

43
07

> Compost et digestat en Suisse

*Étude n° 1 : Micropolluants organiques dans le compost et le digestat
Étude n° 2 : Influences des composts et des digestats sur l'environnement,
la fertilité des sols et la santé des plantes*



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Office fédéral de l'énergie OFEN

Office fédéral de l'agriculture OFAG



Baudirektion
Kanton Zürich

AWEL Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft

43
—
07

> Compost et digestat en Suisse

Étude n° 1 : Micropolluants organiques dans le compost et le digestat
*Étude n° 2 : Influences des composts et des digestats sur l'environnement,
la fertilité des sols et la santé des plantes*

Éditeurs

Office fédéral de l'environnement OFEV

Office fédéral de l'énergie OFEN

Office fédéral de l'agriculture OFAG

Direction des travaux publics du canton de Zurich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL

Berne, 2007

Impressum

Éditeurs

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Office fédéral de l'énergie (OFEN)

L'OFEV et l'OFEN sont des offices du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Office fédéral de l'agriculture (OFAG)

L'OFAG est un office du Département fédéral de l'économie (DFE).

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)

L'AWEL est un office de la Direction des travaux publics du canton de Zurich.

Auteurs

Étude n° 1 : Thomas Kupper¹, Rahel Brändli^{2,3}, Thomas Bucheli², Kristin Becker van Slooten³, Jochen Mayer², Hans-Jörg Bachmann², Mandy Pohl³, Fode Niang³, Carine Stämpfli³, Annette Aldrich², Otto Daniel², Walter Richner², Franz X. Stadelmann², Joseph Tarradellas³

Étude n° 2 : Jacques G. Fuchs⁴, Alfred Berner⁴, Lucius Tamm⁴, Jochen Mayer², Hans-Jörg Bachmann², Urs Baier⁵, Hans-Rudolf Zweifel⁵, Arthur Wellinger⁶, Konrad Schleiss⁷

¹ Haute école suisse d'agronomie (HESA), 3052 Zollikofen

² Station de recherche Agroscopie Reckenholz-Tänikon (ART), 8046 Zurich

³ École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 1015 Lausanne

⁴ Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL), 5070 Frick

⁵ Haute école de Wädenswil (HSW), 8820 Wädenswil

⁶ Nova Energie, 8355 Aadorf

⁷ Conseil en environnement et compostage, 2540 Grenchen

Conseillers OFEV

Marc Chardonnens, division Déchets et matières premières, jusqu'en juillet 2004 ; Rolf Kettler, division Déchets et matières premières, de juillet 2004 à décembre 2005 ; Kaarina Schenk, division Déchets et matières premières, depuis janvier 2006

Comité de pilotage

Marc Chardonnens (précédemment à l'OFEPF), David Dubois (ART), Bruno Guggisberg (OFEN), Markus Hardegger (OFAG), Rolf Kettler (OFEV), Andreas Röthlisberger (Association de la branche des biodéchets), Kaarina Schenk (OFEV), Albrecht Siegenthaler (précédemment à OFAG), Franz X. Stadelmann (précédemment à l'ART), Lucius Tamm (FiBL), J. Tarradellas (précédemment à l'EPFL), Rolf Wagner (AWEL)

Référence bibliographique

Kupper T., Fuchs J. 2007 : Compost et digestat en Suisse.

Étude n° 1 : Micropolluants organiques dans le compost et le digestat;

Étude n° 2 : Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes. Connaissance de l'environnement no 0743. Office fédéral de l'environnement, Berne. 124 p.

Graphisme, mise en page

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Photo couverture

Beat Ernst, Bildarchiv Nutzpflanzen, Bâle

Remerciements

Étude n° 1 :

Les éditeurs et les auteurs remercient tout spécialement la station de recherches Agroscopie Reckenholz-Tänikon (ART), le Laboratoire de chimie environnementale et écotoxicologique de l'EPF de Lausanne, l'EMPA à Dübendorf, le Service de protection de la consommation à Genève, l'Institut de chimie organique de l'Université de Bâle, le Norwegian Institute for Air Research (NILU) à Tromsø, le Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und angewandte Ökologie (IME) à Schmallenberg et l'EAWAG à Dübendorf. Nous exprimons aussi notre gratitude à l'UE (projet PERFORCE NEST-508967) pour son aide financière aux analyses des composés alkylés perfluorés. Sont également remerciés les exploitants d'installations impliqués dans l'étude. Nous souhaitons souligner la participation de Gerber Gemüsebau à Fehraltorf, BV Kompostieranlage Oensingen AG et WIEDAG AG à Oetwil am See à l'étude sur le terrain visant à appréhender le comportement des polluants pendant le compostage et la méthanisation. Que les partenaires du projet « Effets du compost et du digestat sur l'environnement, la fertilité du sol et la santé des plantes » et les nombreuses autres personnes et institutions qui nous ont soutenus soient aussi remerciés chaleureusement.

Étude n° 2 :

Les éditeurs et les auteurs remercient l'Association Suisse des Installations de Compostage et de Méthanisation (ASIC) pour leur soutien technique. De même, ils adressent un remerciement spécial à toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à cette étude, en particulier les installations de méthanisation et de compostage sur lesquels des échantillons ont pu être prélevés. Merci à l'installation de compostage Gerber à Fehraltorf (ZH) et à son maître-composteur Nedzadin Asani pour la réalisation technique des essais de post-traitement des digestats. Enfin, merci également à Daniel Böhler (Mellikon-AG), sur les champs desquels les essais à moyen terme ont pu être effectués.

Téléchargement du fichier PDF

www.environnement-suisse.ch/uw-0743-f

(il n'existe pas de version imprimée)

Référence : UW-0743-F

Cette publication existe aussi en allemand (UW-0743-D)

© OFEV 2007

> Table des matières

Abstracts	5
Avant-propos	7
Introduction	9

Étude n° 1	
Micropolluants organiques dans le compost et le digestat	11

Étude n° 2	
Influences de compost et de digestat sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes	47

> Abstracts

Composting (i.e. aerobic treatment) of biowaste or its anaerobic digestion with the production of biogas are important waste treatment processes which are gaining in significance in Switzerland. The present report offers a comprehensive review of the organic pollutants in compost, digestate and press water and of the benefits procured by the use of these three products. The report describes their effects on the environment, soil fertility and organisms, as well as on plant health. The results of these in-depth studies show that the quality of the large majority of Swiss composts and digestates is good to very good. The input materials mainly influence the chemical properties of the products, while process management mainly determines their biological properties. If compost and digestate are to be applied successfully, care must be taken to choose the right product for the desired application.

Keywords:

compost, digestate, organic pollutants, benefits

Kompostierung (aerobe Behandlung von organischen Abfällen) und Vergärung (anaerobe Behandlung kombiniert mit der Produktion von Biogas) sind wichtige Abfallbehandlungsverfahren, deren Bedeutung in der Schweiz zunimmt. Der vorliegende Synthesebericht gibt einen vertieften Überblick über die organischen Schadstoffe in Kompost, Gärgut und Presswasser, aber auch über den Nutzen dieser drei Produkte. Er beschreibt die Auswirkungen auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit, die Bodenorganismen sowie die Pflanzengesundheit. Die Resultate der umfassenden Untersuchungen zeigen, dass ein Grossteil von Kompost und Gärgut in der Schweiz eine gute bis sehr gute Qualität (Probenahme 2003) aufweist. Dabei beeinflussen die Ausgangsmaterialien vor allem die chemischen Eigenschaften der Produkte. Deren biologische Eigenschaften werden massgebend von der Rotteführung bestimmt. Für einen erfolgreichen Einsatz von Kompost und Gärgut ist das richtige Produkt für die richtige Anwendung auszuwählen.

Stichwörter:

Kompost, Gärgut, organische Schadstoffe, Nutzen

Le compostage (traitement aérobie des déchets biodégradables) et la méthanisation (traitement anaérobie, combiné à la production de biogaz) sont des procédés de traitement des déchets dont l'importance en Suisse continue de croître. Le présent rapport de synthèse propose une revue approfondie des micropolluants présents dans le compost, le digestat et l'eau de pressage et des bénéfices qu'apportent ces trois produits. Il décrit leurs effets sur l'environnement, sur la fertilité du sol, les organismes terrestres, ainsi que sur la santé des plantes. Les résultats de ces études exhaustives montrent que la grande majorité des composts et digestats de Suisse sont de qualité bonne à très bonne (échantillonnage 2003). Les matériaux de départ (intrants) influencent surtout les caractéristiques chimiques des produits, alors que la conduite de la dégradation en détermine surtout les caractéristiques biologiques. Une application réussie de compost et de digestat exige que l'on choisisse le produit adapté à l'utilisation prévue.

Mots-clés :

compost, digestat, micropolluants organiques, effets bénéfiques

Compostaggio (trattamento aerobico di rifiuti organici) e fermentazione (trattamento anaerobico associato alla produzione di biogas) sono procedure di trattamento dei rifiuti, che assumono un'importanza sempre maggiore in Svizzera. Il presente rapporto di sintesi offre una panoramica approfondita sia sul tenore di inquinanti organici nel compost, nel digestato e nelle acque di processo sia sull'utilità di questi tre prodotti. Ne descrive gli effetti sull'ambiente, sulla fertilità del suolo, sugli organismi del suolo come pure sullo stato di salute delle piante. I risultati delle indagini dettagliate mostrano che gran parte del compost e del digestato prodotti in Svizzera è considerata di una qualità da buona a molto buona (campionamento del 2003). I materiali di partenza influenzano soprattutto le proprietà chimiche dei prodotti. Le proprietà biologiche dei prodotti sono invece determinate soprattutto dai processi di decomposizione. Per consentire un impiego ottimale del compost e del digestato è necessario scegliere il prodotto giusto per l'utilizzazione giusta.

Parole chiave:

**compost, digestato,
inquinanti organici, utilità**

> Avant-propos

Le compostage et la méthanisation sont autant de procédés de traitement des déchets et des matières biodégradables qui revêtent une importance toujours plus grande en Suisse. En effet, aujourd'hui déjà, ils constituent des matières premières indigènes fort appréciées, notamment en raison du débat autour de l'énergie. C'est que la valorisation énergétique de la biomasse et en particulier des déchets biodégradables sont essentiels pour permettre à la Suisse d'atteindre ses objectifs en matière de politique énergétique et de protection du climat ; cette forme de valorisation permet également de réduire notre dépendance aux énergies non renouvelables et de rendre l'approvisionnement plus sûr. Les modifications apportées à la loi sur l'aménagement du territoire et les mesures d'encouragement introduites, telle la rétribution de l'injection de courant à prix coûtant, ont permis de créer des conditions propices pour ce type de traitement des déchets, et ce, aujourd'hui comme demain.

En Suisse, quelque 800'000 tonnes de déchets biodégradables par an sont traités dans des installations de compostage ou de méthanisation industrielles. Celles-ci produisent du compost et du digestat qui sont le plus souvent utilisés comme engrais dans l'agriculture, permettant de rendre des nutriments au sol et d'améliorer les propriétés de celui-ci. Ces engrais présentant une certaine teneur en polluants, on a souvent posé la question de leur impact pour les sols. Cette interrogation a incité les offices fédéraux de l'environnement, de l'énergie et de l'agriculture (OFEV, OFEN, OFAG) ainsi que l'office de l'environnement du canton de Zurich (AWEL) à mener deux études dans le but d'évaluer les risques et les avantages liés à la valorisation des déchets biodégradables en Suisse, sur la base de résultats éprouvés scientifiquement. La première étude visait à déterminer si le compost et le digestat contribuent à disséminer des polluants organiques dans l'environnement et quels impacts cette possible contamination présente pour les organismes présents dans le sol. Quant à la deuxième étude, elle analysait quels avantages ces produits présentent pour l'environnement, la fertilité des sols ainsi que la santé des plantes.

Les résultats de ces recherches montrent que la grande majorité des composts et des digestats présentent un niveau de qualité bon à excellent. Ils montrent encore qu'une utilisation réussie de ces engrais passe par un choix du produit adapté à l'application à laquelle il est destiné. Il s'agit donc à présent d'appliquer ces résultats positifs dans la pratique, et, par là, de faire en sorte que ces produits bénéficient d'une meilleure assise dans le marché. Ainsi, pour assurer à long terme leur écoulement dans les secteurs de l'agriculture et de l'horticulture ainsi qu'auprès des particuliers, il convient de garantir une teneur en polluants minimale et de faire connaître leurs propriétés d'améliorants du sol. Une assurance qualité conséquente ainsi qu'une stratégie de marketing avisée, voilà les clés pour mieux convaincre le public que le compost et le digestat constituent des produits de grande valeur.

Nous remercions ici vivement tous les membres du comité de pilotage, les instituts de recherche et les associations de la branche des biodéchets de leur soutien et de leur précieuse collaboration pour les deux études. Nos efforts communs en vue de mettre en place une gestion durable des sols – ressource limitée et non renouvelable – et de poursuivre une collaboration couronnée de succès sont des facteurs essentiels pour optimiser la valorisation des déchets organiques, qu'il s'agisse de valorisation matière ou énergétique.

Gérard Poffet
Sous-directeur
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Michael Kaufmann
Sous-directeur
Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Eduard Hofer
Sous-directeur
Office fédéral de l'agriculture (OFAG)

Jürg Suter
Directeur
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), canton de Zurich

> Introduction

En Suisse, ce sont quelque 800'000 tonnes de déchets organiques par an qui sont traités dans de grandes installations de compostage ou de méthanisation. Composantes essentielles de la gestion des déchets, le compostage et la méthanisation revêtent une grande importance aux plans écologique et économique. Cependant, suite à la crise de la maladie de la vache folle et à la polémique autour de l'épandage des boues d'épuration, les engrais issus de ces opérations, ont fait l'objet de nombreuses critiques. Ainsi, pour assurer des débouchés au compost et au digestat à long terme, il faut prouver que leur teneur en polluants est minime, et que leur utilisation améliore effectivement les propriétés des sols. C'est pourquoi, en 2003, les offices fédéraux de l'environnement (OFEV, alors encore appelé «OFEFP»), de l'agriculture (OFAG), de l'énergie (OFEN), ainsi que l'office de l'environnement du canton de Zurich (AWEL) se sont alliés aux associations de la branche des biodéchets en vue de mener deux études sur le compost et le digestat; celles-ci portaient en particulier sur la teneur en polluants de ces produits ainsi que sur les bénéfices qu'ils apportent.

L'étude n° 1, intitulée «Micropolluants organiques dans le compost et le digestat en Suisse», visait les deux objectifs suivants :

- > mesurer les teneurs en polluants organiques effectives du compost et du digestat;
- > déterminer les voies de contamination les plus importantes et élaborer des recommandations concernant l'assurance qualité et la gestion des risques.

L'étude n° 2, intitulée «Effets du compost et du digestat» poursuivait le but suivant: évaluer les effets de l'application du compost et du digestat sur l'environnement, la qualité des sols ainsi que la croissance et la santé des plantes.

Les acteurs de ces deux projets de recherche ont très bien coordonné leurs travaux, utilisant et analysant en grande partie les mêmes échantillons. Ils ont également régulièrement communiqué leurs résultats. Un comité de pilotage (cf. impressum) a accompagné les travaux de recherche! et a pris les décisions stratégiques importantes durant le projet.

Le présent rapport de synthèse donne un aperçu complet des deux études, en présentant les recherches, les méthodes, les résultats ainsi que les conclusions tirées. Les articles scientifiques connexes proposent de plus amples informations à ce sujet.

> Étude n° 1

Micropolluants organiques dans le compost et le digestat

Table des matières

Résumé	14		
1 Introduction	17		
2 Matériaux et méthodes	20		
2.1 Étude de monitoring	20		
2.1.1 Installations soumises aux essais	20		
2.1.2 Substances étudiées	21		
2.2 Comportement des micropolluants organiques pendant le compostage et la méthanisation	21		
2.3 Études écotoxicologiques	23		
2.3.1 Analyse de risque écotoxicologique basée sur la littérature	23		
2.3.2 Tests écotoxicologiques	23		
3 Résultats et discussion	24		
3.1 Étude de monitoring	24		
3.1.1 Pollution des composts, des digestats et des jus de pressage	24		
3.1.2 Source des micropolluants organiques	25		
3.1.3 Charges de substances dans le sol	26		
3.2 Comportement des micropolluants organiques pendant le compostage et la méthanisation	28		
3.3 Études écotoxicologiques	28		
3.3.1 Analyse de risque écotoxicologique basée sur la littérature	28		
3.3.2 Tests écotoxicologiques	28		
3.4 Suite des travaux	29		
4 Conclusions	30		
5 Recommandations	33		
5.1 Mesures à court terme	33		
5.1.1 Teneur en HAP du compost, du digestat et du jus de pressage	33		
5.1.2 Monitoring périodique de micropolluants organiques	34		
		5.1.3 Flux nets de substances vers les surfaces agricoles utiles	35
		5.1.4 Qualité des substrats utilisés pour la co-digestion et des produits finaux	36
		5.1.5 Comportement à long terme et effets des micropolluants organiques dans le sol	37
		5.2 Mesures, stratégies et perspectives à moyen terme	38
		5.2.1 Principes	38
		5.2.2 Mise en œuvre	39
		5.2.3 Collaboration future et plates-formes pour les parties intéressées	40
		Annexe	41
		A1 Corrélations	41
		Index	42
		Bibliographie	42
		Publications	44
		Rapports	45
		Présentations et posters	45

> Résumé

Introduction

Le compostage (traitement aérobie de déchets organiques) et la méthanisation (digestion anaérobie avec production de gaz) constituent des stratégies importantes pour la gestion des déchets, dont l'importance va croissant dans l'Union Européenne et en Suisse. La majeure partie du compost, du digestat et du jus de pressage est épandue sur des surfaces agricoles, ce qui permet de recycler les éléments nutritifs en améliorant les propriétés du sol. Cependant, ces produits peuvent contenir des substances risquant de porter atteinte au sol. La présence de métaux lourds ayant été détectée, des mesures ont été prises pour en réduire les teneurs. Mais les connaissances actuelles sur les micropolluants organiques sont insuffisantes pour qu'on puisse valoriser ces produits en respectant au mieux l'environnement.

Le présent rapport dresse un tableau détaillé de la présence de micropolluants organiques dans le compost, le digestat et le jus de pressage. Il expose les facteurs influençant les concentrations de ces substances et décrit leurs effets sur les organismes du sol. Ce travail a débuté par une compilation bibliographique exhaustive, ponctuée par une synthèse des données actuellement disponibles (module 1). Les classes de polluants destinées à être analysées ont été classées par ordre de priorité (module 1) et des méthodes analytiques ont été élaborées en conséquence (module 2). Une étude de monitoring a été conçue, réalisée et interprétée (modules 1, 3, 4, 6 et 9). Ces travaux ont été complétés par une étude en conditions réelles du comportement des micropolluants organiques pendant le compostage et la méthanisation (module 8) et par des études écotoxicologiques (module 5). Différents milieux concernés et intéressés ont été informés des résultats par l'intermédiaire de publications, posters et conférences.

Résultats

Des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des polychlorobiphényles (PCB), des dibenzo-*p*-dioxines et dibenzo-*p*-furanes polychlorés (PCDD/PCDF), des PCB de type dioxine (DL-PCB), des retardateurs de flamme bromés, des composés alkylés perfluorés (PFA), des produits phytosanitaires (PPS), des phtalates et des paraffines chlorées (PC) ont été trouvés, tandis que le nonylphénol (NP) n'a pas été détecté. Plusieurs substances (retardateurs de flamme bromés, PFA, certains PPS, PC) ont été décelées dans le compost pour la première fois. Nous ne disposons jusqu'ici d'aucune donnée concernant la présence de ces classes de substances dans le digestat et le jus de pressage. La teneur de la plupart des composés était de l'ordre du µg par kg de matière sèche (MS), ce qui est plus élevé que le bruit de fond mesuré dans les sols. Les teneurs les plus importantes ont été observées pour les HAP (600 à 12'470 µg/kg de MS), un quart des échantillons dépassant la valeur indicative applicable au compost selon l'ORRChim (4000 µg/kg MS). Les concentrations variaient largement pour la plupart des substances. Seules quelques-unes d'entre elles ont pu être corrélées. Les

Étude de monitoring

corrélations entre les micropolluants organiques et d'autres paramètres, tels les éléments nutritifs, les métaux lourds et les substances étrangères, étaient également rares. Le digestat tendait à présenter des teneurs en micropolluants organiques supérieures à celles du compost, à l'exception des PCB, des PCDD/PCDF et des PFA. Les concentrations étaient généralement plus élevées dans le jus de pressage que dans le digestat, sauf pour les PCB et certains retardateurs de flamme bromés.

Toutes les classes de substances, à l'exception des HAP et du HBCD, tendaient à présenter des teneurs supérieures dans les composts et les digestats d'origine urbaine. Des analyses de marqueurs moléculaires ont révélé que la source principale de HAP réside dans les processus de combustion. Il n'a pas été possible de déterminer les sources de polluants en détail et de manière définitive dans le cadre de cette étude.

Les HAP contenus dans les terres agricoles de Suisse proviennent principalement de la déposition atmosphériques (env. 1700 kg par an). La charge contenue dans le compost et le digestat (570 kg par an, soit 20% de la quantité totale) était notablement plus élevée que dans les engrais de ferme et les boues d'épuration. Les composts et les digestats ont occasionné de loin la plus grande charge par hectare dans le cadre d'un épandage normal. Le digestat a apporté des quantités de HAP nettement plus élevées que le compost, et le jus de pressage des quantités légèrement supérieures. Les teneurs des autres micropolluants organiques dus à l'épandage de compost et de digestat étaient relativement faibles ($\leq 6\%$ des charges totales).

Il est peu probable que des PCB se soient dégradés pendant le compostage. Les teneurs en HAP à faible poids moléculaire ont diminué. La plupart des PPS (60 à 90% des substances individuelles) ont été éliminés à raison de 50% ou plus.

L'analyse de risque écotoxicologique basée sur la littérature a bénéficié, pour trois substances étudiées (PCDD, HAP, PCB), de données en suffisance pour exclure tout risque inacceptable. On peut estimer malgré certaines lacunes dans les données que l'introduction d'atrazine ou de captane dans le sol ne devrait pas générer de risque important. Pour les douze autres substances, les résultats des analyses de compost et les données concernant leurs effets écotoxicologiques étaient insuffisants pour permettre une évaluation fiable des risques.

Plusieurs méthodes évaluées se sont avérées appropriées pour les investigations écotoxicologiques du compost et du digestat. Lors de l'étude de monitoring, la moitié des échantillons a eu un effet inhibiteur ou stimulant sur la reproduction de *Folsomia candida* (une espèce de collembole), mais il n'a pas été possible de corréler ces effets avec les teneurs en polluants.

Dans l'ensemble, les résultats des études écotoxicologiques ont indiqué que la dissémination de micropolluants organiques par épandage de compost ou de digestat ne présente aucun risque immédiat pour le sol. Mais les lacunes importantes affectant les connaissances sur les écosystèmes terrestres empêchent d'exclure tout effet néfaste.

Comportement des micropolluants organiques pendant le compostage et la méthanisation

Études écotoxicologiques

La confrontation de l'effet fertilisant et d'autres incidences positives avec les effets néfastes avérés et potentiels, en tenant compte des incertitudes dans l'interprétation des données, indique que l'abandon de la valorisation du compost et du digestat issus de déchets urbains collectés sélectivement n'est ni nécessaire ni proportionné. Il est toutefois recommandé d'optimiser ce mode de recyclage pour les raisons suivantes : (a) grande variabilité des teneurs en micropolluants organiques, (b) flux nets de substances issues de régions urbaines qui aboutissent sur des surfaces agricoles utiles, (c) cycles de matières incomplètement bouclés dans l'agriculture et (d) lacunes dans les connaissances sur l'impact des polluants. La nécessité d'optimisation ne découle donc pas de l'existence de risques immédiats avérés, mais des possibilités manifestes de réduire la contamination du compost et du digestat (a), de l'organisation perfectible du système de recyclage (b, c) et des risques potentiels, qui ne peuvent pas encore être évalués comme il convient (d). En outre, l'assurance de la qualité du compost et du digestat issus de collectes sélectives des déchets devrait intégrer des principes tels qu'une teneur en polluants aussi faible que possible, même si la législation en vigueur ne les réglemente pas expressément.

Il est recommandé de prendre des mesures à court et à moyen terme pour que la valorisation des déchets organiques collectés sélectivement soit aussi écologique et durable que possible :

- > diminution des teneurs en HAP dans le compost, le digestat et le jus de pressage (cf. valeur indicative selon l'ORRChim) ;
- > monitoring périodique de micropolluants organiques dans le compost, le digestat et le jus de pressage ;
- > étude
 - de la qualité des substrats destinés à la co-digestion et des produits qui en résultent,
 - des flux nets vers les surfaces agricoles,
 - du devenir et des effets à long terme de micropolluants organiques dans le sol.

Conclusions et recommandations

1 > Introduction

Le compostage de déchets organiques collectés sélectivement fait partie intégrante de la gestion des déchets en Suisse et en Europe depuis de nombreuses années, tandis que la méthanisation, combinée avec le compostage ou se substituant à lui, a gagné tout récemment en importance. Comme le traitement anaérobie des déchets organiques va continuer de croître en relation avec la demande d'énergies renouvelables, il faut s'attendre à une augmentation des produits finaux que sont le digestat et le jus de pressage. Quelque 32 millions de tonnes de déchets organiques sont transformées chaque année en compost et en digestat dans l'Europe des 25. La Suisse en est actuellement à 0,8 million de tonnes par an (Hügi & Kettler 2004). La production de compost et de digestat ainsi que leur utilisation répondent au principe de durabilité visant à boucler les cycles de matières. Parmi les propriétés agronomiques de ces produits, on citera avant tout leur effet fertilisant et leur capacité à améliorer les propriétés du sol.

Le compost et le digestat peuvent renfermer des polluants dont l'introduction dans le sol est indésirable, car elle n'est pas inoffensive. Les problèmes liés aux métaux lourds ont été identifiés et étudiés, puis des mesures ont été prises (Candinas et al. 1989 ; Plahl et al. 2002). Or le compost peut aussi contenir des micropolluants organiques, comme on l'a reconnu au cours des années 1990 (p. ex. Berset & Holzer 1995 ; Fricke et al. 1989, 1994). Les principaux vecteurs sont la déposition atmosphérique et les apports directs. Ces derniers sont dus à une séparation inappropriée ou peu soignée des déchets, à des erreurs de destination des déchets, à l'application de produits phytosanitaires et à la contamination de végétaux par le trafic routier (p. ex. apport de particules par voie sèche ou mouillée, sous la forme de poussières ou d'écume). Les données sur les polluants organiques contenus dans le compost issu de collectes sélectives sont disponibles en quantités restreintes (Brändli et al. 2005). Cela concerne même les substances visées par la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP). Nous ne possédons aucune donnée sur les digestats et les jus de pressage. Certains polluants organiques récemment apparus (nommés « emerging organic pollutants ») n'ont presque pas été étudiés jusqu'ici. On doit partir du principe qu'ils revêtent la même importance que les POP, car ils sont similaires par leurs propriétés, les quantités produites, la répartition ubiquitaire, la toxicité, la persistance et les effets endocriniens (Alcock et al. 1999 ; Giesy & Kannan 2002 ; Jones & Voogt 1999). Les connaissances relatives aux micropolluants organiques contenus dans le compost, le digestat et le jus de pressage sont insuffisantes pour assurer une valorisation de ces produits aussi écologique que possible, pour estimer les risques qu'ils présentent et pour les intégrer dans un système de gestion de la qualité. L'urgence d'améliorer les données s'est accrue du fait de l'interdiction d'utiliser les boues d'épuration dans l'agriculture suisse à partir de 2006, car cette exclusion a été largement motivée par la présence de polluants organiques (OFEFP 2003).

Les teneurs en polluants dans une matrice ne fournit pas à elle seule des indications décisives quant à ses effets dommageables. La forme sous laquelle ils se présentent joue un rôle crucial, car elle détermine leur disponibilité biologique. C'est pourquoi les analyses chimiques doivent être complétées par des études écotoxicologiques lorsqu'il s'agit d'évaluer l'impact d'un polluant sur l'environnement. Des tests écotoxicologiques sont notamment appliqués couramment dans le cadre de l'homologation des produits phytosanitaires (Fountain & Hopkin 2005 ; Becker van Slooten & Tarradellas 2000). Des organismes témoins (p. ex. lombrics, collemboles, daphnies) sont exposés aux substances à tester, généralement en laboratoire. Un procédé analogue a été étudié par Kapanen et Itavaara (2001) pour tester la valorisation du compost.

Les offices fédéraux de l'environnement et de l'énergie ont reconnu l'importance de cette problématique. C'est pourquoi le mandat confié à la communauté de travail composée du Laboratoire de chimie environnementale et écotoxicologique (CECO-TOX) de l'EPF de Lausanne et de la Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) pour réaliser le projet «Micropolluants organiques dans le compost et le digestat en Suisse» a été accepté en 2002. Une étude portant sur les effets utiles du compost et du digestat (Fuchs et al. 2004) a été menée parallèlement à ce projet. Les résultats des deux études devraient permettre d'évaluer exhaustivement ces produits et de mettre en regard leurs effets utiles et dommageables.

L'étude «Micropolluants organiques dans le compost et le digestat en Suisse» vise à améliorer les connaissances relatives à la présence de ces substances dans le compost et le digestat ainsi qu'à leur impact sur le sol, dans le but de valoriser les déchets organiques collectés sélectivement d'une manière écologique et durable. Les objectifs suivants ont été définis :

- a) Détermination des teneurs en micropolluants organiques dans le compost et le digestat en Suisse ainsi que des principaux paramètres influençant ces pollutions.
- b) Étude du comportement des micropolluants organiques pendant le compostage et la méthanisation.
- c) Étude de l'impact du compost et du digestat sur les organismes présents dans le sol.

Une compilation bibliographique portant sur les micropolluants organiques présents dans le compost et le digestat issus de déchets organiques collectés sélectivement (module 1) ainsi qu'une estimation écotoxicologique des risques basée sur les documents disponibles (module 5a) ont été effectuées dans une première étape. Ensuite, les polluants organiques contenus dans le compost, le digestat et le jus de pressage destinés à être analysés ont été classés par ordre de priorité (module 1), des méthodes analytiques pertinentes ont été développées (module 2), puis une étude de monitoring a été conçue, réalisée et interprétée (modules 1, 3, 4, 6 et 9). Ces travaux ont été complétés par une étude en conditions réelles du comportement de micropolluants organiques pendant le compostage et la méthanisation (module 8) et par des études écotoxicologiques (module 5b). Différents milieux concernés et intéressés ont été informés des résultats par l'intermédiaire de publications, posters et conférences. Une grande partie des travaux a été menée à bien dans le cadre d'une thèse (R. Brändli) et sous la forme

de travaux de master (M. Pohl, F. Niang). Les annexes 2 à 4 comprennent un aperçu des publications, rapports, actes de congrès et présentations sur le sujet.

Le présent rapport de synthèse comprend une brève description de la stratégie et des méthodes appliquées, puis il en résume les résultats (chapitre 3) et les conclusions (chapitre 4). Après avoir discuté des possibilités d'optimiser le système actuel de compostage et de méthanisation des déchets organiques collectés sélectivement, il esquisse des recommandations, des mesures, des stratégies et des perspectives (chapitre 5).

2 > Matériaux et méthodes

2.1 Étude de monitoring

2.1.1 Installations soumises aux essais

Des échantillons de compost, de digestat et de jus de pressage issus de déchets organiques collectés sélectivement ont été prélevés dans 32 installations de compostage et 7 installations de méthanisation de Suisse (Brändli et al. 2007a, b). Ces installations pratiquent le compostage en andains en plein air (andains triangulaires : 19 ; andains tabulaires : 3), la méthanisation thermophile (6), une combinaison de méthanisation et de compostage (5), le compostage en boîtes aérées (3), le compostage en halle (2), la méthanisation mésophile (1) et le vermicompostage (1). La stratégie des essais a intégré les paramètres influençant la pollution du compost et du digestat selon les hypothèses tirées de la compilation bibliographique (Brändli et al. 2005) :

- a) Traitement : aérobie ou anaérobie, il produit finalement du compost et du digestat / jus de pressage. Dans la plupart des cas, le digestat est encore soumis à un traitement aérobie.
- b) Matériaux de départ : les plus importants en termes de quantités sont les déchets verts (déchets organiques issus de jardins privés et de espaces verts publics) et les déchets de cuisine (déchets organiques non cuits produits dans les ménages privés ; Hügi & Kettler 2004). Les composts renfermant des déchets de cuisine sont toujours composés d'un mélange de déchets de cuisine et de déchets verts. Tous les produits de méthanisation contenaient des déchets de cuisine. Certains produits comprenaient d'autres déchets organiques provenant de l'industrie, de l'agriculture ou de l'entretien des routes. Les matériaux de départ ne devaient contenir ni papier ni carton.
- c) Région – urbaine ou rurale – dans laquelle les matériaux de départ ont été collectés.
- d) Saison – printemps/été, automne, hiver – durant laquelle les matériaux de départ ont été collectés.

L'influence de ces paramètres a été établie au moyen de tests statistiques non paramétriques. Ces tests n'exigent pas une distribution normale des données et ils sont insensibles aux valeurs aberrantes. Il n'a pas été possible de les appliquer intégralement à tous les groupes de substances. Parmi les petites séries de données ($n \leq 12$; tableau 1), presque tous les échantillons provenant de régions urbaines contenaient par exemple des déchets de cuisine. C'est pourquoi l'incidence des paramètres « matériaux de départ » et « région » sur la teneur en polluants n'a pas pu être établie de manière définitive dans ces cas.

2.1.2 Substances étudiées

Les groupes de substances analysées dans le cadre de l'étude de monitoring, leurs sources et applications principales, ainsi que le nombre d'échantillons analysés sont synthétisés dans le tableau 1. Les méthodes analytiques mises en œuvre sont décrites dans Brändli et al. (2006, 2007b). Des paramètres standards (matière sèche (MS), matière organique, pH, conductivité électrique, corps étrangers, éléments nutritifs et métaux lourds) ont également été déterminés dans ces échantillons.

2.2 Comportement des micropolluants organiques pendant le compostage et la méthanisation

Le comportement des HAP et des PCB pendant le compostage et la méthanisation a été étudié dans deux installations de compostage (en andains triangulaires) et dans une installation de méthanisation (thermophile) (Brändli et al. 2007c). Dans l'installation de méthanisation, l'on a d'abord échantillonné les matériaux de départ, soit les déchets organiques collectés sélectivement, le jus de pressage et le digestat utilisés pour liquéfier et pour inoculer le matériel. Le digestat et le jus de pressage finalement produits ont été échantillonnés ensuite, conformément au temps de séjour dans le digesteur (12 jours). Puis le digestat a encore été soumis à un traitement aérobic. Dans les installations de compostage, on a prélevé des échantillons dans les matériaux de départ et dans les matériaux compostés après 3, 7, 14, 28, 56 et 112 jours de fermentation aérobic. Au terme du post-traitement aérobic, le digestats a été composté, puis échantillonné comme le compost.

Tab. 1 > Groupes de substances étudiées dans le cadre de l'étude de monitoring avec leurs sources et applications principales ainsi que le nombre d'échantillons étudiés*Les abréviations utilisées dans le texte sont en caractères gras.*

	Sources et applications	n _(e) *	n ₁ *
Hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP : total des 15 HAP ¹ : naphtalène, acénaphthylène, acénaphtène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benzo[a]anthracène, chrysène, benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, benzo[a]pyrène, indéno[1,2,3-cd]pyrène, benzo[ghi]pérylène	Combustibles fossiles, incinération (chauffages, centrales thermiques, UIOM), feux en plein air, véhicules à moteur (gaz d'échappement, abrasion des pneus et du revêtement routier)	85	39
Polychlorobiphényles orthosubstitués, PCB : total des congénères 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180 ²	Huiles de transformateurs, fluides hydrauliques, lubrifiants, plastifiants ; interdits depuis les années 1970	85	39
Polychlorobiphényles de type dioxine, DL PCB : total des congénères 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189 ²		20	12
Dibenzo- <i>p</i> -dioxines et dibenzo- <i>p</i> -furanes polychlorés, PCDD/PCDF ^{2,3}	Processus d'incinération	20	12
Polybromodiphényléthers, PBDE , pentaBDE ⁴ , octaBDE ⁴ , décaBDE (congénères 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 209)	Retardateurs de flamme bromés (plastiques, textiles, composantes de véhicules, matériaux de construction, appareils électriques et électroniques)	20	12
Hexabromocyclododécane, HBCD		20	12
Tétrabromobisphénol A, TBBPA		20	12
Composés alkylés perfluorés, PFA : total des 6 : 2 sulfonates de télomères fluorés + carboxylates de télomères fluorés saturés/insaturés, 6 : 2 FTS/FT(U)CA ; total des sulfonates perfluorés, PFS ; total des carboxylates perfluorés, PFCA ; total des sulfonamides et des sulfonamidéthanol de fluoroctane, FOSA/FOSE ³	Traitement de surface de textiles, tapis, cuirs et papiers, mousses pour la lutte contre le feu, lubrifiants, insecticides	18	11
Produits phytosanitaires, PPS : total de 271 composés, 86 fongicides, 86 herbicides, 92 insecticides, 5 acaricides, 1 nématicide, 1 régulateur de croissance ³	Produits phytosanitaires pour l'agriculture et les espaces verts urbains, protection de matériaux	22	12
Paraffines chlorées, PC : total des composés à chaîne moléculaire courte (C ₁₀ -C ₁₃) et de longueur moyenne (C ₁₄ -C ₁₇) ⁴	Huiles de traitement des métaux, huiles lubrifiantes, enduits, matériaux d'étanchéité, retardateurs de flamme, plastifiants	3	3
Phtalates : phtalate de di-2-éthylhexyle, DEHP ; phtalate de dibutyle, DBP	Plastifiants	6	6
Nonylphénol, NP	Métabolites de polyéthoxylates de nonylphénol ⁵ , émulsifiants (p. ex. dans les PPS)	6	6

* n_(e) : nombre d'échantillons analysés, n₁ : nombre d'installations soumises à échantillonnage¹ Le total selon l'EPA comprend habituellement 16 HAP, dont le dibenzo[a,h]anthracène. En raison de problèmes rencontrés dans la quantification de ce composé, le total indiqué comprend 15 HAP (le dibenzo[a,h]anthracène vaut seulement 1-2% de la somme Σ16 EPA HAP)² Mentionnés dans la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP)³ La liste complète des composés simples étudiés figure dans Brändli et al. (2007b)⁴ Utilisation restreinte dans l'UE⁵ Utilisation restreinte dans l'UE et en Suisse

2.3 Études écotoxicologiques

2.3.1 Analyse de risque écotoxicologique basée sur la littérature

Dix-sept substances chimiques ont été recherchées dans le cadre de l'analyse de risque écotoxicologique basée sur la littérature (Aldrich & Daniel 2003) : HAP, PCB, PCDD, PBDE, bisphénol A (composant de base pour la fabrication de plastiques) et phtalates ainsi que onze PPS : atrazine, captane, cyprodinile, chlorpyrifos, folpet, iprodion, métolachlore, procymidon, thiabendazol, trifluraline et vinclozoline. Toutes les substances recherchées ont été analysées dans le cadre de l'étude de monitoring, à l'exception du bisphénol A. On a trouvé des HAP, des PCB, des PCDD, du cyprodinile et du thiabendazol, tandis que les autres substances sont restées en deçà du seuil de détection de 1 µg/kg MS. Un produit de dégradation de l'atrazine a également été trouvé. La procédure suivante a été appliquée pour estimer le risque :

- a) Estimation de la concentration de la substance considérée dans le sol après épandage de compost (« predicted environmental concentration », PEC). Cinq scénarios ont été examinés : compost pur (cas le plus défavorable), 100 t de compost par ha (MS) avec une profondeur d'incorporation de 5 cm, 100 t de compost/ha (MS) avec une profondeur d'incorporation de 20 cm, 10 t de compost/ha (MS) avec une profondeur d'incorporation de 20 cm, 10 t de compost/ha (MS) avec une profondeur d'incorporation de 5 cm.
- a) Recherche bibliographique de « end points » (p. ex. LC50 : « Lethal Concentration causing 50 % mortality » ; NOEC : « No Observed Effect Concentration ») applicables aux organismes terrestres. Lorsque plusieurs séries de données étaient utilisables, les organismes les plus sensibles ont été sélectionnés pour déterminer la LC50 ou le NOEC.
- b) Calcul du quotient « end point » par la concentration de la substance considérée dans le sol (p. ex. LC50/PEC). Application de facteurs correctifs selon la qualité des données ou selon que les effets sont chroniques ou aigus.

2.3.2 Tests écotoxicologiques

La pertinence de différentes méthodes applicables au compost et au digestat a été vérifiée en observant plusieurs organismes test (collemboles : *Folsomia candida*, *Folsomia fimetaria* ; daphnies : *Daphnia magna* ; bactéries luminescentes : *Vibrio fischeri*) dans le cadre d'une étude préliminaire (Stämpfli et al. 2005). C'est *Folsomia candida* qui a réagi de la manière la plus sensible. Les collemboles représentent une part importante des biocénoses du sol. *Folsomia candida* se retrouve presque partout dans le monde, elle a un cycle de reproduction court et elle est facile à cultiver en laboratoire (Fountain & Hopkin 2005). Dix-huit échantillons ont été prélevés pour étudier les taux de survie et de reproduction de *Folsomia candida* après 28 jours d'exposition dans des mélanges compost/sol et digestat/sol de 1 : 7,5, ce qui correspond à l'épandage de 100 t de compost/ha (MS) sur un sol épais de 5 cm (Pohl 2006). Les effets observés ont été comparés avec une méthode de contrôle (sol pur utilisé pour constituer le mélange). Les échantillons testés ont été analysés dans le cadre de l'étude de monitoring (chapitre 2.1).

3 > Résultats et discussion

3.1 Étude de monitoring

3.1.1 Pollution des composts, des digestats et des jus de pressage

Toutes les classes de substances recherchées ont été trouvées, à l'exception du nonyl-phénol (NP). Les teneurs étaient généralement de l'ordre du $\mu\text{g}/\text{kg MS}$ (tableau 2). Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont présenté les teneurs les plus élevées, de 600 à 12'470 $\mu\text{g}/\text{kg MS}$ (Brändli et al. 2007a). Un quart des échantillons a dépassé la valeur indicative selon l'ORRChim de 4000 $\mu\text{g}/\text{kg MS}$ (anonyme 2005). Les teneurs se sont avérées supérieures aux valeurs trouvées dans la bibliographie et légèrement inférieures aux concentrations dans les boues d'épuration (médiane: 6688 $\mu\text{g}/\text{kg MS}$, fourchette: 1006–22'641 $\mu\text{g}/\text{kg MS}$; Berset & Holzer 1999). Les polychlorobiphényles orthosubstitués (PCB) ainsi que les dibenzo-*p*-dioxines et dibenzo-*p*-furanes polychlorés (PCDD/PCDF) ont présenté des teneurs inférieures aux données connues jusqu'alors (Brändli et al. 2005). La régression des PCB est certainement due à la baisse de leurs teneurs dans l'environnement, consécutive à leur interdiction prononcée dans les années 1970 (Sweetman & Jones 2000). La diminution des PCDD/PCDF, aussi observée dans des matrices telles les boues d'épuration (Rappe et al. 1997), peut être expliquée par les améliorations technologiques apportées à l'incinération des ordures et aux procédés industriels. Les teneurs en phtalates étaient similaires aux valeurs observées dans des études antérieures (Brändli et al. 2005). De l'hexabromocyclododécane (HBCD), du tétrabromobisphénol A (TBBPA), des composés alkylés perfluorés (PFA), du décabromodiphényléther (décaBDE) et plusieurs produits phytosanitaires (PPS) ont été détectés dans le compost et le digestat pour la première fois (Brändli et al. 2007b). Leurs concentrations étaient de quelques ppb (soit $\mu\text{g}/\text{kg MS}$), à l'exception de l'HBCD et des paraffines chlorées (PC), trouvées en concentrations de 17 à 384 $\mu\text{g}/\text{kg MS}$. La présence des substances recherchées dans le compost et le digestat n'est guère surprenante, sachant qu'elles ont été trouvées dans plusieurs matrices et qu'elles se propagent dans l'environnement. Les teneurs en PPS étaient de quelques ppb pour certains d'entre eux, tandis que les fongicides et de nouvelles substances actives, tel les triazoles, en furent les principaux représentants. On n'a en revanche pas retrouvé les pesticides organochlorés endosulfan, DDT et lindane, ce qui témoigne de l'efficacité des interdictions et des restrictions d'utilisation.

Les teneurs trouvées dans les différents échantillons variaient fortement pour la plupart des groupes de substances, généralement d'un facteur 10 à 50. Cette fourchette est plus large que celle des métaux lourds dans le compost. Seuls quelques groupes de substances étudiés étaient corrélés entre eux (annexe 1) ou avec d'autres paramètres pris en compte (p. ex. éléments nutritifs, métaux lourds). Cela vaut également pour les corps

étrangers, ce qui signifie que leurs teneurs observées (total : 0–2,5 %, plastique : 0–0,9 %) n'influençaient pas la pollution du compost et du digestat (annexe 1).

Les teneurs en HAP, PCB, PCDD/PCDF et PBDEs dans le compost et le digestat étaient supérieures aux concentrations normalement observées dans les sols des champs et des prés (Bucheli et al. 2004 ; Schmid et al., 2005 ; Sellström et al. 2006). Les teneurs en DEHP étaient plus élevées dans le sol que dans le compost (Langenkamp & Part 2001). Dans les sites urbains ou contaminés, le sol était parfois aussi pollué, voire davantage, que le compost et le digestat. Le digestat tendait à présenter des teneurs en micropolluants plus élevées que le compost (exceptions : PCB, PCDD/PCDF, PFA). Les concentrations dans le jus de pressage étaient généralement supérieures à celles du digestat, sauf pour les PCB et certains retardateurs de flamme bromés.

3.1.2 Source des micropolluants organiques

D'un point de vue statistique, le compost des régions urbaines renfermait des concentrations en PCB significativement plus élevées que ceux des régions rurales. Les teneurs des autres groupes de substances, sauf les HAP et l'HBCD, étaient également supérieures dans le compost d'origine urbaine, mais les différences n'étaient statistiquement pas significatives (voir remarques concernant les paramètres au paragraphe 2.1.1). Cela semble plausible au vu du fait que ces substances sont contenues en grandes quantités dans les produits et les constructions des régions urbaines, si bien que les émissions produites par leur libération sont supérieures à celles des régions rurales. Pour ces substances, la déposition atmosphérique devrait être un vecteur d'apport important.

L'analyse de marqueurs et l'application de méthodes statistiques a révélé que la source principale des HAP résidait dans les processus de combustion. Ces substances peuvent aboutir dans les matériaux de départ du compost et du digestat par déposition atmosphérique ou par transport de particules générées par le trafic routier. Le compost formé à partir de déchets de cuisine présentait des teneurs en PPS significativement plus élevées que les autres, ce qui est très probablement dû à la présence d'épluchures de fruits et légumes traités avec des PPS (Taube et al. 2002). Les informations disponibles concernant la composition des lots échantillonnés ne permettent pas d'en dire plus sur la source des polluants.

Tab. 2 > Teneurs des substances étudiées dans le compost, le digestat et le jus de pressage, en µg/kg MS

Moy : valeur moyenne ; méd : valeur médiane ; min : valeur minimale ; max : valeur maximale
 DL PCB en ng WHO-TEQ/kg MS et PCDD/PCDF, en ng I-TEQ (I-TEQ : International Toxicological Equivalents) ;
 n : nombre d'échantillons analysés

	Compost*				Digestat**				Jus de pressage			
	moy	méd	min-max	n	moy	méd	min-max	n	moy	méd	min-max	n
HAP	3098	2750	600–10'047	56	5925	4202	2337–12'470	13	6565	5780	5445–9310	5
PCB	30	25	9–102	55	32	31	20–52	13	26	25	21–35	5
DL-PCB	3,1	2,7	0,4–6,3	13	4,1	3,7	2,4–6,8	5	4,2	4,2	3,1–5,3	2
PCDD/PCDF	5,6	4,0	0,5–21,0	13	3,2	2,7	1,3–6,6	5	6,1	6,1	3,8–8,5	2
PentaBDE	2,1	1,9	0,2–3,6	13	2,7	1,9	1,2–4,9	5	2,0	2,0	1,5–2,5	2
OctaBDE	0,4	0,2	0,1–3,6	13	0,3	0,3	0,2–0,5	5	0,3	0,3	0,2–0,4	2
DécaBDE	7,0	6,9	0,6–13,9	13	13,8	10,0	1,7–30,8	5	12,8	12,8	7,0–18,5	2
HBCD	83	47	17–234	13	187	174	98–372	5	43	43	30–56	2
TBBPA	0,6	0,5	0,1–2,3	13	0,9	1,0	0,4–1,5	5	1,6	1,6	1,0–2,3	2
6 : 2FTS/FT(U)CA	1,2	1,4	0,4–1,5 ¹	13	0,2	0,0	nd-0,9 ²	5	-	-	-	-
PFS	4,3	2,2	1,0–23,6	13	3,9	2,3	2,0–8,6	5	-	-	-	-
PFCA	3,5	2,2	1,3–9,9	13	4,1	3,1	2,4–6,6	5	-	-	-	-
FOSA/FOSE	0,1	0,2	0,0–0,3 ³	13	0,3	0,3	0,2–0,4 ⁴	5	-	-	-	-
PPS	57	40	18–171	13	105	82	30–257	7	169	169	155–182	2
PC	242	194	142–384	3	-	-	-	-	-	-	-	-
DEHP	240	212	145–395	4	1140	1140	295–1985	2	-	-	-	-
DBP	nd ⁵	nd	nd	4	nd	nd	nd-105	2	-	-	-	-
NP	nd	nd	nd	4	nd	nd	nd	2	-	-	-	-

* Les composts renfermant d'importantes proportions d'autres matériaux de départ que les déchets de cuisine et les déchets verts (p. ex. engrais de ferme) ne sont pas inclus.

Résultats de ces échantillons : HAP (n=8) : médiane : 978 µg/kg MS (fourchette : 625–2954 µg/kg MS) ; PCB (n=9) : médiane : 16 µg/kg MS (fourchette : 6–536 µg/kg MS)

** Résultats concernant les digestats issus de traitement thermophile. Teneurs dans les digestats issus de traitement mésophile (n=3) :

HAP : médiane : 2314 µg/kg MS (fourchette : 947–3784 µg/kg MS) ; PCB : médiane : 10 µg/kg MS (fourchette : 6–74 µg/kg MS)

¹ Trouvé dans 7 échantillons, ² trouvé dans 2 échantillons, ³ trouvé dans 7 échantillons, ⁴ trouvé dans 4 échantillons, ⁵ n.d. : non détecté

3.1.3 Charges de substances dans le sol

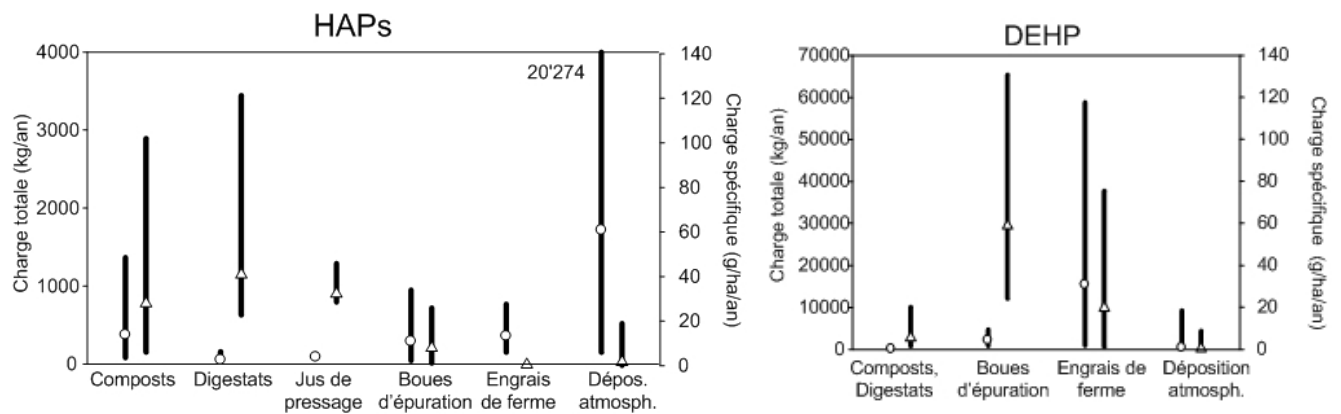
L'apport de micropolluants organiques dans le sol peut être estimé en comparant leurs charges dans le compost et le digestat avec celles d'autres sources (boues d'épuration, engrais de ferme, déposition atmosphérique). Deux approches ont été suivies : (a) celle de la charge totale introduite dans l'ensemble de la surface agricole de Suisse et (b) celle de la charge spécifique (charge par hectare de surface agricole, pour l'épandage de quantités normales, rapportée à 70 kg de P₂O₅, ce qui correspond pour le compost à une quantité de 8 à 10 t de MS ; la méthode de calcul est décrite dans Brändli et al. (2007a, b)). Les résultats concernant les HAP et le DEHP sont discutés ci-après.

Les HAP introduits dans l'ensemble de la surface agricole suisse (env. 1700 kg par an ; fig. 1) proviennent principalement de la déposition atmosphérique. La charge du compost et du digestat (570 kg par an) était nettement plus élevée que celles des autres engrais, et représentait quelque 20 % de la charge totale. L'apport plus faible par les

boes d'épuration s'explique par la diminution de leur valorisation dans l'agriculture suite à l'interdiction de les épandre entrée en vigueur en automne 2006 (pour 2002 : 21 % de la quantité totale). Le compost et le digestat étaient de loin les premiers pourvoyeurs de la charge spécifique observée, ce qui est dû aux teneurs proportionnellement élevées qu'ils renferment (p. ex. 30–50 % de la concentration dans les boes d'épuration ; Berset & Holzer 1999) et aux quantités proportionnellement élevées qui sont épandues. Le digestat apporté des charges spécifiques en HAP nettement plus élevées que le compost, et le jus de pressage des quantités légèrement supérieures.

Fig. 1 > Charges de HAP et de DEHP apportées annuellement par l'utilisation de compost, de digestat, de jus de pressage (pour les HAP), de boes d'épuration et d'engrais de ferme, et par déposition atmosphérique

○ désigne la valeur moyenne de la charge totale dans la surface agricole suisse (en kg/an) et △ la valeur moyenne de la charge spécifique (charge par hectare de surface agricole, pour l'épandage de quantités normales, rapportée à 70 kg P₂O₅), en g/ha/an. Les colonnes indiquent l'écart entre les valeurs minimum et maximum.



Pour le DEHP, l'un des principaux plastifiants, la situation est différente. Sa charge dans les boes d'épuration et les engrais de ferme était plus élevée que dans le compost et le digestat. Un apport important est probablement dû à la déposition atmosphérique, comme pour les HAP. Concernant les engrais de ferme, l'étude de Fromme et al. (2002) soupçonne que les DEHP proviennent du revêtement des installations servant à les stocker. En raison du lessivage des plastifiants contenus dans les matières synthétiques, les eaux usées provenant des ménages privés et de l'industrie ainsi que les écoulements sur des surfaces imperméables jouent un rôle important dans le cas des boes d'épuration (Berset & Holzer 2001). Par ailleurs, le DEHP se dégrade rapidement en conditions aérobies (Madsen et al. 1999 ; Staples et al. 1997) et on peut partir du principe que la dégradation pendant le compostage est plus rapide que pendant le traitement des boes d'épuration ou l'entreposage des engrais de ferme.

Les deux substances décrites ici indiquent combien la contribution du compost et du digestat à la pollution du sol peut varier. Elle est très élevée pour les HAP et faible pour le DEHP. Les autres substances étudiées se situent entre les deux. Mais les données étaient souvent insuffisantes pour comparer les charges.

3.2 Comportement des micropolluants organiques pendant le compostage et la méthanisation

L'étude a révélé une dégradation minimale des PCB pendant le compostage (Brändli et al. 2007c). Ce fait a été confirmé par les rapports énantiomériques des PCB chiraux (PCB 95, 149 et 132) contenus dans le compost et le digestat (Bucheli & Brändli 2006). Une diminution des teneurs en HAP à chaîne moléculaire courte a été observée pendant le compostage. Ces résultats sont en accord avec des études antérieures (p. ex. Hund et al. 1999). Concernant les PPS, env. 60–90 % des différentes substances ont été éliminées à raison de 50 % au moins, mais l'étude n'a livré aucune information permettant de savoir si leur disparition est due à un phénomène de volatilisation ou de dégradation. Au vu d'études antérieures ainsi que des propriétés physico-chimiques de ces substances, il faut partir du principe qu'une dégradation au moins partielle des HAP et des PPS a eu lieu. La nature du substrat (déchets verts avec ou sans déchets de cuisine, digestat) a très peu influencé l'élimination des substances pendant le compostage. L'étude de leur comportement pendant la méthanisation n'a pas permis d'en tirer des conclusions claires.

3.3 Études écotoxicologiques

3.3.1 Analyse de risque écotoxicologique basée sur la littérature

Les données concernant trois substances (PCDD, HAP, PCB) furent suffisantes pour exclure tout risque inacceptable (Aldrich & Daniel 2003). Certaines lacunes dans les données n'ont pas empêché de conclure que l'épandage de compost sur le sol ne devrait pas générer de risque élevé pour l'atrazine ou le captane. S'agissant du bisphénol A, le manque de données analytiques sur le compost n'a pas permis de calculer sa concentration dans le sol. Pour cette substance, ainsi que pour onze autres (chlorpyrifos, cyprodinile, folpet, iprodion, métolaclore, phtalates, PBDE, procymidon, thiabendazol, trifluraline, vinclozoline), les données concernant les effets écotoxicologiques furent insuffisantes pour permettre une estimation des risques qui soit fiable.

3.3.2 Tests écotoxicologiques

Plusieurs tests envisagés se sont révélés appropriés pour l'étude écotoxicologique du compost et du digestat. Lors de l'étude de monitoring, seize échantillons ont eu un effet inhibiteur et treize un effet stimulant sur la reproduction de *Folsomia candida* (Pohl 2006). Des effets statistiquement significatifs ont été détectés pour quatre ou cinq échantillons. La mortalité des organismes adultes a dépassé 20 % dans quatorze échantillons (statistiquement significative pour trois échantillons). La reproduction et la mortalité des organismes adultes n'étaient pas corrélées et les effets observés n'étaient pas corrélables avec les teneurs en micropolluants détectées. Il est possible que d'autres substances non étudiées, éventuellement « naturelles », aient aussi joué un rôle.

Le schéma d'Achazi et al. (2000) a été appliqué pour évaluer la toxicité des échantillons. Quatre d'entre eux ont été qualifiés de peu toxiques et les autres de non toxiques. Cette conclusion est en accord avec des études réalisées sur le terrain et en laboratoire faisant état d'effets positifs sur les collemboles (Petersen et al. 2003) ou sur d'autres organismes présents dans le sol (Hund et al. 1999) lorsque des substances organiques sont incorporées dans la terre par l'application de boues d'épuration ou de compost.

Certains ouvrages signalent une stimulation de la reproduction d'organismes présents dans le sol en présence d'une faible pollution (p. ex. Erstfeld & Snow-Ashbrook 1999). Mais on ignore encore s'il faut considérer cet effet comme un signe de stress. Dans les systèmes aquatiques, des effets dommageables ont été observés pour des mélanges de polluants et de produits de dégradation en faibles concentrations (Junghans et al. 2006). Mais les connaissances relatives aux systèmes terrestres sont encore trop lacunaires pour qu'on puisse appréhender ces mécanismes.

Les résultats des tests écotoxicologiques ont révélé d'une manière générale que l'incorporation de micropolluants par épandage de compost et de digestat ne présente aucun risque immédiat pour le sol. Mais on ne peut pas exclure tout effet négatif en raison de la diversité des espèces en présence et des lacunes affectant nos connaissances sur les écosystèmes terrestres.

3.4 **Suite des travaux**

Plusieurs études sont encore en cours : interprétation statistique des données concernant les métaux lourds (Agroscope ART), comportement des retardateurs de flamme polybromés pendant le compostage (Empa, Dübendorf), interprétation des analyses FTIR et interprétation des teneurs en micropolluants organiques par analyse des composants principaux (BOKU, Vienne).

4 > Conclusions

Les résultats du présent projet fournissent la vue d'ensemble la plus complète jusqu'à présent sur les micropolluants organiques contenus dans le compost. Plusieurs substances et classes de substances (PFA, HBCD, TBBPA, décaBDE et PPS) y ont été détectées pour la première fois. Quant au digestat et au jus de pressage, presque aucune donnée analytique n'existait jusqu'ici sur les micropolluants organiques qu'ils renferment. La plupart des composés ont été trouvés en concentrations relativement faibles dans les produits issus d'installations de compostage et de méthanisation. Mais les teneurs en HAP, PCB, PCDD et PCDF furent sensiblement les mêmes que dans les boues d'épuration. La plupart des substances étaient présentes en concentrations plus élevées que dans les sols agricoles sur lesquels ces produits sont épandus. Les résultats de l'étude indiquent que le compost et le digestat sont contaminés par une grande diversité de polluants, comme les boues d'épuration, dont l'interdiction d'épandage à suscité la discussion sur les micropolluants organiques contenus dans les engrais de recyclage. Signalons cependant deux différences majeures entre le compost/digestat et les boues d'épuration :

1. Seul la déposition atmosphérique et les apports directs sont des vecteurs importants pour le compost et le digestat, tandis que l'eau entraîne une palette de substances notablement plus large dans les boues d'épuration. Ces dernières contiennent des substances telles qu'agents de surface, produits pharmaceutiques ou substances odorantes, alors qu'on ne s'attend pas à les trouver, ou tout au plus sous la forme de traces, dans le compost et le digestat (Marb et al. 2003).
2. La qualité du compost et du digestat peut encore être améliorée en prenant des mesures stratégiques et organisationnelles (p. ex. optimisation des collectes sélectives, choix ou exclusion ciblée de certaines charges dans les installations). La structure actuelle de l'évacuation des eaux urbaines ne permet pas d'améliorer ainsi la situation pour les boues d'épuration.

La charge de certaines substances, tels les HAP, dans le compost et le digestat n'est pas négligeable, puisqu'elle atteint 20 % de l'ensemble des apports sur les surfaces agricoles. Une grande partie du compost et du digestat étant certainement épandue à proximité des installations qui les ont produits, on peut s'attendre à ce que les parcelles en question reçoivent des apports supérieurs (de l'ordre de grandeur des charges spécifiques, voir paragraphe 3.1.3). Le compost et le digestat, provenant en grande partie de déchets produits en région urbaine, sont essentiellement épandus sur des surfaces agricoles¹. Comme les émissions de polluants sont généralement plus élevées en région

¹ La part des fractions « horticulture » et « services publics » était supérieure à 50 % dans les échantillons analysés dans le cadre de la présente étude. Elles provenaient principalement de périmètres urbains. Les fractions « collecte verte » et « industrie » (resp. 55 % et 16 % de l'ensemble des matériaux de départ) devraient provenir pour moitié au plus de matériaux issus de surfaces agricoles (p. ex. déchets de cuisine). On peut donc partir du principe que quelque 75 % des matériaux contenus dans le compost et le digestat émanent de régions urbaines. Plus de 70 % de la quantité totale de compost et de digestat sont utilisés dans l'agriculture (Estermann, Bartha-Pichler, 2005).

urbaine qu'en région rurale, les déchets organiques en provenant ont une teneur en polluants supérieure, même en cas de collecte sélective. La présente étude a confirmé ce lien pour plusieurs substances, du moins dans les grandes lignes. C'est pourquoi la valorisation des déchets organiques par compostage et par méthanisation, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui, occasionne inévitablement un flux net de polluants de régions urbaines vers des surfaces agricoles.

Se pose la question des effets des polluants sur le sol. On peut argumenter en se basant (a) sur les flux de substances et leur enrichissement dans le sol ou (b) sur des études écotoxicologiques :

- a) Flux de substances : plusieurs études ont examiné le risque occasionné par l'accumulation de micropolluants organiques dans le sol. Leurs conclusions diffèrent selon leur objectif et le modèle appliqué : aucun enrichissement ou dépassement à moyen terme des valeurs indicatives applicables aux sols (p. ex. Amlinger et al. 2006 ; Brändli et al., 2007a, b). Les résultats de plusieurs études portant sur de longues durées n'ont encore révélé aucune accumulation de substances telles qu'HAP, DEHP ou NP dans le sol (Hund et al. 1999 ; Petersen et al. 2003). On admet généralement que la dégradation biologique de ces substances compense leur accumulation. Mais l'apport et la dégradation ne sont pas les seuls à déterminer l'enrichissement de substances dans le sol. Certains facteurs comme la bioturbation et les écoulements préférentiels sont à même de retirer des substances de la surface du sol, en sus de phénomènes comme l'entraînement par érosion, le lessivage, la volatilisation ou l'exportation avec les récoltes (McLachlan et al. 2002). Certaines fractions du sol (p. ex. « black carbon ») ont une affinité élevée pour les substances, diminuant ainsi leur disponibilité pour les organismes présents dans le sol (Cornelissen et al. 2005). Mais on ne sait pas encore très bien si les polluants ainsi séquestrés dans le sol sont à nouveau libérés petit à petit, pour être dégradés ou pour devenir toxicologiquement actifs par la suite.
- b) Les études écotoxicologiques n'ont livré jusqu'ici aucun signe de risque immédiat. Les études sur le terrain ont décelé tout au plus de faibles effets consécutifs à l'épandage d'engrais de recyclage (Bartl et al. 2002 ; Traulsen et al. 1997). Mais on ne peut pas exclure *a priori* tout impact néfaste. Dans le domaine aquatique, la présence fréquente de polluants est considérée comme l'un des principaux problèmes posés à l'avenir (Schwarzenbach et al. 2006). Certains indices laissent penser que la problématique est moins aiguë pour les écosystèmes terrestres (disponibilité moindre des substances, potentiel de dégradation supérieur grâce à la présence d'activité biologique, etc.). Mais l'état des connaissances sur le sol est encore limité. Les tests écotoxicologiques ne touchent qu'une partie des organismes terrestres. Les effets sur les espèces sensibles et sur les biocénoses sont inconnus. De plus, l'impact sur le sol serait grave si la pollution devait atteindre un seuil critique, car les polluants affectant le sol s'éliminent difficilement, ou alors très lentement.

La confrontation de l'effet fertilisant et d'autres incidences positives (Amlinger et al. 2006 ; Fuchs et al. 2004) avec les effets néfastes avérés ou potentiels, en tenant compte des incertitudes dans l'interprétation des données, indique que l'abandon de la valorisation du compost et du digestat issus de déchets urbains collectés sélectivement n'est ni

nécessaire ni proportionné. Il est toutefois recommandé d'optimiser ce mode de recyclage pour les raisons suivantes :

- a) Grande variabilité des teneurs en micropolluants organiques (facteur 10 à 50). Les HAP, dont la valeur indicative selon l'ORRChim est fréquemment dépassée, requièrent une action immédiate.
- b) Flux nets de substances issues de régions urbaines qui aboutissent sur des surfaces agricoles.
- c) Cycles de matières incomplètement bouclés dans l'agriculture (p. ex. transfert de substances de l'Europe méridionale vers l'Europe centrale lors de l'importation de fruits méditerranéens).
- d) Lacunes dans les connaissances sur l'impact des polluants (p. ex. éventuels effets cumulatifs dus à la diversité des polluants, nombre limité d'organismes pris en compte dans les tests d'écotoxicité, comportement des substances dans le sol sur le long terme).

La nécessité d'optimisation ne découle donc pas de l'existence de risques immédiats avérés, mais des possibilités manifestes de réduire la charge polluante (a), de l'organisation perfectible du système de recyclage (b, c) et des risques potentiels, qui ne peuvent pas encore être évalués comme il convient (d). L'optimisation du système existant servirait également à soigner l'image des produits. Une stratégie d'assurance de la qualité des produits tels que le compost et le digestat issus de collectes sélectives des déchets devrait intégrer des principes tels qu'une teneur en polluants aussi faible que possible, même si la législation en vigueur ne les règlemente pas expressément.

Le chapitre suivant esquisse des recommandations sous la forme de mesures, stratégies et perspectives en vue d'optimiser le système de production et d'utilisation du compost et du digestat issus de collectes sélectives, applicables sur le court et le moyen terme, afin que la valorisation des déchets organiques collectés sélectivement soit aussi écologique et durable que possible. La co-digestion et les flux de substances liés à la valorisation énergétique de la biomasse sont intégrés dans les recommandations, étant donné l'intérêt croissant qu'ils suscitent.

5 > Recommandations

Les recommandations suivantes découlent des conclusions de la présente étude :

1. Diminution de la teneur en HAP du compost, du digestat et de jus de pressage.
2. Monitoring de micropolluants organiques dans le but de réduire les risques occasionnés par leurs effets sur le sol.
3. Amélioration des connaissances sur les processus déterminants pour la pollution du sol et sur les effets des micropolluants (flux de substances, comportement et effets écotoxicologiques de substances contenues dans le sol).
4. Amélioration des connaissances relatives aux matériaux susceptibles d'être utilisés comme substrats dans des installations de co-digestion.

5.1 Mesures à court terme

Des mesures permettant de mettre en œuvre les recommandations sont énoncées ci-après. Elles sont regroupées selon les objectifs visés, les groupes cibles, la procédure à suivre, les coûts estimés, les bénéfices escomptés et l'horizon temporel.

5.1.1 Teneur en HAP du compost, du digestat et du jus de pressage

- | | |
|--|---------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> > Objectif général : diminution des risques liés à la pollution du sol. > Objectif sectoriel : diminution de la teneur en HAP du compost, du digestat et du jus de pressage. | Objectifs visés |
| <ul style="list-style-type: none"> > Exploitants d'installations, secteur et associations professionnelles. > Autorités (Confédération et cantons : selon l'annexe 2.6, al. 2, ch. 4, ORRChim). | Groupes cibles |
| <ul style="list-style-type: none"> > Détecter les facteurs à l'origine de teneurs élevées en HAP dans le compost, le digestat et le jus de pressage. > Désigner les matériaux de départ pollués. > Élaborer des mesures de nature à diminuer la pollution. > Fonder les recherches sur les produits finaux et/ou les matériaux de départ. Si les matériaux finaux sont étudiés, inventorier en détail toutes les charges de matériaux de départ qui vont se retrouver dans le produit final. Éventuellement procéder par étapes. > Cette étude devrait être combinée avec un développement plus poussé des méthodes d'analyse. La présente étude a montré que les valeurs analytiques des HAP varient fortement en fonction de la préparation des échantillons. La répétition de mesures portant sur des échantillons préparés et analysés de manière identique a livré des écarts allant jusqu'à plusieurs centaines de pour-cent (pour ces échantillons, les | Procédure à suivre |

concentrations ont été déterminées en réitérant les mesures et en les interprétant statistiquement). Cela révèle que des échantillons (en principe) traités dans les règles de l'art peuvent présenter des teneurs en polluants hétérogènes (HAP et métaux lourds). De plus, les résultats des analyses dépendent de la méthode choisie, en particulier du mode d'extraction. Les méthodes d'analyse développées pour les sols, les boues d'épuration ou d'autres échantillons solides ne sont applicables au compost que dans une mesure restreinte, car elles ne permettent pas de réaliser l'extraction la plus efficace. Aux problèmes liés à la préparation et l'analyse des échantillons s'ajoutent celui de la reproductibilité de l'échantillonnage. Il a peu été étudié, si bien que son influence sur la variabilité des données est difficile à évaluer. Les connaissances à ce sujet sont insuffisantes pour assurer un contrôle de la qualité ainsi que la mise en œuvre des dispositions légales. La problématique est en principe la même pour les métaux lourds, mais elle joue un rôle moindre dans l'exécution des dispositions légales, car leurs teneurs sont en général largement inférieures aux valeurs limites. Comme 25 % des échantillons ont présenté des teneurs en HAP supérieures aux valeurs indicatives selon l'ORRChim, il est très important d'améliorer et de normaliser les méthodes analytiques en vue de recherches futures.

> De nouveaux échantillons de jus de pressage devraient être analysés dans le cadre de cette étude. Motif : le jus de pressage et de présent des teneurs plus élevées en éléments nutritifs comme en polluants (métaux lourds et micropolluants organiques) que le compost et le digestat. Il est recommandé de procéder à de nouvelles analyses au vu des quantités relativement grandes de jus de pressage qui sont produites.

- > Amélioration de la qualité des produits finaux.
- > Diminution des risques liés à la pollution du sol.
- > Amélioration de la liste positive.
- > Amélioration de l'image des produits finaux.

Bénéfices escomptés

5.1.2 **Monitoring périodique de micropolluants organiques**

- > Objectif général : diminution des risques liés à la pollution du sol.
- > Objectifs sectoriels :
 - appréhension de la situation actuelle en ce qui concerne la pollution du compost, du digestat et du jus de pressage par des micropolluants organiques ;
 - diminution de la pollution du compost, du digestat et du jus de pressage ;
 - identification des matériaux de départ fortement pollués ;
 - identification précoce des problèmes pouvant se poser et des nouvelles substances susceptibles de poser des problèmes.

Objectifs visés

- > Exploitants d'installations, secteur et associations professionnelles.
- > Acheteurs.
- > Autorités (Confédération et cantons : selon l'annexe 2.6, al. 2, ch. 4, ORRChim).

Groupes cibles

En vertu de l'annexe 2.6, al. 1, ch. 4 de l'ORRChim, l'OFEV effectue, à des intervalles appropriés, des analyses de compost, de digestat et de jus de pressage pour contrôler leur teneur en HAP, dioxines et furanes. Un intervalle approprié devrait être de cinq

Procédure à suivre

ans au maximum. Il est recommandé d'analyser approximativement tous les dix ans une palette élargie de micropolluants organiques, comprenant notamment les classes de substances étudiées dans le cadre du présent projet. Au vu du nombre très restreint de corrélations significatives entre les différentes classes de substances, les investigations ne peuvent guère se résumer à l'analyse de quelques « marqueurs ». Il faudra certainement toujours analyser les substances une par une. L'intégration de nouvelles classes de substances sera discutée en tenant compte des nouvelles connaissances en la matière. Le monitoring périodique devrait se baser si possible sur un réseau d'observation. Les avantages de ces réseaux pour le monitoring ont été décrits dans le cadre de l'observatoire national des sols NABO (http://www.environnement-suisse.ch/buwal/fr/fachgebiete/fg_boden/nabo/index.html) et du monitoring basé sur le projet SEA portant sur les boues d'épuration (<http://www.sea.eawag.ch/>). Bien que les installations de compostage et de méthanisation soient soumises à une dynamique plus vive que les stations d'épuration ou d'observation du sol, il vaudrait la peine d'effectuer les analyses si possible aux mêmes endroits (avantages : optimisation de la charge occasionnée par les campagnes d'échantillonnage, possibilité d'établir des séries temporelles, collaboration avec les exploitants d'installations, etc.). La mise sur pied d'un réseau d'observation (installations, classification de celles-ci) peut se baser sur les installations étudiées dans le cadre du présent projet.

Une stratégie de monitoring périodique comprenant les éléments suivants doit être élaborée au préalable :

- > Définition des intervalles appropriés au sens de l'annexe 2.6, ch. 4, ORRChim.
- > Nombre d'échantillons à analyser.
- > Choix des installations et des produits à échantillonner.
- > Choix des substances à analyser.

- > Amélioration de la qualité des produits finaux.
- > Diminution des risques liés à la pollution du sol.
- > Amélioration de l'image des produits finaux.

Bénéfices escomptés

5.1.3 Flux nets de substances vers les surfaces agricoles utiles

- > Objectif général : diminution des risques liés à la pollution du sol.
- > Objectifs sectoriels :
 - amélioration des connaissances sur les flux de substances entre les régions urbaines ou d'autres surfaces (p. ex. forestières) et les surfaces agricoles ;
 - estimation du risque de trouver des surfaces davantage polluées que d'autres.

- > Secteur et associations professionnelles.
- > Autorités (Confédération et cantons).

Objectifs visés

Groupes cibles

Les flux de substances entre les régions urbaines et les surfaces agricoles devraient être mieux compris dans le contexte de la valorisation du compost et du digestat issus de collectes sélectives. Il est recommandé d'intégrer d'autres substances importantes actuellement ou à l'avenir, tels les résidus de la valorisation énergétique de la biomasse (p. ex. forêt ou surfaces naturelles protégées). La répartition spatiale des flux de substances devrait aussi être étudiée de manière plus approfondie (p. ex. exploitation de méthodes faisant appel à un SIG ; voir aussi Keller et al. 2001, 2002). La procédure à suivre peut être esquissée comme suit :

Procédure à suivre

- > Inventaire des fractions de déchets et des quantités de substances provenant des régions urbaines.
- > Estimation des futurs flux de substances dus à la valorisation énergétique de la biomasse.
- > Inventaire des surfaces d'épandage.
- > Représentation et interprétation des flux de substances à l'échelle régionale.

- > Mise à disposition de bases pour une meilleure gestion des risques.
- > Diminution des risques liés à la pollution du sol.

Bénéfices escomptés

5.1.4 Qualité des substrats utilisés pour la co-digestion et des produits finaux

- > Objectif général : diminution des risques liés à la pollution du sol.
- > Objectifs sectoriels :
 - inventaire des substrats utilisés pour la co-digestion et des informations disponibles à leur sujet ;
 - connaissance des flux de substances ;
 - identification précoce des risques pouvant être occasionnés par les polluants.
- > Exploitants d'installations, secteur et associations professionnelles.
- > Acheteurs.
- > Autorités (Confédération et cantons).

Objectifs visés

Groupes cibles

Avant-projet : étude bibliographique.

Procédure à suivre

- > Établissement d'un inventaire des substrats utilisés actuellement ou éventuellement à l'avenir dans les installations de co-digestion.
- > Estimation de la pollution des substrats par une étude bibliographique et une enquête auprès des exploitants d'installations.
- > Description des flux de substances.
- > Élaboration d'une stratégie de monitoring (intégration éventuelle dans des campagnes selon le paragraphe 5.1.2).

- > Diminution des risques liés à la pollution du sol.
- > Assurance de la qualité de la cométhanisation dans les exploitations agricoles.

Bénéfices escomptés

5.1.5 Comportement à long terme et effets des micropolluants organiques dans le sol

- > Objectif général :
 - diminution des risques liés à la pollution du sol.
- > Objectifs sectoriels :
 - amélioration des connaissances sur le comportement à long terme (adsorption, désorption, dégradation, transport, etc.) des micropolluants organiques dans le sol ;
 - amélioration des connaissances sur les effets des micropolluants organiques dans le sol.
- > Autorités (Confédération et cantons).
- > Milieux scientifiques.
- > Secteur et associations professionnelles.

Objectifs visés

Groupes cibles

Nos connaissances sur le comportement à long terme des micropolluants organiques dans le sol sont très limitées, comme expliqué au chapitre 4. Différents processus (p. ex. adsorption, désorption) sont de nature à l'influencer. La forme sous laquelle une substance est introduite dans le sol peut jouer un rôle. C'est ainsi que des substances contenues dans le compost (adsorption sur une matrice organique ou sur des minéraux argileux) pourraient se comporter autrement que lorsqu'elles parviennent dans le sol par déposition atmosphérique adsorbées aux particules comme la suie. Ces relations devraient être étudiées de manière plus approfondie. Il faudrait encore améliorer les tests écotoxicologiques appliqués pour appréhender les effets des micropolluants organiques. D'autres organismes tests devraient notamment être étudiés. Il y a lieu d'élaborer la procédure dans le cadre d'un avant-projet.

Procédure à suivre

- > Mise à disposition de bases pour une meilleure gestion des risques.
- > Diminution des risques liés à la pollution du sol.

Bénéfices escomptés

5.2 Mesures, stratégies et perspectives à moyen terme

5.2.1 Principes

On devrait suivre le principe voulant que les déchets soient dévalués le moins possible lorsqu'ils sont recyclés. Cela implique que les restes de repas soient utilisés prioritairement comme aliments pour animaux. Les déchets organiques biogènes seront restitués si possible au sol sous la forme d'engrais. Il est plausible et généralement admis que le respect de ces principes représente la manière la plus simple d'économiser de l'énergie et des matières premières².

Il en résulte l'ordre de priorité suivant :

1. Valorisation sous la forme d'aliments pour animaux ou de matières premières pour l'industrie, si cette filière est applicable.
2. Valorisation sous la forme d'engrais, d'amendements et de produits similaires ou combinaison de valorisation énergétique et de recyclage des résidus.
3. Valorisation énergétique (incinération ou traitement similaire puis mise en décharge des résidus)³.

Cet ordre de priorité est pertinent tout à la fois au plan énergétique et en ce qui concerne la nature des substances. D'autres principes doivent être respectés pour éviter des dommages. On doit notamment accorder la priorité à la protection de l'environnement, et en particulier du sol, lorsqu'on veut recourir à des produits tirés de déchets. Cela signifie que ces produits ne peuvent être remis et utilisés que s'ils sont appropriés, s'ils respectent l'environnement lorsqu'ils sont utilisés dans les règles de l'art et qu'ils répondent à un besoin en matière de cultures. Des produits sont appropriés (anonyme 1999) :

- > lorsqu'ils servent à la nutrition de plantes, qu'ils permettent d'améliorer des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques du sol ou qu'ils présentent un autre intérêt pour des cultures ;
- > lorsqu'ils contribuent à économiser des matières premières et des énergies non renouvelables et à refermer des cycles de matières.

Des produits tirés de déchets sont respectueux de l'environnement si toute mise en danger de l'environnement et, plus particulièrement, de la fertilité du sol au sens de l'OSol (anonyme 1998) peut être exclue. Cela implique, selon les connaissances actuelles, que la teneur en polluants des sols ne doit pas augmenter. Il faut limiter au maximum l'apport de polluants dans le sol, afin d'approcher ou d'atteindre à moyen terme un équilibre entre l'apport de polluants avérés ou potentiels et leur exportation, par exemple avec les récoltes, par lessivage ou par dégradation (Candinas et al. 1999).

² Il arrive fréquemment que certaines contraintes empêchent d'appliquer ces principes (p. ex. interdiction de nourrir les porcs avec des déchets de repas prononcée par l'UE pour des raisons hygiéniques et vétérinaires).

³ L'élimination en UIOM est une forme de valorisation énergétique. Actuellement, l'élimination par stockage en décharge ne revêt plus qu'une importance minime en Suisse.

5.2.2 Mise en œuvre

Un certain apport de substances (p. ex. par déposition atmosphérique) est inévitable pour le moment. Les substances ne provenant pas d'un cycle de matières lié à l'agriculture ou provenant d'un tel cycle incomplètement bouclé devraient satisfaire à des exigences élevées concernant la teneur en pollution, afin de décharger le plus possible les sols. On ne peut pas affirmer avec certitude que c'est bien le cas aujourd'hui pour les micropolluants organiques, malgré les grands progrès obtenus dans la qualité des produits finaux, l'assurance de la qualité et les processus de contrôle. Les exploitants d'installations, dont les recettes proviennent en grande partie de la réception et du traitement de déchets, ont intérêt à en réceptionner les plus grandes quantités possibles. Ils risquent alors de traiter des matériaux péjorant la qualité des produits qu'ils livrent en ce qui concerne leur charge polluante. Cette tendance pourrait s'accroître à l'avenir si la demande de matériaux organiques destinés à alimenter des installations de codigestion devait augmenter. Par ailleurs, il est possible que la transformation de déchets en engrais soit la solution la meilleur marché, plus favorable que les autres modes de valorisation ou que l'incinération en UIOM. Le système existant peut être amélioré sur le moyen à long terme en prenant les mesures suivantes :

- a) Choix systématique de matériaux de haute qualité pour la valorisation matière. Les matériaux revêtant une valeur moindre ou qui sont effectivement ou potentiellement pollués (provenant p. ex. du réseau routier) pourraient être valorisés selon une filière énergétique plutôt qu'en tant que matières⁴. Le tri devrait être possible sur les installations de compostage et de méthanisation existantes, qui disposent déjà en grande partie des équipements et des connaissances nécessaires.
- b) Meilleure vérification des matériaux initiaux. Il faut bien connaître les processus de production pour pouvoir évaluer la pollution des substances issues de l'industrie. Une meilleure désignation de la provenance des substances pourrait souvent s'avérer nécessaire.⁵

La charge tolérable en polluants pourrait être adaptée dans une certaine mesure à la nécessité d'obtenir un effet utile. Cela implique une plus grande tolérance lorsqu'un effet utile est très recherché (p. ex. amendement d'un sol dégradé). Lorsqu'un effet utile est moins nécessaire, comme en Suisse, la tolérance serait moindre et les exigences plus sévères.

Il faut s'attendre à l'avenir à une forte croissance de l'utilisation énergétique de la biomasse. La valorisation des résidus sous la forme d'engrais ou d'amendements devrait jouer un rôle important, ce qui occasionnerait d'importants flux nets de substances vers

⁴ L'utilisation énergétique de la biomasse est actuellement sujette à un développement dynamique qui devrait susciter une amélioration de la compatibilité de cette filière avec l'environnement.

⁵ On ne peut pas exclure absolument que des matériaux fortement pollués entrent dans la fabrication d'engrais sans qu'on s'en aperçoive, comme cela s'est notamment passé cette année en Rhénanie du Nord-Westphalie. Un produit pollué par de fortes teneurs en composés perfluorés (PFA) y a été épandu sur des surfaces agricoles. Les PFA, très solubles, ont été lessivés et ont souillé les eaux de surface et l'eau potable d'un vaste périmètre. Le produit utilisé renfermait un mélange de farine de pierre et de boues d'épuration issues de l'industrie des denrées alimentaires, des boissons et du tabac. Son épandage sur des surfaces agricoles et sa diffusion étaient autorisés, respectivement, par l'ordonnance sur les biodéchets et par l'ordonnance sur les engrais (pour des informations complémentaires: <http://www.munlv.nrw.de/sites/presse/titel.htm>).

les surfaces agricoles utiles. Leur compatibilité avec l'environnement devrait être discutée et examinée avec grand soin.

5.2.3 **Collaboration future et plates-formes pour les parties intéressées**

Pour optimiser la valorisation des déchets organiques, et par conséquent la garantir durablement sur le long terme, il faut avant tout procéder à une réflexion autocritique aussi large que possible sur les actions à entreprendre et les stratégies à mettre en œuvre. Dans le cadre des deux projets sur les effets utiles ou nuisibles du compost et u digestat, les compétences de personnes représentatives et d'institutions suisses actives à l'un ou l'autre bout de la chaîne ont été réunies. Une collaboration fructueuse, qui devrait être approfondie à l'avenir, a été lancée à cette occasion. Les disciplines impliquées jusqu'ici – gestion du compost, sciences végétales, chimie environnementale et écotoxicologie – doivent être complétées par la pédologie et l'étude des bilans de matières. Cela permettra d'améliorer encore les connaissances et d'identifier précocement les problèmes susceptibles de se poser. Les mêmes principes devraient être appliqués au domaine en développement de la production d'énergie à partir de la biomasse.

Il semble d'une manière générale que les processus de décision concernant la valorisation des déchets organiques issus de collectes sélectives aient surtout impliqué jusqu'ici les prestataires, soit les exploitants d'installations et leurs associations professionnelles. Il est recommandé d'y associer davantage les acheteurs, notamment les agriculteurs, ainsi que des spécialistes de la protection des sols et des bilans de matières, afin d'élargir les connaissances, d'équilibrer les différents intérêts et d'étayer plus largement les décisions.

> Annexe

A1 Corrélations

Corrélations entre les différentes classes de micropolluants organiques, métaux lourds, éléments nutritifs, substances organiques et étrangères étudiés

PC et NP absents au vu du nombre insuffisant de valeurs analytiques ou de l'absence de corrélation détectable.
En gras : statistiquement significatif ($p < 0,05$).

	HAP	PCB	DL PCB	PCDD/PCDF	PBDEs	Penta-BDE	Octa-BDE	HBCD	TBBPA	PFA	PPS	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Subst. org.	P	K	Ca	Mg	Total subst. étrangères	Corps étr. en plastique
HAP	1,00	0,07	0,07	-0,33	0,01	-0,16	0,38	0,38	0,05	-0,21	0,40	-0,01	-0,25	-0,10	-0,07	-0,25	0,04	0,00	0,31	0,21	0,26	0,01	-0,05	0,22	0,21
PCB	0,07	1,00	0,71	0,00	0,23	0,12	-0,05	0,20	0,13	0,34	-0,01	-0,05	-0,10	-0,01	0,34	-0,09	0,13	0,14	-0,07	0,04	-0,13	0,00	-0,12	-0,01	-0,09
DL PCB	0,07	0,71	1,00	0,42	0,60	0,48	-0,11	0,13	0,40	0,56	0,17	0,28	-0,03	0,15	0,54	0,06	0,25	0,34	0,06	0,01	-0,28	0,04	-0,16	-0,23	-0,22
PCDD/PCDF	-0,33	0,00	0,42	1,00	0,36	0,59	-0,12	-0,31	0,13	0,44	-0,17	0,15	0,27	0,25	0,39	0,34	0,24	0,34	-0,09	-0,01	-0,02	-0,27	-0,03	-0,06	-0,01
PBDEs	0,01	0,23	0,60	0,36	1,00	0,86	-0,03	-0,13	0,26	0,59	0,08	0,02	0,22	0,53	0,34	-0,12	0,10	0,16	0,34	0,21	-0,01	-0,22	-0,07	-0,11	-0,05
PentaBDE	-0,16	0,12	0,48	0,59	0,86	1,00	-0,04	-0,25	0,30	0,49	-0,01	0,03	0,12	0,41	0,24	-0,14	0,03	0,07	0,29	0,07	-0,01	-0,24	-0,12	-0,20	-0,12
OctaBDE	0,38	-0,05	-0,11	-0,12	-0,03	-0,04	1,00	0,11	-0,02	-0,08	0,12	0,17	0,08	-0,12	0,03	-0,05	0,24	0,27	0,21	0,56	0,69	0,16	-0,21	-0,06	-0,06
HBCD	0,38	0,20	0,13	-0,31	-0,13	-0,25	0,11	1,00	-0,13	-0,34	0,64	0,21	-0,34	-0,22	-0,21	-0,41	0,02	-0,13	-0,29	-0,07	-0,20	0,68	0,23	-0,11	-0,10
TBBPA	0,05	0,13	0,40	0,13	0,26	0,30	-0,02	-0,13	1,00	0,49	0,17	-0,05	-0,25	-0,12	0,03	-0,12	-0,18	-0,16	0,34	-0,24	-0,34	0,25	-0,36	-0,14	-0,16
PFA	-0,21	0,34	0,56	0,44	0,59	0,49	-0,08	-0,34	0,49	1,00	-0,12	-0,04	0,42	0,65	0,56	0,56	0,04	0,24	-0,06	0,19	-0,06	-0,14	-0,02	0,24	0,27
PPS	0,40	-0,01	0,17	-0,17	0,08	-0,01	0,12	0,64	0,17	-0,12	1,00	0,07	-0,48	-0,38	-0,33	-0,48	0,13	-0,12	0,10	-0,18	-0,15	0,55	-0,30	0,02	0,12
Cd	-0,01	-0,05	0,28	0,15	0,02	0,03	0,17	0,21	-0,05	-0,04	0,07	1,00	0,05	-0,04	0,17	0,03	0,76	0,65	-0,02	-0,10	0,02	-0,12	-0,13	-0,39	-0,44
Co	-0,25	-0,10	-0,03	0,27	0,22	0,12	0,08	-0,34	-0,25	0,42	-0,48	0,05	1,00	0,73	0,18	0,63	0,19	0,25	-0,33	0,34	0,26	-0,47	0,20	0,11	0,12
Cr	-0,10	-0,01	0,15	0,25	0,53	0,41	-0,12	-0,22	-0,12	0,65	-0,38	-0,04	0,73	1,00	0,42	0,50	0,01	0,17	-0,28	0,39	0,09	-0,36	0,50	0,30	0,30
Cu	-0,07	0,34	0,54	0,39	0,34	0,24	0,03	-0,21	0,03	0,56	-0,33	0,17	0,18	0,42	1,00	0,53	0,34	0,66	-0,03	0,45	0,21	-0,24	0,31	0,02	-0,02
Ni	-0,25	-0,09	0,06	0,34	-0,12	-0,14	-0,05	-0,41	-0,12	0,56	-0,48	0,03	0,63	0,50	0,53	1,00	0,20	0,38	-0,43	0,22	0,15	-0,34	0,14	0,41	0,39
Pb	0,04	0,13	0,25	0,24	0,10	0,03	0,24	0,02	-0,18	0,04	0,13	0,76	0,19	0,01	0,34	0,20	1,00	0,88	0,24	0,27	0,36	-0,39	-0,22	-0,06	-0,09
Zn	0,00	0,14	0,34	0,34	0,16	0,07	0,27	-0,13	-0,16	0,24	-0,12	0,65	0,25	0,17	0,66	0,38	0,88	1,00	0,16	0,49	0,52	-0,44	-0,01	-0,05	-0,10
Subst. organ.	0,31	-0,07	0,06	-0,09	0,34	0,29	0,21	-0,29	0,34	-0,06	0,10	-0,02	-0,33	-0,28	-0,03	-0,43	0,24	0,16	1,00	0,20	0,28	-0,28	-0,50	0,02	-0,02
P	0,21	0,04	0,01	-0,01	0,21	0,07	0,56	-0,07	-0,24	0,19	-0,18	-0,10	0,34	0,39	0,45	0,22	0,27	0,49	0,20	1,00	0,84	-0,29	0,29	0,31	0,27
K	0,26	-0,13	-0,28	-0,02	-0,01	-0,01	0,69	-0,20	-0,34	-0,06	-0,15	0,02	0,26	0,09	0,21	0,15	0,36	0,52	0,28	0,84	1,00	-0,32	0,00	0,17	0,16
Ca	0,01	0,00	0,04	-0,27	-0,22	-0,24	0,16	0,68	0,25	-0,14	0,55	-0,12	-0,47	-0,36	-0,24	-0,34	-0,39	-0,44	-0,28	-0,29	-0,32	1,00	-0,02	-0,16	-0,11
Mg	-0,05	-0,12	-0,16	-0,03	-0,07	-0,12	-0,21	0,23	-0,36	-0,02	-0,30	-0,13	0,20	0,50	0,31	0,14	-0,22	-0,01	-0,50	0,29	0,00	-0,02	1,00	0,12	0,06
Tot. subst. étrangères	0,22	-0,01	-0,23	-0,06	-0,11	-0,20	-0,06	-0,11	-0,14	0,24	0,02	-0,39	0,11	0,30	0,02	0,41	-0,06	-0,05	0,02	0,31	0,17	-0,16	0,12	1,00	0,97
Corps étr. en plastique	0,21	-0,09	-0,22	-0,01	-0,05	-0,12	-0,06	-0,10	-0,16	0,27	0,12	-0,44	0,12	0,30	-0,02	0,39	-0,09	-0,10	-0,02	0,27	0,16	-0,11	0,06	0,97	1,00

> Index

Bibliographie

- Achazi R.K., Römke J., Riepert F. 2000 : Collembolen als Testorganismen. In : *Toxikologische Beurteilung von Böden* (Heiden S., Erb R., Dott W., Eisenträger A., eds.), Spektrum Verlag, Heidelberg, Germany, pp 83–103.
- Alcock R.E., Sweetman A., Jones K.C. 1999 : Assessment of organic contaminant fate in waste water treatment plants I : Selected compounds und physicochemical properties. *Chemosphere* 38(10) : 2247–2262.
- Aldrich A., Daniel O. 2003 : Literature based risk assessment. Final report on module 5a of the project « organic pollutants in compost und digestates in Switzerland ». Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology und Agriculture, Zürich, Switzerland.
- Amlinger F., Peyr S., Geszti J., Dreher P., Weinfurter K., Nortcliff S. 2006 : Evaluierung der nachhaltig positiven Wirkung von Kompost auf die Fruchtbarkeit und Produktivität von Böden. Literaturstudie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. 246 Seiten.
- Anonyme 1998 : Ordonnance du 1.7.1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol), état au 28.3.2000. Le Conseil fédéral suisse, Berne.
- Anonym 1999 : Wegleitung zur Bewertung und Zulassung von Düngern und diesen gleichgestellten Erzeugnissen. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft IUL.
- Anonyme 2005 : Ordonnance du 18 mai 2005 sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). Le Conseil fédéral suisse, Berne.
- Bartl B., Hartl W., Horak O. 2002 : Long-term application of biowaste compost versus mineral fertilization : Effects on the nutrient und heavy metal contents of soil und plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.-Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 165(2) : 161–165.
- Becker-van Slooten K., Tarradellas J. 2000 : Soil biotests und indicators. In *Biological Resource Management. Connecting Science und Policy* (Balazs E., Galante E., Lynch J.M., Schepers J.S., Toutant J.-P., Werner D., Werry P.A.T.J., eds), Springer-INRA Editions, pp 57–65.
- Berset J.D., Holzer R. 2001 : Determination of phthalates in crude extracts of sewage sludges by high-resolution capillary gas chromatography with mass spectrometric detection. *J. AOAC Intern.* 84(2) : 383–391.
- Berset J.D., Holzer R. 1999 : Quantitative determination of polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls und organochlorine pesticides in sewage sludges using supercritical fluid extraction und mass spectrometric detection. *J.Chromatogr. A* 852 : 545–558.
- Berset J.D., Holzer R. 1995 : Organic micropollutants in Swiss agriculture : Distribution of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH) und polychlorinated biphenyls (PCB) in soil, liquid manure, sewage sludge und compost samples, a comparative study. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 59 : 145–165.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer G., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005 : Persistent organic pollutants in source-separated compost und its feedstock materials – a review of field studies. *J. Environ. Qual.* 34(3) : 735–760.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006 : Optimized accelerated solvent extraction of PCB und PAK from compost. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 86(7) : 505–525.
- Brändli R.C., Kupper T., Bucheli T.D., Zennegg M., Huber S., Ortelli D., Müller J., Schaffner C., Iozza S., Schmid P., Berger U., Edder P., Oehme M., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007b : Organic pollutants in Swiss compost und digestate ; 2. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and-furans, dioxin-like polychlorinated biphenyls, brominated flame retardants, perfluorinated alkyl substances, pesticides, und other compounds. *J. Environ. Monit.* 9 : 465–472.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer R., Stahel W., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007a : Organic pollutants in Swiss compost und digestate ; 1. Polychlorinated biphenyls, polycyclic aromatic hydrocarbons und molecular markers, determinant processes, und source apportionment. *J. Environ. Monit.* 9 : 456–464.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Mayer J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007c : Fate of PCBs, PAHs, und their source characteristic ratios during composting und digestion of source-separated organic waste in full-scale plants. *Environ. Pollut.* 148(2) : 520–528 .
- Bucheli T.D., Blum F., Desaulles A., Gustafsson O. 2004 : Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, und molecular markers in soils of Switzerland. *Chemosphere* 56(11) : 1061–1076.
- Bucheli T.D., Brändli R.C. 2006 : Two-dimensional gas chromatography coupled to triple quadrupole mass spectrometry for the unambiguous determination of atropisomeric PCB in environmental Proben. *J. Chromatogr. A* 1110 : 156–164.

- Candinas T., Besson J.-M., Humbel S. 1989 : Erhebung über die Qualität von Kompost aus getrennt gesammelten Siedlungsabfällen. Sonderdruck aus dem Tätigkeitsbericht FAC 1987–1988. Landw. Jahrbuch Schweiz 103 : 145–170.
- Candinas T., Kupper T., Chassot G.M., Besson J.-M. 1999 : Informationen zur Wegleitung zur Bewertung und Zulassung von Düngern und diesen gleichgestellten Erzeugnissen. Interner Bericht. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft IUL.
- Cornelissen G., Gustafsson O., Bucheli T.D., Jonker M.T.O., Koelmans A.A., and Van Noort P.C.M. 2005 : Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils : Mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation. *Environ. Sci. Technol.* 39(18) : 6881–6895.
- Erstfeld K.M., Snow-Ashbrook J. 1999 : Effects of chronic low-level PAH contamination on soil invertebrate communities. *Chemosphere* 39(12) : 2117–2139.
- Estermann R., Bartha-Pichler B. 2005 : Kompostier- und Vergärungsanlagen in der Schweiz, Jahresbericht 2005 : Suhr, CH : Sondernummer des Compost magazins, ARGE Inspektorat.
- European Communities 2005 : Waste generated and treated in Europe 1995–2003 : Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities. Brussel.
- Fountain M.T., Hopkin S.P. 2005 : *Folsomia candida* (Collembola) : A « standard » soil arthropod. *Annu. Rev. Entomol.* 50 : 201–222.
- Fricke K., Vogtmann H. 1994 : Compost quality : physical characteristics, nutrient content, heavy metals and organic chemicals. *Toxicol. Environ. Chem.* 43 : 95–114.
- Fricke K., Vogtmann H., Jager J., Wilken M. 1989 : Organische Schadstoffe in Bioabfallkomposten. *Müll und Abfall* 9 : 472–481.
- Fromme H., Küchler T., Otto T., Pilz K., Müller J., Wenzel A. 2002 : Occurrence of phthalates and bisphenol A and F in the environment. *Water Res.* 36(6) : 1429–1438.
- Fuchs J., Berner A., Bieri M., Galli U., Mayer J., Schleiss K. 2004 : Auswirkungen von Komposten und von Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit. Zusammenfassende Übersicht der aktuellen Literatur. Forschungsinstitut für biologischen Landbau, FiBL, Frick, Switzerland.
- Giesy J.P., Kannan K. 2002 : Perfluorochemical surfactants in the environment. *Environ. Sci. Technol.* 36(7) : 146A–152A.
- Hügi M., Kettler R. 2004 : Abfallstatistik 2002 : Mit Daten der KVA-Planung 2003. *Umwelt-Materialien* Nr. 186. Abfall. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- Hund K., Kurth H.H., Wahle U. 1999 : Entwicklung einer Untersuchungs- und Bewertungsstrategie zur Ableitung von Qualitätskriterien für Komposte. Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Schmallenberg, Germany.
- Jones K.C., de Voogt P. 1999 : Persistent organic pollutants (POP's) : state of the science. *Environ. Pollut.* 100(1–3) : 209–221.
- Junghans M., Backhaus T., Faust M., Scholze M., Grimme L.H. 2006 : Application and validation of approaches for the predictive hazard assessment of realistic pesticide mixtures. *Aquat. Toxicol.* 76(2) : 93–110.
- Kapanen A., Itavaara M. 2001 : Ecotoxicity tests for compost applications. *Ecotox. Environ. Safe.* 49(1) : 1–16.
- Keller A., Abbaspour K.C., Schulin R. 2002 : Assessment of uncertainty and risk in modeling regional heavy-metal accumulation in agricultural soils. *J. Environ. Qual.* 31(1) : 175–187.
- Keller A., von Steiger B., van der Zee S.E.A.T.M., Schulin R. 2001 : A stochastic empirical model for regional heavy-metal balances in agroecosystems. *J. Environ. Qual.* 30(6) : 1976–1989.
- Langenkamp H., Part P. 2001 : Organic contaminants in sewage sludge. European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability Soil and Waste Unit.
- Madsen P.L., Thyme J.B., Henriksen K., Moldrup P., Roslev P. 1999 : Kinetics of di-(2-ethylhexyl)phthalate mineralization in sludge amended soil. *Environ. Sci. Technol.* 33(15) : 2601–2606.
- Marb C., Scheithauer M., Bittl T., Köhler R., Veit N. 2003 : Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Josef-Vogel Technikum, Augsburg.
- McLachlan M.S., Czub G., Wania F. 2002 : The influence of vertical sorbed phase transport on the fate of organic chemicals in surface soils. *Environ. Sci. Technol.* 36(22) : 4860–4867.
- OFEPF 2003 : Fiche d'information sur l'interdiction des boues d'épuration – Questions et réponses concernant les boues d'épuration. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.
- Petersen S.O., Henriksen K., Mortensen G.K., Krogh P.H., Brandt K.K., Sorensen J., Madsen T., Petersen J., Gron C. 2003 : Recycling of sewage sludge and household compost to arable land : fate and effects of organic contaminants, and impact on soil fertility. *Soil Tillage Res.* 72(2) : 139–152.
- Plahl F., Rogalski W., Gilnreiner G., Erhart E. 2002 : Vienna's biowaste compost – quality development and effects of input materials. *Waste Manage. Res.* 20(2) : 127–133.

Pohl M. 2006: Side effects of two insect growth regulators and compost on the non target soil organisms *Folsomia fimetoria* and *Folsomia candida* (Collembola, Isotornidae), Master Thesis EPF Lausanne.

Rappe C., Andersson R., Studer C., Karlaganis G. 1997 : Decrease in the concentration of PCDDs und PCDFs in sewage sludge from Switzerland. *Organohalogen Compd.* 33 : 82–87.

Schmid P., Gujer E., Zennegg M., Bucheli T., Desaulles A. 2005 : Correlation of PCDD/F und PCB concentrations in soil Proben from the Swiss soil monitoring network (NABO) to specific parameters of the observation sites. *Chemosphere* 58(3) : 227–234.

Schwarzenbach R.P., Escher B.I., Fenner K., Hofstetter T.B., Johnson A.C., von Gunten U., Wehrli B. 2006 : The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science* 313 : 1072–1077.

Sellström U., De Wit A.A., Lundgren N., Tysklind M. 2005 : Effect of sewage-sludge application on concentrations of higher-brominated diphenyl ethers in soils und earthworms. *Environ. Sci. Technol.* 39(23) : 9064–9070.

Stämpfli C., Niang F., Becker van Slooten K., Kupper T., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005 : Impact écotoxicologique de l'épandage de compost sur des sols agricoles. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Staples C.A., Peterson D.R., Adams W.J. 1997 : The environmental fate of phthalate esters : a literature review. *Chemosphere* 35(4) : 667–749.

Sweetman A.J., Jones K.C. 2000 : Declining PCB concentrations in the UK atmosphere : evidence und possible causes. *Environ. Sci. Technol.* 34(5) : 863–869.

Taube J., Vorkamp K., Forster M., Herrmann R. 2002 : Pesticide residues in biological waste. *Chemosphere* 49(10) : 1357–1365.

Traulsen B.D., Schonhard G., Pestemer W. 1997 : Risk assessment of the application of biological waste compost on agricultural land use. *Agribiol. Res.* 50(2) : 102–106.

Publications

Brändli R.C. 2006 : Organic pollutants in Swiss compost and digestate. Thesis No 3599. EPF Lausanne.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer G., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005 : Persistent organic pollutants in source-separated compost and its feedstock materials – a review of field studies. *J. Environ. Qual.* 34(3) : 735–760.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer R., Stahel W., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007 : Organic pollutants in swiss compost and digestate. 1. Polychlorinated biphenyls, polycyclic aromatic hydrocarbons and molecular markers, determinant processes, and source apportionment. *J. Environ. Monit.* 9 : 456–464.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Mayer J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007 : Fate of PCBs, PAHs and their source characteristic ratios during composting and digestion of source-separated organic waste in full-scale plants. *Environ. Pollut.* 148(2) : 520–528.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006 : Optimized accelerated solvent extraction of PCBs and PAHs from compost. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 86(7) : 505–525.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006 : Can sources of environmental contamination with PAHs be identified in recipient matrices by concomitant analysis of molecular markers ? *Organohalogen Compd.* 68 : 292–295.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Zennegg M., Berger U., Edder P., Oehme M., Müller J., Schaffner C., Furrer R., Schmid P., Huber S., Ortelli D., Iozza S., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006 : Organic pollutants in source-separated compost. *Organohalogen Compd.* 68 : 863–866.

Brändli R.C., Kupper T., Bucheli T.D., Zennegg M., Huber S., Ortelli D., Müller J., Schaffner C., Iozza S., Schmid P., Berger U., Edder P., Oehme M., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007 : Organic pollutants in swiss compost and digestate ; 2. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and -furans, dioxin-like polychlorinated biphenyls, brominated flame retardants, perfluorinated alkyl substances, pesticides, and other compounds. *J. Environ. Monit.* 9 : 465–472.

Bucheli T.D., Brändli R.C. 2006 : Two-dimensional gas chromatography coupled to triple quadrupole mass spectrometry for the unambiguous determination of atropisomeric PCBs in environmental samples. *J. Chromatogr. A* 1110 : 156–164.

Bucheli T.D. 2006 : Rapport d'activité 2006. Micropolluants organiques dans les composts et les digestats. Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART (mars 2007).

Kettler R., Fuchs J., Kupper T. 2005 : Nutzen und Risiken von Kompost und Gärgut. In : Estermann R., Bartha-Pichler B. *Kompostier- und Vergärungsanlagen in der Schweiz, Jahresbericht 2005.* Suhr, CH : Sondernummer des Compost magazins, ARGE Inspektorat. 22–23.

Kupper T., Brändli R.C., Bucheli T.D., Staempfli C., Zennegg M., Berger U., Edder P., Pohl M., Niang F., Iozza S., Mueller J., Schaffner C., Schmid P., Huber S., Ortelli D., Becker van Slooten K., Oehme M., Mayer J., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006 : Organic pollutants in compost and digestate : occurrence, fate and impacts. In : Kraft E., Bidlingmaier W., de Bertoldi M., Diaz L.F., Barth J., (eds.). Proceedings of the International Conference ORBIT 2006 Biological Waste Management – From Local to Global, 13th to 15th of September 2006 ; Weimar. 1147–1156.

Pohl M., Staempfli C., Niang F., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J., Becker-van Slooten K. Ecotoxicological tests applied to compost : observation of inhibiting und stimulating effects. Appl. Soil Ecol. (in Vorbereitung).

Zennegg M., Brändli R., Kupper T., Bucheli T.D., Gujer E., Schmid P., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005 : PCDD/Fs, PCBs, PBDEs, TBBPA and HBCD in compost and digestate. *Organohalogen Compd.* 67 : 1040–1043.

Rapports

Aldrich A., Daniel O. 2003 : Literature based risk assessment. Final report on module 5a of the project « Organic pollutants in compost and digestates in Switzerland ». Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture.

Brändli R., Kupper T., Bucheli T., Mayer J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2004 : Occurrence and relevance of organic pollutants in compost, digestate and organic residues. Literature review. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture, Zürich.

Pohl M. 2006 : Side effects of two insect growth regulators and compost on the non-target soil organisms *Folsomia fimetaria* and *Folsomia candida* (Collembola, Isotomidae). Master Thesis EPF Lausanne.

Stämpfli C., Niang F., Becker van Slooten K., Kupper T., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005 : Impact écotoxicologique de l'épandage de compost sur des sols agricoles. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Présentations et posters

Présentations lors de conférences internationales

Brändli R.C. : PCBs and PAHs in compost and digestate. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture, Zürich. Platform presentation. SETAC Europe 15th Annual meeting, Lille, France, 22.–26. Mai 2005.

Zennegg M. : PCDD/Fs, PCBs, PBDEs, TBBPA and HBCD in compost and digestate. Swiss Federal Institute for Materials Science and Technology (EMPA), Laboratory of Organic Chemistry, Dübendorf. Platform presentation. 25th International Symposium on Halogenated Environmental Organic Pollutants and Persistent Organic Pollutants (POPs) – DIOXIN 2005, Toronto, 21.–26. August 2005.

Brändli R.C. : Can sources of environmental contamination with PAHs be identified in recipient matrices by concomitant analysis of molecular markers ? Platform presentation. 26th International Symposium on Halogenated Environmental Organic Pollutants and Persistent Organic Pollutants (POPs) – DIOXIN 2006, Oslo, 21.–25. August 2006.

Brändli R.C. : Organic pollutants in source-separated compost. Platform presentation. 26th International Symposium on Halogenated Environmental Organic Pollutants and Persistent Organic Pollutants (POPs) – DIOXIN 2006, Oslo, 21.–25. August 2006.

Kupper T. : Organic pollutants in compost and digestate : occurrence, fate and impacts. Orbit Conference 2006, Weimar. 13.–15. September 2006.

Poster lors de conférences internationales

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Tarradellas J. : Accelerated solvent extraction of PAH and PCB in compost, digestate and input material. Poster. 9th FECS (Federation of Chemical Societies and Professional Institutions) Conference und 2nd SFC (Société Française de Chimie) meeting on Chemistry and the Environment : Behaviour of Chemicals in the Environment. Bordeaux, F, 29. August – 1. September 2004.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J. : Persistent organic pollutants in compost and its input materials – a review of field studies. Poster. 9th FECS (Federation of Chemical Societies and Professional Institutions) Conference und 2nd SFC (Société Française de Chimie) meeting on Chemistry and the Environment : Behaviour of Chemicals in the Environment. Bordeaux, F, 29. August – 1. September 2004.

Aldrich A., Daniel O. : Literature based ecotoxicological risk assessment of compost use for Soil organisms. Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture, Zürich. Poster. SETAC Europe 15th Annual meeting, Lille, F, 22.–26. Mai 2005.

Stämpfli C., Niang F., Kupper T., Brändli R., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J., Becker van Slooten K. : Ecotoxicological Risk Assessment of Compost and Digestates in Switzerland. Poster. SETAC Europe 15th Annual meeting, Lille, F, 22.–26. Mai 2005.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer R., Stahel W., Stadelmann F.X., Tarradellas J. Source apportionment of POPs in Swiss compost and digestate. Poster. SETAC Europe 16th Annual meeting, Den Haag, NL, 07.–11. Mai 2006.

Kupper T., Brändli R.C., Zennegg M., Berger U., Edder P., Iozza S., Mueller J., Schaffner C., Bucheli T.D., Schmid P., Huber S., Ortelli D., Oehme M., Mayer J., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. : Occurrence and sources of organic pollutants in compost and digestate. Poster. SETAC Europe 16th Annual meeting, Den Haag, NL, 07.–11. Mai 2006.

Autres exposés

Kupper T. : Projekt Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz. Referat. Informationstagung Abfall des BUWALs und der Kantone, Zürich, 18. Juni 2003.

Kupper T. : Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Referat. Herbstanlass des VKS. Diegten, 20. November 2003.

Brändli R.C. : Projekt Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz. Referat MARSEP und VBBO Tagung, Liebefeld, 25. Mai 2004.

Brändli R. : Organische Schadstoffe im Kompost und in dessen Ausgangsmaterial. Referat. Kolloquium der FAL Zürich-Reckenholz, 6. Dezember 2004.

Brändli R.C. : PAH und PCB Analysen in Kompost und Gärgut : Probenaufbereitung, Lagerung und Extraktion mittels ASE. Referat. Dionex Seminar. Olten, 16. November 2004.

Becker van Slooten K. : Verbleib, Verhalten und Auswirkungen von organischen Schadstoffen in Böden. Referat. Düngerseminar : Stoffflüsse, Bodenqualität und Nahrungsmittelsicherheit WS 2004/05 des Instituts für Pflanzenwissenschaften, Gruppe für Pflanzenernährung der ETH. Zürich, 28. Oktober 2004.

Kupper T. : Organische Schadstoffe : Belastung von Recyclingdüngern und Eintrag in die landwirtschaftlichen Böden unter besonderer Berücksichtigung von Kompost. Referat. Düngerseminar : Stoffflüsse, Bodenqualität und Nahrungsmittelsicherheit WS 2004/05 des Instituts für Pflanzenwissenschaften, Gruppe für Pflanzenernährung der ETH. Zürich, 28. Oktober 2004.

Stadelmann F.X. : Nutzen und Risiken von Kompost : Erfahrungen aus der Klärschlamm-Leidensgeschichte. Referat. Düngerseminar : Stoffflüsse, Bodenqualität und Nahrungsmittelsicherheit WS 2004/05 des Instituts für Pflanzenwissenschaften, Gruppe für Pflanzenernährung der ETH. Zürich, 28. Oktober 2004.

Brändli R.C. : Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Referat. Begleitende Expertengruppe (BEG) der Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), 8. Treffen in Zürich-Reckenholz. 4. November 2005.

Brändli R.C. Persistent Organic Pollutants (POPs) in Swiss Compost. Referat. Annual Symposium of the PhD Program for Sustainable Agriculture (ASPSA), Zürich 4. November 2005.

Kupper T. : Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut in der Schweiz : Aktuelle Resultate der laufenden Untersuchungen und neueste Erkenntnisse. Referat. Herbstanlass des VKS. Malters, 24. November 2005.

Brändli R. : Organic pollutants in Swiss compost, digestate and presswater. Referat. MARSEP und VBBO Tagung, Liebefeld, 30. Mai 2006.

Brändli R. Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut in der Schweiz. Referat. Jahresversammlung der Schweizerischen Gesellschaft für Lebensmittel- und Umweltchemie (SGLUC), Solothurn, 15. September 2006.

Kupper T. : Schadstoffe in Kompost und Gärgut : neueste Erkenntnisse und Kenntnislücken bezüglich Produkten aus landwirtschaftlichen Co-Vergärungsanlagen. Referat. Düngerseminar : Aktuelle Aspekte von Nährstoffkreisläufen in Agrarökosystemen WS 2006/07 des Instituts für Pflanzenwissenschaften, Gruppe für Pflanzenernährung der ETH. Zürich, 3. November 2006.

Brändli R.C. : Pollutants in compost and digestate from Switzerland and from developing countries. Referat. Sandec Seminar, Eawag. Dübendorf 2006.

> Étude n° 2

Influences de compost et de digestat sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes

Table des matières

1	Résumé	50		8	Recommandations pour la pratique	114
				8.1	Recommandations pour les collaborateurs des installations de méthanisation et de compostage	114
2	Introduction	51		8.1.1	Choix des intrants	114
2.1	Buts du projet	51		8.1.2	Problématique du risque de blocage de l'azote dans les champs	115
3	Présentation du projet	53		8.1.3	Influence de la gestion du processus sur la qualité biologique des composts	116
4	Matériel et méthode	54		8.1.4	Stabilité de l'humus	116
4.1	Choix des composts	54		8.1.5	Post-traitement des digestats	117
4.2	Analyses chimiques et physiques	56		8.1.6	Production de composts suivant l'utilisation et l'effet recherchés	117
4.2.1	Stabilité des humus	56		8.2	Recommandations pour l'utilisateur de compost et de digestat	118
4.3	Analyses biologiques	56		8.2.1	Définir les utilisations et les effets recherchés	118
4.3.1	Activités enzymatiques	56		8.2.2	Choix du compost et des concepts d'utilisation	118
4.3.2	Tests de phytotoxicité	57		8.3	Recommandations pour les méthodes de caractérisation de compost	119
4.3.3	Tests de suppressivité	57		8.3.1	Analyses chimiques de base	119
4.3.4	Détermination de la minéralisation de l'azote dans la terre	58		8.3.2	Stabilité des humus	120
5	Caractérisation de digestat et compost suisses : résultats	59		8.3.3	Qualité biologique des composts	120
5.1	Caractéristiques physico-chimiques de compost	60		8.4	Travaux de recherches futurs : lacunes à combler prioritairement	121
5.2	Caractérisation de la maturité et de la stabilité de compost et digestat	72		8.4.1	Evaluation des risques de blocage de l'azote dans les champs suite à l'application de composts et digestats	121
5.3	Activités biologiques de digestat et compost	77		8.4.2	Mesure d'optimisation de la conduite de la fermentation pour augmenter la qualité biologique des composts	121
5.4	Influence de digestat et compost sur la dynamique de l'azote minéral dans le sol	81		8.4.3	Effet à long termes des divers composts et digestats sur la fertilité des sols et la santé des plantes	122
5.5	Influence de digestat et compost sur la croissance et la santé des plantes	84				
5.6	Influence du mode de production des composts sur leurs caractéristiques chimiques, physiques et biologiques	88		9	Conclusions	124
6	Post-traitement de digestat : résultats	95				
7	Essais à moyen terme d'utilisation aux champs de digestat et de compost	105				
7.1	Influence du compost sur la croissance du maïs	106				
7.2	Influence du compost sur les caractéristiques du sol	108				

1 > Résumé

Environ 600'000 tonnes de déchets organiques sont recyclés chaque année en Suisse. A long terme, seuls les composts et digestats avec une action bénéfique sur les sols pourront trouver un débouché. Dans le cadre de cette problématique, l'OFEV, l'OFEN et le canton de Zurich ont financé le présent projet «Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes», projet coordonné avec le projet EPFL/ART «Polluants organiques dans les composts et digestats» dirigé par Thomas Kupper (SHL).

La stabilité des produits augmente avec leur maturation, ce qui se traduit d'une part par des extraits aqueux plus clairs, et d'autre part par des teneurs en acides humiques plus importantes. En contrepartie, l'activité biologique des composts, caractérisée par le potentiel respiratoire des produits et par leurs activités enzymatiques, diminue avec l'avancement du processus. Les composts deviennent également de plus en plus compatibles avec la croissance des plantes. A ce sujet cependant, il faut relever que la conduite du processus joue un rôle important quand à la qualité biologique du produit final. Ceci est également observable en ce qui concerne le pouvoir de suppression des maladies.

Six mois après l'épandage du compost, une augmentation nette du pH des sols a encore pu être observée. Par contre, les sols ne se différenciaient pas sur le plan de leur réceptivité aux maladies. Il est toutefois probable que cela vienne du fait que l'équilibre microbien de ces champs, cultivés depuis plusieurs années selon le mode de production biologique, est déjà proche de son optimum.

Le post-traitement de digestats permet la production de composts de bonne qualité. Lors de ce traitement, une attention particulière doit être portée à l'humidité des tas, afin d'éviter les pertes en azote sous forme ammoniacale. A ce sujet, l'ajout de broyat ou de compost frais apporte un avantage certain.

En conclusion, la présente étude a mis en évidence le fait que la qualité générale des digestats et composts suisses est bonne. Toutefois, la responsabilité du producteur de compost est importante, la conduite du processus pouvant fortement influencer la qualité du produit fini. Au niveau de l'utilisation des composts, une attention particulière doit être portée au choix du produit en relation avec les buts recherchés. Une meilleure connaissance des produits permet un meilleur succès lors de son utilisation, et un dialogue plus approfondi entre le producteur et l'utilisateur du compost est souhaitable. Ainsi, une des priorités pour assurer l'avenir du compostage et de la méthanisation doit être portée sur la formation des acteurs de cette filiale, et ceci aussi bien au niveau du processus lui-même qu'au niveau de l'utilisation des produits finis.

2 > Introduction

En Suisse, environ 600'000 tonnes de déchets organiques sont compostés ou méthanisés par année. Ce recyclage de la matière organique est écologiquement judicieux. Toutefois, les produits finaux de ces opérations, à savoir les composts et digestats, n'ont pas toujours une bonne image aux yeux de leurs utilisateurs potentiels, malgré le fait que l'on ne peut composter ou méthaniser en Suisse que des déchets organiques triés à la source. Le compostage global des ordures n'existe pratiquement plus en Suisse depuis trente ans. Cependant, des réticences à utiliser composts et digestats se rencontrent encore souvent dans la pratique, la qualité moindre de ces composts d'ordures d'autrefois ainsi que celle des boues d'épuration nuisant encore fortement l'image des composts d'aujourd'hui. Il est ainsi compréhensible que les autorités se sont concentrées en priorité à tout d'abord prendre des mesures pour maintenir le plus bas possible les polluants éventuels des composts et des digestats. Toutefois, cette démarche pouvait éveiller l'impression auprès de la population que ces produits sont potentiellement dangereux.

Ces mesures de précautions, somme toute judicieuses, ont fait passer au second plan les aspects positifs de compost et digestat sur la fertilité des sols, sur la stabilité des rendements et sur la santé des plantes. Dans certains cas, ces valeurs n'étaient même plus perçues. Il est ainsi maintenant grand temps de caractériser ces effets positifs que peuvent apporter composts et digestats, et de les communiquer aux utilisateurs potentiels de ces produits. Ceci a cependant aussi pour condition que les producteurs de compost et de digestat soient attentifs de façon conséquente au fait de ne produire que des composts améliorant la valeur des sols. Ainsi, les paramètres de qualité doivent être élargis dans cette direction, ce qui nécessite l'élaboration des connaissances et des faits nécessaires à cette démarche. C'est seulement comme cela que l'on pourra assurer à long terme les débouchés des composts et digestats, et qu'un recyclage de la matière organique judicieux du point de vue écologique et économique pourra être garanti et accepté par la société.

2.1 Buts du projet

Le but du présent projet était d'évaluer les effets d'application de composts et de digestats sur la croissance et la santé des plantes, sur les paramètres du sol et sur l'environnement. Ainsi, une base doit être élaborée, afin ensuite :

- a) de recenser et de juger de la durabilité de l'application de composts et de digestats selon les aspects économiques, écologiques et sociaux.
- b) d'optimiser les divers produits (digestats, composts frais, composts mûrs)
- c) d'optimiser les processus de production (assurance-qualité)
- d) de pouvoir réaliser des travaux de relations publics sur les risques et les avantages de l'utilisation de composts et de digestats.

Lors de ce projet, l'utilisation pratique des composts et digestats a représenté le point central. Les connaissances obtenues lors de ce projet sont ainsi en grande partie applicables directement dans la pratique.

Ce projet a été réalisé en coordination avec le projet EPFL/ART : « Polluants organiques dans les composts et digestats » (chef de projet : Thomas Kupper).

3 > Présentation du projet

Le projet «Influences de compost et de digestat sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes» est organisé en différents modules. Dans le premier module, une étude bibliographique de l'état des connaissances sur ce thème a été réalisée. Cette étude a été publiée en 2004 par le FiBL (Fuchs J.G., Bieri M. & Char-donnens M. 2004 : Influences de compost et de digestat sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes : Survol de la bibliographie actuelle).

Les quatre modules suivants se sont concentrés sur la caractérisation et l'évaluation de la qualité agronomique d'une centaine de composts représentatifs suisses (voir chapitre 5). Ces travaux se sont déroulés en coordination avec le projet EPFL/ART «Polluants organiques dans les composts et digestats» dirigé par Thomas Kupper de l'EPFL.

Divers aspects spécifiques ont ensuite été étudiés dans des modules séparés : possibilités de post-compostage des digestats (chapitre 6), effet à moyen terme de divers composts dans deux sols agricoles (chapitre 7) et élaboration d'un concept pour la réalisation d'essais de longue durée pour caractériser l'effet de composts et de digestats sur la fertilité des sols et sur la santé des plantes.

En complément à cette étude, un module concernant l'intégration dans les bilans écologiques des valeurs positives des composts et digestats sur la croissance et la santé des plantes ainsi que sur la fertilité du sol est en cours de réalisation.

4 > Matériel et méthode

4.1 Choix de compost

Pour la caractérisation et l'évaluation de la qualité agronomique de compost et digestat de Suisse, un échantillon représentatif de cent produits a été collecté sur tout le territoire suisse. Les critères pris en compte et la répartition de compost et digestat sont présentés dans le tableau 1.

Il existe de nombreuses différentes sortes de composts, produits à partir de divers intrants et selon des techniques différentes, avec des degrés de maturité variables, etc. Ainsi, un choix représentatif des divers produits du marché suisse est essentiel.

En ce qui concerne le choix des échantillons, un compromis pour satisfaire aux besoins des deux projets « Polluants organiques dans les composts et digestats » et « Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes composts » a été réalisé. Ainsi, les échantillons proviennent de toutes les régions géographiques de Suisse, même si une partie importante des échantillons a été prélevée dans le plateau suisse, le compostage n'étant pas très répandu dans les montagnes. La plupart des systèmes de compostage en vigueur en suisse ont été pris en compte, compostage en bords de champs et en halles fermées compris. Un des buts du choix des échantillons était d'obtenir un panel de composts reflétant la répartition du marché. Ainsi, près de la moitié des échantillons sont des composts ou digestats destinés à l'agriculture, un tiers des composts destinés à l'horticulture, et un sixième des composts utilisés dans les cultures couvertes. Le résultat de ce choix est présenté dans le tableau 1.

Photo 1 > Prélèvement d'un échantillon de compost représentatif dans un tas de compost



La prise d'échantillonnage a été réalisée selon les directives FAC 1995 (Compost et boues d'épuration. Instructions et recommandations de la Station fédérale de recherches en chimie agricole et sur l'hygiène de l'environnement (FAC) dans le domaine des engrais de déchets. EDMZ Art.-Nr. 730.920.f).

La prise d'échantillon était en général composée de quatre sous-échantillons. Pour cela, un profil vertical a été creusé avec un croc. Suivant la hauteur du tas, une couche d'épaisseur régulière de deux à dix centimètres a été grattée puis placée dans un box en plastique. De chaque emplacement de prise d'échantillon, au maximum 2 pelles ont été prélevés.

Tab. 4.1 > Critères pris en compte dans le choix de l'échantillonnage des composts étudiés et nombres de composts analysés de chaque catégorie

a) Origine des matières traitées	<ul style="list-style-type: none"> • origine urbaine : 59 • origine rurale 42
b) Composition des matières traitées	<ul style="list-style-type: none"> • sans restes de cuisines : 52 • avec restes de cuisine : 49
c) Produits analysés (selon directives ASIC 2001 : Fuchs, J., Galli, U., Schleiss, K., Wellinger, A. 2001. Directive de l'ASIC 2001 : Caractéristiques de qualité des composts et des digestats provenant du traitement des déchets organiques. Editeur : ASIC (Association Suisse des Installations de Compostage), Schönbühl (Suisse), 11 pp.)	<ul style="list-style-type: none"> • digestats solides : 11 • digestats liquide (eaux de pressage) : 4 • composts pour agriculture : 34 • composts pour horticulture : 36 • composts pour cultures couverts / hobby : 16
d) Systèmes de compostage	<ul style="list-style-type: none"> • méthanisation thermophile : 15 • méthanisation mésophile : 5 • andins triangulaires < 2m de hauteur : 16 • andins triangulaires > 2m de hauteur : 25 • andins tabulaires à ciel ouvert. 7 • boxes aérés : 5 • canaux / halles aérées : 4 • bords de champs 9 • combinaison méthanisation – compostage : 10 • combinaison boxes – andins : 2 • vermicompostage : 3
e) Technique de brassage des tas	<ul style="list-style-type: none"> • pas de brassages : 3 • avec chargeuse sur pneus : 39 • avec brasseuse : 52 • combinaison chargeuse sur pneus et brasseuse : 2
f) Intensité des brassages	<ul style="list-style-type: none"> • jamais : 3 • < 1x par semaine : 44 • 1x par semaine : 20 • 2-3x par semaine : 29 • > 3x par semaine : 0
g) Hygiénisation	<ul style="list-style-type: none"> • conditions légales pas remplies : 3 • au minimum 3 semaines > 55 °C : 38 • au minimum 1 semaines > 65 °C : 47
h) Aération active	<ul style="list-style-type: none"> • aucune : 66 • pendant la phase de chaleur : 26 • pendant le stockage : 3 • pendant la phase de chaleur et le stockage : 4
i) Conduite de l'humidité	<ul style="list-style-type: none"> • trop sec : 48 • optimal : 40 • trop mouillé : 8

4.2 Analyses chimiques et physiques

Les analyses chimiques et physiques ont été réalisées selon les méthodes de référence des stations fédérales de recherches agronomiques (FAL 1997 : Méthodes de référence des stations fédérales de recherches agronomiques. Volume 1, Analyses de sols pour conseils de fumure FAL, RAC, FAW. Actualisation annuelle)⁶.

4.2.1 Stabilité des humus

Différentes extraction des humus ont été réalisées pour caractériser leur stabilité.

L'indice humique est déterminé en mesurant à 550 nm l'absorption de l'extrait aqueux 2 : 1 réalisé pour la détermination de la salinité.

Extraction à l'eau

0,5 g de compost ou digestat séché à l'air ambiant et moulu à 0,5 mm sont extraits pendant 18 heures dans une solution de pyrophosphate (11,15 g de $\text{Na}_4\text{O}_7\text{P}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dans 1 litre d'eau déminéralisée). après filtration, l'index pyrophosphate est déterminé en mesurant l'absorption de l'extrait à 550 nm.

Extraction pyrophosphate

Cette extraction est, tout comme celle pyrophosphate, effectuée à un pH basique. 5 g de compost ou digestat séché à l'air ambiant et moulu à 0,5 mm sont extraits pendant 1 minute dans 20 ml d'une solution NaOH/ Na_2EDTA (15 g Na_2EDTA + 2 g de NaOH dans 1 litre d'eau déminéralisée). Après filtration, l'index NaOH est déterminé en mesurant l'absorption de l'extrait à 550 nm.

Extraction NaOH

4.3 Analyses biologiques

4.3.1 Activités enzymatiques

Cette méthode est basée sur la détermination des sucres réduits libérés après l'incubation pendant 24 heures à 50 °C des composts ou digestats avec du CMC (sel de sodium-carboxyméthylcellulose). Avec cette méthode, l'activité des endoglucanases et des β -glucosidases peut être estimée, toutefois pas celle des exoglucanases. La méthode décrite par Alef et Nannipieri ((Alef, K., Nannipieri, P. 2002 : Practical Use of Quality Compost for Plant Health and Vitality Improvement. Dans : Insam H, Riddech N, Klammer S (eds.): Microbiology of Composting, Springer Verlag, Heidelberg, pp. 345–347)) a été utilisée, avec 1 g de compost tamisé à 2 mm dans 15 ml de solution tampon acétate et 15 ml de CMC. L'activité cellulase est alors exprimée en [μg GLC/g MS/ 24h] (GLC : équivalent glucose).

Activité cellulase

Suite à une incubation pendant 24 heures à 30 °C avec du compost ou du digestat, la quantité de triphényltetrazoliumformazan (TTF) réduit par les déshydrogénases à partir

Activité déshydrogénase

⁶ Les analyses spécifiques aux composts (respiration microbienne, autoéchauffement, etc. ont été réalisées selon les méthodes de la Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V (Kehres, B., & Pohle A. 1998 : Methodenbuch zur Analyse von Kompost, 4. ergänzte und überarbeitete Auflage Juli 1998, publié par Verlag Abfall Now e.V., Stuttgart)

d'une solution de triphényltetrazoliumchloride (TTC) est déterminée. Pour cela, le TTF est extrait avec de l'acétone, puis est quantifié par mesure photométrique à 546 nm. L'activité déshydrogénase est alors exprimée en [$\mu\text{g TTF/g MS/h}$].

Cette méthode est basée sur la détermination de la fluorescéine provenant de la décomposition dans le compost de la fluorescéine di acétate. L'analyse se fait selon la méthode d'Inbar et al. (Inbar, Y., Boehm, M.J. and Hoitink, H.A.J. 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). L'activité FDA est alors exprimée en [$\mu\text{g FDA hydrolysé /g MS/min}$].

Activité FDA (fluorescéine di acétate)

Cette méthode est basée sur la détermination des acides aminés libérés lors de l'incubation pendant deux heures à 50 °C de compost ou de digestat avec du caséinate de sodium. La méthode décrite par Alef et Nannipieri (2002) a été utilisée, avec 0,5 g de compost tamisé à 2 mm dans 12,5 ml de solution tampon plus 12,5 ml de caséinate de sodium. L'activité protéase est alors exprimée en [$\mu\text{g tyrosine/g MS/ 2h}$].

Activité protéase

Cette méthode est basée sur la détermination de l'ammonium libérés lors de l'incubation pendant deux heures à 37 °C de compost ou de digestat avec dans une solution d'urée (4,8 g d'urée par litre d'eau déminéralisée). La méthode décrite par Alef et Nannipieri (2002) a été utilisée, avec 1 g de compost tamisé à 2 mm dans 2,5 ml de solution urée plus 50ml de solution KCl (74,6 g de KCL + 10ml de HCl 1M dans 1 l d'eau déminéralisée). L'activité uréase est alors exprimée en [$\mu\text{g NH}_4\text{-N/g MS/ 2h}$].

Activité uréase

4.3.2 Tests de phytotoxicité

Les tests de phytotoxicité ont été réalisés selon Fuchs et Bieri (Fuchs, J.G., Bieri, M. 2000. Neue Pflanzentests, um die Kompostqualität zu charakterisieren. Agrarforschung 7: 314–319). Les tests suivants ont été réalisés : cresson ouvert, cresson fermé, salade, haricot et raygras. Les composts et digestats ont été tamisés à 10 mm avant la réalisation des tests. Les résultats des tests sont exprimés en % de croissance des plantes dans le compost ou digestat par rapport à la croissance des plantes dans le substrat de référence BRS-200 (Biophyt AG, CH-5465 Mellikon).

4.3.3 Tests de suppressivité

Pour tester le pouvoir des composts et des digestats à protéger les plantes contre les maladies, 20 % de compost ou de digestat tamisé à 10mm ont été mélangés à du substrat universel «Einheitserde® type 0» (Einheitserde Werkverband, D-36391 Sinnthal-Jossa) fertilisé avec 0,56g de scories Thoma, 1,33 g potassium de magnésium et 2,3 g de poudre de corne par litre de substrat. Les deux tests de suppressivité ont été réalisés sur la base des travaux de Fuchs (Fuchs, J.G. 2002. Practical Use of Quality Compost for Plant Health and Vitality Improvement; pp. 435–444 in : Insam H, Riddech N, Klammer S (eds.), Microbiology of Composting, Springer Verlag, Heidelberg, 641pp.).

Par litre de substrat, trois quantités d'une culture sur millet de *Pythium ultimum* âgée de 10 jours ont été mélangées : 0, 0,25 et 3 g par litre de substrat. Par variante, 6 pots en plastiques de 9 cm de diamètre ont été remplis avec ces mélanges, puis 5 graines de concombre de la variété « Serpent de Chine » ont été semées par pot. Après environ 14 jours, le nombre de plantes levées par pot est déterminé. Les résultats des tests sont exprimés en % de protection, en comparant la diminution de levée due à l'agent pathogène dans le substrat avec compost par rapport à la diminution de levée due à l'agent pathogène dans le substrat sans compost.

Test de protection des
concombres contre *Pythium*
ultimum

Par variante, 6 pots en plastiques de 9 cm de diamètre sont utilisés. Environ 1 cm de mélange substrat-compost est placé dans le fond des pots, puis trois quantités d'une culture sur millet de *Rhizoctonia solani* y ont été ajoutées par pot : 1 g de sable fin sans agent pathogène, 1 g d'un mélange de 0,25 g de *R. solani* + 48,75 g de sable fin, et 1 g d'un mélange de 5 g de *R. solani* + 45 g de sable fin. Vingt graines de basilic à grandes feuilles ont alors été semées par pot. Après environ 10, 17 et 21 jours, le nombre de plantes par pot est déterminé. La mortalité des plantes par pot est alors déterminée. Les résultats des tests sont exprimés en % de protection, en comparant l'augmentation de mortalité due à l'agent pathogène dans le substrat avec compost par rapport à l'augmentation de mortalité due à l'agent pathogène dans le substrat sans compost.

Test de protection des basilics
contre *Rhizoctonia solani*

4.3.4 Détermination de la minéralisation de l'azote dans la terre

Afin de caractériser l'évolution de l'azote minéral dans la terre suite à l'amendement de compost ou de digestats, la méthode d'incubation B-ND-BA des « Méthodes de référence des stations la méthode fédérales de recherches agronomiques » (FAL 1996), légèrement modifiée, a été employée.

Pour l'étude de la minéralisation de l'azote à partir d'engrais organiques, un dosage d'azote minéralisable de 100 mg N/150g MF de sol ne doit pas être dépassé, la demande en oxygène étant alors trop importante. Suivant la teneur du compost en azote, entre 5 et 15 grammes de compost ont été ajoutés à 150 g de sol de référence et placés dans les boîtes d'incubation. Trois boîtes par semaine d'analyse ont été remplies, ce qui correspond à un besoin de 12 boîtes d'incubation par compost pour les semaines 2, 4, 6 et 8 plus une boîte pour la détermination de l'azote minéral au début de l'essai. Le même nombre de boîtes doit être rempli avec 165g de sol de référence (témoin). La teneur en eau des mélanges sol-compost est ajustée, puis les boîtes sont alors incubées à 25 °C. Tous les 14 jours, 3 boîtes d'incubation par variante sont prélevées, extraites immédiatement et leur teneur en azote minéral analysée.

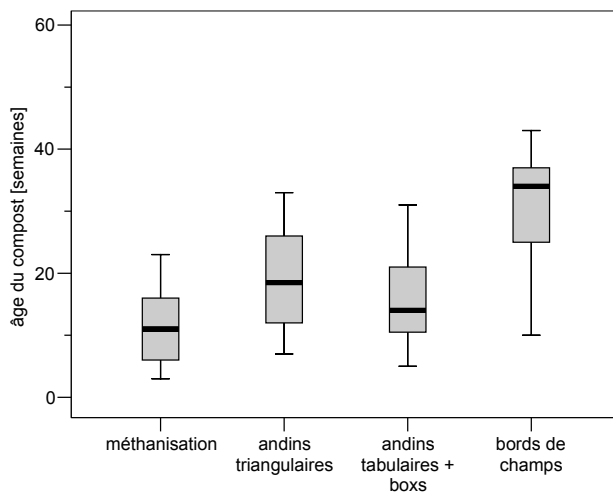
La moyenne des résultats des trois répétitions est calculée pour déterminer les variations des teneurs en azote minéral des mélanges sols-composts. La variation moyenne de l'azote ammonium et de l'azote nitrate est exprimée en mg d'azote par kg de MS de sol. La minéralisation (ou l'immobilisation) de l'azote des composts est calculé comme la différence des valeurs mg N/kg sol-compost moins mg N/kg sol.

5 > Caractérisation de digestat et compost suisses : résultats

De part la nature du produit, les caractérisations de tous les paramètres étudiés n'ont pas pu être effectuées avec les eaux de pressage. Il faut d'autre part noter que seuls quatre échantillons d'eaux de pressage ont été prélevés et analysés, l'interprétation des résultats de ce produit demandant donc une prudence extrême.

De manière générale, il est intéressant de remarquer que les composts réalisés en bords de champs restent en moyenne plus longtemps en tas (fig. 5.1). La place n'étant pas le facteur limitant de ce système, le compost reste en général en bords de champs jusqu'à ce que les conditions pour son utilisation soient remplies (champs récoltés, conditions météorologiques appropriées, etc.). Dans les autres systèmes de compostage, le compost doit être livré ou stocké différemment pour laisser la place aux nouvelles charges de produit.

Fig. 5.1 > Âge de digestat et compost produits en Suisse en fonction du système de compostage



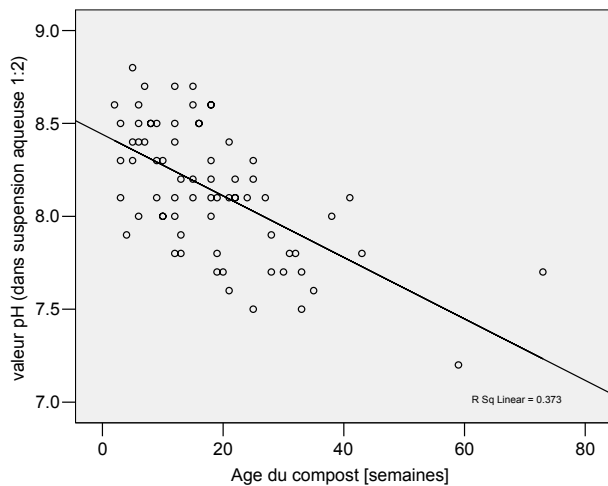
5.1

Caractéristiques physico-chimiques de compost

De manière générale, le **poids volumétrique** des produits augmente avec leur maturation (tab. 1) : le compost pour les cultures couvertes sont en moyenne plus lourds que le compost agricole ou que le digestat. Ceci n'est pas dû à leur tamisage, mais à l'avancée de la maturation elle-même des produits. Ainsi, une relation claire entre la teneur en matière organique de compost et digestat et leur poids volumétrique a été observée (fig. 5.2).

Fig. 5.2 > Caractérisation de la teneur en matière organique de 100 composts suisses, caractérisée par la perte au feu, et leur poids volumétrique

Teneur en matière organique en relation avec le poids volumétrique des produits



Teneur en matière organique selon les classes de produits

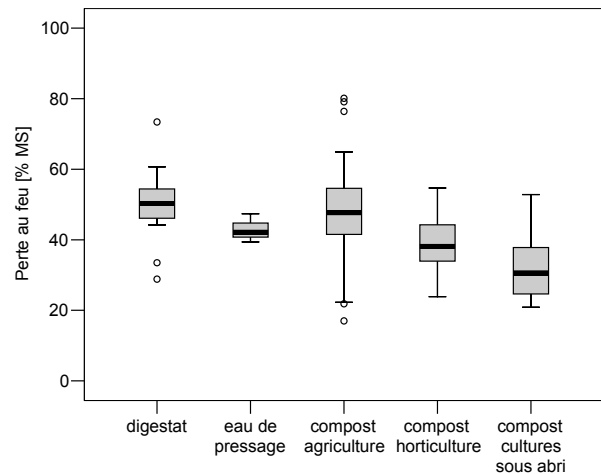


Photo 2 > Différences structurales entre les divers produits

Digestat



Compost pour cultures sous abris



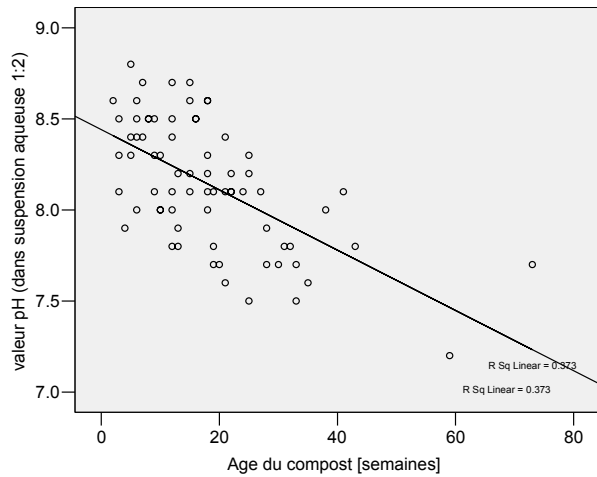
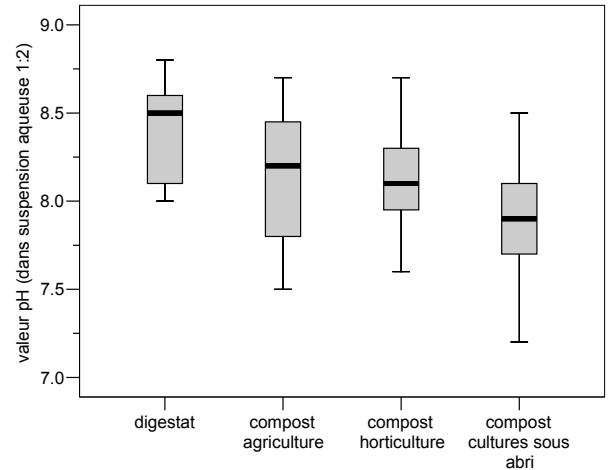
Tab. 5.1 > Caractéristiques physico-chimiques des composts et digestats suisses

Classification des produits selon directives ASIC 2001		Poids volumétrique [g/l]	Matière sèche [% MF]	Perte au feu [% MS]	Capacité de rétention [%]	Salinité (extrait aqueux 1 : 10) [µS]	Valeur pH (dans filtrat aqueux 1 : 2)	Valeur pH (dans suspension aqueuse 1 : 2)	Valeur pH (dans filtrat aqueux 1 : 10)	Valeur pH (dans suspension aqueuse 1 : 10)
Digestat (n=11)	Médiane	468	53,1	50,3	58,1	2930	8,5	8,5	9,1	9,2
	Quantile 10 %	328	48,1	33,5	49,6	1965	8,2	8,0	8,5	8,6
	Quantile 90 %	577	69,1	60,7	63,0	3435	8,6	8,7	9,3	9,3
	Minimum	321	45,4	28,9	49,6	1220	8,1	8,0	8,4	8,5
	Maximum	631	75,2	73,4	67,2	3920	8,6	8,8	9,3	9,3
	Moyenne	472	55,9	49,7	57,2	2829	8,4	8,4	9,0	9,0
	Ecart-type	98	9,7	12,2	5,4	720	0,2	0,3	0,3	0,3
Eaux de pressage (n=4)	Médiane	pas déterminé	15,2	42,1	pas déterminé	pas déterminé	pas déterminé	pas déterminé	pas déterminé	pas déterminé
	Quantile 10 %		9,0	39,9						
	Quantile 90 %		15,4	46,3						
	Minimum		7,5	39,4						
	Maximum		15,5	47,4						
	Moyenne		12,7	43,0						
	Ecart-type		4,5	4,1						
Compost pour agriculture (n=34)	Médiane	556	50,8	47,7	57,5	3343	8,4	8,2	8,9	9,1
	Quantile 10 %	472	40,0	32,6	48,7	1634	8,1	7,7	8,3	8,7
	Quantile 90 %	669	61,0	64,1	63,6	4376	8,6	8,5	9,2	9,3
	Minimum	412	28,2	17,0	36,4	920	7,8	7,5	8,2	8,5
	Maximum	851	73,4	80,1	76,6	5260	8,7	8,7	9,3	9,4
	Moyenne	570	50,7	48,2	56,8	3114	8,4	8,1	8,8	9,1
	Ecart-type	101	9,5	14,4	7,1	1085	0,2	0,4	0,4	0,3
Compost pour horticulture (n=36)	Médiane	609	56,7	38,1	58,0	2653	8,4	8,1	8,9	9,0
	Quantile 10 %	499	47,1	26,8	48,9	1774	8,1	7,8	8,4	8,7
	Quantile 90 %	745	66,2	49,3	63,4	4240	8,5	8,5	9,1	9,2
	Minimum	434	40,8	23,9	23,8	675	7,8	7,6	7,5	8,3
	Maximum	836	71,1	54,7	64,8	7575	8,7	8,7	9,4	9,5
	Moyenne	624	55,9	38,4	56,3	2957	8,3	8,1	8,8	9,0
	Ecart-type	101	7,7	8,1	7,8	1327	0,2	0,3	0,4	0,3
Compost pour cultures sous abris (n=16)	Médiane	715	56,3	30,5	57,5	3090	8,3	7,9	8,6	8,9
	Quantile 10 %	658	41,3	22,7	54,5	1458	7,8	7,6	8,1	8,3
	Quantile 90 %	862	61,9	46,1	66,9	4500	8,4	8,3	9,0	9,2
	Minimum	631	32,2	20,9	39,8	1316	7,4	7,2	7,7	7,7
	Maximum	904	64,5	52,8	74,5	6215	8,5	8,5	9,3	9,5
	Moyenne	742	54,0	32,7	58,5	3076	8,2	7,9	8,5	8,8
	Ecart-type	82	9,2	9,6	7,4	1356	0,3	0,3	0,4	0,4

La teneur en **substance organique** des produits, déterminée par la perte au feu, diminue avec le degré de maturation des produits (tab. 5.1, fig. 5.2). Les composts destinés à l'agriculture ont en moyenne 48 % de matière organique, alors que ceux utilisés dans les cultures sous abris en possèdent en moyenne 33 %. Ceci démontre que la minéralisation de la matière organique pendant le processus de compostage se déroule normalement. Intéressant est le fait que la teneur en matière organique des composts en bords de champs est significativement plus faible que les autres ; ceci vient probablement de la combinaison de deux facteurs : dégradation plus avancée de la matière organique de départ suite à une durée plus longue du processus, teneur en terre plus importante provenant par exemple du sol situé sous l'andain et qui y est mélangée lors des brassages du tas. De manière générale, il est clair que les composts ayant eu un apport de terre au début du processus ont une teneur en matière organique plus faible que les autres.

La **valeur pH** de compost et digestat diminue avec l'évolution de la maturité des produits (tab.5.1, fig. 5.3). Toutefois, il faut noter que la variation de cette valeur pH à l'intérieur d'une classe de produit varie grandement. Le facteur principal influençant la valeur pH est la composition de l'azote minéral. Dans des composts jeunes, cet azote est principalement sous forme ammonium, qui a une activité basique. Avec l'avancement de la maturation, cet azote est nitrifié et transformé en nitrate, ce qui provoque une baisse du pH. Confirmant cela, on peut observer que la valeur pH est positivement corrélée avec la teneur en ammonium des composts, et négativement avec la quantité de nitrate qu'ils contiennent et avec le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ (fig. 5.4).

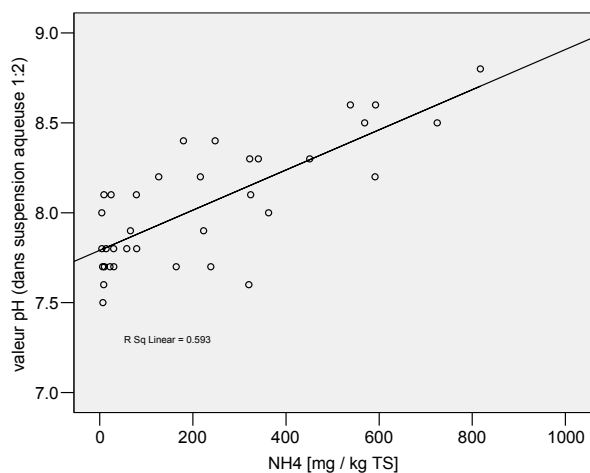
En ce qui concerne les valeurs pH, il est important de noter que la méthode d'extraction des composts et que celle de la mesure du pH influence cette dernière. Ainsi, les extractions réalisées dans des extraits aqueux 1 : 10 sont en moyenne 0,5 unités plus élevées que celles mesurées dans des extraits aqueux 1 : 2 (tab. 5.1). D'autre part, le fait de mesurer le pH dans la suspension avant sa filtration ou dans l'extrait après la filtration influence également les résultats obtenus. La diminution de pH en rapport avec son degré de maturation est clairement observable en mesurant le pH dans la suspension de l'extraction aqueuse 1 : 2 (fig. 5.3), alors que cet effet n'est que très peu marqué si l'on mesure le pH dans le filtrat de cette même extraction (tab. 5.1). Des travaux complémentaires à ce sujet sont en cours à l'institut de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, dans le but de définir une méthode officielle pour mesurer les formes d'azote minéral dans les digestats et les composts.

Fig. 5.3 > Valeurs pH de suspension aqueuses (1 : 2) de 100 composts suisses*Valeurs pH en relation avec l'âge des composts**Valeurs pH selon les classes de produits*

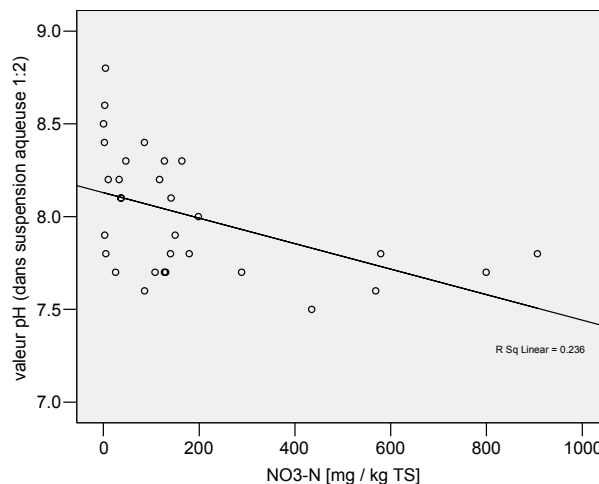
La **salinité** de digestat et compost varie fortement d'un échantillon à l'autre, indépendamment de son degré de maturité (tab. 5.1). De manière générale, ce sont les intrants qui influencent principalement la quantité de sels se trouvant dans les produits finis, l'influence de la conduite du processus elle-même sur ce paramètre étant moindre. Ceci explique la très grande variabilité de la teneur en sels à l'intérieure d'une même classe de produits (tab. 5.1.). Cette influence des intrants sur la salinité des produits est clairement visible en considérant l'évolution de cette valeur en relation avec les dates de collecte des intrants (fig. 5.5). Les composts produits avec des matériaux récoltés pendant les mois d'hiver (beaucoup de feuilles et de bois) contiennent en moyenne nettement moins de sels que ceux produits avec les intrants estivaux (beaucoup de gazon et de déchets de légumes).

Fig. 5.4 > Relation entre les teneurs en $\text{NH}_4\text{-N}$ et $\text{NO}_3\text{-N}$ de compost et leurs valeurs pH

Valeurs pH en relation avec les teneurs $\text{NH}_4\text{-N}$ de compost



Valeurs pH en relation avec les teneurs $\text{NO}_3\text{-N}$ de compost



Valeurs pH en relation avec le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ de compost
Analyses des valeurs $\text{NH}_4\text{-N}$ et $\text{NO}_3\text{-N}$ dans un extrait aqueux 2 : 1

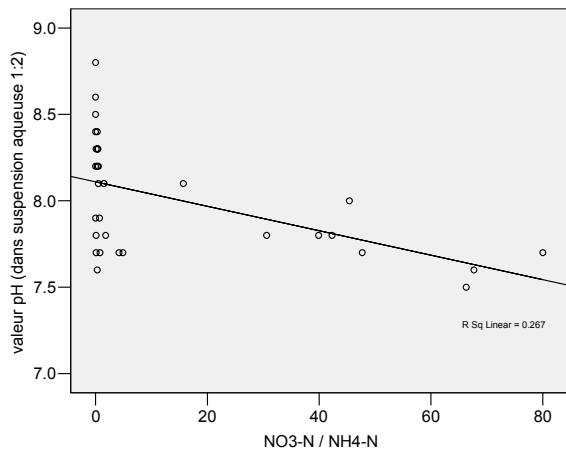
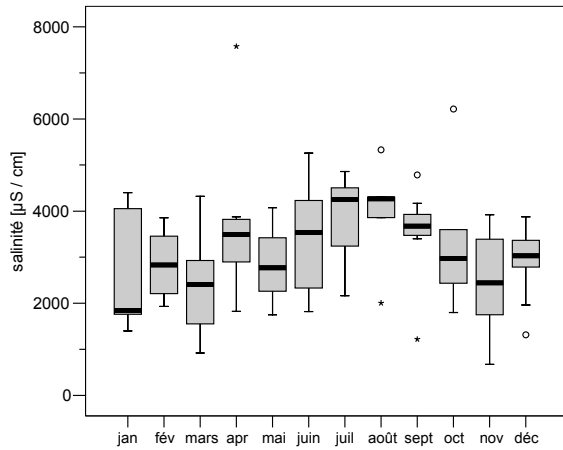
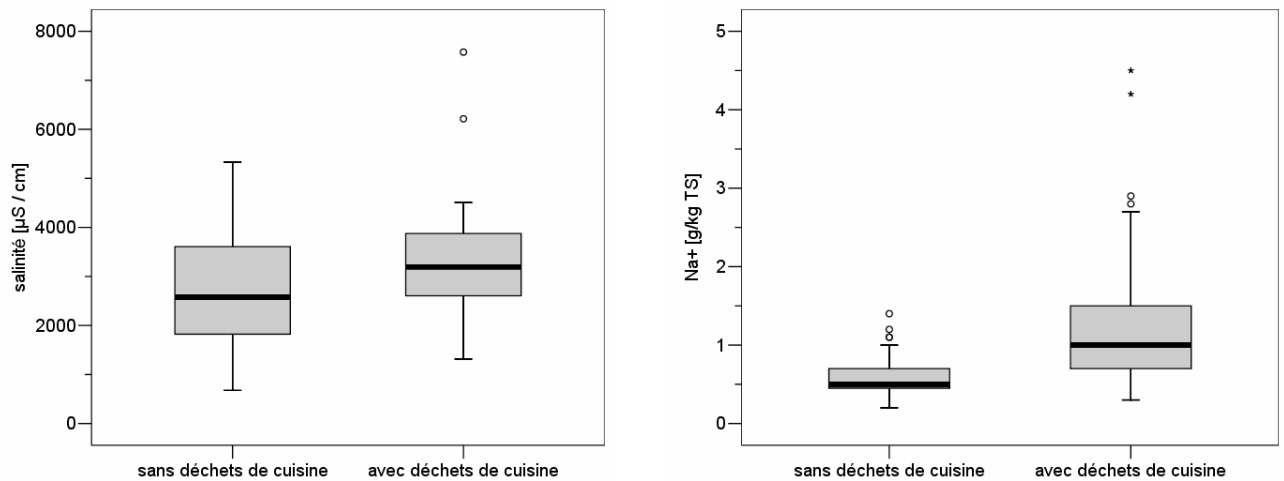


Fig. 5.5 > Relation entre les dates de collecte des intrants et la salinité des produits finis

La présence de déchets de cuisine influence également la salinité, mais de façon plutôt sélective (fig. 5.6) : en effet, la salinité globale de compost contenant des déchets de cuisine n'est en moyenne que 18 % plus élevée (augmentation non significative), alors que la quantité de sodium y est augmentée de 59 %.

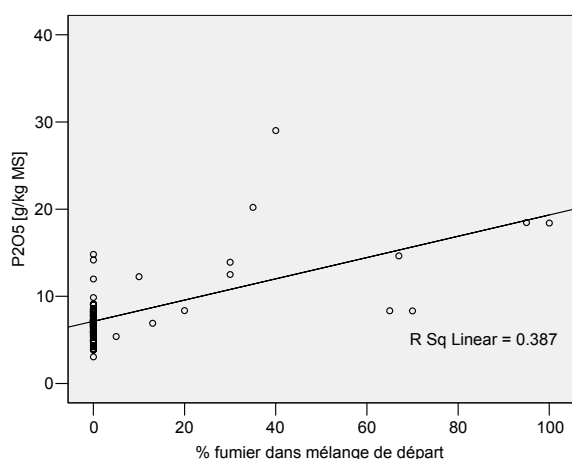
Fig. 5.6 > Influence de la présence de déchets de cuisine dans les intrants sur la salinité globale de compost et digestat (à gauche) et sur leur teneur en sodium (à droite)

Les **teneurs en éléments fertilisants** de compost et digestat sont présentées au tableau 5.2. Les teneurs en phosphore, potasse, magnésium et calcium de digestat et compost sont sensiblement les mêmes, les variations internes à une classe de produit étant nettement plus importantes que les variations entre les divers produits. Ceci est dû au fait que ce sont principalement les intrants qui influencent ces valeurs. La relation entre la quantité de fumier dans les intrants et la teneur en phosphore des produits finis démontre bien cette réalité (fig. 5.7). En ce qui concerne la teneur en **azote total** des composts et digestats, aucune différence n'est plus observable en les différentes classes de produit (tab. 5.3).

Si les digestats contiennent en moyenne plus de **sodium** que le compost (tab. 5.2), cela provient du fait que la quantité de déchets de cuisine est plus importante dans les intrants des installations de méthanisation.

Les eaux de pressage ont une composition différente de compost et digestat. Par rapport à la matière sèche, les eaux de pressage sont nettement plus riches en potasse, phosphore, azote total, magnésium, manganèse et fer (tab. 5.3). Par contre, les eaux de pressage contiennent près de la moitié moins de calcium que les composts et digestats, le calcium restant dans la partie solide du digestat.

Fig. 5.7 > Relation entre la quantité de fumier dans le mélange de départ et la teneur en phosphate de digestat et compost produits en Suisse



Pour l'utilisateur de compost et digestat, le plus important en ce qui concerne l'azote n'est pas sa teneur totale dans les divers produits, mais sa disponibilité pour les plantes. Un des facteurs important à ce sujet est la quantité d'**azote minéral** dans les composts et digestats. Cet azote minéral est composé d'**ammonium (NH₄-N)**, de **nitrite (NO₂-N)**, et de **nitrate (NO₃-N)**. A ce sujet, il faut tout d'abord remarquer que ces valeurs varient énormément à l'intérieur d'une classe de produit, ce qui est visible aux énormes écarts-types que l'on rencontre, en particulier pour le nitrite. Cette valeur est très fortement influencée par la gestion du processus et du stockage du produit fini. Pour leurs parts, les diverses classes de produits se différencient nettement en ce qui concerne leurs teneurs en ammonium et en nitrate (tab. 5.3). Tout d'abord, les digestats

contiennent en moyenne plus d'azote minéral que le compost (fig. 5.8). Cet azote est principalement sous forme ammonium. Ceci demande une attention particulière, car en cas de dessèchement du digestat, cet ammonium se volatilise sous forme ammoniacale et est perdu. Les divers composts ont environ la même quantité d'azote minéral, mais la forme de cet azote varie (fig. 5.8). Le compost pour l'agriculture contiennent principalement de l'ammonium, le compost pour les cultures sous abris principalement du nitrate. Le compost pour horticulture sont intermédiaires et contiennent aussi bien de l'ammonium, du nitrite et du nitrate. Cette évolution reflète bien les mécanismes de nitrification observables pendant la maturation des produits.

Ces résultats reflètent bien les processus biologiques de la décomposition de la matière organique. L'azote des protéines est tout d'abord libéré sous forme ammoniacale, puis est transformé en nitrate (nitrification). Le nitrite est une substance intermédiaire lors de ce processus. Pour que cette nitrification puisse avoir lieu, une quantité suffisante d'oxygène est nécessaire. En cas de manque d'oxygène lors du processus de décomposition de la matière organique, l'ammonium ne peut pas être nitrifié et reste sous forme ammonium.

Pour ces raisons, du digestat frais ne contient pratiquement que de l'ammonium, et ceci en relative grande quantité, car d'une part les produits méthanisés sont relativement riches en azote, et d'autre part car l'ammonium est dissous dans le digestat riche en eau, et qu'ainsi pratiquement pas de perte gazeuse d'ammonium n'est à observer. Le point critique à observer est dès que le digestat arrive à l'air libre. La nitrification du produit commence normalement très rapidement. Cependant, dès que le taux d'humidité du digestat diminue, une partie de l'azote minéral présent dans ce produit est perdu dans l'atmosphère sous forme ammoniacale. Cette perte est d'autant plus importante que le digestat est asséché. Ainsi, une mauvaise gestion du digestat après sa sortie du digesteur peut transformer ce produit riche en azote minéral en un produit immobilisant même cet élément fertilisant lors de son utilisation.

Le nitrite est un relativement bon indicateur de la gestion du processus. Comme déjà mentionné plus haut, le nitrite est une forme d'azote minérale intermédiaire lors de la nitrification de l'ammonium. Ainsi, il est normal de trouver du nitrite dans un compost relativement jeune se trouvant en phase de nitrification. Par contre, le fait de trouver du nitrite dans un compost ne contenant pratiquement plus d'ammonium démontre une erreur de gestion du processus par le composteur lui-même. En effet, si un compost contenant du nitrate se retrouve en manque d'oxygène à cause d'une aération insuffisante, ce nitrate est réduit par certains microorganismes du compost en nitrite. Ainsi, la qualité du stockage des produits finis peut être caractérisée.

La grande variation des valeurs des diverses formes d'azote minéral en fonction de l'avancement du processus biologique et de sa gestion en fait un indicateur privilégié pour caractériser la qualité du compost, et en particulier pour prévoir si ce compost va plutôt immobiliser ou libérer de l'azote lors de son utilisation. Pour ceci le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ est en particulier employé. Un compost biologiquement jeune aura un rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ inférieur à 1, alors qu'un compost biologiquement plus avancé aura un rapport nettement supérieur à 1. Plus de renseignements sur ce sujet sont décrits au chapitre 5.4.

Tab. 5.2 > Teneur en éléments fertilisants composts et digestats suisses (sans azote)

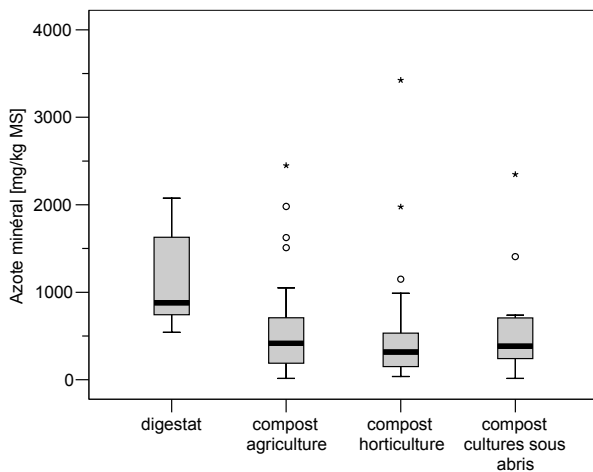
Classification des produits selon directives ASIC 2001		P ₂ O ₅ total [g/kg MS]	P total [g/kg MS]	K ₂ O total [g/kg MS]	K total [g/kg MS]	Na [g/kg MS]	Mg [g/kg MS]	Ca [g/kg MS]	Fe [g/kg MS]	Mn [mg/kg MS]
Digestat (n=11)	Médiane	8,2	3,6	15,0	12,5	1,3	6,8	60,3	8,9	412,2
	Quantile 10 %	6,4	2,8	10,2	8,5	1,1	5,7	38,4	5,4	347,8
	Quantile 90 %	14,6	6,7	18,6	16,4	1,7	8,0	149,1	9,7	1264,5
	Minimum	4,7	2,0	7,7	6,4	0,5	3,7	23,0	3,7	267,0
	Maximum	18,5	8,0	25,1	20,8	2,0	9,7	152,3	12,3	1436,6
	Moyenne	9,0	3,9	15,1	12,6	1,3	6,8	71,4	8,0	574,2
	Ecart-type	4,0	1,8	4,7	4,0	0,4	1,5	41,5	2,5	390,6
Eaux de pressage (n=4)	Médiane	14,2	6,2	37,2	30,9	2,8	9,1	32,3	15,5	634,3
	Quantile 10 %	12,4	5,4	33,0	27,3	2,7	8,6	31,3	13,5	621,2
	Quantile 90 %	14,7	6,4	39,2	32,5	3,9	10,4	36,4	18,6	769,9
	Minimum	12,0	5,2	31,9	26,5	2,7	8,5	31,1	13,0	618,0
	Maximum	14,8	6,5	39,6	32,9	4,2	10,8	37,5	19,3	803,8
	Moyenne	13,7	6,0	36,3	30,1	3,2	9,5	33,6	15,9	685,4
	Ecart-type	1,5	0,6	4,0	3,3	0,9	1,2	3,4	3,2	102,9
Compost pour agriculture (n=34)	Médiane	6,9	3,0	13,9	12,0	0,7	4,8	53,2	8,8	385,3
	Quantile 10 %	4,7	2,0	8,6	7,3	0,5	3,9	32,5	5,9	286,6
	Quantile 90 %	8,6	3,8	20,3	16,8	1,5	7,2	72,0	12,4	471,9
	Minimum	3,9	1,7	6,9	5,7	0,3	3,6	23,1	2,9	212,2
	Maximum	13,9	6,1	30,3	25,2	4,5	10,3	83,7	16,7	773,6
	Moyenne	7,1	3,1	14,7	12,2	0,9	5,4	54,2	9,0	395,3
	Ecart-type	2,1	0,9	5,5	4,5	0,8	1,5	15,6	3,0	106,9
Compost pour horticulture (n=36)	Médiane	6,8	3,0	14,0	11,6	0,6	6,5	65,7	10,1	446,7
	Quantile 10 %	5,0	2,2	8,2	6,8	0,3	5,0	50,1	8,0	329,7
	Quantile 90 %	8,7	3,8	18,3	15,2	1,1	10,1	81,9	12,4	655,2
	Minimum	3,0	1,3	2,6	2,2	0,2	4,4	35,0	5,4	244,9
	Maximum	29,0	12,6	24,9	20,7	1,9	10,7	91,5	14,6	1000,3
	Moyenne	7,3	3,2	13,7	11,4	0,7	7,1	65,9	10,1	480,3
	Ecart-type	4,0	1,7	4,5	3,7	0,4	1,9	12,9	1,9	157,8
Compost pour cultures sous abris (n=16)	Médiane	7,6	3,3	12,6	10,7	0,6	6,5	61,4	12,0	566,9
	Quantile 10 %	5,4	2,4	7,9	6,8	0,3	4,7	38,6	10,2	459,6
	Quantile 90 %	15,3	6,7	17,6	14,6	1,1	11,7	74,4	14,4	721,1
	Minimum	4,8	2,1	6,6	5,5	0,3	4,4	29,5	6,1	289,3
	Maximum	20,2	8,8	33,6	27,8	1,4	13,3	82,8	15,8	788,2
	Moyenne	8,9	3,9	13,8	11,5	0,7	7,4	58,2	12,0	566,4
	Ecart-type	4,4	1,9	6,2	5,1	0,3	2,9	14,9	2,2	119,9

Tab. 5.3 > Formes d'azotes contenues dans le compost et digestat suisses

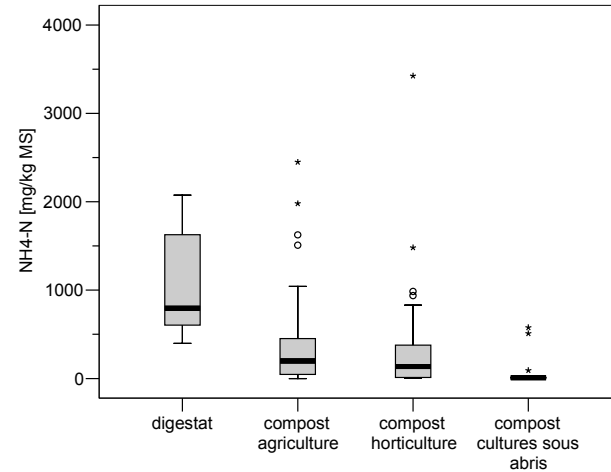
Classification des produits selon directives ASIC 2001		Ntot [g/kg MS]	Extrait aqueux 1 : 2					Extrait CaCl2 1 : 10				
			NH ₄ -N [mg / kg MS]	NO ₂ -N [mg / kg MS]	NO ₃ -N [mg / kg MS]	Nmin [mg / kg MS]	NO ₂ -N/NH ₄ -N	NH ₄ -N [mg / kg MS]	NO ₂ -N [mg / kg MS]	NO ₃ -N [mg / kg MS]	Nmin [mg / kg MS]	NO ₂ -N/NH ₄ -N
Digestat (n=11)	Médiane	15,3	428	0,0	86	592	0,3	797	0	4	879	0,0
	Quantile 10 %	11,9	294	0,0	21	330	0,1	455	0	0	600	0,0
	Quantile 90 %	18,3	762	0,0	108	764	0,3	2019	110	229	2019	0,5
	Minimum	9,4	248	0,0	4	324	0,0	398	0	0	542	0,0
	Maximum	20,3	817	160,6	114	822	0,3	2075	133	348	2075	0,9
	Moyenne	15,1	450	14,6	68	552	0,2	1106	26	80	1181	0,2
	Ecart-type	3,1	215	48,4	57	209	0,2	641	48	130	575	0,3
Eaux de passage (n=4)	Médiane	23,0	pas déterminé					pas déterminé				
	Quantile 10 %	21,6										
	Quantile 90 %	24,7										
	Minimum	21,2										
	Maximum	25,1										
	Moyenne	23,1										
	Ecart-type	2,0										
Compost pour agriculture (n=34)	Médiane	16,6	151	0,0	10	315	0,0	200	0	2	417	0,0
	Quantile 10 %	11,3	15	0,0	0	45	0,0	16,2	0	0	45,4	0,0
	Quantile 90 %	21,5	682	103,6	550	916	29,0	1369	82	534	1372	12,7
	Minimum	8,7	6,6	0,0	0	13,7	0,0	0,0	0	0	15,8	0,0
	Maximum	26,0	1239	243,7	906	1240	66,3	2449	198	841	2449	67,2
	Moyenne	16,7	263	22,0	135	419	7,5	440	20	115	575	4,4
	Ecart-type	4,0	343	53,7	261	343	17,0	611	50	238	573	13,4
Compost pour horticulture (n=36)	Médiane	14,6	75	0,0	89	245	1,1	135	0	53	316	0,4
	Quantile 10 %	10,6	5,3	0,0	7	60,8	0,1	7,1	0	0	69,4	0,0
	Quantile 90 %	18,7	529,4	27,7	455	588	37,3	884	26	358	909	28,6
	Minimum	9,2	3,7	0,0	0	38	0,0	4,4	0	-1	36,6	0,0
	Maximum	27,6	955,4	53,2	569	1543	67,7	3424	59	551	3424	72,0
	Moyenne	14,9	173,2	7,5	147	332	9,2	349	9	119	477	7,7
	Ecart-type	3,7	245,3	14,1	171	334	17,9	625	15	155	629	16,2
Compost pour cultures sous abris (n=16)	Médiane	15,1	10,0	0,0	198	414	45,4	8,4	0	319	384	32,5
	Quantile 10 %	10,9	5,4	0,0	111	182	0,3	0,0	0	99	159,	0,4
	Quantile 90 %	22,9	320,8	4,1	821	831	80,8	301	12	1004	1073,	76,5
	Minimum	8,6	4,4	0,0	86	150	0,3	0,0	0	8	14,6	0,2
	Maximum	25,2	321,9	40,0	854	865	82,0	577	35	2338	2347	273,7
	Moyenne	15,8	97,4	3,0	356	461	38,8	79	4	504	587	49,0
	Ecart-type	4,9	152,8	10,1	328	282	34,6	183	10	586	577	72,1

Fig. 5.8 > Teneurs de 100 composts et digestats suisses en azote minéral. Mesure de l'azote minéral dans un extrait CaCl₂ 1 : 10

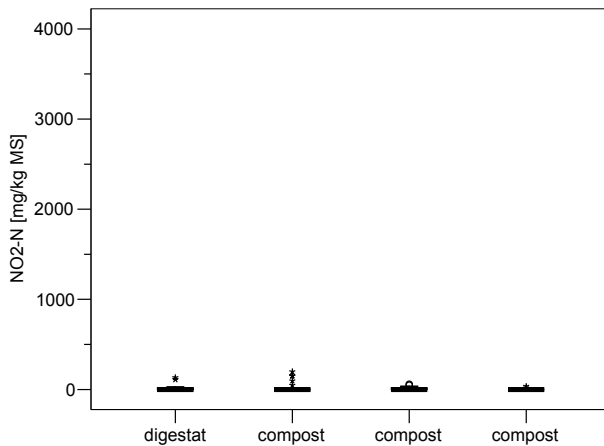
Azote minéral total



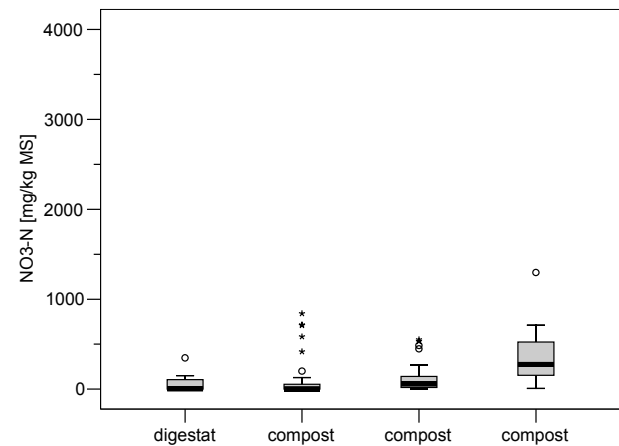
Ammonium



Nitrite



Nitrate



En ce qui concerne les teneurs en **métaux lourds** de compost et digestat, la plupart des échantillons montrent des valeurs nettement en dessous des valeurs limites (tab. 5.4). Quelques dépassements de valeurs limites ont cependant pu être observés pour le cuivre et pour le plomb. Les eaux de pressage contiennent, en relation avec la matière sèche, généralement plus de métaux lourds que les composts, tout en restant en dessous des valeurs limites. Seule exception est le nickel, dont les teneurs dans les eaux de pressage sont en moyenne plus élevées que les valeurs limites. Cependant, on peut ici remettre en question la valeur limite de 30 [mg/kg MS], celle-ci étant, contrairement à celle de tous les autres métaux lourds, plus basse que la valeur indicatrice pour les sols (50 [mg/kg MS]).

Tab. 5.4 > Teneur en métaux lourds de compost et digestat suisses

Classification des produits selon directives ASIC 2001		Cd [mg/kg MS]	Co [mg/kg MS]	Cr [mg/kg MS]	Cu [mg/kg MS]	Hg [mg/kg MS]	Mo [mg/kg MS]	Ni [mg/kg MS]	Pb [mg/kg MS]	Zn [mg/kg MS]
Digestat (n=11)	Médiane	0,1	2,8	21,0	49,8	< seuil de détermination	< seuil de détermination	13,7	22,4	116,4
	Quantile 10 %	0,0	2,0	10,9	29,4			9,1	8,1	79,19
	Quantile 90 %	0,2	3,6	24,2	63,8			16,5	42,0	134,7
	Minimum	0,0	1,4	8,0	21,3			8,2	6,6	60,39
	Maximum	0,3	5,3	31,1	68,5			17,0	282,1	157,5
	Moyenne	0,1	2,9	19,6	47,3			12,8	45,9	113,3
	Ecart-type	0,1	1,0	6,7	14,7			3,1	79,0	27,55
Eaux de pressage (n=4)	Médiane	0,2	6,1	39,8	77,0	< seuil de détermination	< seuil de détermination	30,7	59,6	263,3
	Quantile 10 %	0,2	5,7	37,7	73,2			27,5	57,6	254,4
	Quantile 90 %	0,4	7,6	47,6	95,1			37,4	70,5	324,9
	Minimum	0,2	5,6	37,2	72,3			26,7	57,2	252,2
	Maximum	0,5	8,0	49,5	99,6			39,0	73,3	340,3
	Moyenne	0,3	6,6	42,2	83,0			32,1	63,3	285,3
	Ecart-type	0,2	1,3	6,5	14,6			6,3	8,7	47,97
Compost pour agriculture (n=34)	Médiane	0,1	3,5	16,4	48,5	< seuil de détermination	< seuil de détermination	14,3	34,0	140,5
	Quantile 10 %	0,0	2,2	10,5	31,9			8,3	14,8	94,83
	Quantile 90 %	0,3	5,2	25,3	85,1			23,8	68,8	214,5
	Minimum	0,0	1,0	2,3	21,3			2,9	5,1	72,19
	Maximum	0,5	6,4	29,1	295,8			27,8	298,1	259,6
	Moyenne	0,2	3,5	17,6	63,6			14,8	46,0	148,3
	Ecart-type	0,1	1,2	6,2	54,1			6,1	49,9	47,32
Compost pour horticulture (n=36)	Médiane	0,1	4,2	19,9	57,3	< seuil de détermination	< seuil de détermination	15,9	40,0	149,2
	Quantile 10 %	0,0	3,2	16,0	41,6			12,4	27,0	121,3
	Quantile 90 %	0,3	5,1	23,9	80,8			19,6	64,0	183,5
	Minimum	0,0	2,7	10,5	33,9			10,3	8,7	108,7
	Maximum	0,5	6,0	35,1	105,4			25,1	1016,3	272,7
	Moyenne	0,1	4,1	20,0	58,4			15,8	69,7	155,4
	Ecart-type	0,1	0,7	4,3	15,3			3,1	163,3	34,97
Compost pour cultures sous abris (n=16)	Médiane	0,1	4,8	22,5	52,5	< seuil de détermination	< seuil de détermination	18,0	37,1	161,4
	Quantile 10 %	0,1	3,1	17,0	37,1			13,6	14,6	116,9
	Quantile 90 %	0,3	5,7	26,3	65,8			21,8	64,1	220,4
	Minimum	0,1	2,3	10,3	34,4			8,8	11,2	109,9
	Maximum	0,5	6,2	40,5	334,8			22,4	111,3	252,2
	Moyenne	0,2	4,7	22,5	68,9			17,6	41,4	167,3
	Ecart-type	0,1	1,1	6,3	71,5			3,5	24,6	44,53

5.2 Caractérisation de la maturité et de la stabilité de compost et digestat

Différentes analyses ont été réalisées pour caractériser le degré de maturité et la stabilité des divers produits issus des installations de compostage ou de méthanisation. Le premier facteur étudié a été le **rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$** . Comme mentionné au chapitre 5.1, la relation entre l'ammonium et le nitrate varie avec l'avancement de la maturation, l'ammonium étant nitrifié. Cette évolution est clairement observable (fig. 5.9), le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ étant plus élevé dans les composts pour cultures sous abris. Ainsi, les producteurs de composts respectent sur ce point les directives 2001 de l'ASIC (Fuchs et al. 2001).

Fig. 5.9 > Rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ de 100 composts suisses

Mesure de l'azote minéral dans un extrait CaCl_2 1 : 10

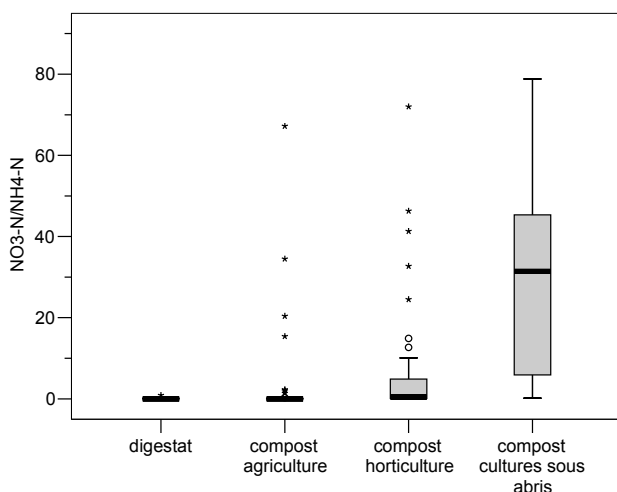
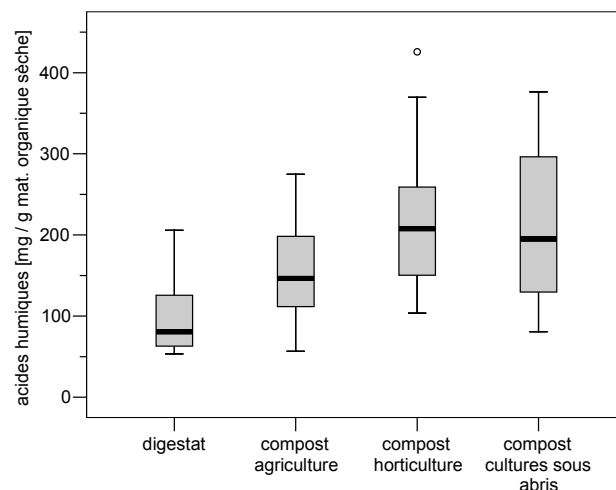


Fig. 5.10 > Teneurs en acides humiques de 100 digestats et composts suisses



Un autre paramètre évoluant avec l'avancement du processus de compostage est la teneur des composts en acides humiques. Cette forme stabilisée de matière organique est importante pour l'effet de compost sur les caractéristiques physiques du sol. Les teneurs en acides humiques de digestat sont effectivement plus faibles que celles des composts (fig. 5.10). Une différence entre les diverses classes de compost est également observable, le compost agricole contenant moins d'acides humiques que les deux classes de produits plus mûres (fig. 5.9).

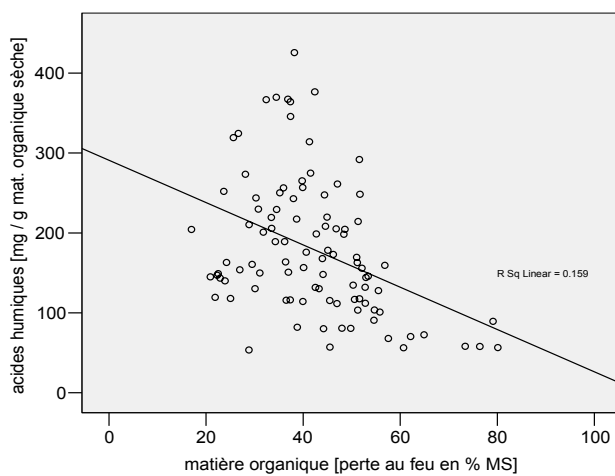
Un point important à remarquer est que la teneur en acides humiques des composts ne corrèle pas du tout avec la teneur en matière organique des composts, que l'on compare ces paramètre globalement sur tous le compost et digestat analysés (fig. 5.11), ou par classe de produits (exemples de compost pour horticulture et de ceux pour les cultures sous abris, fig. 5.11). La conduite de l'humidité dans le tas de compost pendant le processus pourrait influencer fortement la formation d'acides humiques; ainsi, une formation moins importante de ces acides semble être produite si la conduite du pro-

cessus est trop mouillée (fig. 5.12), ce qui pourrait être dû à une activité diminuée des microorganismes aérobies. Toutefois, vu le relativement restreint d'échantillons analysés, des études supplémentaires sont nécessaires pour affiner ce point.

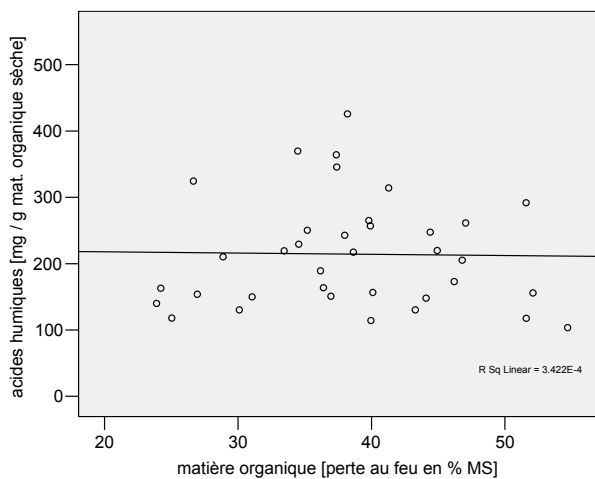
Fig. 5.11 > Rapport entre la teneur en acides humiques et la teneur en matière organique de digestat et compost suisses

Analyse globale de tous les produits

(digestat, compost pour agriculture, compost pour horticulture, compost pour cultures sous abris)



Analyse des compost pour horticulture



Compost pour cultures sous abris

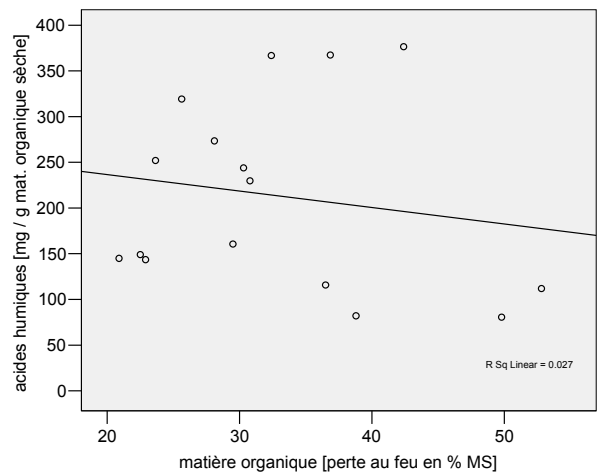
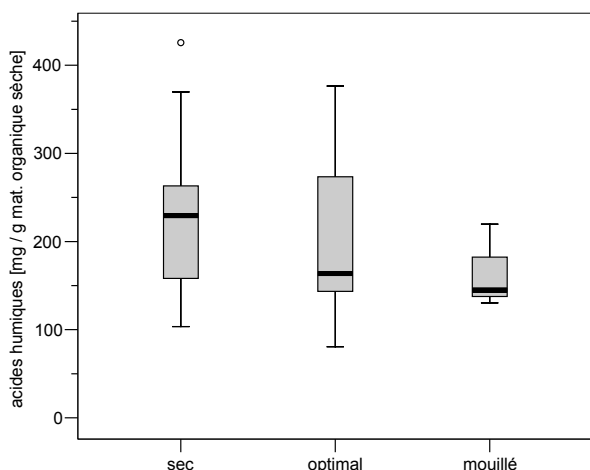


Fig. 5.12 > Relation entre l'humidité du tas de compost pendant le processus de compostage et la teneur en acides humiques de 51 composts suisses pour horticulture et pour cultures sous abris

La teneur en eau de compost a été évaluée avec le test du poing.



La teneur en acides humiques est une caractéristique importante de la qualité des composts et de sa stabilité. Afin d'avoir une méthode d'analyse plus rapide, moins compliquée et moins coûteuse pour la pratique, deux extractions en milieux basiques ont été testées : l'**extraction NaOH** (avec détermination de l'intensité de la couleur de l'extrait par mesure photométrique de l'extinction à 550 nm) et l'**indice pyrophosphate** (employé pour définir la stabilité des tourbes).

Alors que l'extraction NaOH ne différencie pas les diverses classes de produit (fig. 5.13 à gauche), l'indice pyrophosphate évolue avec l'avancement de la maturation (fig. 5.13 à droite). De même, l'indice pyrophosphate corrèle mieux avec la teneur en acides humiques des composts que l'extraction NaOH (fig. 5.14).

Pour l'utilisation pratique des composts, en particulier pour le domaine des plantes en bacs et en pots, la couleur de l'**extrait aqueux** des digestats et composts est particulièrement importante, des dégâts importants aux façades des maisons pouvant par exemple résulter de l'arrosage de bacs à géranium contenant un compost d'où coule un jus foncé. Cette couleur provient des précurseurs humiques solubles à l'eau. Avec l'évolution de la maturation, ces précurseurs sont intégrés dans des molécules plus complexes qui ne sont alors plus solubles dans l'eau. Ainsi, l'intensité de la couleur de l'extrait aqueux diminue avec le degré de maturation du compost (fig. 5.15). Pour cette raison, les risques de problèmes de coloration par exemple de façades diminue fortement avec la maturation des composts. Il est à relever qu'aucune relation directe entre cette couleur d'extrait aqueux et la teneur en acides humiques des composts n'existe (fig. 5.15).

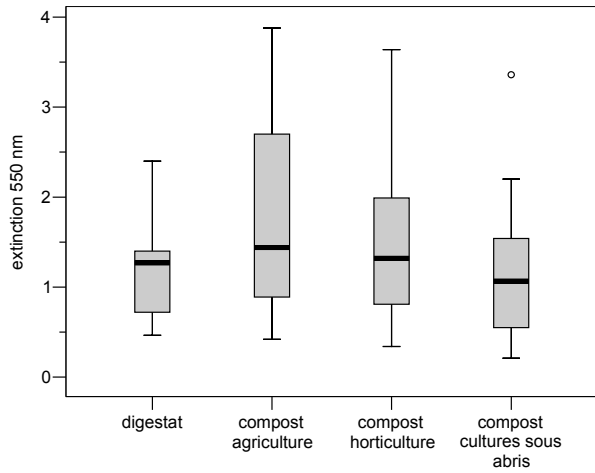
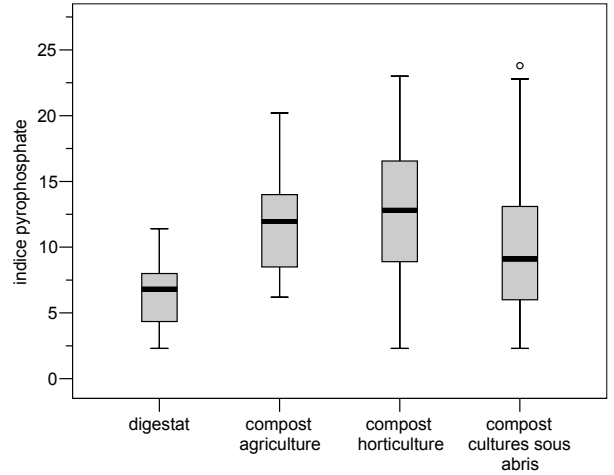
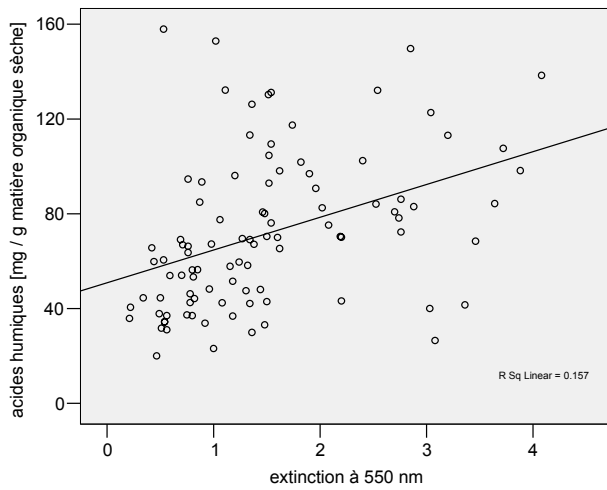
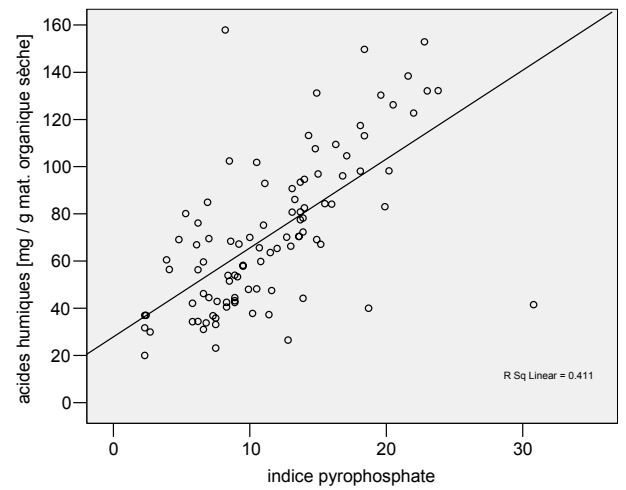
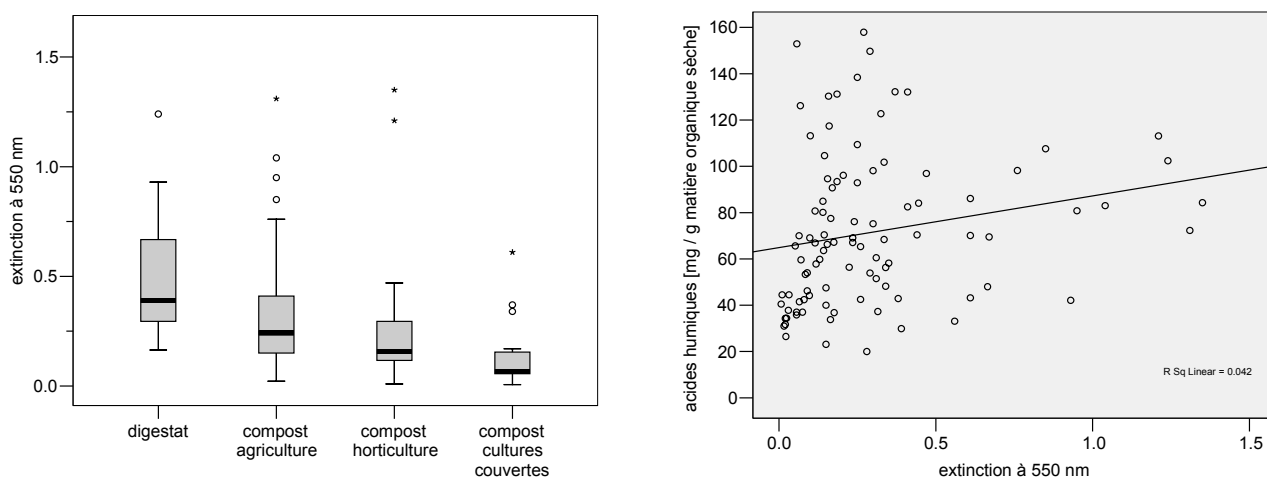
Fig. 5.13 > Détermination de l'intensité de la couleur d'extraits en milieux basiques de 100 digestats et composts suisses*Extraction NaOH**Extraction pyrophosphate***Fig. 5.14** > Relation entre l'intensité de la couleur d'extraits de composts (réalisés en milieux basiques) et de leurs teneurs en acides humiques*Extraction NaOH**Extraction pyrophosphate*

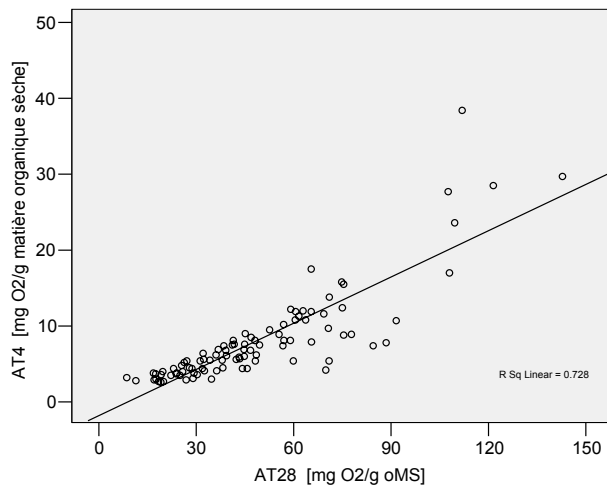
Fig. 5.15 > Détermination de l'intensité de la couleur d'extraits aqueux de 100 digestats et composts suisses (à gauche), et relation entre cette intensité et la teneur des composts en acides humiques (à droite)



5.3 Activités biologiques de digestat et compost

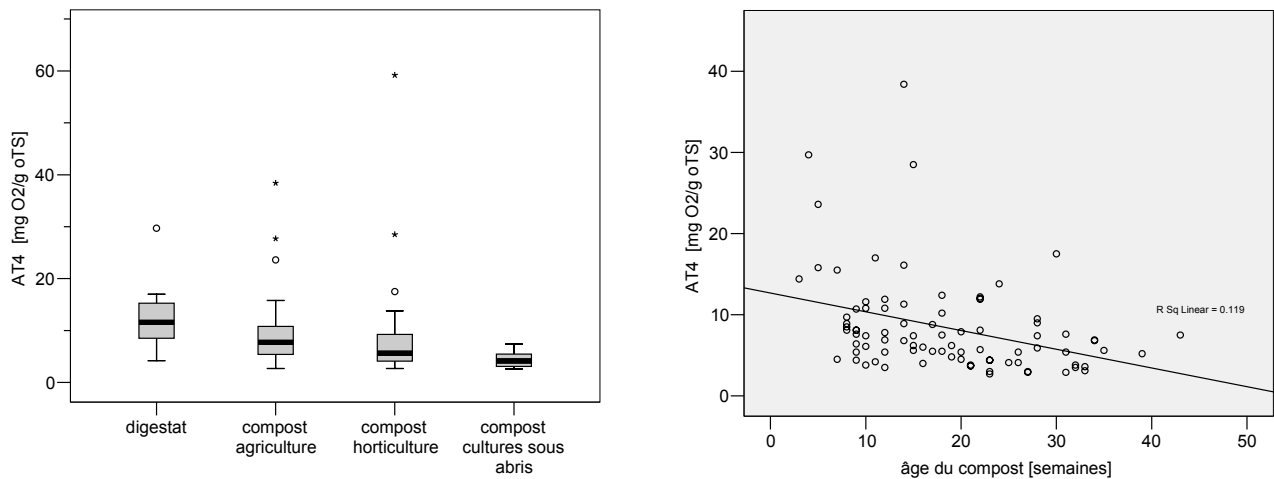
Le digestat et compost se différencient des autres amendements et engrais entre autres par son activité biologique. Ces activités sont des caractéristiques importantes de la qualité des digestats et composts. De manière générale, une activité microbiologique très intense est observable au début du compostage, les matières facilement dégradables étant attaquées. Puis l'activité globale de compost diminue quantitativement, passant à une phase d'activité plus qualitative correspondant à la maturation du compost. Le premier paramètre reflétant ceci est la mesure **de la respiration des microorganismes**. Deux mesures de respiration ont été effectuées : AT4 (mesure de la respiration microbienne d'un compost pendant 4 jours) et AT28 (mesure pendant 28 jours). Ces deux mesures sont bien corrélées (fig. 5.16), si bien que la mesure AT4, bien moins dispendieuse, peut à l'avenir être utilisée.

Fig. 5.16 > Corrélation entre la mesure de la respiration microbienne des composts et digestats pendant 4 jours (AT4) et pendant 28 jours (AT28)



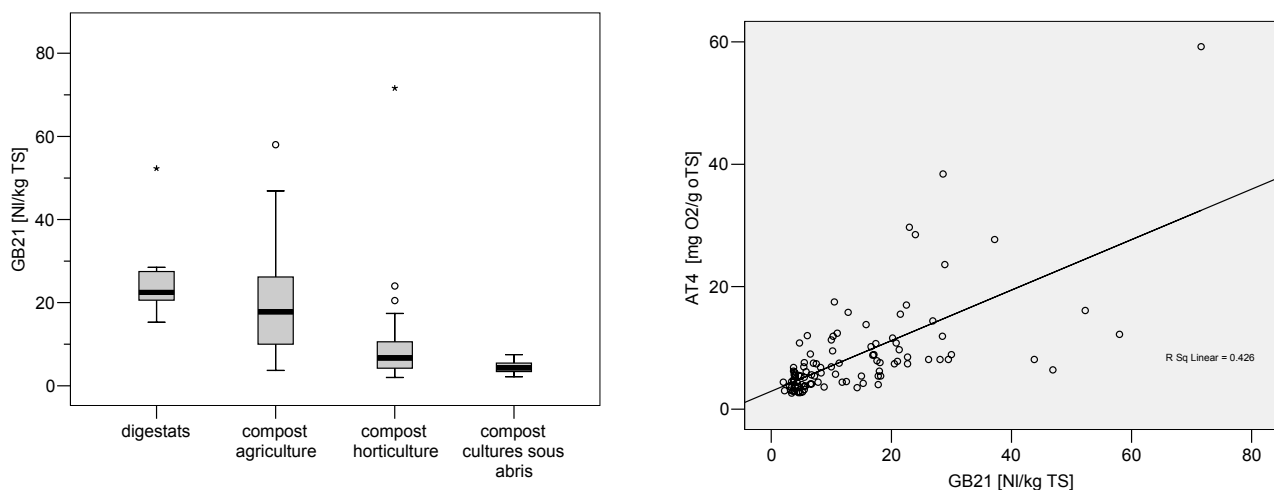
Plus les produits sont élaborés, plus l'intensité de la respiration microbienne diminue (fig. 5.17 à gauche). Toutefois, cette diminution de respiration ne corrèle pas avec l'âge des composts (fig. 5.17, à droite), montrant bien que, suivant l'intensité du compostage et les intrants traités, la durée du processus varie grandement, et que l'âge absolu des composts ne reflète pas son degré de maturité.

Fig. 5.17 > Détermination de la respiration microbienne de 100 digestats et composts suisses (à gauche), et relation entre cette intensité et l'âge des composts (à droite)



En contrepartie du potentiel respiratoire de compost déterminé avec la mesure AT4, le potentiel de formation de gaz en milieu anaérobie a été déterminé (fig. 5.18).

Fig. 5.18 > Détermination du potentiel de formation de gaz en milieu anaérobie de 100 digestats et composts suisses (à gauche), et relation entre cette intensité et le potentiel de respiration microbienne (à droite)

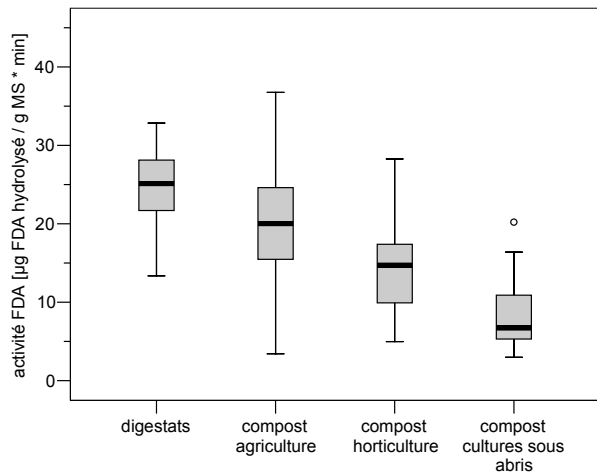


Quatre activités enzymatiques ont également été analysées pour caractériser l'activité microbiologique des composts (fig. 5.19). De manière générale, ces quatre activités enzymatiques diminuent avec l'avancement de la maturité. Leurs évolutions sont cependant différentes. L'activité FDA est celle qui différencie le mieux les quatre classes de produits (fig. 5.19, en haut à gauche), l'activité déshydrogénase étant la moins sensible (fig. 5.19 en haut à droite). L'activité cellulase est relativement long-

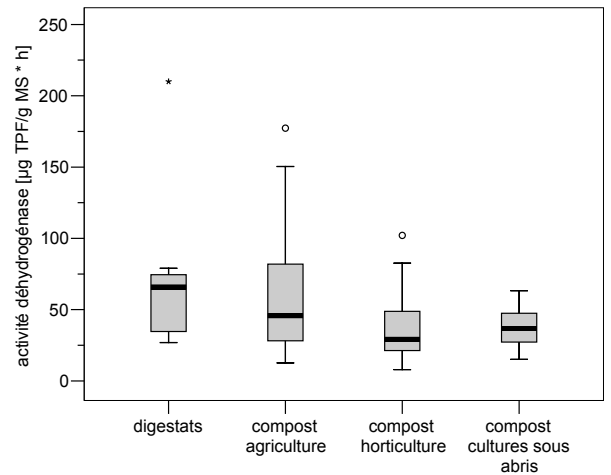
temps constante, ses valeurs étant pratiquement les mêmes pour les composts destinés à l'agriculture et ceux destinés à l'horticulture ; lorsque la maturation du compost est plus avancée (compost pour cultures sous abris), l'activité cellulase est alors plus faible (fig. 5.19, en bas à gauche). A l'opposé, l'activité protéase est élevée dans les produits jeunes, puis diminue rapidement et se stabilise (figure 5.19 en bas à droite). Aucune corrélation entre les différentes activités enzymatiques n'a pu être observée, indiquant bien que les mécanismes qu'elles mettent en évidence n'évoluent pas parallèlement, mais que chacun a sa propre dynamique.

Fig. 5.19 > Détermination de quatre activités enzymatiques dans 100 digestats et composts

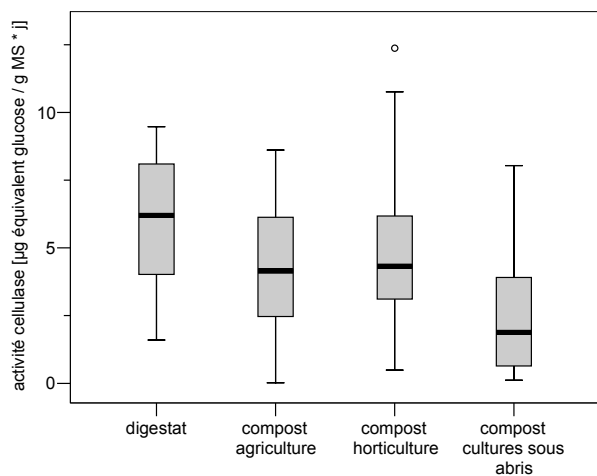
Activité FDA



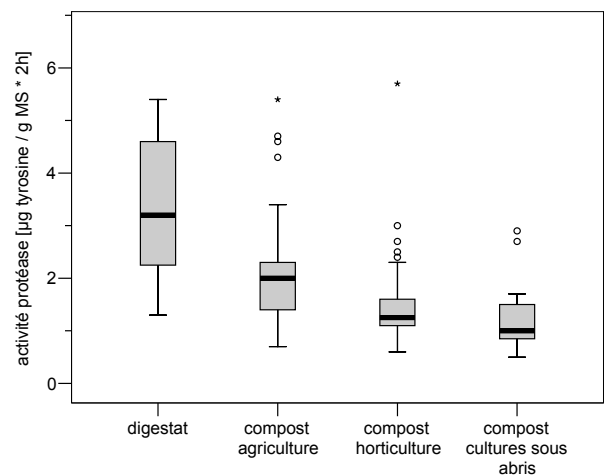
Activité déshydrogénase



Activité cellulase

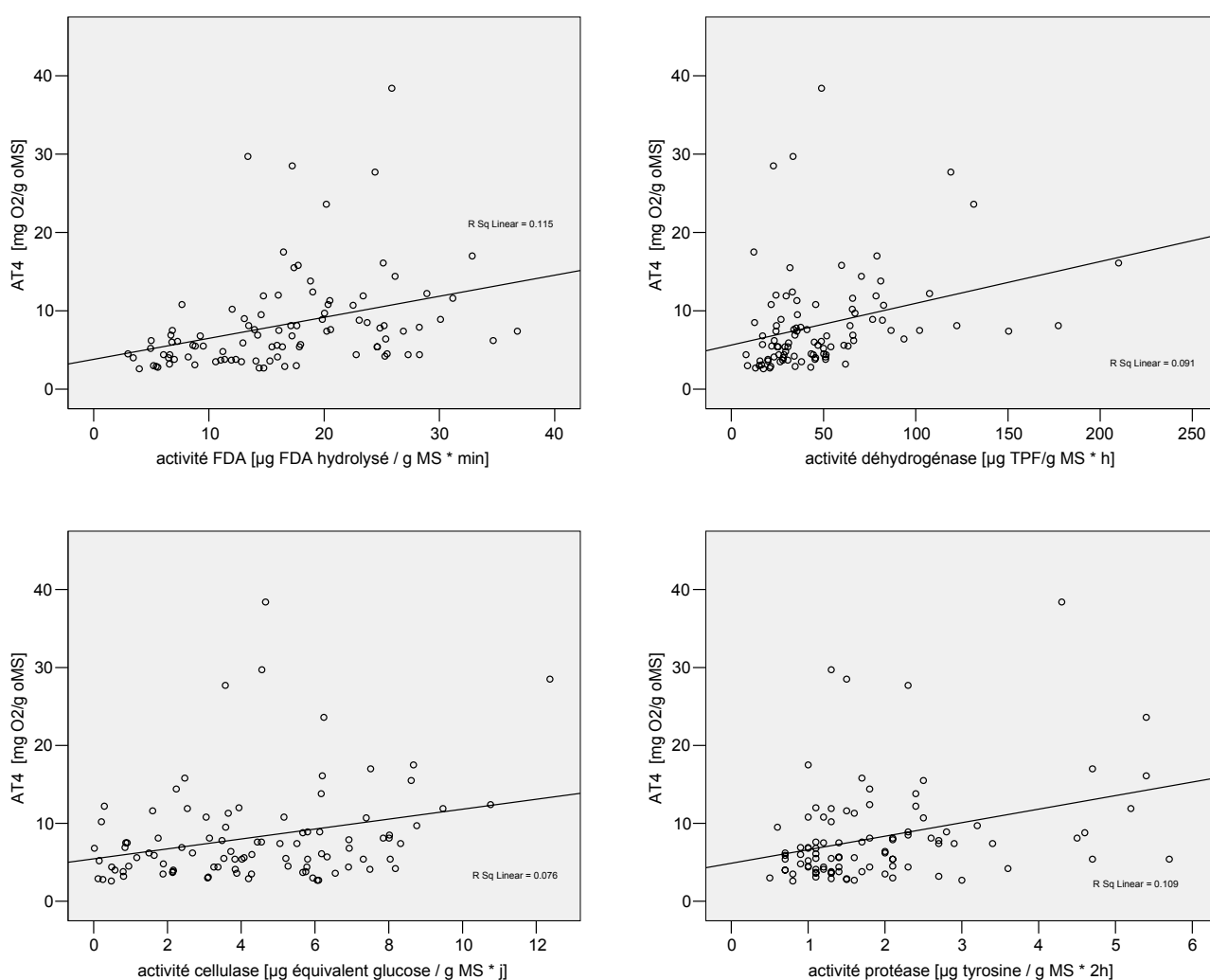


Activité protéase



On peut également observer que la respiration microbienne de compost ne corrèle pas avec les diverses activités enzymatiques étudiées (fig. 5.20), même si les tendances globales de tous ces paramètres, à savoir une diminution avec l'avancement de la maturation, sont les mêmes.

Fig. 5.20 > Interactions entre la respiration microbienne de 100 composts et digestats de Suisse et leurs activités enzymatiques dans 100 digestats et composts



5.4 Influence de digestat et compost sur la dynamique de l'azote minéral dans le sol

Du point de vue de l'utilisateur du compost, l'influence du compost ou digestat sur la dynamique de l'azote minéral dans les champs est d'importance primordiale. En effet, un éventuel blocage de l'azote dans les champs peut se traduire très rapidement par une perte de rendement importante dans les cultures ayant été amendées avec ce produit. Afin d'évaluer cet effet, les divers échantillons de composts et de digestats ont été mélangés à une terre de référence, ce mélange incubé pendant huit semaines sous des conditions contrôlées, et l'évolution de l'azote minéral dans ces mélanges a été périodiquement analysée.

La plupart des digestats libèrent de l'azote minéral dans le sol, ce qui se traduit par une évolution positive de cet azote pendant les huit semaines du test (fig. 21, en haut à gauche). Vu la quantité d'azote minéral contenue dans les digestats (tab. 5.3), ceci était à attendre.

Surprenant est toutefois le fait que quelques digestats solides non seulement ne libèrent pas d'azote minéral, mais en bloquent ! En y regardant de plus près, il est devenu rapidement évident qu'on est dans ces cas en présence de digestats mal gérés, des erreurs graves de conduite du post-traitement de ces produits étant à relever. Dans ces cas là en effet, on a à faire avec des digestats qui ont été séchés par une aération trop importante après leurs pressages. De ce fait, l'azote minéral, qui est principalement présent dans les digestats sous forme ammonium, est alors perdu sous forme ammoniacale. Ainsi, cette erreur de gestion du digestats transforme un produit riche en azote disponible en un produit immobilisant l'azote dans les champs.

En ce qui concerne le compost, une nette évolution des risques de fixation de l'azote dans les champs est à observer. Une proportion importante de compost agricole, encore physiologiquement jeunes, immobilise l'azote minéral dans le sol (fig. 5.21, en haut à droite). Il faut cependant noter que tous le compost agricole n'ont pas cet effet. La proportion de produit ligneux joue ici un rôle important. Le moment de collecte des intrants illustre bien cette réalité : le compost immobilisant l'azote dans le sol sont ceux principalement produits avec des intrants collectés pendant les mois d'hiver, riches en produits ligneux, alors que les composts produits avec des intrants collectés l'été ont un bilan d'azote minéral positif (fig. 5.22).

Avec l'avancée de la maturation des produits, les risques de blocage d'azote minéral dans les champs diminuant fortement, comme le montrent le compost horticole et avec le compost pour cultures sous abris (fig. 5.21).

Le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ est un indicateur intéressant des risques d'immobilisation de l'azote dans les champs (fig. 5.23). En effet, dès que ce rapport est supérieur à 2, les risques d'immobilisation sont pratiquement inexistantes. Toutefois, lorsque ce rapport est inférieur à 2, seulement une partie des composts immobilisent l'azote dans le sol. Ainsi, une interprétation du rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ en relation avec la teneur en produits ligneux des composts pourrait permettre une évaluation plus fine des risques réels de blocage de l'azote minéral du sol suite à l'utilisation de ces composts.

Photo 3 > Réalisation du test de l'influence d'apport de digestat et de compost dans le sol sur l'évolution de sa teneur en azote minéral



Fig. 5.21 > Influence d'apport de digestat et de compost dans le sol sur l'évolution de sa teneur en azote minéral

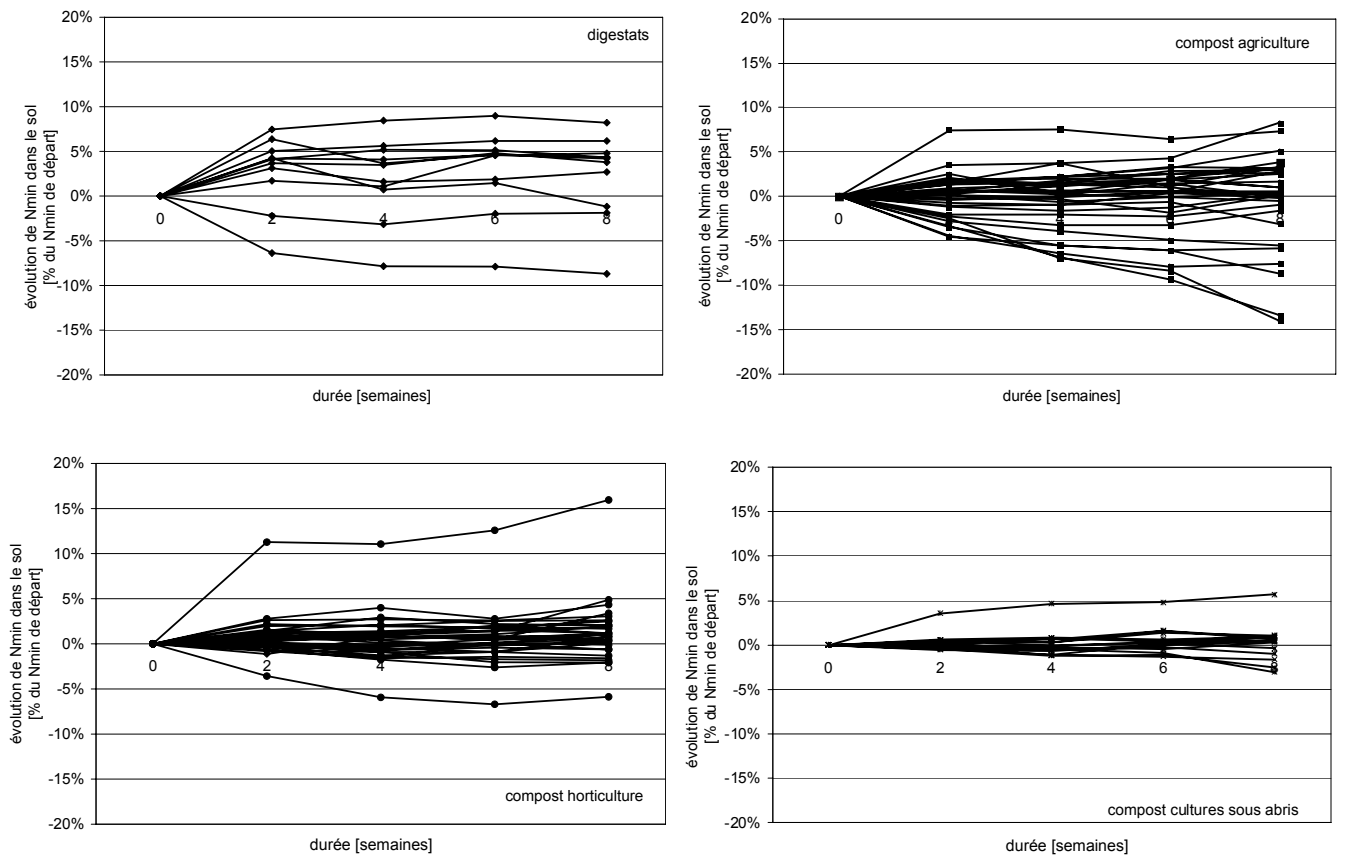


Fig. 5.22 > Relation entre les dates de collecte des intrants et le risque d'immobilisation de l'azote minéral dans les champs suite à l'utilisation de compost agricole

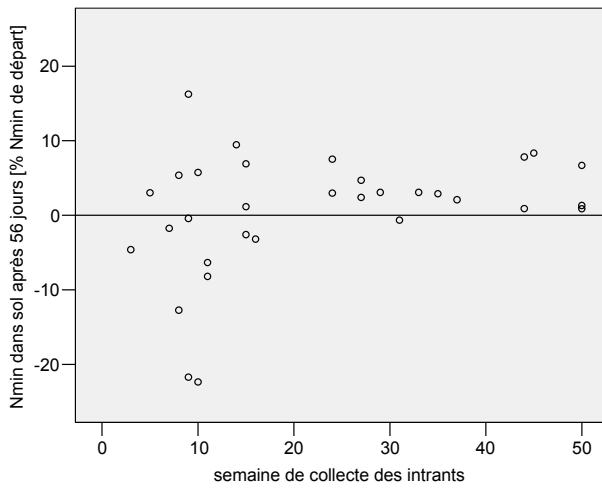
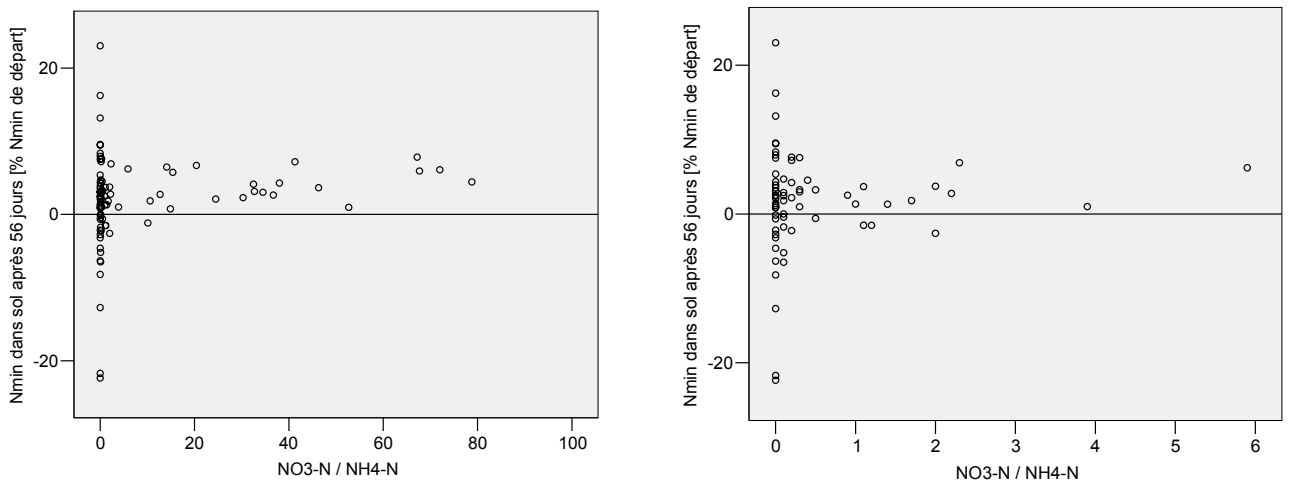


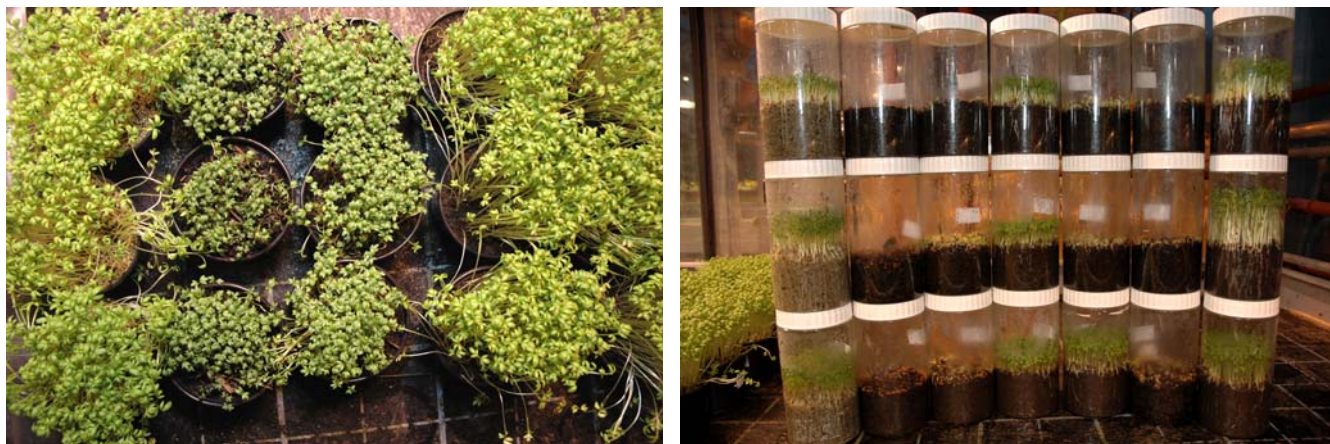
Fig. 5.23 > Relation entre le rapport $\text{NO}_3\text{-N} / \text{NH}_4\text{-N}$ le risque d'immobilisation de l'azote minéral dans les champs



5.5 Influence de digestat et compost sur la croissance et la santé des plantes

Un point particulièrement important au sujet de la qualité de compost est leurs influences sur la croissance et la santé des plantes. Pour déterminer la **compatibilité des divers composts et digestats avec la croissance des plantes**, cinq biotests ont été réalisés (fig. 5.24). De manière générale, il y est clairement observable que le digestat sont plus phytotoxiques que le compost, la croissance des plantes y étant faible, même dans le test peu sensible du cresson ouvert. Une augmentation de la compatibilité des produits avec le degré de maturation est observable dans tous les tests, les produits les plus mûrs étant en moyenne également ceux avec le moins de phytotoxicité (fig. 5.24). Toutefois, il faut observer que la variation de compatibilité avec les plantes à l'intérieur d'une classe de produit est très grande, ce qui montre bien l'importance de la conduite du processus de compostage sur le produit fini.

Photo 4 > Tests de phytotoxicité du cresson ouvert (à gauche) et du cresson fermé (à droite)



Il est également intéressant de constater que les diverses plantes testées réagissent différemment aux divers composts, chacune étant sensible à d'autres paramètres de la qualité des composts. De ce fait, les résultats des divers tests de phytotoxicité ne corrélaient pas entre eux. Une combinaison des résultats obtenus doit donc permettre une meilleure appréciation de la qualité biologique des produits, et ainsi faciliter le choix des composts employés pour des utilisations plus exigeantes, comme la production de substrats.

Un autre aspect intéressant en relation avec la croissance des plantes est la **capacité des divers produits à protéger les plantes contre les maladies**. Pour évaluer ce paramètre, deux tests ont été réalisés. Dans le premier, l'influence des composts et digestats sur la maladie de la fonte des semis de concombre, agent pathogène *Pythium ultimum*, a été testée. *P. ultimum* est un champignon attaquant les graines de concombre lors de leur germination, diminuant la levée des plantes. En général, ce pathogène ne fait plus de dégâts importants aux plantes déjà levées, ce qui fait que le pouvoir protecteur des composts ne doit être efficace qu'un à deux jours. Le deuxième biotest choisi est celui

de la pourriture du collet du basilic, agent pathogène *Rhizoctonia solani*. *R. solani* attaque les plantes plus tard que *P. ultimum*. Ainsi, les plantules de basilic germent et sortent de terre, puis *R. solani* attaque les plantules à la base de l'hypocotyle, provoquant leur mort. Une efficacité plus durable est donc nécessaire pour protéger le basilic contre cette maladie.

Globalement, la capacité des composts et digestats à protéger les plantes de concombre contre *P. ultimum* est supérieure et plus homogène que celle à protéger le basilic contre *R. solani* (fig. 5.25). La protection des plantes contre *P. ultimum* ne varie pas suivant la classe de produit, alors que tendanciellement les produits plus jeunes et plus mûrs sont moins efficaces à protéger les plantes contre *R. solani* que les produits avec une maturation moyenne (fig. 5.25). Ceci pourrait provenir du fait qu'un des antagonistes importants responsables de la protection des plantes contre *R. solani* est un champignon dégradant le bois, et que cette activité est la plus importante dans les composts moyennement mûrs. Toutefois, les variations d'efficacité très importantes à l'intérieure des diverses classes de produits ne permettent pas une analyse plus fine de ces interactions. Ici aussi, tout comme pour la phytotoxicité des composts, la conduite du processus semblent influencer fortement la qualité des produits, ce qui explique ces très grandes variations à l'intérieur des diverses classes de produits.

D'après des travaux réalisés en dehors du présent projet, la conduite de l'humidité et de l'aération des composts pendant la maturation des produits sont les deux points essentiels agissant sur la qualité biologique des produits finaux.

Fig. 5.24 > Caractérisation des risques de phytotoxicité 100 composts et digestats suisses, caractérisés par la croissance de diverses plantes dans les produits purs

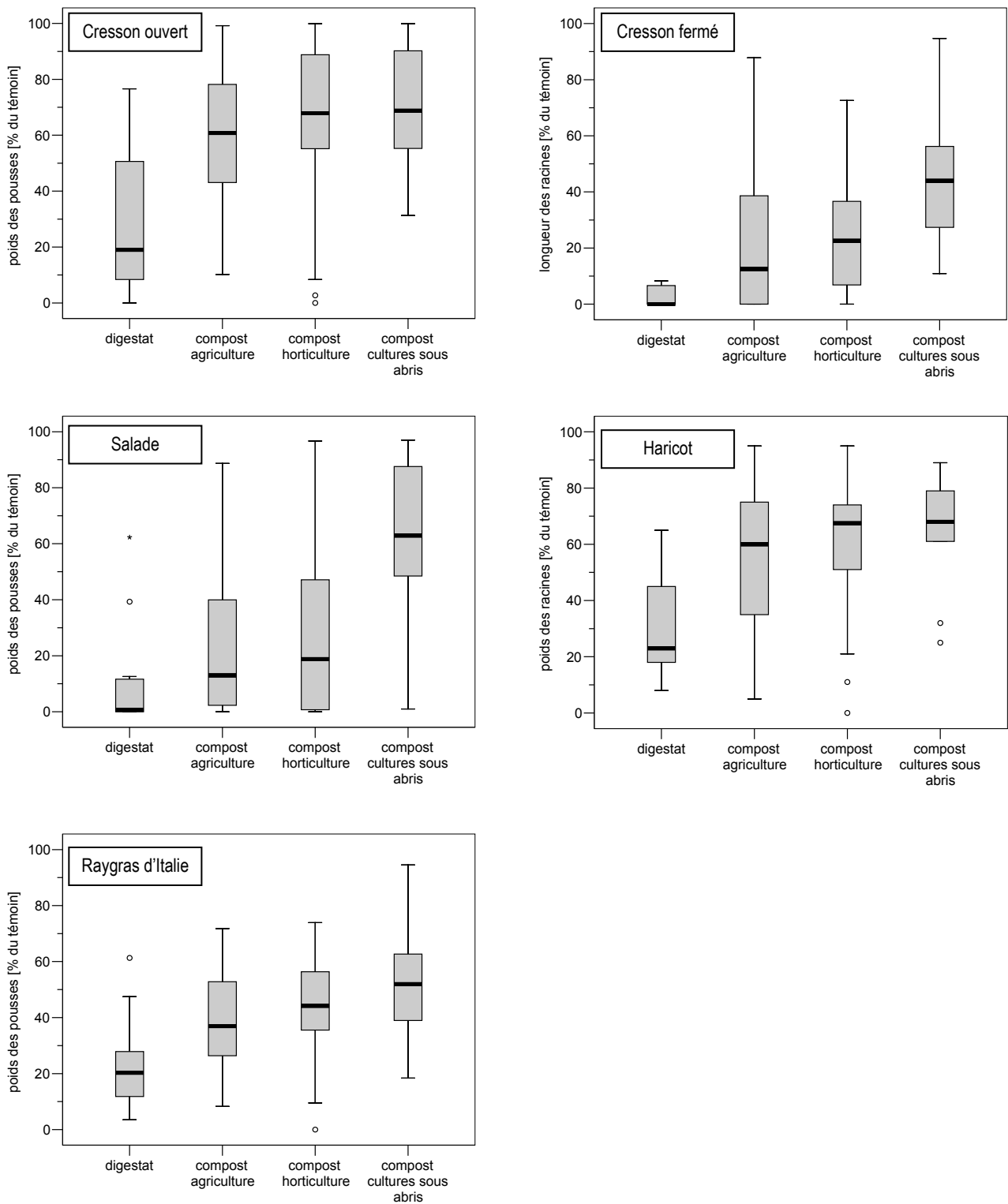
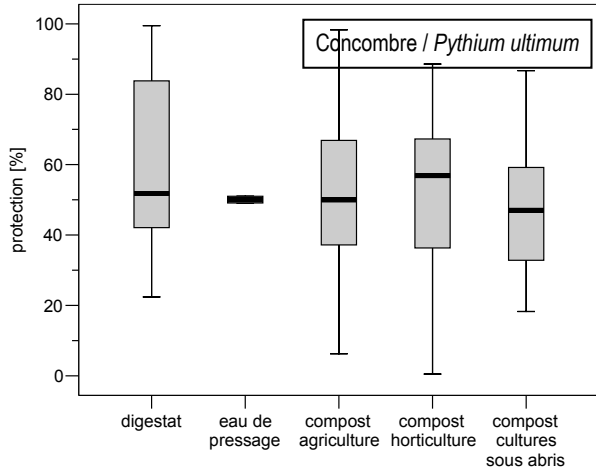
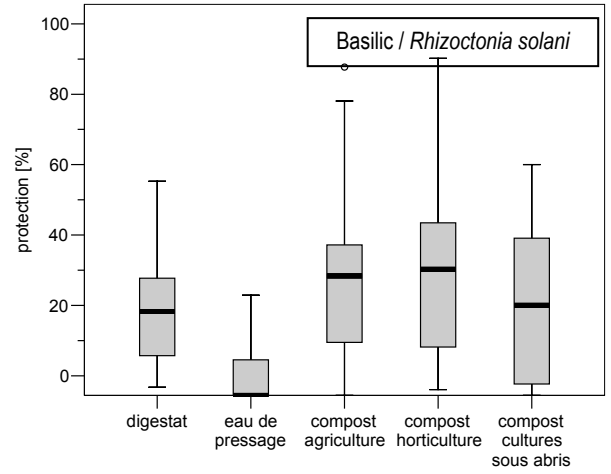


Fig. 5.25 > Capacité de 100 composts et digestats suisses à protéger les plantes contre les maladies

*Protection de plantes de concombre contre la fonte des semis causée par *Pythium ultimum**



*Protection de plantes de basilic contre la pourriture du collet causée par *Rhizoctonia solani**



5.6 Influence du mode de production des composts sur leurs caractéristiques chimiques, physiques et biologiques

Le fait que les diverses classes de produits, définies principalement par le degré de maturation des divers composts, se différencient par les valeurs de divers paramètres de qualité de compost est évidemment normal, les définitions de ces classes étant justement faites pour permettre le choix des produits suivant l'utilisation voulue. Parallèlement à cela, une question importante et récurrente est de savoir si le système de compostage influence de manière primordiale la qualité de compost ou digestat produits.

Pour aborder cette question, les composts produits ont été classifiés en quatre classes selon leur origine : méthanisation, andins triangulaires, andins tabulaires et compostage en bords de champs. Les produits issus de méthanisation sont stockés tel quels ou avec une aération forcée après leur sortie du réacteur ; ils ne sont cependant pas post-compostés, car, dans ce cas, ils sont considérés comme des composts et plus comme des digestats. La différence principale entre les andins triangulaires et les andins tabulaires est leur taille, les andins tabulaires ne laissant, de par leur forme, plus guère une aération passive par convection. Les andins de compostage en bords de champs correspondent de part leurs formes aux andins triangulaires de petite taille ; toutefois, une limite nette entre le tas de compost et son support n'est pas existante. De manière générale, les composts en bords de champs sont beaucoup plus âgés que les autres produits (fig. 5.1), les tas restant en place jusqu'à leur utilisation. Cette durée plus longue du processus se traduit naturellement sur les divers paramètres des produits finis.

La teneur moyenne en matière organique des composts produits en bords de champs est nettement plus faible que celles des autres composts et des digestats (fig. 5.26). Ceci est certainement dû principalement à la plus longue durée du processus ; en plus, le manque de séparation entre la terre et le tas de compost fait que, lors du brassage des tas, une quantité non négligeable de terre se trouve mélangée aux matières compostées, ce qui joue également un rôle sur la teneur plus faible du compost en matière organique. Aucune différence significative entre la teneur en matière organique des trois autres classes de techniques.

Photo 5 > Présentation des divers systèmes de compostage

Co-méthanisation mésophile



Méthanisation thermophile



Andins triangulaires



Andins tabulaires

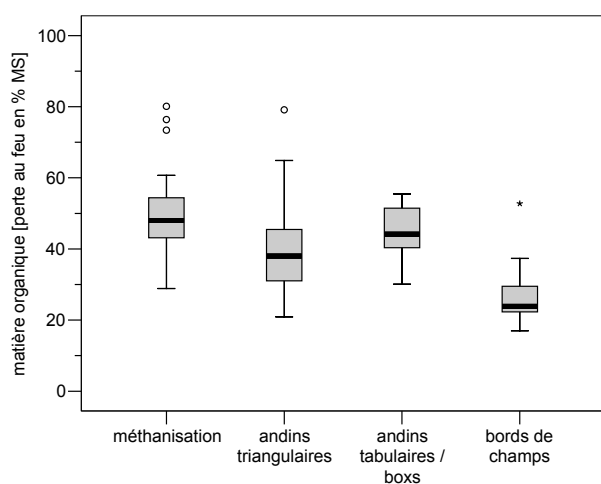


Compostage en bords de champs



Des différences sont toutefois observables en ce qui concerne la qualité de ces matières organiques. En ce qui concerne tout d'abord la couleur de l'extrait aqueux, celui-ci est le plus foncé dans les produits provenant d'installation de méthanisation (fig. 5.27), ce qui est explicable par le fait qu'en système aérobie une recombinaison des substances humiques n'a pas encore pu être réalisée. Les composts provenant de bords de champs produisent des extraits aqueux plus clairs, ce qui est probablement dû à un effet combiné de leurs teneurs en terre plus importante et à une maturation plus avancée.

Fig. 5.26 > Teneur en matière organique de digestat et compost provenant de diverses techniques de compostage



En allant plus en avant dans l'étude de la qualité de la matière organique des divers produits, un point très surprenant a été observé concernant leurs teneurs en acides humiques. Ces acides humiques représentent la partie la plus stable de la matière organique, et ce sont ces molécules qui ont le meilleur potentiel pour influencer positivement et durablement la structure du sol. Le fait que les produits provenant d'installations de méthanisation contiennent proportionnellement moins d'acides humiques que les autres composts est normal (fig. 5.28), ces produits étant physiologiquement plus jeunes. Par contre, il est très surprenant que les composts produits en bords de champs, qui ont sinon toutes les caractéristiques de composts plus mûrs, aient des teneurs relatives d'acides humiques plus faibles que les composts produits sur des places de compostages traditionnelles (fig. 5.28). Il semble que la formation des substances humiques stables n'ait pas pu se dérouler normalement ; ceci pourrait être dû à un problème de régulation de la teneur en humidité dans le tas de compost, ce point étant une des difficultés les plus importantes du système de compostage en bords de champs.

Fig. 5.27 > Teneurs en acides humiques de digestats et composts suisses provenant de diverses techniques de compostage

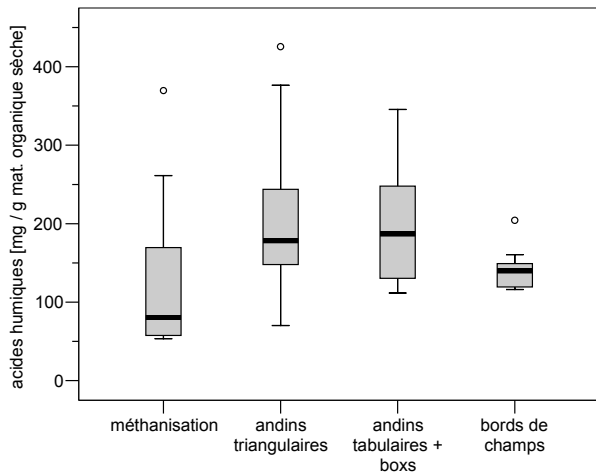
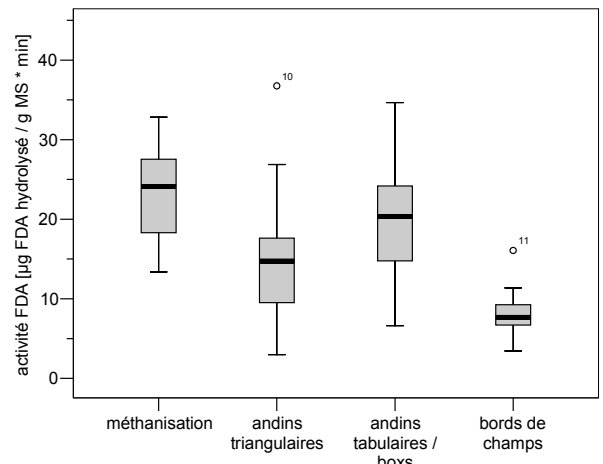
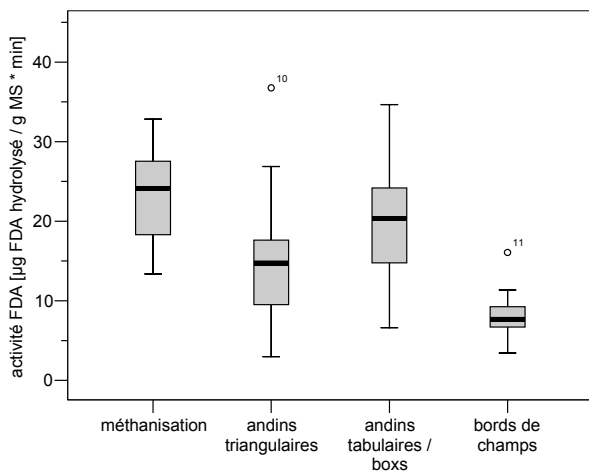


Fig. 5.28 > Activité FDA de digestats et composts suisse provenant de diverses techniques de compostage



En ce qui concerne l'activité microbologique globale des composts, on observe à nouveau un gradient allant des produits provenant des installations de méthanisation jusqu'aux composts produits en bords de champs (fig. 5.29), ces derniers étant, en raison de leur maturité plus avancée, microbiologiquement beaucoup moins actifs.

Fig. 5.29 > Activité FDA de digestats et composts suisse provenant de diverses techniques de compostage



Une image semblable est observable avec les tests de phytotoxicité (fig. 5.30). Le fait que la phytotoxicité de compost en bords de champs soit moins importante est certainement dû à l'âge des produits et à leurs teneurs en terre. Il est par contre intéressant de remarquer que le système de compostage en lui-même n'influence guère la capacité des composts produits à protéger les plantes contre les maladies, si ce n'est que les composts en bords de champs sont un peu moins efficace que les autres produits pour protéger les plantes de concombre contre *P. ultimum* (fig. 5.31). Ceci est à nouveau probablement dû au degré de maturation avancé de ce compost, ce qui fait que son activité biologique est moins importante.

Au niveau de l'état sanitaire des composts, il faut encore relever que certains composts en bords de champs, ainsi que les lombricomposts, contenaient des mauvaises herbes, indiquant que le processus d'hygiénisation naturelle de ces produits n'était pas concluant. Pour l'utilisateur de ces composts, ceci signifie que ces produits peuvent également contenir des agents pathogènes, ceux-ci étant en général plus résistants que les mauvaises herbes. Une grande prudence est donc à conseiller pour l'utilisation de ces produits en horticulture et surtout en maraîchage et en cultures sous abris. Toutefois, le fait que pas tous les composts provenant de bords de champs contenaient des mauvaises herbes viables signifie qu'il est certainement possible de limiter ces risques, le savoir-faire et le professionnalisme du producteur de compost étant sur ce point primordial.

Ainsi, on peut dire que le système de traitement en lui-même n'influence pas guère la qualité des composts produits, les différences observées provenant principalement de la maturation différente des divers produit. Seule exception est la formation affaiblie d'acides humiques dans le compost en bords de champs. Il est cependant sûr que, de part leurs définitions, les produits provenant d'installation de méthanisation seront biologiquement toujours moins mûrs si un post-compostage des digestats n'est pas réalisé.

Le dernier point important à relever est la grande variation de qualité observable à l'intérieur des diverses classes de techniques. Ces variations sont en général plus importantes que les variations entre les diverses classes. Ceci signifie clairement que l'on peut produire des produits de qualité avec les diverses techniques observées, mais que le savoir-faire du maître-composteur est primordial pour obtenir les résultats escomptés. Seule une conduite parfaite du processus permet la production de produits de qualités optimales.

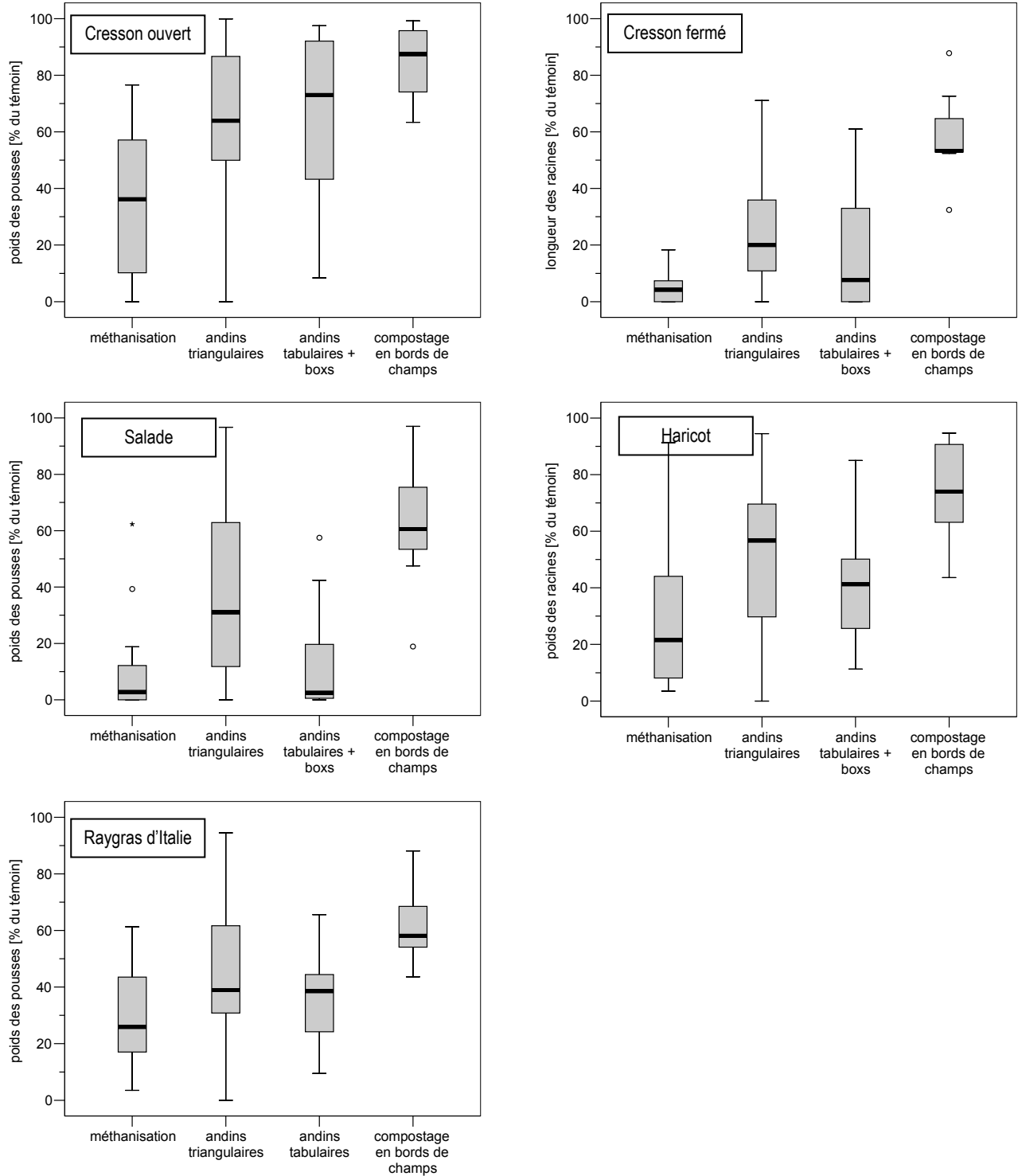
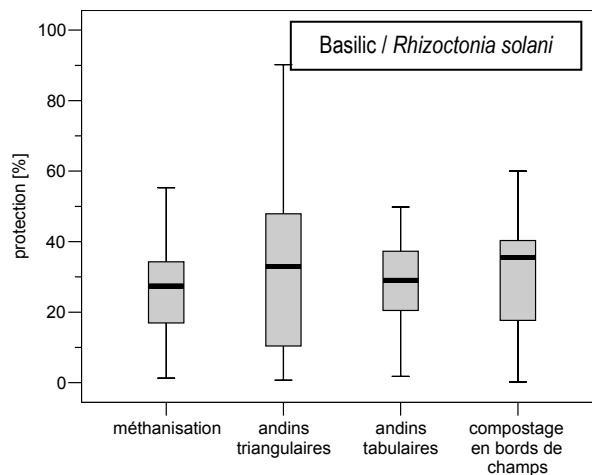
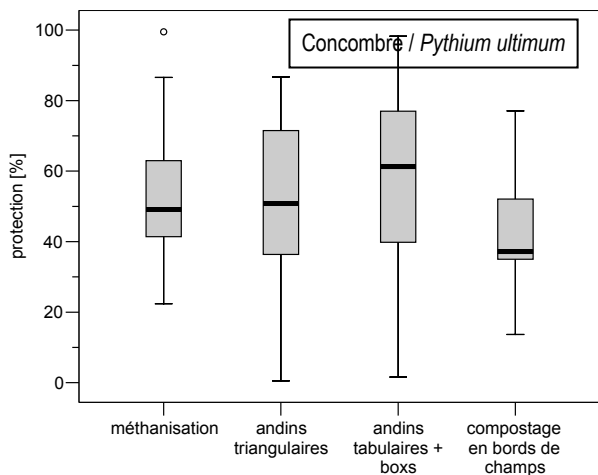
Fig. 5.30 > Phytotoxicité de compost et digestat suisses provenant de diverses techniques de compostage


Fig. 5.31 > Capacité de compost et digestat suisses provenant de diverses techniques de compostage à protéger les plantes contre les maladies

Protection de plantes de concombre contre la fonte des semis causée par Pythium ultimum

Protection de plantes de basilic contre la pourriture du collet causée par Rhizoctonia solani



6 > Post-traitement de digestat : résultats

Deux essais pratiques de post-traitements de digestat ont été réalisés. Ces essais de compostage ont été réalisés à Fehrltorf avec un système d'andins triangulaires intensif (hauteur des andins environ 1,5 mètres, brassage quotidien des tas dans la première phase du compostage). Lors de toute la durée des essais, un soin particulier a été porté aux andins de manière à ce que les conditions de compostage soient le plus optimale possible, en particulier en ce qui concerne l'humidité du matériel. Le suivi pratique et technique des essais a été réalisé par Nedzadin Asani, maître-composteur de l'installation de compostage Gerber à Fehrltorf. La composition des divers andins est décrite dans le tableau 6.1.

Tab. 6.1 > Composition des andins des deux essais de post-compostage de digestat

Essai No 1			
Andins 1A	70 % digestat	30 % criblures	
Andins 1B	30 % digestat	10 % criblures	60 % broyat frais
Andins 1C	30 % digestat	10 % criblures	60 % compost jeune (6 semaines en boxes)
Essai No 2			
Andins 2A	100 % digestat		
Andins 2B	70 % digestat	30 % criblures	
Andins 2C	30 % digestat	10 % criblures	60 % compost jeune (6 semaines en boxes)

Photo 6 > Réalisation des essais de post-compostage du digestat : mise en place, suivi du processus, prise d'échantillons



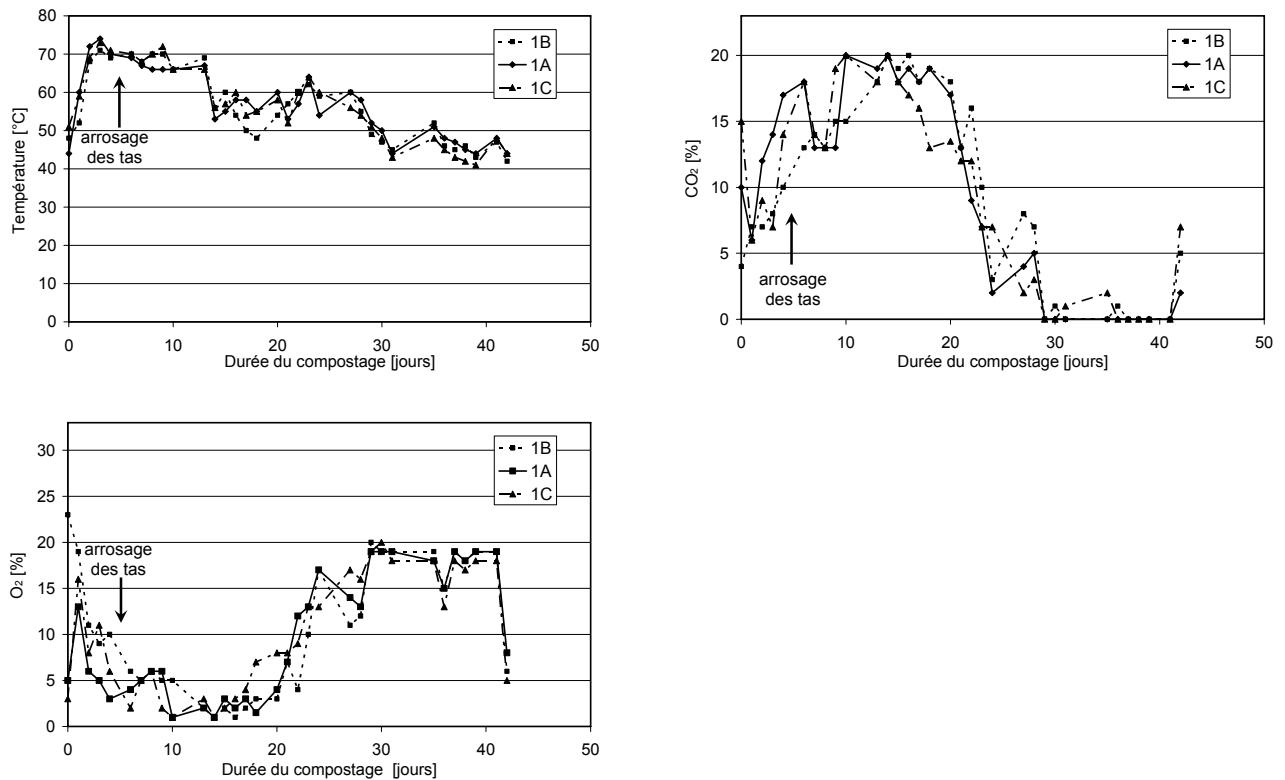
En ce qui concerne l'évolution des paramètres du processus de compostage (températures, teneurs en oxygène et teneurs en gaz carbonique dans les andins), les différentes variantes ne se différencient guère. Le processus de compostage démarre très rapidement, la température dans les divers tas de composts montant très rapidement pour atteindre des valeurs entre 65 et 75 °C, en conséquence de l'activité bactérienne très intense due à la forte dégradation aérobie de la matière organique. Au bout de deux à trois semaines de compostage intensif, l'activité biologique diminue, ce qui se traduit par une baisse de la température dans les tas de composts, ainsi que par une diminution de la teneur en CO₂ (produit de la respiration microbienne) et une augmentation de la teneur en O₂ au centre des andins.

Fig. 6.1 > Evolution des paramètres de compostage pendant le premier essai de post-traitement du digestat

Mélange 1A : 70 % digestat + 30 % criblures

Mélange 1B : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % broyat frais

Mélange 1C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes)



Cette similitude d'évolution de dégradation des matières dans les divers andins est également observable dans les analyses effectuées en laboratoire avec les échantillons prélevés pendant le processus (fig. 6.4 et 6.5). Toutefois, certaines différences entre les andins sont observables au début du compostage, suivant leurs teneurs en digestat. De manière générale, on peut observer que plus le mélange contient de digestat, moins il est réactif. Le test d'auto-échauffement réalisé avec les matières fraîches est plus lent et moins intensif avec les mélanges contenant 70 ou 100 % de digestat (fig. 6.3). Au niveau de leurs caractéristiques chimiques, les mélanges de départ avec une quantité plus importante de digestats se différencient des autres principalement par une teneur en carbone organique dissous plus faible et une valeur pH plus élevée. Ces différences s'égalisent toutefois très rapidement une fois le processus de compostage en route (fig. 6.3, 6.4 et 6.5).

La diminution de la quantité globale d'azote minéral ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) lors du compostage (fig. 6.5) a deux raisons : premièrement une partie de l'azote est perdue sous forme ammoniacale pendant le processus, et deuxièmement une autre partie de cet azote minéral est assimilé et stocké dans la biomasse microbienne.

Fig. 6.2 > Evolution de la température pendant le deuxième essai de post-traitement du digestat

Mélange 2A : 100 % digestat

Mélange 2B : 70 % digestat + 30 % criblures

Mélange 2C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes)

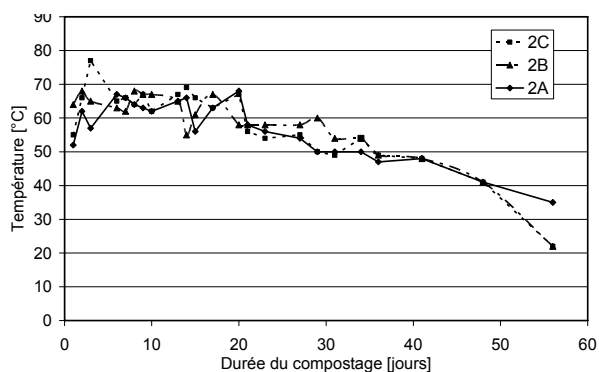


Photo 7 > Structure des produits après deux semaines de compostage

70 % digestat + 30 % criblures

30 % digestat + 10 % criblures + 60 % broyat frais



30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes)

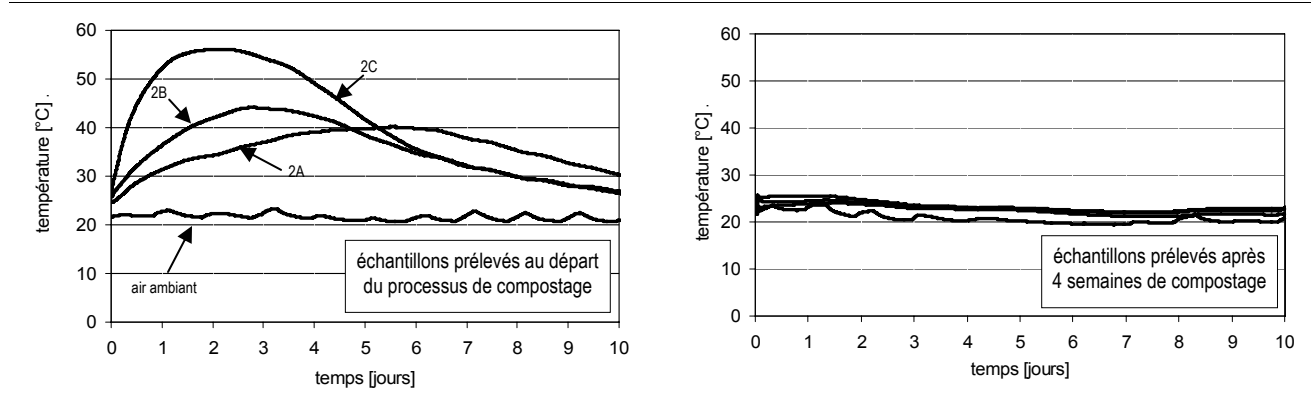


Fig. 6.3 > Influence du mélange de départ sur l'évolution de son potentiel d'auto-échauffement pendant le post-compostage de digestat

2A : 100 % digestat ;

2B : 70 % digestat + 30 % criblures ;

2C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes)



Le mélange de départ du post-compostage du digestat a une influence importante sur le risque d'immobilisation de l'azote minéral suite à l'utilisation du compost dans les champs. Dans les deux essais de post-compostage, il a été observé que les composts avec plus de 50 % de digestats avaient un bilan d'azote minéral dans le sol moins avantageux (fig. 6.6). Il semble que le digestat lui-même ne soit pas capable de garder cet azote pendant le processus de compostage. L'ajout de matières ligneuses au digestat permet d'équilibrer le produit à ce sujet. Que cette matière soit fraîche ou pré-compostée n'a pas, dans l'essai présent, influencé son effet sur ce point (fig. 6.6).

Comme décrit dans le chapitre 5.5, le digestat frais est relativement fortement phytotoxique. Cette situation change drastiquement après quelques semaines de post-compostage (fig. 6.7). L'ajout de mélange frais ou de compost frais n'a pas amélioré de manière significative la compatibilité des composts avec les plantes. Dans le premier essai, l'apport de compost frais (6 semaines de compostage en boxes) a même eu plutôt un effet négatif sur la croissance des plantes (fig. 6.7). Il faut à ce sujet souligner que ce compost n'était pas de qualité optimale, certains problèmes ayant été observés lors de sa préparation dans le box. Ainsi, ces résultats démontrent qu'une attention particulière doit être portée à la qualité de tous les ingrédients du mélange.

La capacité des divers produits à protéger les plantes contre les maladies a également été étudiée. Alors que tous les composts âgés protègent moyennement les plantes de concombre contre la maladie de fonte des semis (fig. 6.8 à gauche), leur potentiel à protéger les plantes de basilic contre *Rhizoctonia solani* est moyen à faible. Les diverses compositions des mélanges de départ testées n'influencent pas significativement ce point.

Fig. 6.4 > Influence du mélange de départ du post-compostage de digestat sur l'évolution de sa matière sèche, sa teneur en substance organique, sa valeur pH et sa salinité dans le produit pendant le post-compostage de digestat

Premier essai : 1A : 70 % digestat + 30 % criblures ; 1B : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % broyat frais ; 1C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes).
Deuxième essai : 2A : 100 % digestat ; 2B : 70 % digestat + 30 % criblures ; 2C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes).

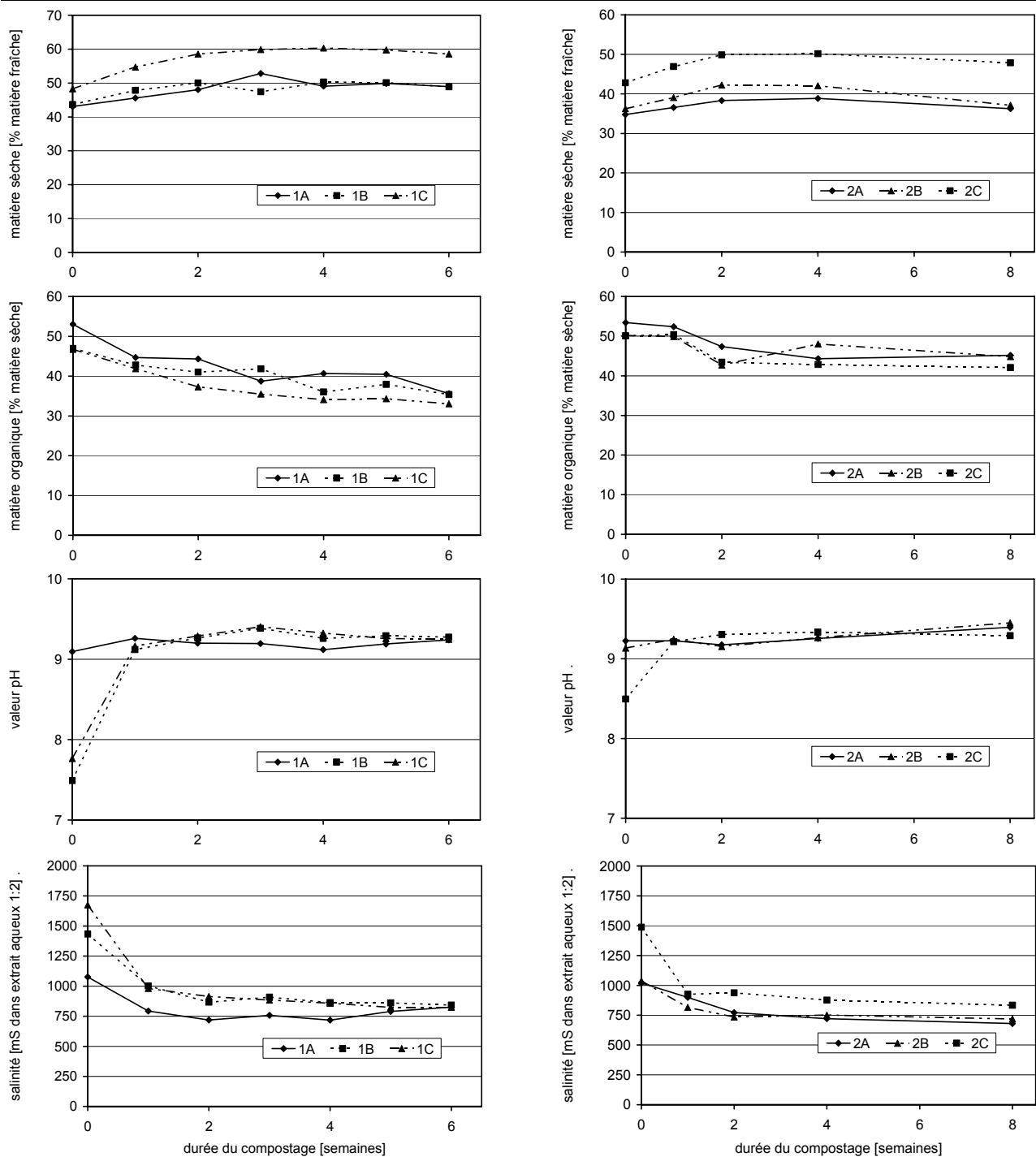


Fig. 6.5 > Influence du mélange de départ du post-compostage de digestat sur l'évolution de ses teneurs en ammonium, nitrate, carbone organique dissous (DOC) et acétate

Premier essai : 1A : 70 % digestat + 30 % criblures ; 1B : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % broyat frais ; 1C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes). Deuxième essai : 2A : 100 % digestat ; 2B : 70 % digestat + 30 % criblures ; 2C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes).

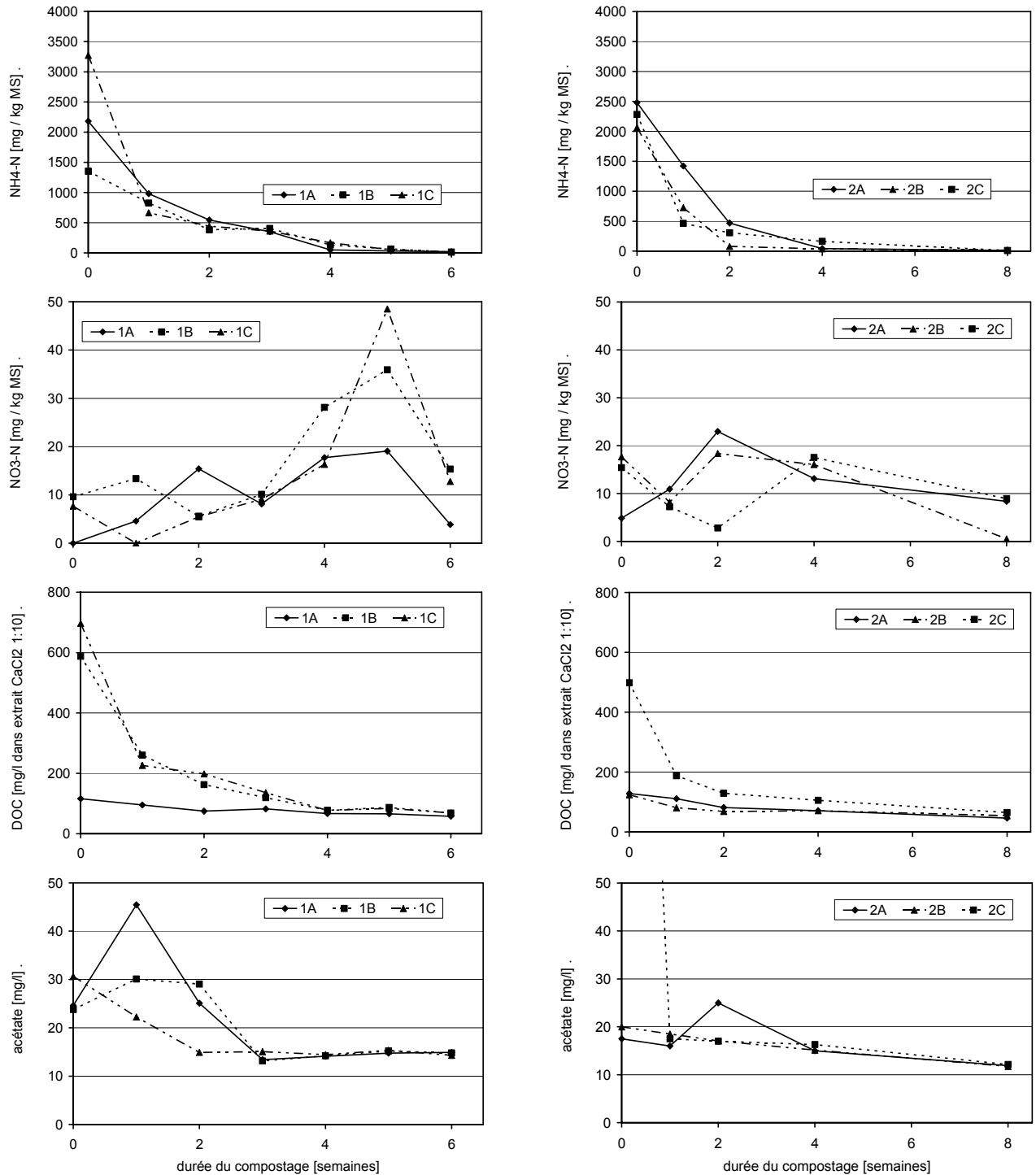


Fig. 6.6 > Influence du mélange du post-compostage de digestat sur son potentiel à immobiliser l'azote minéral dans les champs

Premier essai (échantillons prélevés après 6 semaines de compostage): 1A : 70% digestat + 30% criblures ; 1B : 30% digestat + 10% criblures + 60% broyat frais ; 1C : 30% digestat + 10% criblures + 60% compost jeune (6 semaines en boxes)
Deuxième essai (échantillons prélevés après 2 et 8 semaines de compostage): 2A : 100% digestat ; 2B : 70% digestat + 30% criblures ; 2C : 30% digestat + 10% criblures + 60% compost jeune (6 semaines en boxes)

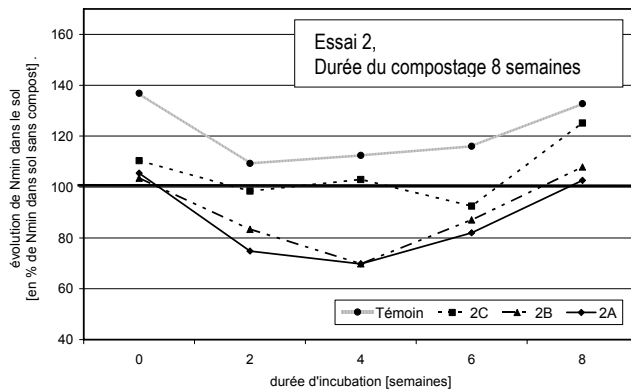
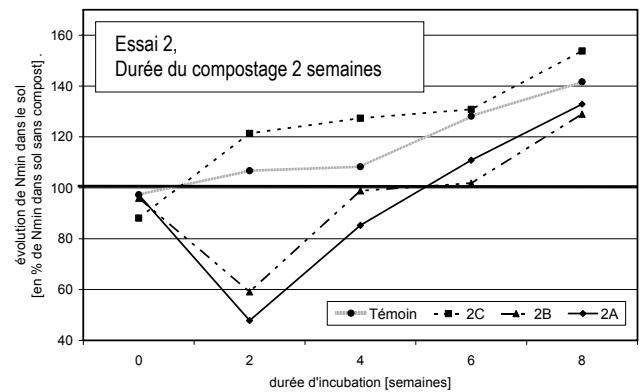
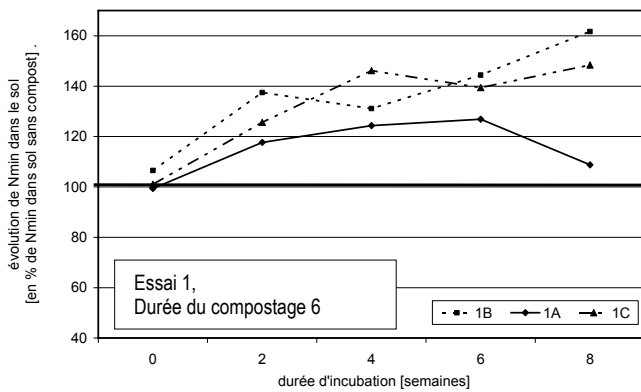


Fig. 6.7 > Influence du mélange du post-compostage de digestat sur son effet phytotoxique

Premier essai (échantillons prélevés après 6 semaines de compostage) : 1A : 70 % digestat + 30 % criblures ; 1B : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % broyat frais ; 1C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes).
Deuxième essai (échantillons prélevés après 2 et 8 semaines de compostage) : 2A : 100 % digestat ; 2B : 70 % digestat + 30 % criblures ; 2C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes)

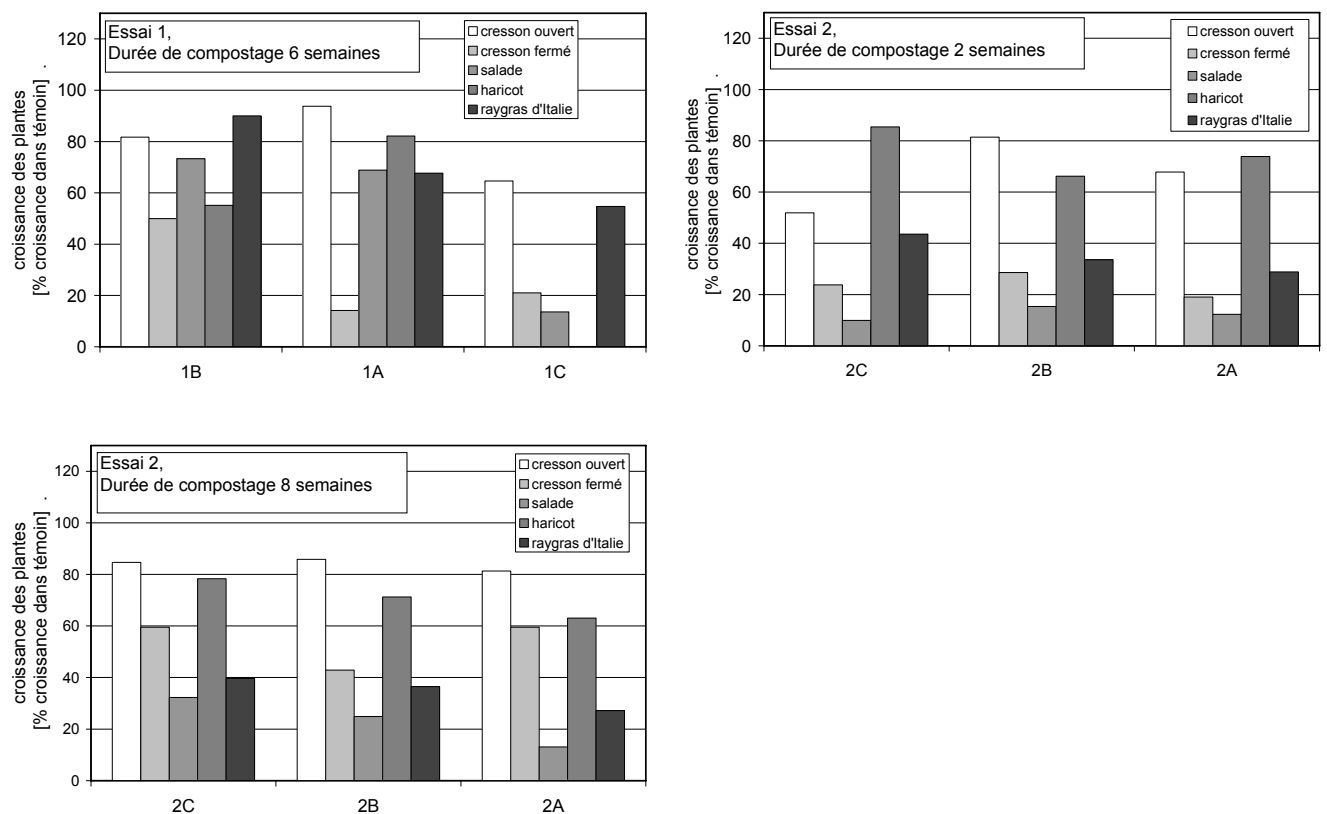


Fig. 6.8 > Influence du mélange du post-compostage de digestat sur sa capacité à protéger les plantes contre les maladies

Premier essai (échantillons prélevés après 6 semaines de compostage) : 1A : 70 % digestat + 30 % criblures ; 1B : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % broyat frais ; 1C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes).
Deuxième essai (échantillons prélevés après 2 et 8 semaines de compostage) : 2A : 100 % digestat ; 2B : 70 % digestat + 30 % criblures ; 2C : 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes).

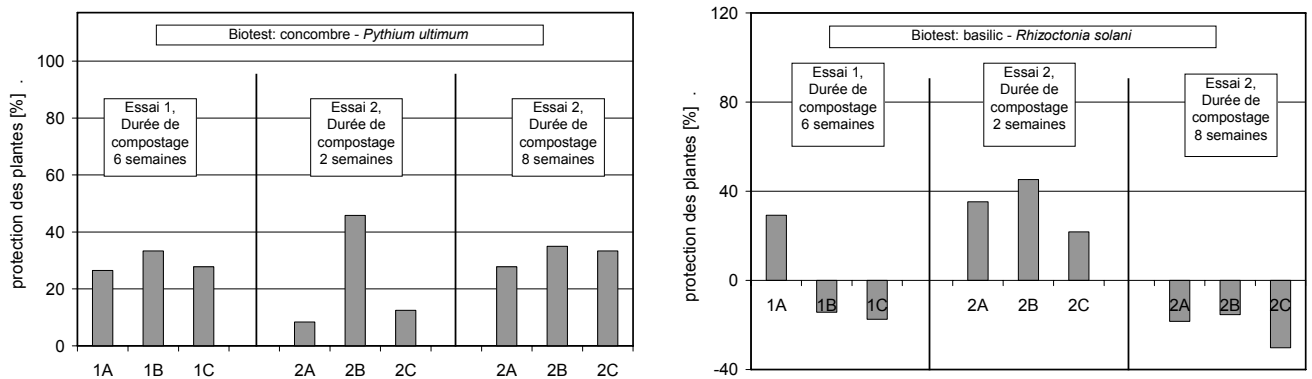


Photo 8 > Phytotoxicité des produits après 6 semaines de compostage – Test du cresson fermé

De gauche à droite : 70 % digestat + 30 % criblures ; 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % broyat frais ; 30 % digestat + 10 % criblures + 60 % compost jeune (6 semaines en boxes)



En conclusion, ces essais de post-compostage de digestat ont démontré qu'il est possible de produire du compost de qualité à partir de digestat si les conditions du compostage sont bien dominées, en particulier l'humidité des tas. Une quantité trop importante de digestat dans le mélange influence négativement la réaction du compost envers l'azote minéral lors de son application. Une attention particulière doit être portée sur la qualité des ingrédients du mélange de départ.

7 > Essais à moyen terme d'utilisation aux champs de digestat et de compost

Deux essais pratiques en pleins champs ont été réalisés à Mellikon (AG), l'un en 2004 dans de la terre lourde, et un en 2005 dans une terre légère. Dans les deux essais, le sol a été amendé au printemps avec huit composts et digestats (deux digestats, deux composts pour agriculture, deux composts pour horticulture et deux composts pour cultures sous abris) à raison de 100 m³ par hectare, puis du maïs a été cultivé. En automne, le maïs a été récolté, et environ trente litres de terre par parcelle ont été prélevés afin d'étudier l'effet des divers composts sur les caractéristiques biologiques du sol.

Photo 9 > Mise en place des essais en champs



7.1 Influence du compost sur la croissance du maïs

Du point de vue agronomique, la première différence observée entre les divers composts et digestats a été leur influence sur l'azote du sol disponible pour les plantes. Très rapidement, le compost agricole ont bloqué une partie de l'azote minéral du sol, et ceci aussi bien dans le sol lourd (fig. 7.1 à gauche) que dans le sol léger (fig. 7.1 à gauche). Ce blocage d'azote a également été bien visible sur la croissance des plantes de maïs, celles poussant dans les parcelles ayant reçu le compost agricole étant plus petites et surtout beaucoup plus chétives quelques semaines après le semis (fig. 7.1 et 7.2 à droite). Une correction de fertilisation azotée avec de la farine de plume a été faite environ sept semaines après le semis. Suite à cette fertilisation, les plantes de maïs ont pu bien se reprendre et compenser pratiquement complètement leur retard, une différence significative de récolte entre les parcelles avec le compost agricole et celles témoin étant faible (sol lourd en 2004) ou inexistante (sol léger en 2005).

Fig. 7.1 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur la teneur du sol en azote minéral après le semis (à gauche) et sur la hauteur du maïs 7 semaines après le semis (à droite) dans un sol lourd (essai 2004)

T: parcelle témoin, *D1*, *D2*: digestat; *Ca1*, *Ca2*: compost agricole; *Ch1*, *Ch2*: compost horticole; *Cc1*, *Cc2*: compost pour cultures sous abris

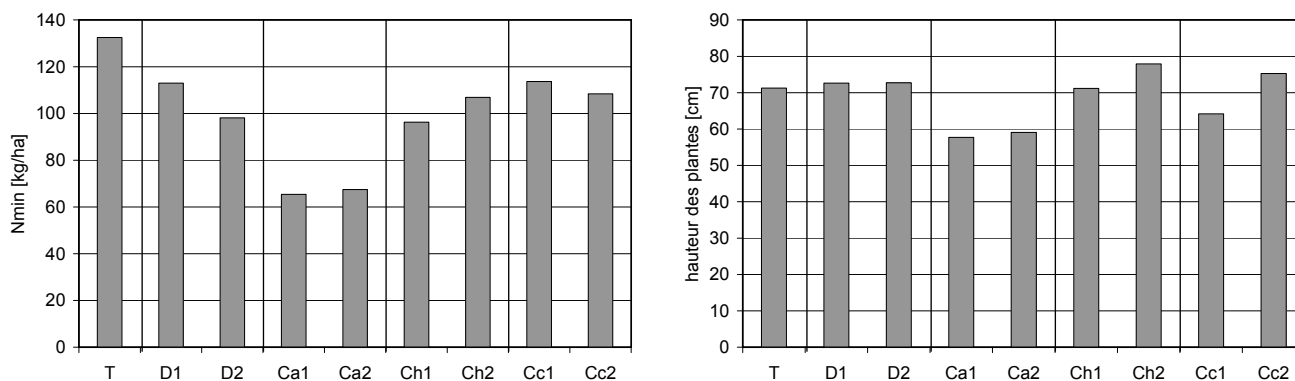
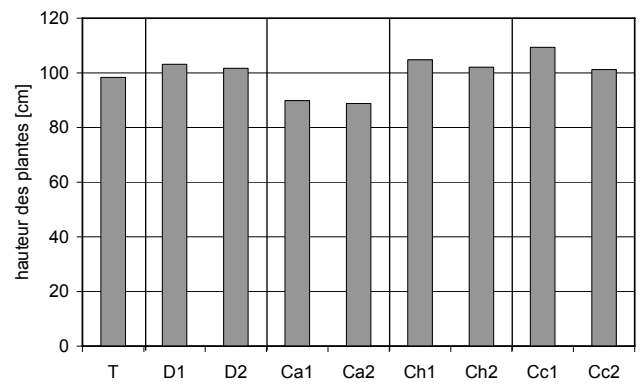
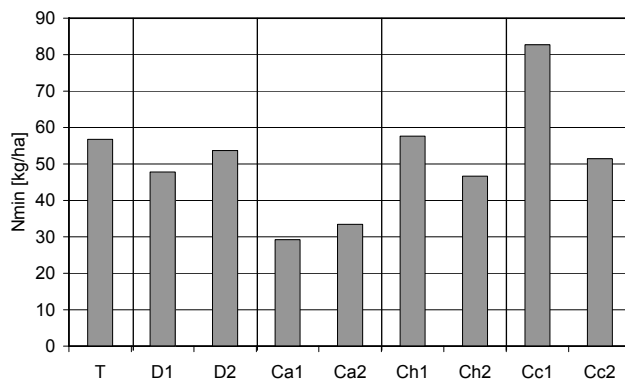


Photo 10 > Effet de l'immobilisation de l'azote minéral par un compost agricole jeune sur la croissance de plantes de maïs en 2004 dans un sol lourd (à gauche) et en 2005 dans un sol léger (à droite)



Fig. 7.2 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur la teneur du sol en azote minéral 4 semaines après le semis (à gauche) et sur la hauteur du maïs 7 semaines après le semis (à droite) dans un sol léger (essai 2005)

T: parcelle témoin, *D1*, *D2*: digestat; *Ca1*, *Ca2*: compost agricole; *Ch1*, *Ch2*: compost horticole; *Cc1*, *Cc2*: compost pour cultures sous abris



7.2 Influence du compost sur les caractéristiques du sol

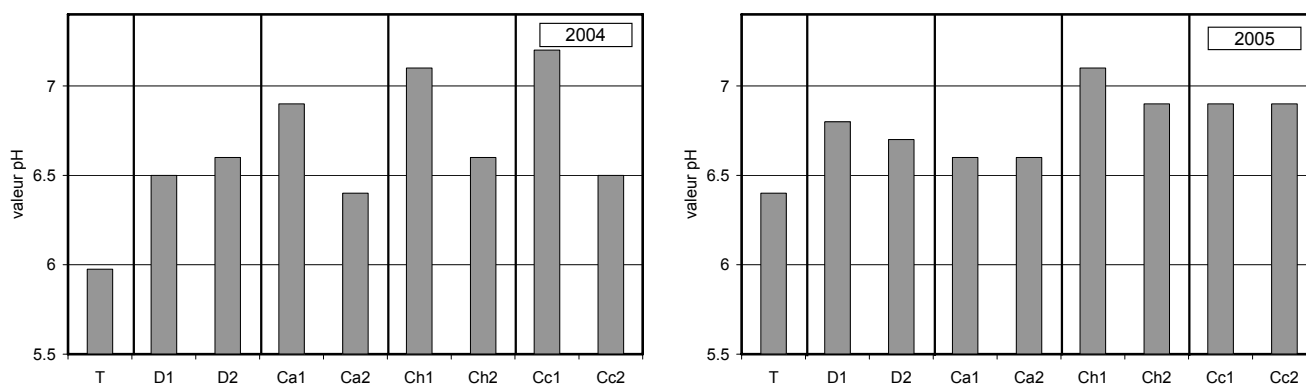
Après la récolte de la culture de maïs, des échantillons de sol ont été prélevés dans les diverses parcelles de l'essai et analysés.

Les divers composts et digestats utilisés n'ont pas influencé de manière constante la teneur du sol en phosphore, en potasse et en magnésium (tab. 7.1 et 7.2). Par contre, la teneur en calcium dans le sol a été clairement augmentée par tous le digestat et compost, et ceci dans les deux sols testés (tab. 7.1 et 7.2).

L'influence de compost et digestat sur le pH du sol a pu être observé lors des deux essais, les valeurs pH des parcelles ayant reçu du compost ou du digestat étant en moyenne entre 0,5 et 1 unité plus élevées (fig. 7.3). L'effet était plus élevé dans le sol lourd, le pH de base de ce sol étant plus bas. Tendanciellement, les composts plus mûrs ont eu un effet plus important que les plus moins mûrs. La question qui se pose maintenant est de savoir si cet effet est seulement à moyen terme ou s'il est persistant.

Fig. 7.3 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur le pH du sol après une culture de maïs dans un sol lourd (essai 2004) et dans un sol léger (essai 2005)

T: parcelle témoin, *D1*, *D2*: digestat; *Ca1*, *Ca2*: compost agricole; *Ch1*, *Ch2*: compost horticole; *Cc1*, *Cc2*: compost pour cultures sous abris



Tab. 7.1 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur la récolte de maïs et sur les caractéristiques du sol après une culture de maïs dans un sol lourd (essai 2004)

Produit amendé		Récolte [kg MS/m]	Valeur pH	P total [mg/kg]	K total [mg/kg]	Mg total [mg/kg]	Ca [g/kg]
Témoin	moyenne	1,10	6,0	51,4	152,3	162,7	2068,8
	écart-type	0,06	0,2	11,0	59,1	17,9	161,3
Digestat 1	moyenne	1,00	6,5	44,8	136,6	160,2	2804,5
	écart-type	0,11	0,1	12,6	34,9	9,8	459,0
	% du témoin	91,1	108,4	87,2	89,6	98,5	135,6
Digestat 2	moyenne	1,02	6,6	86,1	177,6	196,6	2658,5
	écart-type	0,12	0,1	27,6	62,5	17,2	232,2
	% du témoin	93,1	110,0	167,5	116,6	120,9	128,5
Compost agricole 1	moyenne	1,01	6,9	60,5	169,9	170,9	3167,5
	écart-type	0,16	0,1	17,5	59,9	17,0	264,9
	% du témoin	91,6	115,9	117,8	111,5	105,0	153,1
Compost agricole 2	moyenne	1,07	6,4	45,6	137,9	168,4	2493,5
	écart-type	0,20	0,1	12,4	58,8	13,6	180,3
	% du témoin	96,9	106,3	88,7	90,5	103,5	120,5
Compost horticole 1	moyenne	1,09	7,1	70,1	204,5	194,4	4219,5
	écart-type	0,07	0,2	18,7	68,0	18,3	1108,1
	% du témoin	98,6	119,2	136,4	134,2	119,5	204,0
Compost horticole 2	moyenne	1,15	6,6	64,8	215,5	191,6	2859,3
	écart-type	0,16	0,1	20,5	76,5	13,3	246,8
	% du témoin	104,3	110,0	126,1	141,4	117,7	138,2
Compost pour cultures sous abris 1	moyenne	1,07	7,2	70,5	139,2	159,6	3572,3
	écart-type	0,08	0,1	31,5	42,7	27,5	1057,5
	% du témoin	97,7	119,7	137,1	91,4	98,1	172,7
Compost pour cultures sous abris 2	moyenne	1,14	6,5	62,7	180,5	179,8	2770,5
	écart-type	0,12	0,1	18,8	51,3	8,5	164,5
	% du témoin	104,7	109,2	122,0	118,5	110,5	133,9

Par variante, quatre parcelles de 12 m² ont été cultivées. Chaque valeur indiquée dans ce tableau est ainsi la moyenne de quatre valeurs individuelles.

Tab. 7.2 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur la récolte de maïs et sur les caractéristiques du sol après une culture de maïs dans un sol léger (essai 2005)

Produit amendé		Récolte [kg MS/m]	Valeur pH	P total [mg/kg]	K total [mg/kg]	Mg total [mg/kg]	Ca [g/kg]
Témoin	moyenne	0,82	6,4	46,0	110,4	153,1	2349,5
	écart-type	0,22	0,0	11,9	25,9	27,9	235,4
Digestat 1	moyenne	0,83	6,8	27,3	92,5	129	2839,5
	écart-type	0,08	0,2	14,3	14,3	27,1	779,4
	% du témoin	101,1	105,4	59,4	83,8	84,2	120,9
Digestat 2	moyenne	0,86	6,7	44,3	113,6	148,9	2409,8
	écart-type	0,13	0,1	15,4	23,0	27,0	228,2
	% du témoin	104,3	103,5	96,2	102,9	97,3	102,6
Compost agricole 1	moyenne	0,82	6,6	41,5	98,1	130,0	2653,0
	écart-type	0,36	0,1	23,6	22,8	23,4	253,0
	% du témoin	100,2	103,1	90,2	88,8	84,9	112,9
Compost agricole 2	moyenne	0,82	6,6	28,1	95,6	138,7	2547,3
	écart-type	0,23	0,1	8,9	11,4	21,5	207,4
	% du témoin	99,9	102,3	61,1	86,5	90,6	108,4
Compost horticole 1	moyenne	0,89	7,1	52,8	113,0	140,6	3241,8
	écart-type	0,11	0,2	14,3	29,2	30,4	740,3
	% du témoin	109,0	109,7	114,6	102,4	91,9	138,0
Compost horticole 2	moyenne	0,81	6,9	33,5	117,4	148,7	2704,5
	écart-type	0,11	0,1	7,1	30,3	30,7	255,9
	% du témoin	99,3	107,0	72,7	106,3	97,2	115,1
Compost pour cultures sous abris 1	moyenne	0,91	6,9	38,1	117,0	141,0	2598,0
	écart-type	0,32	0,1	5,7	30,8	32,0	263,0
	% du témoin	111,1	106,6	82,7	106,0	92,1	110,6
Compost pour cultures sous abris 2	moyenne	0,90	6,9	30,0	95,1	148,3	2568,3
	écart-type	0,14	0,2	2,4	14,9	19,5	199,0
	% du témoin	110,3	107,0	65,1	86,2	96,9	109,3

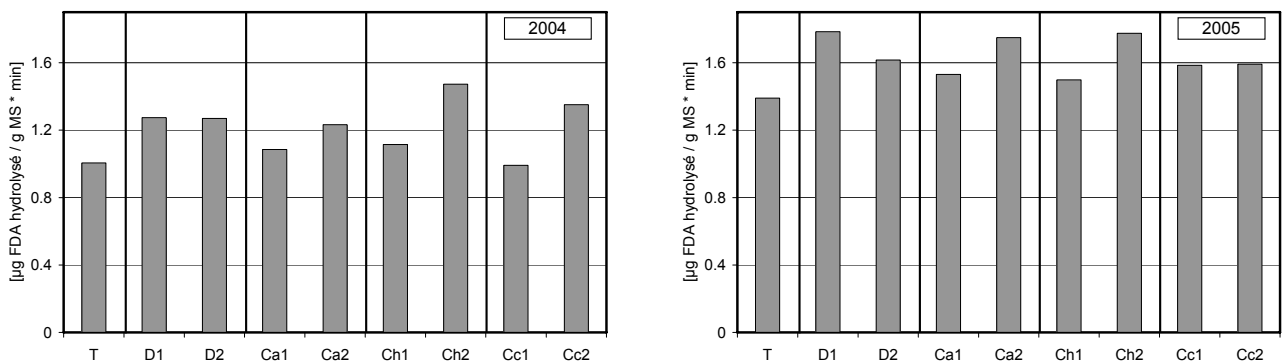
Par variante, quatre parcelles de 12 m² ont été cultivées. Chaque valeur indiquée dans ce tableau est ainsi la moyenne de quatre valeurs individuelles

Une des questions principales de ces deux essais en champs était de savoir si l'apport de composts et de digestats peut influencer à moyen terme l'activité microbienne des sols. Tout d'abord, l'activité générale des sols a été caractérisée en mesurant son activité enzymatique FDA. A une exception près, tous les sols ayant reçu au printemps du compost ou du digestats avaient en automne une activité enzymatique FDA augmentée d'entre 10 et 25 % (fig. 7.4). Aucune différence significative d'augmentation de cette activité enzymatique n'a été observée entre les diverses classes de produits (fig. 7.4).

Photo 11 > Récolte du maïs et prise s'échantillons de sols pour les essais en pots

Fig. 7.4 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur l'activité microbiologique du sol après une culture de maïs dans un sol lourd (essai 2004) et dans un sol léger (essai 2005)

T : parcelle témoin, D1, D2 : digestat ; Ca1, Ca2 : compost agricole ; Ch1, Ch2 : compost horticole ; Cc1, Cc2 : compost pour cultures sous abris



Cette augmentation d'activité microbiologique ne s'est toutefois pas traduite par une augmentation de la résistance des plantes aux maladies. En effet, en ce qui concerne l'influence des composts et digestats sur la réceptivité des sols aux maladie, aucune différence significative n'a pu être observé entre les sols prélevés à la fin de la culture de maïs, que ce soit dans le système hôte-pathogène concombre – *Pythium ultimum* (7.5) ou basilic – *Rhizoconia solani* (fig. 7.6). De même, ces sols n'influencent pas la résistance au mildiou (agent pathogène *Phytophthora infestans*) des feuilles de plantes de tomates croissant dans ces sols. Deux raisons pourraient être responsable de cet état des choses. D'une part, il est possible que plus de temps soit nécessaire pour que les effets des composts sur la fertilité des sols et sur la santé des plantes plus soient observables. Il est d'autre part probable que le manque de différence de réceptivité aux maladies des sols des diverses variantes soit également dû au fait que les deux champs utilisés pour les essais avaient une bonne activité biologique de base, ces deux champs étant cultivés en agriculture biologique et ayant une bonne rotation de leurs cultures.

Fig. 7.5 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur le développement dans le sol de la maladie de fonte des semis de concombre, agent pathogène *Pythium ultimum*, après une culture de maïs dans un sol lourd (essai 2004) et dans un sol léger (essai 2005)

T : parcelle témoin, D1, D2 : digestat ; Ca1, Ca2 : compost agricole ; Ch1, Ch2 : compost horticole ; Cc1, Cc2 : compost pour cultures sous abris

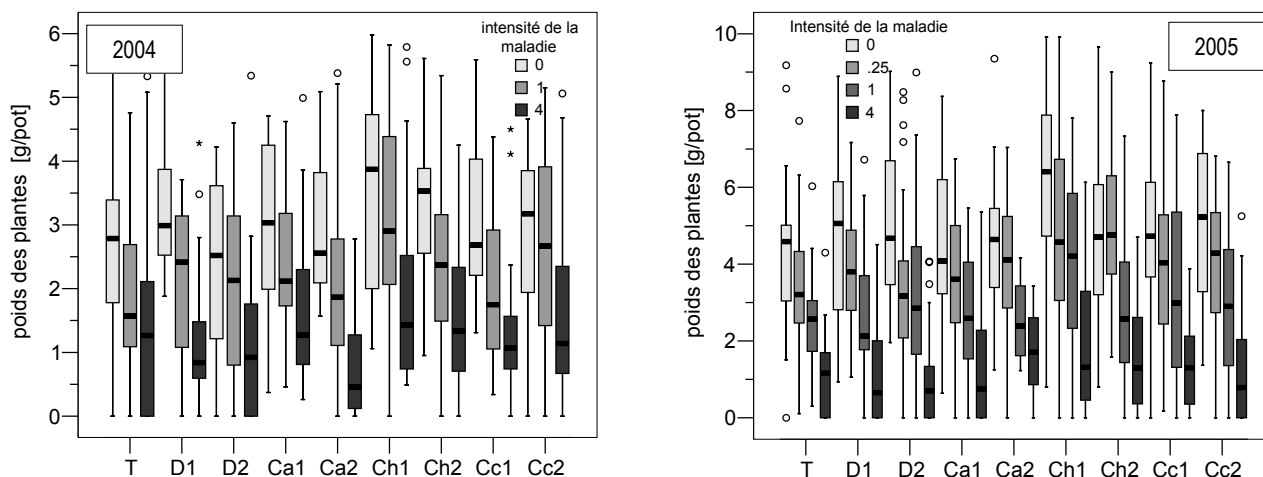


Fig. 7.6 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur le développement dans le sol de la maladie de la pourriture du collet du basilic, agent pathogène *Rhizoctonia solani*, après une culture de maïs dans un sol lourd (essai 2004) et dans un sol léger (essai 2005)

T : parcelle témoin, D1, D2 : digestat ; Ca1, Ca2 : compost agricole ; Ch1, Ch2 : compost horticole ; Cc1, Cc2 : compost pour cultures sous abris

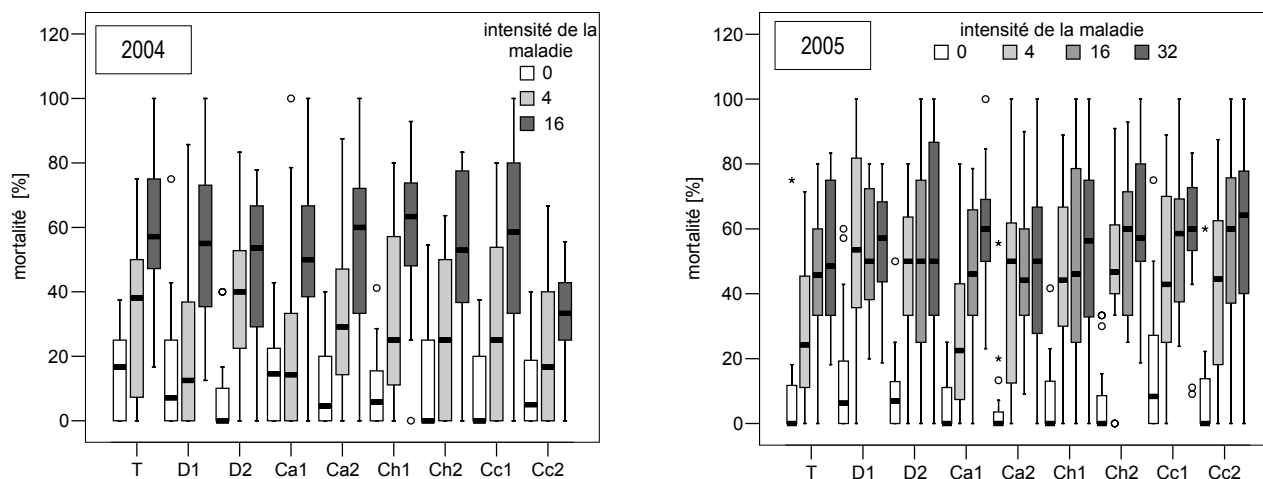


Photo 12 > Exemples de réceptivité des sols à *Pythium ultimum* (à gauche) et à *Rhizoctonia solani* (à droite)

De haut en bas : quantité croissante d'agents pathogènes

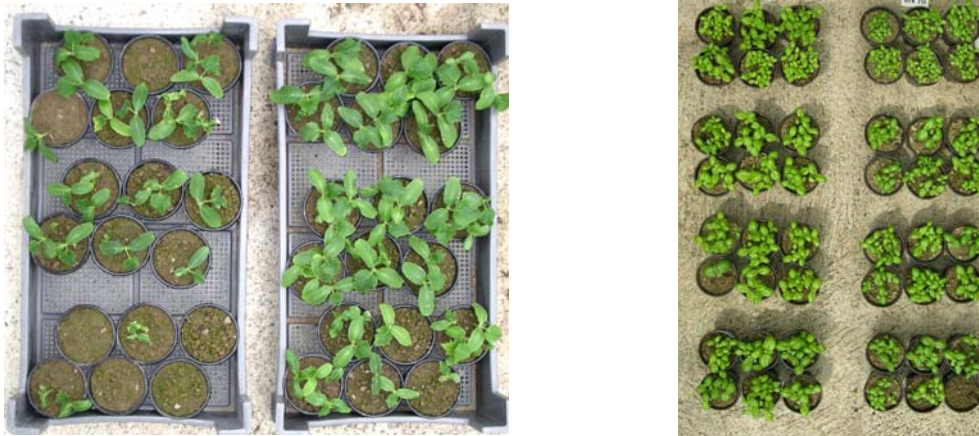
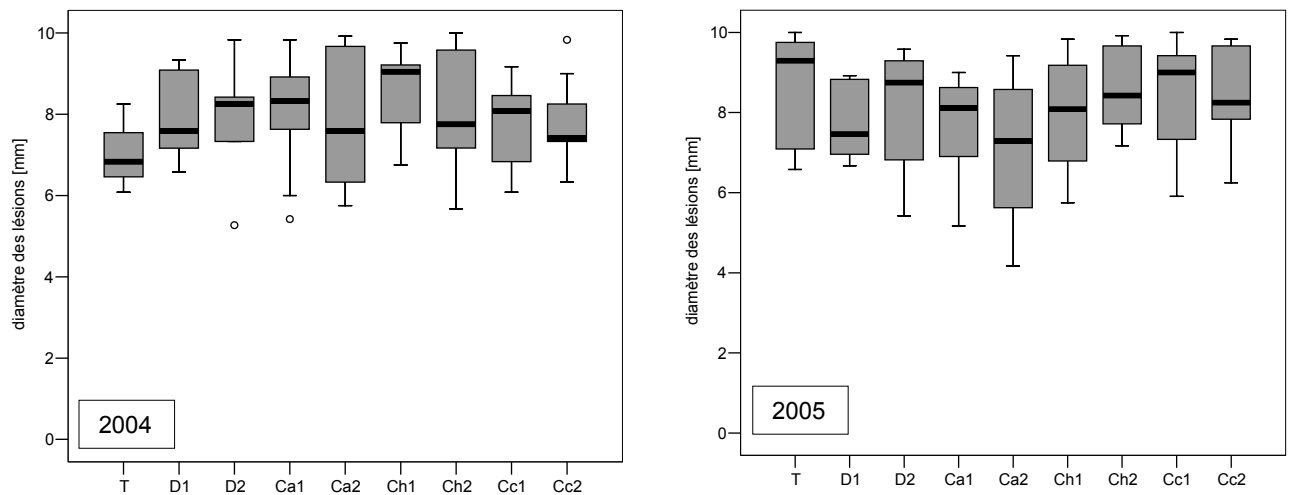


Fig. 7.7 > Influence d'apports de 100 m³ de digestat ou de compost sur la résistance au mildiou de feuilles de plantes de tomates croissant dans le sol prélevé après une culture de maïs (essai 2004 : sol lourd ; essai 2005 : sol léger)

T : parcelle témoin, D1, D2 : digestat ; Ca1, Ca2 : compost agricole ; Ch1, Ch2 : compost horticole ; Cc1, Cc2 : compost pour cultures sous abris



En conclusion, ces essais à moyen terme ont mis en évidence l'importance du choix des composts en ce qui concerne la disponibilité de l'azote minéral dans le sol. Le compost et digestat ont eu un effet clairement positif sur la valeur pH des deux champs et ont augmenté l'activité microbiologique du sol dans les deux essais. Par contre, un effet suppressif de compost et digestat n'a pu être observé lors de ces essais à moyen terme.

Des essais à plus long terme sont maintenant nécessaires pour affiner ces résultats et pour répondre à la question de savoir si les effets observés sont durables, s'ils s'atténuent ou s'augmentent avec le temps.

8 > Recommandations pour la pratique

Les résultats obtenus dans ce projet montrent que la majorité des composts et digestats suisses sont de bonne qualité. Ils se différencient toutefois quand à leurs caractéristiques, suivant leurs intrants, leur maturation et la gestion de la conduite du processus. Le producteur de compost peut influencer les propriétés de ses produits par le choix des intrants et par la conduite du processus, alors que l'utilisateur peut optimiser l'effet des composts sur ses cultures par le choix du produit correspondant aux buts recherchés et par le mode d'utilisation des produits.

8.1 **Recommandations pour les collaborateurs des installations de méthanisation et de compostage**

Le système de compostage n'influence pas de manière déterminante la qualité des produits. Les deux principaux facteurs responsables pour les propriétés de compost et digestat sont les intrants utilisés et la gestion de la conduite du processus.

8.1.1 **Choix des intrants**

Il est évident que la qualité des intrants joue un rôle important sur la teneur en matières indésirables, en particulier en plastiques, des composts produits. Des infrastructures techniques, comme les aspirateurs à plastiques, peuvent permettre d'améliorer en partie la situation ; toutefois, pour obtenir un compost exempt de corps étrangers, la méthode la plus efficace est de ne travailler que des intrants ne contenant pas ses matières.

Outre cet aspect, les intrants utilisés influencent principalement la teneur des composts et digestats en éléments nutritifs et la salinité des produits. En ce qui concerne ce dernier point, une évolution claire peut être observée selon la période de livraison des intrants, les composts d'été étant plus riches en sels que ceux d'hiver. De manière générale, les eaux de pressage sont sensiblement plus riches en éléments fertilisants et en sels que les digestats et les composts, à l'exception du calcium.

Ainsi, les recommandations suivantes peuvent être faites :

- > Choisir le mélange de départ suivant l'utilisation prévue du compost produit. Pour les composts pour cultures sous abris, choisir plutôt des intrants ligneux, comme les intrants livrés pendant l'hiver. En particulier, les déchets contenant des déchets de cuisine sont peu appropriés à la production de tels composts, le sodium qu'ils contiennent, et qui contribuent à augmenter la salinité, n'étant pas utile pour les plantes.

> Les composts produits avec un mélange de départ contenant plus de matériaux pauvres en ligneux, comme les intrants livrés pendant la fin du printemps et l'été, et les livraisons urbaines ou contenant une quantité plus importante de déchets de cuisines, sont plus riches en sels et en éléments fertilisants. Ces composts sont ainsi particulièrement intéressants pour les cultures ouvertes.

En ce qui concerne le bilan de fumure, les composts contenant du fumier sont plus riches en phosphore que les autres. Il faut être attentif à ce point afin de ne pas dépasser le bilan phosphore lors de la fertilisation des champs.

8.1.2 Problématique du risque de blocage de l'azote dans les champs

Une problématique importante lors de l'utilisation de composts est leurs influences sur la disponibilité de l'azote dans les cultures. Aussi bien la composition de départ que la durée de maturation et la conduite du processus jouent un rôle dans cette problématique.

Pour éviter les pertes d'azote minéral pendant le compostage, une humidité suffisante du tas doit être assurée particulièrement pendant la phase chaude.

Les risques de blocage sont les plus importants avec les composts plus jeunes (compost agricole) contenant une quantité conséquente de produits ligneux (principalement intrants hivernaux)

Les risques de blocage sont les plus importants avec les composts un rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ encore inférieur à 2, principalement si leur teneur en intrants ligneux est importante.

Pour des cultures gourmandes en azote (par exemple le maïs), il est déconseillé d'utiliser les composts avec risques importants de blocage d'azote. Un suivi de l'azote minéral du champ est conseillé (analyse de sol après environ quatre à cinq semaines de culture). Ainsi, un éventuel besoin de fertilisation d'appoint peut être pris en considération assez tôt.

Si un compost avec risque de blocage d'azote est utilisé, une correction de fertilisation azotée est à réaliser au moment de la mise en culture (environ 20 unités).

Pour diminuer les risques de blocage d'azote, une maturation plus longue de ces composts est conseillée. Pour que cela porte ses fruits, une telle maturation doit être réalisée avec des conditions d'humidité suffisante pour permettre une bonne activité microbologique des tas. De même, un apport de matière riche en azote disponible peut s'avérer nécessaire (lisier, digestat, gazons, ...).

8.1.3 Influence de la gestion du processus sur la qualité biologique de compost

Contrairement aux teneurs en éléments fertilisants de compost, leurs paramètres de qualité biologiques sont directement influencés par la gestion du processus de compostage. Ceci est particulièrement bien observable dans les biotests, une grande variabilité pouvant être observée dans les produits d'une même classe.

De manière générale, les digestats sont plus phytotoxiques que les autres produits. Ainsi, cet aspect est à prendre en compte lors de leurs utilisations, et les quantités employées doivent être adaptées aux situations particulières.

Un des points essentiels influençant la qualité biologique des produits est la gestion de l'aération des tas. Plus le compost est mûr, moins il est microbiologiquement actif et moins il a besoin d'oxygène. Toutefois, ses microorganismes sont toujours dépendants d'une quantité suffisante d'oxygène. Si le tas s'asphyxie, même pendant le stockage du produit fini, la qualité biologique du compost diminue fortement.

8.1.4 Stabilité de l'humus

La forme sous laquelle la matière organique est présente dans les divers produits influence de manière importante l'effet de compost et digestat sur les caractéristiques physiques des sols. C'est principalement la forme d'humus stable (acides humiques) qui influence à long terme la structure du sol et sa stabilité. Connaître les teneurs des produits en formes d'humus moins stables est cependant également important pour certaines utilisations, comme par exemple la teneur des produits en substances humiques solubles à l'eau, celles-ci étant responsables pour le couleur du jus de compost.

Pour l'utilisation de compost dans des substrats ou pour des bacs à plantes, il est important de choisir des produits avec une faible coloration de l'extrait aqueux.

Si l'on recherche l'amélioration à moyen ou long terme de la structure du sol, un compost avec une quantité plus importante d'acides humiques est à privilégier. Une analyse de l'indice pyrophosphate permet relativement simplement d'évaluer son produit sur ce point (voir chapitre 8.3).

La formation d'humus stables se passe principalement pendant la phase de maturation du produit. Ainsi, la teneur en acides humiques augmente avec l'avancée de la maturation. Cependant, les conditions de maturation influencent fortement ce processus, en plus de la composition des intrants. Une humidification suffisante du tas et une teneur en oxygène suffisante sont les deux points les plus importants pour permettre aux microorganismes de réaliser l'humification du produit.

8.1.5 Post-traitement des digestats

Les essais réalisés dans le cadre du présent projet ont montré qu'il est possible de produire du compost de qualité à partir de digestat. Certains points sont cependant à observer pour réaliser avec succès cette opération :

Le point le plus important est la conduite de l'humidité. Si le digestat frais s'assèche, l'azote minéral, présent sous forme d'ammonium, est perdu sous forme gazeuse (ammoniac). Pour éviter ceci, il est indispensable d'avoir une humidité suffisante de son produit.

L'apport de coproduits aux digestats (broyat, compost jeune, terre) permet d'améliorer la qualité du compost produit, en particulier en ce qui concerne la libération resp. l'immobilisation de l'azote minéral. On peut ainsi conseiller de mélanger par exemple 30 à 50 % de digestat à du compost jeune ou à un mélange de broyat frais et de restes de criblages.

Le post-traitement de digestat nécessite entre six et huit semaines. Ainsi, le temps nécessaire au compostage n'est pas réduit par une méthanisation, seules les molécules facilement dégradables étant attaquées par ce processus. Une place suffisante pour le post-traitement du digestat doit donc être prévue lors de la planification d'une telle installation.

8.1.6 Production de composts suivant l'utilisation et l'effet recherchés

Les composts et digestats produits présentent des caractéristiques différentes suivant leurs intrants, leur degré de maturation, leur conditionnement, etc. Ces différentes qualités de produit sont plus ou moins appropriées pour les diverses utilisations voulues. En définissant à l'avance les utilisations prévues des divers lots de compost, il est possible de sélectionner les intrants voulus et la gestion du processus pour obtenir les effets désirés. Les caractéristiques des divers types de compost en relation avec leurs utilisations sont décrites au chapitre 8.2.

Pour contrôler si les caractéristiques recherchées correspondent à celles des composts produits, il est conseillé de réaliser sur la place de compostage même quelques analyses simples laissant prévoir la réaction des composts avec le sol et avec les plantes. Les analyses les plus importantes dans le cadre de l'optimisation de l'utilisation des composts sont le taux de salinité, la valeur pH, les formes d'azote minéral présentes, la couleur de l'extrait à l'eau, l'indice pyrophosphate et les biotests. Plus de détails à ce sujet se trouvent dans le chapitre 8.3.

8.2 **Recommandations pour l'utilisateur de compost et de digestat**

8.2.1 **Définir les utilisations et les effets recherchés**

Chaque utilisation de composts a ses propres contraintes. Dans certains cas, des composts riches en éléments fertilisants rapidement disponibles sont souhaités, d'autres fois des composts avec une salinité basse, ou des composts ayant un effet bénéfique important sur la structure du sol. Ainsi, avant de commander du compost, il est important que l'utilisateur de compost définisse l'utilisation qu'il désire en faire et les effets qu'il recherche. Ce n'est que comme cela que le producteur de compost pourra le conseiller de manière optimale. Les points énumérés ci-dessous sont les plus importants à définir pour permettre le choix du compost le mieux approprié.

- > Type de culture
- > Mode de production
- > Période d'application

Effet recherché : effet fertilisant à court terme, effet phytosanitaire, effet sur la structure du sol à moyen et long terme, effet sur la teneur en humus des sols, ...

Une fois ces points définis, le choix du produit utilisé peut être déterminé (voir chapitre 8.2.2)

8.2.2 **Choix du compost et des concepts d'utilisation**

Comme mentionné au chapitre 8.1.2, un point essentiel à être attentif est l'influence du compost avec l'azote minéral des sols. Cette problématique et les conseils en découlant sont traités de manière détaillée dans le chapitre 8.1.2.

Tout d'abord, il est clair que seuls les composts respectant les exigences minimales de qualité édictées par la confédération peuvent être employés. Ces exigences garantissent que les composts sont hygiéniquement irréprochables et qu'ils ne contiennent pas de métaux lourds en quantités indésirables. Une fois ce point rempli, les recommandations suivantes peuvent être faites :

Les digestats et eaux de pressage sont riches en éléments nutritifs rapidement disponibles pour les plantes. Ils sont ainsi bien appropriés pour les applications en champs lorsqu'un effet fertilisant à court terme est recherché.

Les digestats et eaux de pressage ne sont cependant biologiquement pas stabilisés et montrent une certaine phytotoxicité s'ils sont employés en quantité plus importante. Ils ne sont ainsi pas appropriés pour les cas où le compost est appliqué de manière plus concentrée (par exemple aux pieds des plantes en horticulture) ou comme composante pour la fabrication de substrat.

Le compost agricole sont physiologiquement jeunes et pas encore stabilisés. Leur application en grande culture est cependant sans problème, pour autant qu'ils n'immobilisent pas l'azote minéral. Pour cette raison, il est conseillé de faire une fumure azotée d'appoint si des composts agricoles produits avec des intrants récoltés pendant les mois d'hiver sont épandus au printemps dans les cultures.

Les composts physiologiquement mûrs sont stabilisés et leurs formes d'humus contribuent à l'amélioration à moyen et long terme de la structure des sols. Ces composts sont donc particulièrement appropriés dans les cas de terre très lourdes avec un structure défectueuse ou dans les sols sableux avec une capacité de rétention de l'eau réduite.

Comme composante pour la fabrication de substrat, les composts ligneux mûrs sont particulièrement appropriés. Etre attentif à ce que le rapport $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ soit élevé, afin de garantir un produit n'immobilisant pas l'azote.

En été après les moissons, un compost jeune est bien approprié. Suivant les cas, il peut être en effet avantageux de fixer momentanément l'azote minéral résiduel de la culture récoltée. Avec les hautes températures estivales, les processus de dégradation de la matière organique jeune est relativement rapide, et cet azote est à nouveau disponible pour les plantes en automne.

8.3 **Recommandations pour les méthodes de caractérisation de compost**

Dans le cadre de ce chapitre, les méthodes les plus adéquates pour déterminer l'aptitude de compost et digestat à être employés pour les diverses utilisations voulues sont mentionnées. Toutefois, aucune valeur indicatrice n'est décrite dans ce chapitre, un groupe de travail composé de chercheurs, de composteurs et d'utilisateurs de compost étant chargé d'actualiser les directives 2001 de l'ASIC sur la base des résultats obtenus dans le présent projet. Afin d'éviter toute confusion, il a été décidé d'attendre les conclusions de ce groupe de travail pour émettre des valeurs limites pour l'utilisation des divers produits.

8.3.1 **Analyses chimiques de base**

Les analyses des éléments fertilisants déterminées selon les méthodes de références définies par les stations fédérales de recherches agronomiques Agroscope ART, sont importantes pour établir le bilan de fumure. Pour l'utilisation avec succès des divers composts et digestats, ces valeurs sont toutefois insuffisantes. Les autres points importants sont la *teneur en sels* des produits, leurs valeurs *pH* et leurs teneurs en *ammonium*, *nitrite* et *nitrate*. Ces dernières sont importantes, en combinaison avec les intrants employés, pour déterminer les risques d'immobilisation de l'azote dans les champs suite à l'emploi de compost.

Actuellement, des méthodes officielles pour déterminer et interpréter ces valeurs ne sont pas définies officiellement. Sur la base des résultats obtenus lors de la présente étude, durant laquelle les composts suisses ont été analysés par la station de recherches Agroscope ART Reckenholz avec différentes méthodes, et de résultats obtenus dans nos pays voisins, la station de recherches Agroscope ART Reckenholz doit encore définir des méthodes officielles applicables dans la pratique. Ceci doit être réalisé dans ces prochains mois.

8.3.2 Stabilité des humus

Sur la base de nos résultats, deux analyses s'avèrent importantes pour définir la stabilité des humus :

Détermination de la couleur d'un extrait aqueux. Cette mesure est importante pour la pratique pour permettre le choix de composts pour les bacs, substrats, etc.

Détermination de l'indice pyrophosphate. Cet indice nous donne des indications sur la stabilité des humus, ce qui est important pour prévoir l'effet à long terme de compost sur la structure du sol et le taux d'humus stable du sol.

Une adaptation de ces tests pour des tests de routines pouvant être réalisés sur les places de compostage elles-mêmes doit encore être définie.

8.3.3 Qualité biologique de compost

En compléments des autres analyses réalisées (voir 8.1.2 et 8.1.3), la réalisation de biotests est à conseiller. En effet, ces tests permettent de déterminer si des problèmes potentiels sont à attendre lors de l'emploi de compost pour des utilisations relativement exigeantes (horticulture, maraîchage, fabrications de substrats, ...). Au minimum, les deux tests de cresson et celui de la salade permettent de caractériser de manière satisfaisante les risques de phytotoxicité. Ces tests ont l'avantage qu'ils peuvent être réalisés sur l'installation de compostage par les collaborateurs de la compostière eux-mêmes

Les tests du potentiel des composts à protéger les plantes contre les maladies sont intéressants surtout pour les utilisations spéciales des composts, comme pour les cultures sous abris et la fabrication de substrats. C'est surtout le test de la protection des plantes de basilic contre *Rhizoctonia solani* qui est le plus important à ce sujet, car il est plus pertinent pour la pratique. Ces tests ne peuvent cependant pas être réalisés sur la place de compostage, mais doivent être effectués par des laboratoires spécialisés, car ils impliquent le travail avec des agents pathogènes. Vu leurs coûts relativement élevés, ils ne sont à conseiller que pour des lots de composts avec forte valeur ajoutée.

8.4 **Travaux de recherches futurs : lacunes à combler prioritairement**

De nombreux points intéressants et importants pour la pratique ont pu être mis en évidence avec ce projet. La force du projet est le grand éventail de données et de composts étudiés. Ceci a permis de mettre le doigt sur des éléments qualitatifs importants. Suite à cela, ces éléments devraient maintenant être approfondis pour être mieux cernés et mieux compris. Trois des thèmes de recherche les plus importants pour la pratique sont présentés dans ce chapitre.

8.4.1 **Evaluation des risques de blocage de l'azote dans les champs suite à l'application de compost et digestat**

La disponibilité de l'azote pour les plantes est un thème central de l'application de composts et digestats dans les champs. C'est sur ce point que le plus de problèmes sont rencontrés dans la pratique, suite à l'épandage d'un compost inapproprié ou au manque de mesures accompagnatrices.

Les résultats de la présente étude montrent clairement que certains jeunes composts peuvent dans un premier temps relativement fortement bloquer l'azote minéral des plantes, azote n'étant alors plus à disposition des plantes. Pour exclure tout risque de blocage, on peut choisir de n'épandre que des composts ayant un rapport nitrate / ammonium supérieur à 2. Toutefois, il faut noter que de nombreux composts ou digestats avec un tel rapport inférieur à 2 ne bloquent pas l'azote. Ainsi, d'autres paramètres influence cette réaction. A l'aide de composts choisis de manière plus ciblée, les risques de blocages devraient être définis de manière plus précise. Ainsi, il devrait être possible d'une part de choisir plus aisément le compost employé, et d'autre part, en pouvant prévoir l'intensité et la durée du blocage, de planifier les mesures à prendre pour contrecarrer cet effet (par exemple au niveau de la fertilisation azotée).

En complément à ce point, il serait important de déterminer la réaction des composts avec l'azote minéral du sol dans différentes situations (température, type de sol, humidité du sol, ...). Ainsi, le praticien pourrait, sans risques de surfertilisation azotée, offrir aux plantes l'azote qu'elles ont besoins pour croître de manière optimale.

8.4.2 **Mesure d'optimisation de la conduite de la fermentation pour augmenter la qualité biologique de compost**

Le présent projet a clairement montré que le choix des intrants est principalement responsable de la qualité chimique des composts, alors que la gestion des processus de fermentation influence surtout la qualité biologique. La combinaison des deux est pour sa part probablement responsable de l'élaboration des humus stables et donc de l'effet à long terme des composts et digestats sur la structure des sols.

Un des résultats intéressants du projet est le fait que tous les processus de compostage étudiés peuvent produire des très bons composts, mais qu'actuellement aucun n'est dominé de manière optimale dans la pratique. Alors que par exemple la formation d'humus stables semble laisser à désirer dans le système du compostage en bords de champs, d'autres systèmes comme les tas avec aérations forcées montrent par exemple souvent des pertes d'azote minéral trop importantes.

Vu la complexité des facteurs en jeu, il n'a cependant pas été possible d'analyser dans tous les détails le rôle des divers facteurs des processus sur la qualité biologique finale des produits (phytotoxicité, pouvoir suppressifs des produits, capacité de nitrification, etc.). Il semble probable que les facteurs aération et gestion de l'humidité sont les principaux facteurs en jeu, mais leur rôles et limites dans les diverses phases du processus de compostage n'est pas connue.

En se basant sur les résultats obtenus dans la présente étude, des essais de compostage définis, ne faisant varier qu'un ou deux facteurs, devraient pouvoir apporter aux composteurs des données de références lui permettant de mieux comprendre et gérer son processus, ce qui évidemment permettrait d'améliorer la qualité finale des produits.

Un tel travail de recherche devrait en outre permettre de définir les possibilités et limites des divers systèmes de traitement des déchets organiques suivant le type de déchet et le produit recherché.

8.4.3 Effet à long termes des divers composts et digestats sur la fertilité des sols et la santé des plantes

Les travaux réalisés jusqu'ici permettent de définir les qualités des divers composts et digestats produits en Suisse. La plus grosse lacune que l'on a encore est celle de savoir ce que ces diverses qualités signifient pour le sol lors de l'application de ces produits. En plus de la caractérisation de la qualité des composts et digestats suisses, des essais en champs à cours terme (une saison de maïs) ont été réalisés. Les résultats obtenus sont certes intéressants et encourageants, mais sont encore insuffisants pour estimer l'effet long terme des divers composts sur la structure et la fertilité du sol. Ceci est cependant un point essentiel du point de vue du sens écologique de l'application des composts et digestats.

De nombreuses questions sont ouvertes à ce sujet là. Au bout d'une saison, les différentes qualités de composts et digestats ne se sont pas vraiment démarquées l'une de l'autre. Pour la pratique, il est toutefois important de savoir si cela est également le cas à long terme. En effet, le choix du compost utilisé, en particulier sa maturité, en dépend. Il est évident que si un jeune compost avait à long terme le même effet qu'un compost mûr, il serait moins nécessaire d'investir dans la production de composts matures. Par contre, si un compost contenant une quantité importante d'acides humiques améliore, au bout de quelques années, significativement plus efficacement la structure des sols et leurs teneurs en matière organique stable, un agriculteur pourrait être intéressé à payer quelques francs de plus pour un compost d'une telle qualité. Très

peu de données existent à ce sujet dans le monde. Un autre point important sur lequel il existe peu de connaissances est le fait qu'il est probable que le choix du compost optimal dépend également du type de sol et des conditions climatiques dominantes. Là aussi des travaux supplémentaires étudiant ces interactions sont nécessaires.

Des réponses à ces questions essentielles pour l'optimisation de l'utilisation des composts et digestats ne peuvent être trouvées qu'avec des essais à long terme. Un essai détaillé, scientifiquement poussé, serait ici très intéressant pour mieux comprendre les interactions entre les divers composts et le sol. Un tel essai ne peut cependant tenir compte que d'un sol et d'une situation climatique. Vu son coût et sa demande en diverses ressources, il n'est pas réaliste d'en planifier plusieurs en parallèle. C'est pourquoi un tel essai doit absolument être complété par un réseau d'essais pratiques coordonnés, de conception beaucoup plus simples, mais permettant d'obtenir de livrer pour la pratique des informations sur les possibilités et limites des divers composts et digestats dans des sols, des climats et des types de cultures différentes.

Afin d'obtenir des données utilisables, il est primordial que ces essais pratiques, qui peuvent être réalisés par les praticiens eux-mêmes, soient accompagnés scientifiquement, que les parcelles et les composts employés soient caractérisés selon un protocole défini, et que les plans des essais répondent tous au même concept. Tous les essais ne doivent toutefois pas forcément avoir l'accent sur le même point. Celui-ci est à définir pour chaque situation donnée. Il est cependant important que les données obtenues puissent s'intégrer dans le concept global de ces essais.

9 > Conclusions

Les efforts portés sur la qualité des composts et des digestats en Suisse sont importants, et les résultats obtenus montrent que l'on est sur la bonne voie. Toutefois, le but final n'est pas encore atteint, diverses améliorations pouvant encore être apportées au système. Pour continuer à avancer dans la bonne direction, il est indispensable que les diverses personnes impliquées intensifient leurs collaborations. En particulier, le dialogue entre les producteurs et les utilisateurs de compost et digestat doit être intensifié. Les utilisateurs doivent mieux définir leurs besoins et mieux connaître les capacités et limites des composts, et les producteurs doivent mieux cerner leurs divers produits et mieux comprendre les réactions des diverses cultures envers les divers composts. Ces deux groupes producteurs et utilisateurs doivent absolument se comprendre comme partenaires. La méfiance qu'ils ont parfois encore les uns pour les autres doit absolument disparaître pour faire place à une collaboration fructueuse. A ce sujet, les essais à long terme discutés au chapitre 8.1.3 pourraient représenter la base de cette collaboration et compréhension mutuelle. Avec le soutien des scientifiques, une avancée rapide vers l'optimisation de l'utilisation des composts et digestats devrait être possible, surtout en tenant compte des excellentes bases techniques déjà à disposition en Suisse.

Il est sûr qu'au niveau technique, certaines méthodes d'analyses doivent encore être définies clairement (voir chapitre 8.3), afin que de rendre plus aisé le dialogue entre les divers interlocuteurs. La station de recherches Agroscope ART Reckenholz est actuellement, en collaboration avec diverses institutions européennes, en train de travailler sur ce thème, si bien que des nouvelles directives pour ces méthodes d'analyses sont à attendre pour d'ici peu de temps.

En complément, des progrès sont encore à réaliser au niveau de la formation des diverses personnes impliquées. Dans ce domaine où l'évolution est très rapide, la formation continue devrait en particulier être intensifiée. Les producteurs de compost devraient à ce sujet non seulement se former en ce qui concerne le maniement des machines et la gestion des processus de compostage, mais également acquérir des connaissances plus approfondies sur la réaction de leurs produits avec les plantes et avec le sol, afin de mieux pouvoir conseiller les utilisateurs de leurs produits. De l'autre côté, de nombreux agriculteurs, horticulteurs, arboriculteurs et maraîchers ont des connaissances sur les composts et digestats très restreintes et parfois erronées, polluées par des idées reçues datant de plusieurs décennies. Comblar ces lacunes serait également très avantageux pour leur permettre d'utiliser de manière plus appropriée ces produits, produits qui leur apporteront alors de grands avantages pour leurs cultures,

L'avenir des composts et digestats passe par cette collaboration entre producteurs et utilisateurs. C'est ainsi que d'une part les débouchés pour ces produits pourront être garantis, et que d'autre part les utilisateurs auront à disposition des produits leur ouvrant de nouvelles perspectives pour leurs cultures.