



Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques

Thèse présentée à la Faculté des Sciences
de l'Université de Neuchâtel
Institut de Botanique (Laboratoire sol et végétation)

Pour l'obtention du titre de Docteur ès Sciences

par **Mohamed Larbi**

Acceptée sur proposition du jury:

Prof. Dr. *Jean-Michel Gobat*

Université de Neuchâtel (Laboratoire sol et végétation), Directeur de thèse

Dr. *Jacques G. Fuchs*

Institut de Recherches pour l'Agriculture Biologique, FiBL, CH-Frick
Co-directeur de thèse

Prof. Dr. *Geneviève Défago*

Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich, ETHZ, Rapporteur

Dr. *Brigitte Mauch-Mani*

Université de Neuchâtel, Rapporteur

Prof. Dr. *Bouziid Nasraoui*

Ecole Supérieure d'Agriculture du Kef, Tunisie, Rapporteur

Soutenue devant le jury le 29 mars 2006

IMPRIMATUR POUR LA THESE

Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques

Mohamed LARBI

UNIVERSITE DE NEUCHATEL

FACULTE DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel,
sur le rapport des membres du jury

Mmes B. Mauch-Mani, G. Defago (ETH Zürich),
MM. J.-M. Gobat (directeur de thèse),
J. Fuchs (FiBI, Frick AG) et B. Nasraoui (Kef, Tunisie)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 22 juin 2006

Le doyen :

J.-P. Derendinger

A l'âme de mon père

Dors en paix ton souhait s'est accompli

A ma mère source d'amour éternel

A mon épouse Najah

SOMMAIRE

Résumé	1
Abstract	3
Zusammenfassung	5
1. Introduction générale	7
2. Etude bibliographique	9
2.1. Importance écologique des déchets organiques et du compost	9
2.2. Influence des sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du sol	11
2.2.1. Effets sur les paramètres physiques	11
2.2.2. Effets sur les paramètres chimiques	12
2.2.3. Effets sur les paramètres biologiques	16
2.3. Les paramètres de caractérisation des composts	17
2.3.1. Caractéristiques physiques	17
2.3.2. Caractéristiques chimiques	17
2.3.3. Caractéristiques biologiques	20
2.4. Influence des acides humiques sur la croissance des plantes	21
2.5. Influence de l'utilisation de composts sur la santé des plantes	22
2.5.1. Influence du compost sur les maladies telluriques	23
2.5.2. Facteurs influençant les caractéristiques suppressives des composts	28
2.5.3. Effets à long terme et applications pratiques	30
2.6. Influence des extraits de composts sur les maladies foliaires	32
2.6.1. Principes généraux	32
2.6.2. Choix des composts	32
2.6.3. Mécanismes d'action des extraits de composts	33
2.6.4. Résultats des essais en plein champ	34
2.6.5. Accroissement de l'efficacité de l'extrait	35
2.7. Compost et induction de résistance	37
3. Objectifs du présent travail	39

4. Matériel et méthodes	41
4.1. Microorganismes	41
4.1.1. Agents pathogènes telluriques (<i>Pythium ultimum</i> , <i>Rhizoctonia solani</i>)	41
4.1.2. Agents pathogènes foliaires (<i>Venturia inaequalis</i> et <i>Plasmopara viticola</i>)	41
4.2. Matériel végétal	42
4.3. Composts et substrats	42
4.3.1. Production des extraits de composts	45
4.3.2. Stérilisation des extraits de composts employés dans les biotests	45
4.4. Caractérisation chimique, physique et biologique des composts	46
4.4.1. Extraction aqueuse 1:2 (méthode H ₂ OGH-Ex)	46
4.4.2. Détermination du pH aqueux (méthode H ₂ OGH-pH)	46
4.4.3. Détermination de la salinité du compost (méthode H ₂ OGH-Sal)	46
4.4.4. Détermination de la teneur en NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ et NO ₃ ⁻	46
4.4.5. Détermination de la matière sèche des composts (méthode D-TS)	47
4.4.6. Détermination de la teneur en matière organique (méthode D-AS)	47
4.4.7. Fractionnement et purification des composés humiques des composts	47
4.4.8. Analyse de la fraction organique inférieur à 50 µm	48
4.4.9. Détermination de l'activité microbienne des composts	48
4.4.10. Détermination de la population microbienne des composts et extraits de composts	48
4.5. Tests <i>in vitro</i>	49
4.5.1. Influence des extraits de composts sur la germination des spores de <i>Venturia inaequalis</i>	49
4.5.2. Influence des extraits de composts sur l'activité des zoospores de <i>Plasmopara viticola</i>	50
4.6. Tests <i>in vivo</i>	50
4.6.1. Test de la phytotoxicité des composts	50
4.6.2. Tests de suppression des maladies telluriques	50
4.6.3. Test de protection des plantes contre les maladies foliaires	52
4.7. Récapitulatif des méthodes expérimentales employées	53
4.8. Analyses statistiques	55
5. Résultats et discussion	57
5.1. Caractérisation des composts	57
5.1.1. Caractérisation physique et chimique	57
5.1.2. Caractérisation biologique	64
5.2. Influence des composts sur le développement des maladies telluriques	70
5.2.1. Influence des composts sur le développement de la maladie de la fonte des semis de concombre (agent pathogène <i>Pythium ultimum</i>)	70
5.2.2. Influence de composts sur le développement de la maladie de la pourriture des racines de basilic (agent pathogène <i>Rhizoctonia solani</i>)	73

5.3.	Influence des extraits de composts sur le développement des maladies foliaires	76
5.3.1.	Influence de divers extraits de composts sur le développement de la maladie de la tavelure du pommier causée par <i>Venturia inaequalis</i>	76
5.3.2.	Influence de divers extraits de composts sur le développement de la maladie du mildiou de la vigne causée par <i>Plasmopara viticola</i>	76
5.3.3.	Influence du mode de production de l'extrait de compost sur sa capacité à protéger les plantes de pommiers contre la tavelure causée par <i>Venturia inaequalis</i>	78
5.3.4.	Influence des paramètres chimiques et microbiologiques des extraits de composts sur leur capacité à protéger les plantes contre les maladies	82
5.3.5.	Influence de différentes stérilisations des composts et de leurs extraits sur l'efficacité des extraits à protéger les plantes contre les maladies	87
5.3.6.	Influence du lavage des feuilles sur l'efficacité d'extrait de composts contre les maladies foliaires	90
5.3.7.	Influence <i>in vitro</i> de divers extraits de composts sur la germination des conidies de <i>Venturia inaequalis</i>	92
5.3.8.	Influence des extraits de composts sur l'activité des zoospores de <i>Plasmopara viticola</i>	94
5.3.9.	Influence de l'application de composés humiques extraits des composts sur l'incidence et la sévérité de la maladie de la tavelure du pommier, agent pathogène <i>Venturia inaequalis</i>	96
5.4.	Récapitulation des résultats essentiels	100
6.	Discussion et conclusion générales	103
6.1.	La caractérisation des composts de qualité	103
6.2.	Influence de la qualité des composts sur leur pouvoir suppressif	104
6.3.	Les mécanismes plausibles des extraits de composts dans la protection des plantes contre les maladies foliaires	109
6.4.	Possibilités et limites de l'utilisation des composts et des extraits de composts dans la pratique	111
6.5.	Le pouvoir phytosanitaire des matières humiques extraites de composts	113
6.6.	Perspectives de recherche et de développement	114
7.	Références bibliographiques	117

Remerciements

Annexe

Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques.

Mots clés : compost, extrait de compost, qualité des composts, protection des plantes, maladies fongiques, *Pythium ultimum*, *Rhizoctonia solani*, *Venturia inaequalis*, *Plasmopara viticola*, matière humique des composts (acides humiques et fulviques), potentiel phytosanitaire, effet fongicide, induction de la résistance

Résumé

Le potentiel suppressif de certains composts et de leurs extraits sur les maladies telluriques ou foliaires a souvent été démontré. L'efficacité des composts et/ou des extraits varie en fonction du type de compost et du système plante hôte-pathogène. Les raisons de cette variabilité demeurent encore en grande partie méconnues. De plus, les mécanismes d'inhibition des pathogènes par les composts et/ou les extraits de composts restent encore insuffisamment explorés. Une meilleure connaissance des paramètres influençant les propriétés phytosanitaires des composts et de leurs extraits est donc indispensable afin de pouvoir optimiser leur utilisation pour lutter contre les maladies des plantes.

Les objectifs du présent travail visent (i) la caractérisation des paramètres de la qualité physique, chimique et biologique de divers composts et de leurs extraits et d'établir le lien entre ces paramètres et l'origine et le mode de leur production, (ii) détermination de l'influence de ces paramètres sur l'efficacité phytosanitaire du compost et de ses extraits (iii) la détermination des mécanismes d'inhibition des pathogènes par les composts contre les maladies telluriques et des extraits de composts contre celles foliaires (iv) détermination du potentiel phytosanitaire des matières humiques des composts (acides humiques et fulviques) contre les maladies foliaires.

Les résultats obtenus montrent que la conduite du processus de compostage ainsi que l'âge physiologique de composts influencent leur qualité biologique. De manière générale, la compatibilité des composts avec la croissance des plantes augmente avec leur âge physiologique. Cet âge physiologique des composts diffère de leur âge réel (en mois), la conduite du processus l'influençant de manière déterminante.

Aucune corrélation claire n'a pu être observée entre les paramètres physico-chimiques et biologiques des composts et leur capacité à protéger les plantes contre les maladies telluriques. La majorité des composts testés ont protégé les plantes de concombre contre la maladie de la fonte des semis (agent pathogène, *Pythium ultimum*) indépendamment du processus de compostage et des matériaux compostés. Ce potentiel suppressif semble diminuer avec l'âge du compost. Par contre, seule une minorité des composts a pu réduire

significativement la mortalité de plantes de basilic contre *Rhizoctonia solani*. L'influence de la conduite du processus de compostage semble être plus importante que le degré de maturité du compost. Le mécanisme de protection contre les maladies telluriques semble être principalement de nature microbiologique.

La majorité des extraits de composts a, *in vivo*, réduit significativement la sévérité de la tavelure du pommier (agent pathogène, *Venturia inaequalis*) au-delà de 40 % et du mildiou de la vigne (agent pathogène, *Plasmopara viticola*) (60 %). Dans ce dernier cas, l'incidence de la maladie a été également réduite (46 %). Le mode de production de l'extrait (durée et rapport d'extraction) ainsi que l'âge des composts utilisés n'ont pas influencé l'efficacité des extraits. La stérilisation du compost par autoclavage avant son extraction et de l'extrait lui-même après son extraction (par autoclavage ou par filtration à 0,2 µm) n'a pas influencé l'efficacité de l'extrait. Alors que le lavage des feuilles après l'application des extraits de compost n'a pas eu d'effet constant sur le développement de la tavelure du pommier, la protection des feuilles de vigne contre le mildiou était diminuée par cette opération. L'application des acides humiques et fulviques des composts a également réduit significativement la sévérité de la maladie causée par *Venturia inaequalis*. *In vitro*, les extraits de composts n'ont pas inhibé la germination de conidies de *Venturia inaequalis*, mais l'ont au contraire stimulé. Par contre, l'activité de zoospores de *Plasmopara viticola* a été fortement inhibée par les extraits de compost (70 %), inhibition probablement due à la salinité des extraits.

Contrairement aux mécanismes mis en jeu dans la protection des plantes contre les maladies telluriques, le mécanisme d'inhibition des extraits des composts contre les maladies foliaires n'est pas lié à leur activité microbienne. Le principe actif contre *Venturia inaequalis* doit être soluble à l'eau, thermostable et déjà présent dans le compost avant son extraction. Etant donné que les extraits des composts ne montrent aucun effet fongicide contre *V. inaequalis*, le mécanisme d'action passe soit par la plante (éventuellement induction de résistance), soit par l'influence de la phyllosphère. En ce qui concerne la protection de la vigne contre *Plasmopara viticola*, une action directe des extraits sur le pathogène semble également jouer un rôle déterminant.

Les résultats obtenus mettent en évidence que les composts et les extraits possèdent un potentiel intéressant à protéger les plantes contre divers agents pathogènes. Des essais complémentaires dans les conditions pratiques s'avèrent ainsi nécessaires afin d'optimiser l'utilisation des composts et de leurs extraits et de déterminer les limites d'efficacité de ces techniques. A cet égard, l'application combinée de compost dans le sol et des extraits sur les feuilles pourrait s'avérer intéressante pour offrir une protection globale des plantes.

Influence of the quality of composts and compost extracts on their capacity to protect plants against fungal diseases

Keywords: compost, compost extract, composts quality, plants protection, fungal diseases, *Pythium ultimum*, *Rhizoctonia solani*, *Venturia inaequalis*, *Plasmopara viticola*, humic matter (humic and fulvic acids), phytosanitary potential, fungicidal effect, induction of resistance

Abstract

The potential of composts and compost extracts to improve plant health has often been shown. Their efficacy varies with the type of compost or compost extract and with the host-pathogen system, but the reasons for this variability are unknown so far. Moreover, there is no final conclusion about the mechanisms of inhibition of plant diseases by composts and their extracts. Better knowledge about the factors influencing the phytosanitary potential of compost and their extracts appears indispensable to optimize their utilization for plant protection.

The aims of this work are: (i) to characterize the chemical, physical and biological properties of composts and compost extracts and to relate these to their origin and method of production. (ii) to determine the influence of these parameters on the phytosanitary effects of composts and compost extracts, (iii) to determine the mechanisms of inhibition of soil borne diseases by composts and of foliar diseases by compost extracts, (iv) to determine the effect of humic matter (humic and fulvic acids) extracted from composts against foliar diseases.

The results show that the composting process and physiological age of composts influence the biological quality of composts. In general, the composts became more compatible with plant growth with increasing physiological age. The physiological age differs from the real age of the compost (in months) and is mainly determined by the composting process.

No clear correlation was found between physical, chemical and biological compost parameters and their suppressiveness against soil borne diseases. The majority of the tested composts protected cucumber against damping-off (*Pythium ultimum*), independently from the composting process and the materials of origin. Suppressiveness seemed to decrease with the age of the composts. By contrast, only few composts significantly suppressed damping-off of basil due to *Rhizoctonia solani*. This latter effect was influenced more strongly by the composting process than by the maturity of the composts. The mechanisms of inhibition seem to be primarily of microbial nature.

The majority of compost extracts reduced severity of scab (*Venturia inaequalis*) in seedlings of apple (by 40 %), and of downy mildew (*Plasmopara viticola*) in seedlings of grapevine (by

60 %). In grapevine, not only the severity but also the incidence of downy mildew was reduced (46 %). The duration of extraction, the compost/water ratio and the age of the composts did not influence the efficacy of the extracts. Sterilization of the composts before extraction and of the extracts (by autoclaving and sterile filtration at 0.2 μm , respectively) did not influence efficacy. Washing the leaves after application of extracts had no consistent effect on apple scab, but reduced the efficacy against downy mildew of grapevines. Application of humic and fulvic acids from composts significantly reduced the severity of apple scab. *In vitro*, compost extracts did not inhibit the germination of zoospores of *V. inaequalis*, but stimulated it instead. By contrast, the activity of zoospores of *P. viticola* was strongly inhibited (70 %), probably due to the salinity of the extracts.

Unlike in soil borne diseases, the mechanisms of inhibition of foliar diseases are not linked to microbial activity. The principle active against *V. inaequalis* must be water soluble, heat stable and present in composts before the extraction. Considering that compost extracts had no fungicidal effect against *V. inaequalis*, the mechanisms must be either through the plant (perhaps induction of resistance) or through influence on the phyllosphere. With respect to protection of grapevines against *P. viticola*, a direct effect on the pathogen seems to be important.

In conclusion, composts and compost extracts reveal an interesting potential to protect plants against a range of pathogens. Further trials under practical conditions are necessary to optimize the use of composts and their extracts, and to determine the limitations of this technique. The combined application of compost to the soil and compost extracts to the leaves seems interesting to achieve full protection of plants against an array of diseases.

Einfluss der Qualität von Kompost und Kompostextrakten auf die Unterdrückung von Pflanzenkrankheiten

Schlussworte: Kompost, Kompostextrakt, Kompostqualität, Pflanzenschutz, Pilzkrankheiten, *Pythium ultimum*, *Rhizoctonia solani*, *Venturia inaequalis*, *Plasmopara viticola*, Humin Substanz (Humin- und Fulvinsäuren), Krankheitsunterdrückungspotential, fungizid Wirkung, Resistanzinduktion.

Zusammenfassung

Die krankheitsunterdrückende Wirkung von Komposten und Kompostextrakten auf boden- und blattbürtige Krankheiten wurde wiederholt gezeigt. Die Wirkung variiert je nach Art des Kompostes und des Wirt-Pathogen Systems. Die Ursachen dieser Variabilität sind bis heute weitgehend unbekannt, und die Wirkungsweise kaum untersucht. Bessere Kenntnisse sind unabdingbar, um die Anwendung von Komposten und Kompostextrakten für den Pflanzenschutz zu optimieren.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es (i) verschiedene Komposte und Kompostextrakte physikalisch, chemisch und biologisch zu charakterisieren und diese Parameter mit dem Ausgangsmaterial und Kompostierungsprozess zu korrelieren, (ii) den Einfluss dieser Parameter auf die krankheitsunterdrückende Wirkung der Komposte und Kompostextrakte zu bestimmen, (iii) die Mechanismen der Unterdrückung bodenbürtiger Krankheiten durch Komposte und blattbürtiger Krankheiten durch Kompostextrakte zu bestimmen, (iv) das Potential von aus Komposten gewonnenen Humin- und Fulvinsäuren zur Krankheitsunterdrückung zu bestimmen.

Die Resultate zeigen, dass der Kompostierungsprozess und das physiologische Alter der Komposte ihre krankheitsunterdrückende Wirkung beeinflussen. Im Allgemeinen werden Komposte mit zunehmendem physiologischem Alter pflanzenverträglicher. Das physiologische Alter ist nicht mit dem chronologischen Alter (in Monaten) gleichzusetzen, denn es hängt stark vom Kompostierungsprozess ab.

Zwischen den physikalischen und chemischen Parametern und dem suppressiven Potential der Komposte gegen bodenbürtige Krankheiten bestand kein klarer Zusammenhang. Die Mehrheit der Komposte schützte Gurken gegen die Auflaufkrankheit (*Pythium ultimum*), unabhängig vom Kompostierungsprozess oder Ausgangsmaterial. Die Suppressivität schien jedoch mit dem Alter der Komposte abzunehmen. Im Gegensatz dazu schützten nur wenige Komposte Basilikum gegen die Wurzelfäule (*Rhizoctonia solani*). Der Kompostierungsprozess scheint dabei eine wichtigere Rolle zu spielen als der Reifegrad des

Kompostes. Die Wirkungsmechanismen scheinen hauptsächlich mikrobiologischer Natur zu sein.

Die Mehrzahl der Komposte reduzierte die Intensität des Schorfbefalls bei Apfelsämlingen (*Venturia inaequalis*) um 40 % und des Falschen Mehltaus bei Rebensämlingen (*Plasmopara viticola*) um 60 %. Bei Reben reduzierten sie auch die Befallshäufigkeit um 46 %. Die Art der Extraktion (Dauer der Extraktion, Kompost/Wasser-Verhältnis) und das Alter der Komposte hatten keinen Einfluss auf die Suppressivität. Sterilisation des Kompostes vor der Extraktion oder des Extraktes (mittels Autoklavieren, resp. Sterilfiltration bei 0,2 µm) hatte keinen Einfluss auf die Suppressivität. Das Abwaschen der Blätter nach der Applikation des Extraktes hatte keinen Einfluss auf den Apfelschorf, reduzierte jedoch den Schutz der Reben gegen den Falschen Mehltau. Die Applikation von Humin- und Fulvinsäuren aus Komposten reduzierte die Befallsstärke mit Apfelschorf. *In vitro* reduzierten Kompostextrakte die Keimung von Zoosporen von *V. inaequalis* nicht, stimulierten sie sogar. Im Gegensatz dazu reduzierten sie die Aktivität der Zoosporen von *P. viticola* drastisch (70 %), vermutlich durch ihren hohen Salzgehalt.

Im Gegensatz zu den bodenbürtigen Krankheiten sind die Mechanismen der Suppressivität gegenüber blattbürtigen Krankheiten nicht an mikrobielle Aktivität gekoppelt. Das aktive Prinzip gegen *V. inaequalis* muss wasserlöslich, hitzestabil und bereits im Kompost vorhanden sein. In Anbetracht der Tatsache, dass die Extrakte keinerlei fungizide Wirkung auf *V. inaequalis* hatten, muss das aktive Prinzip entweder über die Pflanze laufen (möglicherweise Resistenzinduktion) oder über die Beeinflussung der Phyllosphäre. Im Fall von *P. viticola* scheint zudem auch eine direkte Wirkung auf das Pathogen relevant zu sein.

Die Resultate zeigen, dass Komposte und Kompostextrakte ein interessantes Potential zum Schutz von Pflanzen gegen diverse Krankheiten haben. Ergänzende Versuche unter Praxisbedingungen sind notwendig, um die Kompostanwendung für den Pflanzenschutz zu optimieren und um die Möglichkeiten und Grenzen dieser Technologie zu klären. Kombinierte Anwendungen von Komposten auf den Boden gegen bodenbürtige Krankheiten und von Kompostextrakten auf die Blätter gegen blattbürtige Krankheiten könnten Pflanzen umfassend vor Krankheiten schützen.

1. Introduction générale

Le compostage est un procédé de traitement intensif des déchets organiques qui met en œuvre, en les optimisant, des processus biologiques aérobies de dégradation et de stabilisation des matières organiques complexes (Gobat *et al.*, 2003). Les matières premières du compostage sont composées principalement de restes de végétaux et relativement peu de restes d'animaux ou de substance minérales (Fuchs *et al.*, 2001). Les composts qui en résultent ont une double nature : amendement, car ils renferment des composés organiques précurseurs de l'humus et engrais, par leurs teneurs en éléments fertilisants (Gobat *et al.*, 2003). Ils permettent donc de combler le déficit des sols surexploités et d'en améliorer la fertilité à long terme.

Le but du compostage est la production de produits stables qui peuvent être conservés sans traitement supplémentaires et qui peuvent être appliqués au sol sans engendrer de dommages aux cultures et mais qui, au contraire, améliorent la fertilité du sol et la santé des plantes.

La diminution de la fertilité du sol suite à une agriculture trop intensive ou inappropriée s'observe aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement. Il en résulte une perte de matière organique stable dans les sols et une sensibilité accrue des plantes aux maladies, due au déséquilibre microbiologiques des sols.

D'un autre côté, divers pays sont confrontés à une augmentation importante des déchets (Fuchs *et al.*, 2001). Or, une grande partie de ces déchets est de nature organique, et un recyclage par le biais du compostage permettrait de combler le déficit humique des sols surexploités et d'en réactiver une vie microbiologique équilibrée (Gobat *et al.*, 2003).

L'utilisation de plus en plus intense des engrais chimiques, principalement de cuivre et de substances de synthèse, ne permet pas de compenser la perte de fertilité du sol et le développement des pathogènes. Le cuivre présente l'inconvénient de s'accumuler dans les sols où il peut atteindre des concentrations néfastes pour l'écosystème. Un changement rapide de stratégie et la recherche de solutions alternatives, viables à la fois techniquement et économiquement, sont donc devenus de première nécessité.

Les maladies causées par les microorganismes pathogènes telluriques ou foliaires sont de plus en plus problématiques. L'utilisation de compost et d'extrait de qualité peut représenter une solution intéressante, mais la limite de cette technique réside pour l'instant dans les variations de qualité de ces produits (Hoitink et Kutter, 1994 ; Hoitink *et al.*, 1997). Seuls les composts qui répondent aux exigences de qualité et qui excluent les effets négatifs sur la croissance des

plantes doivent donc être pris en considération pour une extension de leur utilisation dans le domaine de la protection des plantes (Logsdon, 1993). Ces exigences de qualité émises par l'utilisateur ne coïncident pas toujours avec celles du producteur, ce dernier considérant parfois le compost comme un déchet à éliminer de la manière la moins coûteuse possible (Fuchs, 1995a).

La production de composts de qualité pourrait donc avoir des avantages pour les deux acteurs : d'une part, dû à ces exigences, la valeur économique des composts augmenterait et, d'autre part, à travers l'extension de ses utilisations, on pourrait assurer ses débouchés (Fuchs, 1995b). Le compost de qualité est par exemple de plus en plus utilisé comme un matériel de substitution pour la tourbe afin de réduire les coûts de production des substrats et tout en respectant les normes d'une agriculture durable (Krebs, 1990 ; Hoitink *et al.*, 1997).

Il peut aussi être employé pour la production de jeunes plants, avec, comme avantage par rapport à la tourbe, de produire des plantes plus résistantes aux pathogènes (Fuchs, 1996 ; Hoitink *et al.*, 1997). Les possibilités d'utilisation des composts sont prometteuses, mais restent fortement tributaires de leur aspect qualitatif.

2. Etude bibliographique

2.1. Importance écologique des déchets organiques et du compost

Le compost est un produit qui gagne toujours plus en importance. Les raisons sont, d'une part, la gestion des déchets et la recherche de moyens sensés pour valoriser et recycler les matières organiques et d'autre part, la conscience des producteurs de cultures végétales concernant les avantages que peut apporter l'emploi de composts de qualité pour leurs cultures. Nous avons ainsi deux acteurs qui se rencontrent : les « industriels des déchets », qui veulent améliorer à moindre frais les déchets verts et les « producteurs de plantes », qui veulent améliorer et assurer à long terme la fertilité de leurs sols grâce à des composts de qualité.

Par habitant et année, environ 1000 kg de carbone renouvelable sont transformés, en partie brûlés sous forme de bois ou décomposés biologiquement dans le sol comme les restes de culture ou les engrais organiques, toutes surfaces de productions, forestière et agricole sont comprises (Fuchs *et al.*, 2004a).

La partie du carbone transformée par compostage ou méthanisation ne représente qu'un pourcent de ces 1000 kg. Il est donc évident que la majeure partie de la conversion du carbone ne peut pour l'instant pas être réalisée sur les installations de compostage ou de méthanisation. Toutefois, le potentiel des déchets organiques à disposition est nettement plus important que ce qui est traité actuellement. Il en va de même pour les débouchés du compost. Le compost représente à peine 1 % de l'azote et de la potasse et 1,7 % du phosphore des engrais totaux annuellement utilisés en Suisse (Fuchs *et al.*, 2004a).

Durant la dernière décennie, la quantité de compost valorisée sur les grands sites de compostage n'a pas cessé d'augmenter. Le compostage a connu un grand essor et a triplé, passant de 200'000 t en 1985 à 740'000 t en 2003 (fig. 2.1).

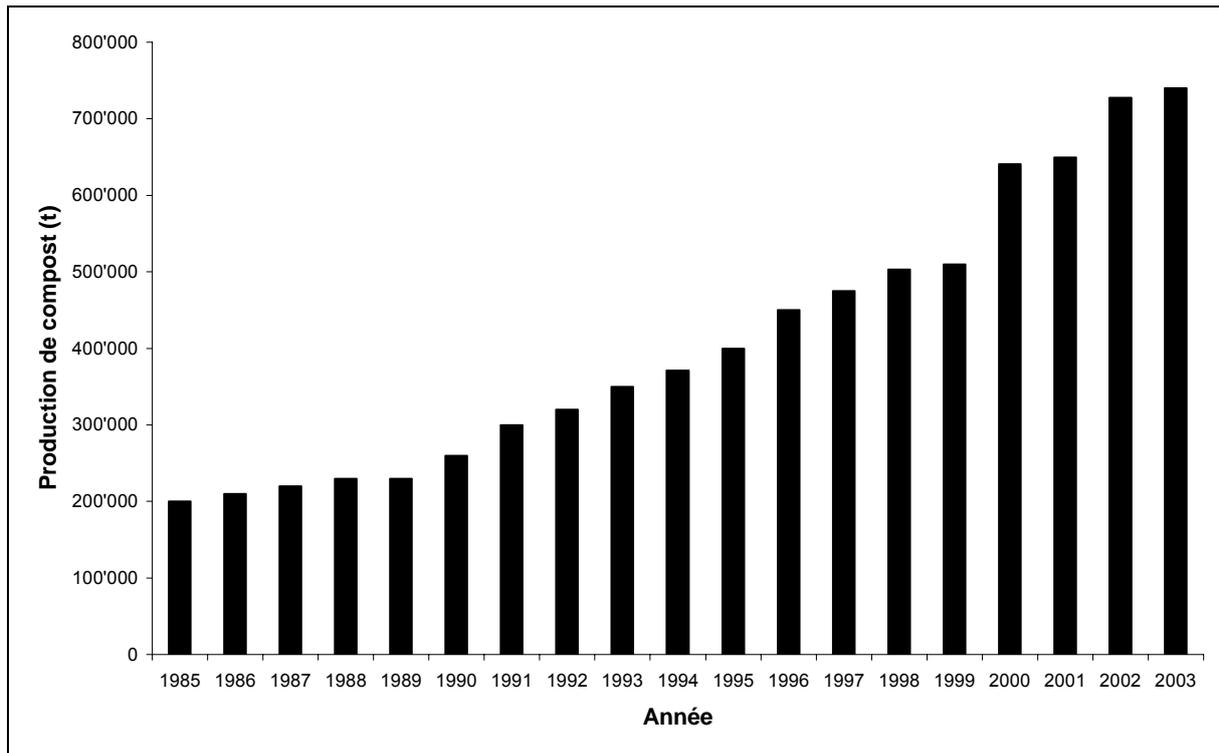


Fig. 2.1. Evolution de la production de compost entre 1985 et 2003 (Source : OFEFP, juillet 2004)

En Suisse, près de 60 % des déchets compostés proviennent des services communaux de collecte (Baier *et al.*, 2004). Les quantités restantes sont partagées entre les déchets de jardinage (env. 100'000 tonnes soit 24 %), les services publics (7 %), l'industrie (soit principalement les entreprises du secteur agro-alimentaire) et l'artisanat (10 %) (Baier *et al.*, 2004)

En 2003, la quantité de déchets biodégradables traitée dans les installations supérieures à 100 t/an était de 408'973 tonnes, ce qui correspond à une moyenne de 100 kg par habitant (Baier *et al.*, 2004).

L'agriculture joue un rôle prépondérant au niveau des débouchés. En 2003, elle a repris 68 % des composts produits, 75 % si on y ajoute les eaux de pressage des installations de méthanisation et les composts utilisés pour les travaux de remise en culture. L'horticulture, qui a des exigences de qualité plus élevées que l'agriculture, a pour sa part utilisé 12 % du compost produit, et les privés 8 %. Environ 5 % des intrants ont été séparés avant le compostage et ont été utilisés comme bois de chauffe (Baier *et al.*, 2004).

2.2. Influence des composts sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du sol

De nombreuses études ont été publiées sur les effets de l'application de compost sur les paramètres du sol (Dick et McCoy, 1993). Une grande partie de ces études est consacrée à la comparaison entre le compost et d'autres engrais organiques (engrais de ferme, boues d'épuration, etc.) ou minéraux (Kundler, 1986 ; Asmus, 1992 ; Guster et Ebertseder, 2002 ; Leifeld *et al.*, 1998, 2002). L'interaction entre la fertilisation organique avec du compost et la fertilisation minérale a aussi été l'objet de plusieurs études (Suzuki *et al.*, 1990 ; Leifeld *et al.*, 1998, 2002). Les effets de l'application de compost ont été fréquemment analysés dans des conditions extrêmes (sols lourds ou légers), et dans des cultures à assolement court ou intensif ou encore dans le cadre de la remise en état de sols (Timmermann *et al.*, 1999 ; Guster et Ebertseder, 2002 ; Hartmann, 2003). Cependant, il existe peu d'études sur les effets de l'utilisation combinée de composts avec d'autres engrais organiques. De même, il n'y a que peu d'études sur l'application de compost dans des conditions d'assolement plutôt extensives de cultures mixtes ou fourragères.

2.2.1 Effets sur les paramètres physiques

Les changements des propriétés chimiques et microbiologiques suite à l'amendement du compost sont souvent associés à un changement direct ou indirect de propriétés physiques. Ainsi, l'augmentation de la matière organique, l'élévation du pH, du contenu en calcium, ainsi que de la biomasse microbienne et de son activité, s'accompagnent aussi de la formation d'agrégats plus gros et plus stables (Gerzabek *et al.*, 1995). L'application de compost a généralement des effets positifs sur la **stabilité des agrégats** à court-terme (moins de trois ans). Cependant, ces effets se maintiennent lors d'applications répétées. L'utilisation de composts mûrs améliore nettement la stabilité des agrégats comparé à celle de "composts jeunes" (Hartmann, 2003 ; Petersen et Stöppler-Zimmer, 1999).

La stabilité des agrégats et l'amélioration de la structure du sol qui y est liée conduisent à une augmentation de la **porosité** et à une diminution de la **densité** (Asche *et al.*, 1994 ; Giusquiani *et al.*, 1995 ; Asche, 1997 ; Ebertseder, 1997 ; Timmermann *et al.*, 1999 ; Hartmann, 2003).

Ces changements dans la structure du sol permettent d'influencer de façon durable la teneur en gaz dans les différents horizons. Chausson (1999) a pu observer, après 9 ans d'apports de compost sur cinq sites de Suisse sud-occidentale, une augmentation moyenne de l'aération du sol de 15 % par rapport au témoin non traité. D'autre part, une augmentation de la respiration

du sol est fréquemment observée suite à la modification des activités microbiennes (Serra *et al.*, 1995).

On observe également une augmentation de la **capacité de rétention de l'eau**. Cet effet semble cependant n'apparaître qu'après un certain temps (Avnimelech *et al.*, 1993 ; Kahle et Belau, 1998 ; Hartmann, 2003), comme le montrent les recherches d'Evanylo et Sherony (2002) qui n'ont trouvé aucune augmentation de la capacité de rétention de l'eau après 2 ans d'application de compost.

L'augmentation de la stabilité des agrégats et de la porosité favorisent aussi **l'infiltration de l'eau** dans le sol. Comme les autres effets positifs concernant les caractéristiques physiques des sols, cet effet sur l'infiltration de l'eau n'est observable qu'après quelques années d'utilisation de composts (Ebertseder, 1997 ; Gilley et Eghball, 1998 ; Evanylo et Sherony, 2002 ; Landes *et al.*, 2002). De manière générale, l'augmentation de la stabilité des agrégats et l'amélioration de l'infiltration de l'eau ont également des conséquences positives quant à la problématique de **l'érosion des sols**. Ainsi, différentes études ont pu montrer une augmentation de la résistance tant à l'érosion hydrique (Bazzoffi *et al.* 1998 ; Landes *et al.* 2002) qu'éolienne (Hartmann, 2003).

L'application de compost peut également influencer l'assimilation d'énergie d'un sol en raison de sa couleur foncée (Podzol et sol brun). Les parcelles amendées avec du compost montrent un bilan radiatif journalier de moindre amplitude et sa température superficielle est tendanciellement plus élevée (Hartmann, 2003).

2.2.2. Effets sur les paramètres chimiques

Dans la plupart des essais, l'application de compost en agriculture ou en horticulture a conduit à une augmentation de la teneur en carbone organique (C_{org}) et de l'azote total (N_{tot}) dans l'horizon supérieur du sol. Cette augmentation est observable pendant de nombreuses décennies, jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint (tab. 2.1).

A l'exception des analyses effectuées par Hartmann (2003), l'accroissement de C_{org} était associé avec celui de N_{tot} (Werner *et al.*, 1988 ; Diez et Krauss 1997; Landes *et al.*, 2002).

Une augmentation significative de la teneur en C_{org} suite à des apports réguliers de composts s'observe à court terme (Landes *et al.*, 2002 ; Hardmann, 2003.). L'épandage d'une grande quantité de compost en une seule fois (100 t de matière fraîche/ha) peut également contribuer à une augmentation durable de la teneur en C_{org} et N_{tot} dans le sol (Kahle et Belau, 1998). Le niveau d'équilibre des teneurs en C_{org} et N_{tot} est essentiellement influencé par des facteurs locaux (sol, climat), les modes d'exploitation (travail du sol, assolement), la quantités de

compost épanché, ainsi que par la qualité de ce dernier. En général, une étroite corrélation a été observée entre la quantité de matières organiques apportée par le compost et l'accroissement de la teneur en C_{org} dans le sol (Giusquiani *et al.*, 1995). Cependant, la même quantité de matières organiques augmente de manière plus conséquente la teneur en C_{org} dans un sol lourd et riche en argile que dans un sol léger et sableux (Gutser et Ebertseder, 2002) et moins dans un podzol que dans un sol brun (Hartmann, 2003).

Tab. 2.1. Influence de l'utilisation de compost sur la teneur en carbone (C_{org}) et en azote total (N_t) dans l'horizon supérieur du sol dans des essais en plein champ (source : Fuchs *et al.*, 2004b)

Durée de l'expérience	Variation		Références bibliographiques
	C_{org}	N_{tot}	
Jusqu'à 3 ans	0(+)	0(+)	Evanylo et Sherony 2002 ; Kremer, 2001 ; Avnimelech <i>et al.</i> , 1994 ; Avnimelech <i>et al.</i> , 1993
	+	+	
	++	+	
4 à 10 ans	++	+	Goldbach et Scherer, 2001 ; Landes <i>et al.</i> , 2002 ; Aichberger et Wimmer, 1999 ; Ebertseder, 1997 ; Leifeld <i>et al.</i> , 1998 Hartmann, 2003 Albiach <i>et al.</i> , 1995 ; Giusquiani <i>et al.</i> 1995
	++	0	
	++		
> 10 ans	++	++	Diez et Krauss 1997 ; Werner <i>et al.</i> , 1988 Delschen, 1999 ; Hartl and Erhart, 2002 ; Sahin 1989
	++		

++ : augmentation; + : faible augmentation; 0 : pas d'effet

Il ressort des travaux de Kundler (1986) et Asmus (1992) que le compost comparé aux autres engrais organiques est plus performant que la tourbe pour augmenter le taux d'humus stable dans le sol. Ceci en raison de la stabilisation des substances organiques sous forme de composés humiques (tab. 2.2). Par contre, les analyses de Delschen (1999) ont montré, dans des sols limoneux réaménagés, que la nature du matériel de départ (fumier de ferme, compost ou boues d'épuration) était de moindre importance dans la performance pour reproduire de l'humus. Le processus d'accumulation à long terme est essentiellement déterminé par le taux d'application.

La composition et les caractéristiques de la **matière organique** du compost diffèrent de celles du sol dans presque tous ses paramètres (Joergensen *et al.*, 1996 ; Leifeld *et al.*, 2002). Le processus de fermentation du compostage conduit à la formation de composés organiques stables et à la mise en place de matières humiques. Joergensen *et al.* (1996) ont comparé, lors

d'un essai d'incubation, les paramètres chimiques du sol et ceux du compost. Ils ont constaté que les composts de déchets de jardin et de cuisine avaient des valeurs nettement plus élevées que le sol pour tous les paramètres tels que C_{org} , N_{tot} , le pH, les carbonates, la capacité d'échange cationique (CEC), la salinité, les chlorures et les sulfates. Leifeld *et al.* (2002) ont aussi trouvé des valeurs nettement plus élevées pour les paramètres C_{org} , N_{tot} , C/N, lignine et pH de composts de jardin (compost de déchets verts) de maturités différentes que le sol. D'autre part, les rapports alcoyle-C/O-alcoyle-C (indice de mesure d'humification) de deux composts se sont distingués clairement de cambiosols, mais par contre pas des luvisols.

Dans un essai en plein champ, Gigliotti *et al.* (1999) ont observé que les acides fulviques de composts de jardins avaient une grande proportion de groupes aliphatiques et carboxyliques et une faible proportion de polysaccharides par rapport au sol. Il est donc facile à comprendre que l'application de substances organiques stabilisées a pour conséquence une modification de la composition de la matière organique du sol, et que celle-ci dépendra de la qualité du compost et du lieu de l'application. Leifeld *et al.* (1998, 2002) ont pu montrer que des apports de composts n'ont pas seulement conduit à une augmentation de C_{org} et N_{org} , mais également de la teneur en carbones aromatiques et en lignine. Toutefois, le rapport alcoyle-C/O-alcoyle-C a montré un faible degré d'humification de la matière organique du sol après l'utilisation de compost de déchets verts, alors que l'épandage de compost de fumier de ferme a dans les deux sites contribué à une augmentation du degré d'humification et à une baisse de la teneur en cellulose (Leifeld *et al.*, 1998). Des résultats semblables ont été trouvés par Gigliotti *et al.* (1999). Ainsi, l'accroissement de la teneur en composés aromatiques observé après l'application de compost ne doit pas être attribué automatiquement à une humification plus avancée. D'après Leifeld *et al.* (1998), les influences de l'application de compost sur les propriétés physiques et chimiques du sol sont probablement dues plutôt à des changements quantitatifs de la matière organique et non qualitatifs. De manière générale, le site et les propriétés intrinsèques du sol influencent les caractéristiques humiques de sa fraction organique de manière plus durable que la fertilisation, et recouvrent partiellement les effets liés à l'utilisation du sol.

Tab. 2.2. Potentiel de reproduction de l'humus et qualité des substances organiques (rapport C:N) de divers engrais organiques (source : Gutser et Ebertseder, 2002)

	Coefficient de reproduction de l'humus*		
	t humus-C/t engrais-C	Relatif (compost = 100)	C:N
Déchets verts	0,12-0,20	28-47	10-30
Paille	0,24	56	70-80
Fumier de ferme	0,35	81	12-15
Compost	0,43	100	12-25
Tourbe	0,52	121	25

* D'après Kundler (1986), et Asmus (1992)

La plupart des composts ont un **pH** relativement élevé (8) et possèdent de grandes quantités de substances tampon. De ce fait, l'apport de compost conduit généralement à une élévation du pH des sols cultivés (Diez et Krauss, 1997 ; Kahle et Belau, 1998 ; Landes *et al.*, 2002). Cependant, cela ne produit pas dans tous les cas (Avnimelech *et al.*, 1993 et 1994 ; Kremer, 2001). De manière générale, l'application de composts conduit à une stabilisation du pH du sol (Stamatiadis *et al.*, 1999). Selon sa qualité (taux de carbonates), l'utilisation de compost peut permettre l'économie de quantités non négligeables d'amendement calcaires.

L'argile et les composés humiques constituent les parties essentielles qui déterminent la capacité d'absorption d'un sol. Le complexe argilo-humique permet de stocker les éléments nutritifs et de les fournir aux plantes. La **capacité d'échange cationique** (CEC) est l'un des paramètres les plus importants caractérisant la capacité d'absorption d'un sol. En général, la CEC de la matière organique décomposée d'un sol est nettement plus élevée que celle des minéraux argileux (Sheffer et Schachtschabel, 1989). L'enrichissement en matière organique peut donc contribuer à une élévation significative de la CEC, surtout dans les sols légers à faible capacité d'absorption. Ainsi, Hartl et Erhart (2002), tout comme Giusquiani *et al.* (1995) ont pu mettre en évidence une corrélation significative entre la quantité de compost amendée et la teneur en C_{org} et la CEC dans le sol (tab. 2.3). On observe également une augmentation du taux de saturation basique (Ca, K, Na) en rapport avec l'élévation du pH et de la CEC (Kahle et Belau, 2002).

Tab 2.3. Influence de l'application d'une quantité croissante de compost sur la teneur en C_{org} et sur la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, après 2 ans de cultures (Giusquiani *et al.*, 1995)

	Quantités de compost appliquées ($t\ ha^{-1}$)				Régression linéaire
	0	10	30	90	
C_{org} ($g\ kg^{-1}$)	7,7	9,5	10,8	11,9	*
CEC ($cmol\ kg^{-1}$)	17,2	18,0	18,7	20,0	*

* Régression linéaire significative à $P \leq 0,01$; d'après le test F-test.

La teneur élevée en sel des composts peut évidemment influencer la **teneur en sel du sol** ou du substrat dans lequel il est ajouté. Lors d'une étude de fertilisation avec du fumier, du compost de déchets de cuisine ou du compost de déchets de jardin dans un sol sableux du Nord de l'Allemagne, Kremer (2001) a pu observer une augmentation des taux de salinité dans la variante amendée avec le compost de déchets de cuisine. Dans les régions qui ont un climat humide, ceci ne devrait pas porter à conséquence, en raison de lessivage relativement rapide. Par contre, dans les régions à climats arides ou semi-arides, une augmentation de la conductivité électrique du sol pourrait limiter l'utilisation des composts (Stamatiadis *et al.*, 1999).

2.2.3. Effets sur les propriétés biologiques

A la fin du processus de décomposition (compostage), les composts mûrs renferment une communauté importante et diversifiée de microorganismes mésophiles (Gobat *et al.*, 2003). Ainsi, l'addition de compost dans un sol ne signifie pas seulement un apport de matières humigènes contenant des composés minéraux, mais aussi un apport de microorganismes vivants. D'autre part, le compost peut également représenter une source nutritionnelle pour les organismes indigènes du sol (Dick et McCoy, 1993). Ainsi, l'apport de compost peut influencer l'activité microbienne aussi bien dans le sol (Perucci, 1990) qu'au niveau de la microflore (Pera *et al.*, 1983). D'un autre côté, la biomasse microbienne, fraction organique active, représente une source importante d'approvisionnement nutritionnel pour la plante (Smith et Paul, 1990), et l'augmentation de la biomasse microbienne par l'amendement de compost peut améliorer à long terme la fertilité du sol.

Non seulement la quantité de microorganismes telluriques peut être influencée par un apport de compost, mais Perucci (1990) a également observé une augmentation significative de diverses activités enzymatiques (uréases, protéases, phosphatases, sulfatases). En améliorant

le potentiel biologique et enzymatique des sols, le compost crée des conditions optimales pour la croissance des plantes, grâce à la minéralisation, l'humification et la disponibilité des éléments nutritifs.

2.3. Les paramètres de caractérisation des composts

Plusieurs paramètres ont été utilisés pour caractériser la qualité physique, chimique et biologique des composts (tab. 2.4).

2.3.1. Caractéristiques physiques

On peut déterminer la qualité d'un compost par une observation visuelle sans infrastructure coûteuse. Tout d'abord, la structure permet d'apprécier le degré de décomposition et de maturité d'un produit (Schleiss *et al.*, 2002). Ensuite, la couleur du compost varie d'un compost à l'autre et évolue pendant le processus de décomposition. Ce critère n'est cependant pratiquement plus utilisé pour déterminer la qualité du compost (Berner et Bieri, 1991).

Par contre, un critère très important pour la qualité est l'évolution de la température pendant le processus de compostage. En effet, c'est ce processus qui engendre l'hygiénisation naturelle du compost (Fuchs *et al.*, 2001).

2.3.2. Caractéristiques chimiques

La **valeur pH** du matériel composté baisse au début de la phase de compostage suite à la formation d'acides organiques, et ceci aussi bien en mode de décomposition aérobie qu'anaérobie (Nakasaki *et al.*, 1993). Ces acides sont ensuite soit dégradés ou volatilisés. En même temps, de l'ammonium est formé par hydrolyse et désamination des protéines (amino-nitrification). Ces deux processus combinés conduisent à une élévation du pH, qui peut atteindre des valeurs supérieures à 9. Lors de la nitrification (phase de maturation), l'ammonium est transformé en nitrate, ce qui a pour effet de faire retomber légèrement le pH.

Le pH de déchets verts frais dépend de leur composition, mais également de la durée et des conditions de stockage avant qu'ils ne soient livrés au site de compostage (Krogmann, 1994).

Un retard dans la décomposition de la matière organique au début de la phase de compostage, lorsque le pH est encore bas, pourrait entraîner une inhibition de la décomposition des protéines microbiennes du matériel brut. La dégradation optimale s'observe entre un pH 7 à 8 (Nakasaki *et al.*, 1993). Cependant, la valeur exacte du pH dépend respectivement de la composition des intrants, de leur teneur en azote et de l'intensité de la nitrification pendant la phase de maturation. Pour cette raison, la valeur du pH peut fortement varier d'un compost à

un autre, indépendamment du degré de décomposition. C'est la raison pour laquelle ce paramètre n'est pas adapté pour l'utilisation comme indicateur de maturation

(Schleiss *et al.*, 2002). En revanche, la valeur du pH est extrêmement importante pour l'utilisation spéciale de compost, comme pour la production de substrats. En effet, si elle est trop élevée, elle peut conduire à des blocages d'éléments nutritifs comme le fer.

La **capacité d'échange cationique (CEC)** est une caractéristique importante et elle est considérée par certains auteurs comme un paramètre de qualité et de maturité des composts (Jimenez and Garcia 1992 ; N'Dayegamie *et al.*, 1997 ; Namkoong *et al.*, 1999 ; Butler *et al.* 2001). La valeur CEC est cependant fortement influencée par la composition des intrants, et elle dépend également de la grosseur des grains des échantillons moulus (Jacas *et al.*, 1986).

La CEC est liée à la quantité de substances humiques (Forster *et al.*, 1993). Inbar *et al.* (1990) ont montré une bonne corrélation entre la CEC et les substances humiques de composts de fumier.

Les **formes d'azote minéral** sont des critères importants permettant de déterminer la qualité et la maturité des composts. Lors de la décomposition des protéines, de l'**ammonium** est libéré. Vers la fin de la phase de chaleur, cet ammonium est en présence d'oxygène est transformé, en nitrite puis en nitrate (Mathur *et al.*, 1993 ; Heller, 1999). Ainsi, le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ est une bonne mesure pour d'une part, différencier les digestats des composts (Schleiss *et al.*, 2002) et d'autre part, caractériser leur degré de maturité (Schleiss *et al.*, 2002). De même, le **rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$** permet de limiter les risques de blocage de l'azote lors de l'utilisation des composts (Berner *et al.*, 1996).

Bernal *et al.* (1998) propose un rapport $\text{NH}_4/\text{NO}_3 < 0,16$ pour un compost mûr. Ceci correspond à un rapport converti de $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ de 1,8. Les directives suisses de qualité des composts (Fuchs *et al.*, 2001) sont un peu plus exigeantes ; elles demandent un rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N} > 2$ pour un compost utilisé en horticulture, et un rapport supérieur à 20 pour un compost destiné aux cultures sous abris et aux utilisateurs amateurs (Fuchs *et al.*, 2001).

Une quantité de nitrite trop élevée reflète soit un compost jeune en pleine phase de nitrification, soit un compost mûr mal stocké, c'est-à-dire manquant d'aération. Dans ce cas, le nitrate est réduit en nitrite par certaines bactéries, ce qui diminue fortement sa qualité biologique (Fuchs, 2002).

En ce qui concerne le **phosphore**, sa solubilité dans l'eau diminue avec le processus de maturation. En effet, le phosphore précipite avec le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) pour former des composés insolubles. Ces composés organiques phosphorés peuvent cependant être reminéralisés ultérieurement (Traore *et al.*, 1999). La disponibilité en phosphore dépend

aussi fortement du pH du sol. Dans un sol acide, le phosphore est plus disponible que dans un sol formé essentiellement de carbonates (Sinaj *et al.*, 2002)

Le **rapport carbone/azote** (rapport C/N) est un paramètre important influencé d'une part par la composition des intrants, et d'autre part par son degré de maturation. Si le rapport C/N d'un compost est très élevé, il risque d'immobiliser l'azote du sol, ses microorganismes l'utilisent pour dégrader les substances ligneuses. Le rapport C/N décroît au cours du processus de compostage, une partie importante du carbone organique s'échappant sous forme de CO₂ (Finstein *et al.*, 1986 ; Jedidi *et al.*, 1995). Ainsi, le rapport C/N est fréquemment utilisé pour évaluer l'évolution du processus de minéralisation des substances organiques (Bernal *et al.*, 1998 ; N'Dayegamiye et Isfan, 1991). Le rapport C/N peut être mesuré soit dans le compost, soit dans son extrait aqueux (Jimenez et Garcia, 1992 ; Pare *et al.*, 1998 ; Namkoong *et al.*, 1999). Ebertseder *et al.* (1996) recommande d'utiliser le K₂SO₄ pour les extractions car les substances organiques sont plus solubles dans le K₂SO₄ que dans l'eau et permettent une meilleure prévision des effets du compost.

Acides humiques et fulviques et autres substances photo-actives

Les matières organiques résultant de l'humification se classent grossièrement en fonction de leurs masses moléculaires qui reflètent également leurs comportements face aux procédés d'extraction (Gobat *et al.*, 2003).

Un extrait aqueux de compost n'est pas incolore, mais a une coloration plus ou moins brune à jaune. Cette coloration est due à des précurseurs des acides fulviques et humiques (pseudo acides fulviques et humiques) tels que les acides créniques et hymatomélaniques qui sont soluble dans l'eau ainsi qu'aux substances photoactives comme les mélanines.

La densité de coloration dépend de la nature des intrants et du degré d'humification du compost. Elle est plus intense au début du compostage, puis baisse au fur et à mesure de la maturation (Mathur *et al.*, 1993).

L'absorption est généralement mesurée dans l'extrait aqueux d'un compost à une longueur d'onde de 472 et 664 nm. Le rapport des absorbances (le **Q4/6**) augmente au fur et à mesure de la durée du compostage (N'Dayegamiye et Isfan, 1991 ; Mathur *et al.*, 1993 ; Schnitzer *et al.*, 1993). Le Q4/6 est compris entre 6 et 8,5 pour les acides fulviques, contre 2,2 à 5 pour les acides humiques (Gobat *et al.*, 2003). Ces derniers diffèrent des précédents par des chaînes latérales plus courtes rattachées à un nucléus aromatiques plus important (Gobat *et al.*, 2003)

La matière humique est plus soluble dans des solvants basiques (Gobat *et al.*, 2003). Aussi, le taux d'extraction (Tx ext), qui correspond au rapport entre la quantité de substances organiques extraites en milieu alcalin (acides humiques et fulviques) et la quantité totale de substances organiques de compost, est aussi employé comme un indice caractérisant

l'évolution de la matière organique au cours du processus de compostage (Jiménez et Garcia, 1992 ; Forster *et al.*, 1993 ; Chefetz *et al.*, 1996 ; Chen *et al.*, 1996 ; Namkoong *et al.*, 1999). Cet indice décroît au cours du processus de compostage proportionnellement à la formation de substances humiques (Chen *et al.*, 1996)

L'indice d'humification AF/AH est souvent déterminé pour évaluer le degré de maturité du compost (Chefetz *et al.*, 1996 ; Chen *et al.*, 1996).

2.3.3. Caractéristiques biologiques

Au début du processus de compostage, les composés organiques facilement dégradables sont rapidement décomposés par les bactéries. Suite à l'**activité respiratoire** des microorganismes, la concentration en oxygène décroît fortement alors que celle en CO₂ augmente. L'intensité de l'activité microbienne diminue ensuite avec l'avancement de la dégradation des substances organiques, entraînant un décroissement de la quantité de CO₂ dégagée. Ainsi, la production de CO₂ peut être employée comme critère pour définir le degré de maturation (Seekins, 1996).

La **demande biologique de l'oxygène (DBO)** peut également être déterminée avec la mesure de la respiration microbienne (Jourdan, 1988 ; Lemaire et Roeber, 1996 ; Seekins, 1996 ; Lasardi *et al.*, 1997 ; Lasaridi et Stentiford, 1998). Cet indice représente la quantité de substances organiques facilement dégradables. Toutefois, la respiration ou la demande biologique de l'oxygène (DBO) d'un compost peuvent diminuer en raison de plusieurs facteurs. En effet, lorsque le compost est mûr et que les microorganismes ont consommé toute leur source de carbone, ou bien s'il y a un manque de disponibilité en carbone ou en azote dû à un mélange de matières organiques inapproprié ou d'une humidité insuffisante, ce qui empêche l'activité des microorganismes. Ainsi, la détermination de la maturité d'un compost à l'aide seulement de la respiration n'est pas assez fiable.

Le **potentiel d'auto-échauffement** des composts est un facteur parfois pris en compte pour caractériser leur degré de maturité (Jourdan, 1988 ; Richard et Zimmermann, 1995 ; Schleiss *et al.*, 2002 ; Weppen, 2002 ;). Toutefois, les mêmes réserves que pour la respiration peuvent être émises quand à la valeur des résultats obtenus. Entre autres, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre le potentiel d'auto-échauffement d'un compost et le risque de blocage de l'azote dans des essais de croissance des plantes (Ebertseder *et al.*, 1994).

L'activité microbienne des composts peut également être définie en mesurant leur **activité enzymatique**, comme celle des déshydrogénases ou celle de l'ammonification de l'arginine (Forster *et al.*, 1993). Ces mesures sont influencées entre autres par les rapports C/N et NO₃-N/NH₄-N, ce qui rend l'interprétation des analyses de l'activité enzymatique relativement difficile.

Tab. 2.4. Paramètres d'évaluation de la qualité des composts (Fuchs *et al.*, 2004b)

Paramètre	Priorité	Indication sur	Important pour
Aspect, Structure	+	Degré de dégradation de la matière organique	Première appréciation
pH	++		Cultures de plantes en substrat
Δ pH après 5 heures	+	Stabilité et maturation	
Capacité d'échange cationique (C.E.C)	-	Capacité de stockage des éléments nutritifs	Capacité de stockage des éléments nutritifs
NH ₄ , NO ₃	++		Croissance des plantes
NH ₄ -N/NO ₃ -N	++	Potentiel redox, maturation	Minéralisation de l'azote
NO ₂	+	Phase chaude de compostage, contrôle de stockage	Phytotoxicité des plantes
Rapport C/N (totale)	+		Minéralisation (en gros)
C _{org} dans l'extrait aqueux	++	Stabilité de la matière organique	Immobilisation de N, germination
N _{org} dans l'extrait aqueux	++		Minéralisation N
C _{org} /N _{org} dans l'extrait aqueux	+	Maturation	
C/N dans l'extrait de K ₂ SO ₄	+	Maturation	Minéralisation N
Eléments minéraux solubles	++	La teneur en éléments minéraux	Croissance des plantes
Cellulose, lignine	-/+		Immobilisation de N
Acides organiques	-	Maturation du compost	Germination
Couleur de l'extrait	+	Stabilité de la matière organique	
Respiration microbienne	-	Activité des microorganismes	Minéralisation, stabilité de stockage
Autoéchauffement	-	Activité des microorganismes	Minéralisation, stabilité de stockage
Activités microbiologiques spécifiques	-	Activité des microorganismes	Activité des microorganismes

2.4. Influence des acides humiques du compost sur la croissance des plantes

Les effets bénéfiques de l'utilisation de composts sur la fertilité du sol reposent entre autres sur l'accumulation de carbone organique total et de carbone organique dans les fractions

d'humines, d'acides humiques et fulviques (Chen *et al.*, 1996 ; Zinati et Bryan, 2001 ; Gobat *et al.*, 2003). Ces acides humiques peuvent influencer positivement la croissance des plantes (Chen et Aviad, 1990 ; Chen *et al.*, 1992 ; Avinimelech *et al.*, 1993 ; Hoitink *et al.*, 1993 ; Chen *et al.*, 1994). La stimulation de la croissance des racines est généralement plus apparente que celle des pousses (Chen *et al.*, 1994).

Vaughan et Malcom (1985) ont observé une stimulation de la croissance du blé après l'addition d'acide humique dans l'eau ou dans une solution nutritive. L'addition d'acide fulvique dans une solution nutritive a provoqué une réaction atypique qui a conduit à une augmentation du poids des racines et des pousses de concombre. L'application par Chen *et al.* (1994) d'acides humiques provenant d'un extrait aqueux de compost de fumier et de marc de raisin a conduit à des résultats similaires sur les racines et les pousses de melon. Selon Chen et Aviad (1990), cet effet pourrait être dû entre autres à une amélioration de la disponibilité de la plupart des oligoéléments nutritifs suite à l'application des substances humiques. Ils divisent les raisons de l'effet bénéfique des substances humiques sur la croissance des plantes en deux classes : les effets directs (influence de la perméabilité des membranes, stimulation de la synthèse des protéines, effet hormonal, accroissement de la photosynthèse, influence des activités enzymatiques) et les effets indirects (solubilisation des oligoéléments, réduction de la toxicité des certaines molécules, stimulation de l'activité microbienne). De plus, l'effet général des composts sur les caractéristiques physiques et chimiques des sols créent des conditions plus favorables pour la croissance des plantes (Pettit, 2002)

Deux autres caractéristiques intéressantes des substances humiques représentent leur effet positif sur la germination des semences et des jeunes plants (Ayuso *et al.*, 1996) et le fait qu'elles soient de bons engrais foliaires (Chen *et al.*, 1994 ; Pettit, 2002). En effet, les acides humiques et fulviques en combinaison avec d'autres éléments nutritifs appliqués sur les feuilles peuvent améliorer la croissance des plantes (Chen *et al.*, 1994 ; Pettit, 2002).

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

Le compost peut agir directement et indirectement sur la santé des plantes. Son action indirecte est due entre autres à son influence sur la structure du sol et sur son apport équilibré en éléments nutritifs, en particulier les micro-éléments. Epstein *et al.* (1976) ont pour leur part observé une influence positive de la photosynthèse des strates végétales par une augmentation du CO₂ dans la première couche d'air au-dessus du sol. Cette augmentation est causée par le

gaz carbonique qui est dégagé au fur et à mesure de la minéralisation du compost par les microorganismes du sol.

Toutefois, l'action directe du compost sur la santé des plantes est probablement plus importante que l'action indirecte. Elle est due essentiellement à sa microflore bénéfique, et peut se traduire par une réduction des maladies aussi bien telluriques que foliaires (Hoitink et Grebus, 1994). Tous les composts ne possèdent cependant pas le potentiel de protéger les plantes contre les maladies (Fuchs et Larbi, 2004 et Hoitink *et al.*, 1997).

Plusieurs facteurs influencent l'effet phytosanitaire des composts. L'auto-échauffement de la matière organique au début du processus de compostage est important pour l'hygiénisation naturelle du compost, c'est-à-dire pour l'éradication des agents pathogènes et des mauvaises herbes. Lorsque la phase de maturation est conduite de manière optimale, une population de microorganismes bénéfiques se développe (Fuchs, 2002). Suivant les cas, après leur phase chaude une inoculation contrôlée des composts, avec des agents biologiques choisis, peut s'avérer nécessaire pour obtenir un potentiel suppressif stable à l'échelle commerciale (Hoitink *et al.*, 1991; Phae *et al.*, 1990 ; Grebus *et al.*, 1993).

Un compost de bonne qualité peut être utilisé avec succès dans le contrôle biologique des maladies entre autres dans les cultures maraîchères (Fuchs, 2002 ; Fuchs et Larbi, 2004 ;) et dans l'horticulture, en particulier pour les cultures hors sol (Inbar *et al.*, 1993). Toutefois, certains composts d'une qualité non appropriée peuvent favoriser le développement d'agents pathogènes.

2.5.1. Influence du compost sur les maladies telluriques

L'influence du compostage sur les phytopathogènes ne se limite pas à leur destruction. Pendant ces processus, une population de microorganismes antagonistes peut s'y développer, ce qui confère au compost la capacité de protéger les plantes contre les maladies telluriques. De nombreux travaux en témoignent (tab. 2.5). Ces effets protecteurs ne se limitent pas à de simples observations au laboratoire, mais leur efficacité a souvent été observée dans la pratique. L'utilisation d'un compost à base de fumier a pu réduire d'environ 80 % à 90 % la maladie du gazon de golf « Dollar Spot » causée par le champignon *Sclerotinia homeocarpa* (Block, 1997).

Widmer *et al.* (1998) ont aussi constaté que l'apport de compost d'ordures ménagères (compost de cuisine) a protégé des boutures d'agrumes contre *Phytophthora nicotiana*. Toutefois, une quantité de compost trop importante peut avoir une influence négative sur la croissance des plantes, probablement à cause d'une teneur en sels trop élevée. Tous les composts ne possèdent pas le même potentiel à protéger les plantes contre les maladies

(Volland et Epstein, 1994 ; Craft et Nelson, 1996 ; Hoitink *et al.*, 1997 ; Dissanayake et Hoy, 1999, Fuchs, 2000, Fuchs et Larbi, 2004). La forte variabilité des effets observés entre différents échantillons est assurément le plus gros écueil à l'utilisation des composts à large échelle pour des mesures ciblées de protection des plantes (Nelson et Boehm, 2002). La production de composts possédant des qualités définies et durables est une nécessité pour satisfaire les attentes des utilisateurs.

Hoitink *et al.* (1997) différencient deux types de mécanismes biologiques contrôlant les infections: la suppressivité « spécifique » et la suppressivité « générale » des composts contre les maladies telluriques. La compétition entraîne une suppression de type «générale», efficace par exemple contre *Pythium* et *Phytophthora* spp. (Chen *et al.*, 1988a et 1988b ; Boehm *et al.*, 1993 ; Mandelbaum et Hadar, 1990; Hardy et Sivasithamparam, 1991 ; Fuchs et Larbi, 2004). Dans les autres cas, le phénomène est souvent plus ciblé, est dû à un groupe restreint d'antagonistes; on parle alors de suppression de type «spécifique». Comme exemple, on peut citer les mécanismes de suppression de *Rhizoctonia solani* dans les cultures hors sol amendées avec du compost (Hoitink *et al.*, 1991), où des *Trichoderma* spp., sont les principaux antagonistes (Kuter *et al.*, 1983 ; Nelson *et al.*, 1983).

D'après ces auteurs, les mécanismes de suppressivité impliqués reposent sur les interactions microbiologiques, à savoir la concurrence pour les nutriments (Chen *et al.*, 1988a et 1988b ; Theodore et Toribio, 1995 ; Boehm *et al.*, 1993 ; Hoitink *et al.*, 1993 et 1997 ; Fuchs et Larbi, 2004), la synthèse de substances antibiotiques (Nelson *et al.*, 1983 ; Theodore et Toribio, 1995 ; Craft et Nelson, 1996), l'hyperparasitisme (Kuter *et al.*, 1983 ; Nelson *et al.*, 1983 ; Hoitink et Fahy 1986) et l'induction de résistance chez la plante hôte (Fuchs, 2002 ; Zhang *et al.*, 1997 et 1998 ; Horst *et al.*, 2005).

De façon similaire, Fuchs (2002) distingue des mécanismes de suppression quantitatifs (au lieu de généraux) et qualitatifs (au lieu de spécifiques). Il postule en effet que les premiers sont principalement dus à la quantité très importante de microorganismes apportés avec les composts jeunes, microorganismes qui concurrencent par leur nombre les agents pathogènes. En opposition, il décrit la suppression qualitative comme une suppression due à moins de microorganismes, mais à des microorganismes qui sont des antagonistes plus efficaces, ceux-ci étant sélectionnés naturellement pendant le processus de compostage. L'action de ces microorganismes antagonistes peut être basée sur des relations d'hyperparasitisme ou sur la production de substances antibiotiques.

Les mécanismes de protection impliqués peuvent varier selon l'organisme ciblé. Par exemple le traitement à la chaleur d'un compost d'ordures ménagères lui fait perdre sa capacité à protéger les plantes contre *Rhizoctonia solani* alors que son efficacité contre *Fusarium* sp. n'en est guère diminuée (Cohen *et al.*, 1998). L'inhibition de *R. solani* semble donc être le fait de microorganismes alors que celle de *Fusarium* sp. est probablement provoquée par des substances fongistatiques résistantes à la chaleur (Cohen *et al.*, 1998).

En général, le mécanisme de protection principal contre les maladies de plantes semble clairement dépendre de l'activité microbienne des composts (Hoitink *et al.*, 1993 et 1997 ; Nelson et Hointik, 1983 ; Tilston *et al.*, 2002). De nombreux travaux de recherche montrent qu'un traitement du compost par la chaleur annihile sa microflore, et par conséquent réduit à néant ses effets suppressifs (Nelson et Hointik, 1983 ; Trillas-Gay *et al.*, 1986 ; Brunner et Seemuller, 1993 ; Hadar et Mandelbaum, 1986 ; Hardy et Sivasithamparam, 1991 ; Theodore et Toribio, 1995 ; Serra *et al.*, 1996 ; Ringer *et al.*, 1997 ; Tilston *et al.*, 2002 ; Fuchs, 2002). Il n'existe que peu de cas où le compost garde sa faculté suppressive après stérilisation (Filippi et Bagnoli, 1992 ; Cohen *et al.*, 1998).

Alors que de nombreux auteurs ont montré une corrélation entre l'activité microbienne, mesurée par la vitesse d'hydrolyse de di-acétate fluorescent (FDA) et son pouvoir suppressif (Chen *et al.*, 1988a; Mandelbaum et Hadar, 1990 ; Boehm et Hoitink, 1992 ; You et Sivasithamparam, 1994 ; Bruns *et al.*, 1996 ; Craft et Nelson, 1996 ; Dissanayake et Hoy 1999; Inbar *et al.*, 1999 ; Diab *et al.*, 2003), certains ont pu mettre en évidence l'importance des microorganismes spécifiques comme *Trichoderma asperellum* contre la fusariose de Tomate (Cotxarrera *et al.*, 2002), *Acromonium* sp. contre le pathogène parasité *Phytophthora nicotianae* (Widmer *et al.*, 1998), *Bacillus subtilis* (Phae *et al.*, 1990) ; *Aspergillus* sp., *Geotrichum* sp. et *Pythium* sp. (Theodore et Toribio, 1995). Divers antagonistes efficaces ont également été isolés à partir de composts d'écorces, comme: *Trichoderma* sp., *Gliocladium* sp., *Penicillium* sp., *Mortierella* sp., *Paecilomyces* sp., *Geomyces* sp., *Ophiostoma* sp., *Bacillus* spp., *Enterobacter* spp., *Pseudomonas* spp., *Streptomyces* spp., et *Penicillium* spp., (Kuter *et al.*, 1983 ; Nelson *et al.*, 1983 ; Hoitink et Fahy, 1986 ; Phae *et al.*, 1990 ; Chung et Hoitink, 1990 ; Hoitink *et al.*, 1997). *Trichoderma hazianum* et *Trichoderma hamatum* ont été les deux champignons antagonistes les plus fréquemment isolés (Nelson *et al.*, 1983 ; Kuter *et al.*, 1983 ; Trillas-Gay *et al.*, 1986).

Tab. 2.5. Exemples de maladies telluriques dont l'incidence est réduite par l'apport de composts (Liste non exhaustive).

Agents pathogènes	Plantes hôtes	Références bibliographiques
<i>Pythium</i> sp	Agrostis	Nelson et Boehm, 2002
<i>Pythium graminicola</i>	Agrostis	Craft et Nelson, 1996
<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp.vasinfectum	Coton	Cohen <i>et al.</i> ,1998
<i>Rhizoctonia solani</i>	Coton	Cohen <i>et al.</i> ,1998;Walter <i>et al.</i> , 1995
<i>Rhizoctonia solani</i>	Haricot	Lumsden <i>et al.</i> ,1983
<i>Plasmodiophara brassicae</i>	Chou chinois	Tilston <i>et al.</i> , 2002
<i>Phytophthora nicotiana</i>	Citrus	Widmer <i>et al.</i> ,1998
<i>Aphanomyces euteiches</i>	Pois	Lumsden <i>et al.</i> ,1983;Walter <i>et al.</i> ,1995
<i>Phoma medicaginis</i>	Pois	Tilston <i>et al.</i> , 2002
<i>Pythium ultimum</i>	Pois	Bruns <i>et al.</i> ,1996
<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp.melonis	Concombre	Lumsden <i>et al.</i> ,1983
<i>Pythium</i> sp.	Concombre	Theodore et Toribio, 1995
<i>Pythium aphanidermatum</i>	Concombre	Hadar et Mandelbaum, 1986
<i>Pythium ultimum</i>	Concombre	Ben et Nelson 1999;Fuchs 1995c; Ringer <i>et al.</i> ,1997 ; Rogger, 1996
<i>Rhizoctonia solani</i>	Concombre	Ringer <i>et al.</i> ,1997
<i>Phytophthora fragariae</i> f.sp.rubi	Framboise	Brunner et Seemuller, 1993;Neuweiler et Heller, 1998
<i>Rhizoctonia solani</i>	Impatiante	Diab <i>et al.</i> , 2003
<i>Verticillium dahliae</i>	Pommes de terre	Gent <i>et al.</i> ,1999;LaMondia <i>et al.</i> ,1999
<i>Plasmodiophara brassicae</i>	Chou	Ryckeboer et Coosemans 1996
<i>Pythium ultimum</i>	Cresson	Erhart <i>et al.</i> ,1999; Fuchs, 2002
<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp.lini	Lin	Serra <i>et al.</i> ,1996
<i>Phytophthora cinnanomi</i>	Lupin	Hoitink <i>et al.</i> , 1997;Tuitert <i>et al.</i> ,1996
<i>Rhizoctonia solani</i>	Gazon	Nakasaki <i>et al.</i> , 1998;Nakasaki <i>et al.</i> ,1996
<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp.dianthi	Oeillet	Pera et Filippi, 1987
<i>Phytophthora capsici</i>	Poivron	Lumdsen <i>et al.</i> ,1983
<i>Pythium ultimum</i>	Radis	Ringer <i>et al.</i> ,1997
<i>Rhizoctonia solani</i>	Radis	Lumdsen <i>et al.</i> , 1983;Nelson et Hoitink 1983; Ringer <i>et al.</i> ,1997;Volland et Epstein, 1994
<i>Sclerotinia homeocarpa</i>	Gazon	Block, 1997
<i>Rhizoctonia solani</i>	Salade	Fuchs, 1995c; Fuchs, 2002;Rogger, 1996
<i>Sclerotinia minor</i>	Salade	Lumdsen <i>et al.</i> , 1983
<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp.lycopersici	Tomate	Cotxarrera <i>et al.</i> , 2002;Harender <i>et al.</i> ,1997
<i>Phytophthora parasitica</i>	Tomate	Bruns <i>et al.</i> ,1996
<i>Pyrenochaeta lycopersici</i>	Tomate	D'Amore <i>et al.</i> , 1998
<i>Phytophthora</i> sp	Plantes diverses	Hardy et Sivasithamparam, 1991
<i>Fusarium culmorum</i>	Blé	Tilston <i>et al.</i> , 2002
<i>Gaeumannomyces graminis</i>	Blé	Tilston <i>et al.</i> , 2002
<i>Pseudocercosporella herpatrichoides</i>	Blé	Tilston <i>et al.</i> , 2002
<i>Rhizoctonia solani</i>	Blé	Tilston <i>et al.</i> , 2002
<i>Phytophthora nicotiana</i>	Agrumes	Widmer <i>et al.</i> , 1998
<i>Pythium arrhenomanes</i>	Canne à sucre	Dissanayake et Hoy, 1999
<i>Botrytis cinerea</i>	Bégonia	Horst <i>et al.</i> , 2005

L'activité microbiologique d'un compost, sa population microbienne ainsi que sa capacité à inhiber les maladies dépendent de l'état physiologique de celui-ci. Ainsi de nombreux auteurs ont rapporté que le compost prélevé de la zone chaude d'un andain est moins actif dans la protection des plantes en comparaison avec des échantillons issus de la zone froide (Chen *et al.*, 1987 ; Chen *et al.*, 1988a ; Hadar et Mandelbaum, 1988; Chung et Hoitink, 1990). Le stockage du compost prélevé de la zone chaude pendant quelques semaines permet toutefois à ses antagonistes naturels de se développer, le compost devenant alors également suppressif (Chen *et al.*, 1988b). Dans certains cas, les composts agissent directement contre les pathogènes, en empêchant leur développement ou en les détruisant (Hoitink *et al.*, 1977 ; Theodore et Toribio, 1995). Dans d'autres cas, le compost n'influence la population de pathogène qu'en présence de la plante hôte (Chen *et al.*, 19987).

Outre l'activité microbienne des composts, certaines de leurs caractéristiques chimiques peuvent aussi contribuer à leur potentiel suppressif (Tilston *et al.*, 2002). Par exemple, la baisse de la concentration en carbone dans le compost est corrélée avec l'augmentation de son potentiel suppressif (Chen *et al.*, 1988a). Les substrats très suppressifs se reconnaissent souvent à leur faible disponibilité en éléments nutritifs et à leur population importante et fortement active de microorganismes mésophytes (Chen *et al.*, 1988b). La teneur en nitrates des composts semble aussi avoir une certaine influence sur son potentiel suppressif. Ringer *et al.* (1997) ont observé des symptômes aggravés de *Pythium* dans les sols contenant plus de nitrates. Un résultat semblable a été trouvé pour l'œillet (Filippi et Bagnoli, 1992). Il est probable que cela vienne du fait qu'une teneur élevée en azote favorise le développement de la maladie, rendant l'effet suppressif moins efficace. Cette supposition est confirmée par les essais de Filippi et Bagnoli (1992), qui ont montré que l'incorporation d'un engrais azoté facilement assimilable peut diminuer l'effet suppressif des composts.

Deux facteurs peuvent également jouer un rôle dans l'effet positif sur la santé des plantes. D'une part, l'amélioration des caractéristiques physiques du sol favorise la croissance des plantes et les rend ainsi plus résistantes (Widmer *et al.*, 1998). D'autre part, certaines substances se trouvant dans le compost peuvent également avoir un effet direct sur les agents pathogènes. Par exemple, l'emploi d'un compost d'écorces dans un biotest cresson-*Pythium ultimum* a montré une corrélation entre la teneur en phénol et la suppressivité. (Erhart *et al.*, 1999).

Enfin, le compost agit vraisemblablement autant à travers son activité microbienne intrinsèque que par la stimulation des activités microbiennes du sol (Nelson et Boehm, 2002). Des apports en compost augmentent l'effet suppressif existant contre *Fusarium oxysporum*

f.sp. *lini* sur le lin. Cet effet est proportionnel à la quantité de compost administrée (Serra *et al.*, 1996). Du compost autoclavé exerce le même effet dans un sol non traité, mais pas dans un sol autoclavé. On peut ainsi conclure que l'activation directe de la microflore saprophyte naturelle du sol est responsable de l'effet protecteur des plantes.

2.5.2. Facteurs influençant les caractéristiques suppressives des composts

Le potentiel suppressif des composts varie considérablement d'un compost à l'autre (Nelson et Boehm, 2002). Afin de pouvoir envisager une application pratique des composts pour prévenir les maladies, il est important d'abord de comprendre quels facteurs influencent cette activité suppressive afin de pouvoir les contrôler.

L'importance de la **composition des intrants** a été étudiée par divers auteurs (Trillas-Gay *et al.*, 1986 ; Hoitink et Fahy, 1986 ; Chung *et al.*, 1988a ; Chung et Hoitink, 1990 ; Brunner et Seemuller, 1993 ; Walter *et al.*, 1995 ; Erhart *et al.*, 1999 ; Ringer *et al.*, 1997 ; Hoitink *et al.*, 1997). Jusqu'à présent, aucune tendance uniforme à ce sujet n'a pu être observée. Harender *et al.* (1997) ont provoqué une différence dans le potentiel de protection de tomates contre le flétrissement de *Fusarium* après l'emploi de composts provenant de différentes origines végétales. Il est toutefois probable que la composition n'influe en réalité qu'avec ses propriétés physico-chimiques. Ainsi, des composts riches en sels peuvent stimuler le développement de certaines *Phytophthora* spp. (Hoitink et Grebus, 1994), alors que certaines maladies causées par divers agents pathogènes (*Phytophthora*, *Fusarium*, *Erwinia*) sont favorisées par des rapports C/N faibles comme ceux des composts obtenus exclusivement de boues d'épuration (Hoitink and Fahy, 1986).

Ringer *et al.* (1997) ont comparé l'effet de composts provenant de différents types de fumier. Ils ont constaté que tous les composts sont révélés suppressifs contre *P. ultimum* et *R. solani*. Bien que peu de variation dans l'effet de protection des plantes contre *R. solani* a été observé, les composts de fumier de bovins se montrent plus efficaces contre *P. ultimum* que ceux de fumiers de cheval, le plus efficace étant le compost de fumier de poule. Dans ce cas, l'effet suppressif contre *P. ultimum* ne semblait pas dû à la population microbienne des composts, mais était inversement proportionnel à sa teneur en NO_3^- (Ringer *et al.*, 1997). On peut en conclure que le **degré de maturité physiologique des composts** est un facteur important pour leurs pouvoirs suppressifs.

Le tamisage du compost influence son pouvoir suppressif, la composition microbienne variant considérablement entre **les fractions de compost**. Tilston *et al.*, (2002) ont montré que le compost a perdu sa capacité de protection après son tamisage à travers un tamis à mailles de 4

mm. Ces auteurs ont également signalé que le compost tamisé finement montre une faible quantité en carbones extractibles et en lignine, et qu'il héberge significativement moins de *Trichoderma* spp, raison pour laquelle son potentiel suppressif est plus faible.

L'effet suppressif des composts est généralement proportionnel à **la quantité de compost incorporé dans le sol** (Serra *et al.*, 1996 ; Fuchs, 2002). Toutefois, l'influence de la quantité de compost employée est moins importante dans un substrat stérile (Walter *et al.*, 1995)

Comme mentionné plus haut, **le degré de maturation** du compost semble jouer un rôle déterminant sur son pouvoir suppressif (Chef *et al.*, 1983 ; Kuter *et al.*, 1988 ; Grebus *et al.*, 1994 ; Hoitink et Grebus, 1994 ; Fuchs 1996 ; Hoitink *et al.*, 1997 ; Cohen *et al.*, 1998 ; Ceuster *et al.*, 1999 ; Erhart *et al.*, 1999 ; Tilston *et al.*, 2002). Par exemple, *Rhizoctonia solani*, qui est hautement compétitif comme saprophyte (Garrett, 1962), peut utiliser la cellulose pour coloniser du compost frais, mais n'arrive pas à se développer fortement dans un compost mûr à faible teneur en cellulose (Chung *et al.*, 1988). *Trichoderma* sp., agent antagoniste efficace contre *Rhizoctonia solani*, est certes également capable de coloniser du compost frais, mais est plus compétitif vis-à-vis *Rhizoctonia solani* dans un compost plus mûr (Nelson *et al.*, 1983 ; Chung *et al.*, 1988a), car il peut également s'attaquer efficacement à la lignine. Cela explique en partie pourquoi les composts plus mûrs sont souvent plus efficaces pour protéger les plantes contre *Rhizoctonia* sp.. Les composts très jeunes montrent en général un effet suppressif très faible (Chef *et al.*, 1983 ; Kuter *et al.*, 1988 ; Grebus *et al.*, 1994 ; Craft et Nelson 1996 ; Ceuster *et al.*, 1999 ; Erhart *et al.*, 1999). Des taux très élevés en substances nutritives et énergétiques (glucose et acides aminés, etc.) provenant de matériaux organiques peuvent inhiber la synthèse d'enzymes essentiels chez les organismes antagonistes (Ceuster *et al.*, 1999), ou représentent une source d'alimentation pour les pathogènes et par conséquent les favorisent (Hoitink et Grebus, 1994 ; Tuitert *et al.*, 1996).

En général, le potentiel suppressif des composts augmente avec leur maturité (Chef *et al.*, 1983 ; Kuter *et al.*, 1988 ; Hoitink et Grebus, 1994 ; Craft et Nelson, 1996 ; Fuchs, 1996 ; Ryckerboer et Coosemans, 1996 ; Erhart *et al.*, 1999). Toutefois, lorsque un certain seuil de maturité est dépassé, l'activité microbienne décroît et le compost perd de son effet suppressif (Boehm *et al.*, 1993 ; Hoitink et Grebus, 1994 ; Hoitink *et al.*, 1997 ; Tilston *et al.*, 2002).

Certains cas ont cependant été observés, où exceptionnellement les composts jeunes étaient plus efficaces que les composts mûrs. Ainsi, il a été possible de protéger avec succès des plantes de choux de l'attaque de *Plasmodiophora brassicae* avec un compost jeune,

(Ryckeboer et Coosemans, 1996), et cet effet protecteur diminuait avec l'augmentation du degré de maturité.

Différentes mesures ont été testées afin d'augmenter le potentiel suppressif du compost et/ou d'en garantir une qualité stable. Chung *et al.* (1988a) ainsi que Hoitink et Grebus (1994), considéraient que les antagonistes, exceptés *Bacillus* spp., étaient tués pendant la phase chaude de compostage et devaient recoloniser le compost pendant la phase de maturation. Afin de garantir la qualité des composts produits, ces auteurs ont procédé avec succès à **l'inoculation ciblée d'antagonistes sélectionnés** comme *Trichoderma harzianum*, après la phase chaude (Nelson *et al.*, 1983 ; Chung et Hoitink, 1990). Cette inoculation peut toutefois s'avérer difficile si la microflore indigène du compost est trop concurrentielle (Chung et Hoitink, 1990). L'inoculation ciblée du champignon antagoniste *Verticillium biguttatum*, mycoparasite de *Rhizoctonia solani*, a pu augmenter significativement la protection contre la maladie de la Betterave à sucre provoquée par ce pathogène (Postma *et al.*, 2000). De même, un apport de l'antagoniste *Bacillus subtilis* N4, isolé à partir de composts d'herbe, a permis de lutter contre la maladie du gazon causée par *Rhizoctonia* sp. (Nakasaki *et al.*, 1998). Kwok *et al.* (1987) ont également réussi à protéger les plantes de radis contre *Rhizoctonia solani* après l'incorporation de bactéries antagonistes dans un mélange de substrat. Ces mêmes bactéries ont cependant pu s'établir plus facilement dans un compost d'écorces stériles que dans un compost suppressif d'écorces, confirmant ainsi les observations de Chung et Hoitink (1990).

Une autre possibilité est de stimuler de façon ciblée un groupe de microorganismes indigènes en y incorporant un aliment spécifique, comme des déchets de crabes pour favoriser les microorganismes attaquant la chitine (Roy *et al.*, 1997). Fuchs (2003, communication personnelle) a indiqué que **l'addition de matériel riche en lignines** pendant la phase de maturation, comme par exemple les fibres de chanvre au lieu de la tourbe, augmente clairement le potentiel suppressif des composts. Cet effet est probablement dû à la stimulation de la population de *Trichoderma* spp., car ces champignons sont impliqués dans la décomposition de la lignine.

2.5.3. Effets à long terme et applications pratiques

De nombreux travaux confirment que les effets positifs des composts sur la santé des plantes ne sont pas uniquement des phénomènes de laboratoire, mais sont également observables dans la pratique (Pera et Filippi, 1987 ; Steffen *et al.*, 1994 ; Gur *et al.*, 1996 ; Gent *et al.*, 1998 ; Neuweiler et Heller, 1998 ; Widmer *et al.*, 1998 ; LaMondia *et al.*, 1999 ; Fuchs, 1995 et 2002). Le problème des moisissures apparaissant dans les cultures de jeunes pousses (cresson,

salade, haricot,..) a pu être résolu en ajoutant 20 à 30 % de compost de qualité au substrat (Fuchs, 2002). De même, la maladie de la pourriture des racines de framboise causée par le pathogène *Phytophthora fragariae* var. *rubi* a pu être combattue efficacement grâce à l'apport de compost de déchets de jardin dans les cultures (Neuweiler et Heller, 1998). L'effet compost en plein champ n'est cependant pas toujours spécifique, comme dans le cas des framboisiers, mais la croissance et la santé des plantes peuvent être favorisées de manière globale. Ainsi, Gent *et al.* (1998) ont pu accroître significativement la quantité de pommes de terre commercialisables par un apport de fumier de champignonnière. Des effets semblables ont été observés par Steffen *et al.* (1994) sur diverses cultures maraichères et par Widmer *et al.* (1998) sur des agrumes. En Suisse, où le bromure de méthyle est interdit depuis plusieurs dizaines d'années, le compost est appliqué avec succès après la stérilisation du sol à la vapeur, afin de le réactiver biologiquement, d'accroître l'efficacité du traitement et de garantir sa durabilité (Fuchs 2002). Ainsi, les composts peuvent offrir une alternative aux traitements au bromure de méthyle. Mais pour que cette méthode soit efficace, il faut prêter une attention particulière à la qualité des composts. Les paramètres importants sont le bilan azoté, la maturité et la stabilité, ainsi que le moment de l'application (Ceuster *et al.*, 1999).

L'effet positif en plein champ repose probablement sur plusieurs facteurs : la fertilisation des plantes, l'amélioration de la structure du sol, la stimulation de l'activité microbienne du sol, ou l'activité des microorganismes du compost lui-même (Craft et Nelson, 1996). L'effet du compost est d'autant plus évident lorsque le sol est déséquilibré ou cultivé de manière très intensive (Compost-Diffusion et sol-conseils, 1999; Fuchs, 1995 ; Fuchs, 2002).

Cet effet bénéfique sur la santé des plantes est un des facteurs qui différencie le compost des autres matériaux organiques. Par exemple, LaMondia *et al.* (1999) ont démontré que les symptômes causés par *Verticillium dahliae* et *Pratylenchus penetrans* sur la pomme de terre ont pu être réduits par l'adjonction de compost de fumier de champignons, mais non pas par de la paille.

Tous les composts protégeant les plantes en laboratoire ne montrent cependant pas la même efficacité aux champs. Dans un essai mené sous serre, l'emploi de compost d'écorce de peuplier a protégé l'œillet contre *Fusarium oxysporum* f.sp. *dianthi* dans un sol déjà infecté, alors que son utilisation au champ, dans le même sol, n'a pas montré d'effet protecteur (Pera et Filippi, 1987). Il est possible que les facteurs de croissance (température, humidité relative de l'air, capacité de rétention de l'eau, etc.) jouent un rôle déterminant sur l'efficacité du compost contre les maladies des plantes (Pera et Filippi, 1987). Dans certains cas, l'effet

contraire a été observé. Ainsi, l'amendement de fientes de dindons était plus suppressif aux champs que dans les essais en pots (Pera et Filippi, 1987). Dans ce cas, il est probable que, dans les pots, la teneur élevée en ammonium était toxique pour les microorganismes du compost ou pour les plantes. Par contre, aux champs, l'ammonium est rapidement nitrifié ou dissipé.

2.6. Influence des extraits de composts sur les maladies foliaires

2.6.1. Principes généraux

Outre l'effet suppressif des composts sur les maladies telluriques, les extraits aqueux de composts peuvent aussi avoir des effets positifs contre les maladies foliaires (Scheuerell et Mahaffe, 2002; Weltzien, 1992). De nombreux travaux relatant ces effets sont illustrés dans le tableau 2.6.

Les extraits de composts se différencient par deux techniques de production principale : les extraits produits en aérobie (généralement nommés « thé de compost ») et ceux produits en condition anaérobie (Scheuerell et Mahaffe, 2002). L'étude de la bibliographie à ce sujet n'est cependant pas toujours claire, certains auteurs n'utilisant pas de manière conséquente ces dénominations (Scheuerell et Mahaffe, 2002). De plus, les avis des auteurs varient sur l'efficacité de ces extraits.

D'après Ingham (1999), un approvisionnement suffisant en oxygène est nécessaire afin d'éviter la toxicité des métabolites présents dans l'extrait. Par contre, Brinton *et al.* (1996) considèrent que l'aération n'est pas nécessaire, et Cronin *et al.* (1996) ont observé que les extraits de composts aérés étaient moins efficaces que ceux non aérés.

D'après Brinton *et al.* (1996) et Ketterer *et al.* (1992), l'application des extraits de composts doit être effectuée de façon préventive. Leur influence est efficace à court terme, alors que celle du compost est plus lente mais plus durable. Ainsi, une utilisation combinée de composts et d'extraits de composts paraît sensée (Brinton *et al.*, 1996).

2.6.2. Choix des composts

La question du choix des meilleurs composts pour la fabrication des extraits n'a pas été clarifiée, car plusieurs contradictions existent encore. Généralement, les extraits de composts provenant de composts de fumier sont souvent décrits comme étant les plus efficaces contre les pathogènes (Weltzien, 1992). Ketterer *et al.* (1992) ont pour leur part également observé une meilleure protection des feuilles de vigne contre *Botrytis cinerea* avec des extraits de

compost de fumier qu'avec un extrait de marc de raisin. Le même effet a été observé dans les systèmes plante-pathogène suivants : Haricot-*Erysiphe polygoni* et Tomate-*Phytophthora infestans* (Ketterer et Schwager, 1992). Les extraits de composts de déchets verts se révèlent nettement moins efficaces que les extraits de composts de fumier de bovin et de poule (Nelson et Boehm, 2002). Par contre, Elad et Shtienberg (1994) ont montré que pour protéger des poivrons contre *Botrytis* sp., des extraits de composts de marc semblent plus efficaces que ceux de composts fabriqués à partir de fumier de mouton ou d'un mélange de fumier de mouton et de fientes de poule.

Outre la composition des matériaux de départ, le degré de maturité du compost semble également jouer un rôle dans l'efficacité de l'extrait (Tränkner, 1991 ; Dittmer *et al.*, 1990 et Dittmer, 1991). Sur ce sujet également, les données bibliographiques sont maigres. Il semble cependant que les composts stockés depuis longtemps, et physiologiquement stabilisés, se montrent moins efficaces que les composts plus jeunes. (Yohalem *et al.*, 1994 et 1996). Ainsi, l'effet du degré de maturité sur l'efficacité de l'extrait de compost dépend des matériaux de départ et des conditions de stockage (Scheuerell et Mahaffee, 2002).

2.6.3. Mécanismes d'actions des extraits de composts

Les effets d'extraits de compost sur l'équilibre microbien de la phyllosphère ont été décrits à maintes reprises. Des corrélations claires ont été mises en évidence entre l'activité microbienne de la phyllosphère et la suppression des maladies (Ketterer et Schwager, 1992). Selon Brinton *et al.* (1996), les extraits de composts influencent la phyllosphère grâce à leur population microbienne. L'effet protecteur est dû : à l'inhibition de la germination des spores, à des mécanismes d'antagonisme et de concurrence avec les agents pathogènes, ainsi qu'à l'induction de réactions de résistance dans les plantes hôtes.

Yohalem *et al.* (1996) ont constaté que la population bactérienne est au moins 10 fois plus élevée sur les feuilles traitées avec un extrait de compost alors que celle de champignons reste inchangée. Toutefois, ils n'ont pas pu mettre en évidence si cette augmentation de bactéries est due à l'apport d'éléments nutritifs ou à la quantité de bactéries apportée par l'extrait. Le fait que leur stérilisation n'a pas pour conséquence d'en réduire l'efficacité, parle en faveur de la thèse de l'apport de matières nutritives (Achim et Schlösser, 1991 ; Cronin *et al.* 1996 ; Elad et Shtienberg, 1994 ; Gross-Spangenberg, 1992). Cependant, Ketterer *et al.* (1992), ainsi que Weltzien (1992) ont réussi à isoler les différents microorganismes qui ont eux mêmes montré une efficacité *in vivo* contre *Botrytis cinerea* de la vigne. Ceci favorise la seconde thèse.

Ketterer (1990) et Weltzien *et al.* (1987) n'ont pas observé de forte inhibition directe des champignons parasites de plantes par des extraits de compost de fumier. Aussi concluent-ils qu'un mécanisme de résistance induite est plus vraisemblable qu'un effet fongicide. Par contre, de nombreux auteurs ont observé une inhibition directe de la germination des sporanges ou des conidies et une réduction de la croissance mycélienne de plusieurs champignons comme *Plasmopara viticola* (Achimou et Schlösser, 1991), *Venturia inaequalis* (Yohalem *et al.*, 1994 et 1996; Cronin *et al.*, 1996), *Botrytis cinerea* (Weltzien, 1992 ; McQuilken *et al.*, 1994), *Cochiobolus carborum* (Yohalem *et al.*, 1994), ainsi que *Sphaeropsis sapinae* (Yohalem *et al.*, 1994). Il est probable que différents mécanismes soient impliqués suivant les extraits, les plantes ou les pathogènes.

2.6.4. Résultats d'essais en plein champ

En laboratoire, Yohalem *et al.* (1994) ont pu protéger efficacement les plantules de pommier contre la maladie de la tavelure du pommier causée par *Venturia inaequalis* à l'aide d'extrait de compost de champignonnière. Cependant, cette protection s'est révélée insuffisante en plein champ, probablement en raison de la très forte pression de la maladie engendrée par les conditions atmosphériques. Lors d'un essai ultérieur, Yohalem *et al.* (1996) ont réussi, en traitant les pommier hebdomadairement avec des extraits de composts, à réduire de façon significative la tavelure sur les feuilles, mais pas sur les fruits.

Des applications réussies d'extraits de composts en plein champ ont toutefois été décrites sur la vigne. Ketterer (1990), Ketterer et Welzien (1987) et Weltzien (1992) ont obtenu un bon contrôle du rougeot (*Pseudopeziza tracheiphila*) ainsi que du mildiou et de l'oïdium de la vigne (*Plasmopara viticola* et *Uncinula necator*), après cinq et dix applications de l'extrait de compost de fumier de cheval. Le dernier auteur a aussi décrit une protection efficace des pommes de terre contre *Phytophthora infestans*, surtout lorsque les extraits de composts de fumier de cheval avaient été enrichis avec des microorganismes antagonistes. Il existe aussi un rapport concernant une utilisation réussie dans la culture de la fraise contre *Botrytis cinerea* après sept applications d'extrait de compost de fumier de cheval (Weltzien, 1992)

Plusieurs exemples d'applications réussies avec des extraits de composts sont aussi connus dans la culture maraîchère. Une application hebdomadaire d'extrait de compost de fumier de mouton sur des tomates a permis non seulement de réduire l'attaque d'*Alternaria solani*, mais aussi d'augmenter le rendement de la récolte (Tsrer et Bieche, 1998). Une réduction significative des dommages dus à *Botrytis* et à *Leveillula taurica* sur la tomate a été obtenue dans des cultures commerciales sous serre avec ce même d'extrait (Elad et Shtienberg, 1994).

Avec la même fréquence de traitements hebdomadaires, une réduction de l'incidence de *Botrytis* sur les salades n'a pas pu être observée mais en revanche une réduction de l'intensité de la maladie est notée, augmentant ainsi le nombre de salades commercialisables (McQuilken *et al.*, 1994).

Un autre exemple d'application réussie concerne le traitement des semences. Dans des essais en plein champ, une désinfection des semences de blé avec du lait maigre en poudre, de la farine de blé et de la poudre d'algue a réduit les attaques de la carie du blé (agent pathogène *Tilletia caries*). L'emploi d'extrait de compost comme agent adhésif a accru l'efficacité des préparations testées (Becker et Weltzien, 1993).

2.6.5. Accroissement de l'efficacité de l'extrait

Différentes méthodes ont déjà été testées afin d'augmenter l'action bénéfique des extraits de composts contre les maladies foliaires. Différentes sources nutritives ou amendements ont été utilisées à cet effet : molasse, varech, caséine, émulsion de poisson, extraits de plantes, microorganismes (Sheuerell et Mahaffe, 2002). Elad et Shtienberg (1994) n'ont trouvé aucune augmentation significative dans le contrôle de *B. cinerea* avec l'addition de bouillon de culture Difco. Par contre, l'adjonction de 0,5 % de caséine ou de 0,5 % de caséine plus 0,05 % d'huile d'aiguille de pin ont amélioré l'efficacité de l'extrait de compost de fumier, bien que ces substances seules ne montrent aucune action inhibitrice contre les maladies (Ketterer et Schwager, 1992 et Ketterer *et al.*, 1992). Gross-Spangenberg (1992) a pour sa part ajouté différentes substances nutritives à son extrait. Il a constaté que l'addition de peptone ou de poudre de lait écrémé n'a pas eu d'effet contre *Venturia inaequalis*. La plus forte réduction de la sévérité de *V. inaequalis* a été réalisée après l'addition de 5 % de saccharose sous forme de betterave à sucre en combinaison avec 0,5 % d'extrait de levure (bio-levure de bière). De même, l'ajout des éléments nutritifs complexes LMPG (0,3 % d'extrait de levure, 0,3 % d'extrait de malt, 0,5 % peptone, 0,5 % glucose) à l'extrait de compost de fumier de bovin et à l'eau après trois jours de fermentation a pu réduire significativement la sévérité de *V. inaequalis* des plantules de pommier.

L'enrichissement des extraits avec des cultures pures de microorganismes a permis d'accroître leur effet protecteur des tomates contre *Phytophthora infestans* (Ketterer, 1990). Un épandage de compost sur le sol et le traitement des feuilles avec des extraits de compost ont également protégé efficacement l'orge contre *Erysiphe graminis* f.sp. *hordei*. Un effet additif a été observé entre les deux méthodes (Budde et Weltzien, 1988).

D'après ces résultats, l'augmentation de l'efficacité des extraits suite à l'apport de substances nutritives et ou des microorganismes pourrait être expliquée par l'accroissement de la population microbienne antagoniste présente sur la phyllosphère de la plante hôte ou par renforcement du système de défense naturelle de la plante.

Tab. 2.6. Protection des plantes contre différentes maladies foliaires par application d'extraits de composts non aérés (Liste non exhaustive)

Agents pathogènes	Plantes hôtes	Références bibliographiques
<i>Plasmopara viticola</i>	Vigne	Achimu et Schlösser, 1991; Ketterer 1990; Ketterer et Weltzien, 1992; Weltzien <i>et al.</i> , 1987
<i>Phytophthora infestans</i>	Pommes de terre	Ketterer, 1990; Weltzien, 1992; Weltzien <i>et al.</i> , 1987
<i>Phytophthora infestans</i>	Tomate	Ketterer 1990; Ketterer et Schwager 1992; Tsrer et Bieche, 1998; Weltzien <i>et al.</i> , 1987
<i>Erysiphe betae</i>	Cannes à sucre	Weltzien <i>et al.</i> , 1987
<i>Botrytis fabae</i>	Haricot de champs	Weltzien <i>et al.</i> , 1987
<i>Venturia inequalis</i>	Pommier	Yohalem <i>et al.</i> , 1994; Yohalem <i>et al.</i> , 1996 ; Andrews, 1993
<i>Sphaeropsis sapinae</i>	Sapin	Yohalem <i>et al.</i> , 1994
<i>Cochiobolus carborum</i>	Maïs	Yohalem <i>et al.</i> , 1994
<i>Pythium sp</i>	Agrostide	Nelson et Boehm, 2002
<i>Botrytis cinerea</i>	Salade	McQuilken <i>et al.</i> , 1994
<i>Botrytis cinerea</i>	Vigne	Ketterer <i>et al.</i> , 1992
<i>Uncinula necator</i>	Vigne	Ketterer, 1990; Ketterer et Weltzien <i>et al.</i> , 1987; Weltzien, 1992 et 1989
<i>Pseudopeziza tracheiphila</i>	Vigne	Ketterer, 1990; Ketterer et Weltzien, 1987
<i>Erysiphe polygoni</i>	Haricot	Ketterer et Schwager, 1992
<i>Botrytis cinerea</i>	Haricot	McQuilken <i>et al.</i> , 1994 ; Urban et Tränkner, 1993
<i>Botrytis cinerea</i>	Laitue	McQuilken <i>et al.</i> , 1994
<i>Botrytis cinerea</i>	Fraise	Stindt, 1990
<i>Botrytis cinerea</i>	Tomate	Elad et Shtienberg, 1994
<i>Botrytis cinerea</i>	Poivron	Elad et Shtienberg, 1994
<i>Botrytis cinerea</i>	Vigne	Elad et Shtienberg, 1994 ; Ketterer <i>et al.</i> , 1992
<i>Alternaria solani</i>	Tomate	Tsrer, 1998
<i>Leveillula taurica</i>	Tomate	Elad et Shtienberg, 1994
<i>Erysiphe graminis</i>	Orge	Budde et Weltzien, 1998
<i>Tilletia caries</i>	Blé	Becker et Weltzien, 1993
<i>Sphaerotheca fuliginea</i>	Concombre	Samerski et Weltzien, 1988
<i>Sphaerotheca pannosa</i>	Rose	Scheuerell et Mahaffee, 2000
<i>Pseudomonas syringae</i>	Arabidopsis	Zhang <i>et al.</i> , 1998
<i>Xanthomonas campestris</i>	Tomate	Al-Dahmani et Hoitink, 1999

2.7. Compost et induction de résistance

L'application de compost dans le sol ne permet pas seulement de protéger les plantes contre les maladies telluriques, mais peut également permettre de renforcer l'état sanitaire global des plantes. Par exemple, Zhang *et al.* (1997) ont montré que des plantes d'*Arabidopsis* croissant dans un substrat contenant du compost étaient nettement moins attaquées par *Pseudomonas syringae* que des plantes cultivées dans de la tourbe. De même, Fuchs (2002) a décrit des amendements de composts qui peuvent permettre de diminuer les attaques d'oïdium sur des plantes d'orge, alors que Hoitink *et al.* (1997) et Zhang *et al.* (1997 et 1998) ont aussi pu réduire les attaques de l'antracnose du concombre. D'autre part, le fait de traiter la moitié des racines de concombre avec du compost permet d'induire à l'autre moitié des racines une résistance contre *Pythium ultimum* (Hoitink *et al.*, 1997). Toutefois, ces effets étaient perdus par la stérilisation du compost (Hoitink *et al.*, 1997 ; Zhang *et al.*, 1998).

Il semble que non seulement les composts, mais aussi leurs extraits peuvent induire une résistance dans les plantes (Hoitink, Zhang *et al.*, 1997 ; Zhang *et al.*, 1998). Dans le second cas, les mécanismes d'induction sont alors résistants à la chaleur.

D'après Budde et Welzien (1988), une induction de résistance contre *Erysiphe graminis* f.sp. *hordei* dans les plantes d'orge est possible aussi bien en ajoutant au sol du compost ou des extraits de compost. Un effet additif a été observé lors de l'utilisation combinée de ces deux méthodes.

3. Objectifs du présent travail

Les effets positifs de certains composts sur la fertilité des sols en général (Dick et McCoy, 1993 ; Gobat *et al.*, 2003) et sur la santé des plantes en particulier ont souvent été décrits (Hoitink et Keener, 1993 ; Hoitink *et al.*, 1997 ; Fuchs et Larbi, 2004). De plus, l'utilisation des extraits de composts a décelé un potentiel phytosanitaire intéressant contre les maladies foliaires telles que la moisissure du fraisier, divers oïdiums et mildious (Weltzien, 1992).

Néanmoins, l'efficacité des composts et des extraits varie beaucoup en fonction du compost et du système plante-pathogène (Scheuerell et Mahaffe, 2002). Les raisons de cette variabilité demeurent en grande partie jusqu'à présent non élucidées. L'effet suppressif du compost contre les maladies telluriques est le plus souvent régi par des mécanismes de nature microbienne, en relation avec les populations microbiennes apportées par le compost (Hoitink, 1991 ; Fuchs et Larbi, 2004). Toutefois, les mécanismes d'inhibition des pathogènes des plantes par les composts et par leurs extraits restent encore insuffisamment explorés.

D'une part, l'ajout de matière organique au sol augmente et stimule la biomasse et l'activité microbienne, de sorte que les populations bénéfiques de bactéries et de champignons entrent en compétition (espace, éléments nutritifs) avec les espèces pathogènes. D'autre part, les composts contiennent certains composés humiques hydrosolubles. Le rôle de ces composés sur la santé des plantes et leur interaction avec les agents pathogènes est cependant encore méconnu

Concernant l'effet phytosanitaire des extraits de composts contre les maladies foliaires, les mécanismes de protection décrits sont contradictoires. Il existe différentes observations qui favorisent la voie de la nature microbienne (Stindt, 1990 ; Weltzien, 1992 ; McQuilken *et al.*, 1994), le mécanisme d'induction de résistance (Zhang *et al.*, 1998 ; Samerski et Weltzien, 1988) et l'effet antibiotique (Yohalem *et al.*, 1994 ; Elad et Shtienberg, 1994 ; Cronin *et al.*, 1996)

La forte variabilité des effets phytosanitaires observés suivant les composts et leurs extraits employés est assurément le plus gros écueil à leur utilisation à large échelle pour des mesures ciblées de protection des plantes. Les divers paramètres influençant les propriétés phytosanitaires des composts et de leurs extraits ainsi que les mécanismes de protection impliqués sont cependant encore insuffisamment connus. Or, une meilleure connaissance de ces paramètres et une approche analytique de la matière organique sont indispensables afin de

pouvoir optimiser leur utilisation pour lutter contre les maladies des plantes. Dans ce contexte, les objectifs assignés à notre recherche sont :

1. Caractériser la qualité physique, chimique et biologique de composts d'origines variées.
2. Etablir le lien entre les propriétés physiques, chimiques et biologiques de composts et de leurs extraits par rapport à leur origine et modes de production.
3. Déterminer l'influence de ces propriétés sur l'efficacité phytosanitaire du compost et de ses extraits.
4. Déterminer le potentiel des composts et de leurs extraits dans le contrôle biologique de maladies des plantes
 - Potentiel suppressif et mode d'action des composts contre les maladies telluriques dans les deux systèmes plante-pathogène suivants: concombre-*Pythium ultimum* et basilic-*Rhizoctonia solani*
 - Potentiel phytosanitaire et mécanismes de protection des extraits de composts contre les maladies foliaires dans les deux systèmes plante-pathogène suivants : pommier-*Venturia inaequalis* et vigne-*Plasmopara viticola*
 - Potentiel phytosanitaire des matières humiques extraites des composts (acides humiques et fulviques) sur leur capacité à protéger les plantes contre les maladies.
5. Discuter l'influence des modes de production des composts et de leurs extraits sur leur capacité à protéger les plantes contre les maladies

4. Matériel et méthodes

4.1. Microorganismes

4.1.1. Agents pathogènes telluriques (*Pythium ultimum*, *Rhizoctonia solani*)

Les deux agents pathogènes telluriques *Pythium ultimum* et *Rhizoctonia solani* peuvent causer des dégâts conséquents aux cultures. Ils ont été employés comme indicateurs pour évaluer le potentiel suppressif des composts.

La souche de *P. ultimum* Trow 67.1 (Allelix agriculture, Mississauga, Canada), agent pathogène de la maladie de fonte de semis, ainsi que la souche de *R. solani* Kühn Stamm160 (Syngenta ; Basel-CH), agent pathogène de la pourriture des racines de basilic, ont été conservées sur milieu de malt gélosé.

Pour la production de l'inoculum, 25 g de graines de millet, autoclavés deux fois à 121 °C pendant 20 minutes, ont été placés dans une boîte de Pétri stérile et humectés avec 15 ml d'eau déminéralisée stérile. Trois rondelles de 0,8 cm de diamètre de l'agent pathogène, prélevées sur les cultures sur milieu de malt gélosé, ont alors été ajoutées à chaque boîte de Pétri. Après 7 jours d'incubation pour *P. ultimum* et 14 jours pour *R. solani*, les graines de millet colonisées par les agents pathogènes ont été finement hachées à l'aide d'un hachoir à oignon. L'inoculum de *P. ultimum* a été mélangé comme tel au substrat, une unité d'inoculum correspondant à un gramme de la culture du champignon sur millet. L'inoculum de *R. solani* a été, pour faciliter son utilisation, dilué avec du sable fin avant son emploi; une unité d'inoculum de *R. solani* correspond à une graine de millet colonisée par le pathogène.

4.1.2. Agents pathogènes foliaires (*Venturia inaequalis* et *Plasmopara viticola*)

Les deux pathogènes foliaires *Venturia inaequalis* et *Plasmopara viticola* sont capables de causer des dégâts considérables sur la partie végétative et sur les fruits de leurs plantes hôtes (pommier et vigne respectivement). Ils ont été utilisés comme indicateurs pour évaluer le potentiel des extraits de composts à protéger les plantes contre des pathogènes foliaires.

Des feuilles de pommier attaquées avec *V. inaequalis*, agent pathogène de la tavelure de pommier, ont été séchées à une température ambiante, puis conservées à 4 °C dans des bouteilles en verre. Pour préparer l'inoculum, un gramme de feuilles a été plongé dans l'eau déminéralisée, agité pendant quinze minutes puis filtré à travers un tissu en nylon (mailles de 0,25 mm). La concentration de la suspension de spores a été ensuite déterminée avec un hématimètre (cellule de Thoma) puis ajustée à 5×10^4 spores/ml.

Des plantules de vigne (stade 4-5 feuilles) infectées avec *P. viticola*, agent causal du mildiou de vigne, sont fournies par Syngenta AG (CH-Stein). Avant emploi, elles ont été conservées

deux à trois jours en chambre climatisée (température jour / nuit : 22 °C / 18 °C ; humidité relative 70%, durée du jour 16 heures). Un jour avant l'utilisation de l'inoculum, les plantules ont été placées à une humidité relative 100%. Les feuilles portant des spores sont coupées et rincées dans l'eau déminéralisée froide (4 °C). La concentration de la suspension de spores a été ensuite déterminée avec une cellule de Thoma, puis ajustée à 10^4 spores/ml. Deux gouttes de dix μ l de la suspension de spores de *Plasmopara viticola* ont été déposées sur la face inférieure des feuilles de vigne. Cinq feuilles par plante ont été ainsi inoculées.

4.2. Matériel végétal

Le matériel végétal employé est présenté dans le tableau 4.1. Toutes les semences utilisées sont non traitées.

Tab. 4.1. Matériel végétal employé

Espèce végétale	Variété	Origine
Ray-grass d'Italie (<i>Lolium multiflorum</i> L.)	Lipo	Fenaco UFA (CH)
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i> L. var. <i>nanus</i> L.)	Daisy	
Laitue pommée (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Attraction	Semence Mauser AG (CH-Thoune)
Cresson (<i>Lepidium sativum</i> L.)	Cresson de jardin	
Basilic (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	Grand vert	
Concombre (<i>Cucumis sativus</i> L.)	Serpent chinois	Richard Geissler (CH)
Plantules de pommier (<i>Malus domestica</i> L.)	Mc Intosh	Syngenta AG (CH-Stein)
Plantules de vigne (<i>Vitis vinifera</i> L.)	Chasselas	

4.3. Composts et substrats

Les composts proviennent de diverses installations de compostages professionnelles Suisses. Les échantillons de composts ont été prélevés de manière à être représentatifs, selon la méthode AD-KP-PN (méthodes de référence de l'institut de recherche Suisse FAW, RAC et FAL, 1996). Sauf indication contraire, tous les composts ont été tamisés à 10 mm, puis stockés à 3°C dans des sacs en plastique tressés perméables à l'air. Les différents composts sont présentés dans les tableaux 4.2a à 4.2.b et les tableaux 4.2 c et 4.2 d.

Deux types de substrats ont été utilisés pour les biotests. Le substrat « Einheitserde Typ 0 » (Patzner GmbH & Co. KG, D-36391 Sinntal-Jossa) a été utilisé pour les tests de suppressivité aux maladies et pour le repiquage des plantules de pommier et de vigne. Le substrat de

référence BRS-200 (Biophyt SA, CH-Mellikon) a été employé comme substrat de référence dans les tests de phytotoxicité.

Tab. 4.2a. Description des composts employés provenant de système de compostage en **andains tabulaires** de 2.5 à 4 m de hauteur.

Nom du compost	Description	Composition du compost	Age du compost au moment du prélèvement (semaines)
Ata08-1	Compost jeune	45 % bois flottants, 20 % boues d'épurations, 35% déchets verts, plumes et légumes	8
Ata10-1	Compost jeune	15 % déchets verts, 25 % déchets d'horticulture, 20 % déchets verts de service publique, 20% déchets d'industrie (papier, chips..), ajout de 10 % compost frais et 10 % de compost mûr	10
Ata12-1	Compost jeune	50 % déchets verts, 25 % déchets d'horticultures, 25 % restes de criblages	12
Ata12-2	Compost jeune		12
Ata29-1	Compost mûr	50 % déchets verts, 25 % déchets d'horticulture, 25 % restes de criblages	29
Ata36-1	Compost mûr	déchets verts, plumes, légumes, fibres papiers	36
Ata30-1	Compost mûr		30
Ata30-2	Compost mûr	50 % déchets verts, 25 % déchets d'horticultures, 25 % rebuts de criblages	30
Ata40-1	Compost mûr	50 % déchets verts, 25 % déchets d'horticulture, 25 % rebuts de criblages	40
Ata56-1	Compost mûr	50 % déchets verts, 25 % déchets d'horticulture, 25 % rebuts de criblages	56

Tab. 4.2b. Description des composts employés provenant de système de compostage en **andains triangulaires** de 1.5 à 2 m de hauteur.

Nom du compost	Description	Composition du compost	Age du compost au moment du prélèvement (semaines)
Atr06-1	Compost jeune	25 % déchets verts, 45 % déchets d'horticulture, 30 % déchets de l'industrie	6
Atr07-1	Compost jeune		7
Atr07-2	Compost jeune	déchets verts, plumes, légumes, fibres papiers	7
Atr08-1	Compost jeune		8
Atr08-2	Compost jeune	déchets verts, plumes, légumes, fibres papiers	8
Atr09-1	Compost jeune	25 % déchets verts, 45 % déchets d'horticulture, 30 % déchets de l'industrie	9
Atr09-2	Compost jeune	30 % déchets verts, 35 % déchets d'horticulture, 15 % déchets de l'industrie, 10% de la terre	9
Atr09-3	Compost jeune	40 % déchets verts, 30 % déchets d'horticulture, 15 % déchets verts de service publique, 15 % déchets d'industrie+ enzymes	9
Atr10-1	Compost jeune	déchets verts, plumes, légumes, fibres papiers	10
Atr12-1	Compost jeune	30 % déchets verts, 35 % déchets d'horticulture, 15 % déchets de l'industrie, 10% de la terre	12
Atr12-2	Compost jeune	25 % de branches grossières et souches , 25 % déchets verts, 30 % de feuilles mortes, 10 % terre argileuse, 10% de fibres de papiers, préparation biodynamique	12
Atr12-3	Compost jeune	25 % de branches grossières et souches, 25 % déchets verts, 30 % de feuilles mortes, 10 % terre argileuse, 10% de fibres de papiers	12
Atr12-4	Compost jeune	déchets verts, plumes, légumes, mélange d'enzyme	12
Atr12-5	Compost jeune	déchets verts, plumes, légumes, mélange d'enzyme	12
Atr15-1	Compost mûr		15
Atr15-2	Compost mûr	déchets verts, plumes, légumes, mélange d'enzyme	15
Atr15-3	Compost mûr	déchets verts, plumes, légumes, mélange d'enzyme	15
Atr16-1	Compost mûr		16
Atr20-1	Compost mûr	déchets verts, plumes, légumes, fibres papiers	20
Atr30-1	Compost mûr		30

Tab. 4.2c. Description des composts employés provenant de système de compostage en **andains triangulaire** de 2 à 3,5 m de hauteur.

Nom du compost	Description	Composition du compost	Age du compost au moment du prélèvement (semaines)
Atrg08-1	Compost jeune	50 % déchets verts, 40 % déchets d'horticulture, 10 % déchets verts de service public	8
Atrg12-1	Compost jeune	déchets verts	12
Atrg13-1	Compost jeune	déchets verts	13
Atrg16-1	Compost mûr	déchets verts avec mélange d'enzymes	16
Atrg18-1	Compost mûr	déchets verts avec mélange d'enzymes	18
Atrg26-1	Compost mûr	déchets verts	26
Atrg26-2	Compost mûr	déchets verts	26
Atrg33-1	Compost mûr	70 % déchets verts, 25 % déchets d'horticulture, 5 % déchets verts de service public	33

Tab. 4.2d. Description des **digestats** employés

Nom du compost	Description	Composition du compost	Age du compost au moment du prélèvement (semaines)
Dim08-1	Digestat mésophile	33 % déchets verts, 67 % fumier	8
Dit10-1	Digestat thermophile	70 % déchets verts, 18 % déchets d'horticulture, 12 % déchets de l'industrie	10

4.3.1. Production des extraits de composts

Un volume de compost a été mélangé avec deux ou cinq volumes d'eau déminéralisée dans une bouteille PE d'un litre à col ouvert. Le mélange a été ensuite agité manuellement pendant deux minutes, puis incubé à une température ambiante. Après la période d'incubation, le mélange a été enfin filtré à travers quatre couches de gaze. Les extraits non utilisés ont été tout de suite conservés au congélateur (-20 °C).

4.3.2. Stérilisation des extraits de composts employés dans les biotests

La stérilisation des extraits de composts a été faite dans le but de voir si les microorganismes présents dans l'extrait sont responsables ou non de la protection des plantules de pommier et de vigne contre respectivement *Venturia inaequalis* et *Plasmopara viticola*.

Différents modes de stérilisation ont été appliqués sur les composts avant et après son extraction aqueuse:

- Stérilisation avant l'extraction : les composts ont été autoclavés pendant 1 heure à 121°C.
- Stérilisation par filtration après l'extraction: les extraits de composts ont été stérilisés par filtration à travers une membrane filtre de 0.2 µm de diamètre (Schleicher & Schuell, D-37582).
- Stérilisation par autoclavage après l'extraction: les extraits de composts ont été autoclavés pendant une heure à 121 °C

4.4. Caractérisation chimique, physique et biologique des composts

Sauf indication contraire, les méthodes employées sont les méthodes standards officielles Suisses décrites dans le classeur « Méthodes de référence de l'institut de recherche Suisse FAW, RAC et FAL » (1996). Le code mentionné correspond aux codes de ce classeur. Dans le but de déterminer la qualité physique, chimique et biologique de divers composts les méthodes suivantes ont été employées :

4.4.1 Extraction aqueuse 1:2 (méthode H₂OGH-Ex)

L'extraction aqueuse 1:2 (V/V ; compost/eau) a été utilisée pour déterminer les propriétés physiques et chimiques des composts.

L'extraction aqueuse des composts a été réalisée selon la méthode **H₂OGH-Ex**. Un cylindre gradué d'un litre est d'abord rempli avec 400 ml d'eau déminéralisée, ensuite du compost a été ajouté jusqu'au trait de 600 ml. Le mélange a été agité pendant une heure à 140 t/min, puis filtré à travers un papier filtre (Schleicher-Schuell, 602). Les filtrats ont été analysés directement après leur extraction.

4.4.2. Détermination du pH aqueux (méthode H₂OGH-pH)

La valeur pH a été mesurée directement dans l'extrait aqueux à l'aide d'un pH-mètre.

4.4.3. Détermination de la salinité du compost (méthode H₂OGH-Sal)

Le taux de salinité du compost a été directement déterminé en mesurant la conductivité électrique dans le filtrat de l'extrait aqueux à l'aide d'un conductimètre.

4.4.4. Détermination de la teneur en NH₄⁺, NO₂⁻ et NO₃⁻

Les teneurs en ammonium, nitrite et nitrate dans les filtrats aqueux de composts ont été déterminées selon les méthodes Reflectroquant de Merck (Merk, RQflex, D-64271 Darmstadt). Cette méthode est sensible, rapide et fiable pour déterminer l'azote minéral des

composts. Elle permet en outre de mesurer la forme nitrique (NO_2^-), qui est une forme d'azote toxique pour les plantes.

4.4.5. Détermination de la matière sèche des composts (méthode D-TS)

La teneur en matière sèche des composts a été déterminée après séchage des échantillons de composts à 105 °C pendant 24 h.

4.4.6. Détermination de la teneur en matière organique (méthode D-AS)

La teneur en matière organique a été réalisée selon la méthode perte au feu à 600 °C : environ 1-5 g de compost séché à 105 °C sont placés dans un four à moufles à 600 °C pendant 3 à 4 heures. La mesure de la perte au feu permet une bonne estimation des teneurs réelles en matière organique des composts.

4.4.7. Fractionnement et purification des composés humiques des composts

Cette analyse a été faite dans le but d'une part d'estimer le degré d'humification des échantillons de composts, et d'autre part de tester l'effet phytosanitaire des composés humiques (AF et AH) sur les maladies des plantes.

Le fractionnement des composés humiques (AH et AF) des composts a été effectué selon la méthode d'Eric Lichtfouse (2003) légèrement modifiée au niveau de la prise d'échantillons.

L'extraction a été basée sur la différence de densité des composés humiques dans les différents solvants. L'analyse comporte deux étapes. Premièrement, 0,2 g (**au lieu de 10 g**) de compost séchés à l'air et tamisés à 2 mm ont été agités en milieu alcalin NaOH (0.001N à pH 10). Deuxièmement, le surnageant issu de l'extraction alcaline a été acidifié jusqu'à pH 1,5 avec HCl 1N, puis laissé une nuit en chambre froide à 4 °C. Cette acidification du surnageant provoque la précipitation des acides humiques (AH), qui sont des composés plus humifiés (acido-insolubles). Les acides fulviques (AF), qui sont des composés peu humifiés (acido-solubles), restent en solution.

Les fractions humiques (AH et AF) ont été ensuite purifiées pendant 48 h à 20 °C à l'aide d'une membrane échangeuse d'ions (Spectra/Por® 6, Socochim SA, CH-Lausanne) laissant passer les éléments minéraux d'un poids moléculaire inférieur à 1'000 daltons.

Le dosage de CHN a été effectué sur les composts secs, sur les humines et sur les acides humiques selon la méthode Carlo Erba (EA 1108). L'analyse de carbone organique total (TOC) a été réalisée sur la solution d'acides fulviques pure et sur le mélange d'extraction d'acides fulviques et acides humiques selon la méthode Dima-TOC 100, (D-45276 Essen)

Les acides fulviques (AF) et les acides humiques (AH) purifiés ont été conservés au congélateur (-20 °C).

4.4.8. Analyse de la fraction organique inférieure à 50 µm

L'analyse de la fraction organique inférieure à 50 µm des composts est un indicateur de la stabilité du carbone fixé à long terme dans le sol. Elle reflète les bases potentielles de la fertilité du sol (Gobat *et al.*, 2003)

La détermination du taux d'humification de la fraction organique des composts la plus humifiée (fraction < 50 µm), a été réalisée selon la méthode de Roulet, modifiée par Bruckert *et al.* (1978). Elle a subi une légère modification au niveau **de la prise d'échantillon** : 10 g **(au lieu de 50 g)** de compost frais ont été tamisés manuellement à travers un tamis à maille 50 µm, en entraînant les particules les plus petites par un faible jet d'eau distillée vers la cuvette. Le volume final de la filtration a été récupéré dans un cylindre gradué, puis un volume de 200 ml de filtrat a été prélevé et mis à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage, le poids sec dans 200 ml de filtrat a été pesé puis calculé par rapport au poids total de l'échantillon du départ. Une aliquote de culot de chaque échantillon a été pris pour le dosage de CHN selon la méthode Carlo Erba (EA 1108).

4.4.9. Détermination de l'activité microbienne des composts

La détermination de l'hydrolyse de FDA (3',6'-diacétylfluorescens) est une des méthodes disponibles pour évaluer l'activité microbiologique des échantillons issus d'habitats naturels. L'hydrolyse FDA est une méthode simple, sensible, rapide et fiable pour déterminer l'activité microbienne dans le sol et dans les ordures.

L'activité microbienne dans les composts a été déterminée par la mesure du taux d'hydrolyse de diacetate fluorescent (FDA) (Sigma chemical Co., St Louis, Miss) selon Inbar *et al.* (1991) et Craft et Nelson (1996). La prise d'échantillon a été légèrement modifiée, un gramme de compost frais tamisé à 2 mm ayant été utilisé (au lieu d'un échantillon sec de compost de 0.5 g). En outre, les filtrats de composts ont été dilués 5 fois dans la solution tampon phosphate à la place de l'acétone. La concentration de fluorescence a été déterminée à 490 nm à l'aide d'un photomètre.

4.4.10. Détermination de la population microbienne des composts et des extraits de composts

La détermination quantitative de différents groupes de microorganismes (bactéries et champignons en général, et actinomycètes et *Trichoderma* spp en particulier) des composts et des extraits de composts, a été réalisée par une série de dilutions sur des milieux de cultures sélectifs (tab. 4.3). L'identification des ces groupes de microorganismes a été faite par observation microscopique.

Pour l'isolation de la population microbienne de composts, 10 g de compost frais ont été agités dans 90 ml d'eau minéralisée stérilisée à 90 t/min pendant une heure.

Tab. 4.3. Milieux de cultures sélectifs pour la détermination quantitative de différents groupes de microorganismes des composts et des extraits de composts*.

Groupe de microorganismes	Milieu de culture
Bactéries	Milieu gélosé B de King (King <i>et al.</i> , 1954)
Champignons totaux	Milieu de malt gélosé + solution de Forbes (1997)
<i>Trichoderma harzianum</i>	Milieu sélectif pour <i>Trichoderma harzianum</i> (THSH ; Williams <i>et al.</i> , 2003)
Actinomycètes	Milieu gélosé de levure mou à l'eau (WYA) (McQuilken <i>et al.</i> , 1994)

* : Les compositions exactes des milieux sont décrites en annexe 1.

4.5. Tests *in vitro*

Les tests *in vitro* ont été réalisés dans le but de déterminer les mécanismes d'action des extraits de composts sur la germination des spores de *V. inaequalis* et *P. viticola*

4.5.1. Influence des extraits de composts sur la germination des spores de *Venturia inaequalis*

L'influence des extraits de composts sur la germination des conidies de *V. inaequalis* a été réalisée selon la méthode de Cronin *et al.* (1996) légèrement modifiée. Dix microlitres d'une suspension de *V. inaequalis* à concentration [50'000 conidies/ml] à laquelle 1 g de saccharose a été ajouté, ont été placés dans chacun des 6 trous d'une micro-plate stérile (Multiple well plate 96 –Well, No 82. 1581.001, Sarstedt, Inc. Newton, NC 28658). Quarante microlitres d'extraits aqueux de composts ou d'eau déminéralisée stérile ont été ajoutés par trou. Après 36 heures d'incubation à 100% d'humidité relative, la germination des conidies a été ensuite observée au microscope. Les stades de croissance de germination ont été évalués selon l'échelle suivante :

- 0 : pas de germination
- 1 : développement de tubes germinatifs d'une longueur inférieure au diamètre de la conidie
- 2 : développement de tubes germinatifs d'une longueur égale au diamètre de la conidie
- 3 : développement de tubes germinatifs d'une longueur supérieure au diamètre de la conidie

4.5.2. Influence des extraits de composts sur l'activité des zoospores de *Plasmopara viticola*

Le pathogène *Plasmopara viticola* est un parasite obligatoire qui a besoin de feuilles vivantes pour se développer. Des plantules de vigne (*Vitis vinifera* L.) ont été traitées avec de l'eau déminéralisée ou avec les extraits de composts, puis incubées pendant 3 jours à une température comprise entre 18 et 20 °C et avec une humidité relative de 70 %. Après la période d'incubation, trois rondelles de 10 mm de diamètre de chaque feuille ont été découpées puis mises sur milieu gélosé mou à l'eau dans des boîtes de Pétri.

Un volume égal à 0,1 ml de la suspension de sporanges *P. viticola* [100'000 sporanges/ ml] a été inoculé au centre des rondelles de vigne. Après 24 heures d'incubation à 18°C, 70 % d'humidité relative et avec lumière, le nombre de stomates colonisés ou non par les zoospores de *P. viticola* a été compté en utilisant le microscope. Le pourcentage de stomates occupés par les zoospores a été ensuite calculé.

4.6. Tests *in vivo*

4.6.1. Tests de la phytotoxicité des composts

Afin d'évaluer la qualité biologique des échantillons des composts, les biotests de phytotoxicité selon Fuchs et Bieri (2000) ont été effectués. Ces biotests caractérisent la croissance de plusieurs plantes dans du compost non dilué et reflètent bien la qualité biologique des composts.

A l'exception du test de cresson fermé, pour lequel 500 ml de compost ont été mis dans une boîte en plastique d'un litre, des pots de 200 ml de volume et d'un diamètre de 10 cm ont été remplis avec les composts. Les différentes plantes ont été semées puis arrosées. Chaque plante a été également semée dans le substrat de référence BRS-200 (Biophyt SA, CH-Mellikon). La croissance des plantes dans les composts a été évaluée en comparaison avec la croissance des plantes dans le substrat de référence. Les détails des différents tests et leur évaluation sont décrits dans le tableau 4.4.

4.6.2. Tests de suppression des maladies telluriques

Ces tests ont été effectués dans le but de caractériser le potentiel des composts à protéger les plantes contre les maladies telluriques. Deux systèmes de tests en pots ont été utilisés à cet effet : le système concombre-*Pythium ultimum* et le système basilic-*Rhizoctonia solani*.

Tab. 4.4. Description de tests de phytotoxicité selon Fuchs et Bieri (2000)

Test	Poids ou nombre de semences par pot	Durée du test [jours]	Evaluation (exprimée en % de la croissance dans le substrat de référence BRS-200)
Cresson ouvert	1 g	7	<ul style="list-style-type: none"> • Poids frais des pousses par pot
Cresson fermé	1 g	7	<ul style="list-style-type: none"> • Longueur moyenne des racines
Salade	10 graines	10	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de plantes levées • Poids frais des pousses par pot
Ray-grass d'Italie	0,4 g	14	<ul style="list-style-type: none"> • Poids frais des pousses par pot
Haricot	4 graines	10	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de plantes levées • Poids frais des pousses par pot • Evaluation de l'état sanitaire des racines : <ol style="list-style-type: none"> 0 : Racines complètement pourries, mortes 1: 81-99 % de la surface des racines de plantes avec des brunissements / nécroses 2: 21-81 % de la surface des racines de plantes avec des brunissements / nécroses 3: 1-20 % de la surface des racines de plantes avec des brunissements / nécroses 4: Racines saines, blanches

Système concombre-*Pythium ultimum*

Le biotest de suppressivité du *Pythium ultimum*, agent pathogène de la maladie de la fonte du semis de concombre (*Cucumis sativus* L.), a été effectué selon la méthode de Fuchs (2002).

Les composts ont été mélangés avec de la tourbe (Einheitserde Typ 0, Werkverband, D-36391 Sinntal-Josa) préalablement fertilisée avec 2,3 g de poudre de corne, 0,56 g de scories Thoma et 1,33 g de potassium de magnésium par litre. L'inoculum de *Pythium ultimum* (culture sur millet âgé de 7 jours) a été ensuite mélangé de manière homogène dans les mélanges composts-tourbe. Des pots en plastique (diamètre 9 cm) ont été remplis avec le substrat et cinq graines de concombre (variété Serpents de Chine).

Les plantes ont été soumises à une température de 18 à 22 °C et une lumière de 16 heures par jour. Après 10 à 14 jours, le nombre de plantes levées par pot a été dénombré et le poids frais des pousses et racines de concombre a été déterminé.

La protection des plantes a été calculée selon (Abbott, 1925) comme suit :

Protection [%] = $100(1-a/b)$, avec a = la sévérité de la maladie (ou incidence ou diamètre de lésion de la maladie) du lot traité et b = la sévérité de la maladie (ou incidence ou diamètre de lésion de la maladie) du lot témoin

Système basilic-*Rhizoctonia solani*

Le biotest de suppressivité du *Rhizoctonia solani*, agent pathogène de la maladie de la pourriture des racines de basilic (*Ocimum basilicum* L.), par les composts, a été effectué selon la méthode de Fuchs (2002).

Les composts ont été mélangés avec de la tourbe (Einheitserde Typ 0, Werkverband, D-36391 Sinntal-Josa) préparée de la même manière que précédemment. Des pots en plastique (diamètre 9 cm) ont été remplis de la manière suivante : premièrement, les fonds des pots ont été couverts avec 0.5 cm des mélanges compost-tourbe, l'inoculum de *R. solani* (culture sur millet) a été mis dans le pot, puis ce dernier a été rempli avec les mélanges compost-tourbe, et dans lequel 20 graines de basilic ont été semées.

Le nombre de plantes vivantes par pot a été compté après 7, 10 et 15 jours. A la fin de l'essai, le poids des pousses de basilic par pot a été aussi déterminé.

La mortalité des plantes de basilic a été calculée par rapport à la levée maximum par pot.

La protection des plantes par le compost a été calculée en utilisant la même formule présentée pour le système concombre-*Pythium ultimum*.

4.6.3. Test de protection des plantes contre les maladies foliaires

Certains extraits de composts ont montré un potentiel phytosanitaire contre les maladies foliaires (Scheuerell et Mahaffee, 2002). Dans le but de caractériser le potentiel phytosanitaire des extraits de composts et des matières humiques contre les maladies foliaires, deux tests *in vivo* ont été menés sous des conditions contrôlées : le système pommier-*Venturia inaequalis* et le système vigne-*Plasmopara viticola*.

Système pommier-*Venturia inaequalis*

Les plants de pommier (*Malus domestica* L, variété Mc Intosh, fournis par Syngenta AG, CH-Stein) ont été repiqués à raison d'une plante par pot dans des pots de 8 cm de diamètre contenant du substrat « Einheitserde Typ 0 » fertilisé avec 3 g/l de Tardite 3M (Hauert & Co, CH-3257). Les plantules ont été cultivées en serre à la température de 18 à 24 °C et sous une lumière naturelle. Cependant en hiver, l'intensité de lumière a été augmentée avec des lampes (radium de lampe 250 WD, 12-15 Klux) avec une photopériode de jour de 16 heures.

Deux à trois semaines après le repiquage, les plantules de pommier (stade de 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec divers extraits de composts jusqu'à saturation à l'aide d'un pistolet à peinture, puis incubées pendant 2 jours à une température de 18 à 20 °C et une humidité relative de 70 %. Les plantules de pommier ont alors été inoculées avec *Venturia inaequalis* (50'000 spores/ml), à l'aide d'un pistolet à peinture, jusqu'à saturation puis ont été incubées pendant 24 h à la chambre d'humidité (100 % humidité relative (HR), 14 h lumière, 5Klux) et

à une température de 20°C. Par la suite, les plantules ont été transférées dans une chambre de croissance (60-70 % HR, 14 h lumière, 20 °C pendant le jour et 18 °C pendant la nuit).

Dix à douze jours plus tard, l'incidence et la sévérité de la maladie ont été évaluées de la même façon que précédemment.

Système vigne-*Plasmopara viticola*

Les plants de vigne (*Vitis vinifera* L., variété Chasselas, fournis par Syngenta AG, CH-Stein) ont été repiqués à raison d'une plante par pot dans des pots de 8 cm de diamètre contenant du substrat « Einheitserde Typ 0 » fertilisé avec 3 g/l de Tardite 3M (Hauert & Co, CH-3257).

Les plantules ont été cultivées en serre à la température de 18 à 28 °C et sous lumière naturelle. Pendant l'hiver, l'intensité de lumière a été augmentée avec des lampes (radium de lampe 250 WD, 12-15 Klux) avec une photopériode de jour de 16 heures.

Trois semaines après le repiquage, les plantules de vigne (stade 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec divers extraits de composts, à l'aide d'un pistolet à peinture, jusqu'à saturation, puis incubées pendant 3 jours à une température de 18-20 °C et à 70 % d'humidité relative.

Après la phase d'incubation, deux gouttes de 10 µl de suspension de spores de *Plasmopara viticola* (100'000 spores/ml) ont été placées sur la face inférieure des feuilles de vignes. Les plantules ont été par la suite incubées à la chambre d'humidité (100 % humidité relative (HR), 14 h lumière, 5Klux) et à température de 20°C, pendant 24 h. Ensuite, les plantules ont été transférées dans une chambre de croissance (60-70 % HR, 14 h lumière, 20 °C pendant le jour et 18 °C pendant la nuit). Cinq jours plus tard, les plantules ont été replacées dans la chambre d'humidité et laissées 24 heures avec 100% d'humidité relative. L'incidence et le diamètre des lésions de la maladie ont été ensuite mesurés.

4.7. Récapitulatif des méthodes expérimentales employées

Afin de caractériser les qualités physico-chimiques et biologiques de divers composts et d'établir le lien entre ces propriétés et la capacité de divers composts utilisés ainsi que leurs extraits à protéger les plantes contre les pathogènes, différentes méthodes ont été utilisées. La figure 4.1 synthétise les diverses analyses réalisées sur les composts, leurs extraits ainsi que sur les plantes.

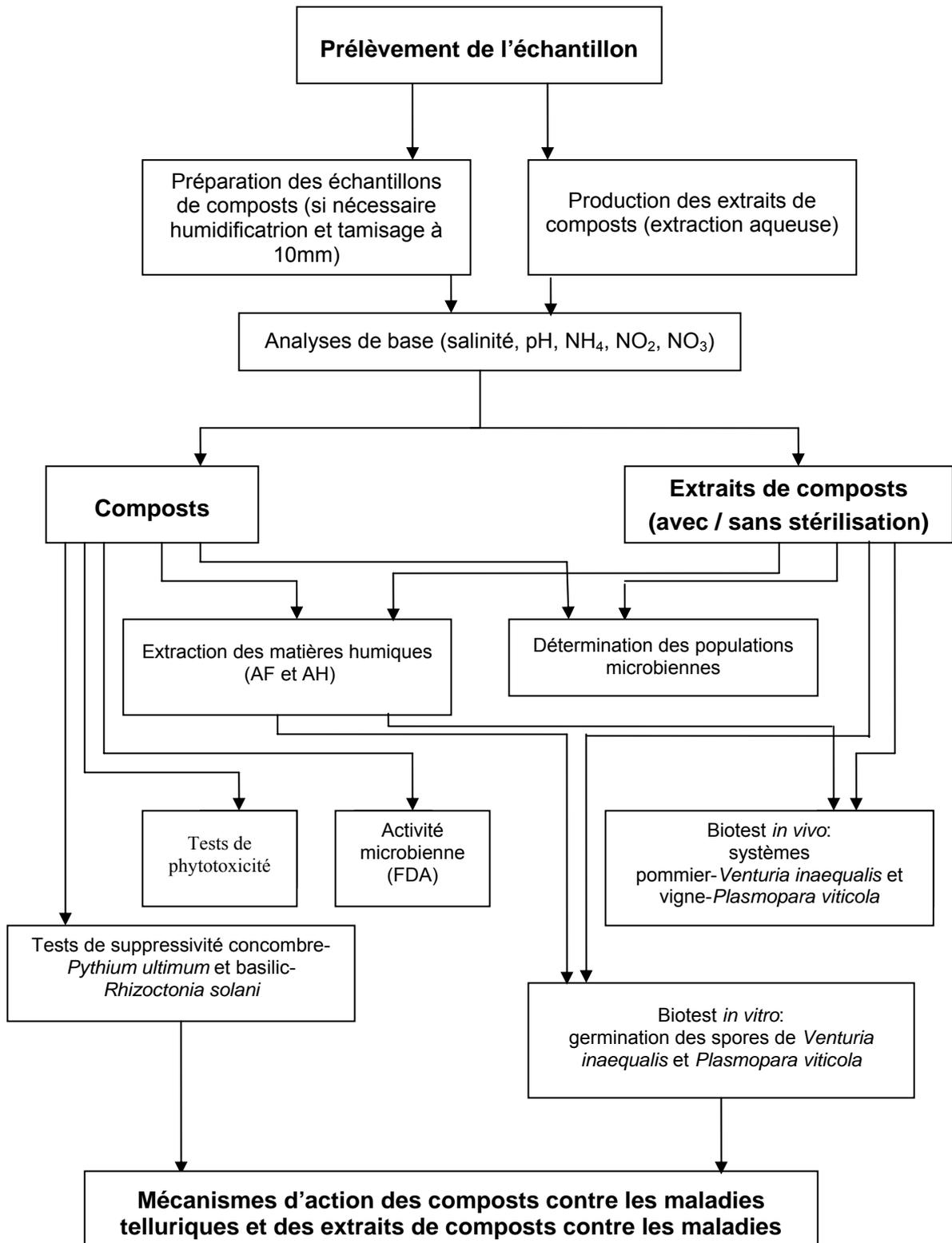


Figure.4.1. Récapitulation des méthodes expérimentales employées dans ce travail.

4.8. Analyses statistiques

Les données ont été évaluées au moyen d'une analyse de variance (ANOVA) suivies par une comparaison par paires (Tukey-B). Les différences significatives ont été relevées par le Test post-Hoc de Tukey-B à $P < 0.05$.

Toutes les analyses ont été faites en utilisant le programme statistique SPSS (version 10.0, SPSS Inc.).

5. Résultats et discussion

5.1. Caractérisation des composts

5.1.1. Caractérisation physique et chimique

Les propriétés physico-chimiques des échantillons de composts, à savoir la matière sèche (MS), la matière organique (MO), les différentes fractions d'azote minéral (NH_4 , NO_2 , NO_3), le pH et la conductivité électrique (CE) sont illustrées dans le tableau 5.1.

La teneur en **matière sèche** des composts analysés varie entre 35 % (compost Atrg26-1) et 82 % (compost Atr20-1). La différence peut s'expliquer par la composition initiale des intrants et surtout par la conduite des systèmes de compostage. La dimension des andains peut également jouer un rôle, les plus petits étant plus enclins à se dessécher.

La teneur en **matière organique** des différents échantillons de composts varie fortement (entre 17 % et 62 %). Dans le produit final, elle dépend d'une part des intrants (notamment de la teneur en terre du mélange initial), et d'autre part du degré de maturation du compost. Les composts les plus âgés comme Ata40-1 et Ata56-1 sont déjà fortement minéralisés et ont les teneurs en matières organiques les plus basses (17,5 % et 17,2 %). Ces teneurs basses en matières organiques peuvent en plus être expliquées d'une part par le fait que ces composts ne contiennent que peu de composé ligneux dans leurs compositions de départ, et d'autre part par le fait que les déchets compostés contenaient une certaine quantité de terre.

Les valeurs de **pH** oscillent entre 6,8 et 9,1 avec une moyenne de 8.3. La valeur du pH des déchets organiques frais verts n'est pas stable (Krogmann, 1994). Elle dépend de la composition des intrants, de la teneur en azote et de l'intensité de nitrification pendant la fermentation. Au début du processus de compostage, la valeur du pH des matériaux compostés baisse à cause de la formation des acides organiques (Nakasaki *et al.*, 1993). Le pH augmente ensuite rapidement pour atteindre des valeurs nettement basiques suite à la libération d'ammonium provenant de la dégradation de la matière organique. Pour finir, une légère acidification du compost a lieu lors de la maturation, acidification provoquée par la nitrification de l'ammonium. La valeur du pH d'un compost mûr se situe normalement entre 7 à 8 (Garcia *et al.*, 1992 ; Nakasaki *et al.*, 1993 ; Iannotti *et al.*, 1994). Dans notre cas, la valeur moyenne du pH était légèrement supérieure ce qui s'explique par le fait qu'un nombre relativement important des composts testés étaient physiologiquement encore jeunes. D'autre part, la variation importante des valeurs pH entre les divers composts, causée par leurs intrants et leur teneur en azote minéral, ne permet de déterminer leur qualité et leur maturité.

C'est pourquoi la valeur du pH n'a souvent pas été considérée comme un indicateur primordial de la qualité des composts (Garcia *et al.*, 1992 ; Schleiss *et al.*, 2002)

La **conductivité électrique**, mesure de la teneur de sel, varie fortement ; la valeur la plus basse étant 0,9 [mS cm⁻¹], pour le compost Atrg16-1, et la plus élevée 5,6 [mS cm⁻¹] pour le compost Ata56-1. Même si tendanciellement les composts jeunes ont des teneurs en sel plus élevées que les composts âgés, ce sont principalement les matières premières compostées qui influencent leur conductivité électrique. Plus le compost contient de la matière ligneeuse, plus sa salinité est basse. Inversement, plus il contient des produits peu structurés, comme du gazon ou des déchets de légumes, plus sa salinité est importante. Ce sont principalement les cations Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺ qui sont responsables de la salinité (Gottesman, 1989 ; Chen *et al.*, 1988). Garcia *et al.* (1992) ont trouvé que la conductivité électrique varie de 3,7 à 8,8 mS/cm selon la nature de la matière compostée (compost d'égouts d'épuration: 3,7; déchets de raisins : 3,7 ; résidus de tourbe : 4,4 ; ordures ménagères : 8,8). Par contre, Iannotti *et al.* (1994) ont trouvé une conductivité de l'ordre de 10 mS/cm pour un compost d'ordures ménagères. Il faut toutefois noter que ces auteurs n'ont pas mentionné dans leurs études le rapport d'extraction, et il se peut que la variation de la teneur en sel soit aussi due à des rapports d'extraction différents.

Les teneurs en **ammonium** des divers produits testés varient aussi fortement. Alors que les digestats montrent des valeurs très élevées (1239 mg/kg MS pour le digestat Dimt10-1), les valeurs ammoniacales pour les composts diminuent fortement lors de la maturation pour s'approcher de la valeur 0, lorsque l'ammonium est nitrifié (Matur *et al.*, 1993 ; Heller, 1999). Ces mêmes auteurs ont conclu que la nitrification de l'ammonium est fortement liée à la composition des intrants et surtout à la conduite du processus. Une valeur limite d'ammonium peut donc être employée comme paramètre permettant de différencier les digestats des composts (Fuchs *et al.*, 2001 ; Schleiss *et al.*, 2002).

Les teneurs en **nitrite** oscillent entre 0.6 [mg/kg MS] pour le compost Atrg16-1 et 268 [mg/kg MS] pour le compost Atr15-1. Les valeurs en nitrite sont plus élevées chez les composts d'âges moyens, ce qui est normal, car le nitrite est une substance intermédiaire entre l'ammonium et le nitrate durant la nitrification. Une teneur en nitrite élevée, peut être phytotoxique, mais peut cependant également refléter de mauvaises conditions d'aération pendant le stockage du produit fini. Sous des conditions anaérobies, le nitrate peut en effet être réduit en nitrite par diverses bactéries.

Les teneurs en **nitrate** des composts étudiés varient entre 0,8 et 710 [mg/Kg MS]. Les valeurs augmentent en fonction de la maturité du compost suite au processus de nitrification de l'azote ce qui explique les teneurs basses en nitrate enregistrées chez les composts jeunes.

Levanon et Pluda, (2002) considèrent la teneur en (NH_4^+ ; NO_3^-) comme un indicateur important de qualité des composts pendant la phase thermophile, car ces paramètres restent stables une fois une certaine maturité atteinte. Le degré de maturation peut ainsi être caractérisé à l'aide du rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$, celui-ci étant inférieur à 1 pour les composts jeunes, et supérieure à 100 lorsque les composts ont atteint une maturation avancée (Bernal *et al.*, 1998; Schleiss *et al.*, 2002). Comme la teneur en nitrate dépend étroitement de la maturation et des intrants, le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$, permet de déterminer la maturité indépendamment de la nature des intrants (Schleiss *et al.*, 2002). Les résultats obtenus dans la présente étude confirment parfaitement ces publications. Des rapports supérieurs à 100 ont été mesurés dans les composts mûrs Atr16-1 et Atrg26-2, et à l'inverse des valeurs nettement inférieures à 1 dans les digestats Dim08-1 et Dit10-1 (tab.5.1). Ainsi, les résultats du présent travail confirment la fiabilité du rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ comme indicateur du degré de maturité du compost.

Les **indices d'humification AF/AH** des divers composts peuvent être classés en trois groupes (tab. 5.2). Le groupe des quatre composts, Ata30-2, Atr12-2, Atr09-3 et Atrg12-1, a un indice d'humification inférieur à 0,6. Un indice AF/AH aussi faible reflète une matière organique plus condensée dont les molécules sont assez stables. Un second groupe de quatre composts (Ata10-1, Ata36-1, Atr09-2 et Atrg08-1) a un indice d'humification moyen compris entre 0,7 et 1. Enfin, deux composts (Atr09-1 et Dim08-1) possèdent un indice supérieur à 1,4. Un indice aussi élevé révèle une part importante de molécules humifiées pas encore condensées, donc à fort potentiel de réactivité, ce qui est caractéristique d'un produit pas encore stabilisé. Ces résultats correspondent à ceux trouvés par Chen *et al.* (1996). Ils ont mentionné respectivement des valeurs de 0,1 à 0,29 et de 0,3 à 1,1 pour les composts mûrs et jeunes. Chefetz *et al.* (1996) ont constaté que l'indice d'humification augmente jusqu'à un rapport de 0,3 après une période de compostage de 132 jours. Ils ont expliqué cela par le fait que la fraction fulvique, extraite du matériel hétérogène comme les déchets ménagers, contient un niveau relativement élevé de matière organique biodégradable qui a été décomposée principalement entre le 20^{ème} et le 40^{ème} jour. Pour le même type de déchets, Jiménez et Garcia (1992) ont trouvé un indice d'humification supérieur à 0,6 pour un compost mûr issu de la phase de compostage (du 60^{ème} au 165^{ème} jour).

Tab.5.1. Caractéristiques physiques et chimiques des composts analysés

Compost	MS [%]	MO [%]	pH	CE [mS/cm]	NH ₄ -N [mg/kg MS]	NO ₂ -N [mg/kg MS]	NO ₃ -N [mg/kg MS]	NO ₃ -N / NH ₄ -N
Référence	92,9	28,9	6,4	2,3	8,6	0,3	71,5	8,4
Ata08-1	41,7	46,5	6,8	4,6	51,1	13,9	709,7	13,9
Ata10-1	53,2	30,1	8,2	1,9	3,7	nd	43,1	11,6
Ata12-1	46,8	24,1	8,2	5,5	235,3	8,0	87,8	0,4
Ata12-2	57,9	43,5	9,0	1,9	41,4	2,6	33,6	0,8
Ata29-1	50,0	21,1	8,1	2,2	2,8	3,7	41,1	14,6
Ata30-1	74,6	41,2	8,3	1,5	0,5	0,6	16,6	36,4
Ata30-2	52,8	40,8	8,3	2,9	30,2	nd	255,2	8,5
Ata36-1	57,6	59,2	8,4	1,5	2,3	1,6	17,8	7,8
Ata40-1	56,6	17,5	8,0	3,5	2,5	4,9	116,1	46,6
Ata56-1	63,3	17,2	8,0	5,6	58,0	44,6	32,4	0,6
Atr07-1	55,6	30,7	8,9	2,6	0,7	4,1	45,6	61,7
Atr08-1	60,1	30,0	8,4	2,5	16,1	2,0	114,9	7,2
Atr08-2	69,9	29,3	8,6	4,1	9,9	12,2	2,9	0,3
Atr10-1	60,5	25,9	8,8	2,7	2,6	5,4	4,0	1,6
Atr12-1	55,7	41,1	8,7	1,7	3,2	1,6	20,0	6,2
Atr12-2	40,6	45,4	8,8	1,6	2,1	0,7	4,8	2,3
Atr12-3	41,0	46,8	8,9	2,0	2,3	0,7	22,4	10,0
Atr12-4	66,0	49,7	9,1	3,1	3,0	2,8	34,0	11,6
Atr12-5	67,6	62,0	8,3	2,9	4,8	1,1	16,3	3,4
Atr15-1	61,6	26,5	8,0	3,0	3,7	268,4	0,8	0,2
Atr15-2	64,4	60,5	9,1	3,2	3,4	8,5	3,6	1,1
Atr15-3	66,3	62,2	8,6	2,6	3,4	15,4	3,3	1,0
Atr16-1	59,6	24,4	8,3	2,6	1,2	2,7	172,3	148,9
Atr20-1	82,9	26,9	8,3	4,6	7,3	1,0	24,4	3,4
Atr09-1	49,2	62,1	8,3	2,0	19,9	nd	nd	nd
Atr09-2	53,1	36,2	8,4	1,9	5,0	nd	69,4	13,9
Atr09-3	50,3	36,4	8,2	2,6	9,8	nd	60,0	6,1
Atrg12-1	60,2	54,5	8,5	1,9	3,3	0,8	18,4	5,6
Atrg13-1	52,9	22,5	8,7	3,2	10,7	82,7	3,9	0,4
Atrg16-1	45,0	37,8	8,5	0,9	1,4	0,6	4,4	3,2
Atrg18-1	44,0	46,5	8,6	1,5	3,5	0,7	4,8	1,4
Atrg26-1	35,1	21,9	8,5	2,4	3,8	14,7	70,2	18,4
Atrg26-2	51,7	21,3	8,5	2,5	0,8	3,8	111,2	135,8
Atrg33-1	56,5	37,4	8,1	nd	71,9	nd	309,0	4,3
Atrg08-1	45,8	54,6	8,3	1,8	38,2	nd	1,0	0,0
Dim08-1	62,9	56,6	8,5	4,1	428,4	nd	274,8	0,6
Dit10-1	50,3	45,5	8,3	nd	1239,0	nd	1,0	0,0

MS : Matière sèche

MO : Matière organique

pH : Potentiel hydroxyde

CE : Conductivité électrique

NH₄-N : Teneur en azote ammoniacalNO₂-N : Teneur en azote nitriteNO₃-N : Teneur en azote nitrate

nd: valeur non déterminée

Référence : BRS-200

En se basant sur ces résultats, on constate que la plupart des composts analysés sont encore en phase d'humification, les valeurs étant encore élevées par rapport à celles observées par Chen *et al.* (1996) et Chefetz *et al.* (1996). Il faut toutefois souligner qu'outre l'âge du compost, la composition des intrants ainsi que la conduite du système de compostage jouent un rôle important dans le degré et la vitesse d'humification de la matière organique. Par exemple, les valeurs les plus élevées trouvées dans le compost Atr09-1 et le digestat Dim08-1 peuvent être expliquées par leur âge et leur mode de production. En effet, le premier est un compost jeune à base de déchets verts frais, alors que Dim08-1 est un digestat à base de déchets verts et de fumier et issu d'un processus de méthanisation. Lors de la méthanisation, seule une décomposition des matières organiques facilement dégradables a lieu ; les matières comme la lignine n'y sont pas attaquées. D'autre part, l'humification des substances organiques n'a pas lieu en absence d'oxygène. Ainsi, un digestat correspond à un compost physiologiquement très jeune, ce qui est confirmé par un rapport AF/AH élevé.

Tab.5.2. Fractionnement chimique et physique de la matière organique des composts et de la tourbe

Compost	Corg [%]	Norg [%]	P _{AH} [%]	AF/AH	Tx ext (%)	Tx hum <50µm (%)	C/N	H/C
Tourbe	25,7	0,4	53,6	0,9	5,6	105,1	58,1	2,2
Ata10-1	15,3	0,8	58,2	0,7	8,7	65,6	19,4	1,6
Ata30-2	21,1	1,4	63,4	0,6	7,6	99,5	14,8	1,5
Ata36-1	17,5	1,0	55,8	0,8	11,6	79,8	17,4	1,6
Atr12-2	19,9	1,3	70,3	0,4	11,3	52,0	15,0	1,7
Atr09-1	26,8	1,5	40,9	1,5	6,2	61,8	18,2	1,6
Atr09-2	20,1	1,4	66,6	0,5	11,5	49,8	14,1	1,7
Atr09-3	19,6	1,3	55,2	0,8	8,1	38,5	14,8	1,6
Atrg12-1	20,2	1,4	70,1	0,4	10,9	96,9	14,5	1,7
Atrg08-1	24,1	1,2	57,2	0,8	6,9	66,7	20,7	1,7
Dim08-1	31,6	1,5	39,9	1,5	6,0	38,4	21,2	1,8

Corg : teneur en carbone organique du compost exprimé en % de son poids sec.

Norg : teneur en azote organique du compost exprimé en % de son poids sec.

P_{AH} : pourcentage d'acide humique (AH) exprimé en % de son carbone de matières humiques (AH+AF) extraites en solution alcaline.

AF/AH : indicateur du degré d'humification de la matière organique

Tx ext (%) : taux d'extraction de matières humiques (AF et AH) du compost exprimé en % de son carbone total.

Tx humi <50 µm : taux d'humification de la fraction organique inférieure à 50 µm

C/N : rapport entre le carbone organique total et l'azote organique total du compost

H/C : indice d'aromaticité du compost et de la tourbe.

Le pourcentage d'acide humique P_{AH} oscille entre 39,9 % pour le compost Dim08-1 et 70,3 % pour les composts Atr12-2 et Atrg12-1. Cet indice a été utilisé par Chefetz *et al.* (1996) et Jiménez et Garcia (1992) pour évaluer la maturité des composts d'ordures ménagères. Jiménez et Garcia (1992) ont constaté que le pourcentage d'acide humique augmente au-delà de 62 % dans le compost mûr après le 60^{ème} jour de compostage. Alors que le pourcentage d'acides humiques augmente jusqu'à 73% après le 90^{ème} jours (Chefetz *et al.*, 1996).

Le taux d'extraction de la fraction humique des composts (Tx ext) est compris entre 6 et 11%, alors qu'il est de 5,6 dans la tourbe. Le taux le plus élevé est enregistré chez les composts Ata36-1, Atrg12-1, Atr12-2 et Atr09-2, alors que les plus faibles ont été observés chez les composts Atr09-1, Atrg08-1 et Dim08-1. Ces valeurs sont plus faibles que celles trouvées par Jiménez et Garcia (1992), déterminées à partir de déchets ménagers. Ceci s'explique par le fait que ces auteurs ont exprimé le taux d'extraction en fonction du carbone oxydable, alors qu'ici il est calculé par rapport au carbone total. D'après Jiménez et Garcia (1992), ce paramètre ne peut pas être considéré comme un indice de maturité du fait de sa variation aléatoire au cours du processus de compostage. Saviozzi *et al.* (1988) et Inbar *et al.* (1990) ont par contre constaté que le taux d'extraction croît au fur et à mesure de la maturation du compost.

Comme on peut le constater avec les résultats du présent travail, ce paramètre varie en fonction des matières premières compostées et de l'âge du compost. Il reflète bien le degré d'humification de la matière organique au cours du processus de compostage. En effet, des valeurs basses traduisent une matière encore peu transformée (peu humifiée) alors que des valeurs élevées révèlent une matière organique plus riche en acides humiques et en humine (Gobat *et al.*, 2003).. Cette variation au niveau de Tx ext est faible par rapport à celle des sols. En effet, Fierz *et al.* (1995) ont par exemple décelé, dans leur étude de caractérisation du degré de maturation de la matière organique de sols alluviaux, des taux d'extraction variant entre 3 à 26 %.

On observe trois niveaux du **taux d'humification de la fraction inférieure à 50 μm** (tab. 5.2). Un niveau bas, inférieur à 50 % (composts Dim8-1, Atr9-3 et Atr9-2), un niveau moyen avec des taux d'humification compris entre 50 et 70 % (composts Atr12-2, Atr9-1, Ata10-1 et Atrg-1) et un niveau élevé avec des taux d'humification supérieurs à 70 % (composts Ata36-1, Atrg12-1, Ata30-2 et la tourbe). Les taux les plus élevés correspondent à des composts mûrs et bien humifiés, alors que les composts jeunes (Atr9-3, Atr9-2 et le digestat Dim8-1) ont des taux d'humification beaucoup plus faibles. Ce paramètre est un indicateur de stabilité du carbone fixé à long terme dans le sol et il reflète les bases potentielles de fertilité du sol (Gobat *et al.*, 2003). D'après ces résultats, ce paramètre peut être utilisé pour caractériser le

degré d'humification au cours du processus de compostage indépendamment des matières premières compostées.

Le **rapport C/N** des composts varie entre 14,1 et 21,2, la tourbe se distinguant nettement des composts avec une valeur beaucoup plus élevée : 58,1 (tab. 5.2). La variation entre les différents composts s'explique par la variabilité des intrants, par l'intensité des opérations effectuées dans chaque système de compostage et par l'âge du compost, ou plutôt par son degré de minéralisation. De manière générale, les rapports C/N sont relativement élevés, correspondants à des composts jeunes. Le rapport C/N de la fraction $< 50 \mu\text{m}$ est dans la plupart des cas légèrement inférieur au rapport C/N du compost entier, moins de matière lignifiée s'y trouvant. Le rapport C/N est fréquemment utilisé pour évaluer le processus de minéralisation de la matière organique (N'Dayegamiye et Isfan, 1991 ; Bernal *et al.*, 1998;) et comme indicateur de maturité des composts (Jiménez et Garcia, 1992; Chefetz *et al.*, 1996). D'après Jiménez et Garcia (1992), un rapport C/N inférieur à 12 dans la phase solide des composts ou un rapport C/N inférieur à 6 déterminé dans l'extrait aqueux peuvent être considérés comme un degré de maturité acceptable pour les composts de déchets ménagers. Chefetz *et al.* (1996) ont observé des rapports C/N semblables sur le même type de compost âgé de 140 jours ; néanmoins, ils ne considèrent pas ce rapport comme un paramètre ultime de maturité à cause de son invariabilité pendant la phase de maturation. D'après Pare *et al.* (1998) et Garcia *et al.* (1992), le rapport C/N mesuré dans l'extrait aqueux est un bon indicateur de la maturité de nombreux types de composts, car il tient compte de la disponibilité des éléments biodégradables. Cependant, vu que la nature des intrants influence fortement le rapport C/N, ce paramètre ne peut pas être considéré comme un indice de maturité absolu. Il peut toutefois, dans un processus donné, être utilisé pour caractériser le degré de minéralisation du compost.

Le rapport d'aromaticité H/C du compost était presque constant chez tous les composts analysés (entre 1,5 à 1,8). Par contre la tourbe a montré un rapport légèrement plus élevé (2,0). Un rapport d'aromaticité bas (< 1) indique une structure moléculaire à dominance aromatique. Tous les composts ont présenté un rapport d'aromaticité plus élevé que 1, ce qui signifie que leur structure aromatique est moins prononcée, et que par conséquent les acides humiques sont identifiés comme « jeunes » (Chen *et al.*, 1996). Cette observation correspond à celles faites par Inbar (1989) et Garcia *et al.* (1992) qui ont également trouvé des rapports H/C compris entre 1,1 à 1,4 dans divers déchets organiques.

Sur la base de l'ensemble des résultats, il paraît clairement difficile de déterminer la maturité des composts à partir de leurs seules propriétés physiques et chimiques, étant donné que ces

dernières sont fortement dépendantes de plusieurs facteurs dont notamment la composition de la matière première et la conduite du processus de compostage. En outre, la maturité chimique des composts ne prédit pas forcément l'influence de ceux-ci sur la croissance des plantes (Chen et Inbar, 1993). Des biotests sont recommandés pour caractériser l'effet de leur qualité sur les plantes (Jiménez et Garcia, 1992 ; Chen et Inbar, 1993; Fuchs et Bieri, 2000). La présence de composés phytotoxiques comme l'ammoniaque (Wong, 1985), l'oxyde d'éthylène (Wong, 1985) et les acides organiques : acétique, propionique, et acide *n*-butyrique (Chanyasak *et al.*, 1983), peut provoquer des dommages observés lors de l'application de composts non mûrs. Par conséquent, il est essentiel d'étudier les caractéristiques biologiques des composts afin d'éviter ces risques.

5.1.2. Caractérisation biologique

Microorganismes des composts et de la tourbe

De manière générale, les composts Ata30-2, Atr09-1 et Dim08-1 ont des populations de microorganismes plus importantes que les autres composts (fig. 5.1); en particulier le nombre de bactéries y atteint des valeurs comprises entre 10^8 et 10^9 [cfu/g]. Le même ordre de grandeur a été trouvé par Rogger *et al.* (1996) et Levanon et Pluda (2002). Levanon et Pluda (2002) ont isolé les bactéries à partir d'un mélange de compost de déchets de bovins et de poulets après 10 semaines de compostage. Ils ont constaté que la population bactérienne totale décroît au cours du processus de compostage au profit de celle d'actinomycètes et de champignons totale.

Les quantités d'actinomycètes présents dans les composts sont comprises entre 10^6 et 10^8 [cfu/g], seul le digestat Dim08-1 a une quantité supérieure à 10^9 [cfu/g] (fig. 5.1). Levanon et Pluda (2002) ont trouvé une quantité d'actinomycètes de l'ordre de 10^5 . Cette différence est probablement due à la composition de matière initiale et à la conduite du système de compostage.

En ce qui concerne les populations fongiques, le compost Ata30-2 et les digestats Dim08-1 et Dit10-1 en contiennent environ dix fois plus que la majorité des autres composts, à savoir près de 10^6 cfu/g. La population fongique isolée est à peu près 100 fois plus grande que celle trouvée par Levanon et Pluda (2002) après 30 semaines de compostage. Ceci est principalement dû à l'état physiologique encore relativement jeune des composts utilisés dans ce présent travail et à leurs intrants.

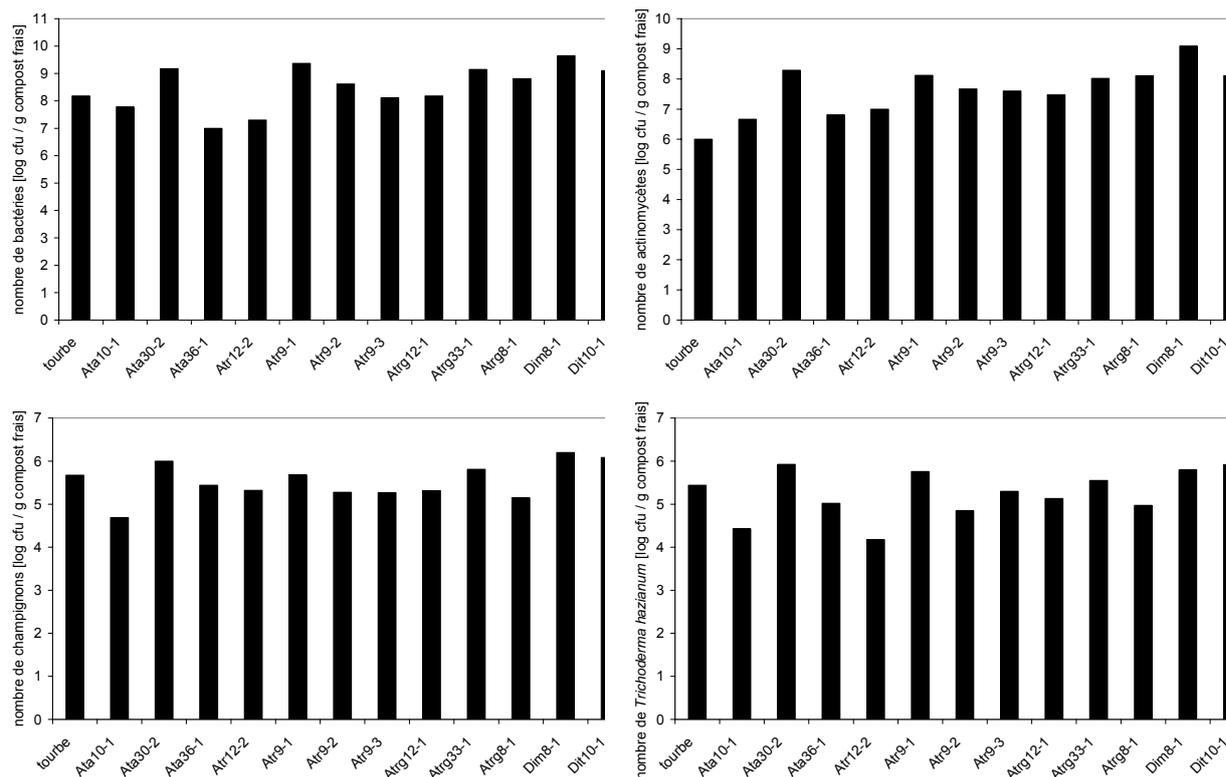


Fig. 5.1 Caractérisation des populations microbiennes des composts et de la tourbe employés.
 La détermination de la quantité des divers microorganismes a été réalisée par chaîne de dilution puis comptage des colonies sur milieux sélectifs.
 Les composts sont décrits dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d

Les composts Ata30-2, Atr09-1, Dim08-1 et Dit10-1 se différencient des autres composts par une population légèrement plus élevée de *Trichoderma harzianum*.

Les digestats Dim08-1 et Dit10-1 se différencient des composts par des quantités très élevées en microorganismes, toutes catégories confondues. Ces produits, déjà prétraités de manière anaérobie, se situent maintenant en phase de décomposition aérobie intensive, ce qui explique cette quantité importante de microorganismes.

De manière générale, la tourbe est nettement moins riche en microorganisme que les composts, même si le nombre de *Trichoderma harzianum* y était relativement élevé.

La composition initiale des composts ainsi que la technique de compostage peut jouer un rôle sur leurs microflore. Mais c'est surtout leur degré de décomposition, donc de maturation, qui reflète sa vie microbienne. Un compost jeune en phase thermophile est dominé par les bactéries, puis les actinomycètes et les champignons prennent la relève.

En général, l'amendement des sols avec du compost induit une augmentation des populations de microorganismes du sol par un facteur 1000 (Lazarovits, 2001), ce qui montre clairement les bénéfices de cette méthode.

La détermination de la maturité biologique des composts à partir de leur seule population microbienne semble difficile, car celle-ci est fortement influencée par la nature des déchets et les conditions ambiantes. Par contre, ce paramètre devrait nous permettre de mieux comprendre l'influence qu'elle exerce sur la population microbienne du sol ou du substrat.

Activité microbienne des composts (FDA)

L'activité microbienne, caractérisée par la capacité des composts à hydrolyser le diacétate fluorescent (FDA), peut être classée en quatre niveaux (fig. 5.2). Au niveau le plus bas, on trouve la tourbe avec des taux d'hydrolyse de FDA inférieurs à 4 µg/g de matière sèche/min. On a ensuite un deuxième niveau avec un seul compost, Ata10-1, ayant un taux d'hydrolyse de FDA à peu près égale à 7 µg/g de matière sèche/min. Un troisième niveau contenant Atr09-2, Atr09-3, Atr12-2, Atrg12-1, et Atrg33-1 montre des taux compris entre 8 et 12 µg/g de matière sèche/min. Enfin, trois composts et deux digestats (Ata30-2, Atrg08-1, Atr09-1, Dim08-1, Dit10-1) montrent des activités enzymatiques plus élevées que 12 µg/g de matière sèche/min.

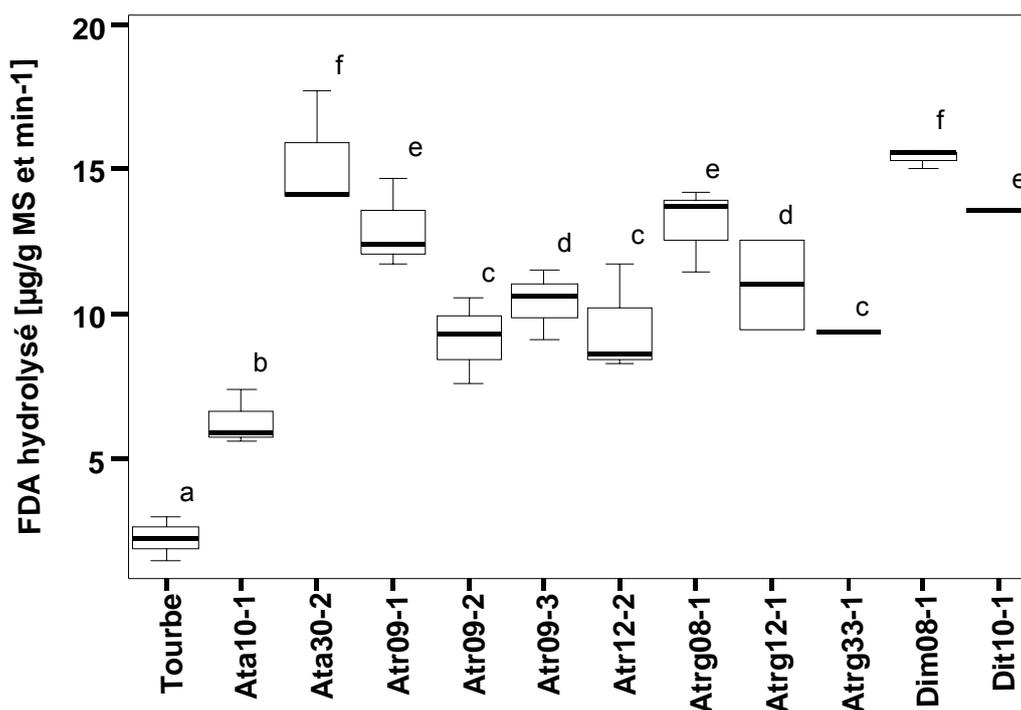


Fig. 5.2 Caractérisation de l'activité microbienne des composts et de la tourbe, mesurée par la capacité de ces produits à hydrolyser le diacétate fluorescent (FDA).

L'activité microbienne est mesurée en µg de FDA hydrolysé par gramme de matière sèche (MS) de compost et par minute (min) selon la méthode d'Inbar *et al.* (1991) et Craft et Nelson (1996) légèrement modifiée.

Chaque valeur est la moyenne de trois expériences indépendantes avec trois répétitions par expérience, à l'exception des composts Atrg12-1 (deux expériences), Atrg33-1 et Dit10-1 (une expérience). La figure montre la médiane de toutes les expériences ainsi que la variabilité entre les différentes expériences. Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. Les composts sont décrits dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

La fluctuation au niveau de l'hydrolyse de FDA s'explique concrètement par l'activité de décomposition des microorganismes hébergés dans les composts. Cette activité varie d'un compost à l'autre, principalement suivant son degré de maturation. Les composts Atr09-1, Atrg08-1, et Ata30-2 ainsi que les digestats Dim08-1 et Dit10-1, qui ont l'activité d'hydrolyse de FDA la plus importante, ont également un nombre de microorganismes relativement élevé par rapport aux autres composts, indépendamment du type de microorganisme isolé (fig. 5.2). L'effet de l'âge de compost ainsi que le système de compostage ne sont pas constants. On remarque par exemple dans le système de compostage à andin tabulaire que l'activité microbienne chez le compost âgé Ata30-2 est plus intense que celle chez le compost jeune Ata10-1. Par contre dans le système à andain triangulaire, l'activité microbienne est tendanciellement plus élevée dans les composts jeunes.

Concernant les composts issus du processus de méthanisation, aucune différence significative n'a été révélée entre les composts jeunes Dit10-1 et Dim08-1. Ainsi, l'influence exercée par la composition de la matière première des composts sur leur maturité microbiologique semble évidente.

Levanon et Pluda (2002) ont trouvé une corrélation positive entre l'activité microbienne mesurée par FDA et les changements des principaux groupes de microorganismes des composts durant le processus de compostage. L'activité microbienne la plus élevée a été enregistrée après 29 semaines du processus de compostage.

On peut ainsi conclure, que l'âge physiologique (en semaine) du compost ne reflète pas sa maturité microbiologique. D'autres facteurs influencent de manière déterminante cette maturité : composition des intrants, intensité du processus, humidité du tas pendant le processus de compostage, etc.

Test de phytotoxicité des composts

Pour définir le risque phytotoxique des composts, cinq plantes tests ont été semées dans du compost pur (selon la méthode de Fuchs et Bieri, 2000). La croissance des plantes était ensuite exprimée en pourcent de la croissance des mêmes plantes dans le substrat de référence standard BRS-200 (Biophyt SA, CH-Mellikon). Les résultats de ces tests sont présentés dans le tableau 5.3.

Les composts dans lesquels la croissance des plantes était dans chaque test supérieure à 70 % par rapport à la croissance dans le substrat de référence sont de bonne qualité biologique et ne présentent pas, selon les directives de l'ASIC, de risques de phytotoxicité dans la pratique (Fuchs *et al.*, 2001).

Le test du **resson ouvert** est le moins sensible de tous. Une variation relativement grande y est observée. Toutefois, les plantes poussent relativement bien dans la majorité des composts.

Tab 5.3. Tests de phytotoxicité des différents composts utilisés

Compost	Cresson ouvert ¹	Cresson fermé ²	Salade ¹	Ray gras d'Italie ¹	Haricot ³
Ata08-1	39,0	0,0	52,1	53,1	10,7
Ata10-1	97,0	58,9	57,5	56,1	85,0
Ata12-1	14,0	0,0	0,0	29,4	19,0
Ata12-2	52,6	0,0	74,5	50,3	99,2
Ata29-1	67,9	14,1	123,6	37,9	83,4
Ata30-1	68,8	16,4	80,6	52,6	146,1
Ata30-2	95,9	38,6	26,3	65,6	29,4
Ata36-1	112,6	105,0	67,4	40,2	91,8
Ata40-1	81,2	68,2	102,8	56,3	76,4
Ata56-1	43,4	11,8	15,7	27,8	37,2
Atr07-1	40,9	45,8	37,8	82,7	57,8
Atr08-1	76,9	60,3	59,8	68,9	61,9
Atr08-2	32,5	3,1	72,6	46,4	6,8
Atr10-1	116,0	16,3	73,3	45,0	66,5
Atr12-1	54,8	53,4	51,6	90,5	77,3
Atr12-2	114,6	85,4	80,9	78,3	84,4
Atr12-3	88,9	62,2	49,0	63,2	81,4
Atr12-4	39,5	0,0	83,1	39,5	67,8
Atr12-5	40,1	0,0	79,5	41,1	73,3
Atr15-1	89,7	75,9	84,6	80,7	72,4
Atr15-2	40,2	0,0	61,5	40,2	48,8
Atr15-3	60,9	13,3	89,1	60,9	73,5
Atr16-1	65,0	63,6	50,3	89,3	65,9
Atr20-1	22,3	8,8	70,1	46,0	13,1
Atr09-1	61,2	19,9	48,7	32,8	75,2
Atr09-2	99,9	32,4	21,7	66,6	73,6
Atr09-3	21,4	25,9	46,8	65,6	67,5
Atrg12-1	58,9	0,0	67,9	38,8	64,2
Atrg13-1	75,8	3,6	50,9	20,7	60,5
Atrg16-1	163,0	0,1	72,3	25,8	71,1
Atrg18-1	198,0	1,3	45,4	43,8	81,3
Atrg26-1	140,0	43,6	135,8	48,8	77,6
Atrg26-2	120,5	70,3	117,3	61,0	74,5
Atrg33-1	84,5	32,2	11,8	62,3	69,5
Atrg08-1	91,7	23,1	32,1	38,4	74,7
Dim08-1	76,6	0,00	39,3	26,6	22,7
Dit10-1	47,1	0,00	2,3	25,2	7,8

Les biotests sont réalisés selon la méthode de Fuchs et Bieri, 2000.

¹ : poids des pousses croissant dans le compost en % du poids des pousses croissant dans le substrat de référence BRS-200.

² : longueur des racines des plantes dans le compost en % de la longueur des racines dans le substrat de référence BRS-200.

³ : poids des racines des plantes croissant dans le compost en % du poids des racines des plantes croissant dans le substrat de référence BRS-200.

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois pots. Les composts sont décrits dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

Le test du **cresson fermé** est très sensible à la qualité biologique des composts, car d'une part les graines sont directement au contact du compost, et d'autre part elles sont également confrontées aux gaz éventuels s'y dégageant. Avec ce test, on peut définir l'aptitude des composts à être employé pour des utilisations spéciales, comme par exemple pour les substrats de culture. Les composts biologiquement jeunes ou ayant eu une asphyxie lors de leur maturation ou de leur stockage se montrent fortement phytotoxiques dans ce test. Le compost Atr08-1 est jeune en âge, mais, de par la conduite de compostage très intensive qu'il a subi, il est déjà très avancé biologiquement, ce qui explique le très bon résultat dans ce test. D'autre part, un compost âgé comme le Ata56-1 n'a pas permis au cresson de croître dans le système fermé, probablement à cause d'un manque d'oxygène lors de son stockage.

Le test de la **salade** est moyennement sensible à la qualité des composts et a permis de réaliser une bonne différenciation des divers produits. Le poids des pousses variait de 0 à 135 % par rapport au substrat de référence. Une tendance à l'augmentation du poids a été remarquée chez les composts mûrs, à cause de leur teneur élevée en nitrate, contrairement à la plupart des composts jeunes qui sont encore peu compatibles avec les plantes.

Le test de **ray-grass d'Italie** réagit surtout à la disponibilité dans le temps de l'azote des composts. Le poids des pousses dans le compost varie de 20 à 90 % comparé au substrat de référence. Le test de croissance de ray-grass a été choisi par Iannotti *et al.* (1994) comme étant la mesure de croissance préférée pour la maturité des composts de déchets ménagers à cause de sa grande sensibilité aux changements pendant la phase de maturité.

Le test du **haricot** met en évidence les composts ayant souffert d'asphyxie pendant leur maturation ou leur stockage. De manière générale, les valeurs de ce test sont meilleures pour tous les composts mûrs.

Différents biotests ont été employés afin d'une part de déterminer la stabilité et la maturité de différents types de compost et d'autre part d'évaluer leur qualité biologique (Zuconi *et al.*, 1981, Iannotti *et al.*, 1994 ; Warman, 1999 ; Fuchs et Bieri, 2000).

Iannotti *et al.* (1994) ont révélé dans leurs biotests que les composts jeunes inhibent la croissance du radis et du ray-grass. Par contre, la croissance du ray-grass poussant dans des pots contenant du compost pur de déchets ménagers, non amendé avec des fertilisants, était accrue comparée à la variante tourbe. Ces résultats confirment nos observations faites avec les composts testés sur les plantes de ray-grass.

Le test de germination de graines de cresson dans l'extrait aqueux de compost, utilisé comme indicateur de phytotoxicité, a révélé une inhibition de germination dans tous les niveaux de maturité des composts. Iannotti *et al.* (1994) reliaient cela à la teneur en sel de l'extrait de compost. Par contre, les résultats obtenus par Warman (1999) vont à l'encontre de ceux trouvés dans le présent travail et par les autres chercheurs. Cet auteur a utilisé trois biotests de

germination (germination dans l'extrait aqueux de compost et compost/sol, croissance des plantes dans les composts) pour déterminer la maturité et la phytotoxicité des composts. Trois espèces végétales ont été employées, qui sont le cresson (*Lepidium sativum*), le radis (*Raphanus sativus*) et chou chinois (*Brassica chinensis*). Il a conclu dans son étude que les trois biotests utilisés n'étaient pas assez sensibles pour détecter la différence entre les composts mûrs et jeunes. Il est probable que les composts jeunes contiennent une quantité trop faible de composés organiques phytotoxiques pour inhiber la croissance des plantes dans ses systèmes.

Afin de déterminer la qualité biologique des composts, il semble donc nécessaire d'employer une combinaison de plusieurs biotests.

5.2. Influence des composts sur le développement des maladies telluriques

5.2.1. Influence des composts sur le développement de la maladie de la fonte du semis de concombre (agent pathogène *Pythium ultimum*)

La plupart des composts testés montrent une capacité à protéger les plantes de concombre contre la fonte des semis, indépendamment de la technique de compostage employée (fig. 5.3). Cette protection peut même dans certains cas dépasser 100 % par rapport au témoin (composts Atr12-2 et Atrg33-1), ce qui signifie que la levée des plantes dans le substrat amendé avec du compost et ayant reçu l'agent pathogène est même meilleure que la levée dans le substrat sans compost et sans agent pathogène.

Les composts jeunes protègent les plantes de concombre contre la maladie de la fonte du semis causée par *Pythium ultimum* indépendamment de la pression de la maladie testée (fig. 5.4). Tendanciellement, leur potentiel suppressif diminue avec l'âge du compost. En effet, à l'exception du site de compostage 6, les composts jeunes des autres sites ont montré un potentiel suppressif plus élevé que les composts plus âgés.

En effet, la majorité des composts jeunes testés possèdent une biomasse et une activité microbienne importante. Cette observation va dans le sens des résultats trouvés par Chen *et al.* (1988a) et Mandelbaum et Hadar (1990). Ces derniers chercheurs ont constaté que la biomasse et l'activité élevée causée par « la microflore générale du sol » dans le substrat empêchent la germination de *Pythium* ou *Phytophthora* spp., et par conséquent l'infection de la plante.

L'activité microbienne mesurée par le taux d'hydrolyse de diacétate fluorescent (FDA) n'est pas corrélée avec le degré de protection des plantes de concombre malgré son activité élevée chez quelques composts (fig. 5.2). De même, aucune corrélation entre le degré de protection des plantes de concombre et la biomasse microbienne des composts n'a pu être observée (fig.

5.1). Ces résultats s'écartent de ceux trouvés par Boehm et Hoitink (1992), Chen *et al.* (1988a), Mandelbaum et Hadar (1990) et You et Sivasithamparam (1994) qui ont observé une corrélation entre l'activité microbienne et la suppressivité de la maladie de fonte des semis causée par *Pythium* sp.,. En revanche, ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Chen *et al.* (1988a), Mandelbaum and Hadar (1990), Hardy and Sivasithamparam (1991) et Boehm *et al.* (1993) en ce qui concerne le rôle de la biomasse microbienne sur le potentiel des composts à protéger les plantes contre *Pythium ultimum*. L'importance de la biomasse apportée avec le compost entraîne une compétition entre les microorganismes antagonistes du compost et l'agent pathogène. Cette compétition joue souvent en défaveur de pathogènes comme *Pythium* et *Phytophthora* (Fuchs, 1995c).

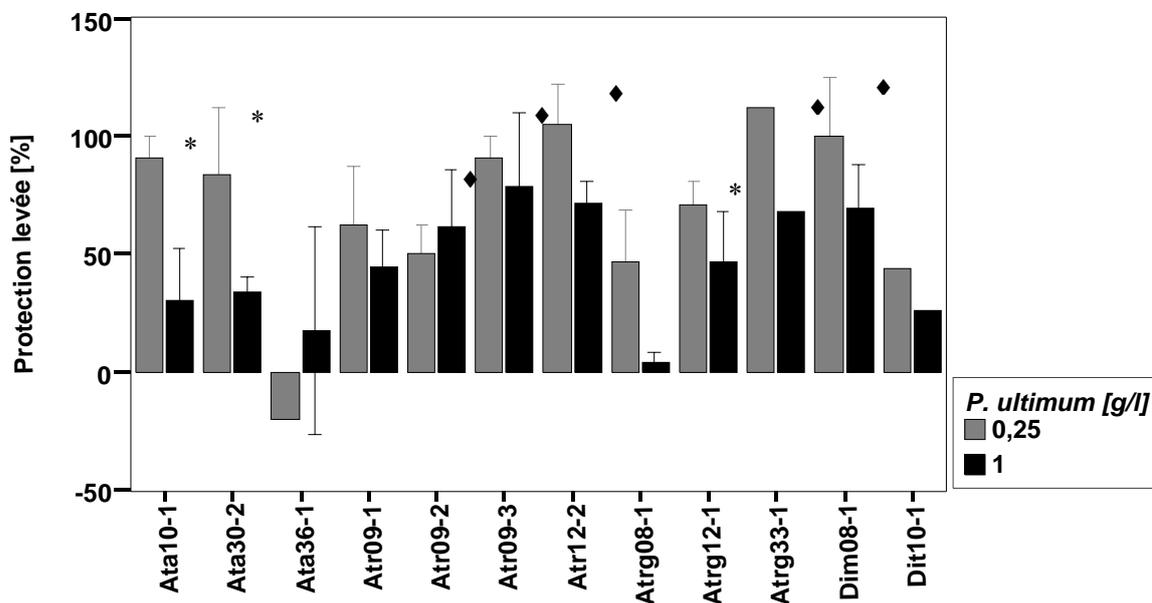


Fig. 5.3. Capacité de différents composts à protéger des plantes de concombre contre la maladie de la fonte du semis causée par *Pythium ultimum*.

Dans la variante substrat (témoin), la moyenne de l'incidence de la maladie était de 49 resp. 75 %, pour les deux concentrations de l'agent pathogène de 0,25 resp. 1 g.

Vingt pourcent du compost ont été mélangés à la tourbe. Deux concentrations de l'agent pathogène (0,25 g et 1 g d'une culture sur millet âgée de 7 jours) ont été ajoutées par litre de substrat. Cinq graines de concombre ont été semées par pot. Après 14 jours, le nombre de plantes levées par pot a été compté.

Chaque valeur correspond à la moyenne de 3 expériences indépendantes avec 6 répétitions par expérience, excepté pour les composts Ata10-1 et Ata36-1 (deux expériences), et Atrg33-1 et Dit10-1 (une expérience). La figure montre la médiane de toutes les expériences ainsi que la variabilité entre les différentes expériences (moyenne \pm erreur standard). Les différences significatives entre le témoin et les composts sont marquées ($P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B). (*) indique une protection significative pour la faible concentration de l'inoculum. (♦) indique une protection significative pour les deux concentrations d'inoculum. Les composts employés sont décrits dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

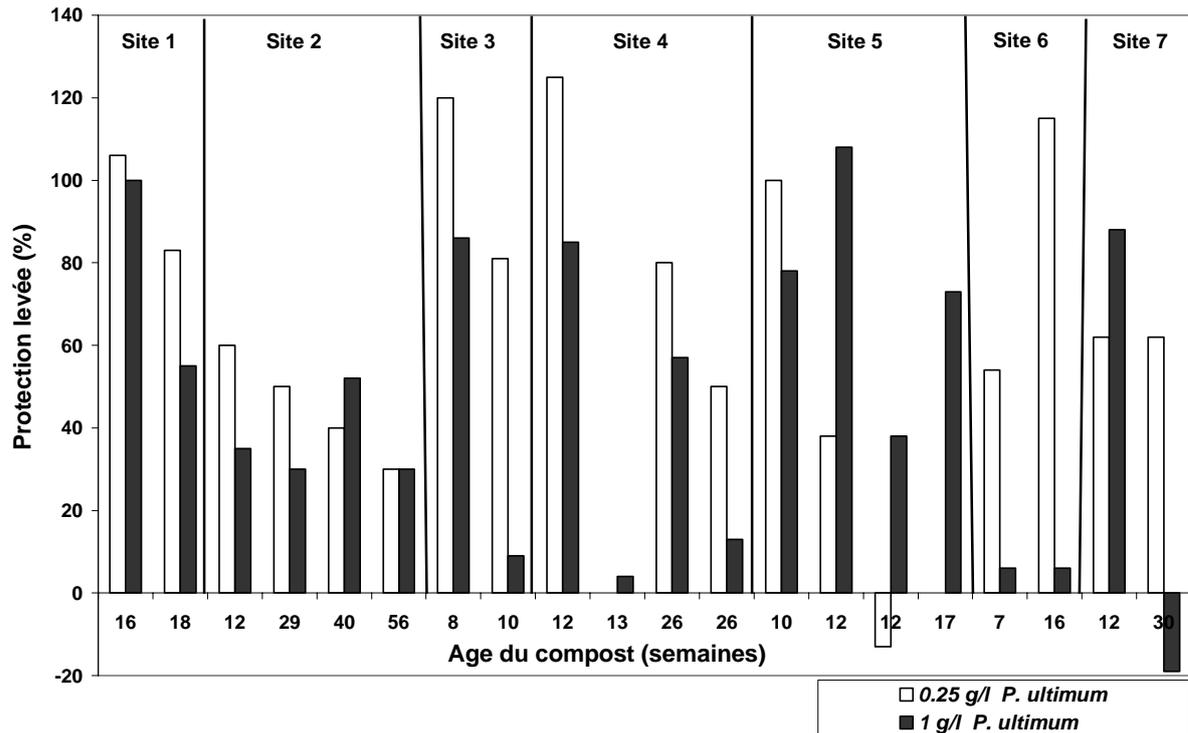


Fig. 5. 4. Influence de l'âge du compost sur son potentiel à protéger des plantes de concombre contre la maladie de la fonte du semis causée par *Pythium ultimum*.

Dans la variante substrat (témoin), la moyenne de l'incidence de la maladie était de 43 resp. 70 %, pour les deux concentrations de l'agent pathogène 0,25 resp. 1 g/l.

Dix pourcent du compost ont été mélangés à la tourbe. Deux concentrations de l'agent pathogène (0,25g et 1g d'une culture sur millet âgée de 7 jours) ont été ajoutées par litre de substrat. Cinq graines de concombre ont été semées par pot. Après 14 jours, le nombre de plantes levées par pot a été compté.

Chaque valeur correspond à la moyenne de 6 pots. Les différents composts testés sont les suivants : **site 1** : Atrg16-1, Atrg18-1 ; **site 2** : Ata12-1, Ata29-1, Ata40-1, Ata56-1 ; **site 3** : Ata08-1, Ata10-1 ; **site 4** : Atrg12-1, Atrg13-1, Atrg26-1, Atrg26-2 ; **site 5** : Atr10-1, Atr12-4, Atr12-5, Atr17-1 ; **site 6** : Atr07-1, Atr16-1 ; **site 7** : Ata12-2, Ata30-1. Les composts sont décrits dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

D'autre part, ces auteurs ont cependant tous travaillé avec des types de composts relativement homogènes et définis, ce qui leur a permis de faire une analyse beaucoup plus fine des mécanismes en jeu. Dans la présente étude, nous avons affaire à une diversité très grande de types de composts, et d'autres paramètres influençant la relation plante-pathogène, comme la disponibilité des éléments fertilisants, pourraient également jouer un rôle très important dans la protection des plantes, et en partie masquer l'influence des populations microbiennes.

Cependant, bien qu'aucune corrélation n'ait pu être mise en évidence entre la microflore des composts et leur effet suppressif, nous pensons que les mécanismes responsables du résultat sont de nature microbienne. Il s'agit probablement d'une compétition entre la population microbienne du compost et celle de l'agent pathogène *Pythium ultimum* pour les éléments nutritifs, notamment le carbone organique et le fer. Cette « suppression générale » a été

décrite par plusieurs chercheurs (Boehm *et al.*, 1993 ;Chen *et al.*, 1988a et 1988b ; Hardy and Sivasithamparam, 1991; Mandelbaum and Hadar, 1990).

5.2.2. Influence des composts sur le développement de la maladie de la pourriture des racines du basilic (agent pathogène *Rhizoctonia solani*)

Contrairement aux observations faites dans le système *Pythium ultimum*-concombre, seuls peu de composts (Ata30-2, Atr09-1, Atrg12-1, Dim08-1) ont pu significativement réduire la mortalité des plantes du basilic dans les deux concentrations de la maladie testée (fig. 5.5). Le meilleur effet protecteur a été observé avec Atr09-1 (81,5 % de réduction de la maladie avec 4 unités de *R. solani* / pot).

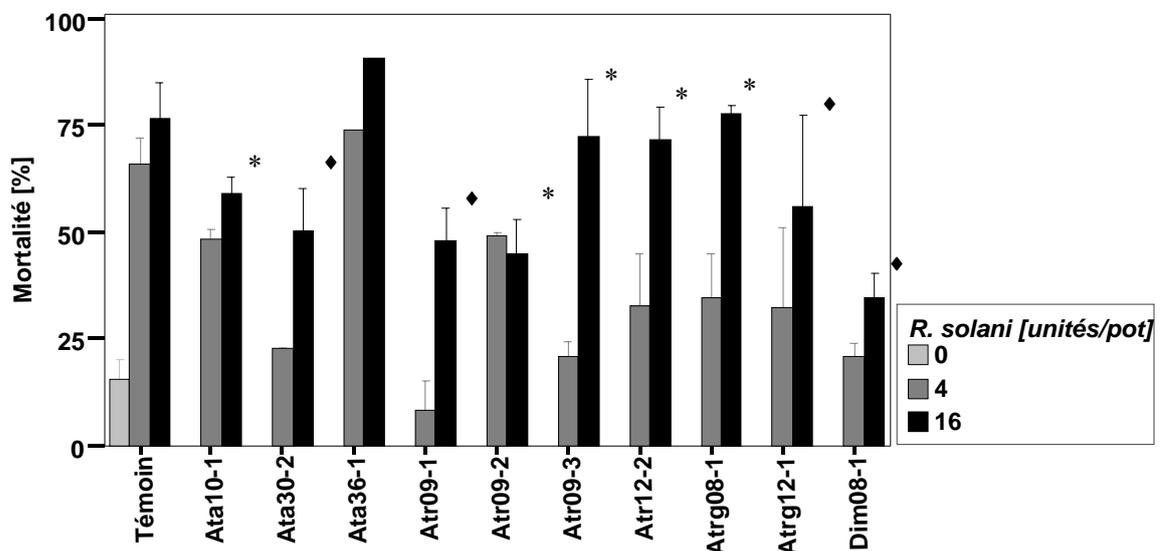


Fig. 5.5. Capacité de différents composts à protéger des plantes de basilic contre la maladie de la pourriture des racines causée par *Rhizoctonia solani*.

Vingt pourcent du compost ont été mélangés avec la tourbe. Deux concentrations de l'agent pathogène (4 et 16 unités d'une culture sur millet âgée de 7 jours) ont été ajoutées par pot. Vingt graines de basilic ont été semées par pot. Le nombre de plantes vivantes par pot a été compté après 7, 10 et 15 jours.

Chaque valeur correspond à la moyenne de 2 expériences indépendantes avec 6 répétitions par expérience, excepté pour le compost Ata36-1 (une expérience). La figure montre la moyenne de toutes les expériences ainsi que la variabilité entre les différentes expériences (moyenne \pm erreur standard). Les différences significatives entre le témoin et les composts sont marquées ($P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B). (*) indique une protection significative pour une des concentrations de l'inoculum. (♦) indique une protection significative pour les deux concentrations de l'inoculum. Les composts employés sont décrits dans les tableaux 4.2a à 4.2d.

Les populations microbiennes des trois composts les plus efficaces pour protéger les plantes de basilic (Ata30-2, Atr09-1 et Dim08-1) étaient relativement élevées par rapport à celles des autres composts, surtout en ce qui concerne la quantité de *Trichoderma* sp. présents (fig. 5.2). Ceci va dans le sens des résultats de Kuter *et al.* (1983) et Nelson *et al.* (1983) qui ont montré que *Trichoderma* spp., et en particulier *T. hamatum* et *T. harzianum*, et *Gliocladium virens*

sont les microorganismes les plus prédominants dans les composts préparés à base de déchets ligno-cellulosiques (déchets d'écorces d'arbres), et que ces champignons peuvent jouer un rôle essentiel dans la protection des plantes contre *Rhizoctonia solani* (Hoitink *et al.*, 1991).

La population également importante des bactéries observées dans ces trois composts pourrait augmenter l'action bénéfique des *Trichoderma* sp., comme l'ont également décrit Kuter *et al.* (1983). Nelson *et al.* (1983) et Kwok *et al.* (1987), qui ont pu isoler des cultures de *Trichoderma* spp. et de *Gliocladium virens* à partir de propagules mortes de *R. solani*, ont suggéré qu'un mécanisme d'hyperparasitisme était également impliqué dans cette réaction.

L'influence de la conduite de compostage sur la capacité des composts à protéger les plantes contre *R. solani* est plus importante que celle de l'âge (fig. 5.6), les composts provenant des sites 1, 6 et 7 montrant de manière générale une bonne efficacité phytosanitaire contre cette maladie.

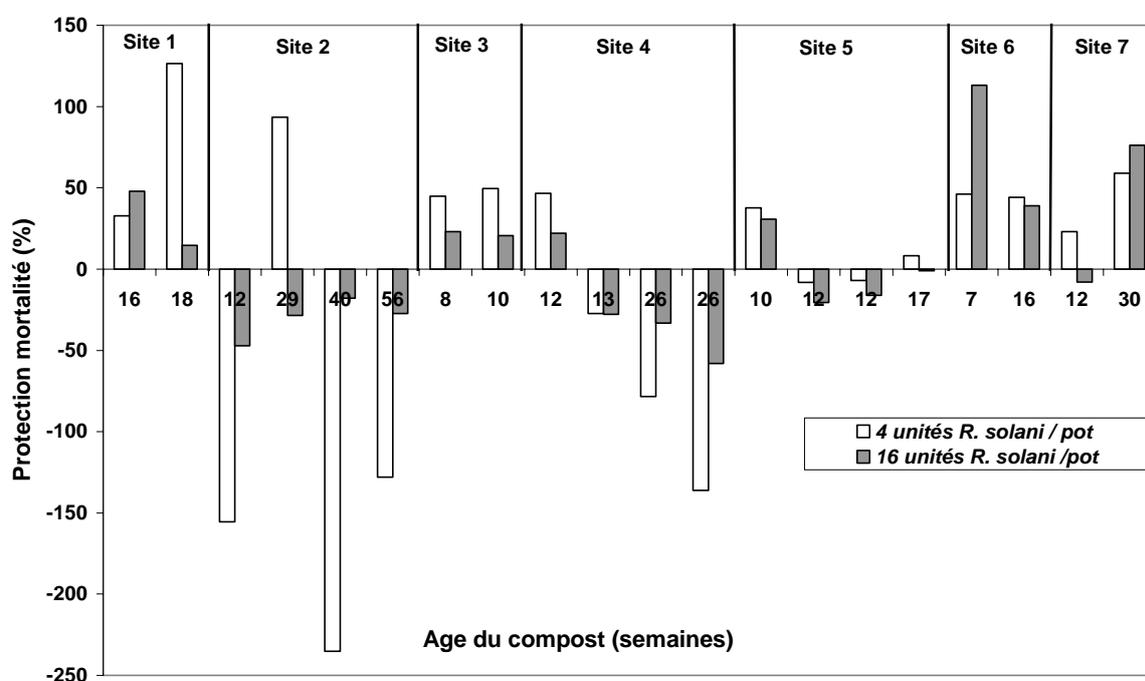


Fig. 5.6. Influence de l'âge du compost sur son potentiel à protéger des plantes de basilic contre la maladie de la pourriture des racines causée par *Rhizoctonia solani*.

Dans la varinate substrat (témoin) la moyenne de l'incidence de la maladie était de 40 resp. 60 % pour les deux concentrations de l'agent pathogène 4 resp. 16 unités/pot.

Dix pourcent du compost ont été mélangés avec la tourbe. Deux concentrations de l'agent pathogène (4 et 16 unités d'une culture sur millet âgée de 7 jours) ont été ajoutées par pot. Vingt graines de basilic ont été semées par pot. Le nombre de plantes vivantes par pot a été compté après 7, 10 et 15 jours.

Chaque valeur correspond à la moyenne de 6 pots. Les différents composts testés sont les suivants : **site 1** : Atrg16-1, Atrg18-1 ; **site 2** : Ata12-1, Ata29-1, Ata40-1, Ata56-1 ; **site 3** : Ata08-1, Ata10-1 ; **site 4** : Atrg12-1, Atrg13-1, Atrg26-1, Atrg26-2 ; **site 5** : Atr10-1, Atr12-4, Atr12-5, Atr17-1 ; **site 6** : Atr07-1, Atr16-1 ; **site 7** : Ata12-2, Ata30-1. Les composts employés sont décrits dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

L'effet de l'âge et la composition de la matière première des composts sur la suppression de *R. solani* ont été mis en évidence par de nombreux chercheurs. Nelson *et al.* (1983) et Chung *et al.* (1988a) ont démontré que l'activité des antagonistes contre *R. solani* dans un compost jeune ne pouvait pas être assez efficace car aussi bien l'agent pathogène que les antagonistes se développent de manière saprophyte. Par contre, dans un compost mûr, lorsque la concentration des éléments nutritifs est basse (Chen *et al.*, 1988), les sclérotés de *R. solani* sont éradiqués par hyperparasitisme et les agents antagonistes spécifiques l'emportent (Nelson *et al.*, 1983).

La composition des composts peut jouer un rôle dans le mécanisme de suppression de *R. solani*. Chung *et al.* (1988a) ont montré que le taux élevé de cellulose dans les composts d'écorces d'arbre amendés dans le substrat (20 %, poids/poids) réduit l'efficacité des ces agents antagonistes. Ils ont ainsi émis l'hypothèse que le niveau élevé de cellulose engendre une production élevée de glucose qui inhibe la production de chitinase. En conséquence, ceci réduit l'hyperparasitisme de *R. solani*, ce qui pourrait aboutir à une augmentation de la sévérité de la maladie.

D'après nos résultats et ces observations, il apparaît que les mécanismes de protection des plantes contre *Rhizoctonia solani* sont différents de ceux impliqués contre *Pythium ultimum*, probablement car seul un nombre limité de microorganismes est capable d'éradiquer le *R. solani*. Hoitink *et al.* (1991) ont décrit ce phénomène phytosanitaire contre *R. solani* comme un mécanisme de « suppression spécifique ».

La composition du matériel de départ semble également avoir une grande importance sur la population de *Trichoderma* sp., pendant la phase de maturation. En effet, ce champignon, capable de dégrader la lignine, est favorisé par une quantité plus importante de déchets ligneux. Or, ce champignon semble jouer un rôle prépondérant dans la protection des plantes contre des champignons comme *Rhizoctonia* sp. (Hoitink *et al.*, 1997). Ce facteur n'est donc pas négligeable et doit retenir une attention particulière.

5.3. Influence des extraits de composts sur le développement des maladies foliaires

L'influence des différents extraits de composts sur le développement des maladies foliaires a été étudiée avec les systèmes plante-pathogène pommier-*Venturia inaequalis* et vigne-*Plasmopara viticola*

5.3.1. Influence de divers extraits de composts sur le développement de la maladie de la tavelure du pommier causée par *Venturia inaequalis*

Environ 80 % des extraits de composts testés ont diminué la sévérité de la tavelure sur les plantules de pommier, seulement 20 % des extraits n'ont montré aucun effet protecteur (tab. 5.4). L'effet de protection contre *Venturia inaequalis* varie cependant fortement d'un compost à l'autre et également entre les répétitions des expériences avec un même compost, comme pour le compost Atrg12-1, qui dans une répétition a réduit l'attaque de tavelure de 97,9 %, et dans l'autre a augmenté les symptômes de la maladie de 12,7 % (tab. 5.4). Le mode d'application de l'extrait pourrait expliquer une partie de cette variabilité. En effet, après ces premiers screening, le mode de traitement des plantules de pommier a été optimiser, et les variations de l'effet protecteur d'une répétition à l'autre a alors fortement diminué. D'autre part, la qualité des extraits peut varier d'une extraction à l'autre, variation due à la complexité des processus en jeu.

Le traitement des plantules de pommier avec les divers extraits de composts ne réduit guère l'incidence de la maladie causée par *V. inaequalis*, excepté avec le compost Atr09-3 qui a réduit significativement l'incidence de la maladie à un maximum de 16 %. Par contre, tous les extraits employés ont réduit significativement la sévérité de la maladie de plus de 40 % (fig. 5.7). Ceci signifie que le nombre de feuilles de pommier attaquées n'est pas diminué, mais que les symptômes restent peu sévères. Entre les divers composts, aucune différence significative n'a pu être observée.

5.3.2. Influence de divers extraits de composts sur le développement de la maladie du mildiou de la vigne causée par *Plasmopara viticola*

Les différents extraits de composts testés réduisent en moyenne de 46 % l'incidence de *Plasmopara viticola* sur les feuilles de vigne (fig. 5.8). Les valeurs les plus basses de l'incidence de la maladie ont été enregistrées chez le compost Dim08-1, suivi par Atr09-3 et Ata30-2.

De même, l'application des différents extraits de composts sur les plantules de vignes a réduit de 60 % le diamètre des lésions provoquées par *Plasmopara viticola* par rapport au témoin (fig. 5. 8.). Le compost Dim08-1 était le plus efficace, suivi de Atr09-3 et Ata30-2.

Tab. 5.4. Capacité des différents extraits de composts à protéger *in vivo* les plantules de pommier contre la maladie de la tavelure du pommier, agent pathogène *Venturia inaequalis*.

Extrait compost	Protection (%)			N
	Moyenne	Minimum	Maximum	
Ata081	44,3	28,5	62,2	6
Ata10-1	43,6	22,4	70,9	6
Ata12-2	17,4			1
Ata30-1	17,3			1
Ata30-2	61,3	48,4	75,2	6
Ata36-1	14,5	-35,6	64,6	2
Ata40-1	34,5	13,5	60,1	6
Atr06-1	-24,0			1
Atr08-1	44,4			
Atr08-2	47,3	15,5	78,9	5
Atr09-1	31,6	11,0	61,3	6
Atr09-2	38,9	5,0	64,7	6
Atr09-3	57,9	27,3	73,8	6
Atr10-1	41,9	27,6	65,5	4
Atr12-1	-69,7			1
Atr12-2	58,8	47,1	67,2	6
Atr12-3	17,8			1
Atr15-1	-44,4			1
Atr15-2	63,7	36,0	91,5	2
Atr15-3	67,9	41,7	94,2	2
Atr16-1	-44,8			1
Atr20-1	40,5	39,6	41,4	2
Atr30-1	-20,3			1
Atrg08-1	61,9	50,8	75,8	6
Atrg12-1	37,2	-12,7	97,9	5
Dim08-1	64,5	36,2	75,8	6

Les extractions aqueuses du compost (1 : 2 ; v : v ; compost/eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après une durée d'extraction de trois jours. Les plantules de pommier de la variété Mac Intosh (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées deux jours plus tard avec *Venturia inaequalis* (50'000 conidies/ml). La sévérité de la maladie a été évaluée 12 à 14 jours après leur inoculation. N : nombre d'expériences indépendantes réalisées. Moyenne : moyenne de protection de toutes les expériences ; minimum et maximum : protection minimale et maximale lors des diverses répétitions de l'essai.

La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2a à 4.2d.

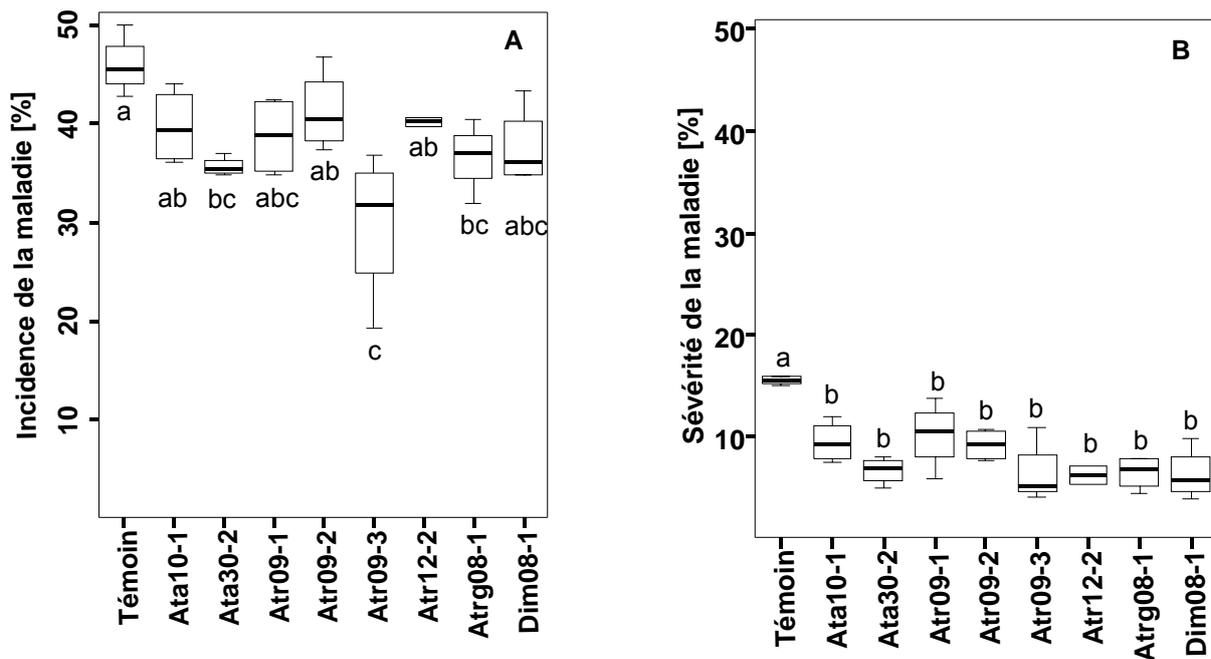


Fig. 5.7. Influence des divers extraits de composts sur l'incidence (A) et la sévérité (B) de la maladie de la tavelure du pommier causée par *Venturia inaequalis*.

Les extractions aqueuses du compost (1 : 2 ; v : v ; compost : eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après une durée d'extraction de trois jours. Les plantules de pommier de la variété Mac Intosh (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées deux jours plus tard avec *Venturia inaequalis* (50'000 conidies/ml). L'incidence et la sévérité de la maladie ont été évaluées 12 à 14 jours après leur inoculation.

Chaque valeur correspond à la moyenne de 4 expériences indépendantes, avec 8 répétitions par expérience, excepté pour le compost Atr12-2 (2 expériences). La figure montre la médiane de toutes les expériences ainsi que la variabilité entre les différentes expériences. Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2a à 4.2d.

5.3.3. Influence du mode de production de l'extrait de compost sur sa capacité à protéger les plantes de pommier contre la tavelure causée par *Venturia inaequalis*

Les divers travaux réalisés dans le monde avec des extraits de composts sont difficilement comparables, car les modes de production des extraits varient d'un auteur à l'autre. Deux paramètres primordiaux peuvent a priori jouer un rôle dans la production des extraits : d'une part le **rapport d'extraction eau/compost**, et d'autre part la **durée de l'extraction**.

Les deux **rapports d'extraction** 1 : 2 et 1 : 5 (v : v ; compost : eau) testés dans le présent travail n'ont pas influencé la capacité des extraits à protéger les plantules de pommier contre *Venturia inaequalis*. Pour les trois composts Ata08-1, Ata40-1 et Atr10-1 étudiés, les résultats de protection obtenus avec ces différents rapports ne diffèrent pas significativement, tous les extraits diminuant le développement de la maladie de plus de 40 % (fig. 5.9).

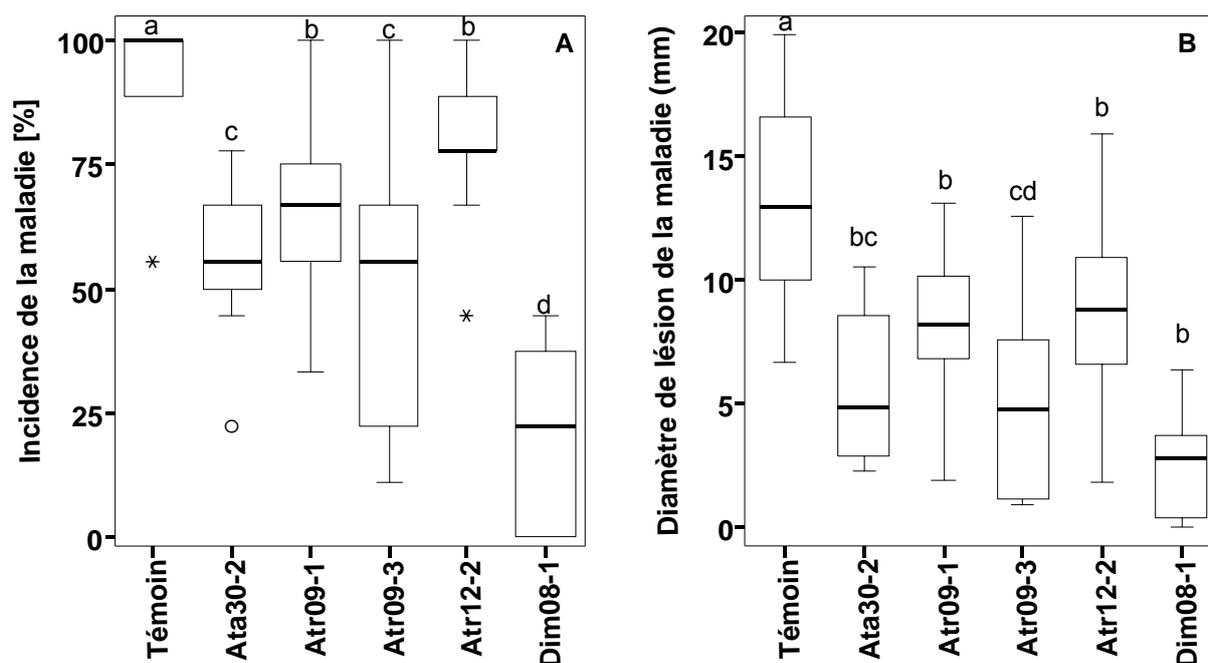


Fig. 5.8. Influence des divers extraits de composts sur l'incidence (A) et la sévérité (B) de la maladie du mildiou de la vigne causée par *Plasmopara viticola*.

Les extractions aqueuses du compost (1 : 2 ; v : v, compost : eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après une durée d'extraction de trois jours. Les plantules de vigne de la variété Chasselas (grandeurs 5 à 7 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées trois jours plus tard avec *Plasmopara viticola* (2 gouttes de 0,1 ml d'une suspension de 100'000 conidies/ml par feuille). L'incidence et le diamètre de lésion de la maladie ont été évalués 7 jours après leur inoculation.

La figure montre la médiane de l'incidence et du diamètre de lésion de la maladie ainsi que la variabilité dans cette expérience (n=8 ou n=10). Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. Cette expérience a été répétée une fois avec les mêmes résultats. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2a à 4.2d.

Ces résultats confirment les travaux de Weltzien (1990) qui n'a pas observé de différences d'efficacité entre les ratios d'extraction 1 : 3 et 1 : 10 contre plusieurs agents pathogènes. Par contre, il a observé une perte d'efficacité avec des rapports d'extraction nettement plus faibles (1:50). Les autres travaux réalisés avec des extraits de composts n'étaient effectués qu'avec un seul ratio d'extraction chacun, comme Zhang *et al.* (1998) qui a utilisé un ratio de 1 : 10, Yohalem *et al.* (1994 et 1996) et Achimu et Schlösser (1991) qui ont travaillé, pour lutter contre respectivement la tavelure du pommier et le mildiou de la vigne, avec un rapport d'extrait 1 : 2 (p/v ; compost/eau), ou Weltzien *et al.* (1987) qui ont employé un rapport d'extrait de compost/eau 1 : 3 (v/v) pour lutter contre toute une série d'agents pathogènes (*Plasmopara viticola*, *Phytophthora infestans*, *Erysiphe betae*, *Erysiphe graminis*). Enfin, d'autres auteurs ont employé pour la production de l'extrait un rapport compost / eau de 1:5 (v/v), comme McQuilken *et al.* (1994) pour lutter contre *Botrytis cinerea* et Al-Dahmmani *et*

al. (2003) contre la maladie de la tache bactérienne de la tomate causée par la bactérie *Xanthomonas vesicatoria*.

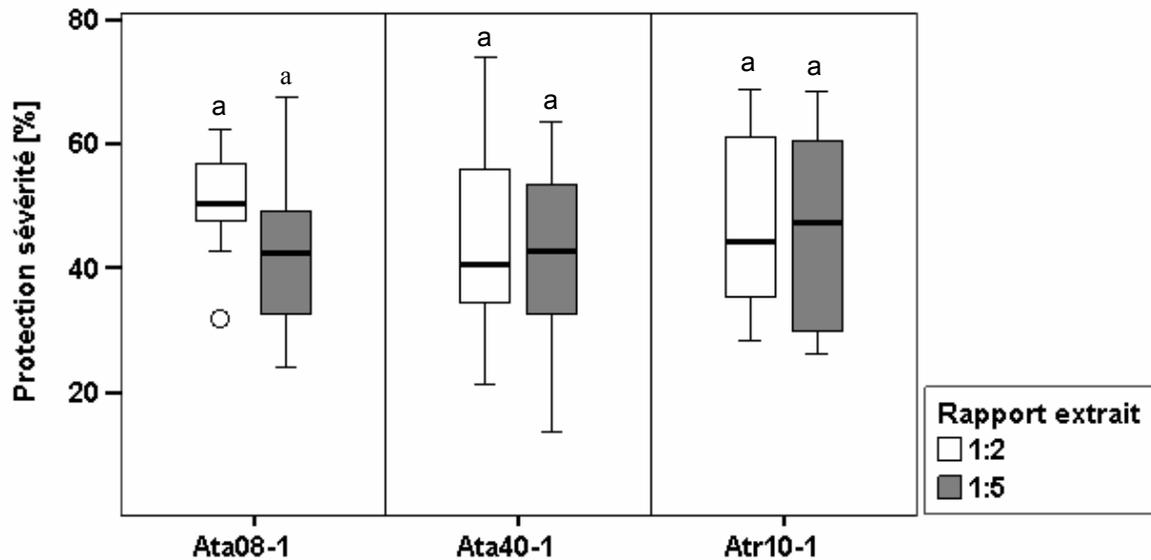


Fig. 5.9. Influence du rapport d'extraction des composts sur la capacité des extraits à protéger des plantules de pommier contre la tavelure, agent pathogène *Venturia inaequalis*.

Les extractions aqueuses du compost ont été réalisées par filtration sur gaze après une durée d'extraction de trois jours. Les plantules de pommier de la variété Mac Intosh (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées deux jours plus tard avec *Venturia inaequalis* (50'000 conidies/ml). Les deux rapports d'extraction 1:2 et 1:5 (V : V ; compost : eau) ont été testés contre *V. inaequalis*. L'incidence et la sévérité de la maladie ont été évaluées 12 à 14 jours après l'inoculation de l'agent pathogène.

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois expériences indépendantes, avec 8 plantes par variante et expérience, à l'exception du compost Atr10-1 (2 expériences). La figure montre la médiane de toutes les expériences ainsi que la variabilité entre les différentes expériences. Pour chaque compost séparément, les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2a à 4.2d

Dans la plupart des cas, les différents rapports d'extraits de compost utilisés dans le système plante-pathogène ont réduit la sévérité ou/et l'incidence ou le diamètre de lésion des pathogènes ciblés. En général, la dilution du filtrat final avant son application pourrait probablement avoir un effet différent que le rapport initial d'extraction, car cette dilution pourrait diminuer le taux d'oxygène pendant la phase de fermentation (Cronin *et al.* 1996 ; Merrill et McKeon, 2001).

D'après les connaissances actuelles, l'influence exacte du rapport d'extrait sur son efficacité demeure encore inconnue, mais les extraits avec un rapport minimal d'extraction de 1:10 (compost/eau) semblent généralement efficaces (Sheuerell et Mahaffee, 2002a)

L'autre paramètre important de la production de l'extrait est la **durée d'extraction**. Une variation de la durée d'extraction entre 2 et 7 jours n'a pas influencé la capacité des extraits de compost à protéger les plantes de pommier contre la tavelure causée par *V. inaequalis*. Tous les extraits diminuent le développement de la maladie de plus de 40% (fig. 5.10). Ces résultats

confirment les travaux d'Achimu et Schlösser (1991) et Tsrer et Bieche (1998) qui n'ont trouvé aucune influence de la durée d'extraction sur l'efficacité de l'extrait. Andrews (1993) et Ketterer (1990) ont constaté qu'une durée d'extraction minimale de trois jours est suffisante pour inhiber la germination *in vitro* de *Venturia inaequalis* et *Plasmopara viticola*. Dans le même contexte, McQuilken *et al.* (1994) ont pu vérifier que l'inhibition de la germination des spores et de la croissance mycélienne de *Botrytis cinerea* était indépendante de la durée d'extraction, mais que par contre l'efficacité *in vivo* de l'extrait était meilleure avec une durée d'extraction de 3 à 8 jours. Plusieurs études contredisent ces observations, indiquant que la suppression des maladies, suite à l'emploi des extraits de composts, varie en fonction de la durée d'extraction (Weltzien, 1990). Cet auteur a montré que les lésions de mildiou sur des feuilles de tomate détachées ont été plus fortement inhibées par des extraits avec une durée d'extraction de 7 ou de 14 jours que par des extraits réalisés en 1, 2 ou 28 jours.

Dans ce contexte, Yohalem *et al.* (1994) et Cronin *et al.* (1996) ont par exemple constaté que l'efficacité de l'extrait croît avec la durée d'extraction et atteint son maximum après 5 à 9 jours, puis persiste au moins 14 jours. Selon Elad et Shtienberg (1994), la durée minimale d'extraction nécessaire pour protéger la vigne contre *Botrytis cinerea* est d'au moins 10 jours aussi bien pour les extraits de compost de fumier que pour ceux de marc de raisin.

Toutefois, ce paramètre semble relativement flexible, et ne doit donc pas représenter une limite primordiale à la production des extraits de composts.

L'âge du compost est un autre facteur de production qui pourrait influencer le pouvoir suppressif de l'extrait. Dans la présente étude, ce paramètre n'a cependant pas influencé leur efficacité dans les deux systèmes plante-pathogène étudiés. Les composts jeunes, âgés de 8 à 10 semaines, et ceux mûrs, âgés de 30 à 40 semaines, protègent pratiquement de la même manière les feuilles de pommier contre *Venturia inaequalis* (fig. 5.7) et celles de vigne contre *Plasmopara viticola* (fig. 4.8). Ces résultats vont dans le sens de ceux de Tränkner (1992) qui recommande l'emploi de composts âgés de deux à six mois. Ceci va cependant à l'encontre des observations de Dittmer *et al.* (1990), Dittmer (1991) et Brinton *et al.* (1996), qui ont indiqué que les composts produits à partir de feuilles, de déchets de jardins et de paille deviennent inutilisables après une maturation de 3 mois, alors que les composts de fumier de bovin et de cheval peuvent être utilisés jusqu'à l'âge de 9 à 12 mois. Winterscheidt *et al.* (1990) ont pour leur part mis en évidence que les composts préparés à partir de fumier de cheval âgés de six mois étaient significativement plus efficaces que ceux âgés d'un an. De manière semblable, Andrews (1993) a montré que l'efficacité des extraits de composts de fumier de bovin pour inhiber *in vitro* l'agent pathogène *Venturia inaequalis* diminue avec l'âge du compost utilisé.

De manière générale, il semble que l'âge des composts choisi peut influencer l'efficacité des extraits, mais que la période pendant laquelle les composts produisent des extraits efficaces est relativement grande, de sorte que ce facteur ne doit pas poser problème dans la pratique.

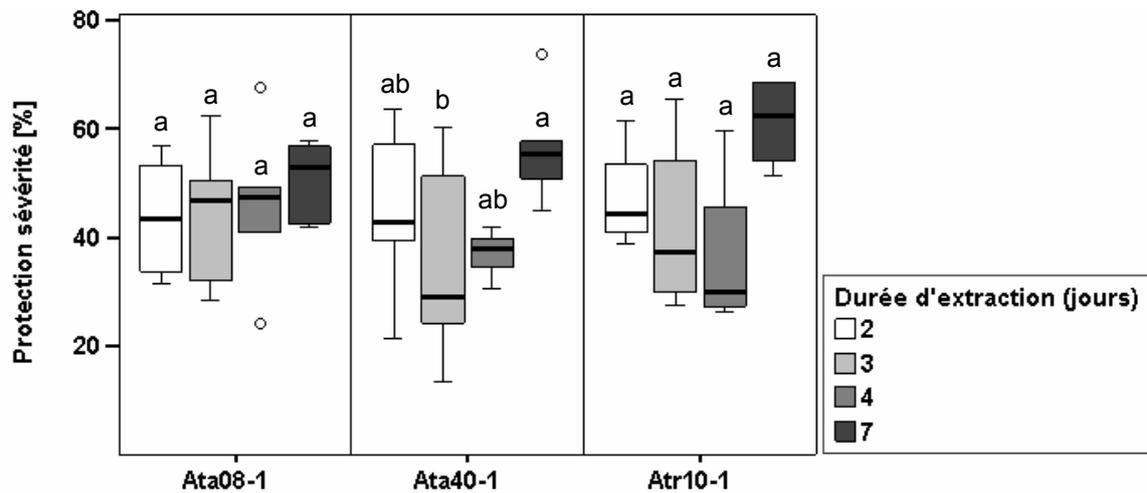


Fig. 5.10. Influence de la durée d'extraction des composts sur la capacité des extraits à protéger des plantules de pommier contre la tavelure, agent pathogène *Venturia inaequalis*.

Les extractions aqueuses de composts (1 : 2 ; v : v ; compost : eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après les durées d'extraction mentionnées. Les plantules de pommier de la variété Mac Intosh (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées deux jours plus tard avec *Venturia inaequalis* (50'000 conidies/ml). L'incidence et la sévérité de la maladie ont été évaluées 12 à 14 jours après l'inoculation de l'agent pathogène.

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois expériences indépendantes, avec 8 répétitions par expérience, excepté pour le compost Atr10-1 (2 expériences). La figure montre la médiane de toutes les expériences ainsi que la variabilité entre les différentes expériences. Pour chaque compost séparément, les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0,05$ d'après le test de Tukey-B. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

5.3.4 Influence des paramètres chimiques et microbiologiques des extraits de composts sur leur capacité à protéger les plantes contre les maladies

Le pH des extraits de composts varie entre 7,3 et 8,9, la moyenne étant de 8.1 (tab. 5.5). Ces valeurs couvrent toute la gamme des pH des extraits de composts décrits par Yohalem *et al.* (1994) et McQuilken *et al.* (1994), les premiers auteurs ayant des pH allant de 8,0 à 8,5, alors les pH mesurés par les seconds se situaient entre 7,3 et 7,5. Bien qu'aucune relation entre la valeur pH de l'extrait et son efficacité n'apparaît dans nos travaux, Scheuerell et Mahaffee (2002a) mentionnent le pH comme l'un des facteurs de fermentation des extraits pouvant influencer leur efficacité, en particulier en influençant la croissance et la diversité des microorganismes. En effet, la croissance des bactéries est plutôt favorisée par des pH neutres, alors que celle des champignons et des levures est favorisée par un pH alcalin mais aussi par une gamme de pH acides (Schlegel 1993). Par conséquent, la faible quantité de champignons

et *Trichoderma* spp. isolés dans ce présent travail pourrait être due au pH alcalin mesuré dans la plupart des extraits.

La **conductivité électrique**, mesure de la teneur en sels des extraits, varie fortement; la valeur la plus basse étant 1,2 [mS cm⁻¹] pour le compost Ata36-1, et la plus élevée 4,1 [mS cm⁻¹] pour le compost Atr08-2 (tab. 5.5). On remarque que les extraits produits à partir de composts jeunes ont des teneurs en sel tendancielle plus élevées que les composts âgés. Toutefois, la matière première compostée influence la conductivité électrique des extraits plus fortement que leur âge. En ce qui concerne leur effet phytosanitaire, la salinité des extraits ne l'a pas influencé.

Le groupe de microorganismes le plus fortement représenté dans les extraits de composts est sans conteste les **bactéries** avec un ordre de grandeur de 10⁷ ufc/ml. Toutefois, la population bactérienne des divers extraits varie grandement, allant de 1 x 10⁷ ufc/ml à 3 x 10¹⁰ ufc/ml (tab. 5.5). Alors que Stindt (1990), Ketterer *et al.*, (1992) et Ketterer, (1990) observaient entre 10⁷ et 10⁸ ufc de bactéries /ml d'extrait de fumier de cheval et de bovin, McQuilken *et al.* (1994) trouvaient, dans des extraits de compost de fumier de cheval et de porc, un nombre beaucoup plus élevé de bactéries par rapport aux autres travaux réalisés (5,6 10¹⁰ ufc/ml). Il semble clair que la matière première des composts et son degré de décomposition jouent un rôle déterminant sur la biomasse microbienne des extraits.

Les quantités d'**actinomycètes** présents dans les extraits sont comprises entre 1,4 et 7,6 10⁶ [ufc/ml], les extraits des composts Atrg08-1, Atr09-1 et Dim8-1 ayant une quantité d'actinomycètes supérieure aux autres extraits (tab. 5.5). En comparaison, McQuilken *et al.* (1994) ont trouvé une quantité dix fois moins importante d'actinomycètes (2,4 10⁵ ufc/ml) dans le filtrat de compost de fumier de cheval et de porc.

Les **populations fongiques** des extraits étaient moins importantes que celles des actinomycètes et des bactéries et se situent dans l'ordre de grandeur de 10³ (ufc/ml) (tab. 5.5). Ces quantités de champignons sont relativement faibles comparées aux résultats de Stindt (1990) qui trouvait environ 100 fois plus de champignons dans des extraits de composts de fumier de cheval et de bovin. En opposition, McQuilken *et al.* (1994) ne dénombraient qu'environ 10² ufc de champignons /ml d'extrait de compost de fumier de cheval et de porc. Ainsi, les valeurs obtenues dans la présente étude se situent entre les diverses données bibliographiques.

Les quantités de *Trichoderma* spp présentes dans les divers extraits de composts, varient fortement, la valeur la plus basse étant $1,4 \times 10^2$ (ufc/ml) pour le compost Atrg08-1, et la plus élevée $3,7 \times 10^3$ (ufc/ml) pour l'extrait de digestat Dim08-1.

De manière générale, l'extrait du digestat Dim8-1 contient des **populations de microorganismes** plus importantes que ceux des autres composts (tab. 5.5), en particulier en ce qui concerne le nombre de bactéries et de *Trichoderma* spp.. Comme mentionné sous 5.1.2, ce digestat, déjà prétraité de manière anaérobie, se situe maintenant en phase de décomposition aérobie intensive, ce qui explique cette quantité importante de microorganismes.

La **durée d'extraction** utilisée pour la réalisation des extraits n'influence pas de manière caractéristique les populations de microorganismes, ni sa valeur pH (tab. 5.6). Par contre, McQuilken *et al.* (1994) ont observé, avec leur extrait de compost de fumier, une augmentation des populations d'actinomycètes, de bactéries, de champignons filamenteux et de levures, avec une élévation de la durée d'extraction, les populations maximums étant atteintes après 8 à 12 jours.

Aucune corrélation n'a pu être établie entre les propriétés chimiques (pH et CE) des divers extraits et la protection de la sévérité de *Venturia inaequalis*.

De même, les populations d'actinomycètes, bactéries, champignons et *Trichoderma* spp. ne corrélaient pas avec la protection contre la sévérité de *Venturia inaequalis*. Ainsi, il s'est avéré inutile de continuer la détermination de la population microbienne des extraits de composts. (tab 4.5). Ces résultats contredisent ceux réalisés par Tränkner, (1991), Weltzien, (1992), Ketterer *et al.* (1992) et McQuilken *et al.* (1994). En effet, tous ces auteurs, qui ont travaillé avec divers composts de fumier, déduisent que le mécanisme de protection des plantes avec les extraits de composts est de nature microbienne. Ketterer *et al.* (1992) et Weltzien, (1992) ont même réussi à protéger des plantes en appliquant sur leurs feuilles des microorganismes antagonistes isolés des extraits de compost. A l'inverse, d'autres travaux relatent que la population microbienne ne joue aucun rôle, une stérilisation des extraits ne diminuant pas son effet protecteur (Achim et Schösser, 1991 ; Elad et Shtienberg, 1994 ; Cronin *et al.*, 1996 ; Zhang *et al.*, 1997).

Tab. 5.5. Caractéristiques chimiques et biologiques des extraits de composts employés dans les essais *in vivo* et *in vitro* (durée d'extraction : 3 jours).

Compost extrait	pH	CE (mS/cm)	Actinomycètes (u.f.c/ml x10 ⁶)	Bactéries (u.f.c/ml x10 ⁷)	Champignons (u.f.c/ml x10 ³)	<i>Trichoderma</i> spp. (u.f.c/ml x10 ²)
Ata08-1	7,5	3,2	3,9	2,0	1,3	-
Ata10-1	7,8	2,2	1,4	1	0,31	4,3
Ata12-2	8,9	1,9	nd	nd	nd	nd
Ata30-1	8,2	1,6	nd	nd	nd	nd
Ata30-2	7,8	3,1	5,6	2,9	2,2	28,5
Ata36-1	8,4	1,2	nd	nd	nd	nd
Ata40-1	8,0	2,5	1,8	1,7	1,0	nd
Atr06-1	7,6	2,1	nd	nd	nd	nd
Atr08-1	8,4	2,5	nd	nd	nd	nd
Atr08-2	8,4	4,1	3,7	4,2	2,0	3,5
Atr09-1	7,3	1,3	6,1	3,9	0,9	8,3
Atr09-2	8,0	2,1	2,5	3,0	0,4	3,1
Atr09-3	8,1	3,2	1,5	2,2	0,7	8,2
Atr10-1	8,2	3,2	4,9	1,2	4,0	nd
Atr12-1	8,2	1,8	nd	nd	nd	nd
Atr12-2	8,3	1,7	nd	nd	nd	nd
Atr12-3	8,3	1,8	nd	nd	nd	nd
Atr15-1	8,6	1,9	nd	nd	nd	nd
Atr15-2	8,1	2,9	nd	nd	nd	nd
Atr15-3	7,9	3,0	nd	nd	nd	nd
Atr16-1	8,5	2,0	nd	nd	nd	nd
Atr20-1	8,9	3,6	nd	nd	nd	nd
Atr30-1	8,4	2,1	nd	nd	nd	nd
Atrg08-1	7,7	1,3	7,6	1,3	0,8	1,4
Atrg12-1	8,3	3,1	5,2	3,20	1,4	2,8
Dim08-1	8,3	2,9	5,8	28	2,0	36,5

Les extractions aqueuses du compost (1 :2 ; v : v : compost : eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après une durée d'extraction de trois jours. La population microbienne des filtrats de composts a été déterminée par chaîne de dilution puis comptage des colonies sur milieux sélectifs.

Le nombre total de microorganismes est exprimé en u.f.c par ml de filtrat de compost.

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois expériences indépendantes / isolations

CE : la conductivité électrique mesurée dans les extraits exprimée en millisiemens/cm.

nd : valeur non déterminée .

Les composts employés pour préparer les extraits sont décrits dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d

Tab. 5.6. Influence de la durée d'extraction sur les caractéristiques chimiques et biologiques des extraits de composts

extrait du compost	Durée extraction (jours)	Protection incidence (%)	Protection sévérité (%)	Actinomycètes (u.f.c/ml x 10 ⁶)	Bactéries (u.f.c/ml x 10 ⁷)	Champignons (u.f.c/ml x 10 ³)	pH	CE (mS cm ⁻¹)
Ata08-1	2	37.2	55.0	2.0	4.8	1.7	7.6	2.4
	3	37.4	48.1	3.9	2.0	1.3	7.5	3.2
	4	21.8	48.0	4.5	8.9	2.0	7.6	3.0
	7	20.5	52.3	3.4	1.3	3.4	7.9	3.7
Ata40-1	2	21.0	39.2	1.9	2.6	3.2	7.9	2.0
	3	24.8	36.4	1.8	1.7	1.0	8.0	2.5
	4	28.3	40.0	2.0	1.8	1.5	7.9	2.6
	7	42.2	62.1	2.4	2.5	1.5	8.0	4.1
Atr10-1	2	17.9	42.1	1.2	1.3	3.0	7.8	2.0
	3	33.5	54.2	4.9	1.2	4.0	8.3	3.5
	4	15.4	30.0	nd	nd	nd	8.3	3.4
	7	40.1	62.5	3.3	1.2	1.0	8.3	4.3

Les extractions aqueuses du compost (1 :2 v : v ; compost : eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après quatre durées d'extraction. : 2, 3, 4 et 7 jours. La population microbienne des filtrats de composts a été déterminée par chaîne de dilution puis comptage des colonies sur milieux sélectifs.

Le nombre total de microorganismes est exprimé en u.f.c par ml de filtrat de compost.

CE : la conductivité électrique mesurée dans les extraits aqueux de compost.

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois expériences indépendantes / isolations.

Par expérience deux boîtes de pétri par ordre de dilution et par type de microorganismes ont été effectuées

nd : valeur non déterminée

Les composts employés pour préparer les extraits sont décrits dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d

Cette différence dans le mode d'action phytosanitaire pourrait être attribuée à la nature des composts employés dans les différents systèmes plante-pathogène. En effet, les auteurs qui favorisent l'hypothèse de la nature microbienne comme étant la cause principale de l'effet phytosanitaire ont chacun travaillé avec des types de composts relativement homogènes à base de fumier. Alors que, dans l'étude présente, nous avons employé une diversité très grande de types de composts produits principalement avec des déchets verts. D'autres paramètres influençant la relation plante-pathogène, comme la disponibilité des éléments fertilisants, les caractéristiques chimiques des composts, l'effet fongistatique des microorganismes présents dans l'extrait, pourraient, suivant les composts, jouer aussi un rôle très important dans la protection des plantes, et en partie masquer l'influence des populations microbiennes.

Afin de confirmer ou d'infirmer le mode d'action des extraits de composts, il paraît donc nécessaire de tester d'une part leur efficacité après différents modes de stérilisation et d'autre part de contrôler leur effet *in vitro* sur les pathogènes foliaires étudiés.

5.3.5. Influence de différentes stérilisations des composts et de leurs extraits sur l'efficacité des extraits à protéger les plantes contre les maladies

La stérilisation du compost avant l'extraction ou de l'extrait lui-même après sa filtration ne diminue pas la capacité de l'extrait à protéger les plantes de pommier contre la tavelure (fig. 5.11, 5.12). De même, le mode de stérilisation (par filtration (0,2 µm) ou par autoclavage), n'a pas influencé l'efficacité de l'extrait (fig. 5.11). L'extrait Atr08-2 a réduit significativement l'incidence et la sévérité de *V. inaequalis* (fig. 5.11 et 5.12) indépendamment du mode de stérilisation utilisé.

Des résultats semblables sur l'influence de la stérilisation des extraits de composts ont été obtenus dans le cas du mildiou de la vigne. Dans ce cas, l'efficacité des extraits de composts pour lutter contre *Plasmopara viticola* n'était pas altérée par leur stérilisation, et dans plusieurs cas, une augmentation tendancielle de la protection des plantes pouvait même être observée (Atr09-1 et Atr12-2 ; fig. 5.13). Contrairement à la lutte contre la tavelure du pommier, non seulement le diamètre de lésion a été nettement réduit dans le cas du mildiou de la vigne, mais également l'incidence de la maladie (fig. 5.13). Cette dernière a été réduite en moyenne de 46 %, une réduction maximale de près de 70% étant atteinte avec l'extrait du compost Dim08-1, stérilisé ou non.

Ces résultats confirment que les populations microbiennes des extraits de compost ne sont pas dans notre cas les principales responsables pour la protection des plantes (voir chap. 5.3.4).

Les résultats connus sur ce sujet varient d'une étude à l'autre. Comme dans le présent travail, plusieurs auteurs ont constaté que l'activité microbienne de l'extrait persiste après un traitement à la chaleur ou même après une stérilisation à travers une membrane filtre de 0,2 µm de diamètre (Achim and Schlösser, 1991 ; Elad et Shtienberg, 1994 Cronin *et al.* 1996 ; Zhang *et al.*, 1997). D'autres auteurs ont par contre observé que l'efficacité des extraits contre les pathogènes foliaires disparaissait après la stérilisation (McQuilken *et al.*, 1994 ; Weltzien, 1992). Ces derniers en déduisent que le mécanisme de protection de l'extrait était de nature microbienne.

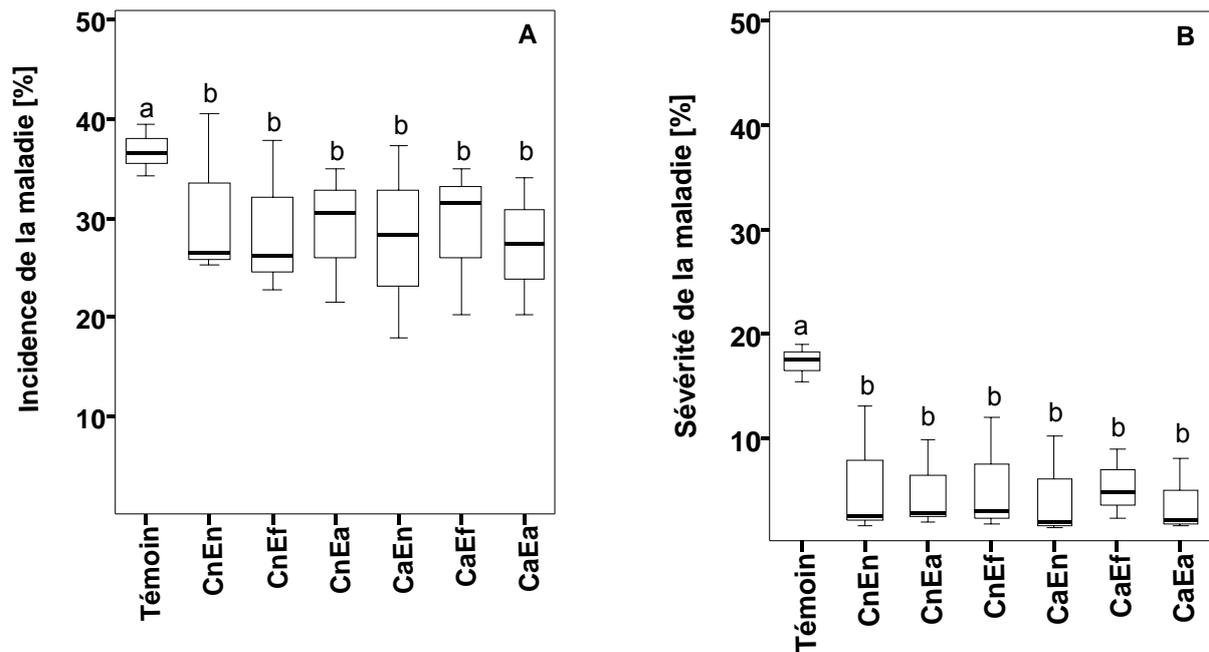


Fig. 5.11. Influence de différents modes de stérilisation du compost Atr08-2 et/ou de son extrait sur la capacité de ce dernier à protéger des plantules de pommier contre la tavelure, agent pathogène *Venturia inaequalis*.

Les extractions aqueuses du compost (1 : 2 ; v : v ; compost : eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après trois jours d'extraction. Les plantules de pommier de la variété Mac Intosh (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées deux jours plus tard avec *Venturia inaequalis* (50'000 conidies/ml). L'incidence et la sévérité de la maladie ont été évaluées 12 à 14 jours après l'inoculation de l'agent pathogène.

CnEn : compost et extrait non autoclavés (extrait cru)

CnEf : compost non autoclavé avant son extraction, extrait filtré à travers un filtre de 0.2 µm.

CnEa : compost non autoclavé avant son extraction, extrait autoclavé

CaEf : compost autoclavé, extrait filtré à travers un filtre de 0.2 µm.

CaEn : compost autoclavé, extrait non autoclavé.

CaEa : compost et extrait autoclavés

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois expériences indépendantes, avec 8 répétitions par expérience. La figure montre la médiane de l'incidence et de la sévérité ainsi que la variabilité entre les différentes expériences. Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. La description du compost employé pour préparer l'extrait est mentionnée dans le tableau 4.2b.

Ni la stérilisation des composts avant l'extraction, ni celle de l'extrait lui-même après sa production n'influençant dans l'étude présente les mécanismes de protection; on peut donc conclure que ceux-ci ne sont pas directement dus à une activité microbienne. Il se peut donc qu'une substance autre soit extraite des composts (probablement produite pendant le processus de compostage), substance qui agit directement sur le pathogène (action fongicide), ou qui renforce les défenses de la plante (induction de résistance). Cette substance doit être soluble à l'eau et doit être résistante à la chaleur; le traitement par autoclavage de l'extrait de compost n'influençant pas son efficacité. D'après Cronin *et al.* (1996), le principe actif des extraits de

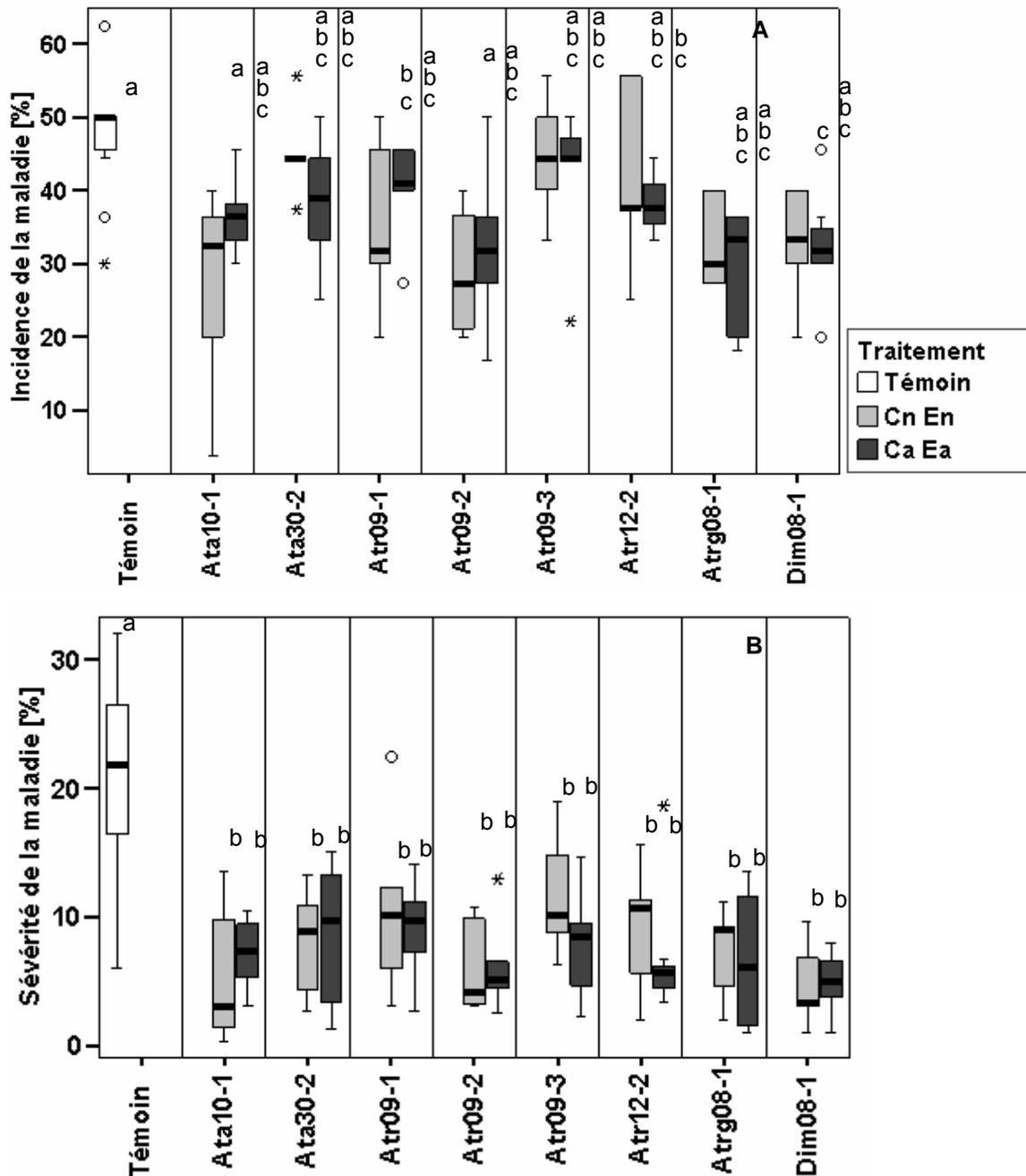


Fig. 5.12. Influence de la stérilisation à la chaleur de divers extraits de composts sur leur capacité à réduire l'incidence (A) et la sévérité (B) de la maladie de la tavelure du pommier, agent pathogène *Venturia inaequalis*.

Les extractions aqueuses de compost (1 :2 v : v : compost : eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après trois jours d'extraction. Les plantules de pommier de la variété Mac Intosh (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées deux jours plus tard avec *Venturia inaequalis* (50'000 conidies/ml). L'incidence et la sévérité de la maladie ont été évaluées entre 12 à 14 jours après l'inoculation de l'agent pathogène.

CnEn : compost et extrait non autoclavés (extrait cru) ; **CaEa** : compost et extrait autoclavés

La figure montre la médiane de l'incidence et de la sévérité ainsi que la variabilité dans cette expérience (n=8 ou n=10). Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. Cette expérience a été répétée une fois avec les mêmes résultats. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

compost de champignonnière pour lutter contre *Venturia inaequalis* reposerait sur des petites molécules stables qui ne sont pas de nature protéique et sont produites par des microorganismes anaérobies.

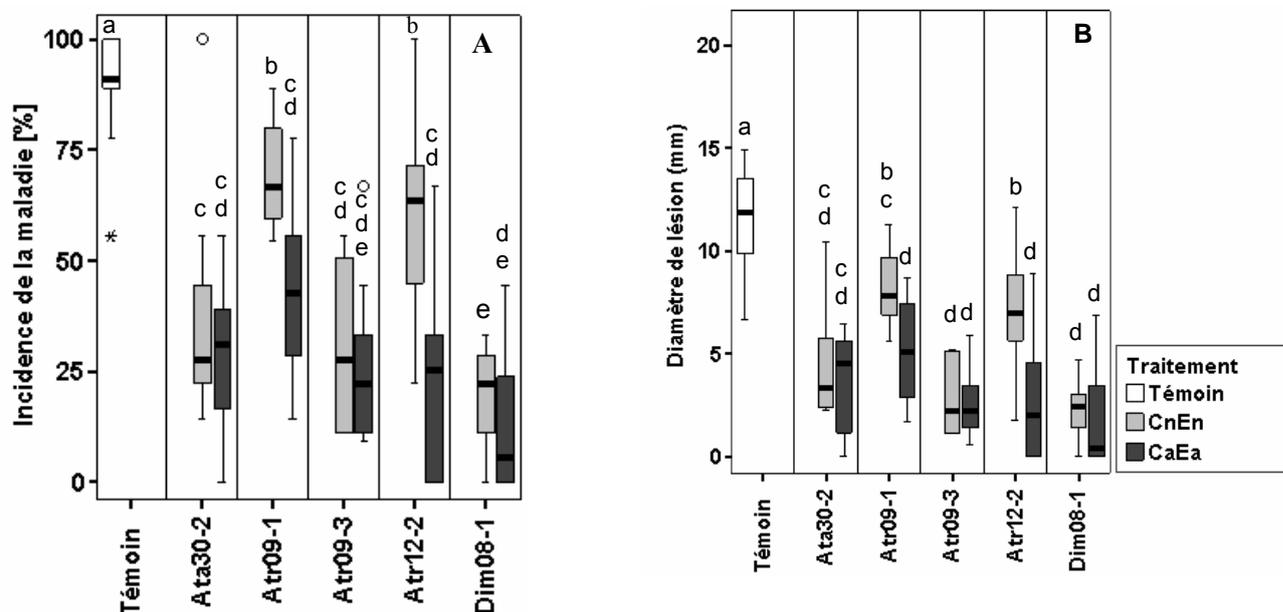


Fig. 5.13. Influence de la stérilisation à la chaleur de divers extraits de composts sur leur capacité à réduire l'incidence (A) et le diamètre de lésion (B) de la maladie du mildiou de la vigne causée par *Plasmopara viticola*

Les extractions aqueuses de composts (1 :2 v : v : compost : eau) ont été réalisées par filtration sur gaze après une durée d'extraction de trois jours. Les plantules de vigne de la variété Chasselas (grandeurs 5 à 7 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées trois jours plus tard avec *Plasmopara viticola* (2 gouttes de 0,1 ml d'une suspension de 100'000 conidies/ml par feuille). Cinq à six feuilles par plantule ont été inoculées. L'incidence et le diamètre de lésion de la maladie ont été évalués 7 jours après l'inoculation de l'agent pathogène.

CnEn : compost et extrait non autoclavés (extrait cru)

CaEa : compost et extrait autoclavés (121°C pendant une 1h)

La figure montre la médiane de l'incidence et de la sévérité ainsi que la variabilité dans cette expérience (n=8 ou n=10). Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. Cette expérience a été répétée une fois avec les mêmes résultats. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 5.2.a à 5.2.d.

5.3.6. Influence du lavage des feuilles sur l'efficacité d'extraits de composts contre les maladies foliaires

Afin de démontrer si l'effet protecteur est plutôt dû à une action fongicide ou à un mécanisme d'induction de la résistance, les feuilles des plantes ont été lavées après un traitement avec les extraits de composts pour déterminer la capacité de ces derniers à les protéger contre les maladies.

Dans le cas de la tavelure du pommier, le fait de laver les feuilles après leur traitement n'a pas diminué l'effet protecteur des extraits contre *Venturia inaequalis* (fig. 5.14).

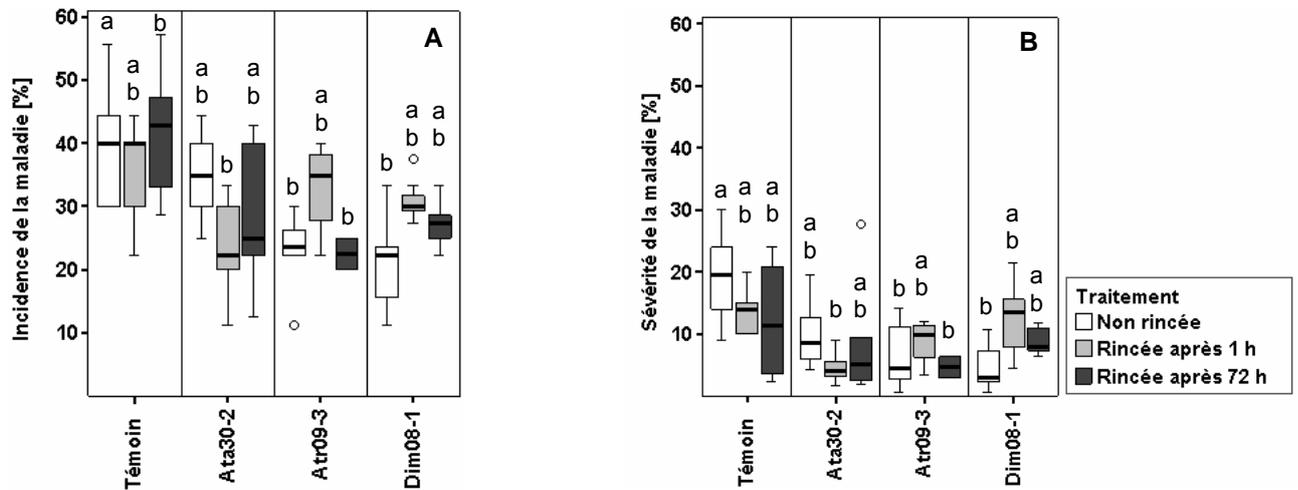


Fig. 5.14. Influence du lavage des feuilles de pommier après leur traitement avec divers extraits de composts sur l'incidence (A) et la sévérité (B) de la maladie de la tavelure de pommier causée par *Venturia inaequalis*.

Les extractions aqueuse de compost (1 :2 ; v : v ; compost : eau) autoclavés avant et après leur extraction, ont été réalisées par filtration sur gaze après une durée d'extraction de trois jours. Les plantules de pommier de la variété Mac Intosh (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées deux jours plus tard avec *Venturia inaequalis* (50'000 conidies/ml). L'incidence et la sévérité de la maladie ont été évaluées entre 12 à 14 jours après l'inoculation de l'agent pathogène.

La figure montre la médiane de l'incidence et de la sévérité ainsi que la variabilité dans cette expérience (n=8). Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. Cette expérience a été répétée une fois avec les mêmes résultats. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

En ce qui concerne le mildiou de la vigne, l'effet du lavage des feuilles est beaucoup plus clair. En effet, dans tous les cas, l'incidence et la sévérité de la maladie ont été augmentées après le lavage des feuilles, aucune protection des feuilles n'étant plus observée (fig. 5.15), et ceci indépendamment du moment de lavage. Ainsi, il semble bien dans ce cas qu'un effet direct des extraits de compost sur l'agent pathogène *Plasmopara viticola* soit responsable de la protection des plantes.

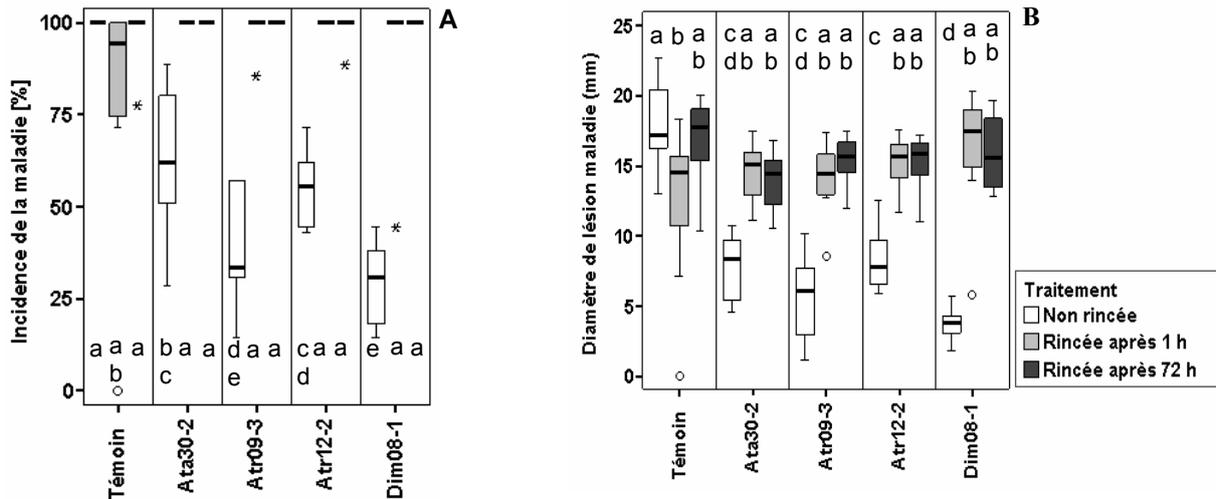


Fig. 5.15. Influence du lavage des feuilles de vigne après leur traitement avec divers extraits de composts sur l'incidence (A) et le diamètre de lésion (B) de la maladie du mildiou de la vigne causée par *Plasmopara viticola*.

Les extractions aqueuse de compost (1 :2 ; v : v ; compost : eau) autoclavés avant et après leur extraction, ont été réalisées par filtration sur gaze après une durée d'extraction de trois jours. Les plantules de vigne de la variété Chasselas (grandeurs 5 à 7 feuilles) ont été pulvérisées avec les différents extraits de composts, puis inoculées trois jours plus tard avec *Plasmopara viticola* (2 gouttes de 0,1 ml d'une suspension de 100'000 conidies/ml par feuille). Cinq à six feuilles par plantules ont été inoculées. Les feuilles de plantules de vigne ont été complètement rincées avec l'eau déminéralisée après 1 et 72 h de leur application. Une variante témoin non lavée a aussi été testée. L'incidence et le diamètre de lésion de la maladie ont été évalués 7 jours après l'inoculation de l'agent pathogène.

La figure montre la médiane de l'incidence et du diamètre de lésion de la maladie ainsi que la variabilité dans cette expérience (n=8 ou n= 10). Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P<0.05$ d'après le test de Tukey-B. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d

5.3.7. Influence *in vitro* de divers extraits de composts sur la germination des conidies de *Venturia inaequalis*

La germination des conidies de *V. inaequalis* a été supérieure à 90 % dans tous les extraits de compost testés, alors que leur germination dans de l'eau déminéralisée était légèrement inférieure à 80% (fig. 5.16). Le pourcentage de conidies avec des tubes germinatifs plus longs que la grandeur des conidies elles-mêmes, était également nettement plus élevé dans les divers extraits de composts en comparaison avec celui dans l'eau distillée.

Ainsi, les extraits de composts stimulent la germination des conidies et ne montrent aucun effet fongicide contre *Venturia inaequalis*. Ceci est probablement dû aux nutriments présents dans les extraits, à moins que ceux-ci ne contiennent d'autres métabolites stimulant la germination des spores.

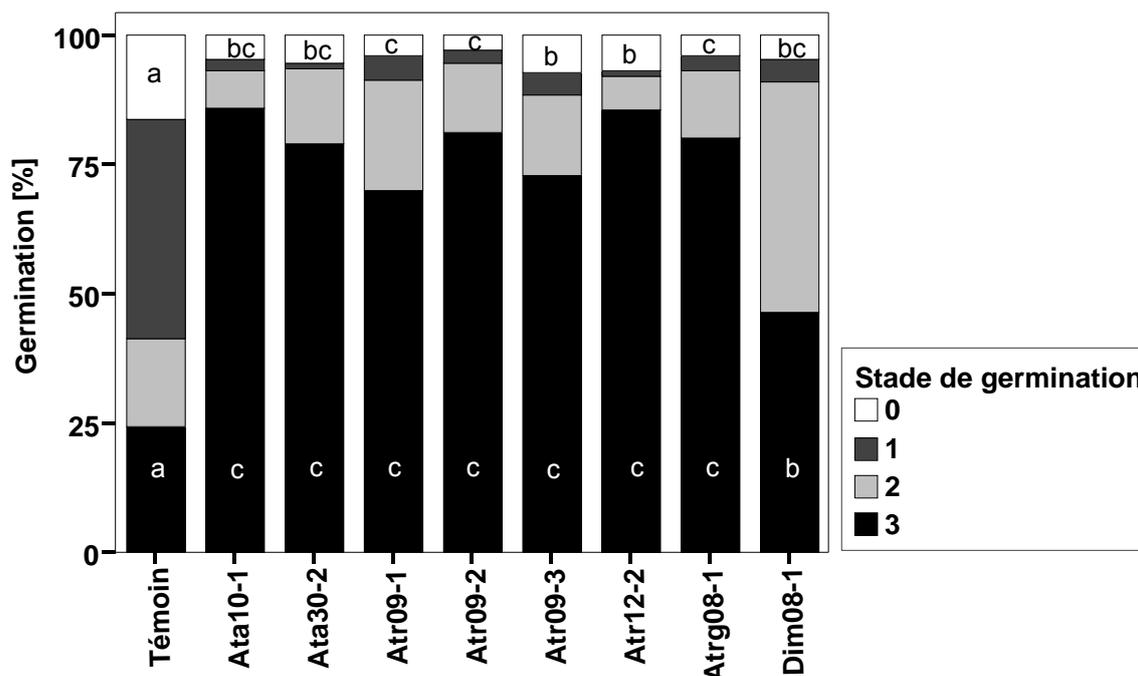


Fig. 5.16. Influence de différents extraits de composts sur la germination *in vitro* des conidies de *Venturia inaequalis*.

Une suspension de conidies de *V. inaequalis* [50'000 conidies/ml] à laquelle 1 g de saccharose a été ajouté. Dix µl de la suspension auxquels on a ajouté du saccharose ont été ajoutés à différents extraits de composts. De la même manière, la variante témoin contenant l'eau déminéralisée stérile a aussi été inoculée. Après 36 heures à 100% d'humidité relative, le stade de germination des conidies a été évalué selon l'échelle suivante :

0 : pas de germination

1 : développement de tubes germinatifs d'une longueur inférieure au diamètre de la conidie

2 : développement de tubes germinatifs d'une longueur égale au diamètre de la conidie

3 : développement de tubes germinatifs d'une longueur supérieure au diamètre de la conidie.

Un rapport de l'extrait de compost (1:2, v : v, compost : eau) et une durée d'extraction de 3 jours ont été employés pour la préparation de chaque extrait de compost.

Chaque valeur correspond à la moyenne de 3 expériences indépendantes avec 6 répétitions par expérience (n=100). La figure montre la moyenne de toutes les expériences. Les colonnes avec la même lettre ne sont pas significativement différentes à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d

Ces résultats contredisent ceux de Cronin *et al.* (1996) et Yohalem *et al.* (1994) qui ont observé *in vitro* une inhibition de plus de 98% de la germination des spores de *Venturia inaequalis* par des extraits de composts de fumier de champignonnière.

On pense que cet effet inhibiteur est probablement dû à la nature du compost, le compost de champignonnière étant en général très riche en sels.

5.3.8. Influence des extraits de composts sur l'activité des zoospores de *Plasmopara viticola*

Le nombre de stomates occupés par les zoospores chez les feuilles traitées avec des extraits de composts stérilisés ou avec le fongicide est significativement réduit comparé à la variante témoin traitée avec l'eau (fig. 5.17). La plus grande inhibition a été observée avec l'extrait de compost Dim08-1, aucune zoospore n'y étant observée sur un stomate (fig. 5.17). Ainsi, les résultats *in vitro* confirment les observations *in vivo* faites préalablement (chap. 5.3.6), et mettent en évidence un effet direct des extraits de compost sur la germination des zoospores de *Plasmopara viticola*.

Cet effet peut être dû soit à l'inhibition directe de la germination du sporange de *Plasmopara viticola*, ou bien à une action sur le métabolisme des zoospores expulsées ou sur leurs mobilités. On ne peut cependant pas exclure l'effet des extraits de composts sur la surface des feuilles qui pourraient jouer le rôle d'une première barrière, empêchant la fixation de zoospores sur les stomates. Les divers extraits de compost testés par Ketterer (1990), réduisaient significativement le taux de libération des zoospores.

Weltzien et Ketterer (1987) ont quant à eux observé que l'inhibition directe de la germination des sporanges dépend de la qualité de l'extrait, et que ce facteur ne peut pas être tenu comme seul responsable de la protection *in vivo* des plantes de vigne contre le mildiou.

Parmi les causes pouvant justifier l'inhibition de la germination des sporanges par les extraits de composts, se trouve leur teneur en sels. L'effet de la salinité a été testé en traitant les feuilles de vigne avec deux concentrations de sels correspondantes à celles observées dans les extraits de composts : 2,5 mS/cm et 5 mS/cm. Ces deux concentrations ont significativement réduit le nombre de zoospores fixées sur les stomates des feuilles de vignes traitées (fig. 5.18). L'inhibition de la fixation des zoospores sur les stomates des feuilles de vigne était relativement proportionnelle aux concentrations de sels appliquées, l'inhibition provoquée par 5 mS de NaCl correspondant à celle du traitement cuivré.

Une certaine corrélation entre la teneur en sels des extraits de composts et leur effet sur les zoospores a pu être observée : l'extrait Atr09-3, avec une salinité de 2.60 mS/cm, inhibe de 48% la fixation de zoospores sur les stomates, l'extrait Ata30-2, avec une salinité de 2.92 mS/cm montre une inhibition de 59 %, et l'extrait de compost Dim08-1, avec une salinité de 4.2 mS/cm, inhibe complètement la fixation des zoospores. Cependant, la salinité seule ne peut pas expliquer complètement l'effet fongicide des extraits, bien qu'elle semble jouer un rôle important dans les mécanismes d'inhibition de la fixation des zoospores de *P. viticola*. En effet, la différence de pression osmotique due à la salinité peut agir sur les membranes des zoospores et provoquer leur lyse ou empêcher leur motilité.

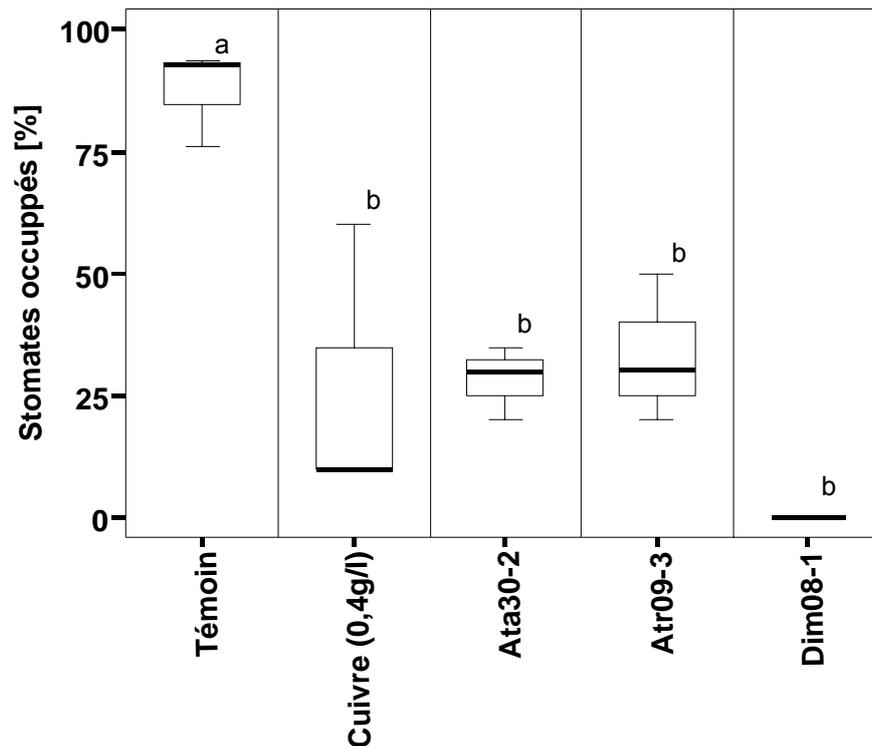


Fig. 5.17. Influence de différents extraits de composts sur l'activité des zoospores de *Plasmopara viticola*.

Un volume de 0.1 ml de la suspension de sporange de *Plasmopara viticola* [100'000 sporanges/ml] a été inoculé au centre des rondelles de vigne ($\varnothing=10\text{mm}$) préalablement traitées avec différents extraits de compost et d'eau (témoin). Les composts et les extraits de compost ont été stérilisés à la chaleur (121°C pendant 1 heure). Deux variantes témoins ont été employées : une avec l'eau et l'autre avec un fongicide à base de cuivre (Kocide DF 1g/l, correspondant à une concentration de 0.4 g de cuivre par litre d'eau). Trois rondelles de chaque type de traitement ont été découpées puis déposées sur milieu mou d'agar dans une boîte de pétri.

Après 24h l'incubation, 50 stomates par rondelle ont été dénombrés puis analysés pour déterminer s'ils étaient colonisés par les zoospores ou non.

La figure montre la médiane des stomates occupés ainsi que la variabilité d'une expérience ($n=50$). Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P<0.05$ d'après le test de Tukey-B. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

Ceci peut également expliquer pourquoi les extraits de composts autoclavés protégeaient tendanciellement mieux la vigne contre le mildiou que les extraits non autoclavés. En effet, les extraits autoclavés contiennent une teneur en sel plus élevée que les extraits non autoclavés, les cellules vivantes y étant lysées.

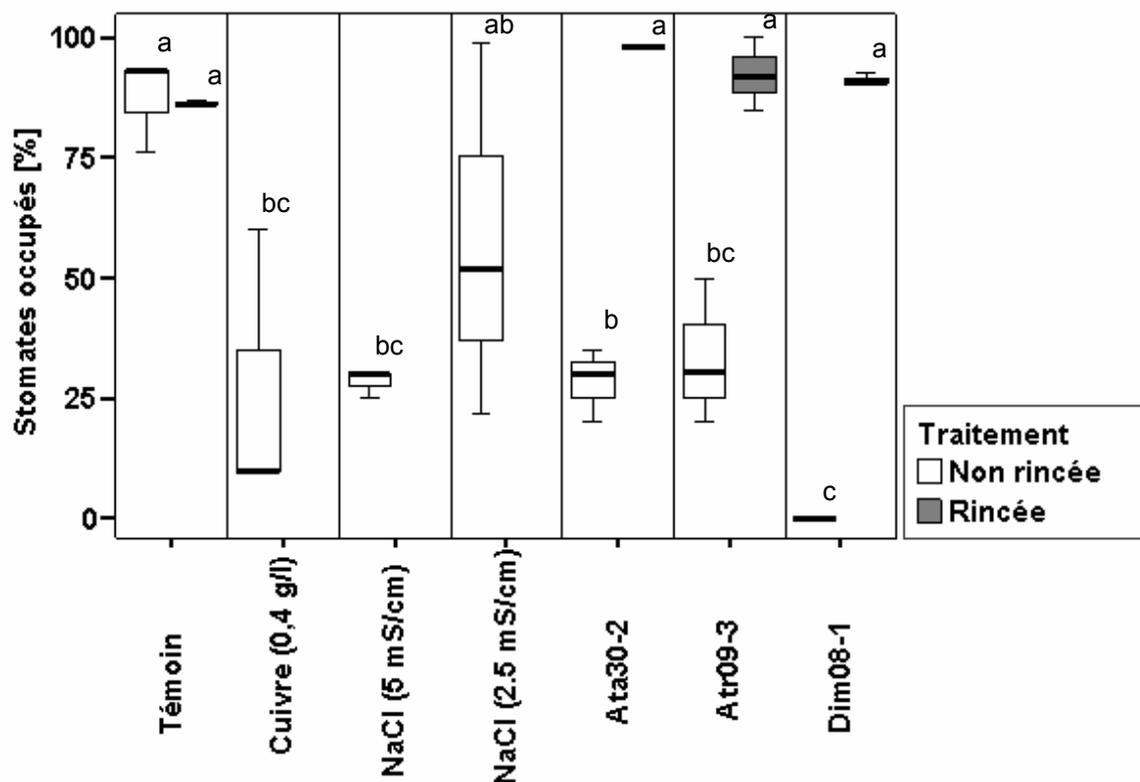


Fig. 5.18. Effet du rinçage des feuilles de vigne après leur traitement avec différents extraits de compost sur le mildiou de la vigne causée par *Plasmopara viticola*.

Les feuilles de plantules de vigne ont été pulvérisées avec différents extraits de composts stériles et avec de l'eau déminéralisée. Deux variantes témoins ont été employées : une avec de l'eau et une avec un fongicide à base de cuivre (Kocide DF 1g/l, correspondant à une concentration de 0.4 g de cuivre par litre d'eau). De plus, du chlorure de sodium (NaCl) à deux conductivités électriques 2.5 et 5 mS/cm a été appliqué. Les variantes cuivre et NaCl n'ont été testées que non rincées. 72 h, après le traitement, les feuilles ont été complètement rincées avec de l'eau déminéralisée. Trois rondelles de chaque type de traitement ont été découpées puis déposées sur un milieu mou d'agar dans une boîte de pétri. Au centre de chaque rondelle, une goutte de 0.1 ml de la suspension de sporanges de *Plasmopara viticola* [100'000 spores/ml] a été inoculée.

Après 24h d'incubation, 50 stomates par rondelle ont été dénombrés puis analysés pour déterminer s'ils étaient colonisés par les zoospores ou non.

La figure montre la médiane des stomates occupés ainsi que la variabilité d'une expérience (n=50). Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. La description des composts employés pour préparer les extraits est mentionnée dans les tableaux 4.2.a à 4.2.d.

5.3.9. Influence de l'application de composés humiques extraits des composts sur l'incidence et la sévérité de la maladie de la tavelure du pommier, agent pathogène *Venturia inaequalis*

Parmi les substances constitutives des extraits de composts se trouvent certains composés humiques solubles à l'eau. Parmi ceux-ci, on trouve les acides créniques et hymatomélaniques. La solubilité de ces dérivés dépend fortement de leur densité moléculaire

ainsi que de leur comportement face aux procédés d'extraction (Gobat *et al.*, 2003). Ces dérivés humiques hydrosolubles sont les précurseurs des acides humiques et fulviques. Dans les sols, les acides fulviques sont solubles dans les milieux alcalins et acides, contrairement aux acides humiques qui ne le sont qu'en milieux alcalins (Gobat *et al.*, 2003). Dans le but de tester le rôle phytosanitaire de ces substances humiques sur la protection des plantes de pommier contre *Venturia inaequalis*, ces substances ont été extraites directement des composts puis appliquées *in vivo*.

Le traitement des plantules de pommier n'a pas réduit l'incidence de la maladie. Par contre la sévérité a été considérablement diminuée (fig. 5.19). Ceci peut s'observer aussi bien avec les acides humiques qu'avec les acides fulviques. Aucun effet additif n'a été observé si les acides fulviques et humiques (AF+AH) étaient employés ensemble (fig. 5.19)

Après leur purification à travers une membrane échangeuse d'ions, la conductivité électrique des acides humiques et acides fulviques variait entre 0,11 et 2,27 mS/cm. Le pH des acides fulviques et des acides humiques en solution oscillait respectivement entre 2,3 à 3,4.

Une dilution de l'extrait de compost ou des acides humiques appliquée aux plantules de pommier provoque une baisse de l'efficacité de ces produits, surtout en ce qui concerne la sévérité de la maladie (fig. 5.20). On peut conclure que l'application de composés humiques combinés (AF+AH) à une concentration de 20 mg C/50 ml eau se montre plus efficace que chaque composé appliqué tout seul à une concentration de 10 mg C/50 ml eau déminéralisée.

Il est probable que la matière humique extraite du compost agit soit sur la résistance des feuilles de pommier, soit directement sur les conidies de *Venturia inaequalis*.

L'efficacité de l'application d'extraits de composts ou de substances humiques sur les feuilles peut reposer sur deux effets principaux : d'une part, les extraits pourraient déclencher dans les plantes des mécanismes d'induction de la résistance, et d'autre part, l'activité antagoniste de la population microbienne de la phyllosphère pourrait être stimulée après l'addition massive d'éléments nutritifs issus des extraits.

Peu de travaux existent sur l'influence des acides humiques sur la résistance des plantes aux maladies. Bosshard et Häseli (1993) ont montré que l'application d'extrait de l'humus commercial «SILKAHUM» dans un essai d'infection de plantules de pommier sous condition contrôlée n'a pas eu d'effet sur *Venturia inaequalis*. D'autre part, Straub et Kienzle (1991) ont montré qu'une préparation riche en acide humique «HUMINVITAL» était clairement moins efficace que le cuivre pour protéger les pommiers contre des infections précoces de tavelure.

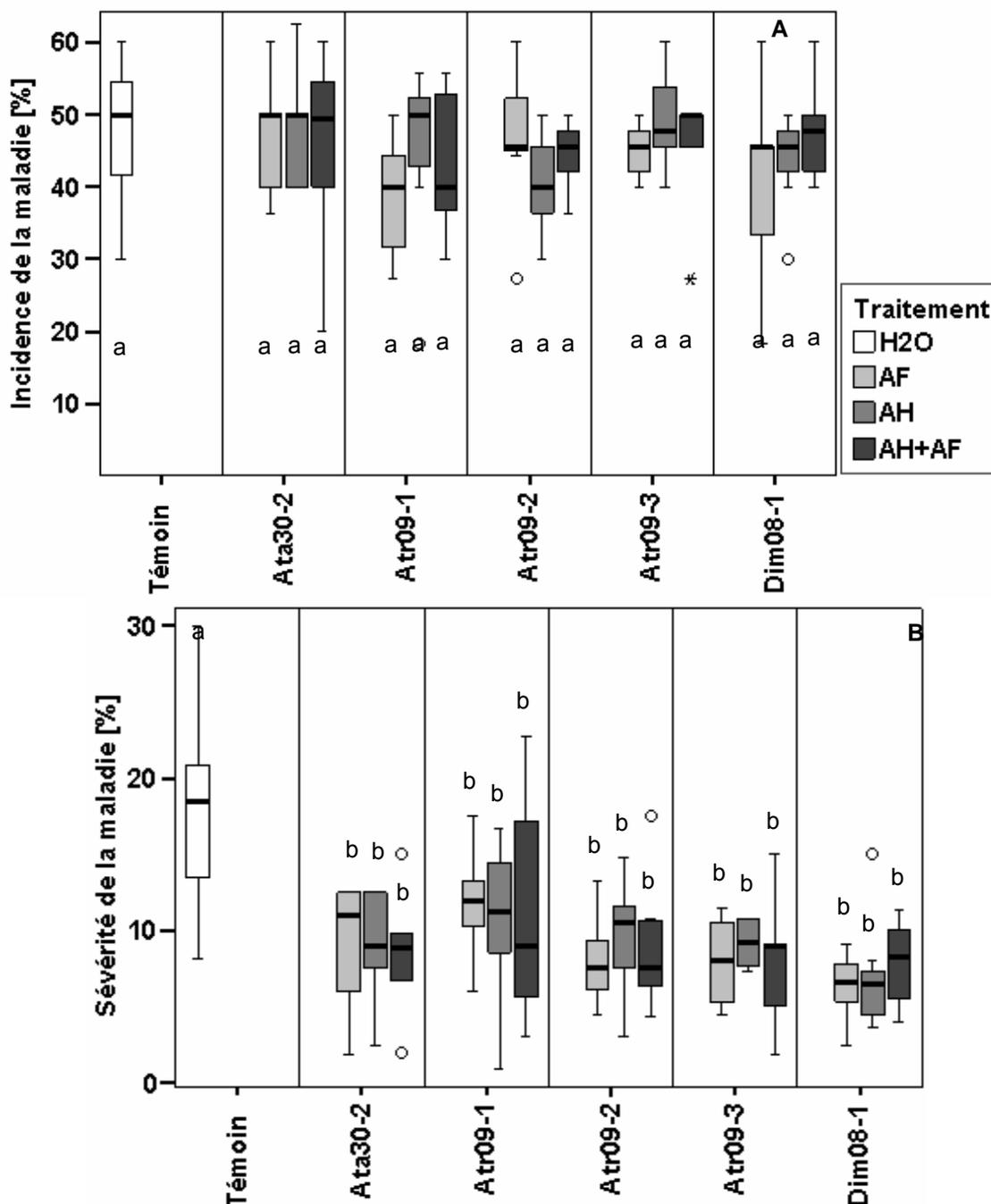


Fig.5.19. Influence de l'application de matières humiques extraites de composts sur l'incidence (A) et la sévérité (B) de la maladie de la tavelure du pommier, agent pathogène *Venturia inaequalis*.

Les plantules de pommiers (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec l'acide fulvique (AF), l'acide humique (AH) et les deux combinés (AF+AH) deux jours avant leur inoculation avec *Venturia inaequalis* (50'000 spores/ml). L'incidence et la sévérité de la maladie a été évaluée 12 à 14 jours après inoculation de l'agent pathogène.

Pour chaque composé humique, une concentration de 10 mg C a été dissoute dans 50 ml d'eau déminéralisée. La concentration de deux composés humiques combinés (AH+AF) est de 20 mg/50 ml d'eau déminéralisée. Une variante témoin traitée avec l'eau déminéralisée a été appliquée.

La figure montre la médiane de l'incidence et de la sévérité de la maladie ainsi que la variabilité dans cette expérience (n=8). Cette expérience a été répétée une fois avec les mêmes résultats. Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. Les caractéristiques physiques et chimiques de composés humiques extraits des composts sont illustrées dans le tableau 5.2.

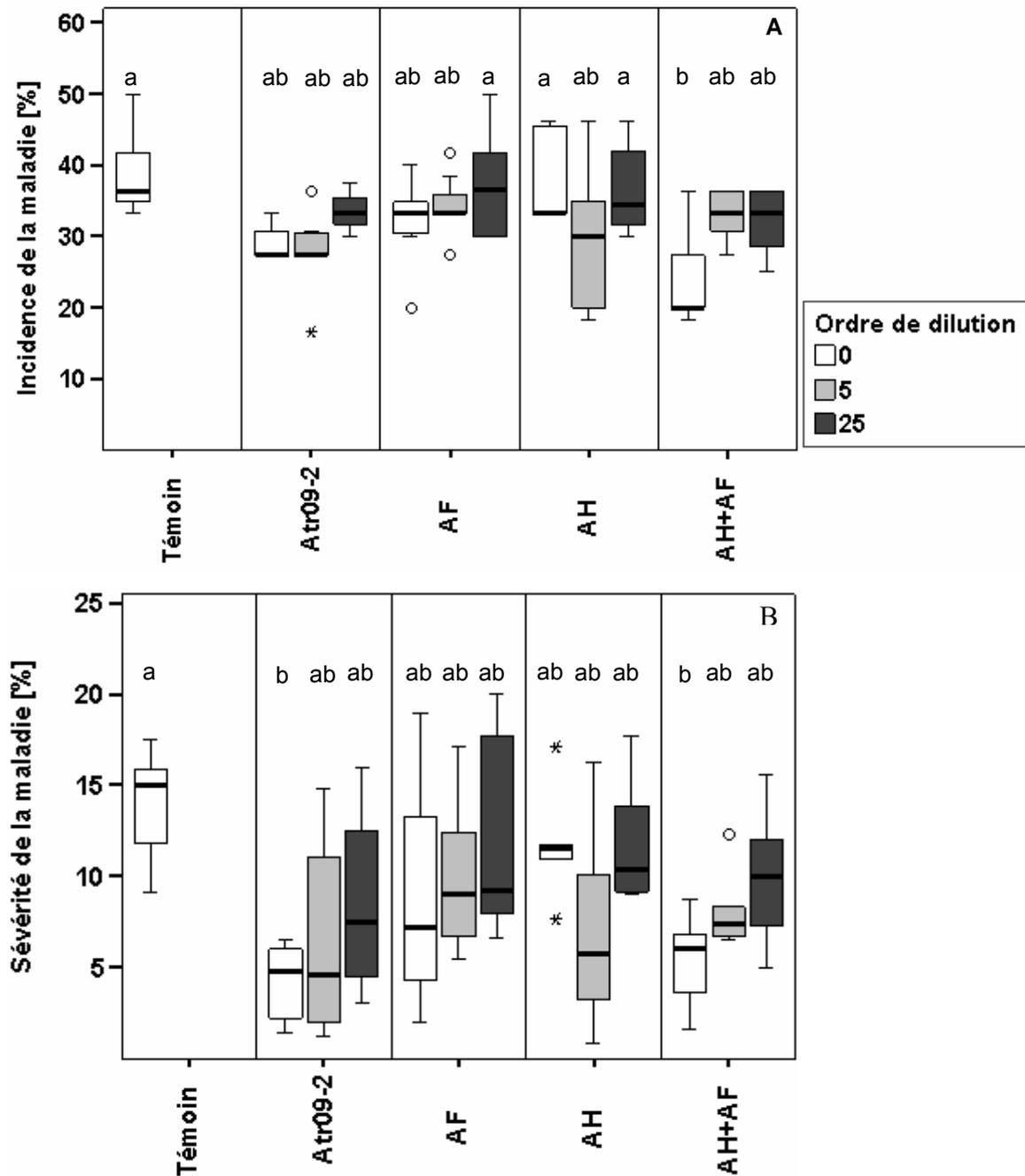


Fig. 5.20. Influence de la dilution de l'extrait de compost Atr09-2 et de ses matières humiques extraites sur l'incidence (A) et la sévérité (B) de la maladie de la tavelure du pommier, agent pathogène *Venturia inaequalis*.

Les plantules de pommier (grandeurs 6 à 8 feuilles) ont été pulvérisées avec l'extrait de compost Atr09-2, acides fulviques (AF), acides humiques (AH) et les deux composés combinés (AF+AH), deux jours avant leur inoculation avec *Venturia inaequalis* (50'000 spores/ml). L'incidence et la sévérité de la maladie a été évaluée 12 à 14 jours après inoculation de l'agent pathogène.

Une série de dilution (1:5 et 1:25, V:V, composés humiques : eau); a été effectuée sur l'extrait de compost, sur la concentration de chaque composé humique (10 mg C/ 50ml) et sur les deux composés humiques combinés (20 mg C/50 ml d'eau déminéralisée).

La figure montre la médiane de l'incidence et de la sévérité de la maladie ainsi que la variabilité dans cette expérience (n=8). Cette expérience a été répétée une fois avec les mêmes résultats. Les box plots avec la même lettre ne sont pas significativement différents à $P < 0.05$ d'après le test de Tukey-B. Les caractéristiques physiques et chimiques des matières humiques extraites du compost Atr09-2 sont illustrées dans le tableau 5.2.

Toutefois, des analyses plus avancées sur la concentration des matières humiques utilisées et sur leurs qualités manquent encore pour pouvoir évaluer la situation de manière claire. D'autre part, des études sur l'influence des divers acides humiques sur les microorganismes de la phyllosphère devraient encore être entreprises.

5.4. Récapitulation des résultats essentiels

Les résultats obtenus mettent en évidence la capacité de certains composts à protéger les plantes contre les maladies telluriques et foliaires. Les investigations réalisées aboutissent aux principaux résultats suivants :

- La combinaison des analyses physico-chimiques et biologiques (tests de phytotoxicité) des composts permet d'évaluer leur qualité biologique. Le système de compostage (méthanisation, petits andains triangulaires ou grands andains tabulaires) et l'âge physiologique des composts influencent leur qualité biologique.
- L'analyse de la matière humique des composts est un bon indice de l'évolution du processus d'humification au cours du compostage. Le taux d'humification de la fraction inférieure à 50 μm de compost est un indicateur fréquemment utilisé pour déterminer la stabilité du carbone fixé à long terme dans le sol. D'après nos résultats, cet indicateur se révèle aussi utilisable pour les composts et permet de prédire le degré de maturité du produit fini indépendamment des matières premières compostées.
- Sur la base des analyses de l'activité microbienne des composts et des tests de phytotoxicité, on a constaté que l'âge biologique des composts est différent de leur âge réel (en mois). Cette constatation permet de mieux estimer d'une part leur qualité biologique, d'autre part leur degré de maturité réelle. Elle représente également un facteur pour estimer le potentiel de suppression des maladies telluriques.
- De manière générale, la compatibilité des composts avec la croissance de plantes augmente avec leur âge physiologique
- En général, la majorité des composts testés dans le système concombre-*Pythium ultimum* ont protégé les plantes contre la maladie de la fonte des semis, indépendamment de la technique de compostage employée et des matériaux compostés. Ce potentiel suppressif diminue avec l'âge du compost. Le mode de protection peut être caractérisé comme étant de type général.
- Par contre, seule une minorité des composts a pu réduire significativement la mortalité de plantes de basilic contre *Rhizoctonia solani* dans les deux concentrations de la maladie. L'influence du site de compostage, et donc du type et de la conduite de compostage, sur la capacité des composts à protéger les plantes contre *R. solani*, est

plus importante que celle du degré de maturité du compost. La population microbienne spécifique présente dans les composts les plus actifs semble elle aussi être responsable de cet effet phytosanitaire. Le mode de protection peut être caractérisé comme étant de type spécifique.

- Le mécanisme de protection contre les maladies telluriques (*Pythium ultimum* et *Rhizoctonia solani*) semble être de nature principalement microbienne.
- Les extraits de composts protègent les plantes contre les deux types de pathogènes fongiques foliaires testés, à savoir un ascomycète (vrai-champignon, *Venturia inaequalis*) et un oomycète (pseudo-champignon, *Plasmopara viticola*).
- Les extraits de composts de déchets verts ont réduit *in vivo* la sévérité de la tavelure du pommier (*Venturia inaequalis*) de plus de 40 % comparativement au témoin non traité. De même, le diamètre des lésions des feuilles de vigne causée par *Plasmopara viticola* a été réduit d'en moyenne 60 %. L'incidence de la maladie du mildiou de la vigne causée par *Plasmopara viticola* a été réduite d'en moyenne 46 %.
- Le mode de production des extraits (rapport et durée d'extraction) n'a pas influencé significativement leur efficacité à protéger les plantules de pommier contre la maladie de la tavelure du pommier causée par *Venturia inaequalis*.
- L'âge de composts n'a pas influencé l'efficacité de leurs extraits dans les deux systèmes plante-pathogène étudiés (Pommier-*Venturia inaequalis* et Vigne-*Plasmopara viticola*).
- Ni la population microbienne des extraits (bactéries, champignons, actinomycètes et *Trichoderma* spp.) ni leurs paramètres physico-chimiques (salinité, pH) n'ont influencé leur efficacité contre les agents pathogènes étudiés.
- Les résultats obtenus lors des essais de stérilisation des extraits sont particulièrement intéressants. Ni la stérilisation par autoclave du compost avant son extraction ni celle de l'extrait lui-même après son extraction (par autoclavage ou par filtration à 0,2 µm) n'ont influencé l'efficacité de l'extrait. Après ces traitements, tous les extraits ont continué à réduire significativement la sévérité de la maladie dans les deux systèmes plante-pathogène testés.
- Les extraits de composts favorisent *in vitro* la germination de conidies de *Venturia inaequalis* et n'ont montré aucun effet fongicide contre ceux-ci. Par contre, l'activité de zoospores de *Plasmopara viticola* a été inhibée à plus de 70 %. Une corrélation positive s'observe entre la teneur en sels des extraits et leur effet inhibiteur sur l'activité des zoospores de *P. viticola*.

- Le lavage des feuilles de pommier (1 et 48h) après l'application de l'extrait de compost n'a pas eu d'effet constant sur l'incidence ou la sévérité de *Venturia inaequalis*. Par contre, l'effet protecteur sur les feuilles de vigne diminue si celles-ci sont lavées après l'application des extraits.
- Nous concluons que le mécanisme d'inhibition des maladies foliaires par les extraits n'est pas lié à leur activité microbienne, contrairement au mécanisme d'action mis en jeu contre les maladies telluriques.
- Nos résultats suggèrent que le principe actif contre *Venturia inaequalis* doit être soluble dans l'eau, thermostable, et déjà présent dans le compost. Nos résultats ne permettent cependant pas de dire si cette substance provient de la matière organique décomposée ou si elle est produite par les microorganismes pendant le processus de compostage.
- Il semble qu'un effet direct des extraits de composts sur l'agent pathogène *Plasmopara viticola* soit responsable de la protection des plantes. Cet effet peut soit être dû à l'inhibition directe de la germination des sporanges, soit à une action sur le métabolisme des zoospores ou à la création d'une barrière physiologique empêchant la fixation des zoospores sur les stomates. La teneur en sels des extraits pourrait aussi inhiber la germination des zoospores de *Plasmopara viticola*.
- L'application de matières humiques extraites des composts (acides humiques et fulviques) a réduit clairement la sévérité de *Venturia inaequalis*, mais pas son incidence. Des recherches plus approfondies et complémentaires sur le potentiel phytosanitaire des matières humiques des composts paraissent nécessaires afin de pouvoir éclaircir les modes de protection mis en jeu et définir les paramètres spécifiques à cet effet.
- Il est probable qu'une interaction entre le pathogène et la plante existe et qui se déclenche surtout en présence de l'extrait. Autrement dit, un phénomène d'induction de la résistance par les extraits de composts ne peut pas être totalement exclu.

6. Discussion et conclusion générales

En se basant sur les résultats obtenus et l'état actuel des connaissances acquises dans le domaine de la lutte biologique contre des maladies telluriques et foliaires par l'emploi des composts de qualité, ce chapitre va contenir plusieurs parties : une première partie sera réservée à la caractérisation des composts, en s'intéressant plus particulièrement aux différents critères de leur qualité. Une autre section sera consacrée à l'influence du mode de production des composts sur leur pouvoir suppressif des maladies donc leur utilité phytosanitaire. Les mécanismes de protection mis en jeu dans les différents systèmes plante-pathogène ainsi que les paramètres influençant et renforçant ces mécanismes seront évoqués dans une autre partie. Les possibilités d'amélioration du potentiel suppressif des composts seront ensuite discutées. Les possibilités et les limites de l'application des composts ou des extraits de composts dans les conditions de la pratique seront discutées. Enfin, des perspectives de recherches et de développements futurs seront proposées.

6.1. La caractérisation des composts de qualité

Afin d'assurer à long terme les débouchés commerciaux du compost, il est nécessaire que son effet sur le sol et sur les plantes soit prévisible. C'est la raison pour laquelle différentes méthodes ont été employées afin d'évaluer et de caractériser la teneur en éléments fertilisants, la maturité, la stabilité et la phytotoxicité des composts utilisés.

Tout d'abord, la détermination des éléments fertilisants totaux et solubles permet de prévoir l'effet fertilisant des composts employés. Un point qui préoccupe beaucoup les chercheurs est la caractérisation de la maturité et de la stabilité des composts. Plusieurs paramètres physiques et chimiques de composts ont été largement décrits pour atteindre cet objectif. Parmi ces paramètres souvent cités figurent la respirométrie (Iannotti *et al.*, 1994), la détermination de la concentration de carbone soluble dans l'extrait aqueux des composts, la capacité d'échange cationique, le rapport C/N (Garcia *et al.*, 1992 et Jiménez et Garcia, 1992), la détermination de la transformation des matières humiques (acides humiques et fulviques) au cours du processus de compostage, soit par extraction en milieu alcalin, soit par spectrographie infrarouge ou encore par résonance magnétique nucléaire (RMN-¹³C) (Jiménez et Garcia 1992 ; Chefetz *et al.*, 1996 et). La plupart de ces études n'ont cependant été effectuées que sur un seul type de compost et pendant une période de compostage de 3 à 6 mois. Toutes ces démarches ont abouti aux résultats (souvent divergents) des valeurs indicatrices de maturité. Il est cependant difficile, voire impossible, de déterminer de façon incontestable la qualité de

composts en se basant seulement sur les paramètres physiques et chimiques (Morel *et al.*, 1985 ; Zucconi et de Bertoldi, 1987). Il ressort de ce travail que des facteurs, plus nombreux et diversifiés que prévu, influencent la maturité du compost, et qu'ils doivent toujours être pris en considération lors de l'utilisation . Il s'agit de la diversité de la composition des intrants, du mode de production de compost (par exemple méthanisation \neq compostage), de la conduite du compostage (fréquence des retournements, conduite de l'humidité du tas, aération, ...), l'âge du compost aux moments des prélèvements, les conditions de stockage du compost, etc.

Parmi les indicateurs de maturité, le plus fiable que nous ayons observé pour prévoir la réaction des plantes par rapport à leur croissance se trouve être le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$. Ceci confirme les observations de Schleiss *et al.* (2002) qui soulignent que ce facteur permet d'éliminer l'influence de la matière primaire compostée dans son appréciation. En combinant ce facteur avec les tests de phytotoxicité, nous avons obtenu une bonne évaluation de l'influence des divers composts sur la croissance des plantes, allant ainsi dans le sens des travaux de Chen et Inbar (1993) et de Fuchs et Bieri (2000). En effet, lors des biotests, les plantes peuvent réagir de manière discriminante envers de nombreux paramètres qualitatifs non analysables dans leur complexité, complétant ainsi efficacement les autres données analytiques. Ainsi, **une tendance générale montrant une amélioration de la croissance des plantes avec une augmentation de l'âge physiologique des composts est observée.** Toutefois, si un problème est rencontré lors de la maturation ou du stockage des composts, une dépression dans la croissance des plantes est rapidement observable. Il en est de même lorsqu'un compost est encore trop jeune. Ceci est dû au fait que les plantes sont alors, dans de tels composts, au contact avec des composés toxiques libérés aux premiers stades de décomposition de la matière organique. Les travaux de Zucconi *et al.* (1981) ; Chanyasak *et al.* (1982) et Fuchs et Bieri (2000) ont abouti à la même conclusion.

D'autres facteurs importants de la qualité comme le pH et la salinité doivent également être pris en compte pour déterminer les applications possibles des divers composts.

6.2. Influence de la qualité des composts sur leur pouvoir suppressif

La capacité d'un compost à protéger les plantes contre les maladies varie d'un compost à un autre, comme l'ont suggéré Harender *et al.* (1997). En effet, ces derniers auteurs ont pu observer une différence dans le potentiel suppressif des composts contre la maladie de flétrissement de tomates, causée par *Fusarium*, après l'emploi des composts ayant différentes origines végétales.

Dans le présent travail, **aucune corrélation claire n'a cependant pu être observée entre les intrants utilisés et le pouvoir suppressif des composts qui en résultent.** En revanche, Ringer *et al.* (1997) ont constaté que tous les composts provenant de différents types de fumier se sont révélés suppressifs contre *Pythium ultimum* et *Rhizoctonia solani*. Cependant, les composts de fumier de bovin sont plus efficaces contre *Pythium ultimum* que celui de cheval, mais moins que les composts contenant les fientes de volailles. L'effet suppressif contre *Pythium ultimum* était inversement proportionnel à la teneur en nitrate de composts (Ringer *et al.*, 1997). D'autres auteurs ont pu mettre en exergue l'influence de certains intrants sur le pouvoir suppressif des composts. Par exemple, les composts de déchets verts et d'écorces de cerisiers ont réduit la sévérité de la maladie de framboise causée par *Phytophthora fragariae* var. *rubi* et ce contrairement au compost d'écorces du bois résineux (Brunner et Seemuller, 1993). Ceci a été expliqué en fait par la différence entre les populations microbiennes des composts de déchets verts et de celui d'écorces du bois résineux. Dans le même contexte, Bruns *et al.* (1996) ont montré que les composts de déchets verts sont plus efficaces contre la maladie causée par *Pythium ultimum* au pois et par *Phytophthora parasitica* à la tomate que les composts issus du fumier. Il semble que l'activité microbienne plus élevée des composts de déchets verts soit la cause de ces différences. Pour leur part, Chung *et al.* (1988a) ont conclu que le taux élevé de cellulose dans le compost frais d'écorces des arbres peut par contre accroître la sévérité de la maladie de la pourriture de racines de radis causée par *Rhizoctonia solani*. Cette cellulose pouvant servir de nutriment à l'agent pathogène et inhibe la production de chitinase des antagonistes.

D'après Hoitink *et al.* (1993), le pouvoir suppressif des composts contre les maladies telluriques ou foliaires est plutôt influencé par leur mode de production. Le type de système de compostage et surtout sa conduite agissent directement sur la maturité de compost et sur la qualité du produit fini. Dans le présent travail, on a utilisé une gamme de composts provenant de différents systèmes de compostage. On a d'une part une différence entre la méthanisation réalisée en condition anaérobie et le compostage mené de façon aérobie. Ce dernier se diversifie ensuite principalement entre le système de compostage à petits andains triangulaire (de 1,5 à 2 m de hauteur), à grands andains triangulaires (2 à 3,5 de hauteur) et le système à andains tabulaires (2,5 à 4 m de hauteur). En ce qui concerne les digestat résultant de la méthanisation, on peut distinguer entre ceux provenant des systèmes mésophiles et ceux provenant des systèmes thermophiles. De plus, le mode de post-traitement des digestats influence également leur qualité.

De manière générale, **on n'a pas observé que le système de traitement des déchets organiques ait en soi une influence sur les caractéristiques suppressives des composts.**

Des composts provenant de différents systèmes de compostage ont montré un pouvoir suppressif contre les maladies telluriques et foliaires, comme le digestat Dim08-1 et les composts provenant des systèmes tabulaires (Ata30-2) et triangulaires (Atr09-1 et Atr12-2) qui ont montré des pouvoirs protecteurs stables dans les différents systèmes plante-pathogène testés.

Si certains des facteurs physico-chimiques et biologiques analysés laissent prévoir une influence des composts sur la croissance des plantes, aucune corrélation claire entre ces facteurs et la protection des plantes n'a pu être observée dans nos travaux. Ceci est probablement dû à la grande diversité des composts et des digestats que nous avons étudiés. Cette diversité n'est pas uniquement due au système de compostage et à sa conduite, mais également aux intrants organiques employés et à l'âge physiologique des composts et digestats. Il est fort probable que les mécanismes de protection mis en jeu avec les divers composts diffèrent d'un compost à l'autre et vraisemblablement également d'une relation plante-pathogène à l'autre.

Certaines des conclusions auraient été mieux étayées en travaillant avec seulement un ou deux types de compost. Mais la recherche entreprise était très dépendante des composts disponibles « sur le marché ». D'autre part, nous avons aussi tenu à avoir une diversité de composts pour mettre en évidence soit des processus invariants, soit des phénomènes liés à des catégories précises de composts. Ceci nous paraissait essentiel en vue d'une future application de nos résultats.

Les résultats obtenus ont toutefois clairement permis de mettre en évidence un fait essentiel : **une protection des plantes par les composts ou les extraits de composts a été observée dans les quatre systèmes hôtes-pathogènes concombre-*Pythium ultimum*, basilic-*Rhizoctonia solani*, pommier-*Venturia inaequalis* et vigne-*Plasmopara viticola*.** Quatre composts ont montré un effet protecteur stable dans les quatre systèmes, les résultats des autres varient d'un système à l'autre. Les composts employés ont montré divers potentiels de protection selon les maladies testées. A ce sujet, il est intéressant de constater que **le pouvoir protecteur des composts contre une maladie n'est pas forcément aussi puissant contre une autre maladie.**

D'une manière générale, on a remarqué que **la majorité des composts protègent bien les concombres contre *Pythium ultimum*, alors que seul un nombre restreint diminue de manière notable la mortalité des plants de basilic contre *Rhizoctonia solani*.** Il semble

donc que nous ayons ici affaire à **deux mécanismes de protection différents, un pouvant être caractérisé de général** (dans le cas du *P. ultimum*) **et un de spécifique** (dans le modèle *R. solani*). Des observations semblables ont déjà été faites par Fuchs et Larbi (2004) et Hoitink *et al.* (1997). Cependant, ces deux modes de protection semblent, selon nos observations et les travaux de Rogger (1996), Hoitink *et al.* (1997), Fuchs (2002), et Fuchs et Larbi (2004), **être tous deux de nature principalement microbiologique**. En effet, de nombreux travaux de recherche ont montré qu'un traitement à la chaleur annihile la microflore microbienne ce qui a aboutit à une perte du potentiel suppressif de composts contre les pathogènes (Nelson et Hoitink, 1983 ; Hadar et Mandelbaum, 1986 ; Trillas-Gay *et al.*, 1986 ; Hardy et Sivasithamparam, 1991 ; Brunner et Seemuller, 1993 ; Theodore et Toribio, 1995 ; Rogger, 1996 ; Serra *et al.*, 1996a ; Ringer *et al.*, 1997 ; Fuchs, 2002 ; Tilston *et al.*, 2002 ; Fuchs et Larbi, 2004).

Concernant, le premier système concombre-*P. ultimum*, on a remarqué que **presque tous les composts employés ont protégé le concombre contre la maladie de la fonte du semis**. En général, **les composts jeunes ont mieux protégé contre les maladies que les composts âgés**, indépendamment de la pression de la maladie testée. Toutefois, la majorité des composts ont montré une biomasse et une activité microbienne élevées. Nous supposons ainsi que **ces facteurs biologiques** étaient les responsables de l'effet suppressif de composts contre *P. ultimum*. Ces résultats confirment ceux trouvés par divers auteurs, qui ont constaté que les pathogènes tels que *P. ultimum* et *Phytophthora* spp., sont inhibés à travers le mécanisme de suppression générale (Chen *et al.*, 1988a et 1988b ; Mandelbaum and Hadar, 1990 ; Hardy et Sivasithamparam, 1991 ; Hardy and Sivasithamparam, 1991 ; Boehm *et al.*, 1993). Cette suppression repose probablement sur un phénomène de sévère compétition entre les microorganismes. Cette compétition joue souvent en défaveur des pathogènes peu concurrentiels saprophytiquement comme *Pythium* et *Phytophthora* (Fuchs, 1995). La concurrence se produit soit pour les éléments nutritifs (Hoitink et Fahy, 1986) soit pour l'espace sur les racines et pour les exsudats racinaires (Nelson *et al.*, 1983 ; Chen *et al.*, 1988b ; Hoitink *et al.*, 1997).

A l'égard du système basilic-*R. solani*, seulement quatre composts ont pu réduire significativement l'incidence de la maladie dans les deux concentrations de la maladie. L'effet de l'âge n'a pas été mis en évidence, les quatre composts qui ont montré un potentiel suppressif contre *R. solani* étant d'âges différents. En revanche, la population microbienne de trois composts (Ata30-2, Atr09-1, Dim08-1) est relativement élevée surtout en ce qui concerne la quantité de *Trichoderma* sp. et les bactéries. Ces types de microorganismes ont

été isolés aussi à partir de composts à base de déchets ligno-cellulosiques qui se montrent particulièrement suppressifs contre *R. solani* (Kuter *et al.*, 1983 et Nelson *et al.*, 1983). Ce type de mécanisme est considéré comme spécifique (Hoitink, 1991). Fuchs, (1996) et Fuchs et Larbi (2004) ont pour leur part considéré que le mécanisme de suppression est qualitatif du fait que cette protection est due à des antagonistes quantitativement moins nombreux mais ayant un pouvoir antagoniste plus puissant. Ces antagonistes semblent se développer principalement au cours de la phase de maturation, comme les *Trichoderma* spp., dégradant alors le bois. Ces microorganismes antagonistes sont capables de coloniser les pathogènes de plantes en provoquant leur lyse ou mort (Chung *et al.*, 1988a ; Hoitink *et al.*, 1997). L'activité de plusieurs bactéries seules ou en combinaison avec *Trichoderma hazanum* et vraisemblablement avec d'autres microorganismes est capable d'inhiber *R. solani* (Kwok *et al.*, 1987).

Contrairement à ce qui se passe au niveau des maladies telluriques, **l'aspect microbiologique ne joue dans nos essais aucun rôle dans la protection des pommiers contre *Venturia inaequalis* et celle de la vigne contre *Plasmopara viticola*** (chap. 4.3.5). Ces diverses réactions démontrent bien la complexité des interactions entre les composts, les extraits de compost, les plantes et les agents pathogènes.

Les résultats du présent travail ont montré que **le potentiel suppressif des composts est variable**. Cette forte variabilité observée entre les différents lots de compost est assurément un gros écueil à l'utilisation à large échelle de composts comme mesure ciblée de protection des plantes (Nelson et Boehm, 2002). La question qui se pose actuellement est donc de savoir comment améliorer et stabiliser le potentiel suppressif des composts afin d'en garantir des effets à plus long terme.

Les intrants, le système et surtout la conduite du compostage influencent notablement la qualité du produit fini (Hoitink et Grebus, 1994 ; Harender *et al.*, 1997 ; Ringer *et al.*, 1997 ; Hoitink *et al.*, 1997 ; Fuchs, 2002 ; Fuchs et Larbi, 2004). L'ajout de substances choisies pendant le compostage ou la phase de maturation permet d'augmenter le potentiel suppressif des composts. Il est par exemple connu que les composts produits à partir d'écorces sont particulièrement efficaces contre *Rhizoctonia solani* (Chung *et al.*, 1988a ; Hoitink et Grebus, 1994). De même, l'ajout, pendant la phase de maturation, de matières riches en lignine, comme les fibres de chanvre (Fuchs, communication personnelle), ou des déchets de crabes ou d'autres produits riches en chitine (Roy *et al.*, 1997), augmentent également la suppressivité de ces composts. .

Divers auteurs avancent l'idée d'ajouter des antagonistes spécifiques aux composts afin d'augmenter leur pouvoir suppressif. Chung et Hoitink, (1990) ont pu montrer que l'inoculation de *Trichoderma hazianum* après la phase chaude de compostage permet l'augmentation de la suppressivité du compost. De même, l'inoculation de l'antagoniste *Bacillus subtilis* souche N4 a permis de mieux contrôler la maladie de pourriture causée par *R. solani* (Nakasaki *et al.*, 1998). De même, l'inoculation ciblée du champignon antagoniste *Verticillium biguttatum*, mycoparasite de *R. solani*, a permis d'augmenter significativement la protection de la betterave à sucre contre ce pathogène (Postma, 2000)

6.3. Les mécanismes plausibles des extraits de composts dans la protection des plantes contre les maladies foliaires

La capacité des extraits de composts à protéger les plantes contre les maladies foliaires a été démontrée dans ce présent travail (chap. 4.3). La majorité des extraits de composts testés **ont réduit la sévérité des maladies de la tavelure de pommier et du mildiou de la vigne**. S'ils ont également **réduit l'incidence du mildiou de la vigne**, ils n'ont par contre **que peu d'influence sur celle de la tavelure**. Ceci indique que les mécanismes mis en jeu pour protéger les plantes contre ces deux maladies ne sont probablement pas complètement identiques.

Une certaine variabilité des extraits produits avec les divers composts testés a été observée en ce qui concerne leur potentiel de protection des plantes contre les maladies foliaires. **Aucune corrélation n'a cependant été définie entre la protection et les intrants compostés, la technique de compostage ou l'âge des composts**. Dans le même sens, Elad et Shtienberg (1994) ont rapporté que les extraits produits avec des composts de marc de raisins étaient autant efficaces dans l'inhibition de *Botrytis cinerea* dans des essais sous serres que ceux issus de déchets de fumier de moutons ou ceux du mélange de fumier de mouton et de fientes de poulet. Par contre, Weltzien (1992) et Ketterer *et al.* (1992) et Andrews (1993) ont observé une meilleure efficacité des extraits de composts de fumier que ceux produits à partir de compost de déchets verts. Selon nos observations, **la conduite du compostage et les conditions de stockage peuvent influencer la qualité des composts de telle manière que les différences dues aux intrants ne soient plus décelables**.

Il ressort clairement de nos résultats que **ni la durée de l'extraction, ni le rapport d'extraction ni l'activité microbiologique du compost ou de son extrait n'influencent l'efficacité de l'extrait** (chap. 4.3). D'autre part, **le principe responsable de la protection**

des plantes est, dans les deux systèmes plante-pathogène, **résistant à la chaleur**. La différence entre les mécanismes d'action entre les deux systèmes réside principalement dans le fait que l'effet protecteur de la vigne contre *P. viticola* diminue fortement, mais pas complètement, après le lavage des feuilles, alors que l'influence de cette opération dans le cas de la tavelure n'est pas évidente (chap. 4.3.6). Cette différence est probablement due à la sensibilité de *P. viticola* qui se traduit dans des conditions de salinité par une diminution claire de la germination des spores de ce champignon qui sont au contact avec les extraits de compost. En opposition, la germination des spores de *V. inaequalis* est plutôt stimulée par les extraits. **Une combinaison des mécanismes comme l'effet fongicide et la stimulation de la défense naturelle des plantes est probable.**

Indépendamment du mécanisme qui régit la protection, **les principes actifs** responsables de la protection des plantules de pommier contre *Venturia inaequalis* et des plantules de vigne contre *Plasmopara viticola* **sont des métabolites du compost solubles à l'eau et résistants à la chaleur**, confirmant les résultats obtenus par Cronin *et al.*, 1996 et Al-Dahmani *et al.* (1998). **Ces métabolites doivent être déjà actifs relativement à petite concentration, ce qui explique que les rapports d'extraction ne jouent pas de rôle sur l'efficacité des extraits.** Cronin *et al.* (1996) ont également pu mettre en évidence, dans leurs extraits de composts de champignonnière, qu'une substance de faible poids moléculaire et thermostable était principalement responsable de l'inhibition de la germination de conidies de *V. inaequalis*. Toutefois, cette substance semblait, dans leur cas, produite par des microorganismes anaérobiques durant l'incubation de l'extrait, alors que dans notre cas, **la substance responsable de la protection est déjà présente dans le compost**, la stérilisation du compost avant la production de l'extrait n'influençant pas son pouvoir protecteur. Nos résultats ne permettent cependant pas de dire si cette substance provient de la matière organique décomposée ou si elle est produite par les microorganismes pendant le processus de compostage.

Ainsi, différentes substances semblent, suivant les situations, être impliquées dans les mécanismes de protection. Ceci n'est a priori pas étonnant, la nature et les caractéristiques des composts pouvant fortement varier. Une caractérisation plus fine ou approfondie de ces composés pourrait être un moyen pour optimiser l'efficacité des extraits.

L'effet fertilisant de l'extrait de compost sur les feuilles de pommier pourrait également être responsable de la protection des pommiers contre *Venturia inaequalis*. Cet apport d'éléments nutritifs pourrait soit renforcer la plante elle-même, soit augmenter la population microbienne antagoniste naturelle de la phyllosphère, population concurrençant alors l'agent pathogène

(Fokkema, 1993). Une telle population microbienne bénéfique pourrait contrôler aussi bien des pathogènes nécrotrophiques que des pathogènes biotrophiques (Blakeman et Fokkema, 1982; Baker *et al.*, 1985). Les mécanismes mis en jeu peuvent alors être soit une concurrence directe pour la place et les nutriments (Weltzien, 1992 ; Fokkema, 1993) soit une production des antibiotiques (Levy *et al.*, 1989 ; Kempf et Wolf, 1989), soit un mécanisme d'induction de la résistance de la plante (Weltzien, 1992 ; Hoitink, Zhang *et al.*, 1997 ; Zhang *et al.*, 1998). Des études plus approfondies de la population microbienne de la phyllosphère avant et après leur traitement avec l'extrait, études ne faisant pas partie du présent travail, pourraient permettre d'éclaircir cette question.

Le degré de maturité des composts n'a pas influencé l'efficacité des extraits contre la maladie de la tavelure de pommier causée par *Venturia inaequalis* et celle du mildiou de vigne causée par *Plasmopara viticola*. Le degré de protection était presque le même chez les composts jeunes et mûrs. Ces résultats vont à l'encontre de ceux trouvés par Dittmer *et al.* (1990) et Dittmer, (1991) et Brinton *et al.* (1996) qui ont observé que les extraits préparés à partir des composts de déchets végétaux de plus de trois mois sont inefficaces, alors que des composts de fumier de bovins et de cheval âgés de 9 à 12 mois peuvent encore être utilisés pour produire des extraits efficaces. D'après Winterscheidt *et al.* (1990), les extraits produits à partir de composts de fumier de cheval âgés de six mois étaient significativement plus efficaces que ceux produits à partir de mêmes composts âgés d'une année. De même, Andrews (1993) a montré que l'efficacité des extraits des composts de fumier de bovins, âgés de 12, 18 et 24 mois, d'inhiber *in vitro* la germination des spores de *Venturia inaequalis* diminuait avec l'âge des composts.

Toutefois, il faut noter que les conditions de conservation peuvent également agir sur les caractéristiques biologiques et physiques des composts et donc sur l'efficacité de l'extrait qui en résulte.

6.4. Possibilités et limites de l'utilisation des composts et des extraits de composts dans la pratique

Aujourd'hui, il existe suffisamment de travaux fondés qui confirment que les effets positifs de composts sur la santé de plantes ne sont pas uniquement des phénomènes du laboratoire.

Les bénéfices agronomiques liés à l'utilisation des composts sont nombreux. C'est en améliorant les propriétés physiques et chimiques et en stimulant l'activité biologique que les composts favorisent la fertilité des sols. Les principaux avantages apportés par l'utilisation

des composts en plein champ sont directement liés d'une part à sa teneur en matière organique, à sa capacité à générer de l'humus stable (Gobat *et al.*, 2003), et d'autre part à la stimulation de l'activité microbienne du sol et à celle des microorganismes du compost lui-même (Craft et Nelson, 1996). L'effet positif des composts est d'autant plus évident lorsque le sol est intensivement cultivé ou déséquilibré (Chausson, 1999 ; Fuchs, 1995 et 2002). Au champ, l'effet des composts se distingue des autres matériels organiques (fumier, résidus de culture...), principalement en raison de leur activité microbiologique.

Afin d'assurer le succès de l'utilisation des composts, il est important, comme on l'a vu au paragraphe précédent, d'assurer sa qualité. Comme tous les paramètres de production ne sont pas encore connus et maîtrisés, **un système d'assurance qualité, combinant des analyses chimiques et des tests biologiques, doit être mis en place pour permettre de choisir les composts les plus appropriés aux différentes conditions d'utilisation pratique.** Ceci est d'autant plus important qu'un compost de moindre qualité peut non seulement ne pas se montrer bénéfique, mais peut même engendrer des dégâts aux plantes, soit par phytotoxicité, soit par les agents pathogènes qu'il contient. Le second point important à considérer est **l'optimisation d'une utilisation raisonnée des composts**, c'est-à-dire d'optimiser cette opération suivant les conditions présentes – type de sol, culture, conditions climatiques, etc. - et les buts recherchés – effet fertilisant à court terme, amélioration de la structure du sol à long terme, rééquilibrage microbiologique du sol, etc.

Les instruments à disposition pour réaliser ceci sont le type de compost, son degré de maturité, la période de son application, les quantités amendées, etc.

Parfois, des applications de compost dans des conditions contrôlées mènent à un succès probant, alors que le résultat au champ est tout autre. Dans un essai mené sous serre, l'emploi de compost d'écorce de peuplier a protégé, dans un sol naturellement infesté, l'œillet contre *Fusarium oxysporum* f.sp. *dianthi* (Pera et Filippi, 1987). Par contre, l'effet protecteur de ce compost contre la même maladie n'a pas pu être observé au champ (Pera et Filippi, 1987). En revanche, l'amendement de composts de fientes de volailles dans le champ était plus suppressif qu'en pots (Pera et Filippi, 1987). Ceci s'explique par le fait que la teneur élevée en ammonium de composts de fientes de volailles était toxique pour les microorganismes et les plantes cultivées dans les pots. Par contre, au champ, l'ammonium est rapidement nitrifié ou dissipé. Il est probable que les facteurs de croissance (température, humidité relative de l'air, la capacité de rétention de l'eau, etc.) joue un rôle déterminant sur l'efficacité de composts contre les maladies.

En ce qui concerne l'emploi d'extrait de composts, il est également nécessaire de mieux définir leur activité phytosanitaire. **Cela signifie aussi de mettre en place un système d'assurance-qualité.** De plus, encore relativement peu d'essais aux champs sont à notre disposition pour juger de façon incontestable si l'effet des extraits peut être suffisant pour la pratique ou pas. D'autre part, des études doivent à notre avis être entreprises pour caractériser les risques éventuels pouvant découler de cette technique. En effet, les extraits de composts contiennent de nombreux microorganismes non identifiés. Sans études plus approfondies, on ne peut pas exclure que des micro-organismes indésirables ne soient aussi apportés aux plantes, ce qui pourrait éventuellement représenter un risque pour le consommateur si la partie de la plante traitée est consommable (par exemple salade ou fruit).

Enfin, il est pour nous évident qu'aussi bien l'apport de compost pour lutter contre les maladies telluriques que **l'emploi des extraits pour protéger les feuilles des plantes ne constituent pas des techniques pouvant totalement résoudre les problèmes.** Nous sommes convaincus, en considérant nos résultats, que ces techniques peuvent avoir le potentiel de réduire significativement la pression des maladies, mais ceci ne doit représenter qu'une étape dans la protection des plantes. **Des travaux permettant d'optimiser l'emploi de ces techniques, de les intégrer et de les combiner avec d'autres méthodes de production doivent encore être entrepris.** Nous pensons ici en particulier aux méthodes de travail du sol, à une fumure et une irrigation raisonnées, à l'emploi d'antagonistes spécifiques, ainsi qu'à la combinaison entre l'emploi de compost dans le sol et d'extrait de compost sur les feuilles. Un effet additif a été par exemple observé lors de l'utilisation combinée de ces deux dernières méthodes contre la maladie de l'oïdium de l'orge causée par *Erysiphe graminis* f.sp. *hordei* (Budde et Weltzien, 1988). C'est par cette voie que nous pourrions mettre en place une méthode de production de plantes stables, économiquement rentables et respectueuses de l'environnement.

6.5. Le pouvoir phytosanitaire des matières humiques extraites de compost

Parmi les acquis originaux démontrés dans le présent travail on cite l'effet phytosanitaire des acides humiques et fulviques extraits des composts contre la maladie de la tavelure du pommier causée par *V. inaequalis* (chap.4.3.9). La sévérité de la maladie a été réduite aussi bien par les acides humiques que par les acides fulviques. Ces substances, appliquées sur les feuilles, pourraient augmenter et stimuler la biomasse

microbienne de celles-ci, les populations de bactéries et de champignons bénéfiques de la phyllosphère pouvant alors concurrencer efficacement les agents pathogènes (compétition pour l'espace et les éléments nutritifs). L'ajout de ces substances humiques pourrait également augmenter la vigueur des plantes, entraînant une meilleure résistance des plantes aux infections.

De nombreux effets bénéfiques de l'application de matières humiques sur les propriétés du sol (Gobat *et al.*, 2003), sur la croissance des plantes (Ayuso *et al.*, 1997 et Chen *et al.*, 1994) et sur la germination de semences (Ayuso *et al.*, 1996) ont été démontrés. Ces améliorations peuvent être expliquées par un effet fertilisant à court terme et par quelques effets indirects dont notamment la solubilisation de micro-éléments (Fe, Zn, Cu et Mn) et quelques macroéléments (K, Ca, P) et par l'amélioration de la population microbienne du sol (Chen *et al.*, 1994). D'après Chen *et al.* (1994), la concentration optimale de substances humiques pour tous les paramètres de croissance de melon (poids de racines et des tiges, concentration en chlorophylle, superficie des feuilles, hauteur de la plante) était de l'ordre de 35 à 55 mg /l ce qui correspond à l'intervalle mentionné dans la littérature pour les dérivés des substances humiques du sol (25-150 mg /l). Petrovic *et al.*, (1982) et Chen et Aviad (1990) ont pour leur part démontré qu'une concentration élevée de substances humiques extraites peut avoir un effet inhibiteur sur la germination, particulièrement pendant sa phase initiale. Toutefois, peu de travaux ont été réalisés sur l'influence directe des matières humiques sur la résistance de plantes aux maladies.

Des études plus approfondies dans ce domaine sont nécessaires afin de mieux caractériser la composition de la matière humique et son effet sur les interactions plantes-pathogènes au niveau de la phyllosphère.

6.6. Perspectives de recherche et de développement

Les résultats du présent travail montrent que le contrôle biologique des pathogènes avec les composts et leurs extraits est possible à condition que tous les facteurs impliqués dans la production et l'utilisation des composts soient définis et maintenus constants. L'efficacité des composts contre les maladies telluriques et des extraits contre les maladies foliaires est également variable dans chaque système plante-pathogène étudié. A l'issue de cette investigation, plusieurs questions ont pu être élucidées, alors que d'autres nouvelles ont émergé.

Les lacunes les plus importantes à combler par des travaux futurs concernent les aspects suivants :

- Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance de la conduite du compostage sur la qualité du produit fini et sur les propriétés suppressives des composts. Le rôle exact de divers paramètres influençant la qualité biologique des composts et leur gestion sont encore mal connus. Une meilleure connaissance des processus mis en jeu à ce niveau permettrait vraisemblablement d'améliorer la qualité des résultats.
- Des études comparatives entre les différents types de composts doivent être intensifiées afin de pouvoir optimiser le choix du compost en fonction de son utilisation et des buts recherchés.
- L'amélioration de l'activité phytosanitaire des composts par ajout contrôlé de microorganismes choisis ou d'additifs spéciaux est un domaine encore nouveau, mais qui laisse entrevoir des possibilités de développement importantes. L'application commerciale de tels procédés pourrait permettre d'obtenir des effets phytosanitaires mieux maîtrisés et plus constant dans la pratique (Phae *et al.*, 1990 ; Hoitink *et al.*, 1991 Grebus *et al.*, 1993).
- De grandes lacunes concernent encore la connaissance d'une part des mécanismes impliqués dans la suppression des maladies et d'autre part l'influence des divers paramètres du compostage sur le potentiel phytosanitaire des composts et de leurs extraits. Les composés chimiques et microbiens impliqués doivent encore être mieux caractérisés.
- D'un point de vue scientifique, des études de la phyllosphère avant et après son traitement avec les extraits de composts devraient être entreprises afin d'une part d'améliorer notre compréhension des interactions entre la population microbienne utile, les agents pathogènes et les surfaces foliaires, et d'autre part estimer les risques hygiéniques éventuels dus au traitement des parties végétales avec des mélanges d'organismes non déterminés.
- Une étude comparative de l'influence du mode de production des extraits de composts (par exemple avec ou sans aération) sur leur efficacité contre les pathogènes foliaires est nécessaire, pratiquement aucune étude comparative précise relative à ce sujet n'existe à notre connaissance.
- Des essais dans les conditions pratiques, particulièrement en ce qui concerne l'effet des extraits de composts sur les pathogènes foliaires, sont indispensables afin de mieux juger le potentiel de telles méthodes et de caractériser les risques éventuels pouvant découler de cette technique.

- Des approches analytiques sur la concentration et la composition chimique de matières humiques de composts se montrent également nécessaires afin de mieux évaluer leurs effets nutritionnels et phytosanitaires.
- Un facteur important qui n'a pas été évalué mais qui pourrait jouer un rôle dans l'efficacité de l'utilisation des composts est la combinaison de l'application de compost dans le sol et des extraits de composts sur les feuilles. Cette technique pourrait apporter des avantages en stimulant au mieux la résistance des plantes aux maladies et autres stress.

Les travaux réalisés dans le domaine de l'influence des composts ainsi que leurs extraits sur la santé des plantes montrent bien que cette voie peut être intéressante non seulement pour le domaine de la recherche, mais également pour le producteur de plants. Des applications pratiques de ces techniques existent et les succès enregistrés sont encourageants. Une connaissance plus approfondie des facteurs mis en jeu doit cependant permettre d'optimiser le système en améliorant et surtout en stabilisant les performances de ces produits.

7. Références bibliographiques

- Abbott, W.S. 1925. A method for computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Econ Entomology*, 18, 265-267
- Achimu, P., and E. Schlosser. 1991. Control of *Plasmopara viticola* with compost filtrates. *Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen, Rijksuniversiteit Gent* 56:171-178.
- Aichberger, K., and J. Wimmer. 1999. Auswirkung einer mehrjährigen Kompostdüngung auf Bodenkenndaten und Pflanzenertrag. *Runder Tisch Kompost: Stickstoff in Bioabfall- und Grünschnittkompost-Bewerbung von Bindungsdynamik und Düngewert*, Wien.
- Al Dahmani, J., H., A. Abbasi Pervaiz, A. Miller Sally, and A.J. Hoitink Harry. 2003. Suppression of bacterial spot of tomato with foliar sprays of compost extracts under greenhouse and field conditions. *Plant Disease* 2003 ; 87 :913-919
- Al Dahmani, J.H., P.A. Abbasi, S.A. Miller, and H.A.J. Hoitink. 1999. Efficacy of compost water extracts for control of bacterial spot of tomato. *Phytopathology* 1999; 89 (6 SUPPL.):S2.
- Albiach, R., R. Canet, F. Pomares, and F. Ingelmo. 2001. Organic matter components, aggregate stability and biological activity in a horticultural soil fertilized with different rates of two sewage sludges during ten years. *Bioresource Technology* 77:109-114.
- Andrews, J.H. 1993. Compost extracts and the biological control of foliar plant disease. Grant Report. Project LNC 91-31 Madison, Wisconsin.
- Asche, E. 1997. Einfluss Von bioabfallkomposten unterschiedlicher Reifegrade auf die Bodenfruchtbarkeit unter besonderer Berücksichtigung de N-Dynamik, *Agrarwissenschaften*. Giessen : Wissenschaftlicher Fachverlag.
- Asche, E., D. Steffens, and K. Mengel. 1994. Fertilizer action and soil structure effects of the application of biorefuse compost on agricultural crop areas. *Düngewirkung und Bodenstruktureffekte durch den Einsatz von Bioabfallkompost auf landwirtschaftlichen Kulturflächen*. Kongressband 106:321-324.
- Asmus, F. 1992. Einfluss organischer Dünger auf Ertrag, Humusgehalt des Bodens und Humusproduktion. Vol. Band 4, *Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft* 206.

- Avnimelech, Y., A. Cohen, and D. Shkedy. 1993. Can we expect a consistent efficiency of municipal waste compost application? *Compost Science and Utilization* 1:7-14.
- Avnimelech, Y., D. Shkedy, M. Kochva, and Y. Yotal. 1994. The use of compost for the reclamation of saline and alkaline soils. *Compost Science and Utilization* 2:6-11.
- Ayuso, M., T. Hernandez, and C. Garcia. 1996. Effect of humic fractions from urban wastes and other more evolved organic materials on seed germination. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 72:461-468.
- Ayuso, M., J.L. Moreno, T. Hernandez, and C. Garcia. 1997. Characterisation and evaluation of humic acids extracted from urban waste as liquid fertilisers. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 75:481-488.
- Baier, U., J. Fuchs, U. Galli, and K. Schleiss. 2004. Rapport 2004 sur les inspections des installations de compostage et de méthanisation en Suisse. Avec une présentation séparée des résultats pour les cantons d'Argovie, de Soleure et de Zurich. Association Suisse des Installations de Compostage et de Méthanisation(ASIC).CH-3322 Schönbühl, pp 32
- Baker, C.J., J.R. Stavely, and N. Mock. 1985. Biocontrol of bean rust by *Bacillus subtilis* under field conditions. *Plant Disease* 69:770-772.
- Bazzoffi, P., S. Pellegrini, A. Rocchini, M. Morandi, and O. Grasselli. 1998. The effect of urban refuse compost and different tractors tyres on soil physical properties, soil erosion and maize yield. *Soil and Tillage Research* 48:275-286.
- Becker, J., and H.C. Weltzien. 1993. Control of common bunt of wheat (*Tilletia caries* (D.C.) Tul & C. Tul.) with organic nutrients. OT: Bekämpfung des Weizensteinbrandes (*Tilletia caries* (D.C.) Tul. & C. Tul.) mit organischen Nährstoffen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 100:49-57.
- Ben, Y.Y., and E.B. Nelson. 1999. Differential suppression of damping-off caused by *Pythium aphanidermatum*, *P. irregulare*, and *P. myriotylum* in composts at different temperatures. *Plant Disease* 83:356-360.
- Bernal, M.P., C. Paredes, M.M.A. Sanchez, and J. Cegarra. 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology* 63:91-99.

- Berner, A., and M. Bieri. 1991. Bericht über den heutigen Stand zur Beurteilung der Qualität von Komposten (Literaturstudie), Arbeitsgruppe Kompostqualität, KEZO, AGW et BuWal, pp 75.
- Berner, A., I. Wullschlegler, T. Alfoldi, M.d. Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, and T. Papi. 1996. Estimation of N-release and N-mineralization of garden waste composts by the mean of easily analysed parameters. In: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi (eds.), *The Science of Composting: part 2*, pp 1078-1082. UK: Blackie Academic & Professional an imprint of Chapman & Hall.
- Bieri, M., R. Kaufmann, W. Heller, and A. Berner. 1998. Determination of the quality of pig manure compost. OT: Qualitätsbestimmungen von Schweinemist-Kompost. *Agrarforschung* 5:33-36.
- Blakeman, J.P., and N.J. Fokkema. 1982. *Annales Revue Phytopathology* 20:67-92.
- Block, D. 1997. Disease suppression on the links. *BioCycle* 38:62-65.
- Boehm, M.J., and H.A.J. Hoitink. 1992. Sustenance of microbial activity in potting mixes and its impact on severity of *Pythium* root rot of poinsettia. *Phytopathology* 82:259-264.
- Boehm, M.J., L.V. Madden, and H.A.J. Hoitink. 1993. Effect of organic matter decomposition level on bacterial species diversity and composition in relationship to *Pythium* damping-off severity. *Applied and environmental microbiology* 59: 4147-4179.
- Bosshard, E., and A. Häseli. 1993. Schlussbericht Zum Projekt: Förderung von methoden des biologischen Apfelanbaus 1985-1993. Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, wein- und Gartenbau, Wädenswil, pp. 162.
- Brinton, W.F., A. Trankner, and M. Droffner. 1996. Investigations into liquid compost extracts. *BioCycle* 37:68-70.
- Bruckert, S. 1979. Analyse des complexes organo-minéraux des sols, In : M. Bonneau and B. Souchier (eds.), *Pédologie 2. Constituants propriétés des sols*, Massons, Paris.
- Brunner, K.S., and E. Seemuller. 1993. Infection studies with *Phytophthora* species in raspberry and investigations on the effect of composts and preceding crops on infection by *P. fragariae* var. *rubi*. OT: Infektionsversuche mit *Phytophthora*-Arten an Himbeere und Untersuchungen zum Einfluss von Komposten und Vorfrüchten auf den Befall durch *P. fragariae* var. *rubi*. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 45:1-6.

- Bruns, C., S. Ahlers, A. Gattinger, C. Schuler, H. Vogtmann, G. Wolf, M.d. Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, and T. Papi. 1996. The suppressive effects of composted separately collected organic waste and yard waste compost on two important soilborne plant pathogens. In: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi (eds.), The science of composting: part 2, pp 1094-1095. UK: Blackie Academic & Professional an imprint of Chapman &Hall.
- Budde, K., and H.C. Weltzien. 1988. Phytosanitary effects of compost extracts and substrates in the host-pathogen system barley-powdery mildew (*Erysiphe graminis* DC f.sp. *hordei* Marchal). Phytosanitäre Wirkungen von Kompostextrakten und -substraten im Wirt-Erreger-System Gerste-Echter Mehltau (*Erysiphe graminis* DC f.sp. *hordei* Marchal). Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen, Rijksuniversiteit Gent 53:363-371.
- Butler, T.A., L.J. Sikora, P.M. Steinhilber, and L.W. Douglass. 2001. Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost. Journal of Environmental Quality 30:2141-2148.
- Ceuster, T.J.J.d., H.A.J. Hoitink and Ceuster T.J.J. de. 1999. Prospects for composts and biocontrol agents as substitutes for methyl bromide in biological control of plant diseases. Compost Science and Utilization 7:6-15.
- Chanyasak, V., M. Hirai, and H. Kubota. 1982. Changes of chemical components and nitrogen transformation in water extracts during composting of garbage. Journal of Fermentation and Technology 60:439-446.
- Chanyasak, V., A. Katayama, M. Hirai, S. Mori, and H. Kubota. 1983. Effects of compost maturity on growth of Komatsuna (*Brassica rapa* var. *pervidis*) in Neubauer's pot. II Growth inhibitory factors and assesement of degree of maturity by Org.-C/Org.-N ratio of water extract. Soil Science Plant Nutriment 29:251-259.
- Chausson, P. 1999. Utilisation des composts en agriculture : Synthèse des essais- vitrines 1989-1998. Compost-Diffusion, SESA, et Sol-Conseil, pp 27.
- Chef, D.G., H.A.J. Hoitink, and L.V. Madden. 1983. Effects of organic components in container media on suppression of fusarium wilt of chrysanthemum and flax. Phytopathology 73:279-281.

- Chefetz, B., P.G. Hatcher, Y. Hadar, and Y. Chen. 1996. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 25:776-785.
- Chen, W., H.A.J. Hoitink, and A.F. Schmitthenner. 1987. Factors affecting suppression of *Pythium* damping-off in container media amended with composts. *Phytopathology* 77:755-760.
- Chen, W., H.A.J. Hoitink, and A.F. Schmitthenner. 1988b. Microbial activity and biomass in container media predicting suppressiveness to damping-off caused by *Pythium ultimum*. *Phytopathology* 78 :314-322
- Chen, W., H.A.J. Hoitink, A.F. Schmitthenner, and O.H. Tuovinen. 1988a. The role of microbial activity in suppression of damping-off caused by *Pythium ultimum*. *Phytopathology* 78:314-322.
- Chen, Y., and T. Aviad. 1990. Effects of humic substances on plant growth. In: P. MacCarthy, C.E. Clapp, R.L. Malcolm and P.R. Bloom (eds.), *Humic Substances in Soil and Crop Sciences*, pp 161-186. American Soil Science Society, Madison, Wisconsin.
- Chen, Y., and Y. Inbar. 1993. Chemical and spectroscopical analyses of organic matter transformations during composting in relation to compost maturity. In: H.A.J. Hoitink and H.M. Keener, (eds.), *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*, pp 551-600. Renaissance Publications, Worthington, Ohio.
- Chen, Y., H. Magen, J. Riov. 1994. Humic substances originating from rapidly decomposing organic matter: properties and effects on plant growth. In: N. Senesi and T.M. Miano (eds.), *Humic substances in the global environment and implications on human health*, pp 427-445. Elsevier Science, Amsterdam.
- Chen, Y., B. Chefetz, Y. Hadar, Y. Chen, M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, and T. Papi. 1996. Formation and properties of humic substance originating from composts. In: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi (eds.), *The science of composting: part 2*, pp 382-393. UK: Blackie Academic & Professional an imprint of Chapman & Hall.

- Chung, Y.R., and H.A.J. Hoitink. 1990. Interactions between thermophilic fungi and *Trichoderma hamatum* in suppression of *Rhizoctonia* damping-off in a bark compost-amended container medium. *Phytopathology* 80:73-77.
- Chung, Y.R., H.A.H. Hoitink, and P.E. Lipps. 1988b. Interactions between organic-matter decomposition level and soilborne disease severity. *Agriculture Ecosystems and Environment* 24 :183-194
- Chung, Y.R., H.A.J. Hoitink, W.A. Dick, and L.J. Herr. 1988a. Effects of organic matter decomposition level and cellulose amendment on the inoculum potential of *Rhizoctonia solani* in hardwood bark media. *Phytopathology* 78:836-840.
- Cohen, R., B. Chefetz, and Y. Hadar. 1998. Suppression of soil-borne pathogens by composted municipal solid waste. In: S. Brown, J.S. Angle, L. Jacobs (eds.). *Beneficial co-utilization of agricultural, municipal and industrial by-products*, pp 113-130. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Cotxarrera, L., G.M.I. Trillas, C. Steinberg, and C. Alabouvette. 2002. Use of sewage sludge compost and *Trichoderma asperellum* isolates to suppress Fusarium wilt of tomato. *Soil Biology and Biochemistry* 34:467-476.
- Craft, C.M., and E.B. Nelson. 1996. Microbial properties of composts that suppress damping-off and root rot of creeping bentgrass caused by *Pythium graminicola*. *Applied and Environmental Microbiology* 62:1550-1557.
- Cronin, M.J., D.S. Yohalem, R.F. Harris, and J.H. Andrews. 1996. Putative mechanism and dynamics of inhibition of the apple scab pathogen *Venturia inaequalis* by compost extracts. *Soil Biology and Biochemistry* 28:1241-1249.
- Delschen, T. 1999. Impacts of Long-term application of organic fertilizers on soil quality parameters in reclaimed loess soils of the Rhineland lignite mining area. *Plant and Soil* 213:43-54.
- Diab, H.G., S. Hu, and D.M. Benson. 2003. Suppression of *Rhizoctonia solani* on impatiens by enhanced microbial activity in composted swine waste-amended potting mixes. *Phytopathology* 93:1115-1123.

- Dick, W.A., and E.L. McCoy. 1993. Enhancing soil fertility by addition of compost. In: H.A.J. Hoitink and H.M. Keener, (eds.), Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects, pp 622-644. Renaissance Publications, Worthington, Ohio.
- Diez, T., and M. Krauss. 1997. Effect of long-term compost application on yield and soil fertility. Wirkung langjähriger Kompostdüngung auf Pflanzenertrag und Bodenfruchtbarkeit. *Agribiological Research* 50:78-84.
- Dissanayake, N., and J.W. Hoy. 1999. Organic material soil amendment effects on root rot and sugarcane growth and characterization of the materials. *Plant Disease* 83:1039-1046
- Dittmer, U. 1991. Untersuchung zu den Wirkung des Kompostierungsprozesses und zum Antipathogen Potential vom Komposten gegen *Sclerotinia trifolium* Erikss., *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary und *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron.) Deigh. Dissertation: University of Bonn, Germany.
- Dittmer, U., K. Budde, A. Stindt, and H.C. Weltzien. 1990. The influence of the composting process, compost substrates and watery compost extracts on different plant pathogens. Der Einfluss der Kompostierung von Kompostsubstraten und Wasserigen Kompostextrakten auf verschiedene Pflanzenkrankheitserreger. *Gesunde Pflanzen* 42:219-235.
- Ebertseder, T. 1997. Qualitätskriterien und Einsatzstrategien für Komposte aus Bioabfall auf landwirtschaftlich genutzten Flächen,. *Agrarwissenschaft*. Aachen: Shaker Verlag.
- Ebertseder, T., R. Gutser, and N. Claassen. 1994. A parameter for estimating the effect of bioefuse composts on plant growth. Parameter zur Abschätzung der Wirkung von Bioabfallkomposten auf das Pflanzenwachstum. *Kongressband* 106:325-328.
- Ebertseder, T., R. Gutser, N. Claassen, M. d. Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, and T. Papi. 1996. Parameters to estimate the nitrogen effect of biogenic waste composts. In: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi (eds.), *The science of composting: part 2*, pp 306-313. UK: Blackie Academic & Professional an imprint of Chapman & Hall.
- Elad, Y., and D. Shtienberg. 1994. Effect of compost water extracts on grey mould (*Botrytis cinerea*). *Crop Protection* 13:109-114.

- Epstein, E., J.M. Taylor, and R.L. Chaney. 1976. Effets of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. *Journal of Environmental Quality* 5:422-426.
- Erhart, E., K. Burian, W. Hartl, and K. Stich. 1999. Suppression of *Pythium ultimum* by biowaste composts in relation to compost microbial biomass, activity and content of phenolic compounds. *Journal of Phytopathology* 147:299-305.
- Evanylo, G.K., and C. Sherony. 2002. Agronomic and Environmental effects of compost use for sustainable Vegetable Production. Paper read at Composting and Compost utilization, at Columbus, Ohio, USA.
- Fierz, M., J.M. Gobat, C. Guenat. 1995. Quantification et caractérisation de la matière organique de sols alluviaux au cours de l'évolution de la végétation. Elsevier/INRA. *Ann Sci For* 52:547-559.
- Filippi, C., and G. Bagnoli. 1992. A relation between nitrogen deficiency and protective effect against tracheo-fusariosis (*Fusarium oxysporum* f.sp. *dianthi*) in carnation plants. *Zentralblatt fur Mikrobiologie* 147:345-350.
- Finstein, M.S., J. Cirello, D.J. Suler, M.L. Morris, and P.F. Strom. 1986. Monitoring and evaluating composting process performance. *Journal Water Pollution control. Fed.* 58:272-278.
- Flisch, R. 1996a. Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 1: Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngerberatung (Acker-, Futter, Wein- und Gartenbau) Eidg. Forschungsanstalten FAL, RAC, FAW.
- Flisch, R. 1996b. Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 2: Bodentuntersuchung zur Standort-Charakterisierung Eidg. Forschungsanstalten FAL, RAC, FAW.
- Fokkema, N.J. 1993. Opportunities and Problems of Control of Foliar Pathogens with Microorganisms. *Pesticide Science* 37:411-416.
- Forbes, G.A. 1997. Manual for laboratory work on *Phytophthora infestans*. Centro international de la Papa, CIP training manual, Quito, Ecuador.
- Forster, J.C., W. Zech, and E. Wurdinger. 1993. Comparison of chemical and microbiological methods for the characterization of the maturity of composts from contrasting sources. *Biology and Fertility of Soils* 16:93-99.

- Fuchs, J. 1995a. Quelle qualité de compost pour l'utilisateur? Forschungsbericht des 2. Oltner Kompost- und Gartenforum, 27.-30 September 1995. Herausgeber Büro composto, pp 97-103
- Fuchs, J. 1995b. Les effets positifs de la qualité des composts sur la santé des plantes. Agri 16 sptembre 1995, p 19
- Fuchs, J. 1995c. Effect of compost amendments on the receptivity of soils to diseases: first results. Influence d'amendements de composts sur la receptivité de sols aux maladies: premiers resultats. Revue Suisse de Viticulture, d'Arboriculture et d'Horticulture 27, p 219.
- Fuchs, J. 1996. Influence de la qualité biologique des composts sur les plantes et leur santé. Biophyt AG. CH-5465, Mellikon, pp 13.
- Fuchs, J., and M. Larbi. 2004. Disease control with quality compost in pot and field trails. Paper presented at International Conference on soil and Composts eco-biology. SoilACE, Biomase Peninsular, C/Cartagena, 58, 1, SP-Madrid 28028. León-Spain, 15-17. Sep. 2004:157-166
- Fuchs, J., U. Galli, and K. Schleiss. 2004a. Cours de base : Association Suisse des Installations de Compostage et de Methanisation (ASIC), CH-3322, Schönbühl.
- Fuchs, J., M. Bieri, and M. Chardonens. 2004b. Auswirkung von Komposten und von Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit, sowie die Pflanzengesundheit. Zusammenfassende Übersicht der aktuellen Literatur. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), CH-5070 Frick, pp 165
- Fuchs, J., U. Galli, K. Schleiss, and A. Wellinger. 2001. Directive de l'ASIC : Caractéristiques de qualité des composts et des digestats provenant du traitement des déchets organiques. Document élaboré par Association Suisse des installations de compostage (ASIC) en collaboration avec le Forum Biogaz Suisse. CH-3322, Schönbühl, pp 11.
- Fuchs, J.G. 2002. Practical use of quality compost for plant health and vitality improvement. In: S. Klammer (ed.), Microbiology of Composting, pp 435-444., Berlin Heiselberg: Springer-Verlag
- Fuchs, J.G., and M. Bieri. 2000. Neue Pflanzentests, um die Kompostqualität zu charakterisieren. Agrarforschung 7:314-319.

- Garcia, C., T. Hernandez, F. Costa, and M. Ayuso. 1992. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Communication in soil science and plant analysis* 23 : 1501-1512.
- Garrett, S.D. 1962. Decomposition of cellulose in soil by *Rhizoctonia solani* kuhn. *Trans. Brit. Mycology Society* 45:114-1120.
- Gent, M.P.N., W.H. Elmer, K.A. Stoner, F.J. Ferrandino, and J.A. LaMondia. 1998. Growth, yield and nutrition of potato in fumigated or non-fumigated soil amended with spent mushroom compost and straw mulch. *Compost Science and Utilization* 6:45-56.
- Gent, M.P.N., J.A. LaMondia, F.J. Ferrandino, W.H. Elmer, and K.A. Stoner. 1999. The influence of compost amendment or straw mulch on the reduction of gas exchange in potato by *Verticillium dahliae* and *Pratylenchus penetrans*. *Plant Disease* 83:371-376.
- Gerzabek, M.H., H. Kirchmann, and F. Pichlmayer. 1995. Reponse of Soil Aggregate Stability to manure amendements in the ultuna Long-term Soil Organic Matter Experiment. *Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde* 158:257-260.
- Gigliotti, G., D. Businelli, and P.L. Giusquiani. 1999. Composition changes of soil humus after massive application of urban waste compost: a comparison between FT-IR spectroscopy and humification parameters. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55:23-28.
- Gilley, J.E., and B. Eghball. 1998. Runoff and erosion following field application of beef cattle manure and compost. *Transactions of the ASAE* 41:1289-1294.
- Giusquiani, P.L., M. Pagliai, G. Gigliotti, D. Businelli, and A. Benetti. 1995. Urban waste compost: effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. *Journal of Environmental Quality* 24:175-182.
- Gobat, J.M., M. Aragno, and W. Matthey. 2003. *Le Sol vivant Bases de pédologie Biologie des sols*. Deuxième édition, Presse polytechniques et universitaires romandes. pp 568
- Goldbach, H.E., and H.W. Sherer. 2001. Verwertung von Sekundärrohstoff-Düngern in der Landwirtschaft, Möglichkeiten und offene Fragen. In *Vortrag 52. Hochschultagung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, Bonn*.
- Gottesman, A. 1989. Effects of compost amendment on protected vegetable production in container media. Dissertation. Faculty of Agriculture the Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem.

- Grebus, M.E., M.E. Watson, and H.A.J. Hoitink. 1994. Biological, chemical and physical properties of composted yard trimming as indicators of maturity and plant disease suppression. *Compost Science and Utilization* 2:57-71.
- Grebus, M.E., K.A. Feldman, C.A. Musselman, and H.A.J. Hoitink. 1993. Production of biocontrol agent-fortified compost-amended potting mixes for predictable disease suppression. *Phytopathology* 83(12) 1406.
- Gross-Spangenberg, A. 1992. Untersuchung zur Regulierung des Apfelschorfes *Venturia inaequalis* mit Kompost und Kompostextrakten. Dissertation. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Germany.
- Gur, A., J. Luzzati, J. Katan, R. Utkhede, and K. Veghelyi. 1996. Alternatives for soil fumigation in combating apple replant disease. Proceedings of the Fourth International Symposium on Replant Problems, Budapest, Hungary (477).
- Guster, R., and T. Ebertseder. 2002. Grundlagen zur Nährstoff und Sonderwirkung sowie zu optimalen Einsatzstrategien von Komposten im Freiland. In *Handbuch Kompost im Gartenbau*, edited by Z. G.e.V.:FGG Förderungsgesellschaft Gartenbau mbH, Bonn. pp 76
- Hadar, Y., and R. Mandelbaum. 1986. Suppression of *Pythium aphanidermatum* damping-off in container media containing composted liquorice roots. *Crop protection* 55:88-92.
- Hardy, G.E.S.J., and K. Sivasithamparam. 1991. Suppression of *Phytophthora* root rot by a composted Eucalyptus bark mix. *Australian Journal of Botany* 39:153-159.
- Harender, R., I.J. Kapoor, and H. Raj. 1997. Possible management of Fusarium wilt of tomato by soil amendments with composts. *Indian Phytopathology* 50:387-395.
- Hartl, W., and E. Erhart. 2002. langzeitdüngung mit Kompost - Ergebnisse aus der Praxis. Tagung Humus - das Qualitätskriterium für Kompost. Vorträge der 4. KGVÖ-ON-Fachtagung, Bundesamtsgebäude Wien.
- Hartmann, R. 2003. Studien zur standortgerechten Kompostanwendung auf drei pedologisch unterschiedlichen, landwirtschaftlich genutzten Flächen der Wildesauer Geest, Niedesachen. In: W. Taubmann (ed.), *Bremer Beitrag zur Geographie und Raumplanung* Vol. 39. Bremen, Universität Bremen, Institut für Geographie. Germany.
- Heller, W.E. 1999. Nitrogen mineralisation of composts in an incubation assay. OT: Stickstoff-Mineralisierung aus Komposten im Brutversuch. *Agrarforschung* 6:75-77.

- Hoitink, H.A.J., and P.C. Fahy. 1986. Basis for control of soilborne pathogens with compost. *Annual Review of Phytopathology* 24:93-114.
- Hoitink, H.A.J., and H.M. Keener. 1993. Science and engineering of composting: Design, environmental, microbiological and utilization aspects, pp 728. Renaissance Publications, Worthington, Ohio.
- Hoitink, H.A.J., and M.E. Grebus. 1994. Status of biological control of plant diseases with composts. *Compost Science and Utilization* 2:6-12.
- Hoitink, H.A.J., D.M.J. Van Doren, and A.F. Schmitthenner. 1977. Suppression of *Phytophthora cinnamomi* in hardwood bark compost. *Phytopathology* 67:561-565.
- Hoitink, H.A.J., Y. Inbar, and M.J. Boehm. 1991. Status of compost-amended potting mixes naturally suppressive to soilborne diseases of floricultural crops.
- Hoitink, H.A.J., M.J. Boehm, and Y. Hadar. 1993. Mechanisms of suppression of soilborne plant pathogens in compost-amended substrates. In: H.A.J. Hoitink, H.M. Keener (eds.), Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects, pp 601-621. Renaissance Publications, Worthington, Ohio.
- Hoitink, H.A.J., A.G. Stone, and D.Y. Han. 1997. Suppression of plant diseases by composts. *HortScience* 32:184-187.
- Horst, L.E., J. Locke, C.R. Krause, R.W. McMahon, and H.A.J. Hoitink. 2005. Suppression of Botrytis Blight of Begonia by *Trichoderma hamatum* 382 in Peat and Compost-Amended Potting Mixes. *Plant Disease* 89:1195-1200.
- Iannotti, D.A., M.E. Grebus, B.L. Toth, L.V. Madden, and H.A.J. Hoitink. 1994. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. *Environmental quality* 23 :1177-1183
- Inbar, Y. 1989. Formation of humic substances during composting of agriculture waste and chracterization of their physico-chemical proopies. Dissertation, The Faculty of Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem.
- Inbar, Y., M.J. Boehm, and H.A.J. Hoitink. 1991. Hydrolysis of fluorescein diacetate in sphagnum peat container media for predicting suppressiveness to damping-off caused by *Pythium ultimum*. *Soil Biology and Biochemistry* 23:479-483..

- Inbar, Y., Y. Hadar, and Y. Chen. 1993. Recycling of cattle manure: the composting process and characterization of maturity. *Journal of Environmental Quality* 22:857-863.
- Inbar, Y., Y. Chen, Y. Hadar, and H.A.J. Hoitink. 1990. New approaches to compost maturity. *BioCycle*:64-69.
- Ingham, E.R. 1999. Making a high quality compost tea. *BioCycle* 40:94.
- Jacas, J., J. Marza, P. Florensa, and M. Soliva. 1986. Cation Exchange capacity Variation During the composting of different materials. Paper read at compost: Production, Quality and use. CEC-congress, 17-19 April 1986, at Udine.
- Jedidi, N., O.v. Cleemput, H.A. M, and C.O. Van. 1995. Quantification of nitrogen mineralization and immobilization in soil in the presence of organic amendments. Quantification des processus de mineralisation et d'organisation de l'azote dans un sol en presence d'amendments organiques. *Canadian Journal of Soil Science* 75:85-91.
- Jimenez, E.I., and V.P. Garcia. 1992. Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 38:331-343.
- Joergensen, R., G., B. Meyer, A. Roden, and B. Wittke. 1996. Microbial activity and biomass in mixture treatments of soil and biogenic municipal refuse compost. *Biology & Fertility of Soils* 23:43-49.
- Jourdan, B. 1988. Zur Kennzeichnung des Rottegrades von Müller und Müllerklärschlammkomposten. 30 vols, *Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft*: Erich Schmittverlag, Bielefeld.
- Kahle, P., and L. Belau. 1998. Model experiments testing the effects of biowaste compost in agriculture. OT: Modellversuche zur Prufung der Verwertungsmöglichkeiten von Bioabfallkompost in der Landwirtschaft. *Agribiological Research* 51:193-200.
- Kempf, H.J., and G. Wolf. 1989. *Erwinia herbicola* as biocontrol agent of *Fusarium culmorum* and *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* on wheat. *Phytopathology* 79:990-994.
- Ketterer, N. 1990. Untersuchung zur Wirkung von Kompost-Extrakten auf den Blattbefall von Kartoffel und Tomate durch *Pythophthora infestans* sowie auf den Befall der Weinrebe durch *Plasmopara viticola*, *Psuedopeziza tracheiphila* und *Uncinula necator*. Dissertation. University of Bonn. Germany.

- Ketterer, N., and H.C. Weltzien. 1987. Studies on the effect of compost extract on the infection of grapevines by *Pseudopeziza tracheiphila*. Untersuchungen zur Wirkung von Kompostextrakt auf den Befall der Weinrebe durch den Roten Brenner (*Pseudopeziza tracheiphila*). Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen, Rijksuniversiteit Gent 52:965-970.
- Ketterer, N., and L. Schwager. 1992. Effect of compost extracts on the disease incidence and the phyllosphere flora of bush bean and tomato leaves. OT: Einfluss von Kompostextrakten auf den Krankheitsbefall und die Phyllosphärenflora bei Buschbohnen- und Tomatenblättern. Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen, Universiteit Gent 57:411-421.
- Ketterer, N., B. Fisher, H.C. Weltzien. 1992. Biological control of *Botrytis cinerea* on grapevine by compost extracts and their microorganisms in pure culture. In: K. Verhoeff, N.E. Malathrakis, and B. Williamson (eds.), Recent advances in *Botrytis* research. Proceedings of the 10th International *Botrytis* symposium, pp 179-186. April 5-10, Heraklion, Crete, Greece.
- King, E.O., M.K.M. Ward, and D.E. Raney. 1954. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescin. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine* 44:301-307.
- Krebs, E.K. 1990. Bark culture media and pathogenic fungi. Rinden-Kultursubstrate und Schadpilze. *Deutscher Gartenbau* 44:2874-2877.
- Kremer, P. 2001. Einfluss von Komposten und Stallmist auf Bodeneigenschaften und Wachstum von *Ligustrum vulgare* L. Dissertation, Fachbereich Gartenbau, Universität Hannover, Hannover. Germany.
- Krogmann, U. 1994. Kompostierung: Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung. Economica Verlag GmbH, Bonn, D:437.
- Kundler, P. 1986. Organic manures and Crop Residues as soil Organic-Matter Inputs. *Bodenkultur* 37:293-307.
- Kuter, G.A., H.A.J. Hoitink, and W. Chen. 1988. Effects of municipal sludge compost curing time on suppression of *Pythium* and *Rhizoctonia* diseases of ornamental plants. *Plant Disease* 72:751-756.

- Kuter, G.A., E.B. Nelson, H.A.J. Hoitink, and L.V. Madden. 1983. Fungal population in container media amended with composted hardwood bark suppressive and conducive to *Rhizoctonia solani* damping-off. *Phytopathology* 73:1450-1456.
- Kwok, O.C.H., P.C. Fahy, and H.A.J. Hoitink. 1987. Interactions between bacteria and *Trichoderma hamatum* in suppression of *Rhizoctonia* damping-off in bark compost media. *Phytopathology* 77:1206-1212.
- LaMondia, J.A., M.P.N. Gent, F.J. Ferrandino, W.H. Elmer, and K.A. Stoner. 1999. Effect of compost amendment or straw mulch on potato early dying disease. *Plant Disease* 83:361-366.
- Landes, E., F. Timmermann, W. Grosskopf, and W. Ziegler. 2002. Verbund-Forschungsprojekt Kompostverwertung in der Landwirtschaft-Zwischenbericht.
- Lasaridi, K.E., and E.I. Stentiford. 1998. A simple respirometric technique for assessing compost stability. *Water Research Oxford* 32:3717-3723.
- Lasaridi, K.E., E.I. Stentiford, and R.A.K. Szmidt. 1997. Biological parameters for compost stability assessment and process evaluation. Proceedings of the international symposium on composting and use of composted materials for horticulture, Auchincruive, Ayr, UK:119-128.
- Lazarovits, G. 2001. Management of soil-borne plant pathogens with organic soil amendment: a disease control strategy salvaged from the past. *Canadian Journal Plant Pathology* 23:1-7.
- Leifeld, J., S. Siebert, and I. Kögel-Knabner. 1998. Humuschemische Parameter von Böden nach mehrjähriger Kompostanwendung im Feldversuch. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* 39:64-68.
- Leifeld, J., S. Siebert, and I. Kogel-Knabner. 2002. Changes in the chemical composition of soil organic Matter after application of compost. *European Journal of Soil Science* 53:299-309.
- Lemaire, F., and R.U. Roeber. 1996. The problem of the biostability in organic substrates. Proceedings of the international symposium on growing media and plant nutrition in horticulture, Freising, Germany:63-69.
- Levanon, D., and D. Pluda. 2002. Chemical, Physical and Biological Criteria for Maturity in Composts for Organic Farming. *Compost Science and Utilization* 10:339-346.

- Levy, E., Z. Eyal, S. Carmely, Y. Kashman, and I. Chet. 1989. Suppression of *Septoria tritici* and *Puccinia recondita* of wheat by an antibiotic-producing fluorescent pseudomonad. *Plant Pathology* 38:564-570.
- Lichtfouse, E. 2003. Extraction des acides humiques et fulviques. Manuel des méthodes: Laboratoire d'Ecologie Végétale. Université de Neuchâtel.
- Logsdon, G. 1993. Composting chicken litter in indoor windrows. *BioCycle* 34:62-63.
- Lumsden, R.D., J.A. Lewis, and P.A. Millner. 1983. Effect of composted sewage sludge on several soilborne pathogens and diseases. *Phytopathology* 73:1543-1548.
- Mandelbaum, R., and Y. Hadar. 1990. Effects of available carbon source on microbial activity and suppression of *Pythium aphanidermatum* in compost and peat container media. *Phytopathology* 80:794-804.
- Mandelbaum, R., Y. Hadar, and Y. Chen. 1988. Composting of agricultural wastes for their use as a container media: effect of heat treatments on suppression of *Pythium aphanidermatum* and microbial activities in substrates containing compost. *Biological Wastes* 26:261-274.
- Mathur, S.P., G. Owen, H. Dinel, and M. Schnitzer. 1993a. Determination of compost biomaturity. 1. Literature review. *Biological Agriculture and Horticulture* 10:65-85.
- Mathur, S.P., H. Dinel, G. Owen, M. Schnitzer, and J. Dugan. 1993b. Determination of compost biomaturity. 2. Optical density of water extracts of composts as a reflection of their maturity. *Biological Agriculture and Horticulture* 10:87-108.
- McQuilken, M.P., J.M. Whipps, and J.M. Lynch. 1994. Effects of water extracts of a composted manure-straw mixture on the plant pathogen *Botrytis cinerea*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 10:20-26.
- Merril, R., and J. McKeon. 2001. Apparatus design and experimental protocol for organic compost teas. *Organic Farming Research Foundation Information Bulletin* 9:9-15.
- Morel, J.L., F. Colin, J.C. Germon, P. Godin, and C. Justes. 1985. Methodes for the evaluation of the maturity of municipal refuse Composting of Agricultural and Other Wastes. In: J.K.R: Gasser (ed.), *Composting of agricultural and other wastes*, pp 56-72. Elsevier Applied Science Publishers, London.

- Nakasaki, K., S. Hiraoka, and H. Nagata. 1998. A new operation for producing disease-suppressive compost from grass clippings. *Applied and Environmental Microbiology* 64:4015-4020.
- Nakasaki, K., H. Yaguchi, S. Yasushi, and K. Hiroshi. 1993. Effects of pH control on composting of garbage. *Waste Management and Research* 11:117-125.
- Nakasaki, K., M. Kubo, H. Kubota. 1996. Production of functional compost which can suppress phytopathogenic fungi of lawn grass by inoculating *Bacillus subtilis* into grass clippings. In: M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, and T. Papi (eds.), *The science of composting: Part 1*, pp 87-95. Blackie Academic & Professional an imprint of Chapman & Hall.
- Namkoong, W., E. Hwang, J. Cheong, J. Choi, W. Namkoong, E.Y. Hwang, J.G. Cheong, and J.Y. Choi. 1999. A comparative evaluation of maturity parameters for food waste composting. *Compost Science and Utilization* 7:55-62.
- N'Dayegamiye, A., and D. Isfan. 1991. Chemical and biological changes in compost of wood shavings, sawdust and peat moss. *Canadian Journal of Soil Science* 71:475-484.
- N'Dayegamiye, A., R. Royer, and P. Audesse. 1997. Nitrogen mineralization and availability in manure composts from Quebec biological farms. *Canadian Journal of Soil Science* 77:345-350.
- Nelson, E.B., and H.A.J. Hoitink. 1983. The role of microorganisms in the suppression of *Rhizoctonia solani* in container media amended with composted hardwood bark. *Phytopathology* 73:274-278.
- Nelson, E.B., and M.J. Boehm. 2002. Microbial mechanics of compost-induced disease suppression. *BioCycle* 43:45-47.
- Nelson, E.B., F.A. Kuter, and H.A.J. Hoitink. 1983. Effects of fungal antagonists and compost age on suppression of *Rhizoctonia* damping off in container media amended with composted hardwood bark. *Phytopathology* 73:1457-1462.
- Neuweiler, R., and W. Heller. 1998. Growing techniques and cultivar choice of summer raspberries. OT: Anbautechnik und Sortenwahl bei Sommerhimbeeren. *Obst und Weinbau* 134:97-99.

- Pare, T., H. Dinel, M. Schnitzer, and S. Dumontet. 1998. Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper. *Biology and Fertility of Soils* 26:173-178.
- Pera, A., and C. Filippi. 1987. Controlling of Fusarium wilt in carnation with bark compost. *Biological Wastes* 22:219-228.
- Pera, A., G. Vallini, I. Sireno, M.L. Bianchin, and M. de Bertoldi. 1983. Effect of organic matter on rhizosphere microorganisms and root development of sorghum plants in two different soils. *Plant and soil* 74:3-18.
- Petrovic, P., D. Vitorovic, and M. Jablanovic. 1982. Investigations of biological effects of humic acids. *Academic. biological. Medicine. Exp* 7:21-25.
- Perucci, P. 1990. Effect of the addition of municipal solid waste compost on microbial biomass and enzyme activities in soil. *Biology & Fertility of Soils* 10:221-226.
- Petersen, U., and H. Stöppler-Zimmer. 1999. Orientierende Felversuche zur Anwendung Von Biokomposten unterschiedlichen Rottegrades. Paper read at Runder Tisch Kompost : Stickstoff in Bioabfall- und Grünschnittkompost- Bewertung von Bindungsdynamik und Düngewert, Wien.
- Pettit, R.E. 2002. Organic Matter, Humus, Humate, Humic Acid, Fulvic Acid and Humin: Their Importance in Soil fertility and Plant Health [Online]. Available by Humate Research and Information. [http; //www.humate.info/mainpage.htm](http://www.humate.info/mainpage.htm) (verified October 1, 2002).
- Phae, C.G., M. Sasaki, M. Shoda, and H. Kubota. 1990. Characteristics of Bacillus subtilis isolated from composts suppressing phytopathogenic microorganism. *Soil Science and plant Nutrition* 36:575-586.
- Postma, J., M. Montanari, H.J.F. Paul, and V.D. Boogert. 2002. Establishment and disease suppressive activity of fungal antagonists introduced in different types of compost and potting soil. Paper read at Microbiology of composting, at Innsbruck.
- Richard, D., and R. Zimmerman. 1995. Respiration rate - reheating potential: a comparison of measures of compost stability. *Compost Science and Utilization* 3:74-79.
- Ringer, C.E., P.D. Millner, L.M. Teerlinck, and B.W. Lyman. 1997. Suppression of seedling damping-off disease in potting mix containing animal manure composts. *Compost Science and Utilization* 5:6-14.

- Rogger, C. 1996. Einfluss von Kompost und Kompostextracten auf Pflanzenkrankheiten. Travail de diplôme à l'Institut des Sciences végétales de l'EPFZ, groupe phytopathologie, EPFZ-Zürich, pp 49.
- Roy, S., P. Leclerc, F. Auger, G. Soucy, C. Moresoli, L. Cote, D. Potvin, C. Beaulieu, and R. Brzezinski. 1997. A novel two-phase composting process using shrimp shells as an amendment to partly composted biomass. *Compost Science and Utilization* 5:52-64.
- Ryckeboer, J., and J. Coosemans. 1996. The suppression of clubroot (*Plasmodiophora brassicae* Wor.) on cauliflower after the addition of biowaste compost to the potting soil. OT: De suppressie van *Plasmodiophora brassicae* Wor. bij bloemkool na bijmengen van humotex, GFT-of groencompost in het containersubstraat. Mededelingen Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Universiteit Gent 61:31-41.
- Sahin, H. 1989. The effects of the long-term application of refuse compost on soil organic matter content, earthworm activity, soil respiration, aggregate stability and pore size distribution. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 59:1125-1130.
- Samerski, C., and H.C. Weltzien. 1988. Investigations on the mode of action of compost extracts in the host-parasite system sugarbeet-powdery mildew. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 95:176-181.
- Saviozzi, A., M.R. Levi, and R. Riffaldi. 1988. Maturity evaluation of organic waste. *BioCycle* 29:54-56.
- Scheuerell, S., and W. Mahaffee. 2002. Compost tea: Principles and prospects for plant disease control. *Compost Science and Utilization* 10:313-338.
- Scheuerell, S.J., and W.F. Mahaffee. 2000. Assessing aerated and non aerated watery fermented compost and *Trichoderma harzianum* T-22 for control of powdery mildew (*Sphaerotheca pannosa* var *Rosae*) in the Willamette Valley, Oregon. *Phytopathology* 90:69..
- Schleiss, K., J. Fuchs, and U. Galli. 2002. Anforderung der VKS-Richtlinie 2001 versus Güterkriterien der Bundesgütegemeinschaft Kompost BGK. *Müll und Abfall* 11:618-626.

- Schnitzer, M., H. Dinel, S.P. Mathur, H.R. Schulten, and G. Owen. 1993. Determination of compost biomaturity. Evaluation of a colorimetric test by ¹³C-NMR spectroscopy and pyrolysis-field ionization mass spectrometry. *Biological Agriculture and Horticulture* 10:109-123.
- Seekins, B. 1996. Field test for compost maturity. *BioCycle* 37:72-75.
- Serra, W.C., S. Houot, and E. Barriuso. 1995. Soil enzymatic response to addition of municipal solid-waste compost. *Biology and Fertility of Soils* 20:226-236.
- Serra, W.C., S. Houot, and C. Alabouvette. 1996a. Increased soil suppressiveness to *Fusarium* wilt of flax after addition of municipal solid waste compost. *Soil Biology and Biochemistry* 28:1207-1214.
- Serra, W.C., S. Houot, and E. Barriuso. 1996b. Modification of soil water retention and biological properties by municipal solid waste compost. *Compost Science and Utilization* 4:44-52.
- Sheffer, F., and P. Schachtschabel. 1989. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 12 ed. Stuttgart: Enke Verlag.,
- Sinaj, S., O. Traore, and E. Frossard. 2002. Effect of compost and soil properties on the availability of compost phosphate for white clover (*Trifolium repens* L.). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62:89-102.
- Smith, J.L., and E.A. Paul. 1990. The signification of soil microbial biomass estimations. In: J.-M. Bollag, and G. Stotzky (eds.), *Soil biochemistry* Vol. 6, pp 357-396. Marcel Dekker, New York.
- Stamatiadis, S., M. Werner, and M. Buchanan. 1999. Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California). *Applied Soil Ecology* 12:217-225.
- Steffen, K.L., M.S. Dann, K. Fager, S.J. Fleischer, and J.K. Harper. 1994. Short-term and long-term impact of an initial large scale SMS soil amendment on vegetable crop productivity and resource use efficiency. *Compost Science and Utilization* 2:75-83.
- Stindt, A. 1990. Untersuchung zur Wirkung und zu den Wirkungsmechanismen von Kompostextrakten auf *Botrytis cinerea* Pers. ex Nocca and Balb an Erdbeeren, Kopfsalat und Buschbohnen. Dissertation. Universität Bonn, Bonn. Germany, pp 120.

- Straub, M., and J. Kienzle. 1991. Versuch zur Schorfregulierung mit alternativen Pflanzenbehandlungsmitteln. Internationaler Erfahrungsaustausch über Forschungsergebnisse zum Ökologischen Obstbau. staatliche Lehr-und Versuchsanstalt für Wein und Obstbau Weinsberg, pp 40-44.
- Theodore, M., and J.A. Toribio. 1995. Suppression of *Pythium aphanidermatum* in composts prepared from sugarcane factory residues. *Plant and Soil* 177:219-223.
- Tilston, E.L., D. Pitt, and A.C. Groenhof. 2002. Composted recycled organic matter suppresses soil-borne diseases of field crops. *New Phytologist* 154:731-740.
- Timmermann, F., R. Kluge, K. Stahr, and G. Zauner. 1999. Erarbeitung von Grundlagen für Anwendungsrichtlinien zur Verwertung geeigneter Rest- und Abfallstoffe im landwirtschaftlichen Pflanzenbau (Ackerbau). PWAB-Forschungsvorhaben PW 95 171 des Bundeslandes Baden-Württemberg, Abschlussbericht 1999, 276 Seiten, 54 Abbildung, 70 Tabellen und Anhang.
- Tränkner, A. 1992. Use of agriculture and municipal organic waste to develop suppressiveness to plant pathogens. In : E.C Tjamos, G.C. Papavizas, R.J Cook.(eds.), *Biological control of plant diseases*, pp 35-42. Plenum Press. New York.
- Traore, O., S. Sinaj, E. Frossard, J.M.v.d. Kerkhove, and d.K.J.M. van. 1999. Effect of composting time on phosphate exchangeability. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55:123-131.
- Trillas-Gay, M.I., H.A.J. Hoitink, and L.V. Madden. 1986. Nature of suppression of Fusarium wilt of radish in a container medium amended with composted hardwood bark. *Plant disease* 70:1023-1027.
- Tsrer, L., and B.J. Bieche. 1998. Biological control of early blight in tomatoes. *Proceedings of the Sixth International ISHS Symposium on the Processing Tomato and the Workshop on Irrigation and Fertigation of Processing Tomato, Pamplona, Spain*:271-273.
- Tuiter, G., G.J. Bollen. 1996. The effect of composted vegetable, fruit and garden waste on the incidence of soilborne plant diseases. In: M.de. Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, and T. Papi (eds.), *The Science of composting: part 2*, pp1365-1369. Blackie Academic & Professional an imprint of Chapman & Hall.

- Vaughan, D., and R.E. Malcolm., B.G. Ord, 1985. Influence of humic substances on growth and Physiological processes. In: D Vaughan, D., and R.E. Malcolm (eds.), Soil organic matter and biological activity, pp. 37-75. Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- Voland, R.P., and A.H. Epstein. 1994. Development of suppressiveness to diseases caused by *Rhizoctonia solani* in soils amended with composted and noncomposted manure. Plant Disease 78:461-466.
- Walter, M., C.M.A. Frampton, P.A.G. Elmer, R.A. Hill, and A.J. Popay. 1995. Pathogenicity and control using composts of *Aphanomyces euteiches* pea root rot. Proceedings of the Forty Eighth New Zealand Plant Protection Conference, Angus Inn, Hastings, New Zealand, August.
- Warman, P.R. 1999. Evaluation of seed germination and growth tests for assessing compost maturity. Compost Science and Utilization 7:33-37.
- Weltzien, H.C. 1990. The use of composted materials for leaf disease suppression in field crops. Monograph. Br. Crop Protection Council. 45:115-120.
- Weltzien, H.C. 1992. Biocontrol of foliar fungal diseases with compost extracts. In J.H. Andrews, S.S. Hirano (eds.), Microbial ecology of leaves, pp 430-450. Springer Verlag, New York.
- Weltzien, H.C., N. Ketterer, C. Samerski, K. Budde, and G. Medhin. 1987. Studies on the effects of compost extracts on plant health. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 39:25-28.
- Weppen, P. 2002. Determining compost Maturity: Evaluation of Analytical Properties. Compost Science and Utilization 10:6-15.
- Werner, W., H.W. Sherer, and H.W. Olf. 1988. Influence of Long-Term Application of Sewage-Sludge and compost from Garbage with sewage-Sludge on soil Fertility Criteria. Journal of Agronomy and Crop Science 160:173-179.
- Widmer, T.L., J.H. Graham, and D.J. Mitchell. 1998. Composted municipal waste reduces infection of citrus seedlings by *Phytophthora nicotianae*. Plant Disease 82:683-688.
- Williams, J., J.M. Clarkson, P.R. Mills, and R.M. Cooper. 2003. A selective medium for quantitative reisolation of *Trichoderma harzianum* from *Agaricus bisporus* compost. Applied and Environmental Microbiology 69:4190-4191.

- Winterscheidt, H., V. Minassian, and H.C. Weltzien. 1990. Studies on biological control of cucumber downy mildew - (*Pseudoperonospora cubensis* (Berk. et Curt.) Rost) - with compost extracts. OT: Untersuchungen zur biologischen Bekämpfung des Falschen Mehltaus der Gurke - (*Pseudoperonospora cubensis* (Berk. et Curt.) Rost) - mit Kompostextrakten. Gesunde Pflanzen 42:235-238.
- Wong, M.H. 1985. Phytotoxicity of refuse compost during the process of maturation. Environmental Pollution. Ser. A 37:159-174.
- Yohalem, D.S., R.F. Harris, and J.H. Andrews. 1994. Aqueous extracts of spent mushroom substrate for foliar disease control. Compost Science and Utilization 2:67-74.
- Yohalem, D.S., E.V. Nordheim, and J.H. Andrews. 1996. The effect of water extracts of spent mushroom compost on apple scab in the field. Phytopathology 86:914-922.
- You, M.P., and K. Sivasithamparam. 1994. Hydrolysis of fluorescein diacetate in an avocado plantation mulch suppressive to *Phytophthora cinnamoni* and its relationship with certain biotic and abiotic factors. Soil Biology and Biochemistry 26:1355-1361.
- Zhang, W., D.Y. Han, W.A. Dick, K.R. Davis, and H.A.J. Hoitink. 1998. Compost and compost water extract-induced systemic acquired resistance in cucumber and Arabidopsis. Phytopathology 88:450-455.
- Zhang, W., W.A. Dick, K.R. Davis, J.C. Tu, H.A.J. Hoitink, B. Duffy, U. Rosenberger, and G. Défago. 1997. Systemic acquired resistance induced by compost and compost water extract in Arabidopsis. Molecular approaches in biological control. Delémont, Switzerland 21:129-132.
- Zinati, G.M., Y.C. Li, and H.H. Bryan. 2001. Utilization of Compost Increase Organic Carbon And Its Humic, Humic and Fulvic Acid Fractions In Calcareous Soil. Compost Science and Utilization 9:156-1162.
- Zucconi, F., and M. de Bertoldi. 1987. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. In: M. de Bertoldi, M.M. Ferranti, P. L'Hermite and F. Zucconi (eds.), Compost: production, Quality and Use, pp 30-50. Elsevier Applied Science, London, UK.
- Zucconi, F., M. Forte, A. Monaco, and M. de Bertoldi. 1981. Biological evaluation of compost maturity. BioCycle 22:27-29.

Remerciements

Durant le déroulement de mon travail de thèse, j'ai eu l'opportunité de travailler dans différentes institutions, à l'Institut de Recherches pour l'Agriculture Biologique (FiBL, Frick), à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (ETHZ) et à l'Université de Neuchâtel. Ainsi, nombreuses personnes ont participé et contribué par différentes voies à la réalisation de ce travail.

Je tiens d'abord à remercier vivement Mme **Geneviève Défago** de m'avoir aidé à venir parfaire mes études en Suisse et pour la confiance qu'elle m'a témoigné en m'accueillant dans son laboratoire et pour son grand soutien et ses conseils qu'elle m'a accordé afin d'aboutir à ce travail; qu'elle trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

J'adresse ma gratitude et mes remerciements à M. **Jean-Michel Gobat**, d'avoir accepté d'être le directeur de ce travail. Je lui exprime ma reconnaissance pour la confiance qu'il m'a fait en me permettant de réaliser ce travail et pour son soutien, sa disponibilité et son encadrement efficace tout au long de mes recherches.

J'adresse également mon profond remerciement à mon co-directeur M. **Jacques Fuchs** pour avoir co-dirigé de près mes travaux. Malgré ses nombreuses occupations, il m'a consacré suffisamment de temps pour me transmettre une partie de son savoir de phytopathologiste et de ses compétences en compostage. J'aimerais également souligner son aide précieuse et critique lors de la rédaction du manuscrit, sans pour autant oublier sa bonne humeur et son humour habituel.

Je tiens à remercier vivement M. **Urs Niggli** (directeur de la FiBL) et M. **Lucius Tamm** (directeur du groupe de phytopathologie de FiBL) qui ont participé de leur part au bon déroulement de ce travail. Merci pour leur encouragement et leur soutien scientifique et moral; qu'ils trouvent ici le témoignage de profonde gratitude et ma haute considération.

J'adresse aussi mes remerciements à tous mes collaborateurs du groupe de phytopathologie de FiBL (**Barbara Thürig, Nicole Specht, Bernhard Speiser, Thomas Amsler, Hans-Jakob Schärer**), à tous le groupe d'Ecologie Végétale de l'Université de Neuchâtel (**Claire Le Bayon, Géraldine Weber, Lidia Mathys,..**) et à tout le groupe de Phytopathologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich. C'est en effet grâce à l'ambiance amicale et chaleureuse régnant dans ces groupes que les moments de doute ont été

surmontés ; les discussions, les conseils, les échanges et les aides à l'intérieur du groupe ont stimulé les ardeurs scientifiques et récréatives.

J'adresse mes remerciements particuliers à tous mes collègues du FiBL qui m'ont patiemment apporté leur aide et leur soutien moral tout au long de ce travail

Je tiens également à remercier vivement Mme **Véronique Chevillat**, M. **Mokhtar Mahouachi**, M. **Jean-Luc Tschabold**, qui ont bien voulu relire ce travail et pour leurs encouragements et leur soutien moral. J'ai bien apprécié leurs conseils et les commentaires qu'ils m'ont fourni.

Je remercie par ailleurs l'ensemble des membres du jury de m'avoir fait l'honneur de juger mon travail et d'assister à la soutenance de ma thèse : Prof. Dr. **Geneviève. Défago**, Dr. **Brigitte Mauch-Mani**, Prof. Dr. **Jean-Michel Gobat**, Prof. Dr. **Bouزيد. Nasraoui**, Dr. **Jacques. Fuchs**

Je tiens particulièrement à remercier M. **Bouزيد Nasraoui** d'avoir accepté de participer à ce jury et pour ses apports pertinents durant ma formation d'ingénieur.

En Outre, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et affectif de ma famille. J'exprime ainsi mes reconnaissances à ma mère pour sa patience et ses sacrifices durant tout mon cursus scolaire. Mes sincères remerciements à mon épouse **Najah** pour sa patience et son aide, ce travail n'aurait pas existé sans son esprit compréhensif.

Enfin, j'exprime mes remerciements à la Commission Fédérale des Bourses pour les Etudiants Etrangers (CFBE) qui m'avait fourni une bourse pour parfaire mes études en Suisse et la chance de faire ce travail. Je remercie également M. **Franz Ehrler**, Secrétaire général de CFBE ainsi qu'au service d'accueil à ETHZ: Mme **Elisabeth Schneiderlin**, Mme **Ritta Gilli**, et Mme **Séverine De Cerjat** à l'Université de Neuchâtel, et aux délégués de la CFBE à ETHZ : M. **Lorenz Hurni** et M. **Olivier Besson** à l'Université de Neuchâtel, pour leur aide précieuse, leur sympathie et leurs encouragements.

Mes remerciements vont également au **FiBL** qui a financé une grande partie de ce projet ainsi qu'à l'**Université de Neuchâtel**.

J'exprime mes remerciements à mes amis qui m'ont encouragé et aidé dans le temps qu'il faut : **Hafedh Nasr**, **Mokhtar Mahouachi**, **Ahmed Ennamsi**, **Lukas Kilcher** et sa famille, **Felix Hekendorn**, **Christian Schlatter**, **Filippa Machado**, **Conny Fuchs**, **Dominique Léвите**, **José Granado**, **Andreas Fliessbach**, **Maria Guarino**, **Nina Basler**, **Achmo Hajdarpasic**, **Bruno Nietlispach**, **Souad Nasr**, **Hamma Tijani**, **Ali Hannoudi**.

Une haute gratitude pour tous ceux qui m'ont aidé à dévoiler les horizons du savoir dès l'enfance.

Annexe 1

Milieux de culture et solutions nutritives

Milieux de culture et solutions nutritives

Certains microorganismes de composts ou d'extraits de composts pourraient jouer un rôle dans les mécanismes de suppression des maladies des plantes. Dans le but de quantifier ces microorganismes, ainsi que pour multiplier les agents pathogènes employés dans les biotests, des méthodes standard de microbiologie ont été utilisées. Les différents groupes de microorganismes bactéries et champignons en général, et actinomycètes et *Trichoderma* spp. en particulier ont été isolés sur des milieux sélectifs. Les microorganismes ciblés sont indiqués pour chaque milieu de culture.

Sauf indication contraire, tous les milieux et solutions ont été autoclavés pendant 20 minutes à 121°C.

- Milieu gélosé B de King (King *et al.*, 1954, pour *Pseudomonas* sp.)

Protéose peptone No.2 (Difco, Detroit, USA)	20,0	g
MgSO ₄ . 7H ₂ O	1,5	g
K ₂ HPO ₄ . 3H ₂ O	1,5	g
Glycérine (87 %)	8,4	ml
Agar bactériologique (Oxoid No 1)	17,0	g

- Milieu gélosé de levure (pour actinomycètes)

Extrait de levure (Oxoid, Basingstoke, UK)	0,25	g
K ₂ HPO ₄	0,4	g
Agar bactériologique (Oxoid No.1)	18,0	g
H ₂ O déminéralisée	1000	ml
Cyclohexamide (Sigma) *	0,05	g

* : le cyclohexamide a été ajouté après refroidissement du milieu de culture à environ 45 °C.

- Milieu gélosé mou à l'eau (pour test *in vitro* de *Plasmopara viticola*)

Agar bactériologique (Oxoid No 1)	8,5	g
H ₂ O déminéralisée	1000	ml

- Milieu malt gélosé (pour la multiplication de *Pythium* sp. et *Rhizoctonia* sp.)

Extrait de malt (Oxoid L39)	15,0	g
Agar bactériologique (Oxoid No 1)	17,0	g
H ₂ O déminéralisée	1000	ml

- Milieu sélectif de malt gélosé (pour champignons)

Extrait de malt (Oxoid b 39)	15,0	g
Bengal Rose	0,035	g
Agar bactériologique (Oxoid No 1)	17,0	g
H ₂ O déminéralisée	1000	ml
Solution de Forbes (Forbes, 1997, légèrement modifiée)	1,0	ml

La solution de Forbes a été ajoutée après refroidissement du milieu de culture à environ 45 °C. La composition de la solution de Forbes est comme suit:

Pentachloronitrobenzène (PCNB) (75 %WP)	335	mg
Rifampicine (Rifampicine)	100	mg
Polymycine B de sulfate	250	mg
Sel de sodium d'Ampicilline	500	mg
Nancomycine	250	mg
DMSO (diméthylsulfooxyde 100 %)	5	ml

- Milieu sélectif pour *Trichoderma harzianum* (THSM ; Williams et al. 2003)

MgSO ₄ . 7H ₂ O	0,2	g
K ₂ HPO ₄	0,9	g
NH ₄ NO ₃	1,0	g
KCl	0,15	g
Bengal Rose	0,15	g
Glucose	3,0	g
Agar bactériologique (Oxoid No 1)	20,0	g
Eau déminéralisée	950	ml
Solution antimicrobienne (voir ci-dessous)	50,2	ml

Autoclavage du milieu pendant 15 minutes à 121 °C.

La solution antimicrobienne a été ajoutée après refroidissement du milieu de culture à env. 45 °C. La solution antimicrobienne est composée de :

Solution mère de streptomycine (1% poids/vol)	9,0	ml
Chloramphénicol	0,25	g
Pentachloronitrobenzène (PCNB)	0,2	g
Propamocarb (772g de matière active par litre)	1,2	ml
Eau déminéralisée	40,0	ml

Annexe 2

Illustrations photographiques

Réalisation des tests de phytotoxicité des composts.



1a : Test du cresson fermé

1c: Tests de ray-grass d'Italie

1e : Test de la salade

1b : Test du cresson ouvert

1d : Test du haricot

Réalisation des tests de suppression des maladies telluriques par les composts



2a : Mise en place d'un essai de suppressivité basilic-*Rhizoctonia solani*

2b : Essai de suppressivité concombre-*Pythium ultimum*

2c : Essai de suppressivité basilic- *Rhizoctonia solani*

Réalisation des tests de protection des maladies foliaires avec les extraits de composts.



3a : Repiquage des plantules de pommier dans la tourbe

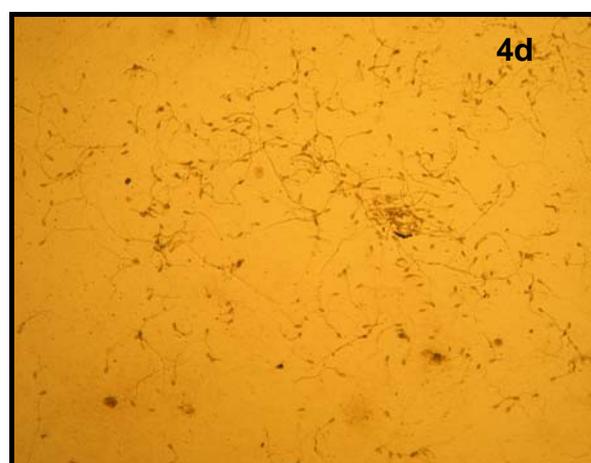
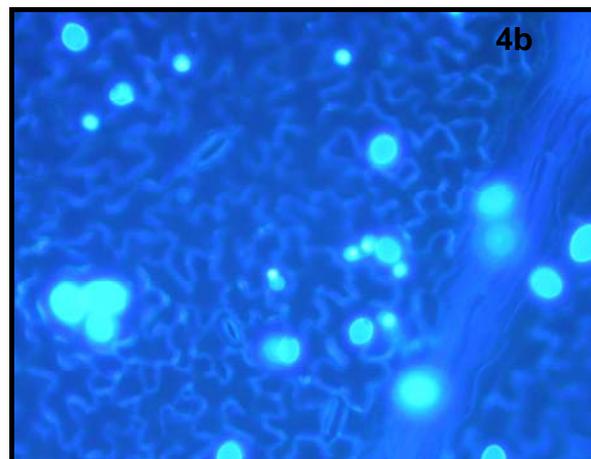
3b : Pulvérisation de l'extrait de compost sur les plantules de vigne

3c: Incubation des plantules de pommier dans la chambre de croissance

3d : Tests de protection des plantes vigne-*Plasmopara viticola*

3e : Tests de protection des plantes pommier-*Venturia inaequalis*

Réalisation des tests *in vitro*.



4a : Test *in vitro* : Rondelles de feuilles de vigne inoculées avec de *P. viticola*

4b : Test *in vitro* : Sporangies et zoospores de *P. viticola* sur des feuilles de vigne préalablement traitées avec l'extrait de compost

4c : Test *in vitro* : Incubation des conidies de *V. inaequalis* dans divers extrait de compost

4d : Test *in vitro* : Conidies de *V. inaequalis* après 36 h d'incubation dans l'extrait de compost