



ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVALUATION DES RISQUES LIES AUX BIOAEROSOLS GENERES PAR LE COMPOSTAGE DES DECHETS

Synthèse des résultats

Contrat ADEME / CAREPS n ° : 0075038

Réalisation CAREPS : Anne Deloraine

Suivi ADEME : P. Bajeat (DTD, Angers) – I. Déportes (DAGAL, Angers)

Février 2002

CAREPS

Centre Rhône-Alpes d'Epidémiologie et de Prévention Sanitaire

CHU Grenoble - BP 217 - 38043 GRENOBLE CEDEX 9

Tél. : 04 76 51 10 56 Fax : 04 76 51 03 06 e-mail :

contact@careps.org

ADEME

Centre d'angers

2 Square La Fayette

BP 406

Angers cedex 01

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVALUATION DES RISQUES LIES AUX BIOAEROSOLS GENERES PAR LE COMPOSTAGE DES DECHETS

I. Introduction et objectifs

Le compostage est une filière de valorisation des déchets que l'ADEME souhaite développer compte-tenu de sa valeur ajoutée sur le plan agronomique et de l'augmentation croissante du gisement de déchets organiques. Dans ce cadre, il convient de s'assurer de l'innocuité de ces pratiques et c'est pourquoi l'ADEME a souhaité disposer d'un état des connaissances sur les risques potentiellement générés par les bioaérosols des composts pour, dans un second temps, proposer un programme d'acquisition et de valorisation des connaissances sur les risques biologiques aéroportés liés au compostage des déchets. Les risques liés aux émissions chimiques provenant du compost ne sont donc pas couverts par cette étude.

La présentation de ce travail doit permettre son utilisation comme outil d'information pour les ingénieurs et techniciens de l'ADEME. Il doit ensuite déboucher sur des propositions de recommandations sur les axes de recherche à développer. Comme cela était spécifié dans la demande, cette étude doit permettre de surtout mieux connaître le risque lié au danger biologique aéroporté encouru par les riverains des sites de compostage et les utilisateurs du compost.

La présentation de cette synthèse est articulée dans une première partie sur les connaissances concernant les micro-organismes, toxines, antigènes identifiés dans le compost et dans l'air des usines de compostage et dans une seconde partie sur des propositions de recherche basées sur les lacunes identifiées dans l'état des connaissances. Seul le transfert dans l'air a été abordé et les autres voies de transfert avec leurs éventuels risques ne seront pas envisagées.

Rappelons que les notions de dangers et de risque sont bien différentes. Le danger est un effet sanitaire indésirable. Il est lié aux propriétés intrinsèques et à la toxicité de la substance ou du microorganisme étudié. Pour qu'il y ait risque sanitaire pour une substance dangereuse, il est nécessaire qu'il y ait exposition à cette substance et

que de plus cette exposition soit quantitativement suffisante pour que le risque puisse apparaître. Le risque correspond donc à la probabilité assortie au danger.

La présentation des connaissances reprendra la démarche d'évaluation des risques développée par le National Research Council (NRC, 1983) :

- *Les dangers* liés aux composés étudiés c'est-à-dire la connaissance des effets sur la santé et l'identification de population sensible.
- *Les relations dose-réponse* qui ont été mises en évidence
- L'inventaire de *l'exposition*. Celui-ci est fait au travers du recensement des concentrations mesurées d'une part dans les composts et d'autre part sur les sites de compostage ou aux alentours. Si les micro-organismes sont présents dans le compost, ils sont susceptibles de s'aérosoliser lors de la manipulation du produit par exemple. Leur mesure dans les produits ne représente qu'un potentiel d'exposition mais afin de faciliter la lecture, les concentrations mesurées dans le compost ont été regroupées avec celle des mesures atmosphériques sous le terme "exposition".
- *Les risques* pour ces substances tels qu'ils ont été objectivés dans les études épidémiologiques auprès des travailleurs ou en population générale. Ces risques peuvent apparaître théoriques si aucune étude n'a été réalisée mais si l'exposition et les dangers sont réels.

II. Microorganismes - Antigènes - Toxines identifiés au cours du processus de compostage

Le compostage est un procédé microbiologique où la matière organique est stabilisée par transformation en des composés proches de l'humus. L'activité microbienne durant le compostage s'accompagne d'une élévation de température et cette phase thermophile permet, si le compostage est bien mené, l'élimination des microorganismes pathogènes d'origine fécale. Néanmoins le compostage génère de nouvelles populations microbiennes (Albonetti, 1979 ; Boutin, 1987 ; Jehanno, 1995 ; ADEME, 1994 ; Pereira Netto, 1986). Ces populations et les constituants qu'elles libèrent peuvent présenter des risques par inhalation. La plupart des auteurs s'accordent à regrouper les microorganismes ou constituants présents dans le compostage et potentiellement dangereux pour la santé en 3 catégories (Millner, 1994 ; Beffa, 1998) :

- organismes pathogènes, d'origine fécale, présents dans les produits de départ : bactéries, virus, parasites,
- organismes pathogènes ou allergisants se développant durant le compostage ou le stockage : c'est surtout le cas des actinomycètes thermophiles et des champignons,
- toxines et allergènes libérés par les bactéries et les champignons.

II.1. Les organismes pathogènes présents dans les produits de départ

De part leur origine, les déchets compostés contiennent un certain nombre de microorganismes d'origine entérique. Il s'agit de bactéries, de virus et de parasites. Parmi ceux-ci, certains sont pathogènes par voie digestive (*Salmonella spp*). Parce que certains germes entériques sont faciles à mesurer et plus résistants que les pathogènes, ils ont été mesurés, plus souvent que les pathogènes eux-mêmes, en tant qu'indicateurs d'efficacité du traitement. On range ainsi dans cette catégorie les coliformes thermotolérants (dont *Escherichia Coli*), *Clostridium perfringens* ou encore les streptocoques fécaux.

L'exposition

Produits de départ

Quantitativement, les indicateurs qui ont été mesurés sont :

- les coliformes thermotolérants (Boutin, 1987 ; Pereira Netto, 1986) :
 - 10^6 /g de matières sèches (MS) dans les OM (ordures ménagères),
 - 10^5 à 10^7 /g de MS dans les boues.
- *E.coli* (Pereira Netto, 1986) :
 - 10^5 à 10^6 /g de MS dans les boues,
 - 10^7 /g MS dans les OM.

- Streptocoques fécaux (Pereira Neto, 1986 ; Boutin, 1987 ; Tolvanen, 1998) :
 - 10^5 à 10^7 g/MS dans les boues secondaires,
 - 10^6 à 10^9 /g de MS dans les OM.

Parmi les bactéries pathogènes seules les salmonelles ont été mesurées. Les quantités sont de l'ordre de 7 à 32/g MS (Pereira Neto, 1986).

Pour les parasites, seule la recherche d'œufs d'ascaris a été effectuée à deux reprises sans que ceux-ci soient retrouvés dans le compost final (Gerba, 1995 ; Deportes, 1997).

Les entérovirus sont parfois présents dans les boues avant compostage (Monpoeho 2001).

La plupart des auteurs s'accordent pour admettre que le compostage est un excellent traitement hygiénisant s'il est bien conduit. En effet, les germes entériques et en particulier les bactéries pathogènes sont mésophiles et sont inactivées par la chaleur. Pour *Escherichia coli*, *Salmonella spp* et *Shigella spp*, la température létale est de 55° C pendant 1 heure et 60° C pendant 15 à 20 mn. Dans le compost, les études montrent effectivement une disparition des espèces tels que *E.coli*, *Salmonella spp* ou *Clostridium perfringens*. Néanmoins, certains travaux démontrent que, dans certaines conditions, la persistance des bactéries d'origine fécale est possible. Parmi les conditions défavorables on retrouve le rôle :

- des paramètres influençant la montée en température (taux d'humidité, aération) (Soares, 1995 ; Beffa, 1998 ; Pereira Neto, 1986 ; ADEME, 2000)
- de la qualité de la maturation ou du stockage avec des possibilités de recontamination ou de recroissance bactériennes lors de ces étapes (Deportes, 1997 ; Bigot, 1997 ; Sidhu, 2001).

Dans l'atmosphère des usines

Globalement, les concentrations en bacilles Gram négatifs (qui incluent entre autres les coliformes, les salmonelles, les shigelles) peuvent atteindre 10^4 UFC/m³ dans les ambiances des usines. Les germes cités appartiennent à la famille des enterobactéries et aux genres *Klebsiella*, *Proteus*, *Xanthomonas* et *Serratia* (Clark, 1983 ; Lacey, 1991 ; Delaunay, 1997 ; Rheinthal, 1997). Parmi ceux-ci, leur mode de transmission habituelle est la voie orale. Après inhalation, il peut néanmoins y avoir déglutition et passage dans le tube digestif.

On dispose de très peu de données à distance des usines de compostage (Heida, 1995 ; Delaunay, 1997). L'abattement mesuré pour les bactéries Gram négatives est d'environ 1 à 2 log (10 à 10^2) selon les études et ceci dès la sortie de l'usine. Il est néanmoins difficile de savoir si les concentrations sont proches des concentrations naturelles dans l'air ambiant car nous ne disposons pas de publications où les concentrations en bactéries Gram négatives sont clairement individualisées dans un environnement hors activité de compostage.

A notre connaissance, la recherche de virus ou de parasites n'a jamais été effectuée dans l'air des sites de compostage.

Les dangers et la connaissance des risques

Les germes fécaux pathogènes identifiés dans les produits de départ du compost sont notoirement responsables de troubles gastro-intestinaux pour une exposition par voie orale. Bien que leur mode habituel de transmission soit l'ingestion, la question a été posée d'une possible contamination digestive après inhalation par phénomène de déglutition. Les études auprès des travailleurs en usine pourraient apporter des éléments de réponse mais celles-ci ont rarement objectivé des risques gastro-intestinaux attribuables aux entérobactéries. Seule une étude (Poulsen 1995) rapporte des résultats significativement plus élevés de nausées, diarrhées, vomissements pour les travailleurs d'une usine de compostage de déchets verts comparativement à ceux d'une usine de production d'eau potable. Les auteurs attribuent cette augmentation aux bactéries Gram négatives ou aux endotoxines mais la relation de causalité n'est pas certaine. Plusieurs publications (Burgei, 1997) sur les travailleurs des stations d'épuration rapportent une augmentation des troubles digestifs dans les mois qui suivent l'embauche chez les travailleurs inexpérimentés mais on ne peut attribuer cette augmentation de symptômes à l'inhalation de microorganismes, le mode de transmission étant probablement plus lié à une contamination de type main bouche.

Quant aux virus et aux parasites, si ceux-ci sont bien présents dans les produits de départ, ils n'ont quasiment jamais fait l'objet de mesures dans le compost ou dans l'air. Les virus sont présents dans les boues et en début de traitement (Monpoeho 2001) et certains ont la capacité de survivre dans le milieu extérieur. La transmission de virus dans les aérosols est donc possible mais le risque en milieu professionnel du compostage n'a pas été étudié.

En ce qui concerne les parasites, la taille des œufs (helminthes) et leur poids rendent peu probable une dissémination par voie aérienne.

II. 2. Risques liés aux microorganismes apparaissant durant le compostage

Durant le compostage, la flore mésophile est remplacée par une flore thermophile parmi laquelle certains organismes présentent, dans certaines conditions, un risque infectieux, allergique ou toxique. Rentrent dans ces catégories les actinomycètes, les champignons et leurs spores.

II.2.1. Actinomycètes

L' exposition

Dans le compost

Les concentrations peuvent atteindre des valeurs de 10^8 à 10^9 /g MS (Deportes, 1997 ; Wong, 2000).

Les genres ou espèces majoritaires sont *Thermonospora* et *Thermoactinomyces* au début du compostage et *Saccharomonospora viridis* et *Faenia rectivirgula* en fin de compostage ou lors du stockage.

Dans les ambiances des usines

Les concentrations sont de l'ordre de 10^4 à 10^5 UFC/m³ (Lavoie, 1997 ; Millner, 1980 ; Lacey, 1991 ; Tolvanen, 1998). Les genres identifiés sont : *Saccharomonospora*, *Thermoactinomyces*, *Streptomyces* et *Faenia*.

Les concentrations à distance des usines

Seulement deux études (Lavoie, 1997 ; Millner, 1980) permettent des comparaisons entre les concentrations dans l'ambiance des usines et en dehors de celles-ci.

L'étude la plus intéressante est celle de Lavoie (1997) car elle apporte des résultats réellement comparatifs. A distance des usines, 300 m en amont et 100 m en aval, les concentrations sont très faibles voir indétectables et toujours inférieures à 60 UFC/m³ alors que les concentrations dans l'usine atteignent 10^3 UFC/m³ à certains endroits. Les concentrations relevées à distance sont du même ordre de grandeur que les valeurs retrouvées dans une étude sur les concentrations dans l'air intérieur des habitations (5 à 17 UFC/m³) (Scheff, 2000).

Les dangers

Les effets des actinomycètes identifiés sont essentiellement de nature allergique. Ceux-ci sont responsables de rhinite allergique et de bronchoalvéolite allergique extrinsèque (Dalphin, 1998) qui ont bien été mis en évidence chez les agriculteurs manipulant du foin (poumon du fermier). Les actinomycètes mis en cause dans ces atteintes sont les mêmes que ceux qui sont retrouvés dans les ambiances des usines de compostage. Pour certains auteurs (Lacey, 1991 ; Molines, 1986) l'exposition à une concentration supérieure à 10^6 UFC/m³ augmente le risque de broncho-alvéolite allergique extrinsèque (BAAE). La valeur d'un seuil de sensibilisation n'est pas établie, néanmoins, il est fort probable qu'un niveau d'exposition élevé soit nécessaire pour déclencher une sensibilisation et les manifestations sont observées avec plusieurs semaines ou mois de latence. Ainsi les notions de niveau, de durée et de répétition de l'exposition sont des éléments qui demandent des recherches complémentaires.

Les risques

Dans les faits, seul un cas de BAAE lié aux actinomycètes chez un particulier ayant manipulé son compost à plusieurs reprises a été recensé (Brown, 1995).

Les études auprès des travailleurs n'apportent que peu d'enseignements. Aucun cas de BAAE n'est signalé mais l'effet du travailleur sain (changement de poste ou de travail pour les personnes allergiques) est probablement important dans ces études transversales. Ceci est suggéré dans une étude (Bünger, 2000) qui indique une prévalence plus faible de rhinite allergique parmi les travailleurs du compostage comparativement à d'autres travailleurs. Dans cette même étude, l'exposition semble bien réelle puisque, les travailleurs en usine de compostage, présentaient des concentrations d'anticorps plus élevées que la population témoin contre *Faenia rectivirgula* et *Streptomyces thermovulgaris*.

Au total, si le risque peut être évoqué pour certains sujets allergiques lors du travail en compostage et lors de la manipulation individuelle du compost, la réalité du risque pour les populations riveraines semble beaucoup moins évidente compte-tenu des concentrations retrouvées à distance qui sont très faibles (inférieures à 60 UFC/m³). On manque néanmoins d'études comparatives sur cet aspect.

Une seule étude (Scheff, 2000) apporte des informations sur les concentrations ambiantes en milieu naturel où il semble que les concentrations soient très basses et la possibilité d'utiliser les actinomycètes comme indicateur d'exposition pourrait être étudiée.

II.2.2. Champignons

L'exposition

De nombreuses espèces mésophiles et thermophiles sont identifiées dans le compost et dans l'air des usines de compostage. La flore mésophile est présente à des concentrations qui varient selon les études entre 10^4 et 10^7 UFC/m³ avec des concentrations particulièrement importantes au déversement des déchets, au broyage et lors du retournement des andains (Passman, 1983 ; Kothary, 1984 ; Van der Werf, 1996 ; Lavoie, 1997 ; Van Tongeren, 1997).

La flore fongique thermophile ou thermotolérante est présente à des concentrations de 10^3 à 10^4 UFC/m³ (Boutin, 1987 ; Tolvanen, 1998 ; Fischer, 2000). Les genres prédominants sont (Lacey, 1991 ; Fischer, 2000) : *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium* et *Rhizopus*.

Les proportions sont très variables selon les études. *Aspergillus* représente souvent 60 à 90% des espèces thermotolérantes. Dans d'autres travaux *Penicillium* ou *Cladosporium* sont prédominants. Les concentrations sont de l'ordre de 10^3 - 10^4 UFC/m³.

L'influence des activités de compostage sur la qualité de l'air extérieur n'est pas facile à mettre en évidence car les spores de champignons sont ubiquitaires dans notre environnement (Beffa, 1995). Les concentrations naturelles dans l'environnement varient de 0 à 10^3 UFC/m³ mais peuvent atteindre en présence d'une source 10^6 UFC/m³ (Jones, 1983 ; Kock, 1998 ; Wu, 2000). Dans les 3 études (Lavoie, 1997 ; Rheinthal, 1997 ; Rheinthal, 1999) où l'on dispose de données permettant des comparaisons, les concentrations au vent des usines de compostage ont des valeurs comparables aux valeurs retrouvées dans l'environnement pour des distances variant de 150 à 900 mètres de l'usine.

Pour *Aspergillus fumigatus*, des valeurs de 10^3 UFC/m³ sont fréquemment retrouvées dans les ambiances des usines et dans les quelques études fournissant des éléments de comparaison, des valeurs du même ordre de grandeur sont retrouvées jusqu'à 100 m des usines (Millner, 1980 ; Lacey, 1991 ; Gumowski, 1992 ; Lavoie, 1997 ; Rheinthal, 1999). Au-delà de cette distance, il est difficile de se prononcer car peu d'études sont disponibles.

Les dangers

Les dangers liés à l'inhalation de spores de champignons sont de type infectieux, allergiques ou toxiques.

Les risques infectieux liés à l'inhalation de spores de champignons concernent principalement les patients immunodéprimés ou porteurs de cavités pulmonaires séquellaires (Latgé, 1999 ; Koenig 1995). Les genres mis en cause sont *Aspergillus*, *Mucor*, *Absydia* et *Fusarium*. Le premier est largement présent dans les usines de compostage mais on connaît mal son influence au-delà de 100 mètres d'une usine de compostage. Les risques infectieux les plus importants sont liés à *A. fumigatus*. Il peut être responsable d'aspergillose invasive chez le patient immunodéprimé (moins de 500 polynucléaires neutrophiles/mm³) et d'aspergillose chez les personnes porteuses de cavités séquellaires pulmonaires (colonisation par *A. fumigatus* de ces cavités) (Latgé 1999). Il n'existe pas de seuils à risque défini pour cette espèce. Des cas d'otite externe sont aussi décrits pour *Aspergillus niger* (Koenig 1995).

Les spores de champignons sont responsables de rhinites allergiques, d'asthme, de bronchoalvéolite allergique extrinsèque et, pour *Aspergillus*, d'aspergillose bronchopulmonaire allergique (Latgé, 1999 ; Johanning, 1999). Un seuil de concentration de 3000 spores/m³ pour l'apparition de symptômes allergiques a été proposé pour *Cladosporium* mais aucune valeur n'est disponible pour *Aspergillus* (Millner, 1994).

Les risques

Dans la littérature, *Aspergillus* a été mis en cause dans 4 cas.

Chez un ouvrier en usine de compostage (Vincken, 1984) et chez un paysagiste (Weber, 1993), il aurait été responsable de bronchoalvéolite allergique extrinsèque. *A. fumigatus* était concerné dans un des cas alors que dans l'autre il s'agissait d'*A. niger* et *flavus*. Un cas d'aspergillose bronchopulmonaire allergique (Kramer, 1989) a aussi été signalé chez une personne résidant à 75 m d'une usine de compostage mais il est difficile d'imputer à l'usine cette atteinte car d'autres sources d'*Aspergillus* étaient aussi présentes dans l'environnement. Enfin, un cas d'aspergillose invasive (Zuk, 1989), assez mal documenté, est rapporté chez un jardinier qui a priori n'était pas immunodéprimé.

Les études auprès des travailleurs n'apportent pas d'informations supplémentaires sur l'exposition à *A. fumigatus* ou sur les effets sur la santé.

II.3. Risques liés aux toxines et autres composés produits par les bactéries et champignons

II.3.1. Les endotoxines

Les endotoxines sont des constituants de la paroi des bactéries Gram négatives qui sont libérés lors de la lyse et de la multiplication de celles-ci. Les bactéries Gram négatives étant présentes dans l'atmosphère des usines de compostage, il était donc logique de rechercher aussi la présence des endotoxines. Très peu d'études ont néanmoins porté sur cette question jusqu'alors.

L'exposition

Les concentrations mesurées dans l'atmosphère des usines varient selon les études de 1,7 à 55 ng/m³ (Clark, 1983 ; Van der Werf, 1996 ; Von Togerren, 1997). Des données à distance de site de compostage sont absentes et la comparaison avec le peu de données disponibles (Park, 2000 ; Wan, 1999) pour les concentrations naturelles ne permet pas non plus de conclure bien qu'il semble que les concentrations sur site soient plus fortes que dans l'air ambiant. Il faut de plus souligner la grande variabilité des résultats en fonction de la méthode de mesure et dans une même série de prélèvements.

Les dangers

Les effets des endotoxines sur la santé des travailleurs en site de compostage n'ont jusqu'alors pas été démontrés. Par contre, ceux-ci ont bien été mis en évidence chez les travailleurs du coton. Ils sont de plusieurs ordres (Rylander, 1994 ; Kline, 1999 ; Heederik, 2000 ; Schwartz, 2001) :

- un effet inflammatoire qui se caractérise par soit une inflammation des voies aériennes et des muqueuses (irritation des yeux, de la gorge, du nez, toux sèche et possible développement d'une hyper réactivité bronchique non spécifique) soit par un syndrome toxique de la poussière organique (ODTS) appelée aussi fièvre d'inhalation (syndrome pseudogripale avec fièvre, frissons, fatigue, malaise, maux de tête, douleurs musculaires et articulaires) apparaissant pour des niveaux d'exposition élevés avec une latence de 4 à 6 heures et une disparition en 24 heures.
- les endotoxines sont responsables d'une obstruction réversible des voies aériennes. Ces manifestations se rapprochent de celles de l'asthme. Il existe de plus un effet potentialisateur chez les personnes porteuses d'asthme allergique.
- l'exposition chronique aux endotoxines peut entraîner une bronchite chronique
- les endotoxines seraient un facteur de protection contre le développement de l'atopie chez l'enfant
- un effet protecteur sur le risque de cancer du poumon est évoqué, en raison des mécanismes d'action..

Les seuils moyens d'apparition des symptômes sont : 10 ng/m³ pour les signes d'inflammation des voies aériennes, 100 ng/ m³ pour les effets généraux (bronchoconstriction, potentialisation de l'asthme) et 200 ng/ m³ pour l'ODTS (American Thoracic Society, 1998). Au Pays Bas, le conseil national de la santé a même proposé une valeur limite d'exposition de 4,5 ng/m³.

Les risques

Dans les études épidémiologiques transversales publiées sur les travailleurs du compost, les endotoxines n'ont pas clairement été incriminées avec un lien de causalité certain avec les effets sanitaires ou biologiques mesurés.

Par contre un travail récent (Douwes 2000) met en évidence une augmentation de marqueurs d'inflammation dans le liquide de lavage des fosses nasales chez le personnel exposé aux endotoxines par rapport à un groupe témoin non exposé et ,dans le groupe exposé, avant/après la prise du poste. Cette étude sur un petit nombre de personnes ne permettait néanmoins pas d'établir de relation dose-réponse

En raison de son effet potentialisateur, il faut souligner que les personnes à risque sont surtout les atopiques et les asthmatiques.

I.3.2. Les mycotoxines

L'exposition

Les mycotoxines sont des métabolites secondaires élaborés, dans certaines conditions, par certains champignons microscopiques notamment *Aspergillus*, *Trichocetium*, *Penicillium* et *Fusarium*. Certains de ces champignons étant présents dans les composts, la question de la présence de mycotoxines dans le compost et dans l'ambiance des usines s'est posée.

En fait, les études sur cette question sont très peu nombreuses et les mycotoxines n'ont été recherchées dans le compost qu'à une seule reprise (Deportes, 1997). Les recherches se sont révélées négatives. Dans la seule étude (Fischer, 2000) qui a mesuré des mycotoxines dans une usine de compostage dans les spores en suspension, dans les bioaérosols et dans les cultures pures, sur les 8 composés retrouvés, un seul avait un potentiel toxique. Mais son identification n'a eu lieu que dans les cultures, ce qui implique des conditions de production particulière probablement différentes de la réalité. Il serait donc nécessaire de disposer de plus de données sur ces aspects.

Les dangers

Les dangers liés aux mycotoxines sont assez bien connus par ingestion (Millner, 1994 ; Johanning, 1999). En effet certains de ces composés sont cancérigènes (aflatoxines, ochratoxines), embryotoxiques (aflatoxines), immunotoxiques (fumonisines et trichothécènes, gliotoxines), hépatotoxiques et neurotoxiques. Néanmoins, par voie respiratoire, leurs effets sont moins bien connus. Ils seraient mis en cause dans un syndrome d'ODTS dénommé mycotoxicose, dans des troubles respiratoires (*Stachybotris atra*). La question d'un risque de cancer ou d'immunodépression par inhalation de mycotoxines reste posée, les quelques études en milieu du travail n'étant pas concordantes. Les cancers mis en évidence étaient différents selon les études. De plus, ces populations étaient exposées à d'autres substances cancérigènes.

Les risques.

Les risques liés à l'exposition aux mycotoxines pour les travailleurs et pour la population avoisinante demeurent non documentés car aucune étude ne les a mis en évidence.

Il importe donc dans un premier temps de mesurer la réalité de l'exposition aux moisissures productrices de mycotoxines puis aux mycotoxines elles-mêmes.

II.3.3. Les glucanes

Les **glucanes** sont des polysaccharides que l'on trouve dans les parois cellulaires de plantes (avoine, orge) et de micro-organismes (champignons, certaines bactéries et actinomycètes). *Actinomyces*, *Streptomyces* et de nombreux champignons produisent ainsi des glucanes. Les glucanes ayant les plus puissants effets immunobiologiques sont les (1→3)-β-D-glucanes, glucanes composés de glucoses unis par des liaisons β-(1→3), dont la source principale est la paroi cellulaire des champignons

L'exposition

Compte-tenu de la présence d'actinomycètes et de champignons, la question de l'exposition aux (1→3)-β-D-glucanes se posait. Néanmoins, une seule (Douwes, 2000) des études consultées a mesuré ce constituant. Les concentrations mesurées auprès de travailleurs en centre de compostage variaient de 540 à 4850 ng/m³.

Les dangers

Expérimentalement les glucanes sont des substances immunostimulantes qui ont la capacité d'amorcer différents systèmes cellulaires résultant en une sensibilisation aux endotoxines et à l'infection (Heederick, 2000). La question se pose donc de leur interaction possible avec les endotoxines mais aussi de leur rôle favorisant sur l'allergie. Chez l'homme les effets ont encore été peu étudiés. Une étude fait état de modifications de la fonction respiratoire et d'augmentation des symptômes d'irritation des voies aériennes supérieures. La connaissance des effets chez l'homme est donc limitée et nécessite un complément d'études (Sisgaard, 2000 ; Williams, 1994).

Les risques

Pour Dowes (2000) la mesure des endotoxines et des glucanes dans l'air environnant des travailleurs collectant des ordures ménagères montrent des résultats à la limite de la signification pour la relation entre l'exposition aux glucans et l'augmentation de certains marqueurs de l'inflammation nasale.

Les risques pour les travailleurs en site de compostage et pour la population riveraine n'ont pas encore été étudiés.

III. Conclusions et propositions

III.1. Connaissance des dangers et relation dose-effet

Les dangers liés aux différents composants d'un bioaérosol sont associés à trois mécanismes : un mécanisme infectieux (pour *Aspergillus* essentiellement), un mécanisme inflammatoire pour les endotoxines, les glucanes et les mycotoxines et enfin un mécanisme allergique pour les actinomycètes et les champignons. Les dangers infectieux et allergiques liés aux actinomycètes et champignons et les manifestations liées à l'inhalation d'endotoxines sont connus. Par contre la connaissance des risques pour la santé liés aux mycotoxines (pour une exposition par inhalation) et surtout aux glucanes est plus récente et assez peu d'études sont disponibles. De plus, on connaît peu les interactions entre ces différents produits. Il est donc nécessaire de développer des études expérimentales sur les bioaérosols dans leur ensemble qui permettent d'ajuster les résultats sur les autres composés présents. Un auteur s'est penché sur les composés organiques volatils d'origine microbiologique (Fischer, 2000) mais l'importance des émissions et les risques pour la santé sont mal connus.

L'existence d'une relation dose-effet n'a été objectivée que pour les endotoxines à partir d'études expérimentales surtout et de quelques études en milieu du travail.

Pour le risque allergique lié aux actinomycètes et aux champignons, des travaux supplémentaires doivent être menés afin de mieux préciser les concentrations et/ou la durée d'exposition au delà duquel il existe un risque de sensibilisation.

De même, les connaissances sont insuffisantes concernant l'implication des mycotoxines et des glucanes dans la nocivité des champignons.

III.2. Connaissance des expositions

III.2.1. Exposition des travailleurs

La plupart des études recensées fournissent des résultats sur les concentrations en bactéries et champignons dans l'atmosphère des usines de compostage. Quelques études indiquent des concentrations en endotoxines et en glucanes. Les concentrations les plus élevées de bactéries aérobies, de champignons thermophiles sont détectées lors d'opération de brassage du compost. Les méthodes de mesure des bactéries sont le plus souvent basées sur la culture des bactéries viables et ignorent les concentrations en bactéries non cultivables, viables et non viables. Il existe une grande variabilité des lieux et du matériel de prélèvement ainsi que des milieux de cultures qui limitent la comparaison des résultats entre études. Pour cette raison, il n'a pas été possible de comparer les concentrations mesurées selon différents procédés de compostage ou le type de déchets compostés. De plus, il n'existe pas de données sur l'exposition aux glucanes et aux mycotoxines dans l'air des usines. Il est donc recommandé que de nouvelles études d'exposition utilisant un même protocole standardisé de mesures et comparant différents types d'usines de compostage ainsi que différents déchets intrants soient réalisées.

III.2.2. Exposition de la population résidant aux alentours des usines.

Assez peu d'études fournissent des données sur les concentrations à distance des usines. Leur interprétation est d'autant plus difficile que les données sur l'exposition habituelle des populations aux agents pathogènes pris en compte dans ce travail sont parcellaires et peu nombreuses. Pour les spores de champignons, il existe d'autres sources naturelles dans l'environnement qui rend difficile l'interprétation des résultats à distance des usines. L'analyse de la littérature disponible serait en faveur d'une absence d'influence des émissions des usines au-delà d'une distance de 150 à 200 mètres. Il serait nécessaire de confirmer cette appréciation.

Par ailleurs, les concentrations naturelles en actinomycètes thermophiles sont très basses, en dehors d'une autre source de matériel organique susceptible de s'échauffer (de l'ordre de 10 UFC/m³). Dans ces conditions, la possibilité d'utiliser ce micro-organisme comme indicateur de la dispersion aérienne peut être étudiée plus avant.

Une attention particulière doit être attachée aux travaux de recherche actuels concernant l'utilisation d'indicateurs chimiques des biomasses bactériennes et fongiques et des endotoxines.

Dans ce cadre et dans une optique de caractérisation de l'exposition, il serait utile de mettre au point et de valider des modèles de prédiction de concentrations en bioaérosols autour d'une source telle qu'une usine de

compostage. Les modèles actuellement décrits sont des modèles gaussiens qui intègrent des paramètres de survie des micro organismes mais qui ont le plus souvent été développés pour des aérosols de gouttelettes et non dans le cadre d'un produit sec tel que la poussière organique (constituant la majeure partie du bioaérosol généré par les composts). Des travaux sur la modélisation, les facteurs d'émissions d'une usine de compostage sont donc nécessaires.

III.2.3. Exposition des utilisateurs de compost.

Nous n'avons pas recensé de données sur l'exposition des utilisateurs du compost utilisé à titre privé (épandage de compost ensaché par exemple) ou dans le cadre d'une utilisation agricole et il serait donc nécessaire que des études d'exposition de ces populations soient réalisées.

III.3. Connaissance des risques pour la santé

III.3.1. Connaissance des risques pour les travailleurs

La connaissance des risques pour les travailleurs est limitée. Seules des études épidémiologiques transversales, avec comparaison de l'état de santé et de paramètres paracliniques, entre des populations de travailleurs de différents types d'usines de traitements de déchets sont disponibles. Il est difficile d'en tirer des conclusions sur la réalité d'un risque dans la mesure où l'exposition n'est pas toujours bien caractérisée et où il existe un possible effet du travailleur sain (les travailleurs malades en raison de leur travail quittent leur travail et sont donc exclus du champ d'investigation des études transversales). Compte-tenu des données disponibles le risque semble principalement d'ordre allergique ou toxinique. L'étude la plus récente et la plus fiable recense des atteintes respiratoires et dans une moindre mesure cutanées chez les travailleurs du compost et comparativement à un groupe témoin mais ces résultats mériteraient d'être confirmés. Il serait nécessaire de réaliser une étude associant un suivi longitudinal clinique, biologique et au suivi de l'exposition afin de valider ces résultats. Un travail international sur 3 ans de ce type est actuellement en cours de réalisation (cité dans Johanning 1999).

III.3.2. Les connaissances sur le risque pour la population riveraine et pour les utilisateurs du compost

Les données sur cette question sont quasiment absentes.

Dans certain cas, il a été proposé que les connaissances pour les travailleurs soient un des éléments d'information sur l'existence de risque pour les populations générales. Néanmoins, pour le sujet traité ici, l'extrapolation des résultats d'une population à une autre doit être envisagée avec une extrême prudence. Les travailleurs sont des personnes a priori en bonne santé exposées 8 heures par jour, 5 jours par semaine et la population riveraine peut inclure des populations sensibles avec une exposition moindre mais qui peut être permanente. Par exemple, le seuil de sensibilisation à *A.fumigatus* ou aux actinomycètes nécessite des niveaux d'exposition élevés correspondant à des concentrations plus fréquemment retrouvées sur les sites qu' autour. En raison de caractéristiques différentes d'exposition et de l'absence de populations sensibles dans leur rang, les travailleurs ne peuvent être considérés comme une population sentinelle

Compte-tenu des micro-organismes mis en cause et s'il s'avérait que les émanations atmosphériques d'une usine sont susceptibles d'atteindre une zone résidentielle avec de fortes concentrations, le risque théorique pourrait être d'ordre allergique et pour les personnes immunodéprimés. En effet, l'exposition à *Aspergillus fumigatus* n'est susceptible de générer des infections graves que chez les personnes immunodéprimés ou porteuses de cavités pulmonaires séquellaires. La mise en place d'étude épidémiologique en population générale est nécessairement complexe, longue et coûteuse. Il est donc nécessaire dans un premier temps de mieux caractériser l'exposition avant d'envisager une étude du risque sanitaire.

Bibliographie

- ADEME, ENSP, ENVN. 1994. Les germes pathogènes dans les boues résiduaires urbaines. 92 p. ADEME Edition n° 1798.
- ADEME, Recyval SA. 2000. Composts de boues de stations d'épuration municipales : qualité, performances agronomiques et utilisation. 423 p. ADEME Edition n°3276.
- Albonetti SG, Massari G. 1979. Microbiological aspects of municipal waste composting system. *European J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 7:91-9.
- American thoracic society. 1998. Respiratory health hazards in agriculture. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 158(5) : 1-76.
- Beffa T, Lott Fischer J, Aragno M. 1995. Industrial sources and dispersion in the air of fungal spores. *Mycologia Helvetica.* 7(2) : 125-130.
- Beffa T, Staib F, Lott Fischer J. 1998. Mycological control and surveillance of biological waste and compost. *Medical Mycology*, 36 (suppl. 1) : 137-145.
- Bigot V, Bourneau E, Legeas M. 1997. Le compostage et son effet hygiénisant. Dans : ADEME, Journées Techniques des 5 et 6 juin 1997, Aspect sanitaire Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage des boues d'épuration urbaines. ADEME Edition n°3205. p. 90 – 103.
- Boutin P, Torre M, Moline J. 1987. Bacterial and fungal atmospheric contamination at refuse composting plants : a preliminary study. Dans : Composts : production, quality and use. Elsevier Applied science publisher ltd, London and New-york. 853p. pp :266-275.
- Brown JE, Masood D, Couser JI, Patterson R. 1995. Hypersensitivity pneumonitis from residential composting: residential composter's lung. *Ann. Allergy Asthma Immunol.* 74(1):45-47.
- Bünger J, Antlauf-Lammers M, Schulz TG. 2000. Health complaints and immunological markers of exposure to bioaerosols among biowaste collectors and compost workers. *Occup. Environ. Med.* 57 : 458-464.
- Burgei E, Ledrans M, Jouan M, Le Goaster C, Quenel P. 1997. Effets de la station d'épuration des eaux usées d'Achères sur la santé et le bien-être des riverains: Bilan des données disponibles et recommandations vis à vis de la mise en place d'une surveillance épidémiologique. RNSP, St Maurice. 32 p.
- Clark SC, Rylander R, Larsson L. 1983. Levels of gram-negative bacteria, *Aspergillus fumigatus*, dust and endotoxin at compost plants. *Appl. Environ. Microbiol.* 45(5) : 1501-1505.
- Dalphin JC. 1998. Pathologie respiratoire en milieu agricole. *Revue du praticien.* 48 : 1313-1318.
- Delaunay N. 1997. Une approche du risque micro biologique aéroporté dans une station de compostage industriel d'ordures ménagères. Thèse de doctorat en médecine. Faculté de médecine de Grenoble.
- Deportes I. 1997. Contribution à l'évaluation des risques liés au compostage des ordures ménagères – Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Deportes I, Krivobok S, Seigle-Murandi F, Zmirou D. 1997. Aflatoxins in municipal solid wastes compost? A first answer. *Journal of agricultural and food chemistry.* 45(7) : 2788-2792.
- Douwes J, Mclean D, Van Der Maarl E, Heederik D, Pearce N. 2000. Worker exposures to airborne dust, endotoxin and beta(1,3)-glucan in two New Zealand sawmills. *Am. J. Ind. Med.* 38(4) : 426-30.
- Fisher G, Müller T, Schwalbe R, Ostrowski R, Dott W. 2000. Exposure to airborne fungi, MVOC and mycotoxins in biowaste-handling facilities. *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 203 : 97-104.
- Gerba CP, Huber MS, Naranjo J, Rose JB, Bradford S. 1995. Occurrence of enteric pathogens in composted domestic solid waste containing disposal diapers. *Waste Management & Research.* 13 : 315-324.
- Gumowski PI, Dunoyer Geindre S, Latge JP. 1992. Evaluation of occupational risk factors for the workers in municipal composting facilities. *European Respiratory Journal*, 5 Suppl.15 : 406-407.
- Heederik D, Dowes J, Wouters I, Doekes G. 2000. Organic dusts: beyond endotoxins *Inhal. Tox.* 12(3) : 27-33.
- Heida H, Bartman F, van der Zee SC. 1995. Occupational exposure and indoor air quality monitoring in a composting facility. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 56(1):39-43.
- Jehanno F. 1995. Suivi de l'évolution des micro-organismes pathogènes pour l'homme dans un compost de mélange de broyat de déchets végétaux et de boues de station d'épuration. Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale de la Santé Publique.
- Johanning E. 1999. An overview of waste management in the United States and recent research activities about composting related occupational health risk. *Schriftenr Ver Wasser Boden Lufthyg.* 104:127-40.
- Jones BL, Cookson JT. 1983. Natural atmospheric microbial conditions in a typical suburban area. *Appl. Environ. Microbiol.* 45 : 919-934.

- Kline JN, Cowden JD, Hunninghake GW, Schutte BC, Watt JL, Wohlford-Lenane CL, Powers LS, Jones MP, Schwartz DA. 1999. Variable airways responsiveness to inhaled lipopolysaccharide. *Am. Journ. of Resp. and Critical Care Medicine.* 160(1) : 297-303.
- Kock M, Schlacher R, Pichler-Semmelrock FP, Reinthaler FF, Eibel U, Marth E, Friedl H. 1998. Air-borne microorganisms in the metropolitan area of Graz, Austria. *Cent Eur J Public Health.* 6(1):25-28.
- Koenig H. 1995. *Guide de mycologie médicale.*ed. Ellipse. 284 p.
- Kothary MH, Chase T, Mc Millan JD. 1984. Levels of *Aspergillus fumigatus* in air and in compost at a sewage sludge composting site. *Environ. Pollut. (ser. A)* 34 : 1-11.
- Kramer MN, Kurup VP, Fink JN. 1989. Allergic bronchopulmonary aspergillosis from a contaminated dump site. *Am. Rev. Respir. Dis.* 140(4) : 1086-1088.
- Lacey J, Williamson P A M, King P.1991. *Airborn microorganisms associated with domestic waste composting.* Warren Spring Laboratory eds, ISBN : 0 85624 666 2. 36p.
- Latge J.P. 1999. *Aspergillus fumigatus* and aspergillosis *Clin. Microbiology Reviews.* 12(2): 310-350.
- Lavoie J, Marchand G. 1997. Détermination des caractéristiques à considérer d'un point de vue de santé et sécurité des travailleurs dans les centres de compostage des déchets domestiques Etudes et Recherches, Rapport IRSST, Institut de recherches en santé et en sécurité du travail du Québec. pp : 1-37.
- Millner P D, Basset D A, Marsh P B. 1980. Dispersal of *Aspergillus fumigatus* from sewage sludge compost piles subjected to mechanical agitation in open air. *Appl. Environ. Microbiol.* 39 :1000-1009.
- Millner P D, Olenchock S A, Epstein E, Rylander R, Haines MDJ, Walker J, Ooi BL, Hornes E, Maritato M. 1994. Bioaerosols associated with composting facilities. *Compost Sci. & Utilisation.* 2(4) : 4-57.
- Molines J, Boutin B, Boissinot E. 1986. Un risque respiratoire nouveau : les STEP et les installations de compostage. *Bull. Soc. Mycol. Med.* 2 : 375-380.
- Monpoeho S. 2001. Quantification génomique de deux virus entériques (HAV et Poliovirus) dans les boues d'épuration. Estimation de l'impact sanitaire lié à leur valorisation agricole. Thèse de l'université de Nantes.
- NRC (National Research Council). 1983. Committee on the institutional means for assessment of risks to public health. Risk assessment in the federal government : managing the process. National Academy Press. Washington DC
- Park JH, Spiegelman DL, Burge HA, Gold DR, Chew GL, Milton DK. 2000. Longitudinal study of dust and airborne endotoxin in the home. *Environ. Health Perspect.* 108(11):1023-1028.
- Passman FJ. 1983. Recovery of *Aspergillus fumigatus* aerospora from municipal sewage sludge composting operations in the state of Maine. *Mycopathologia.* 83(1):41-51.
- Pereira-Neto JT, Stentiford EI, Smith DV. 1986. Survival of faecal indicator microorganisms in refuse/sludge composting using aerated static pile system. *Waste Management & Research.* 4:397-406.
- Poulsen OM, Breum NO, Ebbhoj N, Hansen AM, Ivens UI, Van Lelieveld D, Malmros P, Matthiasen L, Nielsen BH, Nielsen EM, Schibye B, Skov T, Stenbaek EI, Wilkins CK. 1995. Sorting and recycling of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. *Sci. Total. Environ.* 168(1):33-56.
- Reinthal FF, Haas D, Feierl G, Schlacher R, Pichler-Semmelrock FP, Kock M, Wust G, Feenstra O, Marth E. 1999. Comparative investigations of airborne culturable microorganisms in selected waste treatment facilities and in neighbouring residential areas. *Zentralbl Hyg Umweltmed.* 202(1):1-17.
- Reinthal FF, Marth E, Eibel U. 1997. The assessment of airborne microorganisms in large-scale composting facilities and their immediate surrounding. *Aerobiologia.* 13 : 167-175.
- Rylander R, Jacobs RR. 1994. *Organic dust, exposure effects and prevention.* Lewis publishers. 297 p.
- Scheff PA, Paulius VK, Curtis L, Conroy LM. 2000. Indoor air quality in a middle school, Part II: Development of emission factors for particulate matter and bioaerosols. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 15(11):835-42.
- Schwartz DA. 2001. Does inhalation of endotoxin cause asthma? *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 163:305-313.
- Sidhu J, Gibbs RA, Ho GE, Unkovich I. 2001. The role of indigenous microorganisms in suppression of *Salmonella* regrowth in composted biosolids. *Wat. Res.* 35(4) : 913-920.
- Sigsgaard T, Bonefeld-Jorgensen EC, Kjaegaard SK, Mamas S, Pedersen OF. 2000. Cytotine release from the nasal mucosa and whole blood after experimental exposures to organic dusts. *Eur. Resp. J.* 16: 140-145.
- Soares HU, Cardenas B, Weir D, Switzenbaum MS.1995. Evaluating pathogens regrowth in biosolids compost. *Biocycle.* June : 70-76.
- Tolvanen OK, Haenninen KI, Veijanen A, Villberg K. 1998. Occupational hygiene in biowaste composting *Waste management & research.* 16(6) : 525-540.

- Van Der Werf P. 1996. Bioaerosols at a Canadian composting facility. *Biocycle*. 37(9) : 78-83.
- Van Tongeren M, Van Amelsvoort L, Heederik D. 1997. Exposure to organic dust, endotoxins and microorganisms in the municipal waste industry. *Int. J. Occup. Environ. Health*. 3 : 30-36.
- Vincken W, Roels P. 1984. Hypersensitivity pneumonitis due to *Aspergillus fumigatus* in compost. *Thorax*. 39(1):74-5.
- Wan GH, Li CS. 1999. Indoor Endotoxin and Glucan in association with airway inflammation and systemic symptoms. *Archives of environmental Health*. 54 (3) :172-179.
- Weber S, Kullman G, Petsonk E, Jones WG, Olenchock S, Sorenson W, Parker J, Marcelo-Baciu R, Frazer D, Castranova V. 1993. Organic dust exposures from compost handling: case presentation and respiratory exposure assessment. *Am. J. Ind. Med.* Oct;24(4):365-74.
- Williams DL. 1994. (1-3)beta -D-Glucans. *Organic Dusts. Exposure, effects and prevention*. Rylander R, Jacobs RR. Lewis Publishers. pp : 83-85.
- Wong Jonathan W C. 2000. Effects of lime addition on sewage sludge composting process. *Water Research*. 34(15) : 3691-3698.
- Wu PC, Su HJ, Lin CY. 2000. Characteristics of indoor and urban homes in two seasons. *Sci Total Environ*. 253 :111-8.
- Zuk JA, King D, Zakhour HD, Delaney JC. 1989. Locally invasive pulmonary aspergillosis occurring in a gardener: an occupational hazard? *Thorax*. Aug;44(8):678-9.