



ENSP
ÉCOLE NATIONALE DE
LA SANTÉ PUBLIQUE

RENNES

Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion 2005

**Faisabilité d'une étude épidémiologique
auprès des travailleurs des centres de
compostage de déchets**

Gwladys FRANCOIS

Ingénieur ENSG

Structure d'accueil : INRS

Référent professionnel : Dr. Denis AMBROISE

Référent pédagogique : Laurence GULDNER

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon référent professionnel, le Dr Denis AMBROISE, responsable d'étude au département « Epidémiologie en Entreprise » de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), pour sa disponibilité, son enthousiasme pour le sujet d'étude et son aide précieuse apportée tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie également mon référent pédagogique, Laurence GULDNER, enseignant-chercheur à l'Ecole Nationale de Santé Publique (ENSP), au sein du département Evaluation et Gestion des Risques liés à l'Environnement et au Système de Soins (EGERIES), pour ses conseils et son soutien apportés lors de la préparation et la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements à toute l'équipe du département « Epidémiologie en Entreprise » de l'INRS. Son accueil, sa disponibilité et sa bonne humeur ont contribué au bon déroulement de ce stage.

Enfin, merci à toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

<i>Introduction</i>	9
<i>L'INRS en bref</i>	11
<i>Objectifs du mémoire et méthodologie</i>	13
<i>Partie 1 : Risques sanitaires pour les travailleurs des centres de compostage : Etat des lieux et état des connaissances</i>	17
<i>1 Le compostage des déchets</i>	17
1.1 Les déchets compostés	17
1.2 Le principe du compostage	18
1.3 Le compostage en France	19
1.4 La réglementation	21
<i>2 Identification des dangers en milieu professionnel du compostage des déchets</i>	22
2.1 Les éléments dangereux microbiologiques	23
2.2 Les éléments dangereux non biologiques	25
<i>3 Caractérisation des expositions en milieu professionnel du compostage</i>	26
3.1 Les voies d'exposition à considérer en milieu professionnel du compostage	26
3.2 Les émissions d'aérosols dans les activités de compostage	27
3.3 Les expositions aux agents biologiques en milieu professionnel du compostage	27
3.4 Les expositions aux substances chimiques en milieu professionnel du compostage	28
<i>4 Synthèse des études concernant les risques sanitaires pour les travailleurs des centres de compostage de déchets</i>	29
<i>5 Analyse des questionnaires destinés aux professionnels du compostage</i>	30

Partie 2 : Pertinence et faisabilité d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage	33
1 Pertinence de la mise en place d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage	33
2 Liste des agents dangereux et des effets sanitaires à étudier de façon prioritaire	35
2.1 Les agents d'origine biologique	35
2.2 Liste des agents non biologiques	36
3 Eléments pour la faisabilité « épidémiologique » de l'étude	39
3.1 Nombre de sujets nécessaires dans chaque groupe d'étude	39
3.2 Faisabilité organisationnelle	42
3.3 Faisabilité « technique »	43
3.4 Faisabilité dans le contexte actuel	44
3.5 Faisabilité éthique et légale	44
3.6 Faisabilité économique	45
Discussion	47
Conclusion	51
Bibliographie	53
Glossaire	57
Liste des illustrations	59
Liste des annexes	61

Liste des sigles utilisés

Agences / Institut / Organisme

ADEME	: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ATSDR	: Agency for Toxic Substances and Disease Registry
CAREPS	: Centre Rhône-Alpes d'Epidémiologie et de Prévention Sanitaire
CCPPRB Biomédicale	: Comité Consultatif pour la Protection des Personnes dans la Recherche Biomédicale
CCTI	: Comité Consultatif pour la Traitement de l'Information Médicale
CHSCT	: Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail
CNAMTS	: Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés
CNIL	: Comité Nationale pour l'Informatique et les Libertés
ENSP	: Ecole Nationale de la Santé Publique
EPA	: Environmental Protection Agency
FNADE	: Fédération Nationale des Activités de Dépollution et de l'Environnement
INRS	: Institut National de Recherche et de Sécurité
INR	: Institut National de Sécurité
ISO	: International Organization for Standardization (Organisation Internationale de Normalisation)
MEDD	: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
TERA	: Toxicology Excellence for Risk Assessment

Valeurs de référence

VME	: Valeur limite de Moyenne d'Exposition (INRS)
VTR	: Valeur Toxicologique de référence

Substances chimiques

COV	: Composé Organique Volatile
ETM	: Elément Trace Métallique PCB : Polychlorobiphényle
HAP	: Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
PEHD	: Polyéthylène Haute Densité

Pathologies

ABPA : Aspergillose Broncho-Pulmonaire Allergique

BAAE : Broncho-Alvéolite Allergique Extrinsèque

ODTS : Organic Dust Toxic Syndrome

Autres

IAA : Industrie AgroAlimentaire

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

EFR : Exploration Fonctionnelle Respiratoire

ECP : Eosinophile cationic protein

FFOM : Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères

ITOM : Installation de Traitement des Ordures Ménagères

Mt : Million de tonnes

OM : Ordures Ménagères

STEP : Station d'épuration

UFC : Unité Formant Colonie

VEMS : Volume Maximal Expiré en une Seconde

Introduction

La société génère de plus en plus de déchets, dont les déchets fermentescibles. Pour leur élimination, la mise en décharge ou l'incinération sont des solutions peu satisfaisantes en raison des volumes importants qu'ils représentent, des nuisances qu'ils peuvent générer et des faibles possibilités de valorisation par ces voies (faible pouvoir calorifique). Le compostage (traitement biologique) représente une alternative intéressante à ces méthodes.

Ce procédé peut être mis en œuvre à différentes échelles. On distingue ainsi : le compostage individuel, réalisé par les ménages, le compostage de proximité ou de « quartier », dont le bon déroulement est assurée par la commune ou une association, et le compostage centralisé, qui s'exerce sur des plates-formes de moyenne ou grande capacité, dédiées ou annexées à d'autres installations de traitement des déchets.

Actuellement en pleine expansion en France, le compostage conduit à un produit riche en humus, le compost. Utilisé pour l'amendement des sols, il permet une valorisation agronomique des déchets. Il constitue donc un enjeu de développement durable. Cependant, pour être pérenne, cette filière se doit d'être irréprochable autant sur le plan de l'innocuité des produits finis, que sur la maîtrise des risques sanitaires, en phase de production.

En effet, les éléments dangereux potentiellement présents dans les déchets, le compost ou l'air ambiant peuvent être divers. Il peut s'agir de micro-organismes (bactéries, champignons, ...), de substances biologiques (les toxines par exemple), mais aussi d'agents chimiques (les éléments traces métalliques ou les micropolluants organiques). Les effets sanitaires de ces éléments sont divers et multiples : ils peuvent être mutagènes, toxiques, irritatifs, inflammatoires, mais aussi infectieux ou allergisants.

Si des agents dangereux sont émis au cours de cette activité, les travailleurs des centres de compostage sont les premiers à y être exposés et ce à des concentrations probablement plus élevées que celles auxquelles sont exposées les populations riveraines.

Afin de juger des effets du compostage sur la santé de cette population de travailleurs, la question de la mise en place d'une étude épidémiologique peut être posée. En effet, les enjeux d'une telle étude sont multiples. On distingue entre autres :

- Des enjeux sanitaires :

Si des effets sanitaires sont mis en évidence, une étude épidémiologique pourrait apporter des arguments quant à la mise en place d'une éventuelle procédure de dépistage ou bien de mesures préventives.

- Des enjeux réglementaires :

Dans le cas où un effet sanitaire serait mis en évidence et serait relié à un élément nuisible – avec une relation dose-effet – les résultats de cette étude épidémiologique pourraient contribuer à la fixation d'une valeur de référence pour les travailleurs exposés, avec le concours d'autres études.

- Et des enjeux sociaux :

Comme pour toute étude épidémiologique réalisée en milieu professionnel, une telle étude pourrait participer à une reconnaissance de maladie professionnelle et donc à une démarche de « réparation » pour les salariés concernés par un tel préjudice (suivant la gravité de la pathologie reconnue) ou bien à l'aménagement d'un poste où les expositions seraient moindres, dans le cas où des effets sanitaires en rapport avec l'activité de compostage seraient mis en évidence. A l'inverse, si l'épidémiologie ne parvient pas à démontrer des effets sur la santé, il s'agirait alors d'arguments rassurants pour le déroulement de cette activité tant pour les travailleurs que pour les populations riveraines.

De plus, par les mesures auxquelles elle peut conduire, une étude épidémiologique peut amener les professionnels du compostage à s'interroger sur le fonctionnement de leur centre de compostage et éventuellement à constater des différences entre les multiples procédés. Ces interrogations peuvent ensuite être facteurs de progrès pour l'entreprise.

Enfin, les résultats d'une étude épidémiologique, s'ils sont de bonne qualité, peuvent être pris en compte dans une démarche d'évaluation des risques sanitaires et donc contribuer à améliorer la qualité des études d'impact.

Cependant, avant de décider de la mise en place d'une telle étude, il est indispensable d'une part de discuter de sa pertinence, et d'autre part de vérifier sa faisabilité. C'est l'objet de ce travail qui, dans une première partie, dégagera les éléments disponibles pour l'évaluation des risques chimiques et biologiques en milieu professionnel du compostage, puis dans une seconde partie, tentera, à partir de ces données, d'établir l'intérêt de mener une étude épidémiologique dans ce secteur professionnel, de dégager des pistes prioritaires pour cette étude et d'en apprécier la faisabilité.

L'INRS EN BREF

Du risque physique, chimique ou biologique, au bien-être physique ou psychologique, l'objectif premier de l'INRS consiste en l'amélioration de la santé et de la sécurité de l'homme au travail.

Créé en 1947 sous le nom d'Institut National de Sécurité (INS), l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) est une association loi 1901, à but non lucratif, dont le conseil d'administration est prioritaire et qui est soumise au contrôle financier de l'Etat.

Son budget, de l'ordre de 80 millions d'euros, provient du fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles de la CNAMTS (Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés), fonds alimentés par les cotisations « accidents du travail - maladies professionnelles » versées par les entreprises.

Il dispose en interne de compétences très variées : plus de 650 salariés, répartis dans 20 départements différents.

L'INRS, maillon du système français de prévention des risques professionnels, exerce ses activités au profit des salariés et des entreprises du régime général de la Sécurité Sociale. Il transmet aussi son savoir-faire et ses compétences à d'autres acteurs de la prévention tel que les médecins du travail ou les services de l'inspection du travail. Son programme d'activités est établi dans le cadre des directives de la CNAMTS, suivant la politique définie par le ministre chargé du Travail.

Le département « Epidémiologie en entreprise »

Le département «Epidémiologie en entreprise» est constitué de 11 personnes, dont 5 responsables d'étude. Il conduit des études épidémiologiques visant à mettre en évidence des altérations de la santé en rapport avec des expositions professionnelles.

Les études menées s'intéressent à diverses pathologies telles que les atteintes respiratoires, les cancers professionnels, les perturbations du système nerveux périphérique, les troubles neuro-comportementaux ou les pathologies liées au stress professionnel.

Il restitue les résultats obtenus auprès des entreprises, des médecins du travail, du Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail (CHSCT), des salariés, mais aussi de la communauté scientifique internationale et éventuellement du grand public.

OBJECTIFS DU MEMOIRE ET METHODOLOGIE

Comme énoncés auparavant, les objectifs de ce travail sont de discuter de la pertinence d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage des déchets et d'étudier la faisabilité d'une telle étude. Pour ce faire, nous avons abordé ce travail en deux grandes étapes.

Etape 1

La première étape consistait à établir l'état des connaissances sur les risques sanitaires pour les travailleurs des centres de compostage des déchets. Pour cela, la recherche d'information a suivie la procédure habituellement retenue pour la démarche d'évaluation des risques sanitaires. Le recueil des données nécessaires à ce travail s'est fait suivant trois axes :

1. La recherche bibliographique

Pour ce qui concerne les aspects sanitaires, les données proviennent d'articles, de synthèses et de rapports scientifiques, en grande partie identifiés après consultation de bases de données tels que Medline et la BDSP, ou bien à partir de la bibliographie d'autres documents. Une recherche élargie sur le moteur de recherche «google» a également été menée.

Le cas particulier de la toxicité des agents chimiques a quant à lui nécessité la consultation de bases de données telles que celles de l'INRS et de l'INERIS, mais aussi d'autres bases (EPA, ATSDR, TERA, ...).

Enfin, l'information « bibliographique » concernant le compostage (principe, procédé, chiffres) provient essentiellement de sites Internet visités, tels que le site de la FNADE et de l'ADEME, mais aussi des sites de professionnels des déchets ou d'associations de professionnels des déchets.

2. La recherche auprès des organismes compétents en matière de compostage

Afin de compléter l'information obtenue dans un premier temps par la recherche bibliographique, un recueil direct des données auprès d'organismes compétents a été mené. Notamment, une demande de renseignement a été lancée auprès de l'ADEME, de la FNADE et du MEDD, concernant les installations de compostage, les différents postes de travail, les équipements de protection habituels et les principales caractéristiques des salariés.

3. La recherche auprès des professionnels du compostage

Un questionnaire à l'attention des professionnels du compostage a été mis en place, afin d'obtenir des informations plus complètes concernant le procédé de compostage mis en œuvre, la typologie des déchets intrants, les postes de travaux et la typologie des salariés (cf. annexe 1).

Pour cela, une liste des entreprises de compostage a été obtenue sur le site Internet de l'ADEME (liste non exhaustive, datant de février 2005, mais la plus complète disponible à ce moment). Elle recensait 465 unités en France, dont les adresses ont été recherchées, vérifiées et complétées. Elle indiquait également le type de déchets compostés.

Compte tenu des contraintes de temps imposées à ce travail, il a été décidé de n'envoyer le questionnaire qu'à un échantillon de 200 centres, tirés au sort après stratification sur le type de déchets intrants, de manière à ce que les centres sollicités soient représentés de façon équilibrée sur ce critère. Une relance systématique par courrier a été faite en cas de non réponse trois semaines après l'envoi du questionnaire.

Un questionnaire similaire a été adressé pour information dans chacune des CRAM.

Etape 2

La seconde étape consistait, à partir des éléments regroupés à l'étape 1, à discuter de la pertinence d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage, à dégager des priorités en terme d'exposition ou d'effets à étudier et à en apprécier la faisabilité.

1. Etude de la pertinence

Les critères sur lesquels s'est basée l'analyse de la pertinence sont les suivants :

- Il existe une exposition par inhalation des travailleurs des centres de compostage à des éléments dangereux en rapport avec cette activité.

Il est à noter que trois voies d'exposition sont théoriquement possibles : l'inhalation, l'ingestion et la l'absorption cutanée. Cependant, il a été décidé de n'étudier que les effets liés à une contamination par inhalation. En effet, la voie digestive, bien que envisageable (contact main-bouche ; déglutition après inhalation d'un air chargé en agents indésirables), est classiquement acceptée comme étant marginale en milieu professionnel. L'absorption cutanée est quant à elle considérée comme négligeable devant l'absorption par inhalation. En effet, la surface cutanée directement exposée à l'air (mains, visage) est environ deux cents fois plus petite que la surface interne des poumons pour un adulte de 70 kg (0.35 m² versus 90 m²). Par ailleurs, alors que la peau constitue un obstacle vis à vis de l'extérieur, les poumons ont pour fonction d'assurer les échanges entre l'air extérieur et l'intérieur de l'organisme et favorisent donc le passage de produits dans l'organisme.

- Les effets possibles sur la santé de ces agents dangereux après exposition par inhalation peuvent être graves (mortalité, séquelles irréversibles sur le fonctionnement des organes).
- Il n'existe pas d'étude similaire (dans la méthode, l'effet sanitaire ciblé, l'agent dangereux étudié, ...) ou les résultats ne sont pas suffisamment concluants.
- Les résultats de l'étude sont susceptibles d'apporter une information permettant une meilleure évaluation des risques liés à l'activité de compostage (connaissance et caractérisation des dangers, estimation des expositions).
- Il s'agit d'un problème de santé publique (nombre de personnes concernées important, effets grave, coût élevé, problème mal connu, ...).

Ainsi, les agents potentiellement présents dans les déchets, le compost ou l'air ambiant des usines de compostage ont été reportés dans un tableau (non reporté dans ce document compte tenu de sa taille). Pour chacun d'eux, nous avons noté les effets induits par une exposition respiratoire en les classant suivant leur délai d'apparition (court terme / long terme) et l'organe cible. Nous avons aussi recensé les études épidémiologiques menées dans les centres de compostage.

Il a été décidé d'étudier l'ensemble des agents identifiés et mesurés dans les déchets compostés, le compost ou l'air ambiant des usines de compostage par les travaux disponibles (ceci ne préjuge pas des données existantes dans d'éventuelles références non analysées ou non disponibles pour la réalisation de ce travail).

2. Définition des priorités

Dans un second temps, nous avons souhaité classer les sujets d'études possibles par ordre d'intérêt. Nous avons jugé cet intérêt selon quatre critères :

- La connaissance de la toxicité de l'agent et l'existence de VTR « inhalation » (humaines ou extrapolées à partir des données animales). Nous avons choisi de travailler sur les VTR « population générale » et non les VTR « professionnelles », afin d'avoir un regard protecteur pour les travailleurs vis à vis des agents dangereux.
- La disponibilité de mesures d'exposition dans la bibliographie (dans les déchets, le compost, ou mieux, dans l'air ambiant des usines de compostage).
- La vraisemblance de survenue des effets sur la santé (confrontation exposition/VTR).
- La gravité des effets sur la santé.

Ainsi, nous avons proposé un arbre de décision afin de définir ensuite un classement possible des agents à étudier en priorité.

3. Etude de la faisabilité

Dans un troisième temps, nous avons tenté de cerner la faisabilité épidémiologique des sujets d'étude définis aux étapes précédentes comme pertinents et intéressant à étudier dans le cadre d'une étude épidémiologique. Ainsi, nous avons considéré une étude comme faisable si elle répondait aux exigences de méthode épidémiologique, aux contraintes organisationnelles (dispersion de la population, durée de l'étude, ...), techniques (mesures des expositions et des effets techniquement réalisables), économiques (moyens disponibles versus moyens nécessaires), éthiques et s'intégrait dans un contexte légal et politique compatible avec un bon déroulement.

En ce qui concerne les exigences liées à la méthode épidémiologique, les critères suivants ont été vérifiés pour chacun des agents retenus précédemment, en utilisant les résultats obtenus dans l'étude par questionnaire décrite à l'étape 1 :

- La durée de l'exposition nécessaire à l'apparition de l'effet (court terme / long terme) est compatible avec la durée moyenne d'emploi des travailleurs dans les centres de compostage.
- L'exposition peut être considérée comme chronique ou subchronique dans le cadre du poste de travail considéré : la fréquence de l'exposition (fréquence des activités de brassage du compost par exemple) est au moins hebdomadaire.
- Il existe une population exposée de taille suffisante pour espérer détecter l'effet : des calculs du nombre d'individus nécessaires à la réalisation d'études épidémiologiques ont été effectués avec le logiciel stata (Version 8.2), en prenant un risque d'erreur de première espèce de 5% et une puissance statistique acceptable de 80%.

Partie 1

RISQUES SANITAIRES POUR LES TRAVAILLEURS DES CENTRES DE COMPOSTAGE : ETAT DES LIEUX ET ETAT DES CONNAISSANCES

1 LE COMPOSTAGE DES DECHETS

1.1 Les déchets compostés

1.1.1 La production de déchets en France : quelques chiffres

Le tableau suivant (cf. tableau 1) présente une estimation de la production de déchets par les ménages, les collectivités et les entreprises, en France (2002) (ADEME, 2002). Les déchets concernés par le compostage y sont indiqués en italique.

Tableau 1 : Estimation de la production des déchets en France

Total déchets en France : 637 Mt/an							
Déchets des collectivités 25 Mt	Déchets des ménages 31.4 Mt		Déchets des entreprises 105 Mt		Agriculture sylviculture 375 Mt	Activités de soins 0.15 Mt	Carrières, mines et BTP 100 Mt
Déchets du nettoyage (voiries, parking) 4 Mt Boues d'épuration 9 Mt Boues de curage (égouts) 10 Mt Boues de potabilisation 1 Mt Déchets verts 1 Mt	Déchets encombrant des ménages 9.5 Mt	OM 21.9 Mt dont : Matériaux recyclables 3.2 Mt Fraction résiduelle 18.7 Mt	déchets banals 94 Mt		DIS 11 Mt	Déjections d'élevage 275 Mt Déchets de cultures 55 Mt Déchets de forêt 45 Mt	Déchets des mines et des carrières 76 Mt Déchets des constructions et des démolitions 24 Mt
			Déchets des artisans et petits commerçants collectés avec les OM 4.5Mt	Déchets des IAA 43 Mt			
				Déchets de construction 9 Mt			
				Autres 37.5 Mt			

1.1.2 Les déchets organiques fermentescibles

Le compostage concerne les déchets qui peuvent entrer en fermentation aérobie sous l'action d'enzymes sécrétées par des micro-organismes. Ils sont dits « déchets fermentescibles » ou « biodéchets ».

On distingue différentes catégories de déchets suivant leur provenance :

- Les OM brutes (non triées) et les OM grises (collectées après tri par les ménages des emballages plastiques et/ou métalliques).

- La fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) ou les biodéchets des ménages (déchets de cuisines tels que coquilles d'œufs, épluchures, marcs de café, reliefs des repas, ainsi que déchets verts, papiers et cartons). Ces déchets sont collectés sélectivement après tri par les ménages. A ces déchets peuvent être assimilés les biodéchets des cantines, restaurants ou supermarchés.
- Les déchets verts des jardins communaux, privés ou d'entreprises (tontes de gazon, tailles de haies, branches d'égouttage, feuilles mortes, ...).
- Les déchets agricoles (fumiers, lisiers et fientes de volailles).
- Les graisses et les sous-produits de l'IAA (marcs de raisin, pulpes, ...).
- Les résidus de l'assainissement collectif (boues de stations d'épuration urbaines ou industrielles, ...).

Ces déchets peuvent être compostés seuls (pour certains) ou en mélange, afin d'obtenir une composition (teneur en eau, teneur en matière organique, ainsi que rapport carbone sur azote) et une porosité adéquates de la matière à composter.

1.2 Le principe du compostage

1.2.1 Les étapes du compostage

Le procédé de compostage comporte plusieurs étapes (cf. figure 1).

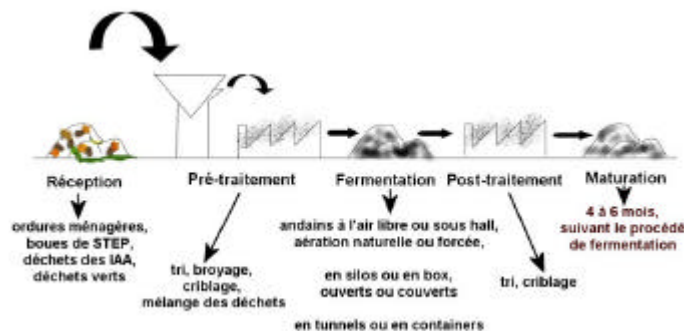


Figure 1 : Les étapes du procédé de compostage (aperçu général)

- 1) Les déchets sont réceptionnés au centre de compostage et stockés sur une courte durée, afin d'éviter certaines nuisances, telles que les odeurs ou la venue sur le site de certains animaux.
- 2) Un prétraitement de la matière première est généralement effectué (ouverture des sacs, tri, broyage, mélange, ...). Il vise à obtenir une composition optimale du produit à composter.
- 3) Les phases de fermentation et de maturation constituent les étapes essentielles du processus de compostage. Leur déroulement est expliqué ci-après (cf. partie 1, § 1.2.2 et § 1.2.3).
- 4) Un éventuel post-traitement (avant ou après la maturation) permet d'affiner le produit. Il comporte habituellement des étapes de tri et de criblage afin d'extraire les éléments non fermentescibles résiduels (rebus métalliques ou plastiques par exemple) et de maîtriser la qualité granulométrique du produit fini.

- 5) Le compost ainsi obtenu peut être directement vendu à des utilisateurs ou bien mélangé à d'autres produits (à des fins commerciales), avant d'être conditionné puis stocké.

1.2.2 La fermentation des déchets

La fermentation consiste en une dégradation rapide de la matière organique par les micro-organismes avec dégagement de chaleur. L'activité bactérienne intense nécessite un approvisionnement en eau et en oxygène important.

Cette étape s'étend sur une durée qui varie de quelques jours à quelques semaines. En fin de fermentation, une réduction du volume (30 à 50 %) et de la masse (40 à 60 %) de la matière est observée (perte d'eau et de gaz carbonique).

1.2.3 La maturation du compost

Ensuite, l'activité des micro-organismes est complétée par celle des macro-organismes (vers de compost, acariens, cloportes, coléoptères, ...). Le compost s'homogénéise et se stabilise, des éléments précurseurs de l'humus apparaissent lentement.

Cette étape de maturation ne nécessite ni eau, ni oxygène et peut durer plusieurs mois, suivant le degré de maturation souhaitée. Au bout de quelques semaines, le produit obtenu est un compost jeune. Celui-ci peut évoluer vers une structure proche de l'humus, au terme d'un processus d'environ 6 mois.

On considère que le compost est mature s'il ne s'échauffe plus lors du retournement, s'il ne repart pas en anaérobiose au cours du stockage et s'il n'immobilise pas d'azote lorsqu'il est incorporé dans un sol.

1.2.4 Les paramètres importants pour un compostage réussi

Trois règles sont à respecter pour que le compostage soit réussi. Le rapport carbone/azote doit être proche de 30 dans les matières à composter, l'aération doit être suffisante et régulière et le taux d'humidité doit être proche de 60% (cf. figure 2). Le suivi du processus de compostage se fait par mesure de la température, de l'humidité et de l'aération dans les composts.

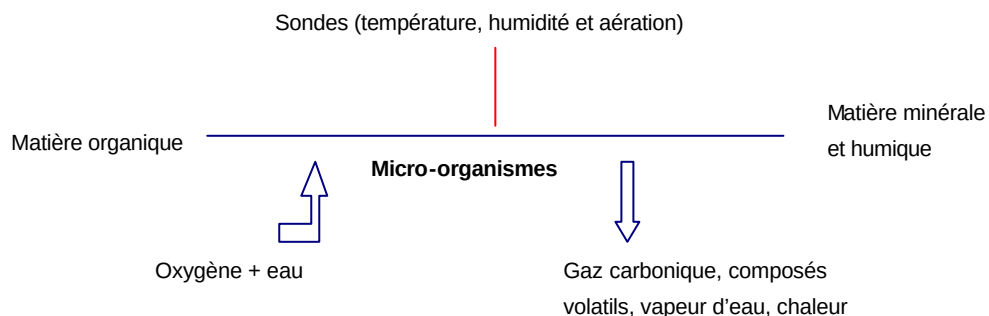


Figure 2 : Schéma des conditions nécessaires à un bon processus de compostage

1.3 Le compostage en France

1.3.1 Les différents procédés de compostage des déchets

Il existe de nombreuses techniques de compostage (environ 140 brevets au niveau européen, en 2002). Parmi les procédés utilisés, il faut distinguer ceux qui présentent une ventilation naturelle statique ou avec retournement, de ceux qui présentent une ventilation forcée.

- La ventilation naturelle statique est déconseillée dans le cadre d'un objectif de maîtrise du processus de compostage. Il s'agit d'un procédé rustique, utilisé pour le compostage domestique, mais qui ne permet pas d'assurer une aération suffisante pour de grandes quantités de matières. La ventilation naturelle avec retournement d'andains permet d'assurer une aération de la matière. Le retournement se fait à l'aide d'engins motorisés (cf. figure 3).
- La ventilation forcée, avec ou sans retournement des andains, se fait à l'aide d'un réseau de drains placé sous la matière à composter. Ce réseau insuffle ou aspire de l'air. Le retournement des andains, combiné à l'aération forcée, permet d'assurer une meilleure homogénéité du produit fini.



Figure 3 : Photographies de retourneurs enjambeurs

Ces différentes techniques peuvent être mises en œuvre dans différents environnements, c'est à dire à l'air libre ou bien en système mi-clos ou clos.

En France, le procédé le plus représenté est le compostage lent, en andains sans aération forcée, notamment pour les déchets vert. Cependant, pour les déchets moins poreux et plus rapidement biodégradables, tels que les résidus de l'assainissement ou les déchets des IAA, l'aération forcée est souvent utilisée.

1.3.2 Le parc du compostage : quelques chiffres

Le développement du compostage est relativement récent : le nombre de plates-formes à considérablement augmenté depuis 1994. Ainsi, en 2002, l'enquête ITOM (ADEME, 2002) recensait 351 unités de traitement biologique par compostage, réparties de la façon suivante (cf. tableau 2).

Tableau 2 : Le parc du compostage en 2002 (ADEME, 2002)

	Plates-formes déchets verts**	Plates-formes biodéchets**	Plates-formes tri-compostage OM**	Autres Plates-formes	Toutes plates-formes confondues
Nombre	240 (68%)	20 (6%)	65 (19%)	18 (5%)	351
Quantité de déchets traités*	2 100	200	1350	365	4015
Quantité de compost produit*	800	50	500	115	1465

*en milliers de tonnes ; **seuls ou en mélange

Cette même enquête recensait plus de 1300 salariés (jusqu'à 20 par centre). Chacun prenait en charge en moyenne plus de 3000 tonnes de déchets par an.

Remarque : Les installations comprises dans le champ de l'inventaire ITOM 2002 sont toutes des installations de compostage qui ont été ouvertes au moins un jour au cours de l'année 2002, qui ont reçu des déchets ménagers ou assimilés, qui ne sont pas dédiées à une entreprise ou un client particulier, qui sont implantées en France métropolitaine ou dans un DOM et qui sont autorisées au regard de la législation sur les ICPE.

En février 2005, une liste (non exhaustive) des installations de compostage en France, réalisée par l'ADEME, comptait 465 plates-formes, dont 215 pour les déchets verts seuls, 124 pour les déchets verts en mélanges et 40 pour les biodéchets des ménages collectés sélectivement. Ces installations étaient exploitées par différents opérateurs (cf. figure 4).

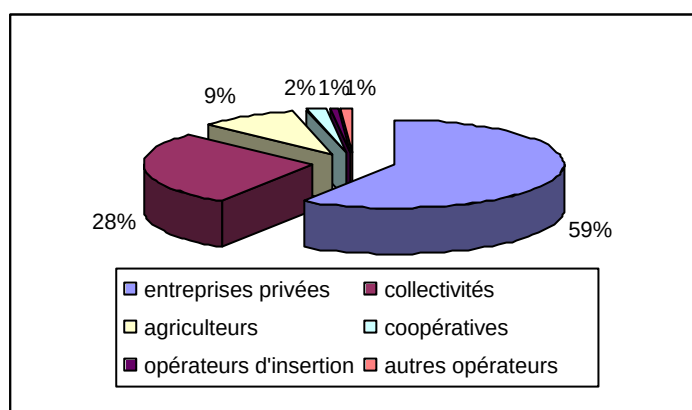


Figure 4 : Répartition des centres de compostage suivant le type exploitants

En juillet dernier, une note du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable donne des informations concernant une enquête sur le parc des installations de compostage en France (MEDD, 2005). Il a été estimé à 680 environ le nombre d'installations de compostage en fonctionnement en France en 2004. Depuis 2002, un ralentissement dans la création d'installation de compostage est noté, après une forte croissance entre 1998 et 2002. Pour l'année 2004, la quantité de déchets compostés est estimée à 7,5 millions de tonnes pour la quantité de compost produit estimée à 3,5 millions de tonnes.

1.3.3 Perspectives d'évolution

La filière compostage évolue en permanence afin de pouvoir répondre aux exigences quantitatives et qualitatives des utilisateurs. Ainsi, on observe un développement rapide du compostage des déchets verts (production d'un compost de bonne qualité), alors que le développement des plates-formes de compostage de biodéchets des ménages est lent. Le tri-compostage des OM brutes et grises est quant à lui en régression car le compost issu de ces déchets ne présente pas une qualité suffisante pour satisfaire les utilisateurs : la question du devenir des plates-formes de compostage de ces déchets est donc posée. Une éventuelle reconversion vers le compostage des biodéchets collectés sélectivement est une possibilité.

1.4 La réglementation

1.4.1 Réglementation liée aux installations de compostage

Les installations de compostage sont soumises à la loi du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.

Une circulaire du ministère de l'environnement du 5 janvier 2000, précise les éléments suivants.

- Pour le compostage de matières organiques d'origine animale ou végétale, seules ou en mélange avec les biodéchets collectés sélectivement, la rubrique 2170 de la nomenclature des installations classées (*fabrication des engrais et supports de culture*) prévoit le régime de déclaration pour les unités sortant un tonnage inférieur à 10 tonnes/jour et d'autorisation pour les unités sortant plus de 10 tonnes/jour.
- Pour les ordures ménagères et les déchets industriels, la rubrique 322 (*stockage et traitement des ordures ménagères et autres résidus urbains*) ainsi que la rubrique 167 (*déchets industriels provenant d'installations classées*) s'appliquent : une autorisation préfectorale est obligatoire pour l'exploitation d'unités de compostage de ces déchets.
- Enfin, pour toutes les installations, la rubrique 2260 (*broyage, concassage, criblage des substances végétales*) stipule qu'entre 40 kW et 200 kW de puissance installée, les installations sont soumises à déclaration et au-delà à autorisation.

Une étude d'impact du site sur la santé de la population riveraine doit être fournie avec le dossier de demande d'autorisation (décret 2000-258 du 20 mars 2000). Par ailleurs, la nécessité d'un volet sanitaire dans l'étude d'impact est réaffirmée par la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30 décembre 1996.

1.4.2 La réglementation liée au compost

Les articles L255-1 à L255-11 du code rural relatifs à la mise sur le marché des matières fertilisantes et supports de culture (loi du 13 juillet 1979) constituent la base réglementaire relative au compost. Ils imposent une homologation du produit par le ministère de l'agriculture ou, à défaut, une autorisation provisoire de vente ou de distribution pour expérimentation. Cependant, ces dispositions ne s'appliquent pas dans le cas où la qualité du compost respecte les normes rendues d'application obligatoire. A ce jour, la norme NFU 44-051 s'applique principalement aux composts issus d'ordures ménagères ou de déchets végétaux et animaux. La norme NFU 44-095 quant à elle concerne les composts issus de boues d'épuration.

En outre, un projet de directive européenne relative au traitement biologique des biodéchets (déchets alimentaires, déchets de jardin, papiers, cartons...) est en cours d'élaboration. Cette directive devrait conduire à l'interdiction du compostage des ordures ménagères brutes ou grises qui contiennent des éléments non biodégradables (plastiques, verres...).

2 IDENTIFICATION DES DANGERS EN MILIEU PROFESSIONNEL DU COMPOSTAGE DES DECHETS

Le terme "aérosol" désigne un ensemble de particules en suspension, dont la nature (biologique ou chimique) et la dimension peuvent être très variables. Les aérosols biologiques sont composés d'un ensemble hétérogène de particules animales, végétales, microbiologiques (champignons, bactéries, virus, ...) et d'agents d'origine microbiologique (enzymes, toxines, spores,...). Les aérosols d'origine chimiques peuvent être organiques (composés chimiques carbonés), métalliques (particules aéroportées de métal élémentaire ou autres particules auxquelles sont liées des espèces métalliques), siliceux (particules de silice amorphe ou cristallisée). Il peut également s'agir de fibres d'amiante, mais ce type de poussières devrait être absent sur les sites de compostage dans le cas d'un tri correct en amont de la filière. En fait, le plus souvent, les particules atmosphériques sont composées d'un agrégat d'éléments biologiques et chimiques.

2.1 Les éléments dangereux microbiologiques

Ce paragraphe est fondé principalement sur l'étude bibliographique commandée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) au Centre Rhône-Alpes d'Epidémiologie et de Prévention Sanitaire (CAREPS) (CAREPS, 2002), complété par les résultats de notre recherche bibliographique.

2.1.1 Quelques généralités

Les effets des micro-organismes peuvent être d'ordre infectieux ou non. Dans ce dernier cas, il est souvent difficile de faire la part de ce qui revient aux micro-organismes eux même, aux toxines qu'ils sécrètent et aux poussières organiques auxquelles ils peuvent être associés. Les pathologies associées sont alors d'ordre immuno-allergiques (rhinites, asthmes, alvéolites allergiques extrinsèques), toxiques (de type pseudo-grippal) ou toxiques (ODTS).

2.1.2 Les micro-organismes pathogènes présents dans les déchets

De part leur origine, les déchets utilisés dans le compostage contiennent des micro-organismes entériques. Il peut s'agir de bactéries, de virus ou de parasites.

Présents dans le matériel brut, ils semblent disparaître au cours du compostage, lors de la phase « d'hygiénisation » (lors de la montée en température de la phase de fermentation). En effet, les germes entériques, plus particulièrement les germes pathogènes, sont généralement mésophiles et sont donc inactivés par la chaleur. Il faut noter que « l'hygiénisation » ne serait pas le seul fait de la chaleur. En effet, certaines bactéries pathogènes seraient sensibles aux antibiotiques émis dans le compost par certains micro-organismes tels que les actinomycètes (cf. partie 1, § 2.2.3). De plus, il semblerait que le processus de compostage transforme la matière organique en un substrat inutilisable par la plupart des bactéries pathogènes, ce qui serait alors incompatible avec leur survie et leur multiplication.

Cependant, certaines bactéries entériques pourraient persister sous certaines conditions (antibiorésistance, adaptation aux conditions du milieu, taux d'humidité et température non homogène dans l'andain, ...).

Les bactéries pathogènes identifiées dans les produits bruts (*Salmonella sp.*, *Shigella sp.*, *Enterobacter sp.*, *Klebsiella sp.*, ...) sont des bactéries Gram négatives anaérobies facultatives. Elles peuvent être responsables de diverses infections, parmi lesquelles des infections des plaies par *contact cutané* ou des infections digestives par *ingestion*.

Pour ce qui est des virus (entérovirus ou autres tels que virus de l'hépatite A) et des parasites (tels que douves, ascaris, ténia, *Giardia*, *Cryptosporidium*, ...), s'ils sont bien présents dans les produits bruts, ils n'ont quasiment jamais fait l'objet de mesures (déchets, compost ou air ambiant). Cependant, l'hypothèse d'une transmission des virus par des aérosols est envisageable (compte tenu de leur taille), alors que pour les parasites, la taille des œufs (notamment pour les helminthes) et leur poids rendent peu probable une dissémination par voie aérienne.

2.1.3 Les agents biologiques apparaissant au cours du compostage

A) Les actinomycètes

Les actinomycètes sont des bactéries Gram positives généralement aérobies. Ils forment des spores à paroi fine, appelées conidiospores (de 0.57 à 1.28 µm).

Les genres ou espèces majoritaires retrouvés dans le compost ou bien dans l'air ambiant des usines de compostage sont *Thermonospora* et *Thermoactinomyces* (au début du compostage), mais aussi *Saccharomonospora viridis* et *Faenia rectivirgula* (en fin de compostage ou lors du stockage).

Les effets des actinomycètes sont essentiellement de nature allergisante, par *inhalation* : rhinite allergique et broncho-alvéolite allergique extrinsèque (BAAE) sont les principaux effets, avec des manifestations chroniques telles que des fibroses pulmonaires.

B) Les champignons

Les champignons peuvent être unicellulaires (les levures) ou pluricellulaires (les moisissures). De nombreuses espèces mésophiles, thermotolérantes et thermophiles sont identifiées dans le compost et dans l'air ambiant des usines de compostage. Les genres prédominants sont *Aspergillus* (surtout *fumigatus* dans les composts), *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium* et *Rhizopus*.

Les dangers liés à l'*inhalation* de spores de ces champignons (quelques μm) sont surtout de type infectieux (pour les individus immunodéprimés ou porteurs d'atteintes pulmonaires séquellaires) ou allergiques, et touchent les voies respiratoires et ORL : rhinite, sinusite ou alvéolite allergique, asthme, BAAE, aspergillose broncho-pulmonaire allergique (ABPA) ou invasive et aspergillome.

Certains champignons sont aussi responsables de mycoses superficielles. Ils appartiennent notamment aux genres *Epidermophyton*, *Microsporum*, et *Pityrosporum*. La contamination se fait par *voie cutanée*. Les pathologies induites par *Epidermophyton* ou *Microsporum* sont des mycoses des régions kératinisées du corps (cheveux, peau et ongles), dont la gravité varie selon le genre et l'espèce de dermatophyte considérée. *Pityrosporum* est quant à lui un champignon provoquant des infections très fréquentes de la peau, appelées pityrospore.

C) Les toxines et autres composés

Les endotoxines, les mycotoxines et les glucanes sont des produits élaborés par certains micro-organismes (bactéries, actinomycètes, champignons), potentiellement présents dans le produit brut, dans le compost ou dans l'air ambiant des usines de compostage. Très peu d'études apportent des éléments quant aux dangers associés à ces composés pour les travailleurs des centres de compostage.

a) Les endotoxines

Les endotoxines sont des constituants de la paroi des bactéries Gram négatives et sont libérées lors de la lyse ou la multiplication de celles-ci.

Les effets des endotoxines par *inhalation* ont été étudiés chez l'animal et chez des volontaires sains. Ils sont associés à une inflammation des voies aériennes et des muqueuses. Les principaux symptômes sont les suivants : hyper-réactivité bronchique, obstruction réversible des voies aériennes, syndrome toxique de la poussière organique (syndrome d'ODTS).

b) Les mycotoxines

Les mycotoxines sont des métabolites secondaires élaborés par certains champignons microscopiques tels que *Aspergillus*, *Penicillium* ou *Fusarium*. Ces moisissures étant présentes dans le compost, la présence de mycotoxines dans l'ambiance des centres de compostage est vraisemblable.

Toutefois, la seule étude à avoir recherchée les mycotoxines dans les composts s'est révélée négative (Déportes, 1997). Au cours d'une autre étude (Fischer, 2000 in CAREPS, 2002), ces substances ont été recherchées dans l'air ambiant d'une usine de compostage. Un seul composé potentiellement toxique a pu être retrouvé, et ce dans des conditions de production particulières (à l'aide de cultures pures).

Les dangers liés à certaines mycotoxines sont bien connus par *ingestion* (effets cancérogènes, embryotoxiques, immunotoxiques, hépatotoxiques et neurotoxiques). Néanmoins, les effets par *inhalation* le sont beaucoup moins : troubles respiratoires ? Syndrome d'ODTS ? Cancers (pour les aflatoxines) ? Immunodépression ?

c) Les glucanes

Les glucanes sont des polysaccharides présents sur la paroi cellulaire de certaines plantes et de certains micro-organismes (tels que des bactéries, dont les actinomycètes, ou les champignons).

La connaissance des effets des glucanes sur l'homme est limitée. Les glucanes ayant les effets immunobiologiques les plus puissants sont les (1-3)- β -glucanes, dont la source principale est la paroi cellulaire des champignons. Les travaux existants (Sigsgaard, 2000 et Williams, 2002 in CAREPS, 2002) font état d'atteintes de la fonction respiratoire (baisse du VEMS) et d'irritations des voies aériennes supérieures (nez et gorge), par *inhalation*.

2.2 Les éléments dangereux non biologiques

Ce paragraphe est fondé principalement sur l'étude commandée par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) et la Fédération Nationale des Activités de Dépollution et de l'Environnement (FNADE) à l'Ecole Nationale de Santé Publique (ENSP) (ENSP, 2002), complétée par les résultats de notre recherche bibliographique (164 composés recensés en tout).

2.2.1 Les éléments traces métalliques

Sous le terme d'ETMs sont regroupés les métaux de transition de la classification périodique (chrome, zinc, nickel, cuivre, ...), auxquels sont ajoutés d'autres éléments tels que le mercure, le cadmium et le plomb, ainsi que des métalloïdes dont l'arsenic et le sélénium. Ces éléments sont présents initialement dans les déchets intrants, à des concentrations dépendantes de la nature des produits qui seront compostés.

Les sources concentrées, représentées par des pièces métalliques, sont généralement peu nombreuses dans les déchets compostés (tri à la source et prétraitement avec tri sur site). Ces sources sont concentrées en métaux ferreux (cadmium, zinc, chrome et nickel peuvent également être présents, notamment du fait des alliages ou en association avec le fer) ou non ferreux (aluminium, cuivre ou zinc ; des traces de thallium peuvent être associées à l'aluminium). Elles peuvent aussi être constituées d'éléments chromés ou nickelés (éléments de robinetterie notamment).

Mais le plus souvent, les ETMs sont présents sous forme de traces dans les déchets destinés au compostage. Cependant, certains déchets sont plus chargés que d'autres et constituent des sources diffuses. Notamment, certains papiers et cartons sont riches en plomb, cadmium et mercure ; le PEHD est très chargé en Cadmium ; le plastique peut être riche en plomb. Les boues d'épuration sont quant à elles généralement riches en zinc et en cuivre, mais aussi dans une moindre mesure, en nickel, plomb et chrome. Le cadmium, le mercure et l'arsenic y sont également retrouvés, mais dans de plus faibles concentrations.

2.2.2 Les micropolluants organiques

Sous le terme de micropolluants organiques, de nombreuses familles chimiques sont désignées (HAPs, PCBs, COVs, pesticides, ...). Tous ces éléments sont susceptibles d'être retrouvés dans le produit brut ou le compost et ont différentes origines.

A) Les HAPs :

Les HAPs présents dans l'environnement ont une origine pour partie naturelle (feu de forêts, volcanisme, ...) et pour partie anthropique (combustion incomplète de matières organiques, résidus d'incinération, ...). Les HAPs sont dispersés dans l'air et peuvent donc se retrouver entre autres dans les matières à composter. Les engins à moteur thermique utilisés sur les plates-formes de compostage peuvent aussi représenter une source de HAPs.

B) Les PCBs :

Les PCBs n'ont pas d'origine naturelle. Ils étaient produits de façon industrielle jusqu'en 1977 comme isolants électriques, mais étaient également retrouvés dans les plastiques, les peintures, les colles, les cires, les encres d'imprimerie, ... Aujourd'hui, ces composés sont toujours retrouvés sous forme de résidus, malgré l'arrêt de leur production. Ils peuvent donc se retrouver dans les produits à composter.

C) Les dioxines et les furannes :

Les dioxines et les furannes sont issus de la combustion de produits chlorés utilisés dans l'industrie (bois, papiers, insecticides, antiseptiques et désinfectants). Ils peuvent se retrouver dans les matières à composter après dispersion dans l'atmosphère.

D) Les COVs :

Les COVs retrouvés dans les composts peuvent être d'origine anthropique ou bien liés au processus de compostage, suite à l'action de certains micro-organismes. Mais peu d'informations sont disponibles sur cet aspect.

3 CARACTERISATION DES EXPOSITIONS EN MILIEU PROFESSIONNEL DU COMPOSTAGE

3.1 Les voies d'exposition à considérer en milieu professionnel du compostage

La principale voie d'exposition en milieu professionnel est l'*inhalation*. La répartition des poussières dans l'appareil respiratoire humain dépend de la granulométrie des particules inhalées. Les principaux effets sur la santé des particules atmosphériques dépendent de leur nature et de cette répartition granulométrique. La voie d'exposition *cutanéomuqueuse* peut quant à elle conduire à d'autres effets : des irritations oculaires bénignes sont à signaler ainsi que des risques d'allergie ou d'infection, en fonction de la nature des poussières.

Comme indiqué dans les objectifs de ce travail, il a été décidé d'étudier uniquement la voie d'exposition par inhalation, considérant celle-ci d'une importance majeure devant la voie digestive et la voie cutanéomuqueuse.

3.2 Les émissions d'aérosols dans les activités de compostage

Les travaux concernant l'empoussièrement des postes de travail des centres de traitement des déchets sont peu nombreux et présentent parfois des résultats qui ne sont pas cohérents entre eux. Ils concernent essentiellement la filière compostage.

Globalement, les constats suivants ont pu être établis (CAREPS, 2002 ; ENSP, 2002) :

- Les principales sources d'émission de poussières sont la zone de décharge des déchets, les zones de prétraitement des déchets ou d'affinage du compost (criblage, tamisage, broyage), les zones de retournement du compost, ainsi que toutes les zones de déplacement ou de conditionnement du produit fini.
- Les concentrations maximales en poussières totales sont de l'ordre de 50 à 100 mg/m³. Elles correspondent à des moments particuliers de fonctionnement des unités, il s'agit donc de pics d'émission. Les concentrations moyennes en poussières totales sont de l'ordre de 2 à 10 mg/m³ et correspondent à un fonctionnement des unités plus constant dans le temps. Les concentrations minimales en poussières totales sont de l'ordre de 0.1 à 1 mg/m³.
- Les poussières mesurées correspondent à des poussières respirables, qui peuvent atteindre le poumon profond. En effet, la fraction dite alvéolaire (inférieure à 5 µm), constitue l'essentiel de ces poussières (90%).

Pour information, en milieu professionnel, le décret 84-1093 du 7 décembre 1984 indique en particulier : « *Dans les locaux à pollution spécifique (où des substances dangereuses ou gênantes sont émises), les concentrations moyennes en poussières totales et alvéolaires de l'atmosphère inhalée par personne, évaluées sur une période de huit heures, ne doivent pas dépasser respectivement 10 et 5 mg/m³ d'air* ».

La circulaire du 9 mai 1985 précise : « *les valeurs mentionnées à cet article concernent les poussières sans effet spécifique, c'est à dire les poussières qui ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons ou tout autre organe ou système du corps humain d'autre effet qu'un effet de surcharge* ».

3.3 Les expositions aux agents biologiques en milieu professionnel du compostage

Généralement, les concentrations les plus élevées en agents biologiques (via les poussières) dans l'air ambiant (quelque soit l'élément considéré) sont détectées lors des opérations de brassage des déchets et des composts : les agents biologiques sont mis en suspension dans l'air sous forme d'un bioaérosol.

Les concentrations dans les déchets et les composts dépendent du type de déchets intrants, mais aussi de l'étape considérée dans le processus de compostage (stockage des déchets, prétraitement, fermentation, maturation, ... ; cf. figure 5).

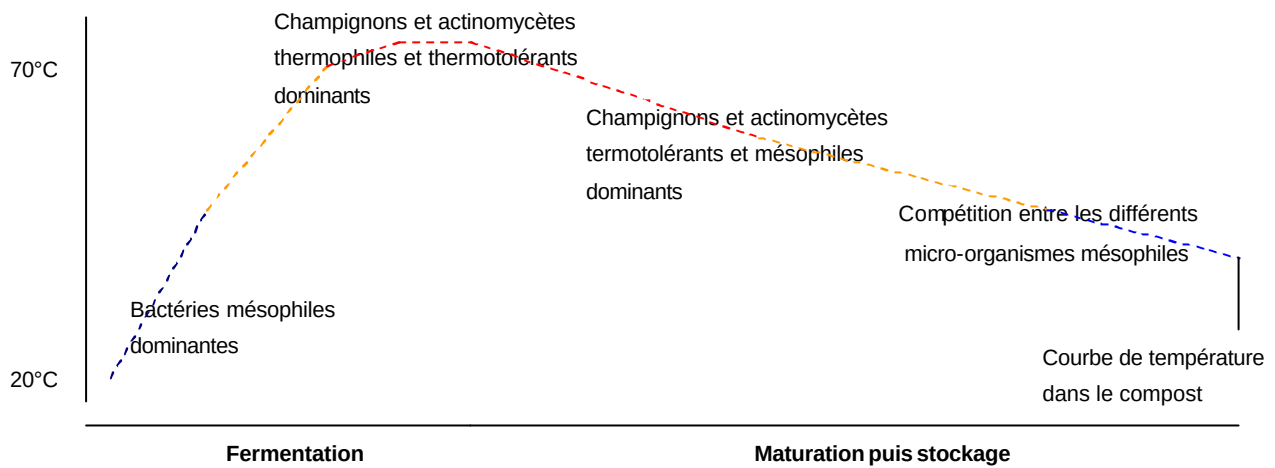


Figure 5 : Nature des micro-organismes en fonction de la température dans le compost

Globalement, on peut retenir les informations suivantes (cf. tableau 3) :

Tableau 3 : Concentrations en agents d'origine biologique dans les usines de compostage

Agents pathogènes	Mesures de concentration		Autres informations
	Dans les déchets ou le compost	Dans l'air ambiant des usines de compostage	
Bactéries totales		De l'ordre de 10^{3-4} UFC/m ³	*
Bacilles Gram négatifs		De l'ordre de 10^3 UFC/m ³ Jusqu'à 10^7 UFC/m ³	
Actinomycètes		De l'ordre de 10^{3-4} UFC/m ³ Jusqu'à 10^8 UFC/m ³	La nature des effets pourrait être liée à l'intensité de l'exposition : Phénomènes de sensibilisation → > 10^8 UFC/m ³ BAAE → > 10^6 UFC/m ³ Fibroses pulmonaires → > 10^5 UFC/m ³
Champignons	De l'ordre de 10^{4-5} UFC/g MS	De l'ordre de 10^{3-4} UFC/m ³	Apparitions de symptômes allergiques liés à <i>Cladosporium</i> → > 3000 spores/m ³ (proposition) Hypothèse : seuil du même ordre pour <i>Aspergillus</i> .
<i>Aspergillus fumigatus</i>	De l'ordre de 10^4 UFC/m ³ Jusqu'à 10^7 UFC/g MS	Jusqu'à 10^7 UFC/m ³	
Flore mésophile		De l'ordre de 10^{3-4} UFC/m ³ Jusqu'à 10^7 UFC/m ³	
Flores thermotolérantes et thermophiles	De l'ordre de 10^4 UFC/m ³ Jusqu'à 10^7 UFC/g MS	De l'ordre de 10^3 UFC/m ³ Jusqu'à 10^6 UFC/m ³	
Endotoxines		< 0.2 à 344.5 ng/m ³	Premiers signes d'inflammation → > 10 ng/m ³ Broncho-constriction → > 100 ng/m ³ ODTS → > 200 ng/m ³
Mycotoxine			
Glucanes		Entre 540 et 4850 ng/m ³	

* Il est intéressant de noter que certains germes entériques non pathogènes pour l'homme ou pathogènes opportunistes sont plus faciles à mesurer que les pathogènes eux mêmes, sont plus nombreux et sont généralement plus résistants. Pour ces raisons, ils ont été choisis comme indicateurs de contamination fécale de l'eau. La même démarche a ensuite été appliquée dans le cas des composts : ces agents ont donc souvent été mesurés en tant qu'indicateurs d'efficacité du traitement des déchets. Ainsi, parmi les bactéries fréquemment mesurées dans les déchets, le compost ou l'air ambiant des usines de compostage, on retrouve : les coliformes thermotolérants, dont *Escherichia coli*, les streptocoques fécaux et *Clostridium perfringens*.

3.4 Les expositions aux substances chimiques en milieu professionnel du compostage

Généralement, les concentrations les plus élevées dans l'air ambiant en ETMs ou en micro-polluants organiques (via les poussières), sont aussi détectées dans les zones où les déchets et les composts sont brassés. Les concentrations dans les déchets et le compost dépendent essentiellement du type de déchets intrants, mais aussi de l'étape considérée dans le processus de compostage (les ETMs passent en partie dans les lixiviats ; les micro-polluants sont en partie dégradés).

3.4.1 Evolution des concentrations en ETMs, des déchets au compost

Lors des premières étapes du compostage (prétraitement et fermentation), l'adsorption des ETMs sur la matière organique est limitée du fait d'un pH neutre : ces éléments sont en partie éliminés dans la phase liquide (les lixiviats). Par contre, les conditions alcalines de la maturation permettent cette adsorption. Les concentrations relatives des ETMs initialement présents s'accroissent en même temps que la teneur en matière sèche diminue. Ainsi, il semblerait qu'un tiers des ETMs présents dans les déchets se retrouvent dans les composts.

Il est à noter que les ETMs sont présents sous diverses formes dans les composts. Ils peuvent être liés à la matière organique (sous forme de complexes organométalliques ou à l'état adsorbé), immobilisés dans des structures insolubles (dans des composés minéraux par exemple) ou bien présents sous forme métallique.

Les poussières émises lors du processus de compostage des déchets sont donc susceptibles de contenir des ETMs, d'autant plus que les teneurs en ETMs sont plus fortes dans la fraction fine des composts. Par contre, il semblerait que ces composés ne soient pas transférés dans les gaz produits lors de la phase de fermentation aérobie.

3.4.2 Les teneurs en micropolluants organiques dans les composts

L'évolution des teneurs de ces composés au cours du processus de compostage varie suivant la nature du composé considéré. Notamment, les PCBs et les HAPs sont des groupes de micropolluants importants dans les composts d'un point de vue risque sanitaire : ce sont des composés persistants, qui ne sont pas forcément dégradés lors du compostage des déchets.

4 SYNTHÈSE DES ÉTUDES CONCERNANT LES RISQUES SANITAIRES POUR LES TRAVAILLEURS DES CENTRES DE COMPOSTAGE DE DÉCHETS

Nous avons recensés douze études épidémiologiques : cinq études longitudinales et six études transversales menées auprès des travailleurs des centres de compostage et une étude transversale menée auprès d'une population riveraine d'une unité de compostage. Les résumés de ces études sont reportés en annexe (cf. annexe 2).

La connaissance des risques sanitaires liés au compostage des déchets pour les travailleurs, mais aussi pour les populations riveraines, reste très limitée. Aucune étude épidémiologique concernant les risques sanitaires pour les travailleurs des centres de compostage de déchets, liés aux agents non biologiques, n'a pu être recensée au cours de ce travail.

Les études disponibles portent sur les risques sanitaires liés aux agents d'origine biologique (bactéries totales, actinomycètes, flore fongique, endotoxines, glucanes) et comparent l'état de santé et certains paramètres cliniques des travailleurs du compostage avec ceux d'autres travailleurs des déchets, ou de groupes de référence non exposés à des sources anthropiques de bioaérosols.

Même, s'il est difficile de tirer des conclusions solides sur la réalité des risques à partir de ces études (puissance statistique faible, défaut de prise en compte du tabagisme, exposition pas toujours bien caractérisée, possible effet du travailleur sain (les employés malades du fait de leur activité quittent leur travail et sont donc exclus du champ d'investigation des études transversales)), la plupart d'entre-elles rapportent des excès de symptômes respiratoires, ORL, digestifs ou cutanés chez les sujets exposés. Ces symptômes semblent être liés à des désordres immuno-allergiques ou toxiques.

Les études qui observent un lien avec les expositions aux agents biologiques sont moins nombreuses et ne rapportent pas de relation dose-effet. Les résultats les plus solides sont observés pour l'exposition aux endotoxines. La recherche de marqueurs immunologiques de contamination (Ig) n'a pas apporté d'éléments probants jusque là. Les études fondées sur la recherche de signes d'inflammation semblent apporter des éléments intéressants mais souffrent d'un défaut de puissance statistique ou n'ont porté que partiellement sur des travailleurs du compostage.

5 ANALYSE DES QUESTIONNAIRES DESTINES AUX PROFESSIONNELS DU COMPOSTAGE

Au 19 août, 60 des 200 centres de compostage sollicités nous ont retourné le questionnaire rempli (soit 30%), 10 nous ont fait parvenir un courrier nous informant qu'ils ne géraient pas ou plus d'unité de compostage (soit 5%) et 10 courriers nous sont revenus avec la mention « aucune entreprise à l'adresse indiquée » (soit 5%). 120 entreprises (soit 60%) ne se sont pas manifestées après les deux envois de courrier, à trois semaines d'intervalle.

L'analyse des questionnaires remplis par les professionnels nous a permis d'obtenir des renseignements concernant les unités et les travailleurs du compostage. Les principaux résultats sont exposés dans les tableaux 4 et 5 et illustrés par les figures 6 et 7.

Les centres de compostage, pour la plupart ouvert depuis moins de dix ans (cf. figure 6), sont gérés pour un tiers par des collectivités et pour deux tiers par des entreprises privées. La répartition des déchets compostés est présentée sur la figure 7 : les déchets compostés sont essentiellement des déchets verts, puis des boues de STEP/des déjections animales et enfin des OM brutes ou grises/des biodéchets/des déchets IAA.

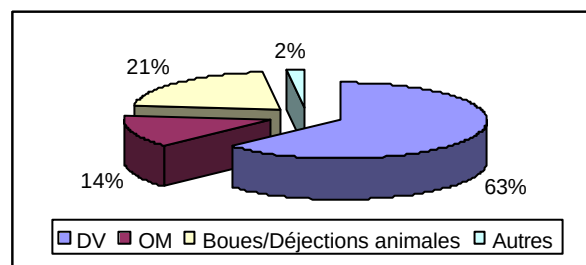
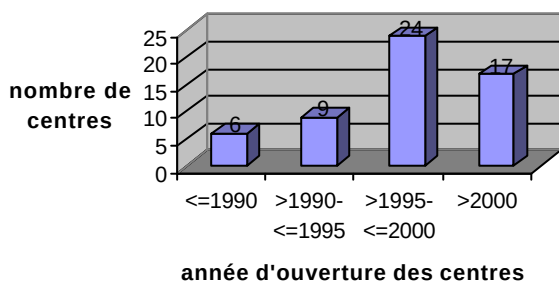


Figure 7 : Répartition de la quantité de déchets compostés suivant leur origine

Figure 6 : Dates d'ouverture des unités de compostage

La quantité de déchets compostés estimée sur la France entière à partir de nos résultats est de 9 Mt/an environ (794 260 t/an / 58 unités ayant répondu à la question « quantité de déchets produit » x 680 unités de compostage estimées en France (MEDD, 2005)). La quantité de compost produite est estimée de la même manière à 3 Mt environ (215 080 t/an / 48 unités de compostage ayant répondu à la question « quantité de compost produit » x 680 unités de compostage).

Les centres de compostage sont plus fréquemment situés à l'air libre (72%) et l'aération se fait le plus souvent de façon naturelle, avec retournement des andains (62%) (cf. tableau 4). Enfin, les centres sont généralement équipés de chargeurs (95%) et de broyeurs (63%), mais également de cribles (41%) et de retourneurs d'andains (30%).

Tableau 4 : Répartition des unités de compostage suivant le type d'aération mis en place et suivant l'environnement où se déroulent les activités liées au compostage

Aération du compost	%	Lieu des activités	%
Aération naturelle sans retournement	5	Activités à l'air libre	72
Aération naturelle avec retournement	62	Activités sous hall non clos	5
Aération forcée sans retournement	13	Activités sous bâtiment clos	5
Aération forcée avec retournement	15	Activités en environnement mixte	18

Le tableau 5 nous indique que la population des travailleurs, estimée sur la France entière à partir de nos données à 1970 individus environ (moyenne géométrique x 680 centres), est composée en grande majorité d'homme (93%). Il s'agit d'une population plutôt jeune (80% des salariés ont moins de 50 ans) et stable à priori (82,5% des salariés ont une ancienneté sur les sites de compostage supérieure à deux ans). Leur statut dans l'entreprise est non précaire (86% de CDI ou de fonctionnaire territoriaux), ce qui est aussi un indice de stabilité des employés dans les centres de compostage.

Tableau 5 : Analyse du questionnaire rempli par les professionnels du compostage : quelques caractéristiques des travailleurs du compostage

Taille de la population	Analyse du questionnaire
Travailleurs du compostage :	
Effectif moyen par unité	2,9*
..... Dont femmes :	7%
..... Dont hommes :	93%
Travailleurs exposés :	80,3% (travailleurs expo / totaux)
Âges des travailleurs :	
..... <30 ans	27%
..... 30 ans à 50 ans	53%
..... >50ans	20%
Ancienneté dans l'unité de compostage :	
..... <2 ans	17,5%
..... 2 ans < <10 ans	64,5%
..... >10 ans	18%
Contrat des employés :	
..... Intérim :	<1%
..... CDD :	7%
..... CDI (ou contrat fonctionnaires) :	86%
..... Autres (emploi jeune, réinsertion) :	<1%
Temps de travail	
..... Temps pleins :	86%*
..... Temps partiel :	14%

* moyenne géométrique (justifiée par la répartition des unités de compostage par nombre de salariés (cf. figure 8))

** Il faut noter que les travailleurs qui sont salariés d'une collectivité exercent généralement leurs activités sur plusieurs postes à la fois, autres que dans les unités de compostage (tri sélectif des déchets, collecte,...). Notés en temps pleins, ils ne réalisent en fait qu'un temps partiel sur l'unité de compostage.

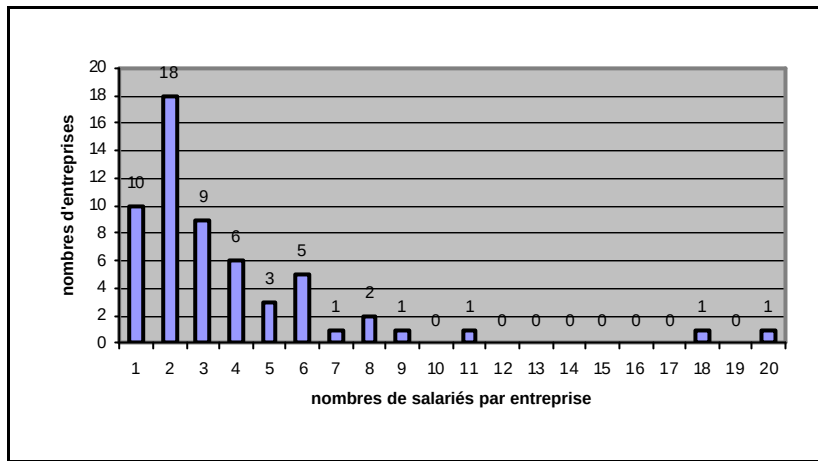


Figure 8 : répartition des unités de compostage par nombre de salariés

Nous avons ainsi établi l'état des connaissances des risques sanitaires par inhalation pour les travailleurs des centres de compostage, lié aux agents d'origine biologiques ou non. Cette première phase de notre travail nous a permis de constater que :

- les activités de compostage sont relativement récentes mais en pleine expansion,
- le nombre de travailleurs exposés à ces activités est limité tant au niveau national que dans un centre donné,
- les procédés employés, bien que reposant sur les mêmes principes (fermentation-maturation) sont multiples et s'exercent dans des conditions diverses,
- les travailleurs exercent le plus souvent leur activité à l'air libre,
- le principe même du compostage (biodégradation de déchets fermentescibles) peut conduire à la libération dans l'atmosphère de travail de multiples agents biologiques ou chimiques,
- les expositions dans les centres sont peu documentées,
- les effets sanitaires ont été peu étudiés.

A partir de ces informations, nous allons maintenant discuter de la pertinence de la mise en place d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage, puis nous dégagerons les priorités en terme d'agents et d'effets à étudier, et enfin nous discuterons de la faisabilité de la mise en place d'une telle étude.

Partie 2

PERTINENCE ET FAISABILITE D'UNE ETUDE EPIDEMIOLOGIQUE AUPRES DES TRAVAILLEURS DES CENTRES DE COMPOSTAGE

1 PERTINENCE DE LA MISE EN PLACE D'UNE ETUDE EPIDEMIOLOGIQUE AUPRES DES TRAVAILLEURS DES CENTRES DE COMPOSTAGE

Une synthèse des connaissances sur les éléments dangereux liés au compostage des déchets a été réalisée sous la forme d'un tableau (non joint à ce document compte tenu de sa taille). Rappelons que nous avons choisi d'étudier l'ensemble des éléments identifiés dans les publications disponibles. Il est donc possible que des composés effectivement émis par les unités de compostage ne figurent pas dans notre étude, soit parce que les données n'ont pas été publiées, soit parce que les composés n'ont jamais été recherchés. Le nombre d'études publiées à ce sujet reste limité et concerne surtout la recherche des composés dans le compost à différents stades des procédés de fabrication. L'exposition professionnelle par mesure individuelle n'est que rarement prise en compte. Les exploitants que nous avons interrogés rapportent à cet égard des mesures principalement au niveau du compost (53% des exploitants), éventuellement dans les déchets (18%) ou l'air (12%). Les composés recherchés se limitent dans la plupart des cas aux valeurs agronomiques, aux ETMS, aux pathogènes, éventuellement aux HAPs et PCBs.

Cette synthèse nous a permis de constater que de nombreux agents d'origine biologique ou non ont effectivement été retrouvés dans les déchets, le compost et l'air ambiant des unités de compostage. Comme nous l'avons rapporté dans la première partie de ce travail, la plupart des familles de composés chimiques organiques sont représentées : métaux lourds, HAP, COV, pesticides,... Les travailleurs du compostage sont donc exposés à ces agents indésirables, notamment par inhalation d'aérosols ou de gaz. Cette exposition est d'ailleurs confirmée par les résultats de notre enquête auprès des exploitants : 80,3 % des travailleurs sont déclarés comme étant exposés. De plus les réponses fournies montrent que les précautions respiratoires ne sont pas prises systématiquement et sont peu fréquentes.

Certaines substances retrouvées sur les sites de compostage représentent un danger important en raison de leur potentiel cancérigène, avec des effets à long terme, sans seuil et pour des doses d'exposition faibles. D'autres sont moins toxiques pour l'homme, mais sont néanmoins présentes en quantité importante sur les sites et peuvent présenter des effets nocifs à court terme.

Cependant, comme nous l'avons noté précédemment, la connaissance des risques sanitaires liés au compostage des déchets pour les travailleurs reste très limitée. Les effets propres aux agents chimiques n'ont pas été explorés jusqu'à présent. En effet, les seules études disponibles portent uniquement sur les risques sanitaires liés aux agents d'origine biologique. Même s'il est difficile de tirer des conclusions solides sur la réalité des risques à partir de ces études, la plupart d'entre-elles rapportent des excès de symptômes respiratoires, ORL, digestifs ou cutanés chez les salariés exposés.

Quelques études observent un lien entre l'apparition de symptômes et les expositions aux agents biologiques, mais aucune d'entre elles ne rapportent des relations dose-effet.

La consultation des études épidémiologiques publiées jusqu'à présent dans le secteur du compostage laisse donc la place à d'autres investigations ciblées sur les agents chimiques ou visant à améliorer les observations réalisées sur les agents biologiques. D'autres travaux épidémiologiques permettraient en effet d'objectiver l'existence d'effet dans la population des travailleurs des centres de compostage et le cas échéant de pouvoir relier ces effets à des expositions, améliorant ainsi la connaissance des risques pour cette activité.

Des éléments semblent indiquer que le manque de connaissance sur les risques liés au traitement des déchets est une préoccupation croissante : plaintes de riverains rapportées par les exploitants, inquiétudes des travailleurs, difficulté dans la réalisation des études d'impact, intérêt des institutions de prévention pour ce sujet.

Nos recherches nous ont permis de constater qu'il était difficile d'obtenir un état des lieux à jour des centres de compostage en France : les inventaires des unités ne sont généralement pas exhaustifs, les critères employés pour les constituer entraînant une sélection (sur les gestionnaires, les types de déchet intrant,...). Le document le plus récent dont nous disposons estime à 680 le nombre de centres en France. Dans notre enquête auprès des exploitants, nous avons observé qu'il y avait en moyenne 2,9 travailleurs par centre (moyenne géométrique). Si nous appliquons ce nombre au nombre d'unités de compostage, nous obtenons un nombre estimé de travailleurs du compostage en France de 1970 environ. En 2004, la population française comptait plus de 27,4 millions de salariés (source : site Internet de l'INSEE). Les travailleurs des centres de compostage représentent donc moins de 0,007% de celle-ci.

Les risques engendrés par cette activité ne représentent donc pas un problème majeur de santé pour la population active française et le coût représenté par la prise en charge d'éventuelles affections doit, compte tenu de la faible population concernée, être mineur par rapport aux coûts sanitaires induits globalement par les activités professionnelles. Pour autant, une activité professionnelle, même marginale en terme d'effectif, mérite d'être exercée dans les meilleures conditions possibles. Dans la mesure où des composés dangereux pouvant provoquer des maladies graves (cancers) ont été mis en évidence, des actions visant à mieux apprécier et prévenir les risques paraissent fondées. La nécessité de ces actions est d'ailleurs renforcée par la possible exposition de la population générale à proximité des plates-formes, population qui pourrait aussi développer des effets en rapport avec ces expositions comme cela a été montré dans l'étude de Herr (*Herr, 2003*).

Malgré le faible nombre de sujet concerné, la problématique des risques sanitaires liés au compostage des déchets pour les travailleurs du compostage peut donc être perçue comme un problème de Santé Publique.

Ainsi, il apparaît intéressant et pertinent de mettre en place une ou plusieurs études épidémiologiques auprès des travailleurs des centres de compostage. Mais une telle étude est-elle faisable (exigences liées à la méthode épidémiologique, contraintes organisationnelle, politique, éthique et légale, économique) ? De plus, quels sont les agents dangereux et les effets sanitaires à étudier de façon prioritaire ? C'est ce que nous proposons d'étudier dans la suite de cette partie.

2 LISTE DES AGENTS DANGEREUX ET DES EFFETS SANITAIRES A ETUDIER DE FAÇON PRIORITAIRE

2.1 Les agents d'origine biologique

Comme nous l'avons vu précédemment, les agents biologiques potentiellement dangereux pour l'homme peuvent être présents dans les centres de compostage à des doses pouvant induire des effets indésirables (cf. partie 1, § 3.3, tableau 3). Par exemple : fibroses pulmonaires et BAAE (effets induits par les actinomycètes, à des doses supérieures à 10^5 et 10^6 UFC/m³) ou broncho-constriction et ODTS (effets induits par les endotoxines, pour des doses supérieures à 100 et 200 ng/m³).

Ces agents ont déjà fait l'objet de diverses études épidémiologiques (longitudinales et transversales) pour la plupart (bactéries totales, actinomycètes, champignons, endotoxines et glucanes). Cependant, les résultats de ces études ne permettent pas de conclure quant aux risques sanitaires liés aux agents biologiques pour les travailleurs du compostage. Elles sont notamment limitées par la difficulté à mesurer les expositions de manière pertinente, les mesures réalisées étant soumises à une forte variabilité (il est à noter que les méthodes de mesure ont peu changé depuis ces études).

En revanche, il est possible de suggérer des orientations à partir des résultats obtenus (cf. partie 1, §4). Entre autres, aucune étude ne fournit d'argument solide en faveur d'effets infectieux. Les atteintes respiratoires, ORL, oculaires et cutanées semblent plus liées à des désordres immuno-allergique ou toxinique.

→ La mise en place d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs du compostage peut se révéler intéressante pour préciser les risques sanitaires liés à ces agents biologiques. Elle devrait cibler des marqueurs précoces de l'action de ces agents, tels que des marqueurs d'inflammation. Compte tenu de la nature des effets ciblés (respiratoires et ORL notamment), le tabagisme apparaît comme un facteur de confusion potentiel majeur et devrait donc être pris en compte dans le choix de la population d'étude.

Le principal obstacle à une telle étude reposerait sur l'estimation des expositions. Une stratégie de mesure adaptée à l'exposition professionnelle, reposant sur l'observation de plusieurs indicateurs d'aérobiocontamination et tenant compte de la variabilité inhérente au mesurage, doit être développée. Compte tenu de la multiplicité des centres de compostage, des procédés, des déchets intrants et des postes de travail, une estimation satisfaisante représente un projet lourd et difficile à mener dans le cadre et dans les délais d'une étude épidémiologique. Compte tenu de cette contrainte, il nous semblerait plus adapté de proposer un travail en deux temps : d'abord une étude métrologique pour mettre au point la stratégie d'estimation des expositions, ensuite une étude épidémiologique qui emploiera cette stratégie.

En revanche, aucune étude disponible ne porte sur les risques sanitaires liés aux mycotoxines et ces composés n'ont jamais été mesurés dans les déchets compostés, le compost ou l'air ambiant des usines de compostage (parmi les publications étudiées pour ce travail). Par ailleurs, les effets de ces composés par inhalation sont mal connus.

→ Compte tenu de ces éléments, l'amélioration des connaissances portant sur les risques sanitaires liés aux mycotoxines relève avant tout d'une approche toxicologique afin de déterminer les effets de ces substances par inhalation, ainsi que d'une approche métrologique pour objectiver leur présence dans l'air des installations.

2.2 Liste des agents non biologiques

2.2.1 Classement des substances par ordre d'intérêt suivant la confrontation exposition/VTR

Rappelons ici que nous avons décidé d'étudier l'ensemble des micropolluants identifiés et/ou mesurés dans les déchets compostés, le compost ou l'air ambiant des usines de compostage par les travaux que nous avons pu regrouper. Parmi ces produits (164 en tout), nous pouvons distinguer différentes catégories.

1. *Les produits pour lesquels aucune mesure dans l'air, les déchets compostés ou le compost n'est disponible.*

→ Nous proposons que ces agents relèvent d'une approche métrologique avant toute investigation épidémiologique de manière à objectiver leur présence dans les centres de compostage. Il est en effet inutile de mettre en place un protocole lourd pour rechercher des effets liés à un produit qui ne serait pas retrouvé. Les produits pouvant induire des effets graves et suspectés d'être volatilisés dans l'air des installations devraient être recherchés de manière prioritaire.

2. *Les produits mesurés dans les déchets ou le compost uniquement, mais non détectés (ND).*

→ Ces résultats sont plutôt rassurants, mais le nombre d'études métrologiques sur les centres de compostage est encore limité et la non détection d'un produit dans les déchets solides ne garantit pas son absence dans la phase gazeuse s'il est très volatile. Nous proposons donc des compléments d'investigations métrologiques, non prioritaires compte tenu des premiers résultats négatifs. Les produits volatiles les plus dangereux (effets graves) seraient dans ce cas à étudier en premier.

3. *Les produits mesurés dans les déchets compostés (ou le compost) uniquement et détectés.* Des concentrations dans l'air sont extrapolées à partir des concentrations mesurées dans les déchets compostés ou le compost, puis comparées aux VTR (cf. annexe 3 pour la méthode d'extrapolation). Trois situations se présentent :

- Les concentrations extrapolées dans l'air sont supérieures aux VTR

→ Comme les concentrations dans l'air sont extrapolées, il nous semble nécessaire de les vérifier afin de préciser l'importance réelle de l'exposition. Nous proposons donc que des mesures dans l'air soient réalisées pour les produits de cette catégorie. Cette approche métrologique nous semble prioritaire dans la mesure où l'extrapolation conduit à des valeurs supérieures aux VTR. Une approche épidémiologique pourra également être proposée mais dans un second temps si les valeurs observées dans l'air sont effectivement élevées.

- Les concentrations extrapolées dans l'air sont inférieures aux VTR.

→ Ce résultat est a priori rassurant, d'autant que nous avons effectué les comparaisons avec des VTR pour la population générale. Cependant, les concentrations dans l'air sont extrapolées. Or, nous avons constaté que pour certains composés, les concentrations extrapolées dans l'air sont inférieures aux valeurs réellement mesurées. C'est le cas notamment pour des composés très volatiles. Des mesures dans l'air ambiant des usines de compostage (approche métrologique) peuvent être envisagées afin de confirmer (ou d'infirmer) l'exposition limitée.

- Il n'y a pas de VTR.

→ Les effets toxiques chroniques du produit ne sont pas connus. Il serait donc difficile d'établir une étude épidémiologique pertinente. Une approche toxicologique nous paraît nécessaire afin d'identifier les éventuels organes cibles de la substance chimique.

4. Les produits mesurés dans l'air, mais non détectés (ND).

→ Ces résultats sont rassurants, les produits les plus dangereux (effets graves) peuvent éventuellement faire l'objet d'une approche métrologique pour complément de recherche compte tenu du faible nombre d'étude (non prioritaire).

5. Les produits mesurés dans l'air et détectés. Plusieurs situations se présentent alors :

- Les concentrations mesurées dans l'air sont supérieures aux VTR.
 - o Les VTR sont déterminées à partir de données humaines

→ Il s'agit de situations à investiguer en priorité. Comme nous avons utilisé des VTR population générale, cette observation n'est pas forcément inquiétante mais mérite d'être approfondie. Dans le cas où des VTR professionnelles sont disponibles et où elles sont aussi dépassées, il est nécessaire de mettre en place avant tout une prévention adaptée. Si les VTR professionnelles ne sont pas dépassées ou n'existent pas, il nous semble nécessaire de préciser l'importance réelle de l'exposition par des mesures dans l'air qui doivent être réalisées de manière prioritaire. Une approche épidémiologique sur ces composés peut également être envisagée mais dans le cas d'un dépassement des VTR professionnelles, la prévention doit prendre le pas sur l'investigation épidémiologique.

- o Les VTR sont déterminées à partir de données chez l'animal.

→ Dans ce cas, une approche épidémiologique semble souhaitable de manière à essayer de confirmer (ou d'infirmer) chez l'homme les observations réalisées chez l'animal. Une telle démarche permettrait de répondre à la question du risque chez les travailleurs du compostage mais aussi, plus largement, permettrait d'apporter des informations recueillies chez l'homme sur les dangers représentés par ces substances. Une approche métrologique afin de préciser l'importance réelle de l'exposition semble aussi nécessaire dans le cadre de ces investigations.

- Les concentrations mesurées dans l'air sont inférieures aux VTR.
 - o Les VTR sont déterminées à partir de données humaines.

→ Il s'agit de données rassurantes. Les produits dangereux (effets graves) relèvent éventuellement d'une approche métrologique pour un complément de recherche ou une surveillance (non prioritaires).

- o Les VTR sont déterminées à partir de données chez l'animale.

→ Il s'agit de données à priori rassurantes mais une incertitude subsiste du fait de l'extrapolation Animal/Homme. Une approche épidémiologique peut être envisagée à visée de recherche (non prioritaire).

- Il n'y a pas de VTR.

→ Une approche toxicologique est nécessaire afin d'identifier les éventuels organes cibles de la substance chimique.

Les substances sont ainsi répertoriées dans un tableau présenté en annexe (cf. annexe 3), selon leur appartenance à l'une ou l'autre des catégories.

Les substances surlignées en jaunes sont les substances pour lesquelles la mise en place d'une étude épidémiologique est jugée pertinente et prioritaire, alors que les substances surlignées en bleu sont les substances pour lesquelles la mise en place d'une étude épidémiologique pourrait être pertinente mais est jugée non prioritaire.

Remarque : Pour les substances dont les concentrations dans l'air (extrapolées ou non) dépassent les VTR, il est indiqué s'il s'agit d'un dépassement d'une VTR sans seuil (ss) ou avec seuil (as).

2.2.2 Classement des effets suivant leurs gravités

Nous avons établi un classement des substances chimiques pour lesquelles une approche épidémiologique a été jugée pertinente et prioritaire précédemment (partie 2, § 2.2.1). nous proposons maintenant un classement des substances retenues suivant la gravité de leurs effets connus (cf. annexe 4). Ainsi 5 catégories d'effets ont été établies :

1. Effets chroniques irréversibles et thérapeutique partiellement efficace ou inefficace chez l'homme (cancer,...),
2. Effets chroniques réversibles ou accessibles à la thérapeutique chez l'homme,
3. Effet chez l'homme à court terme et effets chroniques probables (effets chroniques spécifiques ou graves chez l'animal),
4. Effet chez l'homme à court terme et effets chroniques possibles (effets chroniques non spécifiques chez l'homme ou réversibles chez l'animal),
5. Effet chez l'homme à court terme et effets chroniques peu vraisemblables (effets chroniques non spécifiques chez l'animal ou pas d'effet chronique), ou nuisance.

Les organes cibles sont divers : voies respiratoires, système nerveux, système hématopoïétique, système hépatique et rénal.

2.2.3 Synthèse concernant les substances non biologiques et les effets sur la santé à étudier

Voici une proposition de classement pour l'étude des substances chimiques et de leurs effets sur la santé (cf. tableau 6). Ce classement tient compte de la vraisemblance de survenue des effets (confrontation exposition/VTR) et de la gravité de ces effets.

Tableau 6 : Proposition d'un classement des substances à étudier en priorité, suivant la vraisemblance de survenue des effets et suivant la gravité de ces effets

Etude épidémiologique prioritaire	1	Camphène	Etude épidémiologique non prioritaire	2	Hexane
	1	Chloroforme		2	Tétrachloroéthène
	1	Tétrachlorure de carbone		2	Toluène
	2	Naphtalène		2	Trichloroéthène
	5	2-butanone		3	Carbaryl
Etude épidémiologique non prioritaire	1	Arsenic		3	1,4-dichlorobenzène
	1	Benzène		3	1,1-dichloroéthène
	1	Cadmium		4	Chlorobenzène
	1	Chlorure de méthylène		4	Cuivre
	1	Chrome		4	Pyrène
	1	Nickel		4	Sulfure d'hydrogène
	1	Manganèse		5	1,2-dichloropropane
	1	PCBs		5	Ethyl benzène
	1	Plomb		5	Isopropyl benzène
	1	Xylène (m,p,o)		5	4-méthyl-2-pentanone

3 ELEMENTS POUR LA FAISABILITE « EPIDEMIOLOGIQUE » DE L'ETUDE

3.1 Nombre de sujets nécessaires dans chaque groupe d'étude

3.1.1 Le cas général

Le tableau suivant (tableau 7) indique la taille de la population nécessaire dans chacun des groupes d'étude, dans le cas d'une étude épidémiologique transversale, selon la prévalence d'un symptôme ou d'une maladie dans la population témoin et la différence attendue de prévalence entre la population témoin et la population d'étude.

Tableau 7 : Comparaison de deux prévalences (test bilatéral) : nombre de sujets nécessaires par groupe (puissance = 80 % ; alpha = 5 %)

		Différence attendue entre la prévalence dans la population témoin et celle dans la population étudiée								
		1%	5%	10%	50%	100%	200%	300%	400%	500%
Prévalence dans la population témoin	0,01%	> 10 ⁶	> 10 ⁶	> 10 ⁶	8E+05	3E+05	88189	50038	34241	25814
	0,10%	> 10 ⁶	> 10 ⁶	> 10 ⁶	82341	25471	8804	4993	3416	2574
	1%	> 10 ⁶	6E+05	2E+05	8145	2515	866	489	333	250
	5%	> 10 ⁶	1E+05	31633	1550	474	160	88	59	43
	10%	> 10 ⁶	58162	14951	726	219	72	38	25	17
	25%	5E+05	19306	4941	231	66	19	8	-	-
	50%	2E+05	6354	1605	66	15	-	-	-	-
	75%	52064	2037	493	-	-	-	-	-	-
	90%	16961	597	121	-	-	-	-	-	-

Exemple : une différence de 10 % lorsque la prévalence de base est de 10% signifie que l'on compare un groupe dont la prévalence d'une maladie est de 10 % à un groupe dont la prévalence de la même maladie est de 11%).

En dehors de toutes considérations relatives à la faisabilité organisationnelle d'une telle étude, le nombre potentiel de sujets participants (travailleurs du compostage masculins) est estimé à environ 750 (*2,9 travailleurs par entreprise x 680 entreprises en France x 93% d'hommes* (nombre de femmes trop faible) *x 80,3% d'exposés x 50% de participation* (taux faible)). Compte tenu du tableau précédent, un excès de maladies (ou de symptômes) pourra être détectée chez les travailleurs du compostage dans les situations représentées par les cases grisées du tableau 7. Deux circonstances se dégagent pour assurer une puissance statistique satisfaisante à cette étude :

- La prévalence de la maladie (ou du symptôme) dans la population témoin est >1%.
- La différence de prévalence entre les différents groupes est élevée : au moins 5 %, au mieux >50%.

Dans le cas où l'effet serait exprimé par un paramètre quantitatif (par exemple la mesure du débit expiratoire), avec les mêmes contraintes de puissance (80%) et de risque $\alpha=5\%$, le rapport entre la plus petite différence observable entre les deux groupes et l'écart-type de la mesure doit être supérieur à 20% pour que l'étude soit réalisable.

Un moyen d'améliorer la puissance statistique de l'étude consisterait à augmenter la taille de la population témoin. Cette solution pose cependant de nombreux problèmes pratiques puisqu'elle complique l'organisation du recueil des données et s'avère souvent impossible. En effet, les études réalisées en milieu professionnel se heurtent souvent à des problèmes pour trouver des sujets témoins pertinents (même profil que les sujets d'étude mais sans exposition) et d'autre part à des difficultés pour obtenir la participation de sujets témoins (faible motivation, refus de libérer du temps pour l'étude, ...).

Un autre moyen consisterait à mettre en œuvre une étude longitudinale, en répétant les observations chez les sujets. Dans le cas d'une variable quantitative, pour obtenir une puissance statistique de 80% avec $\alpha = 5\%$ et en posant l'hypothèse d'une corrélation faible entre deux mesures successives $r = 0,1$ (hypothèse qui tend à accroître le nombre de sujets nécessaires), une étude auprès des 750 travailleurs du compostage est envisageable dans de bonnes conditions si le rapport entre la plus petite différence que l'on souhaite observer entre exposés et non exposés et l'écart type de la mesure (σ) est supérieur ou égal à 0,1 avec au moins trois points d'observation. Avec les mêmes contraintes un suivi des sujets à cinq reprises permet de limiter le nombre de sujets nécessaires dans chaque groupe à 110.

3.1.2 Le cas particulier des cancers

L'étude des cancers en épidémiologie est compliquée, d'une part par le temps de latence important qui peut exister entre l'exposition et l'apparition ou le diagnostic de la maladie, d'autre part par le nombre relativement faible de cas d'un cancer donné qui peuvent être observés dans une population.

L'épidémiologie fait appel principalement à deux types d'études pour étudier les cancers.

- Les études de mortalité :

Les études de mortalité consistent à dénombrer dans la population d'intérêt le taux de décès par cancer et à le comparer à celui d'une population de référence. Cette approche implique de bien cerner la population d'intérêt (constitution exhaustive de la "cohorte" des sujets), de disposer ou d'avoir accès à un moyen aussi exhaustif que possible de dénombrement des décès (fichier de décès), de connaître les causes de ces décès pour identifier les cancers, d'avoir accès aux informations concernant une population de référence satisfaisante, c'est à dire aussi comparable que possible à la population étudiée.

Les trois derniers points ne posent pas de problème spécifique au compostage : les décès sont recensés en France par l'état civil, et l'INSEE dispose de fichiers permettant de savoir si une personne donnée est décédée ou vivante. De même, l'INSERM traite les causes de décès et permet par recoupements avec les informations sur l'état vital de connaître les causes de décès des sujets.

Dans le cas des travailleurs du compostage, la constitution d'une cohorte exhaustive pourrait poser à l'inverse de réels problèmes. En effet, l'élaboration d'une cohorte professionnelle suppose de disposer d'un recensement des sujets exposés au risque. Compte tenu de la dispersion des installations de compostage ($n = 680$ en France en 2005), de leur petite taille ($n = 2,9$ sujets par centre en moyenne) et de leur mode de gestion différents (33% publique, 67% privé), il n'existe pas de fichier unique recensant les travailleurs du compostage. Mettre en place une étude de mortalité supposerait donc de constituer ce fichier en multipliant les contacts avec les entreprises, leurs gestionnaires ou les médecins du travail. Ce mode de fonctionnement est possible mais il ne permet pas de garantir l'exhaustivité de la cohorte, paramètre pourtant important à prendre en compte si l'on souhaite limiter les risques de biais de sélection dans ce type d'étude.

En fait le principal problème qui pourrait être rencontré dans ce type d'étude résiderait probablement dans le faible nombre de cas de cancers observés. En effet, l'activité de compostage est une activité récente : 73 % des centres sont en activité depuis moins de 10 ans. Dans le cas des cancers, une latence de 10 à 20 ans est prévisible. Il est donc peu probable qu'une exposition de moins de 10 ans donne lieu à des cancers décelables actuellement. De plus, une étude de mortalité menée aujourd'hui sur les travailleurs du compostage donnerait probablement lieu à un nombre limité de décès observés car ces sujets sont actifs et jeunes (80 % de moins de 50 ans).

Nous avons tenté d'estimer de manière grossière ce nombre de décès pour les hommes qui représentent 93 % des effectifs dans notre population (tableau 8). En considérant que l'ancienneté des centres de compostage observée dans notre étude est représentative de celle de l'ensemble des centres, nous avons calculé le nombre de centres en fonctionnement depuis 1985. Nous avons ensuite estimé le nombre de salariés en activité pour chaque période de 5 ans depuis cette date en posant l'hypothèse que le nombre moyen de salariés masculins par centre est constant au cours du temps et égal à 2,7, moyenne observée dans notre étude. En posant l'hypothèse majorante que tous les salariés du compostage sont restés dans cette activité depuis leur entrée, nous avons calculé le nombre de personnes-années correspondant par tranche quinquennale depuis 1985. L'évolution des taux de mortalité par cancer pour les hommes de la population générale française a été trouvé dans un rapport de l'INVS consacré au cancer en France (Evolution de l'incidence et de la mortalité par cancer en France de 1978 à 2000, http://www.invs.sante.fr/publications/2003/rapport_cancer_2003). Par approximation, nous avons admis que les taux de cancers étaient stables sur chaque période quinquennale et calculé ainsi le nombre de décès attendu dans notre population. Cette estimation grossière, qui ne tient pas compte de l'âge des sujets, est majorante car elle repose sur les taux de mortalité de la population générale qui sont classiquement supérieurs à ceux observés dans une population de travailleurs.

Elle conduit à un nombre de décès par cancer attendu de 36 (cf. tableau 8).

Période	% de centres créés durant la période	Nombre de centres estimé	Effectif cumulé estimé	Nombre de personnes années	Taux de mortalité (/ 100000) (source: INVS)	Nombre de décès par cancer attendus
1985-1989	11 %	75	203	1015	197,2	2
1990-1994	16 %	109	497	2485	193,2	5
1995-1999	43 %	292	1285	6425	189,9	12
2000-2004	30 %	204	1836	9180	187,4	17
Total	100 %	680	1836	19105	-	36

Tableau 8 : Estimation du nombre de décès par cancer dans la population masculine des travailleurs du compostage

Le même calcul appliqué aux taux de mortalité spécifiques par cancer fournit des nombres de cancers attendus de :

- poumon : 9 (arsenic, cadmium, chrome)
- estomac : 1,3 (trichloroéthylène)
- foie : 2,2 (camphène, chloroforme, tétrachlorure de carbone, PCBs)
- SNC : 0,8 (chlorure de méthylène)
- leucémies : 1 (benzène, xylènes)

- Les études cas – témoins :

Les études cas-témoins consistent à comparer les expositions de sujets malades (en l'occurrence victimes de cancers) à celles de sujets témoins non malades. La mise en place d'une telle étude pour étudier les effets du compostage pourrait donc prendre deux formes.

- Cibler des sujets atteints de cancer issus d'un échantillon de la population générale (recrutement à l'hôpital par exemple) et étudier leur carrière professionnelle pour observer s'ils ont exercé en centre de compostage, en comparaison avec un échantillon de personnes non atteintes de cancer
- Cibler des travailleurs de centre de compostage atteints de cancer et étudier les conditions de travail et les expositions auxquelles ils ont été confrontés pour déterminer celles qui sont éventuellement reliées à l'apparition du cancer, en comparaison avec un échantillon de sujets ayant travaillé en centre de compostage mais non atteints de cancer.

La première approche poserait le problème de la rareté des travailleurs de centre de compostage dans la population générale (1972 travailleurs en centre de compostage estimé en France en 2005 pour plus de 27,4 millions personnes dans la population active, soit 0,007%). Il faudrait donc interroger un effectif considérable de sujets pour détecter quelques sujets ayant exercé une activité de compostage. Avec un risque $\alpha=5\%$, en prenant 4 témoins pour un cas, il faudrait, pour atteindre une puissance statistique de 80% plus de 60000 cas pour espérer mettre en évidence un OR de 3. Ce type d'étude se heurterait donc à un problème de puissance statistique.

La seconde approche paraît plus abordable. Elle nécessiterait toutefois de disposer d'un moyen de détection des cas de cancer chez les travailleurs du compostage (rétrospectif ou prospectif) et se heurterait au problème évoqué pour les études de mortalité, c'est à dire la faible latence depuis l'apparition des centres de compostage. De plus, les produits cancérrogènes que nous avons pointés dans notre démarche (benzène, ...) donnent des types de cancers différents (poumons, foie, rein, leucémies), ce qui diminuerait les chances de regrouper un nombre suffisant de cas de chaque type.

Ainsi, d'un point de vue épidémiologique, étudier l'effet "cancer" qui pourrait être induit par les produits classés 1 du tableau 6 chez les travailleurs du compostage semble donc difficile avec la seule population française de travailleurs.

3.2 Faisabilité organisationnelle

Nous avons estimé précédemment le nombre de salariés exposés par centre de compostage à 2,4 (*2,9 salariés par entreprise x 80,3% de salariés exposés*). Si nous considérons un taux de participation des travailleurs à l'étude épidémiologique de 50% (taux faible), une entreprise sera visitée pour étudier 1,2 employés en moyenne. Si 200 individus sont nécessaires à l'étude, ceci signifie que 160 entreprises doivent alors participer à l'étude. Pour les investigateurs, cela représente donc environ 160 journées de recueil dans la France entière, soit une à deux journées par semaine si l'étude est réalisée sur deux ans. Comme les entreprises sont dispersées dans la France entière, le temps nécessaire aux déplacements est susceptible d'accroître encore ce temps durant lequel les investigateurs sont mobilisés.

Le nombre d'investigateurs nécessaire ne dépend pas de l'effectif vu (car il est faible) mais plus du niveau de complexité des tests mis en œuvre. Par exemple, dans le cas où des pathologies respiratoires seraient ciblées, une seule personne peut lors de chaque déplacement assurer l'administration d'un questionnaire, la réalisation d'une exploration fonctionnelle respiratoire et de quelques tests pour explorer l'inflammation bronchique. A l'inverse, si des effets neuro-cognitifs sont recherchés, les tests sont plus nombreux et complexes et pourraient nécessiter le recours à plusieurs personnes.

La possibilité de faire intervenir les médecins du travail pour le recueil doit aussi être étudiée. Si la recherche des effets fait appel à des méthodes couramment appliquées dans le cadre du suivi des professionnels, les médecins pourraient être sollicités. Ceci introduit cependant la possibilité d'un effet "enquêteur" qui pourrait modifier les résultats obtenus. Si des tests plus complexes sont nécessaires, cette solution n'est plus envisageable car il faudrait former alors un nombre trop important de médecin à ces tests.

D'un point de vue organisationnel, il apparaît donc difficile de mettre en place une étude épidémiologique auprès des travailleurs du compostage, du fait de la très petite taille des unités.

3.3 Faisabilité « technique »

L'étude de la faisabilité technique comporte l'appréciation de la faisabilité de la mesure des expositions et de la mesure des effets.

Les différents composés dangereux retenus dans ce travail ont déjà été étudiés auparavant lors d'approches toxicologiques (existence de VTR « population générale »), avec mesure des expositions. L'estimation de l'exposition à ces agents par métrologie devrait donc être techniquement réalisable dans le cadre d'une étude épidémiologique. En fait la difficulté principale qui risque d'être rencontrée pour la métrologie des agents a déjà été évoquée au sujet des agents biologiques : elle est liée à la diversité des procédés et des conditions d'exposition. Une véritable stratégie d'échantillonnage doit être conçue de manière à obtenir des estimations conformes à l'exposition des travailleurs.

L'effet sanitaire supposé doit également pouvoir être mesuré de manière adéquate auprès des travailleurs des centres de compostage. Cet élément devra être vérifié avant la mise en place d'une éventuelle étude, après avoir fait un choix sur le type d'effets attendus. La mesure des effets respiratoires (troubles fonctionnels, hyper-réactivité bronchique) ne pose pas de problème particulier au compostage. Les atteintes biologiques (anémies, troubles immunologiques) peuvent être détectées à l'aide d'échantillons sanguins. Cette approche nécessite toutefois l'approbation préalable du comité d'éthique (CCPPRB) et se heurte parfois à la crainte des sujets vis à vis de la prise de sang. Elle pose aussi des problèmes organisationnels supplémentaires (nécessité de disposer d'un personnel médical sur place, conservation, transport et analyse des échantillons). La recherche de marqueurs urinaires traduisant des atteintes rénales par exemple est généralement plus facile car les sujets sont moins réticents. Pour les mesures d'effets neuro-cognitifs ou comportementaux, qui concernent beaucoup des substances que nous avons identifiées, différents tests informatisés, issus de la batterie NES (Neurobehavioral Evaluation System) permettent :

- La mesure de l'intensité des symptômes subjectifs liés aux neurotoxiques par un autoquestionnaire de type EUROQUEST,
- La mesure de la capacité attentionnelle (Digit Symbol test),
- La mesure de la mémoire de travail (Digit Span et Pattern Memory test),
- La mesure de l'apprentissage (Associate Learning test),
- La mesure de réaction (Simple Reaction Time test),
- L'évaluation de la mémoire à moyen terme (Recall test).

3.4 Faisabilité dans le contexte actuel

La faisabilité politique est évaluée par l'acceptabilité de l'étude épidémiologique par l'administration, par les travailleurs et par les entreprises.

- Acceptabilité par l'administration :

La question du compostage est un sujet d'intérêt pour Le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. En effet, il a mis en place un groupe de travail afin d'élaborer un guide méthodologique pour l'évaluation du risque sanitaire dans l'étude d'impact des installations de compostage. De plus, le MEDD a apporté une aide directe à la réalisation de ce travail en fournissant des données concernant l'état des lieux du parc de compostage en France (E. Morice, communication personnelle).

Après réception du courrier les informant de l'envoi d'un questionnaire aux entreprises de compostage, aucune CRAM n'a fait part d'un avis défavorable vis à vis de l'étude de faisabilité. Certaines ont réagi au contenu du questionnaire, en proposant de le compléter par des questions plus précises sur les expositions. D'autres ont manifesté leur intérêt pour le sujet et souhaitaient recevoir un exemplaire du travail effectué.

- Acceptabilité par les entreprises :

Aucunes des entreprises tirées au sort et contactées par courrier dans le cadre de ce travail n'a manifestée de remarques hostiles vis à vis de l'étude de faisabilité.

Cependant, au 19 août, le taux de non réponse après envoi de deux courriers à trois semaines d'intervalle était de 60% (soit 120 entreprises sur les 200 sollicitées). Ce taux important de non réponses peut s'interpréter de différentes façons.

- L'envoi du questionnaire s'est fait durant la deuxième semaine de juillet et la première semaine d'août. Un nombre important d'entreprise n'a donc pas répondu car le personnel était en congés.
- Un nombre important d'entreprises est opposé à la mise en place d'une éventuelle étude épidémiologique auprès des travailleurs du compostage,

En conclusion, il semble que la mise en place d'une étude épidémiologique serait acceptée par l'administration (MEDD, CNAM). Cependant, un doute subsiste quant à l'acceptabilité d'une telle étude par les entreprises du compostage. Compte tenu des délais impartis, nous n'avons pas pu apprécier la faisabilité d'une telle étude auprès des médecins du travail ou des travailleurs dans le cadre de ce travail.

3.5 Faisabilité éthique et légale

L'INRS est un organisme accrédité ISO 9001 version 2000 pour la conception et la réalisation des études épidémiologiques.

Les projets d'études épidémiologiques sont soumis à une commission scientifique composée d'experts extérieurs à l'INRS. Si le projet est approuvé par cette commission, des demandes d'autorisation sont soumis à la CNIL (Commission Nationale pour l'Informatique et les Libertés) pour la sécurité des données, au CCTI (Comité Consultatif pour la Traitement de l'Information Médicale) pour la pertinence de l'étude et au CCPPRB (Comité consultatif pour la protection des Personnes dans la Recherche Biomédicale), qui est un comité d'éthique. Une déclaration de l'étude est également à faire auprès du Ministère.

L'étude ne serait entreprise qu'après obtention de toutes ces autorisations.

3.6 Faisabilité économique

L'élaboration du protocole de l'étude comporte une réflexion sur les moyens nécessaires. Ce protocole d'étude est ensuite soumis à la Direction Scientifique puis à la Commission scientifique de l'INRS. Dès lors que le projet d'étude est scientifiquement validé par ces instances, il est soumis au conseil d'administration pour approbation. L'INRS, qui autofinance ses études, alloue alors le budget nécessaire à sa réalisation. Le coût de l'étude ne représente donc pas une contrainte absolue pour ce qui est de la faisabilité de l'étude épidémiologique. Il va de soit cependant que les difficultés organisationnelles évoquées précédemment sont susceptibles d'augmenter considérablement les coûts d'une telle étude par sujet inclus et donc de remettre en cause sa mise en place, au moins en terme de priorité.

Discussion

- Partie 1 : La recherche de l'information

Les organismes compétents (ADEME, FNADE, MEDD) possèdent des données concernant le parc du compostage (nombre d'unités en France, opérateurs de gestion, quantité de déchets compostés, quantité de compost produit, répartition suivant le type de déchets intrants, répartition suivant le régime de déclaration des unités, ...), mais ces données évoluent vite au cours du temps et sont donc rapidement « périmées ». Elles doivent donc être mises à jours régulièrement. Il est à noter qu'au cours du dernier trimestre de l'année 2005, un nouveau document (rapport ITOM 2004) devrait être publié.

En revanche, ces organismes ne possèdent que peu de données concernant la population de travailleurs du compostage. La donnée la plus récente date de 2002 (ADEME, 2002) et fait état de 1300 salariés. Notre estimation est d'environ 1970 travailleurs en 2005, ce qui est compatible avec un développement continu de cette activité. De plus, le champ d'investigation de l'enquête ITOM 2002 ne tient compte que des unités de compostage des déchets ménagers ou assimilés et exclut donc l'ensemble des unités de compostage de boues de STEP ou de déjections animales notamment. L'utilisation de cette donnée pour la suite de ce travail n'était donc pas possible. De même, les caractéristiques des travailleurs (âges, ancienneté, type de contrat dans l'entreprise, ...) ne sont que très mal connues par ces organismes.

La recherche d'informations concernant les connaissances des risques sanitaires pour les travailleurs des centres de compostage a suivi la démarche habituelle d'évaluation des risques, avec notamment identification des dangers et caractérisation des expositions. Les dangers ont été identifiés après avoir effectué une recherche bibliographique. Seul les éléments potentiellement dangereux identifiés dans les déchets compostés, le compost ou l'air ambiant des usines de compostage ont été étudiés. Or, une recherche plus complète aurait pu tenir compte des éléments dangereux retrouvés sur les lieux de travail des autres travailleurs des déchets (collecte des déchets, tri des déchets) ou de l'assainissement. Cependant, le temps imparti pour ce travail ne le permettait pas.

Le questionnaire destiné aux professionnels du compostage

Afin d'obtenir des données plus complètes et plus récentes que celles fournies par les organismes compétents, nous avons choisi d'envoyer des questionnaires directement aux professionnels du compostage (cf. annexe 1). Le taux de non réponse assez élevé (60%) peut s'expliquer soit par l'opposition des professionnels à la mise en place d'une éventuelle étude épidémiologique, soit par l'absence des professionnels sur leur lieux de travail durant la période d'envoi des courriers (prise des congés entre juillet et août).

Le questionnaire a globalement bien été rempli par les professionnels du compostage, mais certaines questions semblent avoir été mal comprises car incomplètes ou mal posée, notamment dans la partie relative à la typologie des salariés.

- La question 18 intitulée « nombre de salariés embauchés depuis l'ouverture du site et encore présents » avait pour but de renseigner sur la stabilité des salariés dans l'unité (les travailleurs présents à l'ouverture du site sont-ils les mêmes que ceux présents de nos jours, ou bien ont-ils été tous remplacés ?). Cependant, cette question a été fréquemment mal comprise car mal posée. Elle aurait du être intitulée « nombre de salariés embauchés à l'ouverture du site et encore présents ».

Nous avons choisi d'exclure cette question de l'analyse des questionnaires.

- La seconde question mal comprise par les professionnels est la question 19, relative à la durée d'embauche des travailleurs. Il s'agissait en fait d'obtenir une information sur la **durée d'emploi** sur le site de compostage et non au sein de l'entreprise ou de la collectivité. Le problème s'est fréquemment posé pour les fonctionnaires (la durée d'embauche étaient supérieure à la durée d'ouverture du centre de compostage).

Cette question a tout de même été analysée, en apportant cependant les corrections suivantes : lorsque la durée d'embauche des salariés et la durée d'ouverture du centre étaient incompatibles, nous avons considéré que les salariés étaient arrivés sur le site à son ouverture.

Après analyse des questionnaires, les résultats obtenus semblent être conforme aux données fournies par l'ADEME et le MEDD (partie 1, § 1.3). Par exemple, l'estimation sur la France entière de la quantité de déchets compostés est de 9 Mt environ contre 7,5 Mt selon les estimation du MEDD, la quantité de déchets compostés est quant à elle estimée à 3Mt environ contre 3,5 Mt selon les données du MEDD. Les données obtenues par l'analyse des questionnaires sont donc du même ordre de grandeur que celles fournies par le MEDD.

Il faut noter que 62% des réponses proviennent d'unités de compostage de DV seuls alors que ce type d'unités ne représentait à priori que 46% des centres sollicités pour ce travail. Deux hypothèses peuvent alors être émises :

- Les unités compostant des déchets verts seuls ont plus fréquemment répondu comparativement aux autres unités.
- Certaines unités tirées au sort parmi les strates «OM/bio-déchets/déchets IAA seuls ou en mélange avec des DV», «boues de STEP/déjections animales seules ou en mélange avec des DV» ou «autres types de déchets ou autres mélanges» ont bien retourné le questionnaire, mais ont abandonné certaines de leurs activités pour se restreindre au compostage des DV depuis le recensement effectué par l'ADEME (recensement qui a permis l'élaboration de la liste des centres de compostage utilisé pour le tirage au sort des entreprises sollicitées pour répondre au questionnaire).

■ Partie 2 : Le classement des agents et des effets par ordre de priorité

Afin de proposer un classement des agents non biologiques et des effets sur la santé à étudier de façon prioritaire, nous avons proposé dans un premier temps une confrontation exposition/VTR inhalation. Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser des VTR « population générale » (exposition sur une vie entière) et non des VTR « professionnelles » (exposition sur 40 ans, 5jours/semaines, 8h/jours), de façon à avoir un regard protecteur vis à vis des agents dangereux. En effet, les VTR «population générale» sont toujours plus faible que les VTR «professionnelles». Voici quelques exemples (VTR « population générale » données pour des effets avec seuil ici) :

Pour le 2-butanone : VTR « population générale » = 5 mg/m³

VTR « professionnelle » = 600 mg/m³

Pour le chloroforme : VTR « population générale » = 0,1 mg/m³

VTR « professionnelle » = 25 mg/m³

Pour le tétrachlorure de carbone : VTR « population générale » = 0,06 → 0,19 mg/m³

VTR « professionnelle » = 12 mg/m³

Pour les mêmes raisons, nous avons choisi de confronter les concentrations maximales obtenues dans la bibliographie. Cependant, il faut noter une grande variabilité des mesures de concentration (que ce soit pour les agents biologiques ou non) au sein d'une même publication ou d'une publication à une autre. Ceci est dû au fait qu'il existe une grande variabilité des méthodes et des lieux de prélèvement, ainsi que des milieux de culture (pour la recherche de micro-organismes) ou des méthodes d'extraction (pour les micropolluants organiques). Ainsi, l'étude menée par Eitzer (in *ENSP*, 2002) fournit des concentrations en micropolluants systématiquement plus élevées que celles fournies dans les autres documents disponibles, les différences pouvant être très élevées (exemple : Eitzer retrouve le benzène dans des concentrations pouvant aller jusqu'à 130 µg/m³ (dans le digesteur), alors que Heida (*Heida*, 1995) retrouve ce même élément dans des concentrations inférieures à 5 µg/m³ ; le type de déchets (OM vs DV) ne suffit pas à expliquer cette différence importante). Il aurait été intéressant de refaire un classement des agents à retenir en priorité en éliminant les données issues de l'étude de Eitzer et de comparer ce nouveau classement à celui présenté dans ce travail. Cependant, le temps imparti à la réalisation de ce travail ne nous l'a pas permis. Nous recommandons donc d'utiliser le classement proposé avec prudence.

Lorsqu'aucune concentration n'était disponible dans l'air ambiant des usines de compostage, nous avons estimé ces concentrations dans l'air ambiant à partir des concentrations mesurées dans les déchets ou le compost. Ces estimations semblent convenir pour les composés élémentaires (dont ETMs) et les composés non volatiles. En revanche, il s'agit d'une sous estimation importante pour les composés volatiles (d'un facteur 100 à 1000). En conséquence, l'arbre de décision proposé dans la partie 2 (§ 2.2.1) tient compte de cette sous estimation en proposant une approche métrologique pour les composés dont les concentrations estimées seraient inférieures aux VTR.

Enfin, tel qu'est fait cet arbre de décision, une approche toxicologique est proposée pour tous les composés chimiques pour lesquels il existe un manque de connaissance au niveau de leur toxicité (absence de VTR). Ces substances sont nombreuses. Nous aurions pu proposer aussi une approche épidémiologique : une telle étude pourrait alors être jugée pertinente du fait de l'absence d'étude identique et de l'enrichissement des connaissances qu'elle pourrait apporter. Cependant, il nous a semblé plus judicieux de rechercher dans un premier temps des données chez l'animal (organes cibles, type d'effets), afin de mieux cadrer ensuite une éventuelle étude épidémiologique.

- La faisabilité d'une étude épidémiologique

La mise en place d'une étude épidémiologique transversale auprès des travailleurs du compostage semble envisageable (d'un point de vu nombre de sujets nécessaires) pour les symptômes ou maladies dont la prévalence dans la population témoin est supérieure à 1% ou bien dont la différence attendue de prévalence entre les différents groupes est au moins supérieure à 5%. Les symptômes traduisant une irritation respiratoire, ORL ou oculaire, de signes d'atteintes digestives ou cutanées répondent parfois à ces conditions comme le montrent les résultats des études épidémiologiques consacrées au compostage. Parmi les autres symptômes et maladies observés pour les expositions chroniques aux composés du tableau 6, seuls les symptômes suivants pourraient répondre aussi à ces conditions : fatigue, troubles du sommeil et céphalées. Ceci serait cependant à vérifier par le calcul : pour chacun des effets de ces composés, il faudrait alors rechercher dans la bibliographie la prévalence dans la population de référence et définir la différence attendue entre la prévalence dans la population de référence et celle dans la population de travailleurs du compostage.

Les seules études transversales réalisables avec une puissance statistique suffisante concerneraient donc des effets non spécifiques des produits. De plus d'un point de vue organisationnel, ce type d'étude serait difficile à gérer. Ainsi, la mise en place d'une étude épidémiologique transversale auprès des travailleurs du compostage est réalisable mais n'est pas à privilégier.

En revanche, la mise en place d'une étude épidémiologique longitudinale auprès des travailleurs des centres de compostage semble plus adaptée. En effet, pour un nombre de sujets nécessaires moindre voir équivalent, il pourrait être envisagé d'étudier des symptômes plus spécifiques des agents dangereux. Cependant, les activités de compostage présentent une certaine instabilité du fait d'une évolution des technologies employées mais aussi du type de déchets traités, et ce afin de répondre aux exigences de quantité et de qualité des utilisateurs. Ainsi, le compostage d'OM brutes ou grises semble être en déclin au profit du compostage des DV et des bio-déchets (ADEME). Ce phénomène pourrait progresser avec la mise en application du projet de directive européenne en cours d'élaboration, relative au traitement biologique des bio-déchets. Cette évolution actuelle et future dans la filière compostage (qui induit des variations dans le temps des expositions des travailleurs aux agents dangereux) pourrait alors nuire au bon déroulement d'une étude épidémiologique longitudinale.

La mise en place d'une étude de mortalité par cancer dans la population des travailleurs du compostage ne semble pas réalisable. En effet, une première limite à la faisabilité d'une telle étude est la constitution et le suivi de la cohorte de tous les travailleurs du compostage masculins depuis 1985 (le nombre de travailleurs du compostage féminins est trop faible pour constituer une cohorte de taille suffisante pour une étude épidémiologique par mortalité). De plus, le nombre de décès par cancer attendu, bien que surestimé dans nos calculs, est faible (36). Il permettrait éventuellement de comparer la mortalité globale par cancer dans cette population à celle d'une population de référence. Cependant, il laisse peu de place à des analyses par type de cancer, ce qui serait pourtant souhaitable pour permettre la recherche de liens avec les expositions aux différents produits cancérigènes (en supposant que l'on réussisse à quantifier l'exposition à ces produits).

De même, la mise en place d'une étude cas-témoins pour la recherche d'un excès de cancer parmi les travailleurs du compostage ne semble pas abordable. Outre le problème de puissance statistique (pour la première approche) et les problèmes liés à la constitution de la cohorte de travailleurs et à la faible latence depuis l'apparition des centres de compostage (pour la seconde approche), étudier les expositions des travailleurs du compostage de manière rétrospective semble très difficile, du fait de l'évolution de ces centres (citée précédemment).

En revanche, il ne semble pas inutile de réfléchir sur une éventuelle étude épidémiologique faisant appel à la recherche de biomarqueurs précurseurs de l'apparition de cancers chez les travailleurs du compostage (tel que des marqueurs de lésions de l'ADN). Ceci pourrait supprimer le problème de la forte latence nécessaire entre l'exposition à un agent cancérigène et l'apparition de cancers.

CONCLUSION

Le compostage est une activité en plein développement en France, du fait qu'il constitue une alternative intéressante à la mise en décharge et à l'incinération des déchets. Cependant, de nombreux agents dangereux, d'origine biologique ou non, sont présents dans les déchets, le compost et l'air ambiant des usines de compostage. Ainsi, la question de l'influence de ce type d'activité sur la santé des travailleurs est posée depuis plusieurs années.

Ce document est un outil d'aide à la décision sur la pertinence et la faisabilité d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage. Ses conclusions reposent sur une analyse des données bibliographiques disponibles relatives aux activités de compostage, à la toxicité des produits émis par ces activités, aux études épidémiologiques relatives à ces activités. Nous avons complété ces données par l'interrogation des professionnels du compostage afin de préciser les caractéristiques des travailleurs exerçant cette activité. Les principales conclusions obtenues sont les suivantes :

La mise en place d'une étude épidémiologique est pertinente car :

- Les travailleurs du compostage sont exposés à différents agents dangereux, d'origines biologique ou non. Les effets de ces agents sont divers : ils peuvent être toxiques, allergisant, mutagènes, infectieux (micro-organismes uniquement), ... Les organes cibles sont très variés suivant les agents considérés : appareil respiratoire, système nerveux, organes hématopoïétiques, foie, reins, ...
- Certains de ces agents sont présents dans des concentrations supérieures aux VTR « population générale » (VTR « effets sans seuil » ou VTR « effets avec seuil » suivant les substances). Les effets de ces composés peuvent être graves : cancer, effets irréversibles, séquelles, ...
- Les risques sanitaires pour les travailleurs du compostage sont peu connus, surtout pour ce qui concerne les risques sanitaires liés aux composés chimiques.

La mise en place d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs du compostage est réalisable sous certaines conditions, mais dans tous les cas, des difficultés organisationnelles. S'il est décidé de mettre en place une étude, il faudra favoriser une étude longitudinale à une étude transversale car celle-ci manquerait de puissance statistique pour l'étude d'effets spécifiques. Par ailleurs, étudier la survenue de cancers parmi la population des travailleurs du compostage ne peut être envisagé de façon traditionnelle (étude de mortalité par cancer ou étude cas-témoins). Cependant, une réflexion sur la faisabilité d'une éventuelle étude épidémiologique mettant en jeu des biomarqueurs précurseurs de l'apparition des cancers peut être menée.

Afin d'améliorer la puissance statistique de notre population d'étude (principale limite pour l'étude d'effets spécifiques), il pourrait être envisagé de mener une étude épidémiologique auprès des travailleurs du compostage à l'échelle internationale. Cependant, une telle étude se heurterait à de nombreux problèmes d'ordre organisationnel mais aussi éthique et légaux (traitement des données, autorisations pour la mise en place de l'étude, ...).

De plus, une étude épidémiologique apporte habituellement plus d'information lorsqu'elle est menée auprès de population dont les expositions sont contrastées quantitativement et qualitativement, comparée à une simple confrontation exposés/non exposés. Or, les différents types de déchets intrants laisse supposer des différences d'exposition entre les sites et donc la possibilité d'identifier des populations de travailleurs du compostage soumises à des niveaux d'expositions différents. Il pourrait donc être intéressant de vérifier cette hypothèse afin de déterminer si une telle étude pourrait être envisagée.

Bibliographie

ADEME. 2002. Enquête sur les installations de traitement des déchets ménagers et assimilés en 2002 - Le traitement biologique (résultats de l'inventaire ITOM 2002).

CAREPS. Février 2002. Etude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bio-aérosols générés par le compostage des déchets.

Comité de santé environnementale des DSC du Québec. Des déchets verts domestiques et des boues de stations d'épuration : synthèse des connaissances concernant les risques pour la santé. Octobre 1992.

Cré (Composting Association of Ireland Teo). Bioaerosol and composting – A literature evaluation. Août 2004.

J Bünger, M Antlauf-Lammers, TG Schulz, GA Westphal, MM Müller, P Ruhnau, E Hallier. Health complaints and immunological markers of exposure to bioaerosols among biowaste collectors and compost workers. *Occup. Environ. Med.* 2000 ; 57 : 458-464.

J Bünger, B Schappler-Scheele, Th Missel, R Hilgers, S Kämpfer, Ch Felten, I Leifert, P Hase. Gesundheitsrisiken in Kompostierungsanlagen durch biologische Arbeitsstoffe : ein 5-Jahres-Follow-up. Research Report Fb 993. BAuA. 2003.

SC Clark, US Bjoranson, J Schwartz-Fulton, JW Holland, PS Gartside. Biological health risks associated with the composting of waste water treatment plant sludge. *J. water Poll. Cont. Fed.* 1984 ; 56 : 1269-1276.

I Déportes, J-L Benoit-Guyod, D Zmirou. Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost : a review. *The science of the total environment*, 1995; 172 : 197-222.

N Delaunay. Une approche du risqué microbiologique aéroporté dans une usine de compostage industriel d'ordures ménagères. Thèse de doctorat en médecine, 1997. Grenoble.

J Douwes, I Wouters, H Dubbeld, L van Zwieten, P Steerenberg, G Doekes, D Heederik. Upper airway inflammation assessed by nasal lavage in compost workers : a relation with bio-aerosol exposure. *Am. J. of Ind. Med* 2000 ; 37 : 459-468.

ENSP. Avril 2002. Rapport d'étude : éléments pour la prise en compte des effets des unités de compostage de déchets sur la santé des populations riveraines.

KK Heldal, AS Halstensen, J Thorn, P Djupesland, I Wouters, W Eduard, TS Halstensen. Upper airway inflammation in waste handlers exposed to bioaerosols. *Occup. Environ. Med.* 2003 ; 60 : 444-450.

H Heida, F Bartman, SC van der Zee. Occupational exposure and indoor air quality monitoring in a composting facility. *Am. Ind. Hyg. Assoc.* 1995 ; J. 56 (1) : 39-43.

C EW Herr, A zur Nieden, M Jankofsky, NI Stilianakis, RH Boedeker, TF Eikmann. Effects of bioaerosol polluted outdoor air on airways of residents : a cross sectional study. *Occup. Environ. Med.* 2003 ; 60 : 336-342.

C EW Herr, A zur Nieden, NI Stilianakis, TF Eikmann. Health effects associated with exposure to residential organic dust. Am. J. of Ind. Med. 2004 ; 46 : 381-385.

HSE. Occupational and environmental exposure to bioaerosols from composts and potential health effects – A critical review of published data. Research report 130. 2003.

International meeting on waste collection and recycling. Bioaerosols exposure and health problems. Abstract collection 1996, 13-14 september, Koge, Denmark.

E Joahning. An overview of waste management in the US and recent research activities about composting related occupational health risk. Schriftenr Ver Wasser Boden Lufthyg 1999 ; 104 : 127-140.

Jacques Lavoie, Geneviève Marchand. Détermination des caractéristiques à considérer d'un point de vue de santé et sécurité des travailleurs dans les centres de compostage des déchets domestiques. Rapport IRSST. Juin 1997.

L Lazzari, L Sperti, P Bertin, B Pavoni. Correlation between inorganic (heavy metals) and organic (PCBs and PAHs) micropollutant concentrations during sewage sludge composting processes. Chemosphere 2000 ; 41 : 427-435.

M Lundholm, R Rylander. Occupational symptoms among compost workers. J. Occup. Med 1980 ; 22 (4) : 256-57.

J Martens. Indicator methods to evaluate the hygienic performance of industrial scale operating biowaste composting plants. Waste management 2005 ; 25 : 435-444.

MEDD. Guide pour l'évaluation du risque sanitaire de l'étude d'impact des installation de compostage (en cours d'élaboration).

MEDD, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques. Enquête sur le parc des installation de compostage en France. 26/07/2005.

E. Marth, F. F. Reinthaler, D. Haas, U. Eibel, G Feierl, I. Wendelin, S. Jelovcan, S. Barth. Waste management - Health : a longitudinal study.

PD Millner, SA Olenchok, E Epstein. Bioaerosols associated with composting facilities. Compost Sci. and Utilisation 1994 ; 2 (4) : 4-57.

OM Poulsen et al. Collection of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. The Science of the Total Environ. 1995a ; 170 : 1-19.

OM. Poulsen et al. Sorting and recycling of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. The Science of the Total Environ. 1995b ; 168 : 33-56.

T Sigsgaard, A Abel, L Donbaek, P Malmros. Lung function changes among recycling workers exposed to organic dust. Am. J. of Ind. Med. 1994a ; 25 : 69-72.

T Sigsgaard, P Malmros, L Nersting, C Petersen. Respiratory disorders and atopy in Danish refuse workers. Am. J. Crit. Care Med. 1994b ; 149 : 1407-1412.

O Tolvanen, J Nykänen, U Nivukoski, M Himanen, A Veijanen, K Hänninen. Occupational hygiene in a Finnish drum composting plant. Waste management 2005 ; 25 : 427-433.

Sites Internet :

<http://www.acgih.org/home.htm> → site de ACGIH, exposition professionnelle (US)

<http://www.ademe.fr> → site de l'ADEME

<https://www.atsdr.cdc.gov> → base de données toxicologiques de l'ATSDR

<http://www.chu-rouen.fr> → base de données bibliographiques Medline

<http://www.ensp.fr> → base de données bibliographiques BDSP

<http://www.epa.gov/iris/> → base de données toxicologiques IRIS

<http://www.iarc.fr> → site de l'IARC

<http://www.ineris.fr/> → site de l'INERIS, « portail des substances chimiques »

<http://www.inra.fr/dpenv> → « pages spéciales, le compost », par J. Lopez (INRA-ME&S)

<http://www.inrs.fr> → site de l'INRS, base de données toxicologiques

<http://www.irsst.qc.ca> → site de l'IRSST (recherche en santé au travail, site Canadien)

<http://www.sede.fr> → « tout sur la réglementation » → « logique produit »

<http://www.techniques-ingenieur.fr> → rubriques « traitement biologique des déchets », « déchets et risques pour la santé » et « hygiène industrielle »

<http://www.toxnet.nlm.nih.gov> → base de données toxicologiques Toxnet

<http://www.tera.org/iter> → base de données toxicologiques ITER

<http://www.who.dk> → site de l'OMS

<http://perso.wanadoo.fr/atout.boues/> → « tout savoir sur l'étude de marché gestion biologique des déchets - avril 2005 »

Glossaire

Pathologies / effets sur la santé

Allergie : Une allergie est une modification de la sensibilité de l'organisme à l'égard d'une substance capable de se comporter comme un antigène. L'organisme peut soit devenir plus sensible à une deuxième inoculation de cet antigène (anaphylaxie), soit au contraire réagir d'une manière atténuée (immunité).

Aspergillome : Cette maladie infectieuse survient lorsque *Aspergillus sp.* (moisissure) colonise des cavités broncho-pulmonaires préexistantes (dilatations des bronches, cavités séquellaires de tuberculose, ...), sans envahissement. Fièvre et toux (productive et/ou hémorragique) peuvent être des symptômes à associer.

Aspergillose broncho-pulmonaire allergique : Cette maladie, non infectieuse, survient à la suite d'une exposition à *Aspergillus sp.* Elle est caractérisée par des crises de dyspnée asthmatiforme au cours d'épisodes d'allure infectieuse, avec fièvre et expectoration abondante, voire hémorragique.

Aspergillose invasive : Il s'agit d'une pneumopathie opportuniste particulièrement redoutable et difficile à diagnostiquer de façon précoce. Les symptômes à associer sont essentiellement fièvre, toux, dyspnée et douleur thoracique. Elle touche essentiellement les personnes immunodéprimées.

Broncho-alvéolite allergique extrinsèque : Cette maladie, aussi appelée pneumopathie d'hypersensibilité, est une maladie inflammatoire pulmonaire diffuse liée à l'inhalation répétée d'agents biologiques ou non. Les symptômes à associer sont fièvre, toux et crépitants diffus.

Infection : L'infection est liée à la pénétration et à la prolifération dans l'organisme d'agents biologiques étrangers. Elle peut être due à des pathogènes ou bien à des opportunistes.

Inflammation : L'inflammation est une réaction de défense très générale de l'organisme face à un agresseur qui peut être biologique, chimique ou mécanique. La réaction inflammatoire comporte une suite complexe d'événements, avec apparition de quatre signes : chaleur, douleur, rougeur et gonflement tissulaire.

Pneumoconiose : Ensemble des désordres broncho-pulmonaires liés à l'accumulation de particules minérales dans les poumons et à la réaction des tissus du fait de la présence de ces particules.

Syndrome toxique de la poussière organique (Organic Dust Toxic Syndrom) : Syndrome pseudo-grippal de durée brève survenant après une exposition massive et inhabituelle à des poussières organiques.

Autres

Aérosol : Le terme aérosol désigne un ensemble de particules, solides ou liquides, en suspension dans un milieu gazeux (vitesse limite de chute inférieure à 0.25 m/s). Le terme bio-aérosol désigne un aérosol composé de particules biologiques.

Andains : Lignes régulières de compost mis en tas.

Compost : Un compost est un produit stable, hygiénisé et riche en humus. Il résulte de la fermentation lente de divers résidus, d'origine animale ou végétale. Il est utilisé comme engrais, amendement organique ou support de culture.

Danger : Le danger induit par un agent chimique ou par un micro-organisme correspond à l'effet sanitaire indésirable qu'il provoque en cas d'exposition. Le danger est directement lié aux propriétés intrinsèques de l'élément considéré.

Exposition aiguë : Ce dit d'une exposition lorsque le temps de contact d'un individu avec un agent dangereux est inférieure à 14 jours.

Exposition chronique : Ce dit d'une exposition lorsque le temps de contact d'un individu avec un agent dangereux est supérieure à 365 jours.

Exposition sub-chronique : Ce dit d'une exposition lorsque le temps de contact d'un individu avec un agent dangereux est compris entre 14 et 365 jours.

Individu immunodéprimé : Individu possédant moins de 500 polynucléaires neutrophiles par millimètre cube de sang.

Mésophile : La température optimale de croissance d'une espèce mésophile est comprise entre 25 et 40°C.

Poussière (INRS, 1999) : « Les poussières sont des dispersions de particules solides qui peuvent être mises en suspension dans l'atmosphère par un procédé mécanique ou par la remise en suspension depuis le lieu de dépôt. Les particules sont conventionnellement considérées comme en suspension si leur vitesse de chute maximale n'excède pas 0.25 m/s. (...) »

Risque : Le risque sanitaire est la probabilité assortie au danger. Pour qu'il y ait risque, il est nécessaire qu'il y ait exposition à un élément dangereux.

Stabilisation : La stabilisation des composts consiste à réduire les concentrations en matière organique et en micro-organismes pathogènes, mais aussi à limiter au maximum les odeurs nauséabondes, en transformant la matière organique en matière minérale ou lentement biodégradable.

Thermophiles : La température optimale de croissance d'une espèce thermophile se situe au delà de 50°C.

Thermotolérant : La température optimale de croissance d'une espèce thermatolérante est comprise entre 40 et 50°C.

Liste des illustrations

Liste des tableaux

Tableau 1 : Estimation de la production des déchets en France	17
Tableau 2 : Le parc du compostage en 2002 (ADEME, 2002)	20
Tableau 3 : Concentrations en agents d'origine biologique dans les usines de compostage	28
Tableau 4 : Répartition des unités de compostage suivant le type d'aération mis en place et suivant l'environnement où se déroulent les activités liées au compostage	31
Tableau 5 : Analyse du questionnaire rempli par les professionnels du compostage : quelques caractéristiques des travailleurs du compostage	31
Tableau 6 : Proposition d'un classement des substances à étudier en priorité, suivant la vraisemblance de survenue des effets et suivant la gravité de ces effets	38
Tableau 7 : Comparaison de deux prévalences (test bilatéral) : nombre de sujets nécessaires par groupe (puissance = 80 % ; alpha = 5 %)	39
Tableau 8 : Estimation du nombre de décès par cancer dans la population masculine des travailleurs du compostage	41

Liste des figures

Figure 1 : Les étapes du procédé de compostage (aperçu général)	18
Figure 2 : Schéma des conditions nécessaires à un bon processus de compostage	19
Figure 3 : Photographies de retourneurs enjambeurs	20
Figure 4 : Répartition des centres de compostage suivant le type exploitants	21
Figure 5 : Nature des micro-organismes en fonction de la température dans le compost	28
Figure 6 : Dates d'ouverture des unités de compostage	30
Figure 7 : Répartition de la quantité de déchets compostés suivant leur origine	30
Figure 8 : répartition des unités de compostage par nombre de salariés	32

Liste des annexes

Annexe 1 : Questionnaire destiné aux professionnels du compostage des déchets

Annexe 2 : Etudes épidémiologiques disponibles

Annexe 3 : Classement des substances chimiques suivants l'existence de mesures de concentrations dans les déchets compostés et le compost ou l'air ambiant et suivant la confrontation concentration dans l'air (extrapolée ou non) et VTR

Annexe 4 : Gravité des effets induits par les substances non biologiques pour lesquelles la mise en place d'une étude épidémiologique est pertinente (qu'elle soit prioritaire ou non)

Annexe 5 : Explications sur l'obtention des concentrations dans l'air estimées à partir des concentrations disponibles dans les déchets ou le compost

Annexe 1 : Questionnaire destiné aux professionnels du compostage des déchets



Faisabilité d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage des déchets Questionnaire destiné aux professionnels

Pages 1 / 3

Pour répondre, indiquer d'une croix votre choix ou remplir les case ou lignes prévues à cet effet.

PLUSIEURS REPONSES sont possibles.

Si vous le souhaitez, vous pouvez insérer des commentaires au dos de la dernière feuille.

L'UNITE DE COMPOSTAGE

1. Indiquer :

Nom et adresse de l'unité de compostage	Nom et adresse de l'exploitant

Année d'ouverture de l'unité de compostage /

2. L'unité de compostage est-elle gérée par : ☐ une entreprise privée ? ☐ une collectivité ?

LES DECHETS ET LE COMPOST

3. Types de déchets traités par l'unité de compostage

4. Quantité annuelle de déchets intrants, en tonnes/an

☐ Déchets verts (tonte de gazon, taille de haies, branches d'élagage, feuilles mortes)	
☐ Déchets de bois (sciures, écorces, souches, troncs, morceaux de bois ...)	
☐ Paille	
☐ Retraits et / ou déchets de fruits et / ou de légumes	
☐ Algues	
☐ Ordures ménagères brutes ou grises	
☐ Déchets de cuisines (coquilles d'oeufs, épluchures, restes de repas, marcs de café ...)	
☐ Déchets des Industries AgroAlimentaires (coquilles d'oeufs, marcs de raisin, pulpes ...)	
☐ Déchets de l'assainissement (boues de stations d'épuration, boues de curage, boues IAA ...)	
☐ Déjections animales (fumier, lisier, fientes ...)	
Autres : préciser	

5. Quantité annuelle de compost produit, en tonnes/an

L'INSTALLATION ET L'EQUIPEMENT

6. L'aération des déchets et du compost s'effectue en :

- ☐ Aération naturelle sans retournement des andains
☐ Aération naturelle avec retournement des andains
☐ Aération forcée sans retournement des andains
☐ Aération forcée avec retournement des andains

Autres : préciser

Tournez la page SVP

7. L'unité de compostage est implantée :

- ☐ A l'air libre
- ☐ Sous hall non clos
- ☐ Sous bâtiment clos
- ☐ Dans un environnement mixte :
- si une partie du procédé s'effectue à l'air libre : préciser
 - si une partie du procédé s'effectue sous hall non clos : préciser
 - si une partie du procédé s'effectue sous bâtiment clos : préciser

8. L'équipement de l'unité de compostage est composé de :

En pré-traitement	En post-traitement
-------------------	--------------------

- ☐ Chargeur(s)
- ☐ Broyeur(s)
- ☐ Crible(s)
- ☐ Tamis
- ☐ Retourneur(s) d'andains

☐	☐
☐	☐
☐	☐

Autres : préciser

LES POSTES DE TRAVAIL

9. Quel est le nombre total de salariés dans votre centre? _____

10. Quel est selon vous le nombre de salariés exposés aux déchets ou au compost ? _____

	11. Indiquer les différents postes de travail de l'unité de compostage	12. Niveau d'exposition *	13. Type d'équipement de protection habituellement porté				14. Fiches de risque associées ?	
			gants	masque	lunettes	autres	oui	non
Poste 1	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 2	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 3	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 4	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 5	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 6	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 7	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 8	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 9	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐
Poste 10	_____		☐	☐	☐	_____	☐	☐

* niveau d'exposition : indiquer un chiffre allant de 1 à 5, "1" correspondant à un poste pas ou peu exposé (exemple : poste de secrétaire, dans un bureau) et "5" correspondant à un poste très exposé (exemple : poste de retournement des andains)

LA TYPOLOGIE DES SALARIES

15. Age des salariés :

Nombre de salariés âgés de moins de 30 ans		Nombre de salariés âgés de plus de 50 ans	
Nombre de salariés âgés de 30 à 50 ans			

16. Répartition par sexe :

Nombre de femmes		Nombre d'hommes	
------------------	----------------------	-----------------	----------------------

17. Nature des contrats de travail :

Nombre d'intérimaires		Nombre de CDI	
Nombre de CDD		Si autres types de contrats, nombre	
		préciser	
Nombre de temps plein		Nombre de temps partiel	

18. Nombre de salariés embauchés depuis l'ouverture du site et encore présents

19. Durée d'embauche :

Nombre de salariés embauchés depuis moins de 2 ans		Nombre de salariés embauchés depuis plus de 2 ans mais moins de 10 ans	
Nombre de salariés embauchés depuis plus de 10 ans			

20. Catégories professionnelles des salariés :

Nombre d'ouvriers		Nombre de techniciens supérieurs	
Nombre d'ouvriers spécialisés		Nombre de cadres	
Nombre de techniciens		Si autres catégories professionnelles, nombre	
		préciser	

21. Dans le cas où l'unité de compostage est gérée par une collectivité, les salariés sont-ils :

☐ statutaires ? ☐ non statutaires ?

MESURES D'EXPOSITION

22. Votre unité de compostage a-t-elle déjà fait l'objet de mesures d'éléments microbiologiques ou chimiques dans :

		dans quel cadre ?	pour quel(s) paramètre(s) ?
les déchets	☐ Oui ☐ Non		
le compost	☐ Oui ☐ Non		
l'air ambiant	☐ Oui ☐ Non		

MERCI D'AVANCE POUR VOTRE COLLABORATION

Annexe 2 : Les études épidémiologiques disponibles

Etude de cas

Quelques publications portent sur les risques sanitaires pour les travailleurs des centres de compostage. Notamment, **Heida** (Heida, 1995) rapporte des plaintes de travailleurs concernant des troubles des voies respiratoires, avec irritations et infections des voies aériennes supérieures. Il s'agissait de travailleurs d'une usine de compostage de déchets organiques, située à Medemblik (province côtière du nord de l'Hollande). Le compostage était réalisé en système clos, avec retournement automatisé et ventilation forcée. A la suite de ces plaintes, un programme simple de mesures d'agents microbiologiques et chimiques (COVs) fut mis en place. Les résultats montraient une population en micro-organismes importante. La concentration en bactéries totales dans l'air ambiant de l'usine était supérieure à 23.10^3 cfu/m³, dont 9.10^3 cfu/m³ de bactéries Gram négatives. La population fongique était quant à elle présente à des concentrations pouvant aller jusqu'à 9.10^3 cfu/m³, dont $\pm 60\%$ d'*Aspergillus*, $\pm 20\%$ de *Penicillium* et 10% de *Mucor* et *Rhizopus*. Les résultats des analyses chimiques montraient des concentrations maximales en alkylbenzènes de 13.10^3 µg/m³, en hydrocarbures aliphatiques de 57.10^3 µg/m³ et en sulfure d'hydrogène de 0.5 ppm. Etant donnés ces résultats, les plaintes ont été attribuées aux fortes concentrations en microorganismes dans l'air ambiant de l'usine (guidelines (Hollande, 1995) : 10.10^3 cfu/m³ pour la population totale fongique ou en bactéries, 500 cfu/m³ pour chacune des espèces fongiques ou bactériennes), plutôt qu'aux concentrations en COVs, élevées mais toujours inférieures aux guidelines (Hollande, 1995)).

Delaunay (Delaunay, 1997) rapporte quant à lui des plaintes d'agents d'exploitation d'un centre de compostage d'ordures ménagères (bâtiment clos en dépression), situé à Murianette (Isère, France). Ces plaintes concernaient principalement des irritations ORL (gorge sèche), oculaire et respiratoire (toux sèche) (4 à 12 heures après la prise de poste), mais aussi des troubles digestifs (diarrhée, nausée, douleurs abdominales) et des céphalées de façon récurrente. Les mesures microbiologiques d'ambiance montraient des concentrations importantes en micro-organismes, pouvant aller jusqu'à 95.10^3 cfu/m³. Le genre fongique prédominant était *Aspergillus*, présents dans des concentrations pouvant aller jusqu'à 22.10^3 cfu/m³.

D'autres études ont été menées sur une population plus importante. Nous ferons référence ici à douze études épidémiologiques : cinq études longitudinales et six études transversales menées auprès des travailleurs des centres de compostage et une étude transversale menée auprès d'une population riveraine d'une unité de compostage. Pour deux de ces travaux, nous n'avons pu accéder dans le délai imparti à ce travail aux publications originales, ce qui nous a obligé à reprendre les informations proposées dans le rapport du CAREPS (CAREPS, 2002) et dans les publications de Epstein et Millner (Epstein, 1996 ; Millner, 1994).

Les études épidémiologiques longitudinales

Epstein (Epstein, 1996) et **Millner** (Millner, 1994) font référence à une étude épidémiologique longitudinale (Chesapeake Occupational Health Service, 1991), réalisée sur cinq ans et conduite auprès de 242 travailleurs du compostage (USA). Les données montraient une stabilité voire une diminution des symptômes respiratoires au cours des cinq années d'étude. Les épisodes rapportés d'asthme, de bronchite et de difficulté respiratoire étaient peu nombreux. Les examens sérologiques n'ont pas mis en évidence d'anticorps contre *Aspergillus fumigatus* et les radiographies des poumons n'ont rien montré de spécifique. Les modifications spirométriques (faibles) pouvaient quant à elles être attribuées au tabagisme. Cette étude concluait donc en l'absence de preuve d'effet délétère lié à *Aspergillus fumigatus*.

Marth (Marth, 1999) a menée une étude sur trois ans, afin d'étudier la fonction respiratoire et les réponses immunitaires chez les travailleurs des déchets. La population d'étude était composée de 256 employés de centres de tri des déchets (dont 87 suivis trois années consécutives) et de 120 employés du compostage (dont 34 suivis sur trois années consécutives). L'ancienneté de cette population était de quelques mois à 33 ans, avec une médiane de 37,8 mois.

La fonction respiratoire des sujets participants a été mesurée par EFR et impédancemétrie respiratoire. Un examen sérologique a été pratiqué afin de déterminer les concentrations en anticorps IgE totales et en anticorps spécifiques IgG dirigés contre *Aspergillus fumigatus*, *Penicillium notatum*, *Mucor*, *Cladosporium* et *Alternaria*. Enfin, des prélèvements ont été effectués dans l'air ambiant afin de dénombrer les bactéries et les moisissures cultivables.

Les résultats ne montrent aucune différence significative entre les salariés des centres de tri et ceux des centres de compostage pour ce qui est des EFR. En revanche, les travailleurs du tri des déchets présentent une augmentation significative des résistances périphériques comparativement aux travailleurs du compostage, ce qui pourrait indiquer une inflammation de la muqueuse respiratoire selon les auteurs de cette étude. Enfin, sur les trois années d'étude, les concentrations en IgE varient de façon plus importante chez les travailleurs du tri des déchets (de -100% à +200%) par rapport aux travailleurs du compostage (autour de 0%).

Il est à noter qu'aucun ajustement sur le tabac n'a été fait. De plus, tous les résultats ne sont pas rapportés : les données météorologiques sont manquantes, ainsi que la description de la population d'étude pour les différents paramètres mesurés. Enfin, aucune distinction n'est faite quand aux résultats transversaux (données issus des 256 employés du tri des déchets et des 120 employés du compostage) et longitudinaux (issus de la population suivis sur les trois années d'étude). En conclusion, les résultats apparaissent peu convaincants.

Le travail de **Douwes** (Douwes, 2000) avait pour objet d'apprécier l'inflammation des voies respiratoires des travailleurs des centres de compostage, par la méthode du lavage nasal, et de rechercher une éventuelle corrélation entre l'exposition aux endotoxines, aux (1-3)- β -glucanes ou aux poussières et l'apparition de marqueurs de l'inflammation. Pour ce faire, deux campagnes de mesures ont été réalisées (1995-1996) auprès des travailleurs d'un centre de compostage de déchets organiques couvert (14 sujets participants en 1995 et 15 en 1996 ; seulement 4 sujets communs aux deux campagnes). Une population témoins a également été sélectionnée parmi les membres d'une université (10 témoins en 1995 et 9 en 1996). Il faut noter que les travailleurs du centre de compostage et les témoins diffèrent de manière significative en ce qui concerne la consommation de tabac, les premiers étant plus fréquemment fumeurs.

Pour l'ensemble des sujets participants (exposés et non exposés), un lavage nasal était effectué avant et après la journée de travail, une à deux fois par semaine, sur deux à quatre semaines consécutives. Des marqueurs de l'inflammation étaient ensuite recherchés dans le liquide obtenu. Pour les travailleurs du centre de compostage uniquement, la fraction inhalable des poussières de l'ambiance de travail a également été collectée sur la durée des postes à l'aide d'échantillonneurs individuels et de prélèvements statiques dans les locaux. Ces prélèvements ont ensuite donné lieu à une analyse gravimétrique des poussières et à une dosage des endotoxines bactériennes et des (1-3)- β -glucanes de la paroi des moisissures. Enfin, un questionnaire sur les symptômes respiratoires a été complété par la plupart des travailleurs (14 en 1995 et 12 en 1996).

Les moyennes géométriques des concentrations observées après échantillonnage individuel variaient selon les postes de travail : de 0 à 1,8 mg/m³ pour les poussières (maximum : 22,8 mg/m³), de 27 à 527 EU/m³ pour les endotoxines (maximum : 5965 EU/m³) et de 0,36 à 4,85 µg/m³ pour les (1-3)-β-glucanes (maximum : 53,23 ng/m³). Les mesures statiques effectuées dans les locaux de travail donnaient des résultats inférieurs aux mesures individuelles ou de même ordre de grandeur. Les concentrations relevées pour les poussières, les endotoxines et les (1-3)-β-glucanes étaient corrélées (r=0,6-0,7 ; p<0.01).

Suivant les réponses aux questionnaires, la fréquence des symptômes liés aux voies respiratoires hautes était élevée (25 à 79%), contrairement à ceux liés aux voies respiratoires basses (0 à 8%).

Les résultats des analyses biologiques montrent que les concentrations en marqueurs de l'inflammation sont plus élevées chez les salariés du centre de compostage comparativement à la population témoin, et ceci de manière significative lors de la première campagne de mesure et pour les prélèvements effectués avant la prise de poste. Elles sont également plus élevées en fin de poste qu'en début de poste.

De plus, avant la prise de poste, les concentrations en marqueurs de l'inflammation sont plus élevées pour les travailleurs les plus exposés aux endotoxines (exposition supérieure à la moyenne des expositions de l'ensemble des travailleurs), mais de façon pas ou peu significative. Les résultats sont similaires pour les travailleurs les plus exposés aux poussières et aux (1-3)-β-glucanes. En revanche, aucune relation n'est observée entre les paramètres d'exposition et les marqueurs de l'inflammation en fin de poste.

Ainsi, les auteurs concluent à une augmentation de l'inflammation des voies respiratoires supérieures au cours de la journée de travail. Ils suggèrent que les traces d'inflammation observées avant la prise de poste pourraient traduire le caractère chronique ou sub-chronique de cet état ou bien un effet différé de l'exposition de la veille. Cependant, il faut noter un éventuel biais lié au tabac.

Heldal (Heldal, 2003) a estimé l'inflammation des voies aériennes supérieures chez les travailleurs du secteur des déchets : 25 salariés chargés de la collecte des déchets et 6 salariés du compostage ont participé à cette étude. Des prélèvements individuels ont été réalisés sur la durée du poste de travail durant trois jours consécutifs, afin d'estimer l'exposition des travailleurs aux bactéries et moisissures viables, aux endotoxines et (1-3)-β-glucanes et aux poussières. L'état d'inflammation des voies respiratoires était apprécié par rhinométrie acoustique (appréciation de la dimension des cavités nasales) et par lavage nasal avant la prise de poste. Ces tests étaient réalisés le premier jour avant la prise de poste et à l'issue des trois jours de travail. Un questionnaire de symptômes rempli par les salariés complétait ce recueil. Les résultats des prélèvements individuels sont présentés dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 4).

Résultats des mesures microbiologiques individuelles (Heldal, 2003)

Agents étudiés	Concentrations maximales mesurées
Bactéries totales	3,8.10 ⁵ cfu/m ³
Actinomycètes	2,2.10 ⁶ cfu/m ³
Flore fongique	2.10 ⁶ cfu/m ³
endotoxines	180 EU/m ³
(1-3)-β-glucanes	220 ng/m ³
Poussières	6,6 mg/m ³

Les résultats de cette étude montrent une augmentation significative de certains marqueurs d'inflammation mesurés dans le lavage nasal (polynucléaires neutrophiles, ECP). Un des indicateurs de volume des cavités nasales mesurés diminue toujours au cours des trois jours de travail, de manière significative.

Aucune association entre les symptômes rapportés et les paramètres sanitaires mesurés n'a été notée. En revanche, des corrélations sont observées entre les teneurs en endotoxines, en spores fongiques le jour précédent et certains marqueurs d'inflammation (polynucléaires neutrophiles, Myéloperoxydase), ainsi qu'entre les spores fongiques, les (1-3)- β -glucanes et l'existence d'une congestion nasale.

Les résultats présentés dans cette étude, menée sur un nombre limité d'individus, sont en faveur d'un effet inflammatoire à court terme chez les sujets exposés aux déchets. Cependant, il faut noter que 27 des 31 sujets participants à cette étude étaient des fumeurs.

Le travail de **Bünger** (Bünger, 2003) porte sur les risques sanitaires pour les travailleurs des centres de compostage liés à une exposition aux bioaérosols. L'étude, de type exposés (salariés de 41 centres de compostages) / non exposés (individus de l'administration et de laboratoires), a été menée auprès de 284 sujets (218 employés du compostage et 66 témoins) en 1996/1997 et auprès de 171 sujets (123 employés du compostage et 48 témoins) en 2001. Les 113 individus « perdus de vue » entre 1996/1997 et 2001 ont été recherchés (95 employés du compostage et 18 témoins).

L'état de santé des sujets participants à l'étude a été évalué à l'aide d'un questionnaire de symptômes. Des mesures d'impédance des voies aériennes et des EFR ont également été réalisées afin d'évaluer la fonction respiratoire. Enfin, un examen sérologique a été effectué afin de déterminer les concentrations en anticorps spécifiques IgG dirigés contre 7 champignons (*Aspergillus fumigatus*, *A. nidulans*, *A. niger*, *A. sydowii*, *A. versicolor*, *Penicillium aurantiogriseum*, *P. crustosum*) et 4 actinomycètes (*Saccharopolyspora rectivirgula*, *S. hirsuta*, *S. viridis* et *Streptomyces thermovulgaris*). Les sujets « perdus de vue » ont été invités à remplir un questionnaire de symptômes et à préciser la raison de leur départ.

Les travailleurs du compostage sont en moyenne plus jeunes de six ans par rapport à la population témoin et sont plus souvent fumeurs (36% vs 21%).

L'exposition des travailleurs du compostage a été évaluée par questionnaire. Une matrice emploi-exposition a ainsi été réalisée en tenant compte des procédés employés et des précautions adoptées : des scores de risques de 1 à 12 sont attribués aux travailleurs selon la durée de travail et le port de protection individuelle (0 → pas d'exposition, 1-4 → exposition limitée, 5-8 → exposition moyenne, 9-12 → exposition importante).

Les résultats longitudinaux (données issues des 123 travailleurs du compostage et des 48 témoins suivis entre 1997 et 2001) montrent une augmentation des irritations oculaires et des voies respiratoires supérieures, ainsi qu'une augmentation des maladies cutanées chez les employés du compostage, comparativement à la population témoin. Une augmentation de la concentration en IgG est également notée chez les travailleurs du compostage par rapport à la population témoin, mais aucune association n'est faite entre les concentrations en IgG et les symptômes. En revanche, entre 1997/1998 et 2001, les examens sérologiques des travailleurs du compostage présentent des baisses de taux d'IgG plus importantes comparativement aux sujets de référence.

Ces résultats sont issus de tests statistiques sans ajustement sur le facteur « tabac » (test de Mann Whitney). Cependant, après ajustement sur ce facteur, il existe toujours un effet « compost », mais uniquement chez les non fumeurs.

La proportion de « perdus de vue » est plus importante chez les travailleurs du compostage par rapport aux témoins (44% vs 57%). Des raisons médicales de sortie du suivi étaient citées pour 1/3 dans les deux groupes (30% vs 31%).

Les études épidémiologiques transversales

Lundholm (Lundholm, 1980) rapporte les résultats d'une étude menée dans une usine expérimentale de compostage de déchets ménagers et de boues de station d'épuration et dans une usine de production d'eau potable. Sur les onze salariés de l'unité de compostage interrogés, deux avaient des nausées, quatre des diarrhées, cinq des maux de tête et un de la fièvre. La fréquence de ces symptômes était variable suivant les individus. Alors que sur les 41 salariés de l'usine d'eau potable, seuls deux se plaignaient de diarrhées. Les mesures effectuées dans l'ambiance du site de compostage (compostage sur une période de six mois, sur site ouvert) révélaient des concentrations en bactéries Gram négatives pouvant atteindre 500.10^3 cfu/m³.

Clark (Clark, 1984) a mené une étude sur deux ans (1979 à 1981) auprès d'une population de 388 individus, aux caractéristiques socio-économiques similaires et réparties dans quatre villes : Beltsville, Camben, Philadelphie et Washington (US). Ces individus étaient répartis en trois catégories.

- I : individus directement impliqués dans les activités de compostage (98).
- II : individus occasionnellement impliqués dans les activités de compostage ou travaillant à moins de 100 m d'un site de compostage (157).
- III : individus non impliqués dans les activités de compostage et travaillant à plus de 100 m d'un site de compostage (133).

Remarque : il s'agissait ici de centres de compostage de boues de stations d'épuration, seules ou en mélange avec des déchets verts.

Ces individus ont participé à un ou plusieurs aspects de l'étude : visite médicale et questionnaire, examen clinique, tests de la fonction pulmonaire, tests sérologiques (examen sanguin de routine, recherche d'anticorps contre *Aspergillus fumigatus*, *A. flavus*, *A. carneus* et *A. niger*, contre *Legionella pneumophila* et *Histoplasma capsulatum*, contre des endotoxines), examen clinique et radiographie de la cage thoracique. Des prélèvements au niveau de la gorge et du nez ont également été réalisés, afin de détecter la présence d'*Aspergillus fumigatus* par culture.

Les résultats des examens cliniques montrent une fréquence plus élevée d'atteintes nasales, auriculaires et cutanées chez les individus des catégories I et II.

Les examens sérologiques montrent quant à eux des concentrations en anticorps dirigés contre les endotoxines généralement plus grandes chez les travailleurs des centres de compostage. En revanche, aucune association entre les infections à *Legionella* et les expositions liées au compostage n'a été montrée. De plus, il n'a pas été trouvé d'augmentation significative des anticorps contre *Aspergillus spp*, ni contre *Histoplasma capsulatum*.

Les prélèvements au niveau du nez et de la gorge étaient fréquemment positifs à *Aspergillus fumigatus* pour les travailleurs des centres de compostage (I), alors qu'ils étaient généralement négatifs pour les individus non exposés (III) (70% vs 5%, $p < 0,01$).

Sigsgaard (Sigsgaard, 1994) a évalué les symptômes respiratoires et d'irritation des muqueuses dans différentes populations de travailleurs du tri et recyclage des déchets au Danemark. L'étude, de type exposés/non exposés, incluait 44 travailleurs du tri des déchets, 8 travailleurs du compostage des déchets et 20 travailleurs du tri des papiers. La population témoin était composée de 119 salariés d'usines de potabilisation de l'eau.

La population étudiée était en moyenne plus jeune que la population témoin et avait une durée d'emploi plus courte. Aucune différence significative dans la consommation de tabac n'a été observée entre les différents groupes.

L'état de santé des travailleurs était évalué au cours d'une entrevue avec un médecin (utilisation d'un questionnaire de symptômes). La fonction pulmonaire était testée pour chaque travailleur avant et après la prise de poste (une période de 48h minimum sans travail était exigée), ainsi que leur réactivité bronchique. Enfin, des tests sérologiques et cutanés ont été effectués afin de tester les réactions allergiques des sujets. Parallèlement à la mesure des paramètres de santé des travailleurs, des mesures d'exposition ont été réalisées (poussières, micro-organismes, endotoxines).

Il a été observé une plus forte concentration moyenne en poussière dans l'ambiance des usines de tri des déchets ($0,74 \text{ mg/m}^3$) que dans celle des usines de traitement de l'eau potable ($0,42 \text{ mg/m}^3$) ($p < 0,05$). Les concentrations en micro-organismes dans l'ambiance des usines de tri des déchets ($4,6 \cdot 10^4 \text{ cfu/m}^3$) et de compostage des déchets ($5,4 \cdot 10^4 \text{ cfu/m}^3$) étaient également significativement plus élevées que dans celle des usines de tri des papier ($4,7 \cdot 10^3 \text{ cfu/m}^3$) et de potabilisation de l'eau ($8 \cdot 10^1 \text{ cfu/m}^3$) ($p < 0,05$). Notamment, les concentrations en bactéries Gram négatives étaient significativement plus élevées dans l'ambiance des usines de tri des déchets ($4,8 \cdot 10^4 \text{ cfu/m}^3$) et de compostage ($4,5 \cdot 10^4 \text{ cfu/m}^3$) que dans les usines témoins ($1 \cdot 10^1 \text{ cfu/m}^3$). En revanche, les concentrations en endotoxines étaient faibles et ne différaient pas significativement.

Les résultats concernant l'état de santé des travailleurs indiquent une prévalence significativement augmentée de certains symptômes, chez les travailleurs du tri des déchets comparativement à la population témoin : oppression thoracique (14% vs 1%, $p < 0,05$), syndrome pseudo-grippal (14% vs 1%, $p < 0,05$), irritations oculaires et nasales (27% et 14% vs 11% et 0%, $p < 0,05\%$), toux sèche ou d'irritation (21% vs 2%, $p < 0,05\%$), nausée (19% vs 2%, $p < 0,05$) et diarrhée ou vomissement (27% vs 7%, $p < 0,05$). La fréquence des symptômes gastro-intestinaux était également plus importante (mais pas de façon significative) chez les travailleurs du compostage (13% de nausée, 25% de vomissement ou diarrhée) comparativement à la population de référence.

Aucune différence n'a été observée entre les différents groupes de travailleurs quant aux paramètres de base de la fonction respiratoire et de la réactivité bronchique. En revanche, la proportion d'individus ayant des variations de débit de pointe supérieures à 20% au cours d'une période de 24 heures ($\text{PFR} > 20\%$ en 24h, paramètre témoin d'un syndrome obstructif) était plus grande chez les travailleurs du tri des déchets et chez les travailleurs du compostage. Ceci est en faveur d'un effet aigu de l'environnement de travail sur les poumons.

Enfin, en ce qui concerne les symptômes cutanés (irritation cutanée au moins une fois par mois), ils étaient significativement plus fréquents chez les travailleurs du tri des déchets comparativement à la population de référence (14% vs 10%, $p < 0,05$). En revanche, aucun des travailleurs du tri des déchets n'avait un test fortement positif à un ou plusieurs allergènes, contrairement à la population témoin (8%).

En conclusion, cette étude ne met pas en évidence d'augmentation significative des symptômes chez les travailleurs des centres de compostage comparativement à la population témoin. L'absence de résultat significatif peut s'expliquer par le nombre réduit de travailleurs du compostage inclus dans cette étude (8).

Le travail de **Marth** (Marth, 1996 in CAREPS, 2002) porte sur trois usines de compostage et deux centres de tri des ordures ménagères (137 individus au total). Les plaintes principales rapportées par cette étude concernaient essentiellement les symptômes de gorge sèche (38% des travailleurs), toux sèche (35%), infection pulmonaire (23%), diarrhée (18%), douleur articulaire (13%) et conjonctivite (12%). Des EFR ont été effectuées en début et fin de poste : elles étaient normales et aucune différence entre les différents groupes n'a été montrée. De même, aucune différence significative concernant les maladies infectieuses n'a été mise en évidence entre les groupes. De plus, aucune association n'a été établie entre les concentrations en IgE et la durée d'emploi des travailleurs. Cependant, l'incidence des IgE contre les antigènes de champignons était significativement supérieure parmi les employés de ces centres de traitement comparativement à un groupe de référence qui n'a pas été précisé.

L'étude de type exposés/ non exposés menée par **Büniger** (Büniger, 2000) entre 1996 et 1998 est probablement un sous ensemble de l'étude déjà évoquée du même auteur. Elle avait pour objet d'évaluer l'état de santé de 58 travailleurs de centres de compostage, 53 collecteurs de biodéchets et 40 sujets témoins, et de rechercher une éventuelle association entre l'état de santé des travailleurs et leur exposition aux bioaérosols.

Les sujets participants ont été interrogés, à l'aide d'un protocole standardisé, sur leur état de santé (symptômes), leurs éventuelles maladies atopiques, les conditions d'exposition aux bioaérosols sur leur lieu de travail, les autres sources éventuelles d'exposition aux bioaérosols et leur habitude tabagique. Ils ont également été examinés par des médecins spécialisés dans les maladies professionnelles.

Enfin, un examen sérologique a été pratiqué afin de déterminer les concentrations en anticorps spécifiques IgG (en tant que biomarqueurs d'exposition aux bioaérosols), dirigés contre sept champignons et quatre actinomycètes rencontrés régulièrement sur leur lieu de travail. Aucune mesure de concentration en micro-organismes n'a été réalisée sur les lieux de travail : seul un ordre de grandeur a été fourni (estimation à partir de plusieurs études multicentriques allemandes).

Il faut noter que les collecteurs de biodéchets étaient significativement plus jeune que les travailleurs du compost (33 ans en moyenne vs 40 ans) et que leur durée d'emploi était significativement plus courte (1,5 ans vs 3 ans).

Les résultats des examens cliniques montrent une augmentation significatives des symptômes et maladies des voies aériennes (atteintes respiratoires combinées : 14/58 vs 2/40 ; $p=0,003$) et de la peau (maladies de la peau combinées : 8/58 vs 0/40 ; $p=0,02$), comparativement à la population de référence. En revanche, aucune différence significative n'a été notée entre les collecteurs des déchets et les sujets témoins, concernant les manifestations de symptômes.

Les résultats du questionnaire standardisé montrent que les sujets porteurs d'une maladie atopique étaient sous représentés de façon significative chez les travailleurs du compostage (rhinite allergique : 2/58 vs 10/40 ; $p=0,003$) comparativement à la population de référence, ce qui pourrait être considéré comme un effet du travailleur sain (biais de sélection).

Enfin, les examens sérologiques montrent des concentrations significativement plus élevées d'anticorps IgG contre la flore fongique (*Aspergillus fumigatus*) et les actinomycètes (*Saccharopolyspora rectivergula*, *Streptomyces thermovulgaris*) chez les travailleurs des centres de compostage par rapport aux sujets témoins, alors qu'aucune différence significative n'a été notée entre les collecteurs des déchets et la population de référence. Les travailleurs du compostage avaient également des titres d'anticorps IgG élevés, dirigés contre d'autres champignons (*A. nidulans*, *A. niger*, *A. versicolor*, *A. sydowii*, *Penicillium brevicompactum* et *P. crustosum*) et actinomycètes (*Saccharopolyspora hirsuta*), comparés aux collecteurs des déchets et aux sujets témoins.

Une association significative a été montrée entre la fréquence élevée de symptômes et de maladies et les concentrations élevées en anticorps spécifiques dirigés contre la flore fongique et les actinomycètes généralement retrouvés sur leur lieu de travail, chez les travailleurs du compostage. Cette association restait significative, même après exclusion des individus exposés à d'autres sources de bioaérosols (3) (facteur de confusion).

Une étude épidémiologique transversale auprès de la population riveraine d'un centre de compostage

Herr (Herr, 2003) a étudié la relation entre des indicateurs de morbidité ressentie et la concentration en bioaérosols à proximité d'un centre de compostage (déchets verts et organiques, Allemagne).

Cette étude transversale, de type exposés/non exposés, a fait appel à une population composée d'habitants d'une zone résidentielle situé à une distance de 150 à 500 m sous le vent d'une installation de compostage (310 habitants au total, 214 participants). Cette population est divisée en sous-groupe suivant la distance domicile - centre de compostage. La population témoin est quant à elle composée de résidents d'une zone d'habitation ayant des caractéristiques similaires à la précédente (taille des maisons, trafics automobiles, présence de stations services, de zones industrielles), mais étant située à distance de toutes sources anthropiques de bioaérosols (411 habitants sollicités, 142 participants).

Au total, ce sont 721 individus qui ont été invités à répondre à un questionnaire concernant leur état de santé et les nuisances olfactives liées à l'unité de compostage et à rencontrer un médecin pour une entrevue à domicile (seuls 356 individus ont accepté de participer à l'étude). Les concentrations en bactéries et moisissures cultivables ont été mesurées dans l'air ambiant de la zone d'habitation exposée, à trois reprises et à différentes distances (à 500 m du site, au vent ; à 200, 250, 300, 320 et 550 m du site, sous le vent).

Les concentrations en agents biologiques sont plus élevées sous le vent (jusqu'à 5.10^5 cfu/m³ dans l'ambiance des zones d'habitation les plus proches du centre de compostage, situées à moins de 250 m), que au vent ($\sim 10^3$ cfu/m³). Les actinomycètes, non détectés en amont de l'unité de compostage, sont retrouvés à des concentrations pouvant aller jusqu'à 10^3 cfu/m³, à 550 m du site et sous le vent.

Les résultats montrent une prévalence des symptômes respiratoires, oculaires et généraux plus importante dans la population exposée comparativement à la population témoin. Elle est également plus élevée pour les individus dont les domiciles sont proches du site de compostage comparativement aux individus dont les domiciles sont plus éloignés de ce même site.

De plus, après ajustement sur l'âge, le sexe, l'expression d'une gêne liée aux odeurs, l'ancienneté de résidence, l'existence d'une source de bioaérosols domestique et la proximité d'un axe routier, la probabilité de déclarer certains symptômes reste significativement liée à une exposition plus importante (concentration totale en micro-organismes dans l'air $> 10^5$ cfu/m³) (cf. tableau 5).

Symptômes liés à une exposition aux bioaérosols produits par un centre de compostage et OR (Herr, 2003)

Symptômes	OR [IC]
Bronchite	3,02 [1,35-7,06]
Réveil du à la toux	2,70 [1,23-6,10]
Dyspnée de repos	3,99 [1,31-15,19]
Dyspnée d'effort	4,23 [1,74-11,34]
Toux au réveil ou durant la journée	2,67 [1,17-6,10]
Irritation des yeux plus de 10 x par an	2,44 [1,02-6,72]
Fatigues excessive plus de 5 x par an	2,80 [1,22-6,72]
Tremblements	4,63 [1,44-20,85]

Enfin, l'étude montre un lien statistiquement significatif entre la durée de résidence dans la zone d'exposition la plus proche du site (< 200 m) et l'existence d'épisodes de bronchite au cours des 12 mois précédents ou de réveils nocturne dus à une toux.

Les résultats de cette étude épidémiologique, menée sur un nombre assez limité d'individus (quelques dizaines de personnes par sous-groupe), évoquent donc l'existence de symptômes respiratoires, oculaires et généraux dans la population riveraine des centres de compostage. La prévalence de ces symptômes semble liée à la concentration en bioaérosols et à la durée de résidence à proximité du site. Cependant, les différences de niveau d'exposition observées sont à prendre avec prudence car les mesures de bioaérosols sont assez peu nombreuses et ne permettent donc pas d'appréhender correctement la variabilité des concentrations. Par ailleurs, le taux de non-réponses dans la population témoin est important, ce qui laisse penser à un éventuel biais de sélection.

Annexe 3 : Classement des substances chimiques suivants l'existence de mesures de concentrations dans les déchets compostés et le compost ou l'air ambiant et suivant la confrontation concentration dans l'air (extrapolée ou non) et VTR

Aucune mesure dans les déchets, le compost ou l'air	Mesures dans les déchets ou le compost mais ND	Mesures dans les déchets ou le compost ? ND			Mesures dans l'air mais ND	Mesures dans l'air ? ND				
		[] extrapolées dans l'air < aux VTR	[] extrapolées dans l'air > aux VTR	Pas de VTR		[] dans l'air < aux VTR (A)	[] dans l'air < aux VTR (H)	[] dans l'air > aux VTR (A)	[] dans l'air > aux VTR (H)	Pas de VTR
Acétaldéhyde	Dibutylaphtalène	Barium	Arsenic (ss)	Argent	1,2-dichlorobenzène	Cuivre	Mercure	2-butanone (as)	Cadmium (ss, as)	2,3-butanédione
Acétone	Méthoxy phénanthrène	Cobalt	Manganèse (as)	Aluminium	1,3-dichlorobenzène	Nickel	Disulfure de carbone	Camphene (ss)	Chrome (ss)	2-butanone
Ac. Acétique	(2)	Molybdène	PCBs (ss, as)	Bore	1,2-dichloroéthane	Carbaryl	Styrène (~ VTR)	Chloroforme (ss)	Plomb (as)	3-carène
Ac. acétique méthyl propyl ester		Aldrine	(3)	Fer	Hexachloro butadiène	Chlorobenzène	(3)	Naphtalène (as)	Benzène (ss, as)	4-chlorotoluène
Ac. acétique propyl ester		Benzo(a)pyrène		Magnésium	1,2,3-trichloro benzène	Chlorure de méthylène		Tétrachlorure de carbone (ss, as)	Hexane (as)	Dichlorobenzène
Ac. butanoïque		Chlordane		Sélénium	1,2,4-trichloro benzène	1,4-dichlorobenzène		(5)	Pyrène (as)	1,1-dichloroéthane
Ac. butanoïque éthyl ester		Chlorodifluoro méthane		Sodium	1,1,2,2-tétrachloro éthane (< lim dét.)	1,1-dichloroéthène			Tétrachloroéthène (as)	Ethyl acétate
Ac. butanoïque propyl ester		Chlorure de vinyle		Titane	1,1,2-trichloro éthane (< lim dét.)	1,2-dichloropropane			Toluène (as)	Ethyl hexanate
Ac. hexanoïque		Cis-1,2-dichloroéthène		Vanadium	(8)	Éthyl benzène			Xylène (m,p,o) (as)	Hexanone
Ac. Hexanoïque éthyl ester		Dieldrine		Zinc		Isopropyl benzène			(9)	3-hydroxy-2-butanone
Ac. méthyl 2 butanoïque		Endrine		Acénaphène		4-méthyl-2-pentanone				Limonène
Ac. méthyl 2 propanoïque		Heptachlore		Acénaphtylène		Sulfure d'hydrogène				d-limonène
Ac. octanoïque éthyl ester		Hexachloro benzène		Anthracène		Trichloroéthène				Méthyl acétate
Ac. pentanoïque		(13)		Benzaldéhyde		(13)				3-méthyl butanal
Ac. propanoïque				Benzo(a) anthracène						3-méthyl-1-butanol
Acroléine				Benzo(b) fluoranthène						?-myrcène
Ammoniac				Benzo(g,h,i) pérylène						n-butyl benzène
DDD				Benzo(e)pyrène						Décane
Aucune mesure	Mesures dans les	Mesures dans les déchets ou le compost ? ND			Mesures dans l'air	Mesures dans l'air ? ND				

dans les déchets, le compost ou l'air	déchets ou le compost mais ND	[] extrapolées dans l'air < aux VTR	[] extrapolées dans l'air > aux VTR	Pas de VTR	mais ND	[] dans l'air < aux VTR (A)	[] dans l'air < aux VTR (H)	[] dans l'air > aux VTR (A)	[] dans l'air > aux VTR (H)	Pas de VTR
DDT				Benzo fluoranthène						Dodécane
Dioxines				Benzo(k) fluoranthène						Heptane
Dioxyde de soufre				Chrysène						Nonane
Dioxyde d'azote				DDE						Octane
Ethyl mercaptan				Diazinon						Undécane
Formaldéhyde				Dibenzo(a,h) anthacène						n-propyl benzène
Indole				Dibenzothiophène						a-pinène
Isopropyl alcool				Dichlorodifluoro méthane						β-pinène
l-limonène				Dichlorofluoro méthane						p-isopropyl toluène
Méthane				Fluoranthène						Sec-butylbenzène
Méthyl amine				Fluorène						1,1,1- trichloroéthane
Méthyl mercaptan				Heptachloro cyclohexane						Trichlorofluoro méthane
2-méthyl propanal				Indéno(1,2,3,cd) pyrène						(30)
2-méthyl-2- propanol				Indéno(1,2,3,ed) pyrène						
2-pentanone				Lindane						
Pyridine				Naphtothiophène						
?-terpinène				Pentachlorphénol						
(36)				Phénanthrène						
				Pérylène						
				trichlorobiphényles						
				1,1,2- trichlorotrifluoro méthane						
				1,2,4-triméthyl benzène						
			(42)	1,3,5- triméthylbenzène						

Annexe 4 : Gravité des effets induits par les substances non biologiques pour lesquelles la mise en place d'une étude épidémiologique est pertinente (qu'elle soit prioritaire ou non)

Classification		Agents	VTR prof 8h (mg.m-3)	Cancérogenèse	Effets aigus chez l'homme	Effets chroniques chez l'homme	Effets chroniques chez l'animal	Remarques
[] dans l'air > aux VTR (A) (étude épidémiologique prioritaire)	5	2-butanone	600		I de la gorge, du nez, des yeux	-	T non spécifiques (foie, rein, SNC, SNP)	Nuisance olfactive Pas d'étude CV, GI, MS, R, H, Im, DR chez l'homme
	1	Camphène	-	Foie	I VAS, T SNC (céphalées, vertiges), T hépatiques et rénaux	-	-	Pas d'étude sur la toxicité chronique par inhalation
	1	Chloroforme	25	Foie	T SNC (narcose), A du foie (hépatite toxique), T digestifs (nausées, vomissements), T cardiaques (arythmie)	T foie (hépatomégalie, T biologiques), T SNC (fatigue, irritabilité, dépression, manque de concentration, troubles du sommeil, de la mémoire), T rein (excrétion de β2 microglobulines), Splénomégalie, T digestifs (nausées, vomissements)	Foie (hépatite toxique) Rein (atteintes tubulaires) Poumon (pneumopathie) Troubles reproduction T non spécifiques (poids corporel)	Pas d'étude DR chez l'homme
	2	Naphtalène	50		T digestifs (nausées, vomissements)	Anémie hémolytique, T cristallin (opacités non symptomatiques), T SNC (malaise, céphalées, confusion), T digestifs (nausées)	T VAS (inflammation, métaplasies) T Poumon (inflammation, tumeurs bénignes)	Nuisance olfactive Pas d'étude respi, CV, MS, Im, DR chez l'homme
	1	Tétrachlorure de carbone	12	Foie	T poumon (oedème), T foie (hépatite toxique), T rein (néphrite toxique), T digestifs (nausées, vomissements), T SNC (narcose, vertiges)	T SNC (Somnolence, dépression), T digestifs (dyspepsie, nausées), Anémie, T foie (perturbations biologiques)	T foie (cirrhose) T rein (dégénérescence glomérulaire) Sang (Hémolyse, perturbation des lignées sanguines) T SNP (lésions nerveuses) T reproduction T non spécifiques (rate, poids corporel)	Pas d'étude MS, Im, DR chez l'homme
	1	Arsenic	0,15	Poumons	I des VR (toux et dyspnée, rhinite, laryngite, pharyngite, bronchite), T digestif (nausées, vomissements, diarrhées), T SNC (encéphalopathie), T SNP (neuropathie périphérique)	T vasculaires (HTA, vasoconstriction), T cutanés (dermatites, kératoses), T SNP (neuropathie périphérique), T respiratoires (pneumoconiose) ?, Surmortalité ? (T pulmonaires non K, T CV), Avortements ?	Baisse des défenses respiratoires	Pas d'étude DR chez l'homme

[] extrapolées dans l'air > aux VTR (étude épidémio. non prioritaire)	1	Manganèse	1		I des VR (toux, bronchite)	T respiratoires fonctionnels, T SNC (manganisme : baisse des performances neuro-comportementales et cognitives, tremblements, ataxie), T endocriniens (prolactine, cortisol), Baisse de libido, de fertilité ?	I respiratoire T SNC (T comportement)	Pas d'étude MS chez l'homme
	1	PCBs	0,5	Foie	T neurologiques, I cutanée, chloracné, I oculaire, hyperpigmentation conjonctivale, T digestifs (nausées, vomissements, anorexie)	T foie (hépatomégalie, perturbations biologiques), T respiratoire (irritation, EFR ?, bronchites), I oculaire, T digestifs (baisse appétit, dyspepsie), T endocrinologiques (thyroïde), T reproduction ?	T sang (perturbations biologiques) T endocrinologiques (thyroïde, surrénales) T non spécifiques (foie, rein, poids corporel)	Peu volatiles → effets surtout étudiés par voie orale (T immunologique, T neurologique, T reproduction)
[] dans l'air > aux VTR (H) (étude épidémiologique non prioritaire)	1	Cadmium	0,05	Bronche, Poumons	T respiratoires (irritation, syndrome grippal, dyspnée, œdème pulmonaire), T rein (nécrose corticale)	T rein non réversibles (proteinurie, insuffisance rénale, lithiases), T respiratoire (EFR)	T pulmonaire (emphysème, inflammation interstitielle, fibrose) T non spécifiques (foie, cœur, rein, poumon, rate, cerveau, testicule, poids corporel) T reproduction (viabilité fœtale)	
	1	Chrome	0,1	Poumons	T ORL (épistaxis, ulcérations, rhinorrhée), T respiratoires (toux, sifflements, dyspnée, asthme, détresse respiratoire), T digestifs (douleurs abdominales), T allergiques, T neurologiques (céphalées, vertiges)	T ORL (rhinorrhée, épistaxis, pharyngite chronique, atrophie muqueuse, ulcérations nasales, perforation de la cloison nasale), T respiratoire (bronchite, EFR), T rénal (microglobulinurie), T digestifs (gastralgies, ulcères)	T ORL (perforation du septum nasal) T pulmonaire (emphysème, fibrose interstitielle, pneumonies) T non spécifiques (poumon, poids corporel)	T chroniques chez l'homme liés au chrome VI Pas d'étude MS, RD, endocrinologique chez l'homme
	1	Plomb	0,15	?	T digestifs (coliques), T SNC (encéphalopathie), T rein (néphropathie), T reproduction (fausses couches)	T digestifs (saturnisme), T CV (HTA) ?, T SNC, SNP (T neuro-cognitifs et comportementaux, neuropathie sensitivo-motrice), T sang (perturbations biologiques), T rein (néphropathie), Avortements spontanés ?, T développement fœtal (neuropsy)	T rein (néphropathie)	Très nombreuses études chez l'homme, effets chez l'animal non investigués
	1	Benzène	3,25	Tissus hématopoïétiques et tissus lymphopoïétiques (leucémie)	T respiratoire (irritation, dyspnée, dépression respiratoire), T SNC (céphalées, vertige, somnolence), T sang (aplasie), T digestif (épigastralgies), I cutanée	Hémopathies non malignes (pancytopénie), Irritation oculaire T fertilité féminine ?, T SNP (neuropathie périphérique) ?	Hémopathies non malignes (pancytopénie) T non spécifiques (poids corporel)	Nuisance olfactive Pas d'étude CV, GI chez l'homme
	2	Hexane	170		Céphalée, Déficits neurologiques sensitivomoteurs	Neuropathie périphérique	I et métaplasies des VAS T SNC, SNP (narcose, neuropathie périphérique) T non spécifiques (poids corporel, muscles, testicules)	Pas d'étude RD chez l'homme
	4	Pyrène	-		I peau, I oculaire, I respiratoire	T respiratoire (fonctionnels) ?	-	Pas d'étude spécifique chronique par inhalation

	2	Tétrachloroéthène	335	?	I des VAS, I oculaire, T SNC (T neurocognitifs, narcose, ataxie, T comportement), T foie (hépatomégalie)	Fatigue, T SNC (T neurocognitifs), T rein (perturbations biologiques), Avortements spontanés ?	T rein (néphropathie) T foie (hépatite, cirrhose) T digestifs (ulcères estomac) T SNC (T comportement) T non spécifiques (poids corporel)	Pas d'étude GI, MS, Im, D chez l'homme
	2	Toluène	375		I VAS, I oculaire, T SNC (T neurocognitifs, céphalées, vertiges)	T SNC (T neurocognitifs), T hépatiques et rénaux (perturbations biologiques), T endocriniens (perturbations biologiques), T sanguins (perturbations lignées sanguines, Ig) ?, Avortements spontanés ?	I olfactive et respiratoire T SNC (perte auditive, T neurotransmetteurs, T sommeil) T RD (baisse spermatogénèse, anomalies cérébrales fœtales) ? T non spécifiques (poids corporel, foie, rein, cœur, poumon)	Nuisance olfactive Pas d'étude GI chez l'homme
	1	Xylène (m,p,o)	435	Tissus hématopoiétiques ?	I VAS (nez, gorge), I oculaire, T SNC (vertiges, T neurocognitifs), T digestifs (nausées, vomissements, gastralgies)	I VAS (nez, gorge), T respiratoires (EFR) ?, I oculaire, T digestif (nausées, pertes d'appétit), T SNC (baisse concentration, T mémoire, anxiété)	T auditifs T SNC (tremblements, perturbations biologiques) T non spécifiques (poids corporel, foie)	Nuisance olfactive Pas d'étude sur les effets endocriniens
[] dans l'air < aux VTR (A) (étude épidémiologique non prioritaire)	4	Cuivre	-		I des yeux, T digestifs (anorexie, nausées, diarrhées), Fièvre des métaux, T SNC (céphalées, vertiges, somnolence)	I respiratoire, T non spécifiques (foie, sang)	-	Pas d'étude CV, MS, R, Im, RD chez l'homme
	1	Nickel	1	Poumon, nez	T respiratoire (Rhinite, sinusite, asthme, polypose nasal, perforation de la cloison nasale, détresse respiratoire)	T rein (microprotéinurie)	T ORL (atrophie muqueuse) T pulmonaire (bronchite, alvéolites, pneumonie interstitielle, fibrose, emphysème) T Immunologiques (hyperplasie lymphoïde) Phéochromocytome	Pas d'étude GI, S, MS, F, SNC, SNP, effets endocriniens chez l'homme
	3	Carbaryl	-		I oculaire, myosis, Inhibition de cholinestérase (hypersécrétions, crampes, convulsions), T digestifs (nausées, vomissements, diarrhées)	T SNC (inhibition de cholinestérase, céphalées, T mémoire) ?	T SNC (inhibition de cholinestérase) Effets sur la reproduction	Peu volatile Pas d'étude RD chez l'homme
	4	Chlorobenzène	46		T SNC (torpeur, dépression respiratoire)	-	T lignées sanguines ? T non spécifiques (foie et rein)	Pas d'étude CV, GI, S, MS, R, H, Im chez l'homme
	1	Chlorure de méthylène	180	Foie ? poumons ? cerveau ? SNC ?	T respiratoires (toux, dyspnée, dépression respiratoire), T digestifs (nausées, vomissements), T SNC (céphalées, vertiges, T neurocognitifs, T conscience), T sang (carboxyhémoglobine)	T SNC (T neurocognitifs) ?, T fertilité masculins ?, Avortements spontanés ?	T ORL (métaplasie épithéliale) T non spécifiques (poids corporel, foie)	Pas d'étude MS, Im chez l'homme

3	1,4-dichlorobenzène	4,5		I VAS (nez), I oculaire, T digestifs (nausées, vomissements), T SNC (céphalées, torpeur, maladresse)	I nez, T foie (hépatite toxique) ?	I oculaire et nasale T pulmonaire (oedème) T foie (hépatite toxique, cirrhose) T SNC (tremblements, T conscience) T non spécifiques (poids corporel, rein, cœur, poumon)	Pas d'étude CV, MS, R, RD chez l'homme
3	1,1-dichloroéthène	-		T SNC (ébrété)	T foie (perturbations biologiques) ?	I nasale T foie (hépatite toxique) T rein (néphropathie)	Pas d'étude respiratoire CV, GI, Im, MS, R, S, RD chez l'homme
5	1,2-dichloropropane	350		I VAS, I oculaire, T digestifs (nausées, vomissements), T foie (insuffisance hépatique), T rein (néphrite)	-	I respiratoires T non spécifiques (poids corporel) Anémie ?	Pas d'étude CV, MS, Im, DR chez l'homme
5	Éthyl benzène	-		I de la gorge, Oppression thoracique I oculaire, T SNC (vertiges)	-	T pulmonaires (métaplasies) T lignées sanguines ? T non spécifiques (foie, rein, poumon, rate)	Nuisance olfactive Pas d'étude CV, GI, MS, Im, SNC, SNP, DR chez l'homme
5	Isopropyl benzène	-		I oculaire, T SNC (céphalées, vertiges, somnolence, ataxie, T conscience)	-	-	Pas d'étude chronique chez l'homme ou l'animal
5	4-méthyl-2-pentanone	240		I oculaire, I respiratoire, T SNC (T conscience)	-	T développement	-
4	Sulfure d'hydrogène	7		I oculaire, T respiratoires (irritation, œdème détresse respiratoire), T SNC (céphalées, T comportement, T conscience, tremblements, convulsions), T CV (HTA, tachycardie), T digestifs (nausées, vomissements)	T oculaires (conjonctivites, cataractes) ?, T respiratoires (symptômes, T fonctionnels) ?, T CV (incidence pathologies CV) ?, T SNC (fatigue, T mémoire, T neurocognitifs)	T olfactifs (lésions muqueuses et nerveuses) T SNC (perturbations biologiques) T non spécifiques (poids corporel)	Nuisance olfactive Pas d'étude Im, DR chez l'homme
2	Trichloroéthène	405	Foie ? estomac ? tissus lymphopoiétiques ?	I oculaire, T respiratoire (irritation, dépression), T CV (arythmies), T digestifs (nausées, vomissements, anorexie), T SNC, SNP (céphalées, fatigue, perte de connaissance, T neurocognitif, neuropathies), T foie (hépatite toxique)	T SNC SNP (somnolence, vertiges, neuropathies, pertes de mémoire), T rein (perturbations biologiques) ?, T non spécifiques (poids corporel), Avortements spontanés ?	T SNC (T neurotransmetteurs, T neurocognitifs) T non spécifiques (foie, rein, poids corporel)	Pas d'étude MS chez l'homme

Légende :

CV = Cardio-vasculaire

DR = Développement et reproduction

F = Foie

GI = Gastro-intestinal

I = Irritation

Im = Immunologie

MS = Musculo-squelettique

NS = effets non spécifiques (baisse du poids des organes, troubles fonctionnels...)

R = Rein

S = Sang

SNC = Système nerveux central

SNP = Système nerveux périphérique

T = Trouble

VAS = Voies aériennes supérieures

Remarque

Les effets grisés dans le tableau ci-dessus sont les effets pour lesquels l'exposition est inférieure aux VTR :

Si uniquement la VTR « sans seuil » est dépassée, alors les effets aigus et chroniques sont grisés,

Si uniquement la VTR « avec seuil » est dépassée, alors les effets sans seuil (cancers) sont grisés.

Le classement proposé ne tient pas compte de ces effets.

Annexe 5 : Explications sur l'obtention des concentrations dans l'air estimées à partir des concentrations disponibles dans les déchets ou le compost

Les concentrations estimées dans l'air ont été obtenues de la façon suivante :

1. Nous avons considéré que toute la poussière de l'air ambiant était de la matière sèche et que toute la poussière était compost. Ainsi, les concentrations en agents chimiques dans les poussières sont les mêmes que les concentrations dans le compost (ou les déchets compostés le cas échéant).
2. Nous avons également considérées que la concentration en poussière dans l'air ambiant était de 10 mg/m^3 (cf. partie 2, § 3.2).

Ainsi, pour passer de d'une concentration connue dans les déchets ou le compost (mg/kg MS) à une concentration estimée dans l'air ambiant (mg/m^3), il suffit de d'y ajouter un facteur 10^{-5} .

Cette estimation semble convenir pour les composés élémentaire (dont ETM) et les composés non volatiles. En Revanche, il s'agit d'une sous estimation forte pour les composés volatiles (d'un facteur 100 à 1000).