l'utilisateur professionnel de compost. Il ne peut cependant pas l'influencer. Il doit ainsi exiger du producteur de compost un produit qui, en plus des exigences minimales officielles: **ne cause aucun dommage aux plantes (libre d'agents pathogènes), fortifie les plantes, favorise la santé des plantes, augmente et assure à long terme la fertilité des sols grâce à son activité microbiologique.** Grâce aux connaissances actuelles, il est déjà possible actuellement de produire des composts remplissant, dans un cadre raisonnable, ces exigences. Les caractéristiques microbiologiques peuvent varier considérablement d'un compost à l'autre. Ainsi, en plus des analyses habituelles, l'activité microbiologique des composts devraient également être analysée régulièrement. Les analyses livrant actuellement les résultats les plus probants sont des biotests avec des plantes: ce sont les seuls qui livrent des résultats clairement interprétables et utilisables.



4.1. Vision: le compost au 21ème siècle

Des composts de qualité favorisent la santé des plantes, augmentent et assurent la fertilité des sols. Afin d'obtenir de tels composts, il ne suffit pas de laisser pourrir la matière organique. Un compostage dans les règles de l'art exige plus de travail et de professionnalité, mais apporte beaucoup d'avantages pour l'utilisateur dans les domaines de la production végétale et de la protection des cultures.

Cet aspect de la qualité biologique des composts est si important pour l'utilisateur qu'il va de plus en plus exiger du producteur de compost une caractérisation du produit fini à ce sujet. Un **label** pour les composts de haute qualité biologique, contrôlés régulièrement, va très probablement être élaboré. Ainsi, **ces composts de qualité vont pouvoir se démarquer des "composts" de moindre qualité.** L'utilisateur de compost pourra alors choisir librement s'il veut acheter du compost de qualité et ainsi améliorer et assurer à long terme la fertilité de ses sols, ou s'il veut éliminer gratuitement les déchets de la société en acceptant des "composts-déchets" avec le risque de dommager, à moyen ou long terme, ses sols.

A long terme, l'intérêt de tous (politiciens, gestionnaires des déchets, producteurs de composts et utilisateurs) est de produire de composts de qualité. C'est la seule voie pour d'une part **assurer à long terme la fertilité des sols** et d'autre part **assurer les débouchés pour le compost.** Pour ces raisons, **les composts de qualité devraient jouer au 21ème siècle un rôle central dans la production végétale intégrée et biologique.**

La production de composts de moindre qualité est certes moins chère, mais comporte plus de risques. Si une fois des problèmes surgissent avec un tel compost, tous les composts, même ceux produits selon les règles de l'art, vont en ressentir les conséquences. Nous aurons alors une situation semblable à celle que nous avons connue il y a quelques années avec les boues d'épuration. Or il est extrêmement difficile de ressortir d'une telle situation et de regagner la confiance des gens. C'est pourquoi il est indispensable que les producteurs de composts de qualité se démarquent le plus vite possible, avec un label et des contrôles sérieux de leurs produits, des "composts" bon marché. Ceci va leur permettre de gagner une réputation exemplaire et durable auprès des utilisateurs de compost.

Tous les essais présentés dans cette brochure ont été réalisés par BIOPHYT SA.

* **Biophyt SA** est une jeune société spécialisée en pathologie végétale, en microbiologie et en agronomie. Elle est entre autres très active dans le développement et la réalisation de biotests et dans le domaine de la qualité microbiologique des composts. A côté de ses travaux de développement et de recherches, Biophyt SA conseille des entreprises publiques et privées, en particulier pour l'élaboration de concepts pour les déchets organiques et pour la planification et l'exploitation d'installations de compostage.

Adresse de contact:

BIOPHYT SA, Dr. Jacques G. Fuchs, Schulstr. 13, CH-5465 Mellikon
☎ 056/250'50'42, natel 079/216'11'35, fax 056/250'50'43, e-mail: jacques.fuchs@biophyt.ch