Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion : **2007-2008**

Date du Jury : **25 septembre 2008**

Mémoire confidentiel

Risques sanitaires d'origine biologique encourus pour les travailleurs des plates-formes de compostage de boues de station d'épuration

Mise en œuvre d'un outil d'évaluation des risques

Bérengère LEDUNOIS

Lieu de stage :
SEDE Environnement

Référent professionnel :
M. Gilles Treca

Référent pédagogique :
M. Rémi Demillac

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon référent professionnel, M. Gilles TRECA, Coordinateur Hygiène et Sécurité de SEDE Environnement, pour le temps qu'il a su m'accorder, ses précieux conseils et son enthousiasme pour le sujet.

Je remercie également mon référent pédagogique, M. Rémi DEMILLAC, Enseignant-Chercheur en Santé Publique du Département EGERIES (Evaluation et Gestion des Risques liés à l'Environnement et aux Systèmes de soin) de l'EHESP, pour ses conseils et son implication dans la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des employés SEDE pour leur aide et leur bonne humeur.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont pu participer de près ou de loin au bon déroulement de ce mémoire.

Sommaire

Introduction **1**

1 Généralités relatives au compostage de boues de stations d'épuration **3**

1.1 Le principe du compostage **3**

1.2 Les étapes du compostage **3**

1.3 La configuration des plates-formes et le type de procédé choisis **4**

1.4 Cas particulier du compostage de boues de station d'épuration **5**

1.5 Les chiffres en France **5**

1.6 La réglementation **6**

1.6.1 Réglementation relative aux plates-formes de compostage de boues de STEP ... 6

1.6.2 Réglementation relative à la commercialisation du compost 6

1.6.3 Réglementation relative à l'évaluation des risques sur les plates-formes de compostage 7

2 Objectifs, méthodologie et application aux plates-formes SEDE Environnement **9**

2.1 Objectifs du mémoire **9**

2.2 Matériel et Méthodes pour la réalisation de l'ERS sur les plates-formes SEDE Environnement **9**

2.2.1 Définition du fonctionnement des plates-formes 9

2.2.2 Caractérisation de la population de travailleurs 10

2.2.3 Caractérisation des dangers et choix des valeurs et seuils recommandés 11

2.2.4 Evaluation des expositions 11

2.2.5 Caractérisation du risque et proposition de mesures de gestion 13

2.3 Application au cadre d'étude : le compostage sur les plates-formes SEDE Environnement **13**

2.3.1 Fonctionnement des plates-formes 13

2.3.2 Effectifs 15

2.3.3 Postes de travail 16

3 Outil d'évaluation des risques sanitaires d'origine biologique encourus pour les travailleurs des plates-formes de compostage **19**

3.1 Synthèse bibliographique des agents biologiques d'intérêt sanitaire présents dans le compostage **19**

3.1.1 Les différents agents biologiques 19
3.1.2 Les agents biologiques présents dans les déchets 22
3.1.3 Les agents biologiques présents au cours du compostage 24
3.2 Identification des dangers et agents biologiques retenus 25
3.2.1 Les dangers liés aux agents biologiques 25
3.2.2 Résultat du questionnaire sur les gênes ou désordres enregistrés auprès des chefs d'exploitation 29
3.2.3 Les agents et molécules retenus dans l'évaluation des risques 30
3.3 Les seuils conseillés et valeurs guides retenus pour l'ERS 30
3.4 Evaluation de l'exposition 33
3.4.1 Potentiel d'exposition 33
3.4.2 Scénarios d'exposition 34
3.4.3 Quantification de l'exposition 34
3.5 Caractérisation des risques 37
3.6 Limites de l'évaluation des risques 38

4 Gestion des risques sanitaires d'origine biologique et mesures compensatoires pour limiter l'exposition 41

4.1 Préconisations techniques et organisationnelles pour limiter les expositions et sensibilisation aux règles d'hygiène 41
4.1.1 Evolution des techniques pour limiter l'émission de bio aérosols 41
4.1.2 Uniformisation des moyens de protection 42
4.1.3 Mise en place de procédure 46
4.1.4 Argumentaire destiné aux employés sur le risque biologique 46
4.2 Identification des connaissances scientifiques manquantes et mise en place d'une veille scientifique et juridique 47
4.2.1 Prévalence et concentrations des agents pathogènes 47
4.2.2 Prévalence des pathologies observées chez les travailleurs 48
4.2.3 Consensus scientifique sur les seuils d'acceptabilité 49

Conclusion 51
Bibliographie 53
Glossaire 57
Liste des illustrations 59
Liste des annexes I
Abstract XXXIII

Liste des sigles utilisés

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise des Energies
ADN	Acide Désoxyribonucléique
ARN	Acide Ribonucléique
ASTEE	Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement
BAAE	Bronchioalveolite Allergique Extrinsèque
CAE	Centre d'Analyses Environnementales
CHSCT	Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
DECOS	Dutch Expert Committee on Occupational Standards
DMI	Dose Minimale Infectante
EPI	Equipement de Protection Individuelle
ERS	Evaluation des Risques Sanitaires
FFOM	Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères
FNADE	Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement
GTCF	Germes Témoins de Contamination Fécale
HSE	Health and Safety Executive
IAA	Industrie AgroAlimentaire
ICOH	International Commission on Occupational Health
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
MIATE	Matières d'Intérêt Agronomique issues du Traitement des Eaux
NHC	National Health Council (Pays Bas)
NPP	Nombre le Plus Probable
ODTS	Organic Dust Toxic Syndrom
OM	Ordures Ménagères
ORL	Oto-Rhino-Laryngologie
PFC	Plate-Forme de Compostage
STEP	STation d'EPuration
SYPREA	SYndicat des Professionnels du REcyclage en Agriculture
UE	Unité Endotoxine
UFC	Unité Formant Colonie
VTR	Valeur Toxicologique de Référence

Introduction

La société SEDE Environnement gère en 2008, 17 Plates-Formes de Compostage (PFC) de boues de Station d'Epuration (STEP) sur le territoire français. Son activité, dans l'épandage et le compostage, ne cesse d'augmenter car cette filière de traitement est plébiscitée par l'ADEME et les pouvoirs publics pour pallier la mise en décharge et l'incinération.

En tant que processus biologique, le compostage implique inévitablement la présence de microorganismes dont certains sont pathogènes ou opportunistes pour l'homme. Les premiers exposés à ces agents présents dans les déchets entrants mais également sous forme de bio aérosols[1] sont les travailleurs de ces plates-formes.

Les entreprises de compostage comme SEDE Environnement sont donc soumises à des enjeux dont les principaux sont d'ordre :

- sanitaire : les effets sanitaires (principalement pour les bio aérosols) ont fait l'objet d'un grand nombre de publications scientifiques confirmant l'intérêt croissant des pouvoirs publics sur cette question et sur l'impact en santé publique. Bien que le nombre de cas de pathologies recensées restent très limités (moins d'une dizaine de cas sur l'ensemble des études menées), ceci n'implique pas pour autant l'absence de risque pour les salariés. En effet, les études épidémiologiques réalisées sur les travailleurs des PFC ont mis en évidence l'augmentation de symptômes respiratoires (inflammations des voies aériennes), de manifestations cutanées et de troubles gastriques ;

- réglementaire : le nouveau code du travail exige la réalisation de cette évaluation dans un objectif de protection des salariés ;

- social : la population des travailleurs et leur représentants au Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail (CHSCT) demandent des réponses sur les risques encourus sur les PFC.

L'objectif de ce mémoire est donc d'évaluer les risques d'origine biologique (les microorganismes pathogènes et les composants ou toxines issus de ces agents) auxquels peuvent être exposés ces travailleurs par le biais d'un outil d'évaluation des risques (ERS). Cet outil permet d'estimer, par le calcul, les risques pour la santé auxquels est soumise une population exposée à une pollution particulière. Celle-ci se décompose

[1] Ensemble des micro-organismes et des vecteurs particulaires en suspension dans l'air (Fabriès, 2001)

en 4 étapes qui sont : l'identification des dangers, le choix des valeurs de référence, l'estimation de l'exposition et la caractérisation du risque.

Des limites sont toutefois posées à la réalisation d'une évaluation des risques sanitaires d'origine biologique encourus pour les travailleurs. En effet, comme le notifie « Le guide méthodologique pour l'évaluation du risque sanitaire de l'étude d'impact des installations de compostage soumises à autorisation » (ASTEE, juin 2006), en raison de l'état actuel des connaissances sur les relations doses réponses, il n'est pas recommandé de réaliser une évaluation dite « quantitative » des risques sanitaires d'origine biologique. Toutefois, il s'agit dans le cadre de ce mémoire, d'un outil préliminaire d'ERS qui a pour but de rapporter les connaissances actuelles sur les risques biologiques et d'évaluer les niveaux de concentration en agents présents sur les plates-formes par rapport à des seuils conseillés. La caractérisation du risque sera donc présentée sous la forme d'une expression qualitative. Au regard des résultats obtenus et afin de répondre au principe de précaution, des mesures de gestion du risque seront proposées et cela afin de limiter l'exposition des travailleurs aux agents biologiques.

Ce mémoire s'articulera donc en 4 parties. Après avoir présenté dans une première partie le principe du compostage et la réglementation actuelle, la deuxième partie s'intéressera à la méthode employée pour la réalisation de cette ERS et sa mise en application sur les PFC de SEDE Environnement. Par la suite sera présenté dans une troisième partie cet outil d'ERS d'origine biologique pour les employés. La dernière partie aura pour objectif d'exposer les mesures de gestion du risque en cours et à venir pour limiter l'exposition des salariés aux agents biologiques.

1 Généralités relatives au compostage de boues de stations d'épuration

1.1 Le principe du compostage

Le compostage est un procédé biologique aérobie de conversion de matières organiques fermentescibles en un résidu déshydraté, désodorisé, hygiénisé et stabilisé utilisable comme amendement organique si le procédé est bien mené. Les matières organiques fermentescibles sont très variées et comprennent principalement les déchets verts et de bois, les déchets de l'assainissement (boues de stations d'épuration urbaines et industrielles), les déchets agricoles (fumiers, excréments d'animaux…), les graisses et les sous-produits de l'industrie agroalimentaire et les ordures ménagères (la Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères (FFOM) et les ordures ménagères non triées ou grises).

Afin d'assurer la qualité du processus de compostage, trois paramètres ou conditions environnementales doivent être contrôlés et maîtrisés. Il s'agit de l'humidité (qui varie selon les produits entrants et l'eau appliquée), de l'aération pour faire face au besoin de la microflore, et du rapport carbone/azote qui est également fonction des proportions de déchets entrants. Le compostage s'accompagne d'une élévation de température (plus de 70°C) qui doit également être maîtrisée afin d'éviter la destruction de la microflore et l'apparition de phénomène de combustion.

1.2 Les étapes du compostage

En fonction du type de déchets entrants sur la plate-forme, le procédé de compostage se déroule selon les étapes suivantes :

- la réception et le contrôle des produits entrants ;
- le stockage intermédiaire (le plus court possible) ;
- la préparation des produits ou prétraitements tels que le broyage, le mélange ;
- la fermentation qui constitue la phase active ;
- la maturation ;
- le criblage (réalisé entre la fermentation et la maturation ou après la maturation) ;
- le stockage du produit fini.

Le processus de compostage est donc caractérisé par une évolution de la température et du pH (pendant la fermentation et la maturation) ainsi que par le changement des populations microbiennes présentes. La figure 1 suivante présente ces évolutions.

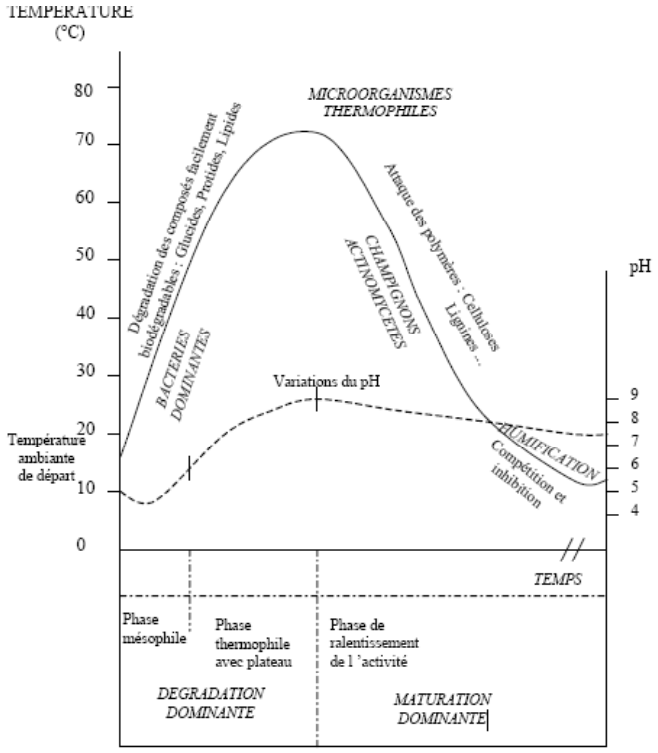


Figure 1 : Evolution de la température, du pH et des populations biologiques au cours du processus de compostage[2]

Ainsi, après une première phase mésophile qui correspond à l'élévation de la température suite à l'activité microbiologique, la microflore initialement présente dans les déchets mélangés laisse place à des microorganismes thermophiles (se développant à plus de 50°C). Cette seconde phase correspond à la phase thermophile. C'est pendant cette étape que les germes pathogènes sont susceptibles d'être neutralisés. Le temps nécessaire à la fermentation est alors variable selon les PFC. Par la suite, la phase de maturation est associée à une baisse de la température et au changement de population. On considère qu'un compost est mature lorsqu'il ne s'échauffe plus, qu'il ne repart pas en anaérobiose au cours du stockage et qu'il n'est pas phytotoxique.

1.3 La configuration des plates-formes et le type de procédé choisis

Le choix de la configuration et du type d'aération d'une PFC est variable et dépend principalement de l'implantation géographique (proximité des habitations et infrastructures), du budget attribué au projet et du type de déchets à traiter.

Ainsi, les PFC peuvent être à l'air libre, en bâtiment clos, en bâtiment ouvert ou avec une configuration mixte (une partie à l'air libre et le reste couvert, partiellement ou

[2] D'après l' étude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bio-aérosols générés par le compostage des déchets, Careps, ADEME, 2002

totalement). Les bâtiments couverts sont majoritairement destinés à la phase de fermentation où les dégagements d'odeurs et de poussières sont les plus importants.

Le type de procédé appliqué pour le compostage est fonction de l'aération choisie au début de la fermentation (naturelle ou forcée) et de la mise en place de retournement ou non des andains (mode statique ou non). Dans le cas de l'aération forcée, l'oxygénation est réalisée soit par insufflation d'air soit par aspiration. Ces deux types d'aération sont assurés par un système de drains présents à la base des andains. Dans le cas de l'insufflation d'air, l'air vicié ne peut être traité que pour une configuration de la fermentation en bâtiment clos, l'air du bâtiment est alors aspiré et traité. Pour l'aspiration d'air, l'air chargé ayant traversé l'andain est récupéré à sa base puis traité par lavage acide dans des colonnes de traitement de l'air et/ou par passage dans un biofiltre. Le temps d'aération est variable selon les usines, il varie de 14 à 45 jours.

1.4 Cas particulier du compostage de boues de station d'épuration

Dans le cas du compostage de boues de stations d'épuration (STEP) qui sont caractérisées par une très faible porosité et une humidité élevée, l'ajout d'un élément structurant est essentiel afin d'assurer la circulation de l'oxygène dans l'andain. Il s'agit la plupart du temps de déchets verts et de déchets de bois. L'humidification des andains est rarement mise en place de par la nature humide du produit entrant.

Selon les plates-formes, les temps destinés au processus de compostage sont de l'ordre de 4 à 6 semaines pour la fermentation et de 8 semaines pour la maturation. Ils peuvent toutefois varier de quelques semaines et ceci afin de s'assurer l'obtention d'un produit fini « hygiénisé » d'un point de vue réglementaire (norme NFU 44-095 présentée dans le paragraphe 1.6.2).

1.5 Les chiffres en France

Il existait en 2007, 741 plates-formes recensées sur le site SINOE[3]. Sur ces 741 PFC, 66 répondent à la demande « traitement des boues de stations d'épuration urbaines ». Il est à noter que ce nombre sous-estime les PFC de boues de STEP existantes en 2007 car le type de déchets traités n'était pas toujours renseigné dans la base de données. Ces plates-formes étaient au nombre de 25[4] en 2001 soit une augmentation de plus de 260% en 6 ans. Cette filière de compostage est en constante évolution afin de répondre à une demande croissante. En effet, la valorisation agricole

[3] SINOE : Base de données sur les déchets en France créée à l'initiative de l'ADEME et de ses partenaires.
[4] Source ADEME.

des boues de STEP est plébiscitée par la politique européenne de gestion des déchets afin de pallier l'incinération.

1.6 La réglementation

1.6.1 Réglementation relative aux plates-formes de compostage de boues de STEP

Au titre de la législation propre aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement[5] (ICPE), les installations de compostage de boues de STEP soumises à autorisation à partir d'un tonnage supérieur à 10 tonnes (rubrique 2170 de l'arrêté du 22 avril 2008 en application du titre Ier du livre V du code de l'environnement) sont tenues de fournir dans le dossier de demande d'exploiter, une étude d'impact du projet. Ceci implique entre autre de faire « *une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents de l'installation sur l'environnement […], sur la commodité du voisinage, l'hygiène, la santé …* ». Cette disposition a été renforcée par l'art. 19 de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie[6] et ses textes d'application qui demandent la réalisation d'études particulières sur la santé dès lors qu'un projet nécessite une autorisation d'exploiter. L'étude d'impact doit inclure également une notice d'hygiène et de sécurité applicable pour les travailleurs afin d'identifier les risques liés aux différents postes de travail. Elle garantit la conformité de l'installation aux prescriptions législatives et réglementaires.

Pour les installations soumises à déclaration, les prescriptions techniques qui peuvent servir de référence sont celles de l'arrêté du 7 janvier 2002 (rubrique 2170) qui prévoit des exigences spécifiques pour limiter l'impact des rejets liquides mais aussi des nuisances relatives aux odeurs et au bruit.

1.6.2 Réglementation relative à la commercialisation du compost

La loi du 13 juillet 1979 sur les matières fertilisantes constitue le texte de base de la réglementation. Elle impose une homologation des produits ou à défaut, le respect de normes d'application obligatoire. Depuis l'arrêté du 18 mars 2004 (JO du 26 mars 2004), les produits à base de boues d'épuration font l'objet de la norme NFU 44-095 « *composts contenant des matières fertilisantes issues du traitement des eaux* ». Ceci implique la réalisation de mesure d'innocuité et d'efficacité du traitement. Les paramètres mesurés sont présentés en Annexe 1. Cette norme permet ainsi à ce type de compost de ne plus

[5] Loi n°76-663 du 19 juillet 1976 codifiée aux article L.511-1 et L.517-2 du code de l'environnement, circulaire DDPR du 19 juin 2000.
[6] Loi n°96-1239 du 30 décembre 1996

être considéré comme un déchet mais comme un produit pouvant être commercialisé dans le cadre de l'épandage agricole.

1.6.3 Réglementation relative à l'évaluation des risques sur les plates-formes de compostage

L'obligation générale de sécurité qui incombe à l'employeur doit le conduire à prendre toutes les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé des travailleurs (article L. 4121-2 du nouveau Code du Travail). Cette disposition générale prévoit la mise en œuvre de mesures de prévention, fondées sur des principes généraux qui doivent aider et guider l'employeur dans sa démarche globale de prévention. Parmi ces principes généraux, l'évaluation des risques constitue un élément clé de cette démarche. Elle en est le point de départ et permet, dans un environnement à évolution rapide, de choisir des actions de prévention appropriées et d'apporter, face à des risques déterminés, des réponses et des solutions complètes qui ne soient pas uniquement "techniques". Le décret n° 2001-1016 du 5 novembre 2001 a introduit dans le Code du travail une disposition réglementaire destinée à "formaliser" cette étape cruciale de la démarche qu'est l'évaluation des risques. Désormais, les résultats de cette évaluation doivent être transcrits dans un "document unique". La circulaire n° 6 de la Direction des relations du travail du 18 avril 2002 est venue apporter quelques précisions utiles. A l'issue de la phase d'évaluation des risques, l'employeur doit mettre en place des mesures correctives destinées à réduire au maximum les risques constatés.

Les risques biologiques en milieu professionnel ont été envisagés dans leur globalité suite à l'élaboration de la directive européenne 90/679/CEE du 26 novembre 1990 et transposée en droit français par le décret n°94-352 du 4 mai 1994. D'après le code du travail complété suite à ce décret, les articles réglementaires R. 4421 à R. 4427 fixent les règles particulières de prévention et de protection contre les risques biologiques. Ceci implique d'après l'art. R 4423-2, la réalisation, par l'employeur, d'une évaluation des risques afin d'identifier les dangers et maladies professionnelles liés à cette activité et de mettre en place les mesures de prévention et de protection qui en résultent pour limiter l'exposition (fourniture de moyens de protection individuelle selon l'article R 4424-5). Une liste européenne des agents pathogènes (devenue française et définie par l'arrêté du 18 juillet 1994 modifié par l'arrêté du 17 avril 1997 et l'arrêté du 30 juin 1998) a été établie suite à cette directive afin de classifier les agents infectieux en 4 groupes (critères de classification présentés en Annexe 2), en fonction de leur pouvoir épidémiogène, la gravité de la maladie, l'existence d'une prophylaxie et/ou d'un traitement efficace. Les pathologies non infectieuses, dont les agents ne sont pas présentés dans cette liste, devront être également prises en compte dans l'évaluation des risques.

2 Objectifs, méthodologie et application aux plates-formes SEDE Environnement

2.1 Objectifs du mémoire

L'objectif principal de cette étude est de fournir un outil fonctionnel d'évaluation des risques d'origine biologique (liés aux agents pathogènes, métabolites, toxines ou fragments de microorganismes) encourus par les travailleurs sur les PFC de boues de STEP de SEDE Environnement. Ce travail doit répondre d'une part à une obligation réglementaire (cf.1.6.3) sur la prévention et l'évaluation des risques biologiques fixées par l'article R. 4423-2 du Code du Travail et, d'autre part, à la demande croissante du Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail (CHSCT) et des travailleurs. En effet, la présence de quelques gènes ou désordres d'ordre médical parmi certains travailleurs a engendré un questionnement accru sur les dangers associés à l'exposition aux agents présents dans l'air issus des boues de STEP et du processus de compostage.

Dans cette optique, ce mémoire cherche à remplir les étapes caractéristiques d'une ERS qui sont : la description du site, l'évaluation des dangers et le choix des valeurs seuils, l'évaluation des expositions et, pour finir, la caractérisation des risques. Il est important de bien différencier le danger qui correspond à l'effet sanitaire indésirable, du risque qui implique l'exposition à la molécule ou à l'agent biologique. Le but de cette étude est de prendre en compte les éventuels risques d'origine biologique associés au travail sur une PFC afin de mettre en place des solutions techniques et organisationnelles pour limiter l'exposition. En effet, bien que la présence de pathogènes soit inévitable au regard des produits traités sur les PFC, la mise en place d'actions préventives et correctives, peut permettre de limiter l'exposition à ces agents biologiques.

2.2 Matériel et Méthodes pour la réalisation de l'ERS sur les plates-formes SEDE Environnement

Afin de répondre à chacune des étapes de l'ERS, des objectifs spécifiques ont été fixés au préalable et modifiés suite à l'avancement des connaissances.

2.2.1 Définition du fonctionnement des plates-formes

Afin de caractériser le fonctionnement des différentes PFC, un questionnaire a été élaboré et envoyé aux chefs d'exploitation. Ce questionnaire, présenté en Annexe 3, est un outil essentiel pour définir les caractéristiques de chaque plate-forme du point de vue de son fonctionnement, de ses effectifs et des mesures d'hygiène mises en place. Inspiré,

en première approche, par le questionnaire élaboré par l'INRS[7], son élaboration définitive a fait suite à des visites sur quelques PFC afin d'évaluer les différentes pratiques et points essentiels à connaître. Complété par le chef d'exploitation de chaque PFC, l'exploitation du questionnaire a permis de définir :

- la proportion des PFC par types de déchets traités (résultats en Annexe 4, figure 2), de traitement appliqué et de configuration (paragraphe 2.3.1) ;
- la répartition des effectifs par type de contrat ;
- l'ancienneté d'exploitation des PFC (Annexe 4, figure 3).

D'autres points plus spécifiques ont été évalués par ce questionnaire tels que :

- les différents postes exercés et les moyens de protections utilisés ;
- les équipement de protection sur les engins (filtres) ;
- les équipements mis à la disposition des employés pour leur hygiène (douche, savons antiseptiques, vestiaires séparés vêtements propres/vêtements sales…) ;
- le tabagisme dans les engins ;
- les vaccinations demandées ou suggérées par la médecine du travail ;
- les gênes ou désordres d'ordre médical des employés.

Pour ce dernier point, les questions posées n'ayant pas été élaborées par un médecin, il s'agit de signes ou symptômes généraux, qui sont généralement des signes peu spécifiques retrouvés dans de très nombreuses pathologies ainsi que des symptômes fonctionnels (orientant vers l'atteinte d'un système particulier tel que le système respiratoire, digestif…). Ce questionnaire ne prétend pas justifier le potentiel impact des microorganismes présents sur les PFC sur la santé des salariés mais plutôt d'avoir un aperçu de l'état de santé globale de la population de travailleurs.

2.2.2 Caractérisation de la population de travailleurs

La caractérisation de la population a été documentée par le registre du personnel qui récapitule les informations relatives aux travailleurs SEDE Environnement tels que le sexe, l'age, la situation familiale, l'ancienneté, le poste exercé, le type de contrat, les arrêts maladie. L'exploitation de ce registre a impliqué la suppression au préalable des noms de famille des employés pour préserver le caractère confidentiel des informations présentes. Par la même occasion, ce document apporte des connaissances sur les nombres d'arrêts maladie par PFC et leur durée. Les causes de maladies ne sont évidemment pas incluses dans ce registre car strictement confidentielles et du ressort du

[7] Dans le cadre du mémoire sur la faisabilité d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des plates-formes de compostage, Gwladys FRANCOIS, 2005

médecin. Ce registre présente toutefois l'inconvénient majeur de ne pas inclure les sous-traitants et les intérimaires travaillant sur les PFC.

2.2.3 Caractérisation des dangers et choix des valeurs et seuils recommandés

La première étape dans la caractérisation des dangers est de faire une revue bibliographique des dangers associés aux agents et molécules présents et se développant au cours du processus de compostage. La recherche s'est portée par la suite sur les agents et molécules pour lesquels d'une part la présence dans le compost a été avérée et mesurée et d'autre part, des effets sanitaires sont connus ou suspectés à partir des études expérimentales et épidémiologiques disponibles.

Cette étape implique également la participation de la médecine du travail qui a été associée afin de connaître les pathologies rencontrées chez les travailleurs des PFC. La FNADE et le CREED (Centre de Recherche de Veolia) sont également associés à cette étude afin de partager les connaissances et les études en cours.

Suite au choix des agents dont la présence et les effets ont été avérés, les valeurs seuils proposées dans la littérature font également l'objet d'une analyse afin de choisir celles répondant au mieux aux critères suivants :

- la notoriété de l'organisme proposant la valeur ;
- la transparence sur l'élaboration de la valeur ;
- l'adéquation des durées et voies d'exposition ;
- le support (préférence pour les données sur l'homme que sur l'animal).

Toutefois, la recherche bibliographique peut mettre en évidence les lacunes actuelles en terme de connaissances sur les pathologies présentes et les relations doses-réponses existantes.

2.2.4 Evaluation des expositions

Cette étape consiste à définir tout d'abord l'aire géographique dans laquelle sera circonscrite la démarche d'ERS. Par la suite, la population concernée par cette ERS ainsi que les voies d'exposition y sont déterminées. Une revue bibliographique des concentrations et des méthodes de prélèvement des agents est essentielle afin d'établir le protocole de mesure. Ceci implique également la prise en compte du bruit de fond, d'autant plus pour des agents dont les concentrations sur les PFC peuvent être proches de celles retrouvées dans notre environnement. Dans cette partie sont prises en compte les incertitudes liées aux choix de mesure des agents ainsi que leur dénombrement.

Afin d'évaluer les concentrations en agents et molécules choisies pour l'ERS auxquelles sont exposés les travailleurs, des mesures dans l'air et dans les boues de

station d'épuration sont nécessaires pour compléter la bibliographie. Pour ces mesures, SEDE Environnement a fait appel au laboratoire CAE de Veolia. La justification des paramètres choisis pour ces mesures : choix du site, paramètres mesurés, points de mesure et méthodes de mesure, est présentée ci-dessous.

- Site sélectionné : les mesures, initialement prévues sur deux sites de compostage, n'ont pu être réalisées que sur une seule plate-forme. Le coût important de ce type d'analyses explique ce changement. Le site choisi (PFC de Tarascon) présente toutefois l'avantage d'avoir une configuration mixte (air libre, bâtiment ouvert et bâtiment clos) et d'être particulièrement sensible à l'envol de poussière. L'Annexe 5 présente les caractéristiques du site retenu et des illustrations des points de mesure.

- Paramètres mesurés : le choix des paramètres mesurés doit répondre aux critères cités précédemment (présence des agents biologiques sur les PFC, effets connus, valeurs seuils présentes dans la littérature) et qui ont également servi de base pour les études de la FNADE. Ces agents sont présentés dans l'évaluation des risques.

- Points de mesure : le choix des points de mesure, limités en nombre par le coût de telles analyses, répond à une volonté de comparer les concentrations à l'extérieur du site (bruit de fond) et sur certaines étapes de traitement (au mélange, à la fermentation et au criblage) mais également de voir l'efficacité des moyens de protection mis en place sur le site (par les mesures sur site et dans les engins équipés de filtres à poussières et charbon actif). Les étapes de traitement choisies sont caractérisées, d'après la bibliographie, par des émissions en bio-aérosols plus élevées.

- Méthodes de mesure : l'étude bibliographique a permis de déterminer les différentes méthodes utilisées pour la mesure de bio aérosols illustrées en Annexe 6. Le choix a été fait avec le laboratoire CAE (Centre d'Analyses Environnementales), qui a déjà réalisé ce type de mesures, d'utiliser la méthode en milieu liquide. L'air est aspiré selon un mouvement circulaire dans un cône fixe contenant un liquide qui subit un effet vortex lors de l'aspiration. Les microorganismes sont impactés dans la veine liquide, ainsi constituée. L'appareil utilisé pour réaliser les mesures de l'ensemble des agents (à l'exception des endotoxines) est un Coriolis (Bertin). Chaque prélèvement correspond à un volume prélevé de 1.5 m^3 (débit de 300l/min et temps de prélèvement : 5 min) dans 10ml de liquide de prélèvement. La taille des particules retenues s'échelonne entre 0,5 et 20µm. Après dilution, il y a ensemencement en boite de Pétri sur milieu gélosé propre à chaque agent recherché. Pour les endotoxines, l'air est aspiré (pompe GilAir) à travers un filtre en fibre de verre contenu dans une cassette avec un débit de 2L/min pendant 3 heures. Le filtre a été traité en suivant les recommandations de la norme NF EN 14031 de mai 2003. Pour chacun des points de prélèvement, une cassette neuve a été mise en place.

2.2.5 Caractérisation du risque et proposition de mesures de gestion

Cette étape consiste à reprendre les données d'exposition afin de les intégrer sous la forme d'une expression quantitative, ou qualitative le cas échéant, du risque. L'ensemble des incertitudes entourant cette expression est explicité ainsi que les limites de cette ERS.

A l'issue de cette étape de caractérisation du risque, des solutions techniques et organisationnelles sont proposées pour limiter les expositions. Ces éléments s'appuient sur les mesures présentées dans la bibliographie ainsi que celles déjà réalisées sur certaines PFC. Ces solutions sont adaptées à la configuration des sites.

2.3 Application au cadre d'étude : le compostage sur les plates-formes SEDE Environnement

Spécialisée dans l'épandage de boues de station d'épuration et le compostage, l'entreprise SEDE Environnement gère 22 PFC sur les territoires français et belges. Parmi ces plates-formes, 17 sites traitent des boues de station d'épuration. Ce sont ces 17 plates-formes qui seront étudiées dans le cadre de ce mémoire. La localisation de ces plates-formes ainsi que leurs caractéristiques (ancienneté et déchets traités) sont présentées en Annexe 4.

2.3.1 Fonctionnement des plates-formes

2.3.1.1 Types de déchets traités

Il existe 8 types de déchets différents compostés sur les PFC SEDE Environnement. Ces déchets sont les suivants :

- les déchets d'assainissement qui comprennent : les boues de station d'épuration urbaine, les boues de curage et les boues de l'industrie agroalimentaire ;
- les déchets verts tels que les tontes de gazon, les tailles de haie, les branches d'élagage, les feuilles mortes ;
- les déchets de bois tels que les souches, écorces, troncs, morceaux de bois et palettes broyées ;
- les Fractions Fermentescibles des Ordures Ménagères (FFOM) ;
- les déchets d'origine animale tels que les fumiers, lisiers, fientes, plumes... ;
- les autres types tels que les déchets de papeteries, les boues liquides, les biofiltres usagers utilisés sur les PFC pour le traitement de l'air…

La répartition des plates-formes par type de déchets traités est présentée en Annexe 4 (chaque plate-forme traitant plusieurs types de déchets).

2.3.1.2 Techniques de traitement et configuration des plates-formes

Les plates-formes SEDE ont des configurations très variables. La répartition de ces configurations est présentée sur la figure 2 qui suit.

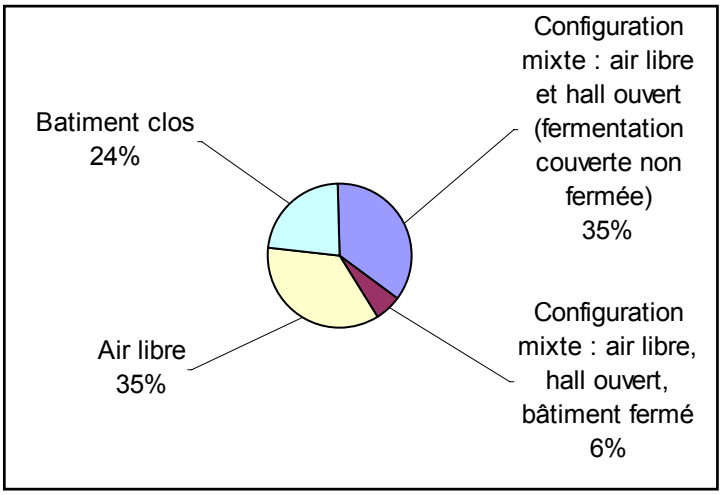


Figure 2 : Répartition des 17 plates-formes de compostage SEDE par type de configuration

La répartition des plates-formes suivant le type de procédé appliqué est présentée sur la figure 3 qui suit.

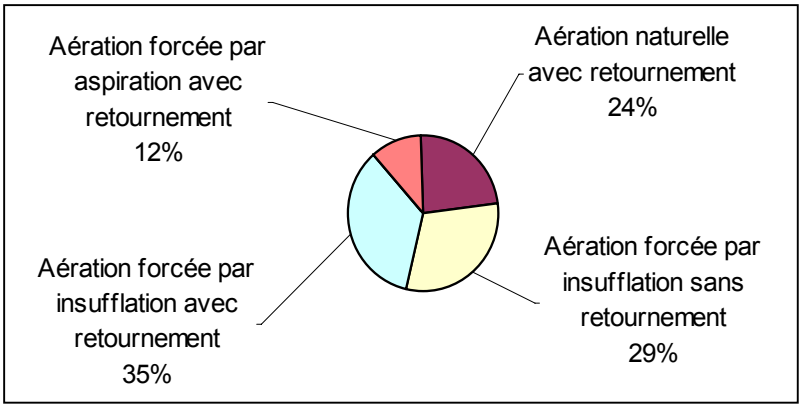


Figure 3 : Répartition des 17 plates-formes SEDE par type de procédé appliqué.

Ainsi, ce sont 12 plates-formes qui réalisent le retournement d'andains soit un total de 71 %. Les procédés par aération naturelle sans retournement et aération forcée par aspiration sans retournement ne sont pas pratiqués sur les plates-formes SEDE. Le procédé majoritaire est l'insufflation d'air avec retournement. Bien que ce type de procédé participe à l'émission de gaz tel le NH_3, il n'a pas été observé sur le terrain ni dans la bibliographie que cette technique augmentait significativement l'envol de poussières. Toutefois, dans le cas du traitement par aspiration, la formation d'aérosols liquides est limitée. Il est également à noter que les facteurs climatiques, dans le cas des plates-formes à l'air libre ou en bâtiment ouvert, participent à la volatilisation des poussières des andains et celles qui s'accumulent sur les voies de circulation. En effet, le climat sec et les vents accrus augmentent d'une part le phénomène de dessiccation du compost et d'autre part son envol sous forme d'aérosols.

2.3.2 Effectifs

L'ensemble des effectifs travaillant sur les PFC exploitées par SEDE n'est pas constitué des seuls employés de SEDE. En effet, de nombreux sous-traitants et quelques intérimaires sont également présents sur les PFC. Sur les 17 plates-formes SEDE, 5 plates-formes ne présentent que des employés SEDE, 5 ont un effectif mixte (employés SEDE et sous-traitants ou intérimaires occasionnellement) et 7 sont exploitées par des sous traitants permanents et un chef d'exploitation SEDE y travaille à temps partiel. Ces sous-traitants et les intérimaires ne sont pas inclus dans le registre du personnel. Ils n'ont par conséquent pas pu être intégrés dans la population des travailleurs. D'un point de vue sécurité toutefois, les plans de prévention sont élaborés pour chaque entreprise extérieure afin de rappeler les règles d'hygiène, obligations et comportements à tenir sur les plates-formes. Le tableau 1 présente les caractéristiques des employés SEDE uniquement (les sous traitants et intérimaires ne sont pas inclus).

Tableau 1 : Caractéristiques des travailleurs des PFC SEDE Environnement

Caractéristiques des travailleurs	Résultats des 17 PFC
Effectif global sur les PFC - pourcentage d'homme - pourcentage de femme	52 personnes 90,4% 9,6%
Effectif moyen par unité :	3,1 personnes
Répartition des employés par poste réalisé - Chefs d'exploitation - Agents d'exploitation - Postes administratif - Autres (technicien de maintenance, chef d'équipe)	 16 personnes **(30,8%)*** 29 personnes **(55,8%)** 3 personnes **(5,7%)** 4 personnes **(7,7%)**
Type de contrat - CDI - CDD	 48 personnes **(92,3%)** 4 personnes **(7,7%)**
Age moyen des employés SEDE ** : - 20 à 30 ans - 31 à 40 ans - 41 à 50 ans - 51 à 60 ans - > 60 ans	37,5 ans 11 **(21,2%)** 22 **(42,3%)** 14 **(26,9%)** 5 **(9,6%)** 0 **(0%)**
Ancienneté moyenne des employés SEDE **: - <1an - 1 à 3 ans - 3 à 5 ans - 5 à 7 ans	6,5 ans 7 **(13,5%)** 20 **(38,5%)** 16 **(30,8%)** 9 **(17,3%)**

* Un chef d'exploitation est en charge de 2 plates-formes

** Calcul de la moyenne arithmétique

Plusieurs remarques peuvent être faites suite aux résultats présentés dans le tableau 1. En effet, la population de travailleurs des PFC est majoritairement masculine (plus de 90%), jeune (90,4% des travailleurs ont moins de 50 ans), stable (plus de 92% des employés sont en CDI avec une ancienneté moyenne de 6,5 ans). Les postes principalement représentés sur les PFC sont les agents d'exploitation et les chefs d'exploitation (86,6% en cumulé).

2.3.3 Postes de travail

En fonction du type de déchets entrant traités sur la PFC, les postes de travail peuvent varier. Il existe huit postes principaux auxquels s'ajoutent des tâches ponctuelles qui seront précisées par la suite. Le questionnaire envoyé à l'ensemble des responsables des plates-formes permet d'évaluer, entre autre, les différents postes occupés sur la plate-forme, les engins utilisés et les moyens de protection individuelle et collective mis à la disposition des travailleurs pour chaque poste. Les illustrations de ces engins sont présentées en Annexe 7.

Les postes de travail qui suivent sont présentés par ordre chronologique du processus de compostage. Il s'agit des postes où les travailleurs sont en contact direct avec les déchets et le compost (ne sont pas inclus les tâches administratives).

- La réception. A chaque arrivée de camions de déchets sur la PFC, le déchet est déchargé sur l'aire de stockage prévue à cet effet. Pour ce poste, l'utilisation d'un chargeur (Annexe 7, photographie 3) est parfois nécessaire pour faciliter le déchargement. A cette étape, des prélèvements sont alors réalisés par les agents d'exploitation pour chaque camion entrant afin de suivre les caractéristiques chimiques du produit (afin de répondre à la norme NFU 44-095 dans le cas des boues d'assainissement urbaines). Pour cette tache, tous les agents utilisent, comme protections individuelles, des gants afin d'éviter le contact cutané. A la fin du processus de compostage, des prélèvements sur le compost sont également réalisés afin de respecter cette norme et pouvoir commercialiser le produit ;

- Le broyage. Pour les déchets verts et les déchets de bois non broyés arrivant sur les plates-formes, cette étape est indispensable avant le mélange des déchets. Elle est réalisée, la plupart du temps, par un sous-traitant avec une fréquence variable selon le tonnage entrant. Pour cette tache, le sous-traitant utilise un broyeur avec ou sans cabine ou plus rarement un Morbarch® (Annexe 7, photographies 1 et 2). Le broyeur (avec une cabine), qui appartient généralement au sous-traitant, n'est pas toujours équipé d'un filtre permettant de protéger les travailleurs contre les poussières émises lors du broyage. Sur les 10 PFC où le broyage est réalisé in-situ, seulement 3 engins en sont équipés ;

- Le mélange. Afin d'assurer le processus de compostage, les différents types de déchets sont mélangés dans des proportions fixées. Pour cette étape, les engins utilisés varient selon les plates-formes. Il s'agit : de grues, de chargeurs, de MECH®. Les filtres à

poussières (de type P3[8]) et à charbon actif (pour le NH_3) qui filtrent l'air en amont des cabines mises en surpression, ne sont pas omniprésents sur tous les appareils. Seules 8 plates-formes sont équipées de quelques chargeurs avec filtres à poussières et charbon actif. Les critères d'efficacité de filtration de ces filtres sont présentés en Annexe 8. Pour les autres chargeurs non équipés, la filtration est uniquement assurée par un filtre papier, initialement présent sur l'engin, qui retient les poussières et qui doit être nettoyé une à deux fois par jour selon l'émission de poussières. Leur capacité de filtration n'est pas précisée par le constructeur.

- La constitution d'andain. Pour cette étape, trois types d'appareil sont utilisés : les MECH®, les chargeurs ou le tracteur avec un épandeur. L'utilisation du chargeur est la plus répandue (15 plates-formes).

- Le retournement d'andain. Cette étape n'est pas systématique et dépend du choix de traitement de la fermentation. Sur les 17 plates-formes SEDE, 12 pratiquent le retournement. Pour cette étape, l'engin utilisé est également le chargeur ou le retourneur d'andain. Ce dernier est assez rare sur les PFC (seulement 1 plate-forme, pratiquant le retournement, en est équipée).

- Le criblage. Selon les sites, cette étape est réalisée soit entre la fermentation et la maturation, soit à la fin de la maturation. Les engins utilisés pour cette étape sont des cribleurs (Annexe 7, photographies 4 et 6). Les agents d'exploitation utilisent des chargeurs pour alimenter le cribleur. Cet appareil permet de séparer les matières fines (dont la taille est fixée par la maille choisie) des refus de criblage qui sont réutilisés lors de la conception des andains de fermentation. Cette étape est particulièrement émettrice de poussières, c'est pourquoi les chargeurs doivent être équipés de filtres. Sur les 17 plates-formes SEDE, 9 possèdent au moins un chargeur équipé d'un filtre à poussières et charbon pour le criblage.

- Le chargement. Lorsque le processus de compostage est terminé après la maturation, le compost est stocké sur une aire prévue à cet effet puis chargé à l'arrivée

[8] La version 2001 de la norme EN149 définit 3 classes d'efficacité pour les filtres en fonction de la valeur maximale de pénétration du média vers l'intérieur. Le filtre anti-poussières P3, qui est le plus efficace en terme de quantité de poussières retenues, arrêtera au minimum 98% des particules (contre 78% pour le FFP1 et 92% pour le FFP2) de diamètre moyen 0,6µm (particules de 0,01 à 1µm). La fuite totale vers l'intérieur est de 2%. Source INRS. Selon le fabricant des filtres poussières, ceux-ci retiennent 99.995% des particules invisibles et 100% des particules visibles.
Les dimensions des bioaérosols sont de l'ordre de 0,02 µm à 0,25 µm pour les virus, de 0,3 à 15 µm pour les bactéries et de 1 à 50 µm pour la majorité des moisissures et des levures (AIHA, 2000; Goyer et al., 2001).

des transporteurs. Cette étape nécessite l'utilisation de chargeurs. Pour ce poste, 8 plates-formes sont équipées de chargeurs avec filtres à poussières et charbon actif.

- La maintenance. En fonction des engins présents sur la plate-forme, de nombreuses tâches de maintenance peuvent être réalisées tels que les réparations, l'ajout d'huile…Pour cela, les agents ont à leur disposition des protections individuelles tels que les gants, les lunettes et les masques de filtration respiratoire obligatoirement de type FFP3 sur toutes les plates-formes. Les masques de filtration respiratoire sont des demi-masques jetables avec valve (couvrant le nez, la bouche et le menton) qui protégent des poussières, des fumées (fines particules en suspension dans l'air) et des aérosols (fines gouttelettes produites lors d'opérations de pulvérisation).

Parmi les autres tâches réalisées sur la plate-forme, un ramassage des plastiques présents dans certains déchets verts, est réalisé sur les parties accessibles des andains de fermentation à l'air libre ou en bâtiment ouvert (tâche non réalisée en bâtiment clos). Les protections individuelles utilisées pour cette tâche manuelle sont uniquement des gants. Seulement 9 plates-formes pratiquent le ramassage des plastiques.

Il est également demandé aux agents d'exploitation de nettoyer régulièrement les engins. La fréquence est variable selon les plates-formes et parfois non définie explicitement. Pour cette tâche, les moyens techniques mis à leur disposition sont variables : les lingettes, le balai, l'aspirateur mais également le souffleur sur un site. L'utilisation de souffleur n'est pourtant pas recommandée car il participe à la remise en suspension des poussières déposées dans les cabines des engins.

Pour les engins équipés d'un filtre à poussières en papier initialement présent sur l'engin, un nettoyage quotidien est demandé en utilisant un souffleur. Jusqu'à présent, la technique de nettoyage de ces filtres n'était pas définie (pression du souffleur appliquée, moyen de protection individuelle à utiliser…). Celle-ci sera définie dans la quatrième partie sur la gestion du risque car un mauvais nettoyage peut entraîner une exposition importante sur un temps court aux poussières qui se sont accumulées dans le filtre.

Selon les exploitants (16 réponses sur 17), les tâches exposant le plus les employés aux agents biologiques quelle que soit la voie d'exposition (réponses spontanées) sont la prise d'échantillon à 76%, la maintenance et le nettoyage du site et des engins à 53%, le criblage à 29% et le retournement à 12%.

3 Outil d'évaluation des risques sanitaires d'origine biologique encourus pour les travailleurs des plates-formes de compostage

3.1 Synthèse bibliographique des agents biologiques d'intérêt sanitaire présents dans le compostage

La plupart des auteurs s'accordent à regrouper les microorganismes ou constituants présents dans le compostage et potentiellement dangereux pour la santé en 3 catégories (Millner, 1994 ; Beffa, 1998) :

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

Après avoir présenté les généralités sur les agents et les toxines et allergènes d'origine biologique ainsi que leurs effets sur la santé, les agents spécifiques aux déchets traités et au processus de compostage seront détaillés.

3.1.1 Les différents agents biologiques

Il existe 5 types d'organismes pathogènes qui sont les bactéries, les virus et les parasites regroupant les champignons, les protozoaires et les helminthes. Certaines toxines ou composants pathogènes pour l'homme sont issus de certaines bactéries (endotoxines) et de champignons (glucanes et mycotoxines).

Ce paragraphe reprend les informations issues de : « l'étude bibliographique sur l'évaluation des risques liés au bioaérosols générés par le compostage des déchets » (Careps, 2002) ainsi que le rapport produit en 2003 par l'HSE (Health and Safety Executive). Il s'agit d'une présentation succincte rappelant la nature et les caractéristiques de pathogénicité de ces agents.

3.1.1.1 Les bactéries

Les bactéries sont des cellules procaryotes, c'est à dire ne possédant pas de vrai noyau mais un appareil nucléaire simplifié. Elles sont présentes dans tous les milieux (air, sol, eau, corps humain...). Leur pathogénicité est liée à la libération de toxines (ex : endotoxines) ou à leur caractère invasif (infection). De taille de l'ordre du micromètre, les différences fondamentales au niveau de leur enveloppe cellulaire permettent de les

distinguer en deux groupes : les Gram$^+$ et les Gram$^-$. Cette distinction est liée à leur affinité pour des colorants utilisés dans le cadre de la coloration de Gram.

➢ Les bactéries Gram$^+$ présentent une enveloppe simple, rigide et exceptionnellement résistante qui protège la bactérie et définit sa forme (cocci ou bacille). Le tableau suivant récapitule les principaux genres de bactéries Gram$^+$ en fonction de leur forme et de leur affinité pour l'oxygène.

Tableau 2 : Principaux genres de bactéries Gram positif

		Forme de la bactérie	
		Bacille	Cocci
Affinité pour l'oxygène	Aérobie	*Bacillus* *Listeria*	*Staphylococcus* *Streptococcus* *Enterococcus*
	Anaérobie	*Clostridium*	*Peptostreptococcus*

Parmi les bactéries Gram$^+$, les actinomycètes (ou bactéries filamenteuses) sont présentes dans le processus de compostage. Essentiellement aérobies, ces organismes sont les plus prolifiques dans la production d'antibiotiques et d'enzymes et jouent donc un rôle essentiel dans la dégradation de la biomasse végétale et animale. Les espèces thermophiles les plus communes (température de croissance entre 30 et 60°C) sont *Saccharopolyspora rectivirgula*, *Saccharomonospora* sp., *Thermoactinomyces vulgaris* et *Thermonospora* sp. Des espèces mésophiles tels que *Streptomyces* sp. sont également présentes en grand nombre. Les effets des actinomycètes sur l'homme sont de nature allergique.

➢ Les bactéries Gram$^-$ sont caractéristiques de la flore bactérienne du tube digestif animal et humain avec pour genres les plus fréquemment isolés *: Salmonella* sp., *Shigella* sp., *Enterobacter* sp., *Klebsiella* sp., *Escherichia* sp. (Hart, 1997). Les Gram$^-$ sont également très largement répandues dans l'environnement et prédominent dans les déchets d'origine végétale.

3.1.1.2 Les virus

Les virus sont caractérisés par la présence d'un seul acide nucléique : ADN ou ARN. Ce génome est protégé par une coque protéique et par une enveloppe lipidique pour certains virus (virus enveloppés). Le virus étant incapable de se multiplier par division dû à l'absence d'équipement enzymatique, il nécessite la présence d'une cellule hôte pour se reproduire. Le pouvoir pathogène des virus est alors lié à l'inactivation de la fonction des cellules hôtes ou de leur destruction. En terme de santé publique, les virus reconnus sont les virus entériques transmis à l'homme par voie orofécale et les virus respiratoires transmis par inhalation d'aérosols principalement. La taille des virus varie de 20 à 200 nm.

3.1.1.3 Les parasites

Les parasites regroupent les champignons, les helminthes et les protozoaires. Ces organismes se nourrissent au dépend d'un autre organisme appelé hôte.

- Les champignons sont des organismes eucaryotes, c'est à dire qu'ils possèdent un noyau isolé du cytoplasme par une membrane et qui contient de l'ADN (en opposition aux bactéries). On parle alors de levures pour les champignons unicellulaires et de moisissures pour les pluricellulaires. Ces organismes hétérotrophes[9] se nourrissent uniquement de carbone organique et doivent, pour cela, soit décomposer de la matière morte (saprophytes), soit s'alimenter au détriment d'organismes vivants (parasites), soit s'associer avec un organisme chlorophyllien (symbiotiques).

Le cycle de reproduction des champignons, sexué ou non selon les espèces, se fait par le biais de cellules appelées spores. Celles-ci sont facilement mises en suspension dans l'air de par leurs petites tailles (de 1 à 50µm et qui diffèrent selon le degré d'humidification) et peuvent donc être transportées par le vent (Millner, 1994).

Les champignons mésophiles (cultivés à 25°C) regroupent entre autre les genres : *Altenaria, Cladosporium, Mucor, Penicillium, Trichoderma.* Les champignons thermophiles (cultivés à 35°C), quant à eux, regroupent principalement les genres *Aspergillus*, *Geotrichum* et les levures.

Parmi ces champignons, certains sont pathogènes pour l'homme. Les sources d'exposition sont alors multiples car ils se développent sur de nombreuses sources carbonées : sol, végétaux, homme et dans l'air. Ces champignons sont transmis par contact cutané, par inhalation de spores présentes dans l'air ou par ingestion. Les effets sont de trois types : effets allergènes, effets toxiques ou apparition de mycose.

- Les helminthes sont des êtres pluricellulaires, communément appelés « vers », regroupant les trématodes (ex : douve), les cestodes (ex : tænia), les nématodes (ex : ascaris, toxocara). Cette classification est liée à la morphologie de ces helminthes (segmentation, forme…). Le cycle de développement de ces parasites est complexe. En effet, plusieurs stades se succèdent : œufs, larves, adultes. La plupart des helminthes parasitent le tube digestif et peuvent également se localiser dans les organes profonds. La contamination a lieu par piqûre d'insecte, par voie orale ou pénétration transcutanée.

- Les protozoaires sont des êtres unicellulaires qui vivent en grande majorité en milieu aquatique et pour certains en association avec un hôte dans le tube digestif. Tout comme les helminthes, le cycle de développement se réalise en plusieurs étapes. Parmi

[9] se nourrissent à partir de matières organiques préexistantes en opposition aux autotrophes

les protozoaires, nous pouvons citer *Cryptosporidium* sp., *Giardia* et *Toxoplasma*. La taille des protozoaires est de l'ordre de quelques microns pour la majorité des protozoaires à quelques millimètres. Un certain nombre de protozoaires est pathogène pour l'homme. Ils sont également capables de former des structures résistantes viables dans l'environnement (oocystes) pendant plusieurs mois à plusieurs années. La contamination se fait par piqûre d'arthropodes ou par contamination féco-orale pour les protozoaires intestinaux.

3.1.1.4 Les toxines et allergènes produits par les bactéries et les champignons

Certaines bactéries et champignons ont la capacité d'élaborer des produits au sein de leur paroi qui sont, par la suite, libérés dans le milieu.

- Les endotoxines, qui sont des macromolécules formées d'un complexe lipopolysaccharides, sont présentes uniquement dans la paroi des bactéries $Gram^-$ (Jacobs et al, 1997). Celles-ci contribuent au pouvoir pathogène bactérien et ne sont actives que lors de leur libération suite à la destruction ou à la multiplication de la bactérie (Millner, 1994).
- Les mycotoxines sont des métabolites secondaires produites par certains champignons, sous la forme d'aminoacides et de terpènes principalement. Aspergillus, Trichotecium, Penicilium et Fusarium sont cités parmi les espèces les plus caractéristiques en terme de production de mycotoxines (Perdrix, 1997) ainsi que Alternaria, Paelomyces, Rhizopus et Trichoderma (Sorenson, 1999). Toutefois, les souches au sein d'une même espèce ne sont pas toutes toxinogènes. Il existe un grand nombre de mycotoxines différentes, spécifiques à certaines espèces, dont les aflatoxines, les trichotécènes, les ochratoxines…Elles sont présentes dans les denrées alimentaires moisies, l'eau ou l'air contaminé (scierie, industrie du bois, fromagerie…).
- Les glucanes sont des polysaccharides présents dans les parois cellulaires de plantes et de microorganismes tels que les champignons, certaines bactéries et les actinomycètes. Parmi ces molécules, les (1-3)-β-D-glucanes présentent les effets immunobiologiques les plus puissants. La source principale de ces glucanes est la paroi cellulaire des champignons. La connaissance de leurs effets chez l'homme reste toutefois limitée et nécessite la réalisation d'autres études pour évaluer leur rôle favorisant sur l'apparition d'allergie et les interactions avec les endotoxines (Sisgaard, 2000 ; Williams, 1994).

3.1.2 Les agents biologiques présents dans les déchets

3.1.2.1 Dans les boues d'épuration

La nature et la concentration des pathogènes présents dans les eaux usées dépendent de plusieurs facteurs qui sont principalement le niveau sanitaire de la

population et sa taille, les diverses activités raccordées (laiteries, abattoirs…), la nature du réseau et l'influence des saisons. Ainsi, au cours du traitement en station d'épuration, ces agents vont pour un grand nombre soit décanter en raison de leur densité propre (œufs de parasites, kystes de protozoaires) soit s'adsorber sur les matières particulaires (virus et bactéries). La charge microbiologique retrouvée dans les boues d'épuration sera donc dépendante de ces paramètres mais également des méthodes de mesures employées.

Une synthèse sur les agents potentiellement présents dans les boues de STEP issue de la bibliographie est présentée dans le tableau 3. Parmi ces agents, certains appartiennent à la liste européenne des agents pathogènes des groupes 2,3 et 4 (classification en Annexe 2). Ces agents ont été soulignés dans le tableau 3. Pour les genres suivis de *sp*. (l'abréviation *sp.* renvoie à l'ensemble des espèces de chaque genre), les auteurs n'ont pas précisé les espèces concernées. Ils comptent toutefois, pour certains de ces genres, des espèces classifiées et sont donc notifiés d'un astérisque.

Tableau 3 : Pathogènes présents dans les boues de station d'épuration (CSHPF, 1997 ; Carrington, 2001 ; Déportes et al, 1998 ; Strauch 1998 ; Dumontet et al., 2001)

Bactéries	Champignons	Parasites
Gram - *Aeromonas sp.* *Arizona hinshawii* *Brucella sp.** *Campylobacter sp.* *Citrobacter koseri* *Enterobacter sp.* *Escherichia coli* *Klebsiella sp.* *Legionella pneumophila* *Leptospira sp.** *Pasteurella pseudotuberculosis* *Plesiomonas shigelloide* *Proteus sp.** *Providencia sp.* *Pseudomonas aeruginosa* *Salmonella sp.** *Serratia sp.* *Shigella sp.** *Vibrio sp.* *Yersinia enterocolitica* **Gram +** *Arcobacter sp.* *Bacillus anthracis* *Bacillus cereus* *Clostridium botulinum* *Clostridium perfringens* *Listeria monocytogenes* *Staphylococcus aureus* *Enterococcus sp.* *Mycobacterium sp.**	*Aspergillus sp.** *Candida sp. ** *Cryptococcus neoformans* *Epidermophyton sp.** *Geotrichum candidum* *Microsporum canis* *Microsporum cati* *Phialophora richardsii* *Trichophyton sp.* *Trichosporon cutaneum* **Virus** Virus entériques : - Poliovirus - Coxsachievirus - Echovirus Virus hépatite A Adenovirus Norovirus Sapporo like virus Virus influenza Coronavirus Reovirus Rotavirus Virus hépatite E Astrovirus	**Protozoaires :** *Acanthomoeba castellanii* *Balantidium coli* *Cryptosporidium parvum* *Cyclospora cayentensis* *Dientamoeba fragilis* *Encephalitozoon intestinalis* *Entamoeba histolytica* *Giardia lamblia (interstinalis)* *Isospora sp.* *Naegleria fowleri* *Sarcocystis sp.** *Toxoplasma gondii* *Vittaforma corneae* **Helminthes :** *Ancylostoma duodenale* *Ascaris lumbricoides* *Diphylobothrium latum* *Echinococcus granulosus* *Echinococcus multilocularis* *Enterobium vermicularis* *Hymenolepsis sp.** *Necator americanus* *Strongyloide stercoralis* *Taenia saginata* *Toxocara canis* *Toxocara cati* *Trichuris sp.**

3.1.2.2 Dans les autres déchets

La grande variété des déchets mélangés avec les boues de station d'épuration (paragraphe 2.3.1) implique, par la même occasion, une importante gamme d'agents

potentiellement présents. Le tableau 4 récapitule les principaux genres recensés dans les différents types de déchets présentés dans le paragraphe 2.3.1.1. La partie ordures ménagères (FFOM), dont l'utilisation est très limitée (une seule plate-forme et pour un faible tonnage), n'a pas été incluse dans ce tableau.

Tableau 4 : Contenu microbien des autres déchets du compostage

Matières Premières	Contenu microbien
Coproduits (déchets verts, écorces, palettes et autres déchets du bois…)	- Bactéries Gram négatif (*Achromobacter*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*) ; - Bactéries Gram positifs non sporulés (*Micrococcus*, *Streptococcus*) et sporulées (*Bacillus*) ; - Bactéries filamenteuses de type actinomycètes mésophiles (Streptomyces, Rodococcus, Agromyces) et thermophiles (Saccharopolyspora, Thermoactinomyces, Saccharomonospora, Thermonospora) ; - Champignons saprophytes se développant sur les végétaux (Alternaria, Cladosporium, Didymella, Fusarium, Verticillium) ; des champignons de décomposition (Aspergillus, Penicillium, Trichoderma, Mycor, Rhizopus)
Résidus agricoles et de l'industrie agro-alimentaire	- Bactéries (principalement Gram positif) - Moisissure de décomposition
Déchets d'élevage de bétail	- Microorganismes d'origines fécales - Bactéries Gram positif (Corynebacteria, Bacillus, Staphylococcus, Micrococcus et Streptococcus

Source : Les bioaérosols en plate-forme de compostage : exposition et risque professionnel, Schlosser O., Huyard A., 2008

3.1.3 Les agents biologiques présents au cours du compostage

Au cours du processus de compostage, les populations microbiennes vont évoluer avec le changement des conditions physiques (température, humidité) au sein des andains. Alors que certains agents apparaissent ou se multiplient (microorganismes mésophiles et thermophiles de type champignons et actinomycètes), les pathogènes initialement présents dans les déchets sont détruits en partie ou totalement. De nombreux auteurs (Pourcher, 2005 ; Lavoie, 2006 ; Clarck, 1983 ; Wiley, 1969) ont étudié l'hygiénisation du compost avec le suivi de certains agents pathogènes (principalement les agents d'origine fécale : les entéropathogènes). Les conclusions restent identiques malgré des méthodes de mesures et des agents pathogènes choisis différents. En effet, la survie de ces agents est directement liée au bon déroulement du processus de compostage (compost mature avec élévation de température homogène en tout point). Les recommandations actuelles en terme de température et de temps d'hygiénisation sont de l'ordre de 55 à 60°C mesuré pendant 4 semaines. Les études montrent toutefois que lorsque la température n'est ni suffisante ni homogène en tout point de l'andain et que le taux d'humidité est trop faible, une recontamination est potentiellement observable suite à un retournement (les parties extérieures recontaminent le reste de l'andain).

Les interventions mécaniques réalisées sur les PFC tel que les retournements d'andains, le criblage ou la circulation des véhicules, vont participer à la mise en suspension de bioaérosols dans l'air. D'un point de vue qualitatif, le contenu des

bioaérosols est le reflet de celui des matériaux du compostage auquel s'ajoute celui de l'environnement ambiant. Ainsi, les agents biologiques présents dans les aérosols regroupent des organismes vivants et morts ainsi que les allergènes et les toxines qui leur sont associés. Ils sont le plus souvent agrégés entre eux et/ou fixés sur une particule mais peuvent également être retrouvés à l'état libre dans le cas des spores de champignons. C'est sous la forme de bio aérosols que les agents biologiques ont principalement été étudiés dans le cadre des études menées pour évaluer les risques sanitaires associés à la présence d'agent biologique sur les PFC. Les méthodes de prélèvement et d'identification existantes pour ces bioaérosols sont présentées en Annexe 6.

3.2 Identification des dangers et agents biologiques retenus

3.2.1 Les dangers liés aux agents biologiques

Le mode d'action des agents biologiques pathogènes est de 3 types. Ils sont à l'origine soit de pathologies infectieuses soit de pathologies allergiques et/ou inflammatoires. En dernier ressort, le mode d'action peut être toxique voire cancéreux pour certaines mycotoxines. Pour chaque mode d'action, les agents responsables sont précisés.

3.2.1.1 Mécanisme infectieux

Trois étapes indissociables caractérisent le mécanisme infectieux : l'invasion de l'hôte, sa multiplication et la réponse aux mécanismes de défense immunitaire de l'hôte. Les agents responsables sont certaines bactéries (dont les entéropathogènes), certains virus et parasites (inhalation de spores de champignons dont *Aspergillus*, *Mucor*, *Absydia* et *Fusarium*).

- La première étape consiste en **l'invasion des cellules**. Suivant l'agent infectieux, l'invasion aura lieu par pénétration dans les cavités du corps présentant une ouverture vers l'extérieur (système digestif, respiratoire, uro-génital) ou par pénétration dans les tissus plus profonds après avoir traversé la barrière épithéliale.

Pour le premier cas qui comprend les voies d'exposition par inhalation ou par ingestion, des paramètres physiques et biologiques interviennent pour limiter l'invasion des cellules. En effet, pour l'inhalation de particules sur lesquelles peuvent se fixer les agents biologiques (bio aérosols), les nombreuses barrières physiques (narines, oropharynx, larynx) sont en mesure de retenir les plus grosses particules. En dessous d'une certaine taille (diamètre inférieur à 100µm), ces particules atteignent la partie basse de l'appareil respiratoire et sont évacuées par le mucus bronchique. Les lésions liées à

ces particules dites « inhalables » sont de type irritatif : destructions des cils, altération du mucus… Les particules plus fines dites poussières thoraciques (diamètre inférieur à 30µm) atteignent les parties non ciliées où elles peuvent adhérer aux surfaces et être assimilées. Quant aux particules de taille inférieure à 5µm (pour la médecine du travail) et 2,5µm (en santé environnementale), celles ci atteignent les alvéoles pulmonaires et peuvent ainsi passer dans la circulation sanguine. Pour l'ingestion, le principal mécanisme de défense est lié à l'acidité gastrique auquel doivent faire face les agents après l'ingestion ainsi que les enzymes et le puissant balayage gastrique. Pour les agents ayant résisté, l'adhésion aux cellules épithéliales de l'intestin entraîne le début de l'infection.

Pour le second cas, la pénétration peut se faire directement à travers l'épithélium des muqueuses ou généralement indirectement à travers la peau par l'intermédiaire d'une lésion cutanée ou d'une piqûre.

- La seconde étape consiste en la **multiplication** des microorganismes chez l'hôte. La taille de l'inoculum intervient alors dans le potentiel d'infection. En effet, la réponse du système immunitaire n'est insuffisante que pour une quantité importante d'agents infectieux. Cela peut donc nécessiter une multiplication au sein de l'organisme qui induit l'apparition en décalé des premiers symptômes (période d'incubation). A partir d'un certain seuil apparaissent les premiers symptômes, ce seuil étant variable suivant l'état de santé de l'hôte. Il existe des doses minimales infectantes (DMI) pour les principaux agents pathogènes à partir duquel il est considéré que 100% de la population est susceptible de développer l'infection.

- La troisième étape, dite de **réponse au système immunitaire**, apparaît dès la période de multiplication. Cela implique pour l'agent la mise en place de stratégies pour vaincre le mécanisme de défense (destruction des phagocytes, « déguisements » pour ne pas être reconnu), et pour l'hôte de s'adapter aux stratégies.

3.2.1.2 Mécanismes non infectieux

L'ensemble des agents biologiques (bactéries $Gram^+$, bactéries $Gram^-$ et leurs endotoxines, actinomycètes, champignons et mycotoxines, virus et protozoaires) peut être à l'origine de pathologies non infectieuses (Perdrix, 1997). Ces mécanismes peuvent être de nature inflammatoire ou allergique selon l'agent impliqué.

- *Mécanismes allergiques*

Les pathologies respiratoires d'origine allergique sont la broncho-alvéolite allergique extrinsèque (BAAE) qui est inscrite dans le tableau des maladies professionnelles (n°66 bis) et l'asthme professionnel.

La BAAE se caractérise, par un état pseudo-grippal (toux, fièvre, frissons, douleurs musculaires, hypoxie) pour les formes aiguës apparaissant 6 à 8 heures après l'exposition, et un amaigrissement, une toux et une dyspnée pour les formes subaiguës (plusieurs semaines d'exposition). Ces symptômes disparaissent généralement après l'arrêt de l'exposition. A chaque nouvelle exposition, les symptômes peuvent réapparaître et mener à une atteinte pulmonaire irréversible. La forme chronique (exposition à de petites quantités en continu) évolue globalement en associant une toux et une dyspnée. Les agents responsables de cette pathologie (courante dans le secteur professionnel avec milieu de travail chaud et humide, clos et poussiéreux) sont principalement les actinomycètes thermophiles et les champignons Mycromycètes tel que *Aspergillus* et *Penicillium*. Les mycotoxines pourraient également participer au déclenchement des BAAE.

L'asthme professionnel est associé à plus de 400 agents différents regroupant principalement les champignons. Il apparaît suite à l'exposition répétée à des agents présents dans le milieu professionnel.

- *Mécanisme inflammatoire*

La réaction inflammatoire constitue une réaction de défense de l'organisme face à une agression (biologique, chimique ou mécanique).

Dans un premier temps, l'exposition aux poussières peut être à l'origine de syndromes respiratoires non spécifiques (SRNS) tels que des irritations oculaires, nasales et de la gorge avec une production de médiateurs de l'inflammation.

Dans un second temps en terme de gravité sont regroupées d'une part les broncho-pneumopathies chroniques obstructives regroupant les bronchites chroniques et l'emphysème et d'autre part, les fièvres d'inhalation comme l'ODTS (Organic Dust Toxic Syndrom).

Les fièvres d'inhalation regroupent toutes les mycotoxicoses pulmonaires (fièvre du fermier, syndrome des silos, fièvres des travailleurs du coton). L'ODTS est observable dans un délai de 4 à 6 heures suivant une exposition à des particules fines associées à des agents biologiques tels que les endotoxines, *Aspergillus fumigatus* et *Penicillium*. Le rôle des mycotoxines est également évoqué dans le déclenchement de ces fièvres d'inhalation. L'ODTS se caractérise par un état fiévreux et des troubles gastro-intestinaux accompagnés de diarrhées qui disparaissent après un vingtaine d'heure. Principalement observable sur les nouveaux embauchés et les retours de vacances, l'évolution est souvent bénigne.

3.2.1.3 Mécanismes cancérigènes

L'action cancérigène de certaines mycotoxines est désormais reconnue par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC)[10].

Les mycotoxines concernées sont classées :

- en groupe 1 (effet cancérigène certain pour l'homme) : aflatoxine B1
- en groupe 2B (potentiellement cancérigène pour l'homme) : ochratoxine A, griséofulvine, aflatoxine M1, sterigmatocystine, fumonisine B1, acide penicillinique.

3.2.1.4 Maladies et autres plaintes recensées

En Annexe 9 sont présentés les effets sur la santé relatés en lien avec l'exposition aux bioaérosols ainsi qu'en Annexe 10 les études épidémiologiques réalisées sur des PFC (tous types de déchets traités). Il s'agit d'études transversales qui ont comparé l'importance des symptômes cliniques et paracliniques entre différents groupes de travailleurs et parfois des groupes témoins. Les infections les plus représentées sont liées à la présence du genre *Aspergillus*. L'aspergillose est une pathologie infectieuse liée à l'inhalation de spores présentes dans l'air. Globalement, les lésions n'apparaissent chez l'homme que si *Aspergillus* rencontre des conditions locales (abcès pulmonaires) ou générales (personnes immunodéprimées) favorables à leur implantation.

D'autres plaintes ont été rapportées dans la bibliographie mais qui ne sont pas toujours accompagnées de mesures environnementales permettant d'identifier l'agent responsable. Il s'agit :

- de troubles respiratoires et d'infections ORL (Heida et al., 1995). Les concentrations en bio aérosols étaient pour les bactéries totales inférieures à 28.103 UFC.m^{-3}, pour les bactéries Gram négatif de 3,6 à 9.103 UFC.m^{-3} et pour les champignons de 5,8 à 9.103 UFC.m^{-3} ;
- des irritations ORL et respiratoires (gorge et toux sèches) (Delaunay, 1997) ;
- des irritations oculaires (Delaunay, 1997) ;
- des troubles digestifs, nausées, vomissements, diarrhées (Lundholm *et al.*, 1980) pour des concentrations en bactéries totales de 3.10^{4} à 3.10^{5} UFC.m^{-3}. Une étude transversale (Ivens, 1999), menée dans le domaine des déchets (2412 collecteurs de déchets et 1460 témoins), a conclu à une association entre l'apparition de problèmes gastro-intestinaux et l'exposition aux bio aérosols (spores de champignons et microorganismes totaux) ;
- des maux de tête (Lundholm *et al.*, 1980).

[10] Les 5 catégories du CIRC : groupe 1 : l'agent (ou le mélange) est cancérigène pour l'homme, groupe 2A : l'agent est probablement cancérigène pour l'homme, groupe 2B : l'agent est un cancérigène possible pour l'homme, groupe 3 : l'agent ne peut être classé du point de vue de sa cancérigénicité pour l'homme, groupe 4 : l'agent est non cancérigène (1 seule substance).

3.2.2 Résultat du questionnaire sur les gênes ou désordres enregistrés auprès des chefs d'exploitation

L'exploitation du questionnaire sur les gênes ou désordres rencontrés par les agents et les chefs d'exploitation de SEDE Environnement permet de justifier le choix des agents retenus. Globalement, les gênes principalement rencontrées sur les PFC s'apparentent à des troubles digestifs et des gênes respiratoires pouvant être liés à la dispersion de poussières.

Sur les 16 chefs d'exploitation des PFC SEDE questionnés, 5 se sont plaints d'un ou plusieurs désordres suite à une journée de travail. Il s'agissait de désordres gastriques (3/16 des chefs d'exploitation), de gênes respiratoires de type toux sèche (3/16), de manifestations cutanées et oculaires (irritations oculaires : 1/16) et de troubles d'ordre général de type état fiévreux, migraine, saignements de nez (1/16).

Des gênes ou désordres ont également été recensés, par les chefs d'exploitation, chez leurs agents d'exploitation sur 5 plates-formes parmi les 17 (dont 3 sont communes à celles des chefs d'exploitation ressentant des gênes). Il s'agissait de désordres gastriques (3/17), de gênes respiratoires (3/17), de manifestations cutanées et oculaires (1/17) et de troubles d'ordre général (2/17). Ces troubles reprennent globalement ceux cités dans la bibliographie mais ne touchent pas l'ensemble de la population de travailleurs (plaintes sur 7 PFC sur les 17).

Toutefois, plusieurs limites peuvent être posées à ce questionnaire (présence de biais d'information). Ce questionnaire n'ayant pas été élaboré par un médecin, il reste donc assez subjectif et limité sur les types de gênes ou pathologies rencontrées. De plus, selon la disponibilité des chefs d'exploitation, certains questionnaires ont été complétés par téléphone. Ainsi, des omissions volontaires ou non ont pu être faites entre autre par manque de temps ou d'intérêt pour le sujet. De plus, l'exploitation est plus difficile pour les plaintes des agents qui sont collectées par les chefs d'exploitation. En effet, les chefs d'exploitation ne sont pas systématiquement informés de la santé des agents et ne sont pas tenus de leur demander.

D'autre part, la relation de causalité entre l'apparition de symptômes et l'exposition au travail est difficile à établir. En effet, des symptômes tels que des gastro-entérites peuvent être contractées en dehors du lieu de travail. Par ailleurs, le faible nombre de PFC et, par la même occasion, d'employés enquêtés limitent la représentativité des réponses à ce questionnaire. De plus, la présence de ces troubles n'implique pas pour autant qu'ils soient imputables aux agents biologiques (aucune mesure environnementale n'a été réalisée). A titre d'exemple, la présence de gaz tel que le NH_3, relativement courant sur ce type d'activité, peut participer à l'apparition de certains symptômes tels que les maux de tête, les saignements de nez. De même, les poussières organiques peuvent également participer à des gênes respiratoires.

3.2.3 Les agents et molécules retenus dans l'évaluation des risques

Concernant les agents et molécules biologiques retenus pour cette évaluation des risques, il s'agit principalement de familles d'agents. En effet, la liste des organismes se développant au cours du compostage étant exhaustive, il a été retenu des agents ou famille d'agents répondant à un ou plusieurs des critères suivants :

- des effets sur la santé ont été mis en évidence lors de précédentes études (dans le domaine du compostage ou activités similaires) ;
- il existe soit une relation dose-réponse ou le cas échéant, un seuil d'exposition maximale recommandé pour les agents biologiques ; soit une Valeur Toxicologique de Référence (VTR) pour les molécules d'origine biologique ;
- des études ont été menées afin de mesurer l'agent ou la molécule sur des PFC.

Les agents ou molécules retenus, répondant aux critères ci-dessus pour cette évaluation des risques sont : *Aspergillus fumigatus* ; les champignons totaux ; les bactéries totales ; les bactéries Gram négatif ; les actinomycètes thermophiles et les endotoxines. Bien que les effets des endotoxines sur la santé n'aient été démontrés que chez les travailleurs du coton (Rylander, 1994 ; Van der Werf, 1996), cet agent d'origine biologique a été retenu car sa présence est avérée sur les sites de compostage et des seuils ont été recommandés. Les mycotoxines n'ont pu être retenues de par la faiblesse des données et cela malgré la gravité des effets sur l'homme (effets cancérigènes).

3.3 Les seuils conseillés et valeurs guides retenus pour l'ERS

La réalisation d'une ERS nécessite la connaissance de relations dose réponse ou dose minimale infectante (DMI) afin de caractériser le risque. Toutefois, les données actuelles concernant les microorganismes restent limitées. Les données de référence sont principalement des seuils conseillés pour une exposition de 8h pour des familles d'agent et pour la voie par inhalation uniquement. Ces données sont issues pour la plupart d'observations des auteurs suite à l'apparition de symptômes chez des patients. Aucune relation dose-effet n'a été mise en évidence à l'heure actuelle et aucun consensus n'a pu être établi. L'ensemble des valeurs guides pour les agents retenus est présenté dans le tableau 5 qui suit. Il est à noter que les méthodes employées pour l'élaboration de ces valeurs sont peu détaillées (temps de prélèvement) mais utilisent principalement des impacteurs sur milieu solide (type Anderson).

Tableau 5 : Valeurs guides proposées pour les agents biologiques en milieu de travail

Agents biologiques	Valeurs guides conseillés (UFC.m^{-3})	Auteurs	Pathologies associées précisées par l'auteur
Bactéries totales	10^4 5.10^3 à 10^4	Malmros,1992 Poulsen, 1995 Heida, 1995 Sigsgarrd, 1990	
Bactéries Gram $^-$	10^3 2.10^4	Rylander, 1983 ; Sigsgarrd 1990 Dutkienwicz, 1989	
Champignons totaux	10^4 5.10^4	Heida, 1995 Dutkienwicz, 1989	
Champignons par espèce	5.10^2	Heida, 1995	
Actinomycètes thermophiles	10^6 2.10^4	Lacey, 1991 Dutkienwicz, 1989	BAAE, ODTS

Concernant les endotoxines, les valeurs proposées présentent des dénominations différentes selon les auteurs, il s'agit : de valeurs limites d'exposition (VLE) sur 8 heures de travail et spécifiques de certains milieux de travail ; de valeurs seuils et des valeurs guides pour des doses sans effet. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Relations dose réponse, valeurs seuils, valeurs guides et VLE proposées pour les endotoxines en milieu de travail dans la littérature

Type de valeurs	Valeurs (ng.m^{-3})	Auteurs	Environnement concerné	Type d'effet
Relation dose réponse	9 à 33	Castellan et al.,1987 et Rylander et al., 1985	Usine de coton	Obstruction aiguë des voies respiratoires
	10 à 45	Latza, Oldenburg et al. 2004	Usine de coton	Augmentation des symptômes bronchiques
	4	Milton et al. 1996	Industrie de la fibre de verre	Diminution de la fonction pulmonaire
VLE pondérée sur 8h	100 à 200	Sigsgaard, 1990	Usine de tri de déchets	
	5	DECOS (Pays Bas), 1998	NP	
	45	NHC, Pays Bas	NP	
Valeurs seuils	10	Michel, Huneau et al., 2006	NP	
	5 (sur 8h)	Zock, 1998	Industrie pomme de terre	Déclin fonction pulmonaire
	100	Donham,1995 et Reynolds, 1996	Elevage de porc	
	61.4	Donham, 2000	Elevage volaille	
	20	Sigsgaard, Jensen et al., 2004	Industrie papetière	
Valeurs guides	200	ICOH (Rylander, 1997)	NP	ODTS
	100		NP	Effets systémiques
	10		NP	Inflammation des voies aériennes
	9 à 170	Heeferik, 1996	NP	Sans effets

1ng.m^{-3} d'endotoxine correspond à 10 EU (Endoxin Unit)
NP : Non précisé

Les seuils proposés n'impliquent pas obligatoirement l'apparition de symptômes chez les travailleurs. Les experts s'accordent à dire qu'au delà de ces niveaux guides, des problèmes de santé peuvent se poser chez les travailleurs. En dessous, par contre, l'incertitude est totale sur le développement de problème de santé chez certains salariés, notamment en ce qui concerne les pathologies avec une réponse de type allergique. Les études menées ne rapportent que peu de cas de pathologies entre autre car les personnes les plus sensibles ne restent pas longtemps dans ce type d'activité et ne sont donc pas prises en compte dans les études. Les incertitudes sur la validité de ces seuils sont donc particulièrement élevées, ce qui explique que des groupes d'experts tels que l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) ne proposent pas de VLE (ACGIH, 2006). Ils proposent toutefois des valeurs limites d'actions à partir de concentrations dépassant le bruit de fond. En effet, des actions doivent être mises en place pour :

- une concentration sur un poste de travail 30 fois supérieure à la concentration de base mesurée dans l'air au site de référence pour des individus sains,
- une concentration 10 fois supérieure pour des gens ayant des symptômes associés.

Le site de référence des prélèvements de base peut être à l'intérieur ou à l'extérieur, selon la saison (ACGIH, 1999). À titre d'exemple, supposons que la concentration moyenne en endotoxine dans une porcherie soit de 1 000 UE/m³ d'air alors que la concentration extérieure (de base) était de 7 UE/m³ d'air. Ceci indique un niveau 142 fois supérieur à celui de base. En portant un masque avec valve de type FFP3, la concentration est réduite de 10 fois (de 1 000 à 100 UE/m³ d'air) et la limite d'exposition relative de 210 UE/m³ est donc respectée (30 fois la concentration de base de 7 UE/m³ d'air) pour des individus sains.

Les valeurs retenues pour l'ERS sont donc choisies par mesure conservatrice, c'est à dire qu'elles correspondent aux teneurs les plus protectrices pour le travailleur et les plus souvent citées dans les revues bibliographiques. Le récapitulatif des seuils recommandés retenus est présenté ci-dessous :

- 10^4 UFC.m^{-3} d'air pour les bactéries totales
- 10^3 UFC.m^{-3} d'air pour les bactéries Gram $^-$
- 10^4 UFC.m^{-3} d'air pour les champignons totaux
- 5.10^2 UFC.m^{-3} d'air pour chaque espèce de champignon (dont *Aspergillus fumigatus*)
- 2.10^4 UFC.m^{-3} d'air pour les actinomycètes thermophiles
- 5 ng.m^{-3} d'air pour les endotoxines

3.4 Evaluation de l'exposition

3.4.1 Potentiel d'exposition

3.4.1.1 Délimitation de la zone d'étude

La zone d'étude dans le cadre de cette évaluation des risques est définie par rapport aux limites cadastrales des PFC de SEDE Environnement traitant des boues de STEP.

3.4.1.2 Caractérisation de la population exposée et des voies d'exposition

- *Population exposée*

L'évaluation des risques sanitaires ne concerne que la santé des travailleurs des PFC SEDE Environnement. Cela représente sur l'ensemble des plates-formes, un effectif de 52 personnes employées par SEDE (sous traitants non inclus). Les caractéristiques de cette population ont été présentées dans le paragraphe 2.3.2, tableau 1.

Les risques vis-à vis des populations riveraines et des autres employés de SEDE Environnement (localisés sur les agences et le siège social) ne font pas l'objet de cette étude.

- *Voies d'exposition*

Les agents biologiques et les composants issus de ces agents peuvent être transmis aux travailleurs par trois voies d'exposition directes qui sont :

- l'inhalation, considérée comme la voie d'exposition principale pour les travailleurs, qui expose les muqueuses des voies aériennes ainsi que les poumons à des particules dont le diamètre aérodynamique définit l'étage des voies aériennes touchées. L'inhalation peut également occasionner une contamination digestive dans le cas des particules les plus grosses (diamètre aérodynamique >10µm) qui s'impactent au niveau des voies aériennes supérieures et sont dégluties par la suite ;
- l'ingestion, essentiellement par l'intermédiaire des mains sales portées à la bouche avec le tabagisme ou la consommation d'aliments sur le lieu de travail et l'ingestion de particules inhalées (Cf. paragraphe précédent sur l'inhalation) ;
- le contact cutané avec la peau et les muqueuses. Ceci comprend les conjonctives.

Toutefois, au regard de la faiblesse des informations concernant les voies d'exposition par ingestion et par contact cutané, celles-ci ne seront pas étudiées dans le cadre de ce mémoire. Il est à noter que pour le contact cutané, la peau agit comme une barrière de protection vis à vis de l'extérieur contrairement aux voies respiratoires. Toutefois, la partie gestion prendra en compte ces voies d'exposition dans les mesures préventives à mettre en place.

3.4.2 Scénarios d'exposition

En fonction du poste exercé et des présences sur les PFC, les durées d'exposition aux agents biologiques varient. De grandes différences existent entre les sites en fonction des tâches affectées aux agents d'exploitation mais également aux chefs d'exploitation (travail à temps partiel sur les PFC, démarchage auprès des clients, gestion de plusieurs plates-formes…).

Ainsi, le temps de travail des chefs d'exploitation sur les PFC s'échelonne entre 20% et 80% dans les zones empoussiérées et le reste à l'extérieur du site ou dans les bureaux administratifs. Le scénario 1, s'attachera à étudier le niveau de risque de ces chefs d'exploitation.

Le scénario 2 s'intéressera aux agents d'exploitation pour lesquels le temps de travail varie de 80 à 90% dans les chargeurs et de 10 à 20% entre la maintenance et les pauses. Pour le personnel administratif, l'exposition dans les zones empoussiérées n'est qu'occasionnelle, il ne fera donc pas l'objet d'un scénario d'exposition.

3.4.3 Quantification de l'exposition

Les concentrations mesurées sur différentes PFC de boues de STEP sont présentées en Annexe 10 (études épidémiologiques réalisées en Allemagne, au Danemark et aux Pays Bas) et Annexe 11, tableau 1 (mesures de concentrations de la littérature). Les méthodes de mesure y sont rarement précisées (préleveur de type Anderson quand cela est précisé), d'autant plus que l'ancienneté de ces études est relativement importante. De plus, aucune étude ne précise les concentrations en bactéries totales pour le compostage de boues de STEP hormis les études épidémiologiques de l'Annexe 10. Des mesures de bruit de fond sont également présentées en Annexe 11, tableau 2. Contrairement aux agents chimiques qui sont spécifiques, pour la plupart, d'activités industrielles, les agents biologiques sont ubiquitaires pour la plupart. La connaissance du bruit de fond est donc essentielle pour la comparer aux valeurs sur les PFC. Les données de la littérature sont également très variables selon les méthodes employés (appareil de mesure, technique utilisé, temps de mesure) et le site choisi. Pour les endotoxines, le bruit de fond moyen varie entre 0,3 et 4,4 UE/m^3 (par convention 1UE correspond à 0,1ng/m^3) en zone urbaine et entre 1,3 et 30UE/m^3 en zone industrielle (rapport d'étude endotoxine, INERIS, 2007).

La réalisation de mesures sur une des plates-formes SEDE Environnement, située à Tarascon (13), apparaissait donc comme essentielle afin d'évaluer les concentrations en bio aérosols sur le site et dans les chargeurs au regard des données de la littérature. Les étapes de traitement choisies pour les mesures des agents retenus dans l'ERS (hormis les endotoxines) étaient : le mélange des produits entrants, la fermentation et le criblage.

Elles ont été retenues car il s'agit d'étapes particulièrement émettrices de poussières. Pour chacune de ces étapes, trois réplicats ont été réalisés dans un chargeur avec filtre à poussières (type P3) et en ambiance soit un total de 6 mesures pour chacune des étapes de traitement choisies. Un blanc a été réalisé en dehors du site de compostage, sur un espace de stationnement, à une distance de 500 m en amont du site (suivant la direction du vent). Ces résultats sont présentés dans le tableau 7. Afin d'avoir un meilleur aperçu des résultats obtenus, ces concentrations sont également représentées sous la forme de graphiques en Annexe 12. Toutefois, ils doivent être maniés avec prudence. En effet, ces représentations ont été élaborées à partir des moyennes des concentrations des 3 réplicats pour chaque site choisi et cela lorsque aucune des trois valeurs ne paraissait aberrante. Dans le cas contraire, les données grisées dans le tableau 7 n'ont pas été incluses dans ce calcul afin qu'elles ne minimisent pas le résultat obtenu (hypothèse majorante de l'exposition). Il est également à noter que pour les concentrations précédées du signe supérieur (>) sur les 3 réplicats, la moyenne a tout de même été calculée bien que celle-ci sous-estime la concentration réelle d'agents biologiques dans l'air. Cette absence de précision des résultats présentés par le laboratoire s'explique soit par des concentrations trop faibles dans l'air (pour les concentrations « inférieures à »), soit par des mauvais choix dans les dilutions étudiées pour les concentrations « supérieures ».

Tableau 7 : Résultats des mesures d'agents biologiques réalisées à Tarascon par le laboration CAE (Veolia)

Etapes de traitement et localisation des réplicats	Culture 22°C (UFC/m^3)	Culture 36°C (UFC/m^3)	Gram $^-$ (UFC/m^3)	Actinomycètes thermophiles (UFC/m^3)	Champignons 22°C (UFC/m^3)	*A.fumigatus* (UFC/m^3)
Blanc	$6{,}4.10^2$	$3{,}0.10^2$	$1{,}1.10^2$	<22	$3{,}8.10^1$	<22
	>$5{,}2.10^3$	$5{,}7.10^2$	<3.10^1	3.10^1	$6{,}1.10^2$	3.10^1
	$8{,}5.10^3$	$4{,}2.10^2$	<$2{,}5.10^1$	<$2{,}5.10^1$	$6{,}1.10^2$	$2{,}5.10^1$
Au mélange des boues						
Ambiance	$1{,}8.10^7$	$2{,}8.10^7$	$5{,}9.10^5$	$6{,}6.10^5$	$3{,}3.10^5$	$1{,}3.10^5$
	$1{,}6.10^7$	$1{,}9.10^7$	$3{,}2.10^5$	$1{,}6.10^6$	$6{,}4.10^5$	$3{,}2.10^5$
	$3{,}9.10^5$	$7{,}4.10^6$	$1{,}0.10^5$	$6{,}9.10^5$	$2{,}6.10^5$	$1{,}6.10^5$
Chargeur avec filtre	$1{,}3.10^3$	$3{,}1.10^3$	<$8{,}1.10^1$	$2{,}1.10^3$	$1{,}6.10^2$	<$8{,}1.10^1$
	>$1{,}2.10^4$	$6{,}6.10^3$	$2{,}9.10^3$	$3{,}1.10^2$	$1{,}4.10^3$	$3{,}1.10^2$
	$5{,}9.10^2$	$2{,}6.10^3$	<$6{,}1.10^1$	$2{,}0.10^3$	$8{,}2.10^1$	<$6{,}1.10^1$
A la fermentation						
Ambiance	$2{,}9.10^7$	$3{,}3.10^7$	$1{,}6.10^6$	$2{,}5.10^5$	$1{,}7.10^5$	<$6{,}3.10^4$
	$3{,}3.10^7$	$2{,}8.10^7$	$5{,}1.10^5$	<$5{,}6.10^4$	1.10^5	<$5{,}6.10^4$
	$7{,}2.10^6$	$5{,}3.10^6$	$1{,}2.10^5$	$2{,}5.10^5$	1.10^5	<$6{,}2.10^4$
Chargeur avec filtre	$1{,}9.10^3$	$3{,}3.10^3$	$8{,}0.10^1$	$1{,}3.10^3$	$5{,}3.10^1$	<$8{,}0.10^1$
	$1{,}0.10^4$	$3{,}6.10^3$	$2{,}4.10^3$	$1{,}0.10^3$	$1{,}2.10^2$	<$7{,}4.10^1$
	$1{,}5.10^4$	$1{,}3.10^4$	$9{,}3.10^2$	$1{,}2.10^3$	$1{,}1.10^2$	<$8{,}5.10^1$
Au criblage						
Ambiance	$1{,}3.10^8$	$8{,}5.10^7$	$2{,}0.10^6$	$1{,}0.10^6$	$5{,}9.10^4$	<$5{,}9.10^4$
	$9{,}1.10^7$	$7{,}3.10^7$	$1{,}3.10^6$	$3{,}3.10^5$	$4{,}8.10^5$	<$4{,}8.10^4$
	>$2{,}8.10^7$	$7{,}5.10^7$	$3{,}0.10^5$	1.10^5	<$9{,}4.10^4$	<$5{,}2.10^4$
Chargeur avec filtre	>$1{,}4.10^4$	>$1{,}4.10^4$	<$7{,}2.10^1$	$2{,}0.10^3$	$2{,}4.10^2$	<$7{,}2.10^1$
	>$1{,}6.10^4$	$1{,}3.10^4$	$6{,}4.10^2$	$3{,}5.10^3$	$6{,}9.10^2$	<$8{,}0.10^1$
	>$1{,}5.10^4$	$1{,}6.10^4$	$6{,}6.10^3$	$4{,}1.10^3$	$5{,}5.10^2$	<$7{,}5.10^1$

L'exploitation de ces résultats met en évidence plusieurs remarques :

D'une part, le site de compostage présente un impact important sur l'environnement. Nous pouvons observer une différence de concentrations entre le bruit de fond et les ambiances de travail de l'ordre de 3 log pour les champignons dont *A.fumigatus* et de plus de 4 log pour les autres agents biologiques (Annexe 12, figure 1).

D'autre part, il existe un abattement de l'ordre de 2 à 3 log selon les étapes de traitement et la concentration à l'intérieur des cabines des chargeurs. Ceci met en évidence l'efficacité de la filtration. Par rapport au bruit de fond, les concentrations dans les chargeurs sont sensiblement identiques pour les bactéries cultivées à 22°C et les champignons. Cet abattement est moins significatif pour les bactéries cultivables à 36°C, les bactéries Gram$^-$ et les actinomycètes thermophiles. Ceci s'explique car ces organismes sont peu représentés dans des environnements naturels (tel que celui du bruit de fond), et sont particulièrement significatifs du procédé de compostage (aérosolisation pour les bactéries totales et caractéristiques du compostage pour les actinomycètes et les Gram$^-$).

Pour les endotoxines, 3 mesures ont été réalisées : une en ambiance au niveau du criblage, une dans un chargeur équipé de filtre à poussière de type P3 au mélange et une dans un chargeur sans filtre au criblage (uniquement un filtre papier). Ces mesures n'ont pu être reproduite de par la durée de chaque prélèvement (3 heures par point de mesure). Les résultats des mesures d'endotoxines sont présentés dans le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : Résultats des mesures d'endotoxines réalisées sur le site de Tarascon (analyse par laboratoire agréé)

	Criblage (mesure d'ambiance à 2m du crible)	Dans chargeur avec filtre papier au criblage	Dans chargeur avec filtre de type P3 au mélange
Concentration en endotoxines (ng/m^3 d'air)	1414,78	2,81	1,53

Les résultats présentés dans le tableau 8 mettent en évidence une concentration élevée en endotoxines à proximité du poste de criblage (2m du cribleur). L'abattement entre la concentration en ambiance et celle dans le chargeur équipé uniquement d'un filtre papier est de l'ordre de 3 log. Pour le chargeur avec filtre de type P3, la teneur en endotoxine est du même ordre de grandeur. Ces concentrations dans les chargeurs sont proches de celles retrouvées en zone industrielle (bruit de fond de l'ordre de 0,13 à 3 ng/m^3).

3.5 Caractérisation des risques

Comme définit précédemment, en l'absence de relations doses-réponses pour les agents biologiques et la voie d'exposition retenue, la caractérisation du risque ne peut être présentée sous la forme d'une expression quantitative du risque. Ainsi, c'est sous une forme qualitative que cette évaluation du risque sera définie. Il est important de rappeler que la comparaison des niveaux d'exposition mesurés avec les valeurs seuils recommandées doit être faite avec prudence. En effet, les méthodes de prélèvement utilisées n'étant pas les mêmes, les incertitudes sont nombreuses sur la validité de cette analyse et sur la compatibilité des concentrations obtenues. En effet, les prélèvements par impaction ont été reconnus comme étant à l'origine de sous-estimations des concentrations dans l'air (cette méthode nécessite des temps de prélèvement très courts pour assurer un nombre de colonies exploitables sur boite de Pétri et ne permet pas de mettre en évidence les agents non cultivables). Ceci implique que les seuils proposés ont peut être sous estimé les véritables concentrations à l'origine de pathologies chez l'homme. Toutefois, par mesure conservatrice, nous utiliserons ces seuils dans l'attente de nouvelles données avec des méthodes normalisées. Ainsi, nous pouvons observer que certains de ces seuils sont dépassés sur les postes de travail.

Comme le montre les droites de référence de ces seuils sur les graphiques de l'Annexe 12, ceux-ci sont dépassés pour tous les paramètres dans les 3 ambiances sélectionnées (à l'extérieur des engins). De même, la concentration en endotoxines au niveau du poste de criblage dépasse très largement le seuil de 5ng/m^3 (dépassement de 3 log) qui constitue un niveau sans risque. Pour une concentration supérieure à 200ng/m^3 d'air, des syndromes de type ODTS peuvent apparaître (source ICOH : Commission internationale de santé au travail). Ainsi pour le scénario 1, qui concerne les chefs d'exploitation, quel que soit le temps passé sur la plate-forme, le passage dans les zones d'ambiance implique une exposition aux agents biologiques supérieure aux seuils conseillés. Cette exposition pourrait donc présenter un risque par inhalation de nature infectieux (pour *Aspergillus* essentiellement), allergique à long terme (pour les champignons et les actinomycètes) ou inflammatoire (pour les endotoxines produites par les bactéries Gram négatif).

Concernant les agents d'exploitation qui passent plus de 80% de leur temps dans les engins (scénario 2), ces mesures ont mis en évidence un dépassement des seuils uniquement pour les bactéries Gram négatif pendant le mélange et la fermentation et les bactéries totales et Gram négatif pendant le criblage. Pour les bactéries cultivables à 22°C, une réserve doit être mise quant au dépassement du seuil qui reste très limité et proche de la concentration présente dans le bruit de fond. De même, les dépassements

du seuil des bactéries Gram négatif au mélange et à la fermentation ne s'appuient que sur un seul réplicat. Pour les endotoxines, les concentrations au sein des engins (avec filtre poussières papier ou de type P3) sont inférieures au seuil recommandé. Pendant environ 10% de leur temps, les agents sont exposés dans les zones d'ambiance ou à proximité. Comme pour le scénario 1, cette exposition pourrait impliquer des risques de nature infectieux, inflammatoire ou allergique.

Le poste de travail le plus préoccupant reste toutefois le criblage où plusieurs dépassements par rapport aux seuils recommandés sont observés en ambiance et au sein des engins et nécessitera donc la mise en place de nouvelles mesures pour limiter l'émission de poussières.

3.6 Limites de l'évaluation des risques

Plusieurs limites peuvent être posées à cet outil d'ERS.

- *Choix des agents biologiques et des valeurs seuils de l'ERS*

La première limite de cette étude est liée aux lacunes actuelles en terme de connaissances scientifiques sur les seuils d'acceptabilité et les effets des agents biologiques sur la santé des travailleurs. Ce point sera plus longuement évoqué dans le paragraphe 4.2 ainsi que la nécessité de normaliser les méthodes de mesure employées. Ces lacunes impliquent de nombreuses incertitudes sur les conséquences prolongées d'une exposition aux agents biologiques sur les PFC. Les études menées (principalement des études transversales) ont tendance à minimiser le risque pour la santé de l'exposition à un environnement professionnel du fait de l'effet bonne santé des travailleurs (travailleurs sains). En effet, ce biais de sélection implique que les personnes interrogées sont en bonne santé. Dans le cas contraire, ils auraient probablement changé de travail et n'auraient donc pas été inclus dans les études.

De plus, l'élaboration de ce seuils peut être critiquée au regard de leur pertinence. Ceux-ci ont été proposés par des auteurs suite à l'apparition de symptômes chez certaines personnes. Il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de cette population (age, prédisposition tel que l'asthme, l'atopie) et les expositions potentielles à d'autres agents toxiques.

Pour le choix des agents retenus pour cette ERS, il s'agit uniquement de familles d'agents hormis *Aspergillus fumigatus* et les endotoxines. Il était impossible, au regard des connaissances actuelles, d'étudier des espèces spécifiques et ceci en l'absence ou l'incertitude sur les relations dose-effet. De plus, la présence dans le processus de compostage des familles d'agents retenues pour cette ERS n'implique pas pour autant de

risque pour les travailleurs car seules certaines espèces sont pathogènes ou opportuniste chez l'homme.

- *Population concernée*

Une limite peut être émise sur la réalisation du questionnaire. En effet, celui-ci était complété par les chefs d'exploitation qui ont pu omettre des informations sur la santé des employés de leur PFC (volontairement ou non). Dans le cadre d'une étude épidémiologique, il est nécessaire de faire réaliser ce questionnaire par un organisme indépendant pour garantir la validité des résultats.

- *Exposition*

Cette évaluation des risques a étudié uniquement la voie d'exposition par inhalation. La part respective des autres voies de contamination dans l'apparition de pathologies est également difficile à attribuer actuellement. En effet, la littérature concernant le compostage a principalement étudié la voie de contamination par inhalation de bio aérosols. Toutefois, la contamination par ingestion directe via les aérosols déglutis ou indirect par le contact main bouche reste très limité. Il est uniquement conseillé des mesures de gestion afin de limiter les risques par ces autres voies d'exposition.

Plusieurs limites sont également à apporter aux mesures réalisées sur le terrain dans le cadre de cette ERS. D'une part, ces mesures n'ont pu être réalisées que sur une seule plate-forme et limitées à 3 postes de travail. Ceci ne permet pas de caractériser l'exposition des travailleurs pour l'ensemble des PFC (selon la configuration présente et le procédé employé) et en fonction des conditions environnementales (variabilité de la distribution dans le temps : effets saisonniers, vitesse du vent). Toutefois, le choix du site a été justifié par sa configuration et son fort taux d'empoussièrement afin de maximiser l'exposition aux agents d'origine biologique. Il est à noter que l'exposition des travailleurs a pu également être maximisée en prenant l'ambiance de ces étapes du traitement. En effet, il ne s'agissait pas de mesures d'exposition individuelle pendant toute une journée (mesures à proximité des agents pendant les différentes tâches de travail). Cette remarque est d'autant plus pertinente pour les chefs d'exploitation pour lesquels les temps d'exposition et zones de travail sont plus variables. Il est également à noter que ces derniers éviteront spontanément le passage à proximité des postes en activité tel que le criblage afin de limiter leur exposition aux poussières. De plus, de par la présence dans l'air d'agents non cultivables à cause de l'incompatibilité avec le milieu de culture mais également des cellules non viables qui peuvent préserver leur caractère toxique, la sous estimation des concentrations peut être très importante (Amman et al., 1995 et Blomquist, 1994).

Il est également à noter que les conditions de prélèvement restent difficiles à maîtriser pour des sites comme les PFC. En effet, avec l'ouverture des portes du chargeur dans les zones empoussiérées à chaque changement du milieu liquide des préleveurs, le renouvellement de l'air, assuré par la filtration n'est pas maintenu pendant toute la durée du prélèvement. En effet, les poussières ont pu entrer dans les chargeurs et ainsi augmenter les concentrations obtenues. Toutefois, le faible espace dans les cabines ne permettait pas à l'opérateur de rester dans l'engin pendant la prise de mesure.

- *Caractérisation du risque*

Comme cela a été mentionné dans les parties 3.4.3 et 3.5, plusieurs limites se posent à la comparaison des mesures de concentration sur le site avec les seuils de référence. En effet, la réalisation de moyenne de concentrations et la comparaison avec des seuils dont les méthodes de mesure, temps de prélèvement et appareil utilisé diffèrent totalement doivent être exploités avec prudence et mentionné au cours de la diffusion des résultats. Le choix d'un prélèvement en milieu liquide a été justifié par plusieurs paramètres : d'une part des études ont été réalisées par Veolia pour comparer son efficacité par rapport à d'autres préleveurs (stress des organismes plus faible, pas de saturation du milieu, possibilité de réaliser des analyses variées tel que la PCR). D'autre part, l'espace dans les chargeurs ne permettait pas de mettre en place d'appareil plus volumineux et, pour finir, le temps imparti pour la réalisation des mesures ne permettait pas de mettre en place de préleveur de type Anderson.

De plus, cette caractérisation des risques, par son caractère qualitatif, ne permet pas de mettre en évidence les différentes susceptibilités des travailleurs (prédispositions génétiques) ou de faire un lien en l'apparition de symptômes et l'âge ou la durée de travail. Pour cela, une étude plus poussée avec la réalisation d'analyses biologiques (mesure des médiateurs de l'inflammation et anticorps), de questionnaires sur les caractéristiques médicales des travailleurs seraient nécessaires ainsi que l'élaboration de relations doses réponses semblent essentiels pour les justifier.

Pour finir, les pathologies associées à la présence de microorganismes peuvent être non spécifiques ou être le résultat d'une agression par un agent chimique tel le NH_3. Il n'est donc pas impossible que des synergies existent entre ces agents biologiques et chimiques. Ceci remet en question la validité d'une évaluation des risques sanitaires d'origine biologiques dissociée des agents chimiques.

4 Gestion des risques sanitaires d'origine biologique et mesures compensatoires pour limiter l'exposition

4.1 Préconisations techniques et organisationnelles pour limiter les expositions et sensibilisation aux règles d'hygiène

Il est difficile, sinon impossible, de réduire à zéro l'exposition aux agents biologiques dans le compostage mais tout doit être entrepris pour minimiser les teneurs. Comme l'indique l'article L. 4121-2 du Code du travail, l'employeur doit mettre en œuvre des mesures pour respecter les principes de prévention. Cela implique, parmi ces principes, d'éviter les risques (en limitant l'émission de poussières) et de les évaluer lorsqu'ils ne peuvent être évités afin de mettre en place prioritairement des mesures de protection collective par rapport aux mesures de protection individuelle.

4.1.1 Evolution des techniques pour limiter l'émission de bio aérosols

Les choix techniques sur les PFC peuvent participer à augmenter l'exposition aux poussières et par la même occasion aux bio aérosols. Il est à noter, d'après la bibliographie, que les étapes de criblage, de broyage et de retournement des andains sont particulièrement émettrices de poussières. De même, la circulation des engins entraîne une remise en suspension de ces poussières fines (Cf. Annexe 7, photographie 5).

La mise en place de filtres à poussières de type P3 sur les engins est une première étape pour limiter l'exposition aux bio aérosols. Toutefois, elle doit s'accompagner d'autres solutions techniques pour agir en amont au niveau de l'émission de poussières. Ceci implique, d'une part, la remise en cause des techniques employées et d'autre part des engins utilisés. Il serait donc intéressant de mettre en place une étude comparative du taux d'empoussièrement généré en fonction des techniques et engins disponibles.

Une action peut être menée au niveau des postes particulièrement émetteurs de poussières tel que le criblage ou les retournements. En effet, la mise en place de système de brumisation d'eau à ces postes, destinée à alourdir les poussières pour faciliter leur sédimentation, pourrait participer à limiter le taux d'empoussièrement de l'air. Cette technique est actuellement expérimentée sur une PFC SEDE en bâtiment fermé. Elle semble participer globalement à la diminution de l'empoussièrement mais également du risque d'incendie. Il est essentiel d'évaluer pour chaque PFC, un volume d'eau brumisée suffisant pour la sédimentation (principalement pendant les périodes estivales pour les sites ouverts) sans pour autant entraîner une humidification trop importante du sol. En effet, l'objectif n'est pas de rendre le sol glissant.

Une étude menée sur une PFC fermée (Epstein et al., 2001) a montré une diminution de concentration en poussières, endotoxines et *A.fumigatus* de 90% suite à la mise en place de plusieurs mesures. Ces mesures étaient l'humidification du compost mais également l'augmentation de l'humidité des produits entrants ainsi que la modification du débit d'air au sein des andains. Toutefois, aucune étude n'a mis en évidence les différences de concentrations de ces agents suivant le type d'aération appliquée (par aspiration ou insufflation d'air). Ces auteurs conseillaient également l'utilisation de balayeuses, surtout pour les PFC avec des climats secs, afin de limiter l'accumulation et l'envol de poussières sur le sol. Cependant, l'efficacité des balayeuses n'a pas été prouvée sur certaines PFC SEDE (climat sec) pour lesquels le passage de ces engins entraînaient la remise en suspension des poussières. Une humidification préalable des poussières (possible avec certaines balayeuses équipées d'une réserve d'eau) permettrait de limiter cet envol et d'atténuer les concentrations de poussières sur le site.

Afin d'évaluer l'efficacité de ces techniques et ainsi les étendre à toutes les PFC, il est difficilement envisageable, d'un point de vue économique, de reproduire des mesures d'agents biologiques. Toutefois, une solution alternative peut être envisagée via l'équipement d'un appareil portatif de mesure des poussières totales permettant d'évaluer le taux d'empoussièrement (ainsi que les types de poussières PM10, PM5…). Il a été montré que la majorité des agents biologiques (mis à part les spores de champignons) se fixe à un support tel que les poussières et les gouttelettes lorsqu'ils sont dans l'air. Ainsi, en diminuant l'empoussièrement sur les PFC, l'exposition aux bio aérosols tendra à diminuer également. Toutefois, aucune étude n'a permis de corréler ces deux paramètres par une relation mathématique.

4.1.2 Uniformisation des moyens de protection

La politique de SEDE est, dans un second temps, de mettre en place prioritairement des mesures de gestion collectives puis secondairement des protections individuelles. Ces mesures doivent être compatibles avec l'exploitation et protéger les employés contre les expositions aux agents biologiques. La mise en place de l'ensemble de ces moyens doit être planifiée sur tous les sites et préconisée auprès des sous traitants (propriétaires des engins).

4.1.2.1 Protections collectives

La mise en place de protections collectives vise à protéger une majorité des travailleurs de chaque PFC. Globalement, ces protections sont destinées principalement aux agents d'exploitation et dans une moindre mesure aux chefs d'exploitation qui sont du coup les plus exposés aux agents biologiques.

L'une des étapes essentielles dans la gestion du risque lié aux agents biologiques est la mise en place de filtre à poussières et à charbon actif (pour les gaz) sur l'ensemble du parc d'engins présents sur les PFC. Il s'agit de l'équipement le plus efficace et le moins contraignant à l'heure actuelle pour limiter l'exposition aux poussières (paragraphe 2.3.3 sur les filtres P3) pour les employés travaillant dans les engins toute la journée. Sa mise en place nécessite également l'organisation de son entretien afin d'assurer son efficacité. A l'heure actuelle, une mesure de dépression dans l'engin indique lorsque le filtre est colmaté. Un temps est donc nécessaire entre le déclenchement de cette alarme et le réapprovisionnement du matériel (entretenu ou neuf), ce qui implique de nouveau une exposition des travailleurs. Le colmatage de ce type de filtre étant directement lié au taux d'empoussièrement de chaque PFC, il est donc essentiel de définir pour chacune d'entre elles les modalités d'entretien de celui-ci (temps de fonctionnement avant changement du filtre) avec les chefs d'exploitation et d'assurer un changement rapide du matériel suite à un colmatage. Ces modalités peuvent être incluses dans l'outil Optimaint (logiciel de rappel des tâches à effectuer) afin qu'un contrôle régulier de son entretien soit assuré.

La seconde étape dans la mise en place de protections collectives concerne des mesures d'amélioration des locaux sanitaires sur certaines PFC. Ceci implique pour le confort des employés : la présence de douches individuelles adaptées, de vestiaires séparés pour les vêtements civils et de travail, des prises d'eau avec eau chaude et eau froide et des savons antiseptiques à la disposition des salariés.

- Concernant tout d'abord les douches, la note interne du 12/14/2006 rédigée par le directeur de SEDE Environnement rappelle que le temps de travail journalier doit inclure « *une période de 15 minutes à l'issue du travail pour la douche, non assimilée à du temps de travail effectif et rémunérée* ». Il est précisé qu' « *en raison de la nature salissante de l'activité de compostage, la douche est obligatoire par mesure d'hygiène* ». Actuellement, sur les 17 PFC, 15 en sont équipées (dont une ne fonctionne pas, l'action est en cours). Toutefois, celles-ci ne sont utilisées que sur 10 PFC. Les raisons évoquées par les employés sont prioritairement une préférence pour se doucher chez soi mais également le manque d'intimité ou d'accessibilité (2 PFC pour lesquelles des travaux vont être réalisés) et des problèmes liés à l'alimentation d'eau chaude (cumulus défaillant). Toutefois, ce dernier point peut mettre en évidence un manque de motivation des chefs d'exploitation à imposer la douche aux employés récalcitrants et donc de les faire réparer. Il existe également des limites pour certaines plates-formes, pour lesquelles l'alimentation d'eau n'est pas assurée par un réseau et nécessite la mise en place de réserve de stockage ou de puit. En effet, la garantie de potabilité de l'eau n'étant pas assurée,

certains employés réclament la réalisation d'analyses. Ces mesures ont donc été prévues avec les chefs d'exploitation concernés.

- Concernant la mise en place de savons antiseptiques, elle est généralisée sur une majorité des PFC (15 sur 17). Toutefois, il est à noter que l'absence d'eau chaude sur toutes les prises d'eau peut limiter le nettoyage des mains chez certains employés. Ce point concerne actuellement 6 PFC (action en cours).

- Pour les vestiaires, les équipements de protection ainsi que les vêtements civils doivent être séparés. Il s'agit de mesures d'hygiène appropriées permettant de réduire le risque de dissémination des poussières hors du lieu de travail. Sur les 17 PFC, 9 sont équipées de vestiaires avec une séparation physique. Pour les PFC équipées de bungalow comme locaux administratifs et sanitaires et dont la taille est insuffisante, il doit être envisagé l'ajout de nouveaux bungalows prévus à cet effet.

Il serait également souhaitable de mettre à disposition des employés un dispositif de lavage oculaire (douche oculaire). En effet, des gênes suites à des poussières dans l'œil ont été signalées par les employés. Des collyres, prescrits par le médecin du travail, sont déjà présents sur les sites. Toutefois, il est nécessaire que les chefs d'exploitation s'assure régulièrement de leur réapprovisionnement.

La troisième étape est la mise en place de véhicule pour limiter la circulation à pied sur les PFC (principalement concernés : les chefs d'exploitation). En plus de prévenir le risque d'écrasement, l'utilisation du véhicule permet de limiter l'exposition aux poussières. Cela implique la présence d'une climatisation pour éviter l'ouverture des fenêtres et ainsi l'exposition aux poussières. Cette mesure ne peut s'appliquer qu'aux PFC où la circulation de véhicules est importante (pour les PFC avec de faibles surfaces, le véhicule serait inutile). Des véhicules sont déjà mis en place sur trois PFC.

4.1.2.2 Protections individuelles

Les employés travaillant à proximité des boues et du compost doivent tous être équipés d'équipement de protection individuelle (EPI) afin de limiter l'exposition aux agents biologiques. Parmi ces équipements, il est important de privilégier la qualité des gants et des masques. Ainsi, il a été fixé que chaque employé devait avoir à sa disposition des gants de travail oléohydrofuge de qualité 4232 (définit par la norme EN 388[11]) et des masques FFP3 avec valve (protection maximale) dont le conditionnement (emballé à l'unité ou par boîte de 10) sera choisi en fonction des préférences des employés. Ces EPI sont essentiels lors d'action de maintenance ou de prélèvements.

Concernant les autres EPI (bleus de travail ou autres tenues réfléchissantes), le nettoyage doit être assuré régulièrement (contrat de nettoyage avec société prestataire) et rangés dans un endroit spécifique (vestiaires séparés des vêtements civils). Ce point est mis en application sur l'ensemble des PFC avec des employés SEDE. Pour les sous-traitants, par contre, ceci n'est pas toujours respecté et ne peut être exigé par SEDE.

4.1.2.3 Respect du code du travail et du règlement intérieur

Le règlement Hygiène et Sécurité, élaboré pour chaque PFC, définit le comportement de chaque employé sur son lieu de travail. Parmi les obligations relatives à l'hygiène et au comportement, il est rappelé l'interdiction de fumer, manger et boire sur le lieu de travail (sauf espace mis à disposition à cet effet) et donc dans les chargeurs afin de limiter le contact main bouche et par conséquent l'exposition aux agents biologiques.

L'interdiction de fumer sur les PFC est justifiée pour trois raisons. Il s'agit d'éviter le risque d'incendie qui est important sur les PFC de par la nature des déchets, de respecter des règles d'hygiène en évitant le contact main bouche et de répondre au décret n° 2006-1386 du 15 novembre 2006, pris en application de l'article L. 3511-7 du Code de la santé publique. Ce décret fixe les conditions d'application de l'interdiction de fumer dans les lieux à usage collectif et de travail, et renforce la réglementation jusqu'alors applicable. En cas de non-respect, le contrevenant ainsi que le propriétaire du site sont soumis à une condamnation pécuniaire. Afin de faciliter l'application de cette loi encore négligée sur certaines PFC, des zones fumeurs ont déjà été mises en place sur 3 PFC. Il ne s'agit, en aucun cas, d'une obligation réglementaire pour le responsable du site. Toutefois, le tabagisme dans les engins y est maintenu (sur les 3 PFC avec une zone fumeur et sur 1 PFC non équipée). Il est également envisageable, afin de faire respecter cette loi, de faire participer la médecine du travail. Des programmes d'aide pour faciliter l'arrêt du tabagisme chez les fumeurs qui le souhaitent sont envisageables et proposés par la médecine du travail (conseil formulé par l'inspection du travail au cours du CHSCT du 27 juin 2008).

Ce dernier point soulève le problème de la responsabilité des chefs d'exploitation pour faire respecter la loi mais également les règles définies dans le règlement hygiène et sécurité de chaque PFC. Il existe actuellement un motivation trop limitée de ces derniers à faire appliquer ces recommandations et à sanctionner le cas échéant les contrevenants.

---

[11] Les quatre chiffres dénominatifs définit par la norme EN 388 et inscrits sur les gants, correspondent au degré de protection contre les risques mécaniques suivant : l'abrasion (de 1 à 4), la coupure(de 1 à 5), la déchirure (de 1 à 4) et la perforation (de 1 à 4)

4.1.3 Mise en place de procédure

Afin de limiter l'exposition aux agents biologiques au cours de certaines tâches plus sensibles tels que le prélèvement d'échantillons, le ramassage de plastiques et le nettoyage des filtres et du matériel, des procédures doivent être mises en place pour définir la méthode à appliquer. Bien que le port de masque FFP3 ne soit pas toujours accepté par les employés, il doit être imposé et inscrit dans les documents officiels. Pour cela, le service Hygiène et Sécurité laisse le choix, à chaque PFC, du type de masque mis à la disposition des employés afin de favoriser leur utilisation.

Concernant le nettoyage des filtres initialement présents sur les engins (type papier) et qui viendront à disparaître avec l'acquisition de filtre à poussières de type P3 et à charbon actif, il est nécessaire de définir la méthode de nettoyage. Ainsi, celle-ci se décompose en 2 étapes. La première consiste à tapoter les filtres sur le sol ou contre le châssis de l'engin (en s'équipant de masques FFP3) afin d'évacuer un maximum de poussières. La seconde étape consiste à utiliser un souffleur, à une pression maximale de 1 à 2 bars (pour une pression supérieure il y a risque de déchirement du filtre et augmentation de la remise en suspension des poussières) pour éliminer les poussières toujours fixées. La fréquence de nettoyage doit être d'une fois par jour minimum. Pour les filtres à poussières et à charbon actif, un nettoyage fréquent doit également être réalisé par l'utilisation d'un aspirateur sur la partie filtre à poussières.

Chaque agent se doit également de prévenir immédiatement le chef d'exploitation après une alarme du système d'aération des engins afin de faciliter le changement des filtres le plus rapidement possible. Une procédure doit donc être incluse dans les documents prévus à cet effet.

Une procédure doit également être mise en place pour définir la fréquence de nettoyage des engins ainsi que des filtres à poussière. La formalisation de cette tâche peut favoriser sa mise en place sur toutes les PFC.

4.1.4 Argumentaire destiné aux employés sur le risque biologique

Contrairement aux risques par inhalation, les risques d'ingestion et de contamination par contact cutané sont globalement maîtrisables par l'employé lui-même. En effet, en évitant les contacts mains-bouche (tabagisme et consommation d'aliments), en utilisant des gants adéquats, en se lavant les mains avant et après chaque repas et pause sanitaire, les risques sont globalement maîtrisés. De même, toute coupure ou contusion doit être protégée immédiatement après désinfection.

Pour le risque par inhalation, il est important de suivre les recommandations citées précédemment qui impliquent l'utilisation de masque FFP3 pour toutes les tâches réalisées en dehors des engins dans les zones à forte production de poussières. Il est également essentiel de privilégier la circulation à pied (lorsque cela est nécessaire) à l'écart des zones fortement empoussiérées tels que le criblage ou les retournements d'andains.

4.2 Identification des connaissances scientifiques manquantes et mise en place d'une veille scientifique et juridique

4.2.1 Prévalence et concentrations des agents pathogènes

Afin de comparer les données de concentrations mesurées sur les PFC, il est essentiel de normaliser les méthodes de mesures. Des études sont en cours à ce sujet pour définir les méthodes de prélèvement et d'analyse les plus à même de présenter les niveaux de concentrations présents dans l'air. Ainsi, l'étude menée depuis 2003 par le département Métrologie des polluants de l'INRS vise à étudier les techniques spécifiques de prélèvement et d'analyse des agents biologiques (micro-organismes et leurs toxines, en excluant les virus) dispersés dans l'air des lieux de travail. L'objectif est également de rechercher les meilleures conditions d'utilisation de ces techniques en fonction des différents environnements rencontrés. Cette étude teste ces systèmes d'échantillonnage à la fois sur le plan de leur comportement physique et sur le plan microbiologique. Les conditions de prélèvement et de dosage des endotoxines et des glucans sont également étudiées. La mise en application de ces méthodes sur des sites industriels permet de valider les conditions d'application. En dehors des méthodes traditionnelles d'analyse fondées sur la culture des micro-organismes sur gélose et de leur identification suivant des critères biochimiques, les techniques de biologie moléculaire sont également étudiées. Parmi ces recherches, un article a été publié en 2005 (GORNER P., INRS, 2005) sur un échantillonneur portatif de bio aérosols en milieu liquide (le CIP 10-M). Cet appareil a été testé en milieu de travail (incinérateur d'OM, STEP) et comparé aux autres techniques de prélèvement (impacteur, filtre) pour la mesure de bactéries, de champignons et d'endotoxines. Les résultats de cette étude indique une efficacité de prélèvement satisfaisante pour l'ensemble des paramètres avec toutefois une limite pour les champignons due au caractère hydrophobe des spores. Cette technique présente comme avantage, contrairement aux impacteurs de ne pas avoir de problèmes de saturation (lié à la possibilité de dilution du liquide utilisé).

Concernant les endotoxines, le Comité Européen de Normalisation a réalisé un rapport (draft final en mars 2000) qui développe les méthodes d'échantillonnage, de

transport et de stockage des échantillons et la détermination des endotoxines en milieu du travail (Final Draft for Comité Européen de Normalisation, CEN, enquiry 2000-03-28, CENT/TC/137/WG 5, Workplace atmosphere – Determination of airborne endotoxin). La méthode analytique recommandée en routine est la méthode LAL cinétique chromogénique (lecture colorimétrique). Toutefois, selon le type de filtre, la méthode d'extraction et de stockage des échantillons contenant des endotoxines de l'air, les quantités peuvent varier. Ainsi, par exemple, Douwes (1995) rapporte une efficacité de collecte des endotoxines 7 fois supérieure avec 0,05% de « Tween 20 » dans de l'eau stérile que sans « Tween 20 ». De même, les quantités d'endotoxines sont 2 fois supérieures en utilisant des filtres de fibres de verre, téflon ou polycarbonate que des filtres d'ester de cellulose (Douwes, 1995, Thorne, 1997). Tous ces paramètres doivent donc être pris en compte pour l'élaboration d'un protocole normalisé.

Contrairement aux endotoxines, aucune stratégie ni méthode de prélèvement des mycotoxines dans un contexte professionnel n'a fait l'objet d'une proposition européenne, bien que certaines aient été reconnues comme cancérigènes.

4.2.2 Prévalence des pathologies observées chez les travailleurs

Le nombre de pathologies recensées sur les PFC reste relativement limité. Ceci n'implique pas pour autant l'absence de risques. Il est en effet envisageable que tous les cas n'aient pas été enregistrés ou n'aient pas été mis en relation avec l'activité professionnelle du compostage. Parmi les maladies professionnelles, une seule est reliée à l'activité de compostage, il s'agit de la pneumopathie d'hypersensibilité (n°66 bis du tableau des maladies professionnelles).

Il est donc nécessaire de mettre en place de nouvelles études. La réalisation d'une étude épidémiologique prospective peut être justifiée pour répondre à la demande de la population de travailleurs. Un sujet de mémoire réalisé à l'ENSP en 2005 par Gwladys Francois, justifie la pertinence de cette étude sur les travailleurs des PFC avec quelques limites à apporter. En effet, la pertinence d'une telle étude implique de bien définir les objectifs. Il ne s'agit pas de prouver la dangerosité du travail dans le compostage mais d'évaluer l'occurrence potentielle de certaines pathologies chez les travailleurs par rapport à la population témoin.

Ainsi, une telle étude implique la coopération d'une majorité des sociétés réalisant le compostage. En effet, à l'échelle de SEDE Environnement, la validité d'une étude épidémiologique serait nulle de par la faiblesse des effectifs. Parmi les syndicats gérés par la FNADE, le SYPREA (Syndicat des Professionnels du Recyclage en Agriculture) regroupe l'ensemble des entreprises de compostage. Il serait donc justifié que ce syndicat

soit à l'initiative d'une telle étude et en collaboration avec des médecins, des épidémiologistes pour définir un protocole acceptable par l'ensemble des acteurs. Le SYPREA coordonne actuellement la réalisation d'une évaluation des risques sanitaires des salariés en charge de l'épandage des boues.

Pour assurer la validité de cette étude, il est important de prendre en compte les caractéristiques de la population des exposés (âge, sexe, milieu social) ainsi que leur stabilité ou non sur les postes (ancienneté dans l'entreprise, poste exercé,…) et celles de la population de témoin. Les témoins doivent évidemment répondre à certains critères : âge proche, sans pathologies préexistantes, n'étant pas exposé au processus de compostage et n'utilisant pas de compost à leur domicile. De même, la variabilité entre les différentes PFC doit être prise en compte (déchets intrants, procédé appliqué, configuration des PFC, type d'équipement).

4.2.3 Consensus scientifique sur les seuils d'acceptabilité

Plusieurs raisons expliquent l'absence de seuil global d'acceptabilité pour les agents biologiques en dessous duquel il n'y a pas de risques pour les travailleurs. Il s'agit, comme l'a spécifié le comité sur les bioaérosols de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), de limites dues aux méthodes d'échantillonnage, des données insuffisantes sur les relations doses-réponses et des grandes variations de susceptibilité envers les agents biologiques entre individus. Un seul seuil pour l'ensemble des agents biologiques est donc totalement impossible à fixer de par les différences d'actions de ces agents sur l'homme (effets allergiques, inflammatoires, infectieux).

Bien que des seuils soient proposés par certains auteurs pour certains agents d'origine biologique et justifiés par l'apparition de symptômes chez quelques individus, leur utilisation comme référence est toutefois à remettre en cause. En effet, ceux-ci peuvent justifier la mise en place d'actions de gestion du risque afin d'être en dessous de ces seuils uniquement. A contrario, une autre approche plus protectrice pour les employés chercherait à être le plus bas possible en terme de concentrations et ceci dans la limite du faisable pour l'exploitation. Cette seconde approche correspond à la politique de SEDE Environnement qui tend à mettre un maximum de moyens techniques et organisationnels pour limiter l'émission de poussières et l'exposition de ces salariés aux agents biologiques et chimiques.

Conclusion

Cet outil d'évaluation des risques sanitaires (ERS) avait pour objectif d'évaluer, à partir des données disponibles dans la littérature, les risques sanitaires liés aux agents biologiques présents sur les plates-formes pour les travailleurs. Dans cette optique, les agents retenus dans cette ERS sont les bactéries totales, les bactéries Gram négatif, les actinomycètes thermophiles, les champignons totaux, *Aspergillus fumigatus* et les endotoxines pour lesquels des seuils recommandés, par inhalation, existent dans la littérature.

La caractérisation du risque a mis en évidence des dépassements des seuils recommandés pour l'ensemble des agents retenus dans l'ERS sur les trois postes de travail d'une plate-forme SEDE (mélange, fermentation et criblage) et pour les bactéries Gram négatif dans les engins utilisés par les agents d'exploitation. Cette comparaison des seuils avec les concentrations mesurées sur la PFC doit être exploitée avec prudence de par les différences entre les méthodes de prélèvement et la validité de ces données (méthodes d'acquisition, pertinence d'une moyenne de concentration…).

Les limites et les incertitudes de cette évaluation des risques ainsi que les études passées concernant les risques associés au compostage donnent un poids supplémentaire aux mesures de précaution actuellement en place ou à venir. Il s'agit pour l'employeur d'agir en amont par la mise en place de moyens techniques tels que le changement de ces méthodes de traitement (type d'aération, fréquence des retournements d'andains) et la limitation des envols de poussières (humidification, balayage). Bien qu'il n'existe pas de relation mathématique établie entre concentration en poussières et agents biologiques, la diminution de l'empoussièrement participera à limiter l'exposition. En parallèle, des moyens de protection collective (filtre à poussières sur les engins, équipement sanitaires) et individuelle (EPI) sont mis à la disposition des employés afin de limiter l'exposition aux agents biologiques. Toutefois, un point essentiel doit être mis sur la formation et l'implication des employés aux règles d'hygiène, au respect des consignes et à l'utilisation des moyens de protection, sans quoi, les actions mises en place par l'entreprise pour protéger leur santé, n'auront aucun intérêt.

La mise en évidence des lacunes actuelles en terme de validité des données (seuils d'acceptabilité, méthodes de mesure, relations agents-effets sanitaires) implique la participation des différents acteurs de santé publique et des professionnels dans la réalisation d'études globales. Plusieurs facteurs doivent donc être pris en compte avec notamment l'évaluation de l'exposition individuelle. En effet, les concentrations d'ambiance proposées dans la littérature surestime actuellement l'exposition des travailleurs.

Bibliographie

Article de périodique

CLARK C. S., RYLANDER R., LARSSON L., 1983, levels of Gram-Negative Bacteria, *A.fumigatus*, Dust, and Endotoxin at compost Plant, *Applied of Environmental Microbiology*, vol.45, pp. 1501–1505

GORNER P., FABRIES J.F., DUQUENNE P. et al, 2006, « Bioaerosol sampling by a personal rotating cup sampler CIP 10-M », *Journal of Environmental Monitoring* [en ligne], n° 8, pp. 43-48, disponible sur Internet : http://www.rsc.org/delivery/_ArticleLinking/DisplayHTMLArticleforfree.cfm?JournalCode=EM&Year=2006&ManuscriptID=b508671j&Iss=1

GUICHARDAZ O., 2007, « la norme NFU 44-051 révisée rendue obligatoire », *Environnement et Technique*, n°270, p.15.

HRYHORCZUK et al., 2001, « Bioaerosols emissions from a suburban yard waste composting facility », *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* [en ligne], vol. 8, pp.177-185., [visité le 15/06/2008], disponible sur Internet : http://www.aaem.pl/pdf/aaem0126.htm

LAVOIE J., DUNKERLEY C. J., KOSASTSKY T. et al., 2006, «Exposure to aerosolized bacteria and fungi among collectors of commercial, mixed residential, recyclable and compostable waste», *The science of total environment*, vol. 370, n°1, pp.23-28.

LOPEZ R., CADENET D., MOQUET B., 2005, « De la boue au compostage », *L'eau, l'industrie, les nuisances*, n°285, pp.68-72.

PILLAI, SURESH D., 2007, « Bioaerosols from land-applied biosolids : Issues and Needs », *Water Environment Research* [en ligne], vol.79, n°3, pp. 270-278, [visité le 16/07/08], disponible sur Internet :http://www.redorbit.com/news/science/902314/bioaerosols_from_landapplied_biosolids_issues_and_needs/index.html

POURCHER A.-M., MORAND P., PICARD-BONNAUD F. et al., 2005, «Decrease of enteric micro-organisms from rural sewage sludge during their composting in straw mixture», *Journal of Applied Microbiology*; vol. 99, n°3, pp. 528-539

TAHA M., DREW G.H., LONGHURST P.J. et al., 2006, «Bioaerosol releases from compost facilities : evaluating passive and active source terms at a green waste facility for improved risk assessments», *Atmospheric Environment* [en ligne], Volume 40, n°6, pp.1159-1169, [visité le 16/07/2008], disponible sur Internet : http://direct.bl.uk/bld/PlaceOrder.do?UIN=132487108&ETOC=RN&from=searchengine

SANCHEZ-MONEDERO M. A., STENTIFORD E.I., 2003, « Generation and dispersion of airborne microorganisms from composting facilities », *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 81, n° 3, pp. 166-170

SCHLOSSER O., LORET J.F., 2005, « Le risque des bioaérosols dans l'environnement des stations d'épuration », *Techniques Sciences Méthodes*, n°7-8, pp. 43-50.

SCHLOSSER O., HUYARD A., 2008, «Les bioaérosols en plate-forme de compostage : exposition et risque professionnel », *Environnement, Risques & Santé* [en ligne], Vol.7, n°1, [visité le 15/06/2008], disponible sur Internet : www.jle.com

WERY N., LHOUTELLIER C., DUCRAY F. et al, 2008, «our pathogenic and indicator bacteria during urban wastewater treatment and sludge composting, as revealed by quantitative PCR », *Water Research*, Vol. 42, pp. 53-62

WILEY B.,WESTERBERG S. C., 1969, «Survival of human pathogens in composted sewage », *Applied of Environmental Microbiology* [en ligne], n° 18, pp. 994–1001, [visité le 15/06/2008], disponible sur Internet : http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=378182

Rapport d'étude

BAUMONT S., CAMARD J.P, LEFRANC A. et al., 2004, *Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France*, Rapport de l'Observation Régional de Santé de l'Ile de France [en ligne], pp. 222, [visité le 16/06/2008], disponible sur Internet : http://www.ors-idf.org/resultat-publication.asp

BONNARD R., 2001, *Le risque biologique et la méthode d'évaluation du risque,* Rapport de l'INERIS [en ligne], pp.79, [visité le 16/06/2008], disponible sur Internet : http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/etud_impact/risqbio_ei72.pdf

CAREPS, 2002, *Etude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bio aérosols générés par le compostage des déchets* [en ligne], Rapport n° 317, [visité le 15/04/2008], disponible sur Internet : http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/rapport1.pdf

CRE, 2004, *Bioaerosols and Composting* [en ligne], [visité le 16/07/2008], disponible sur Internet : http://www.compostireland.ie/docs/cre_bioaerosol_aug2004.pdf

DELERY L., 2007, *Endotoxines : Eléments disponibles pour une évaluation des risques sanitaires en lien avec les émissions des ICPE* [en ligne], rapport d'étude INERIS, [visité le 16/07/2008], disponible sur Internet : www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getFile&id=2810

ELISSALDE N., 1994, *Les germes pathogènes dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines*, rapport ADEME n°1798, pp.90.

ENSP, 2002, *Rapport d'étude : éléments pour la prise en compte des effets des unités de compostage de déchets sur la santé des populations riveraines*[en ligne], [consulté le 15/04/2008], disponible sur Internet : http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/etud_impact/ensp1_ei52.pdf

GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L. et al., 2001, *les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention* [en ligne], disponible sur Internet : http://www.irsst.qc.ca/fr/_projet_2983.html

LAVOIE J., MARCHAND G., 1997*, Détermination des caractéristiques à considérer d'un point de vue de santé et sécurité des travailleurs dans les centres de compostage des déchets domestiques* [en ligne], IRSST, [visité le 15/04/2008], disponible sur Internet : http://www.irsst.qc.ca/fr/_projet_2172.html

RECORD, 2003, *Etat des connaissances sur les micro-organismes dans la filière déchets*, Rapport réseau santé-déchets n°2002-02, pp. 124, [visité le 15/04/2008], disponible sur Internet : http://www.record-net.org/record/etudesdownload/record01-0657_1A.pdf

RENAULT C., MORICE E., DELERY L. et al, 2006, *Guide méthodologique pour l'évaluation du risque sanitaire de l'étude d'impact des installations de compostage soumises à autorisation*, Rapport de l'ASTEE [en ligne], pp.60, [consulté le 15/04/2008], disponible sur Internet : http://www.environnement.gouv.fr/IMG/pdf/GuideERS_Compost_200606.pdf

Communication

COURTOIS G., 2001*, Exposé sur les boues de stations d'épuration urbaines, les risques sanitaires, évolution de la réglementation* [en ligne], [visité le 15/04/2008], disponible sur le Rese : http://rese.intranet.sante.gouv.fr/santenv/interven/assaini/bouestep/risq/gc_0501.htm

LEPRINCE A., 1999, *Le point des connaissances sur … Risques biologiques en milieu de travail* [en ligne], ED 5002 INRS, [visité le 16/07/08], disponible sur Internet : http://www.inrs.fr/htm/les_risques_biologiques_en_milieu_de_travail.html

SWAM JRM., KELSEY A., CROOK B., Gilbert EJ., 2003, *Occupational and Environmental exposure to bioaerosols from composts and potential health effects – a critical review of published data* [en ligne], HSE, [visité le 15/04/2008], disponible sur Internet : http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr130.htm

Mémoire

FRANCOIS G., 2005, *Faisabilité d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage de déchets* [en ligne], Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur du Génie Sanitaire : ENSP, [visité le 16/04/2008], disponibilité sur Internet : http://www.bdsp.tm.fr/Base/Scripts/ShowA.bs?bqRef=333884

JEHANNO F., 1995, *Suivi de l'évolution des micro-organismes pathogènes pour l'homme dans un compost de mélange de broyat de déchets végétaux et de boues de station d'épuration*, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur du Génie Sanitaire : ENSP, pp.49.

Ouvrage :

BLANC A., 2008, *Code du Travail Edition permanente*, 116e édition, Annecy-le-Vieux :Tissot éditions.

PLUYETTE J., 2005, *Hygiène et sécurité Conditions de travail lois et textes réglementaires*, 27ème édition , Lavoisier, Paris, pp.2740, p.954-970.

Site Internet :

www.ademe.fr
www.astee.org
www.ineris.fr
www.inrs.fr
www.irrst.fr
www.sede.fr
www.sinoe.org

Glossaire

Allergie : capacité à une réaction exacerbée à chaque nouveau contact avec un antigène.

Aspergillose : maladie survenant à la suite d'une exposition au genre *Aspergillus* qui se traduit par se traduire par une pneumonie (touche généralement les personnes avec un déficit immunitaire).

Atopie : prédisposition génétique aux allergies

Bio aérosols : Ensemble des micro-organismes et des vecteurs particulaires en suspension dans l'air (Fabriès, 2001).

Bronchite chronique : existence d'une toux et d'une expectoration survenant au moins trois mois par an pendant au moins deux années consécutives.

Danger : le danger est la propriété ou la capacité intrinsèque d'un équipement, d'une substance ou d'une méthode de travail de causer un dommage pour la santé des travailleurs.

Emphysème : augmentation de la taille des espaces aériens périphériques situés au delà de la bronchiole terminale, soit par dilatation soit par rupture des parois alvéolaires.

Epidémiogène : qui présente un risque épidémique.

Hétérotrophes : qualifie un être vivant qui ne peut fabriquer lui-même tous ses constituants et doit, de ce fait, utiliser des matières organiques exogènes.

Hypoxie : baisse du taux d'oxygène dans les tissus et le sang.

Immunodéprimé : se dit d'une personne dont le système immunitaire est défaillant.

Infection : développement de germes pathogènes dans l'organisme et provoquant des troubles.

Inflammation : Etat pathologique caractérisé par de la chaleur, de la rougeur, de la douleur et parfois de la tuméfaction.

Mésophile : caractéristique d'un organisme dont la température de croissance optimale modérée est située entre 20 et 45°C.

Prophylaxie : ensemble des mesures propres à prévenir les maladies.

Risque : le risque est le résultat de l'exposition d'une personne à un danger.

Saprophyte : organisme capable de se nourrir de matières en décomposition.

Symbiotique : relatif à une association biologique durable et réciproque entre deux ou plusieurs organismes vivants.

Thermophile : caractéristique d'un organisme dont la température de croissance optimale modérée, située entre 45 et 70°C.

Ubiquitaire : qui est présent dans de nombreux milieux.

Valeur toxicologique de référence (**VTR)** : appellation générique regroupant tous les types d'indice toxicologique qui permettent d'établir une relation entre une dose et un effet (toxique à seuil d'effet) ou entre une dose et une probabilité d'effet (toxique sans seuil d'effet). Les VTR sont établies par des instances internationales (l'OMS ou le CIPR, par exemple) ou des structures nationales (US-EPA et ATSDR aux Etats-Unis, RIVM aux Pays-Bas, Health Canada, CSHPF en France, etc.).

Liste des illustrations

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des travailleurs des PFC SEDE Environnement.....15
Tableau 2 : Principaux genres de bactéries Gram positif.....20
Tableau 3 : Pathogènes présents dans les boues de station d'épuration (CSHPF, 1997 ; Carrington, 2001 ; Déportes et al, 1998 ; Strauch 1998 ; Dumontet et al., 2001) 23
Tableau 4 : Contenu microbien des autres déchets du compostage.....24
Tableau 5 : Valeurs guides proposées pour les agents biologiques en milieu de travail ..31
Tableau 6 : Relations dose réponse, valeurs seuils, valeurs guides et VLE proposées pour les endotoxines en milieu de travail dans la littérature.....31
Tableau 7 : Résultats des mesures d'agents biologiques réalisées à Tarascon par le laboration CAE (Veolia).....35
Tableau 8 : Résultats des mesures d'endotoxines réalisées sur le site de Tarascon (analyse par laboratoire agréé) 36

Liste des figures

Figure 1 : Evolution de la température, du pH et des populations biologiques au cours du processus de compostage.....4
Figure 2 : Répartition des 17 plates-formes de compostage SEDE par type de configuration.....14
Figure 3 : Répartition des 17 plates-formes SEDE par type de procédé appliqué. 14

Liste des annexes

Annexe 1 : Norme NFU 44-095 relatives à la commercialisation d'amendements organiques issus des MIATE (source AFNOR) III

Annexe 2 : Classification des agents biologiques en 4 groupes en fonction de l'importance du risque infectieux (arrêté du 18/07/1994) V

Annexe 3 : Questionnaire envoyé aux responsables de plates-formes de compostage (7 pages) VII

Annexe 4 : Répartition géographique, types de déchets traités et ancienneté des PFC SEDE Environnement XV

Annexe 5 : Présentation du site de Tarascon et des photographies de mesures XVII

Annexe 6 : Méthode d'échantillonnage et d'identification des microorganismes présents dans l'air XIX

Annexe 7 : Illustrations sur les étapes du traitement et les engins utilisés XXI

Annexe 8 : Efficacité de filtration d'un filtre en fonction de 3 mécanismes : la diffusion, l'interception, l'impaction XXIII

Annexe 9 : Effets sur la santé relatés en lien avec l'exposition aux bio aérosols XXV

Annexe 10 : Etudes épidémiologiques portant sur les effets sanitaires conséquents à l'exposition de bio-aérosols émis à partir de sites de compostage XXVII

Annexe 11 : Concentrations en agents biologiques, issues de la littérature, mesurées sur des sites de compostage et dans l'air extérieur (tableaux 1 et 2) XXIX

Annexe 12 : Résultats des mesures réalisées sur Tarascon (agents biologiques) .. XXXI

<u>Annexe 1</u> : Norme NFU 44-095 relatives à la commercialisation d'amendements organiques issus des MIATE (source AFNOR)

Le responsable de la mise sur le marché du produit répondant à la norme NF U 44-095 doit réaliser :

- la vérification de la conformité des produits à la norme en analysant chaque lot de produit commercialisable. Les résultats de ces contrôles devront être consignés par écrit et tenus à disposition des services compétents pendant 10 ans.

Les critères d'innocuité et d'efficacité auxquels doit répondre le responsable de la mise sur le marché sont présentés ci-dessous

Critères d'innocuité :

- ETM, micro-polluants organiques, microbes pathogènes, inertes indésirables

Critères d'efficacité :

- MS, MO
- Teneur limite en azote
- P2O5, K2O
- Fractionnement biochimique

Minéralisation potentielle du C et de l'N

Les critères d'innocuité mesurés sont présentés ci-dessous :

<u>Elément Traces Métalliques</u> :

Eléments traces métalliques	Valeurs limites (mg/kg MS)
As	18
Cd	3
Cr	120
Cu	300
Hg	2
Ni	60
Pb	180
Se	12
Zn	600

<u>Micro-polluants organiques</u>

Micro – polluants organiques	Teneurs limites (mg/kg MS)
Total des 7 PCB (28+52+101+118+138+153+180	0,8
HAP :	
Fluoranthène	4
Benzo(b)fluoranthène	2,5
Benzo(a)pyrène	1,5

Micro-organismes d'intérêt sanitaire

	Toutes cultures sauf maraîchères	Cultures maraîchères	Méthodes d'analyses normalisées
Agents indicateurs de traitement :			
Escherichia coli	10^4/g M.B	10^4/g M.B	NF V 08-053 (1993)
Clostridium perfringens	10^3/g M.B	10^4/g M.B	NF V 08-056 (1994)
Entérocoques	10^5/g M.B	10^4/g M.B	NF T 90-432 (1997)
Agents pathogènes :			
Œufs d'helminthes viables	Absence dans 1 g de M.B	Absence dans 25 g de M.B	En cours
Listeria monocytogenes	Absence dans 1 g de M.B	Absence dans 25 g de M.B	NF V 08-055
Salmonelles	Absence dans 1 g de M.B	Absence dans 25 g de M.B	NF ISO 6579 (1990) NF V 08-052 (1993)

<u>Annexe 2</u> : Classification des agents biologiques en 4 groupes en fonction de l'importance du risque infectieux (arrêté du 18/07/1994)

Ce classement, issu de l'arrêté du 18 juillet 1994, classifie les agents biologiques pathogènes en quatre groupes. L'objectif est de fixer des prescriptions minimales particulières afin de garantir un meilleur niveau de sécurité et de santé aux travailleurs exposés à ces agents pendant leur travail.

Groupe 1	Agents biologiques non susceptibles de provoquer une maladie chez l'homme
Groupe 2	Agents biologiques pouvant provoquer une maladie chez l'homme et constituant un danger pour les travailleurs. Leur propagation dans la collectivité est peu probable. Il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficaces.
Groupe 3	Agents biologiques pouvant provoquer une maladie grave chez l'homme et constituer un danger sérieux pour les travailleurs. Leur propagation dans la collectivité est possible mais il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficaces.
Groupe 4	Agents biologiques qui provoquent des maladies graves chez l'homme et constituent un danger sérieux pour les travailleurs. Le risque et leur propagation dans la collectivité sont élevé, il n'existe généralement ni prophylaxie ni traitement efficace.

<u>Annexe 3</u> : Questionnaire envoyé aux responsables de plates-formes de compostage (7 pages)

Questionnaire : Description des plates-formes de compostage

Dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires d'origine biologique encourus par les travailleurs des plates-formes de compostage, nous souhaiterions vous poser quelques questions concernant la plate-forme de compostage.

Avant tout, nous tenons à vous définir les objectifs de ce questionnaire. Il s'agit :

- de décrire le fonctionnement de la plate-forme de compostage et des effectifs
- de caractériser les différents postes de travail ainsi que les moyens de prévention mis à disposition des salariés avec leur fréquence d'utilisation.
- d'avoir une idée du type de pathologies rencontrées chez les travailleurs (que vous pourriez interroger à ce sujet en justifiant la réalisation d'une évaluation des risques sanitaires)

Nous tenons à vous remercier d'avance pour votre participation et pour la qualité des informations qui seront recueillies grâce à vous.

Si nous voulons améliorer la prévention de certains symptômes et améliorer les conditions de travail, il est nécessaire de connaître au mieux les éventuelles difficultés que vous pouvez rencontrer. Il est très important que votre point de vue soit connu de manière précise.

Evidemment, ce questionnaire est strictement anonyme.

Questionnaire n° : 1

Partie à remplir par le responsable de site :

La plate-forme de compostage

Nom et adresse de l'unité de compostage :

Année d'ouverture :

1. **Type de déchets traités**

Boues de stations d'épuration urbaines ☐
Boues de curage ☐
Boues d'IAA ☐
Déchets verts (tonte de gazon, taille de haie, branches d'élagage, feuilles mortes…) ☐
Déchets de bois (souches, écorces, troncs, morceaux de bois) ☐
FFOM ☐
Déjections animales (fumier, lisier, fiente…) ☐
Autres : si oui précisez : ☐

2. **Quantité annuelle de déchets intrant (en tonnes) :**

……

3. **Quantité annuelle de compost produits (en tonnes) :**

……

4. **L'implantation de l'unité de compostage est :**

A l'air libre..... ☐
Sous hall ouvert ..... ☐
Dans un batiment clos..... ☐
Dans un environnement mixte :..... ☐
- avec une partie à l'air libre : si oui précisez laquelle : .....
- avec une partie sous hall ouvert : si oui précisez laquelle .....
- avec une partie dans batiment clos : si oui précisez laquelle .....

5. **L'aération des déchets en fermentation s'effectue par :**

Aération naturelle sans retournement..... ☐
Aération naturelle avec retournement : si oui combien de fois..... ☐
Aération forcée par insufflation sans retournement..... ☐
Aération forcée par aspiration sans retournement..... ☐
Aération forcée par insufflation avec retournement : si oui combien de fois ..... ☐
Aération forcée par aspiration avec retournement : si oui combien de fois ..... ☐

6. **Quels sont les équipements présents sur la plate-forme, toujours en fonctionnement, et leur nombre :**

		Nombre :
Chargeur.....	☐	.....
Crible	☐	.....
MECH.....	☐	.....
Retourneur d'andain.....	☐	.....

Autres : Précisez .....

Effectifs et postes de travail

7. **Quels est l'effectif de la plate-forme :**

a. Salariés permanents : .....
- En CDD : .....
- En CDI : .....
- Autres : précisez .....

b. Salariés sous traitants : .....

8. **Sur cet effectif, combien sont en contact direct avec les déchets et les poussières (le personnel administratif n'est donc pas concerné) ?**

a. Salariés permanents : .....
- En CDD : .....
- En CDI : .....
- Autres : précisez .....

b. Salariés sous traitants : .....

9. **Pour chaque poste de travail énuméré, précisez la fréquence hebdomadaire de réalisation, les engins utilisés et les protections utilisés par les employés. Si des postes ont été oubliés, merci de les rajouter en fin de tableau.**

Postes de travail sur la plate-forme (maintenance, retournement des andains, conception d'andain, secrétariat, autres…)	Fréquence hebdomadaire de réalisation	Utilisation d'un engin ou équipement particulier?	Protections individuelles utilisées pour réaliser cette tache
Réception et prélèvement		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants……☐ Lunettes……☐ Masque FFP3……☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Mélange		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants……☐ Lunettes……☐ Masque FFP3……☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Constitution d'andains		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants……☐ Lunettes……☐ Masque FFP3……☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Broyage		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants……☐ Lunettes……☐ Masque FFP3……☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Criblage		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants……☐ Lunettes……☐ Masque FFP3……☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Retournement d'andain		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants……☐ Lunettes……☐ Masque FFP3……☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Chargement		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants……☐ Lunettes……☐ Masque FFP3……☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……

Postes de travail sur la plate-forme (maintenance, retournement des andains, conception d'andain, secrétariat, autres…)	Fréquence hebdomadaire de réalisation	Utilisation d'un engin ou d'un équipement particulier?	Protections individuelles utilisées pour réaliser cette tache
Maintenance		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants…… ☐ Lunettes…… ☐ Masque FFP3…… ☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Nettoyage des filtres		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel (aspirateur, souffleur) ? …… …… A quelle pression (en bar) dépoussiérez-vous les filtres ? ……	Gants…… ☐ Lunettes…… ☐ Masque FFP3…… ☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Ramassage des plastiques		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? ……	Gants…… ☐ Lunettes…… ☐ Masque FFP3…… ☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
Nettoyage des cabines		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants…… ☐ Lunettes…… ☐ Masque FFP3…… ☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants…… ☐ Lunettes…… ☐ Masque FFP3…… ☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants…… ☐ Lunettes…… ☐ Masque FFP3…… ☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……
		Oui ☐ Non ☐ Si oui, lequel ? …… Est-il équipé de filtre à charbon ? Oui ☐ Non ☐	Gants…… ☐ Lunettes…… ☐ Masque FFP3…… ☐ Système à assistance respiratoire…… ☐ Autres : si oui précisez :…… ……

10. **Citez, selon vous, les taches exposant le plus les travailleurs aux agents biologiques ?**

Mesures d'hygiène et conditions de travail

11. **Une climatisation est-elle présente au niveau des bureaux administratifs (secrétariat,…) ?**

- Oui……☐ - Non……☐

Si **Oui**, à quelle fréquence est-elle nettoyée ? ……

12. **Les bureaux administratifs sont-ils séparés de la production ?**

- Oui……☐ - Non……☐

13. **La plate-forme est-elle alimentée en eau potable ?**

- Oui…….. ☐ - Non…… ☐

Si **Non**, précisez le type de stockage de l'eau : ……

14. **Si l'eau est non potable, des analyses bactériologiques ont-elles déjà été réalisées (de préférence pendant la période estivale) ?**

- Oui……☐ - Non……☐

Si **Oui** : précisez quand et quels paramètres ont-été mesurés :

……

15. **Le savon mis à la disposition des employés est-il un savon antiseptique ?**

- Oui……☐ - Non……☐

16. **La plate-forme est-elle équipée de douches individuelles ?**

- Oui……☐ - Non……☐

Si **Oui**, combien d'employés, en contact direct avec les déchets et compost, l'utilisent régulièrement ?

17. **La plate-forme est-elle équipée d'une alimentation « eau chaude-eau froide » sur toutes les prises d'eau sanitaire (lavabo, douche…) ?**

- Oui……☐ - Non……☐

18. Chaque employé a-t-il des vestiaires réellement séparés pour ses vêtements propres et sales ?

- Oui…….. ☐ - Non…… ☐

19. Existe-t-il une zone d'habillage - déshabillage adaptée sur la plate-forme de compostage ?

- Oui…….. ☐ - Non…… ☐

20. Existe-t-il une « zone fumeur » sur la plate-forme de compostage ?

- Oui…….. ☐ - Non…… ☐

21. Combien d'employés sont fumeurs ? ……

22. Parmi les fumeurs, combien fument dans les engins ?……

23. Existe-t-il une zone de repos et repas séparée du reste du bâtiment ?

- Oui…….. ☐ - Non…… ☐

24. L'entretien des locaux est-il réalisé par une femme de ménage ?

- Oui…….. ☐ - Non…… ☐

Si **Oui**, à quelle fréquence ?……..
Si **Non**, qui est en charge de le réaliser et à quelle fréquence ?……
……..

25. Du gel antiseptique est-il mis à la disposition des travailleurs dans les engins ?

- Oui…….. ☐ - Non…… ☐

Autres informations

26. Avez-vous déjà ressenti certaines gènes ou désordres au cours ou suite à une journée de travail ?

27. Certains de vos agents d'exploitation ont-ils déjà ressenti des gènes ou désordres?

- Oui…… ☐
- Non…… ☐

Si **Oui**, précisez lesquels, à quelle fréquence et pour combien d'employés ?

28. Quels vaccins sont demandés par le médecin du travail pour les travailleurs de votre plate-forme de compostage ?

	Oui	Non
- Polio	☐	☐
- Tétanos	☐	☐
- Typhoïdes	☐	☐
- Tuberculose	☐	☐
- Leptospirose	☐	☐
- Hépatite A	☐	☐

- Autres : précisez .....

29. Comment vérifiez-vous que ces vaccins sont à jour ?

.....

Mesures d'exposition

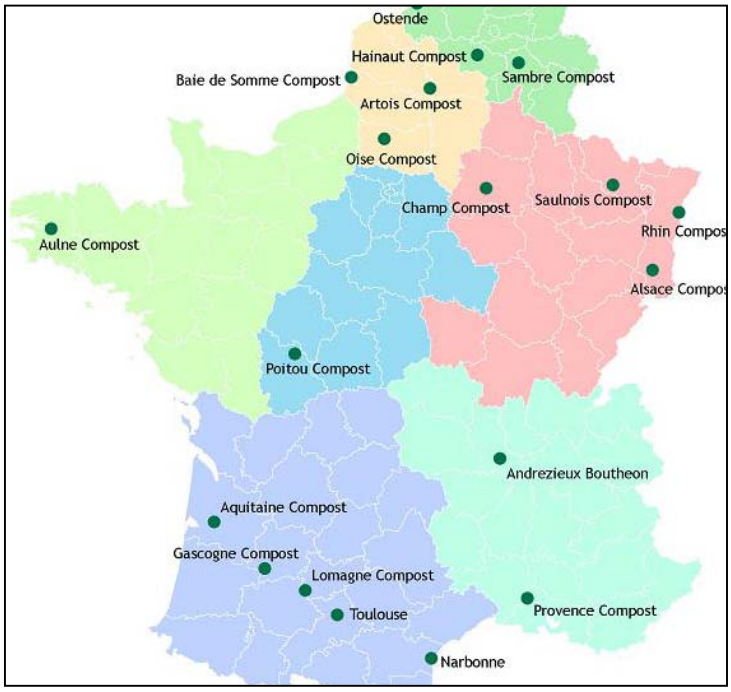
30. Des mesures d'agents micro-biologiques ont-elles déjà été réalisées sur la plate-forme dans :

	Oui	Non	Dans quel cadre ?	Pour quel(s) paramètre(s) ?	Sont-ils dans Suivra ?
Les boues de station d'épuration	☐	☐			
Le compost	☐	☐			
L'air ambiant	☐	☐			
Les lixiviats	☐	☐			

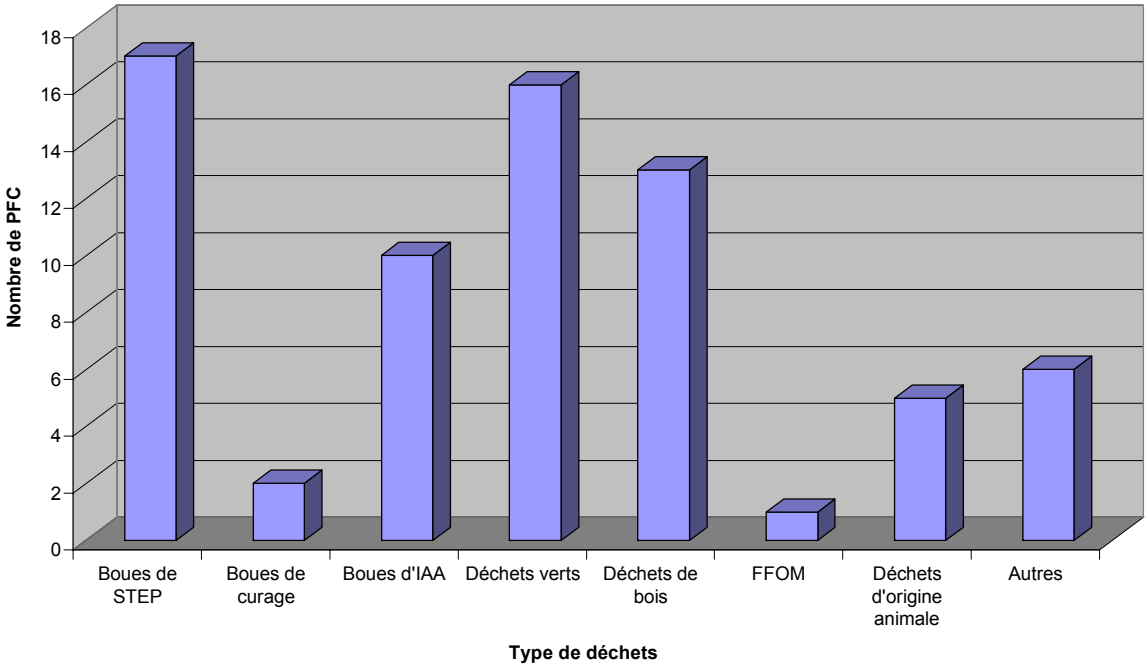
Cet encadré est destiné à quelques commentaires ou autres observations qui vous semblent importants de rajouter :

Merci pour votre collaboration.
Cordialement
Bérengère Ledunois

<u>Annexe 4</u> : Répartition géographique, types de déchets traités et ancienneté des PFC SEDE Environnement



<u>Figure 1</u> : Répartition géographique des plates-formes de compostage SEDE Environnement



<u>Figure 2</u> : Type de déchets traités parmi les 17 PFC SEDE Environnement

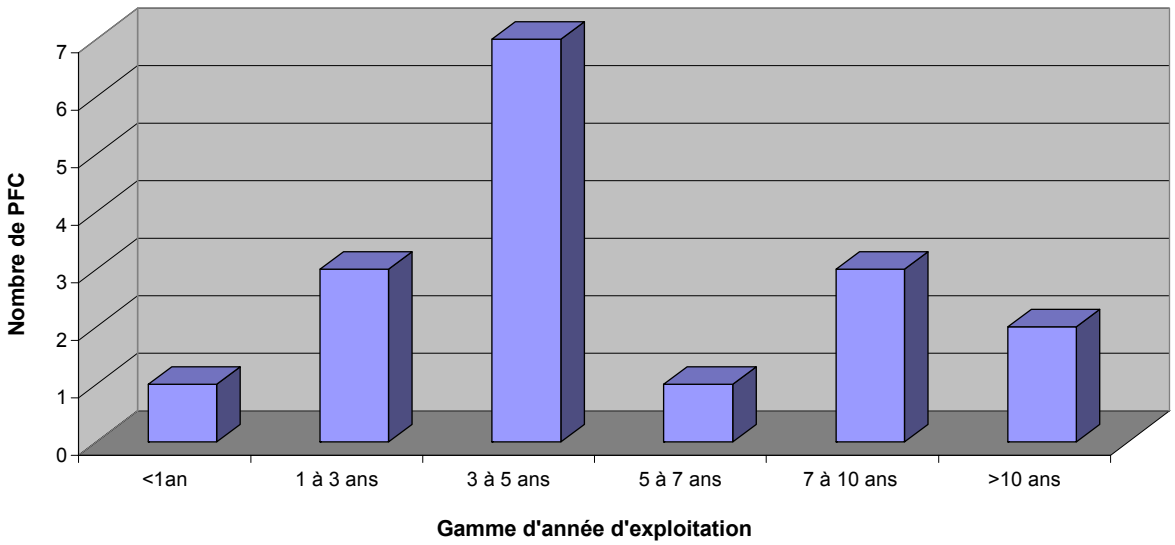
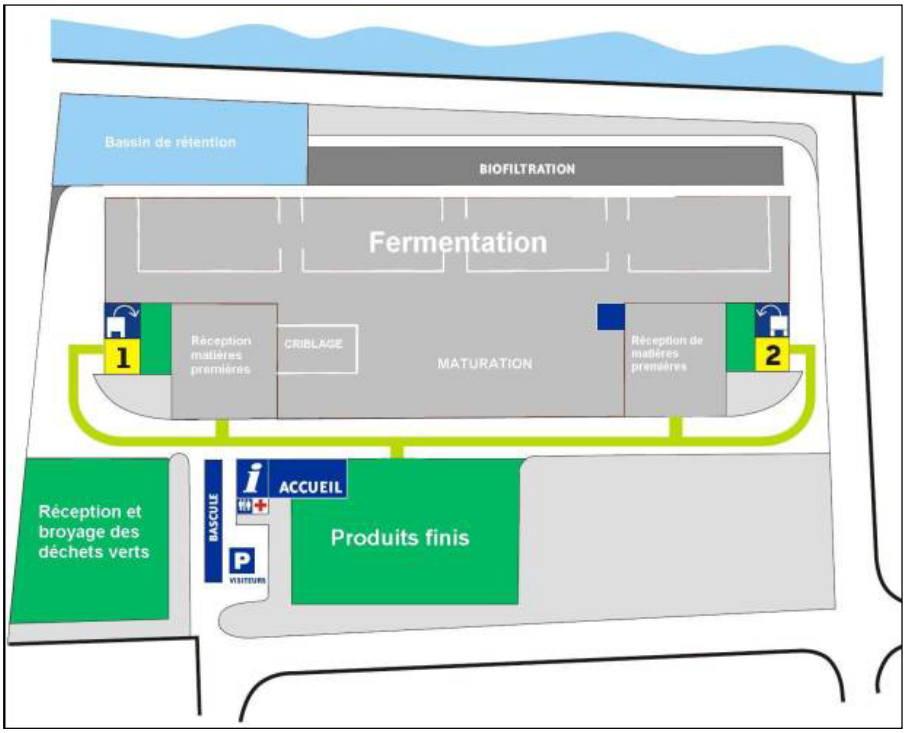


Figure 3 : Ancienneté des 17 PFC SEDE Environnement

<u>Annexe 5</u> : Présentation du site de Tarascon et des photographies de mesures



Ouverture de la PFC : 2005
Superficie : 4 ha dont un bâtiment de 1,5 ha
Configuration : mixte (fermentation en bâtiment fermé, maturation en bâtiment ouvert et stockage du produit fini à l'air libre)
Procédé : aération forcée par insufflation d'air sans retournement
Déchets traités : boues de STEP, boues d'Industrie Agroalimentaire, déchets verts, déchets de bois, déchets d'origine animale, FFOM
Tonnage déchets entrant : 80000 T/an
Tonnage compost produit : 37000 T/an
Effectifs : 8 permanents (2 CDD, 6 CDI) dont 1 chef d'exploitation, 1 secrétaire et 6 agents d'exploitation ; et 2 intérimaires (agents d'exploitation)

Photo 1 : Appareil de mesure des agents dans un chargeur, 1 : cassette filtre pour endotoxine, 2 : Coriolis

Photo 2 : Zone de mélange
Photo 3 : Fermentation
Photo 4 : Criblage
Photo 5 : Bruit de fond (500m du site)

Annexe 6 : Méthode d'échantillonnage et d'identification des microorganismes présents dans l'air

- Prélèvement

L'association française de normalisation (AFNOR) a définit une norme (EN 13098-2000) concernant les méthodes d'échantillonnage utilisables pour la mesure des microorganismes et les endotoxines dans l'air. Cette norme ne précise pas le type d'appareil à utiliser ; il est simplement recommandé que l'échantillonneur choisi ait une efficacité d'échantillonnage connue et documentée. Les méthodes d'échantillonnage sont présentées ci-dessous.

Echantillonneur d'air	Principe	Avantages	Inconvénients
Impaction sur boîte de Pétri (type Anderson)	- Séparation de particules du flux de gaz porteur suivant les propriétés d'inertie de celles-ci. - L'air est aspiré à travers une série d'orifice et les particules ayant une inertie suffisante viennent s'impacter sur une surface cible (milieu nutritif gélosé) placé sur le trajet de l'air	- Niveau de détection élevé (pour atmosphères avec des concentrations faibles)	- Faible précision - Temps d'échantillonnage court - Stress bactérien lié au choc - Risque de dessèchement de la gélose par le flux d'air
Impingers ou impaction sur milieu liquide :	- Echantillonnage d'aérosol dans un milieu liquide - L'air est aspiré au travers d'un tube capillaire puis propulsé dans ou à la surface d'une suspension liquide - Peut être couplé avec un effet centrifuge. Les particules sont impactées tangentiellement à la surface du liquide de collecte (Biosampler®)	- dilution possible - pas de déshydratation des cellules bactériennes - compatible avec de nombreuses méthodes d'analyse (culture, test biochimique et immunologique, analyse moléculaire..)	- risque d'évaporation du liquide pour une durée d'utilisation prolongée (White et al, 1975)→ utilisation de liquide non volatile
Filtration	- Séparation des aérosols du fluide vecteur en les faisant passer au travers d'un média filtrant - Les filtres sont ensuite lavés puis la solution de lavage est mise en culture après dilution	- dilution possible	- temps de prélèvement conditionné par le colmatage du média et la concentration particulaire présente dans l'environnement - non adapté aux faibles concentrations dans l'air

Source : Etat des connaissances sur les micro-organismes dans la filière déchets et Synthèse bibliographique sur les méthodes de mesure des aérosols de Légionnelles CSTB 2006

Globalement, les études menées sur les PFC utilisaient l'impacteur de type Anderson où les particules se déposent directement sur la gélose. Cette méthode

présente l'avantage d'inoculer directement la boite avec la gélose afin que les germes s'y développent. Toutefois, pour ce type de méthode, il existe une concentration maximale en agent par gélose qui implique dans les atmosphères fortement chargées comme les PFC de réaliser des prélèvements très courts (inférieurs à 1 minute). Le préleveur est généralement placé dans l'ambiance de travail pour être représentatif de la concentration présente à chaque poste de travail. Le prélèvement sur le travailleur, par le biais de collecteur portatif, reste très peu étudié (étude de l'INRS de 2005, Cf. paragraphe 4.2.3).

- Dénombrement

La plus commune des méthodes de dénombrement est la mise en culture sur milieux gélosés liquides, spécifiques pour chaque type d'agent recherché. Les milieux employés pour les agents retenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Milieux de cultures pour les micro-organismes cultivables

Agents	*Milieux de culture*
Bactéries totales	*Milieux à large spectre :* *Agar de tryptone de soja (TSA)* *Agar + peptone de soja et caséine (CSPA)* *Agar + substance nutritive (NA)*
Bactéries Gram -	Agar + sang de mouton Agar de MacConkey (MAC)
Actinomycètes thermophiles	*Milieux à large spectre* Agar + peptone de soja et caséine (CSPA) Agar + levure, glucose et tryptone(SMA ou SPCA)
Champignons	*Milieux à large spectre* Agar + extrait de Malt(MEA) Agar + dichlorane de glycérol Agar + rose de Bengale (RBA) Agar + dichlorane glycérol (DG-18)
Aspergillus	Agar SDA (Sabouraud dextrose Agar)

Source : étude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bioaérosols générés par le compostage des déchets (CAREPS, 2002)

<u>Annexe 7</u> : Illustrations sur les étapes du traitement et les engins utilisés

Photo 1 : Broyeur équipé d'une grue (Morbrack®)

Photo 2 : Broyeur alimenté par chargeur

Photo 3 : Chargeur équipé d'un filtre à poussières et à charbon sur le toit de l'engin

Photo 4 : Crible alimenté par le chargeur

Photo 5 : Poussières émises lors de la circulation des engins

Photo 6 : aérosols produits sur une PFC (autour du criblage)

<u>Annexe 8</u> : Efficacité de filtration d'un filtre en fonction de 3 mécanismes : la diffusion, l'interception, l'impaction

(source http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/RG-497.pdf)

Plusieurs mécanismes conditionnent le comportement des particules solides ou liquides dans l'air : la diffusion, la sédimentation, l'impaction, l'interception et la force électrostatique. Trois d'entre eux ont une importance déterminante sur la façon dont est captée une particule par un filtre, soit l'interception, l'impaction par inertie et la diffusion par mouvements incessants ou browniens (Yassi et Bryce, 2004; Willeke et Baron, 1993). Une augmentation de la dimension d'une particule accroît sa capacité d'être filtrée par interception et impaction par inertie alors qu'une diminution de sa dimension augmente sa collecte en faisant intervenir le mécanisme de diffusion (Willeke et Baron, 1993). Par conséquent, il existe une dimension intermédiaire de particules qui fait intervenir deux mécanismes ou plus, lesquels opèrent simultanément, sans prédominance. La courbe d'efficacité totale de la figure 1 indique le segment dans lequel le potentiel de pénétration de la particule à travers le filtre mécanique est à son maximum, et, inversement, celui dans lequel l'efficacité de filtration s'avère à son minimum (Yassi et Bryce, 2004; Willeke et Baron, 1993). Pour chaque type de filtre, il existe un diamètre de particules qui rend minimale l'efficacité de collection. Plusieurs institutions réputées considèrent la particule de **0,3 µm** comme étant celle qui pénètre le plus profondément selon les essais sur les filtres de protection respiratoire (Ruzer et Harley, 2005). Elle est d'ailleurs le paramètre de base des tests de certification effectués sur les respirateurs de la norme européenne EN149 : 2001, du NIOSH 42 CFR Part 84 et de l'Australian Standard AS1716 (Yassi et Bryce, 2004).

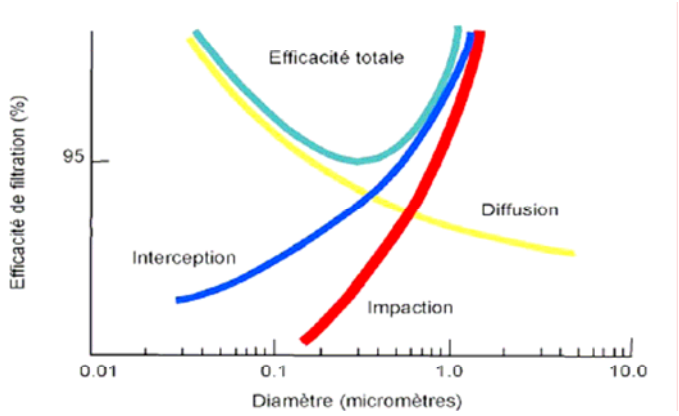


Figure 1 : Efficacité de filtration mécanique des filtres en fonction du diamètre des particules

Annexe 9 : Effets sur la santé relatés en lien avec l'exposition aux bio aérosols

Personne impliquée	Circonstances	Effets sanitaires observés	Période de latence avant déclaration des 1er symptômes	Analyses effectuées	Bio aérosols impliqués	Remarque sur les antécédents du patient	Référence bibliographique
Homme de 20 ans	Travailleur dans une usine de compostage de végétaux, ancienneté : 2 ans	BAAE : dyspnée, toux sèche, fièvre évoluant depuis 3 jours Aspergillose broncho-pulmonaire	Pour la BAAE : 2 mois Pour l'aspergillose : 6 heures	Test sérique	*A.fumigatus*	La faiblesse immunitaire suite au BAAE a favorisé l'aspergillose	Vincken, 1984
Homme de 34 ans	Jardinier	Aspergillose pulmonaire invasive	ND	*A. fumigatus* détecté dans des crachats	*A.fumigatus*	Aucun facteur prédisposant	Zuk., 1989
Personne asthmatique	Personne vivant à 75 m d'une plate-forme de compostage	Aspergillose broncho-pulmonaire	ND	Analyse environnementale : A.fumigatus : 1,2 à 2,4 UFC/m^3	*A.fumigatus*	Asthme	Lessard 1992 Kramer 1989
Homme 52 ans	Paysagiste manipulant du compost de déchets verts	BAAE ou ODTS : atteinte pulmonaire avec fièvre, myalgies, céphalées, dyspnée	12 heures	Recherche de précipitine + analyse environnementale champignon : 1,4.10^6- 4,7.10^8 UFC.m^{-3} bactéries : 6,3.10^5- 7,7.10^8 UFC.m^{-3} endotoxines : 63,6- 1630ng/m^3 spores : 1,3-3,7.10^9 spores/m^3	*A.flavus*, *A.niger*	Pas d'antécédent, résultats biologiques de la présence d'anticorps non confirmé	Weber, 1993
Personne de 39 ans	Epandage de compost sur une pelouse	Pneumopathie d'hypersensibilité : difficultés respiratoires, fatigue, toux, fièvre, douleurs articulaires	2 heures	Recherche de précipitines	Thermoactinomycètes	Rhinite allergique	Brown, 1995
Homme de 47ans	Epandage de compost dans son jardin	Aspergillose : toux grasse, crachats, douleurs thoracique, gênes respiratoires	24 heures	Prélèvements sanguins négatifs Radiographie pulmonaire (présence de nodule) Analyse des expectorations avec présence *d'Aspergillus fumigatus*	*A.fumigatus*	Pas d'antécédent Fumeur (10 cigarettes/jour)	*Lancet*, 2008

ND : Non Déterminé

Sources : Etat des connaissances sur les micro-organismes dans la filière déchets et Lancet

<u>Annexe 10</u> : Etudes épidémiologiques portant sur les effets sanitaires conséquents à l'exposition de bio-aérosols émis à partir de sites de compostage

Type d'étude et populations observées	Agents biologiques mesurés Concentrations moyennes (écart type)					Effets observés avec augmentation significative	Effets observés sans augmentation significative	Remarques	Références bibliographiques
	Bactéries totales ($UFC.m^{-3}$)	Bactéries Gram $^-$ ($UFC.m^{-3}$)	Moisissures ($UFC.m^{-3}$)	Endotoxines ($ng.m^{-3)}$)	Poussières ($mg.m^{-3}$)				
Etude transversale par interrogatoire : - travailleurs n=8 - témoin (usine d'eau potable) n = 119	54.10^3 (77.10^3) 76.10^3 (38.10^3)	4.10^3 (5.10^3) $0.01.10^3$ ($0.001.10^3$)	26.10^3 (67.10^3) $0.01.10^3$ ($0.001.10^3$)	0,8 (1,1) 0,0025 (0,04)	0,62 (0,57) 0,42 (0,25)	Augmentation de 20% du débit expiratoire Concentration élevée d'IgG		Résultats non significatifs dus à la faible population de travailleurs	Sigsgaard 1994 Danemark étude sur la fonction respiratoire des employés de plate-forme de compostage
- Travailleurs n = 362 - Population de référence n = 129	Actinomycètes méso et thermophiles Moisissures			N.D	N.D	Un cas d'hypersensibilité à *A.fumigatus*	- Pathologie respiratoire et pulmonaire, - Bronchite chronique - BAAE - Pathologie du système locomoteur - Maladie de la peau - ODTS	Performance des systèmes de mesure à améliorer	Schappler-Scheele, 1999, Allemagne
Etude transversale par interrogatoire : - travailleurs n=58 - témoin (nouveaux employés) n = 40	10^7 (actinomycètes : 10^5)	N.D	N.D	N.D	N.D	- symptômes et maladies des voies respiratoires, - maladie de la peau - syndrome ODTS - Présence d'IgG contre les antigènes fongiques - Anticorps élevés contre les actinomycètes	- BAAE - Asthme - Rhinite allergique	- Population témoin faible - Concentration déterminée à partir d'estimation des sites de traitement des déchets	Bünger et al. 2000 Allemagne
Analyses biologiques -travailleurs n=14 - témoin n=10	$>10^9$	$400 – 24.10^3$	10^3-10^6 (spores fongiques)	5-100	0,4-3,1	-augmentation des cellules totales -augmentation des leucocytes, neutrophiles, cellules épithéliales -augmentation de certains médiateurs de l'inflammation		Exposition aux bio-aérosols associée à l'augmentation de l'inflammation des voies aériennes supérieures	Douwes 2000 (Pays Bas)

<u>Annexe 11</u> : Concentrations en agents biologiques, issues de la littérature, mesurées sur des sites de compostage et dans l'air extérieur (tableaux 1 et 2)

Tableau 1 : Concentrations en agents biologiques sur des PFC (littérature)

Agents	Procédé de traitement et déchets traités	Méthodes de mesures	Concentration ($UFC.m^{-3}$ ou UE pour les endotoxines)	Auteur
Bactéries Gram -	3 usines (boues + OM) 1 usine (boue + copeaux de bois)	Andersen à 6 étages, 1,5 m du sol A l'intérieur et extérieur des bâtiments, sur poste de travail	0 à $3,7.10^5$ Genre : *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Pseudomonas*	Clark (1983) Suisse
Champignons totaux	3 usines (boues + agent gonflant type sciure) dont 2 ouvertes et 1 en bâtiment fermé	Appareil utilisé non précisé. Mesure sur séchage, retournement, broyage, transport sur rampe	7 à $5,5.10^4$ Genre : Aspergillus	Millner (1980), USA
	Boues de STEP + copeaux de bois	Appareil utilisé non précisé Mesure sous le vent et contre le vent à proximité des andains	$7,9.10^1$ à $3,1.10^3$ Genre : Aspergillus	Kothary (1984) USA
Aspergillus fumigatus	3 usines (boues + agent gonflant type sciure) dont 2 ouvertes et 1 en bâtiment fermé	Appareil utilisé non précisé. Mesure sur séchage, retournement, broyage, transport sur rampe	7 à $5,5.10^4$	Millner (1980), USA
	3 usines (boues + OM) 1 usine (boue + copeaux de bois)	Andersen à 6 étages, 1,5 m du sol A l'intérieur et extérieur des bâtiments, sur poste de travail	10^2 à $1,5.10^6$	Clark (1983) Suisse
	Boues de STEP + copeaux de bois	Appareil utilisé non précisé Mesure sous le vent et contre le vent à proximité des andains	$6,2.10^1$ à $2,5.10^3$	Kothary (1984) USA
Actinomycètes thermophiles	3 usines (boues + agent gonflant type sciure) dont 2 ouvertes et 1 en bâtiment fermé	Appareil utilisé non précisé. Mesure sur séchage, retournement, broyage, transport sur rampe	$1,7.10^1$ à $5,6.10^4$ Genre : *Micropolyspora* sp, *Nocardia* sp, *Saccharomonospora viridis*, *Streptomyces* sp, *Thermoactinomyces vulgaris*	Millner (1980), USA
Endotoxines	3 usines (boues de STEP + OM) écorce de bois 1 usine (boue + copeaux de bois	Andersen à 6 étages, 1,5 m du sol Dilution préparée à partir des filtres à poussière	1 (en salle de contrôle) 38 (en zone de traitement)	Clark (1983) Suisse

Tableau 2 : Mesures d'agents biologiques dans l'environnement extérieur

Agents	Localisation de la mesure	Méthodes de mesures	Concentration mesurée	Auteur
Bactéries totales	Zones suburbaines (résidentielle, commerciale, agricole, industrielle)	Andersen à 2 étages, 1.5m du sol, débit de 28L/min, culture sur Agar, 1 à 2 mesures par mois pendant 2 ans	Bactéries viables : de 37 à 144 UFC/m^3 en 1979 et de 31 à 115 UFC/m^3 en 1980	Jones (1983) USA
	Sites de mesures : - Village rural - Zone d'activité (bureaux + routes) - Zone proche d'une usine de compostage	Andersen 6 étages Débit de 16L/min Temps de collecte : 4min Culture sur peptone + sang humain	Médianes : - 327 UFC/m^3 - 146 UFC/m^3 - 97 UFC/m^3	Kock, 1998, Autriche
Champignons totaux et Aspergillus fumigatus	Zones suburbaines (résidentielle, commerciale, agricole, industrielle)	Andersen à 2 étages, 1.5m du sol, Débit de 28L/min, Culture sur milieu Oxgall de Littman avec antibiotique, 1 à 2 mesures par mois pendant 2 ans	Champignons mésophiles : Moy. géométrique : 273 UFC/m^3 Etendue de 0 à 7220 UFC/m^3 Champignons thermophiles : Moy. géométrique : 2.1 UFC/m^3 Etendue de 0 à 193 UFC/m^3 Aspergillus : de 0 à 71 UFC/m^3	Jones (1983) USA
	Sites de mesures : - Village rural - Zone d'activité (bureaux + routes) - Zone proche d'une usine de compostage	Andersen 6 étages Débit de 16L/min Temps de collecte : 4min Culture sur peptone + sang humain	Médianes : - 185 UFC/m^3 - 168 UFC/m^3 - 150 UFC/m^3	Kock, 1998, Autriche
	Zone urbaine Zone suburbaine	Burkard à 1 étage 1.5m du sol débit : 10L/min temps : 30s culture : Malt Agar	Moy géométrique (étendue) $1,2.10^4$ ($5,7.10^3$-$2,3.10^4$) $4,6.10^3$ ($1,9.10^3$-$1,2.10^4$)	Whu, 2000, Taiwan
Actinomycètes thermophiles	Site de non compostage	Andersen à 6 étages 2m du sol temps : 30min milieu : trypticase soja Agar	0 à 35 UFC/m^3	Millner, 1980
Endotoxines	13 sites (cotier, montagne, désert, urbain, rural) Californie du Sud, USA	104 échantillons	Moyenne géométrique : 0,44 UE/m^3 Intervalle : 0,19-1,85 UE/m^3	Mueller-Anneling2004
	Munich, Allemagne	48 échantillons de mars 1999 à juillet 2000	Moyenne géométrique = 0,019 UE/m^3 pour les $PM_{2,5}$ et 0,081 UE/m^3 pour les PM_{10}	Morgenstern, Carty et al, 2005

Annexe 12 : Résultats des mesures réalisées sur Tarascon (agents biologiques)

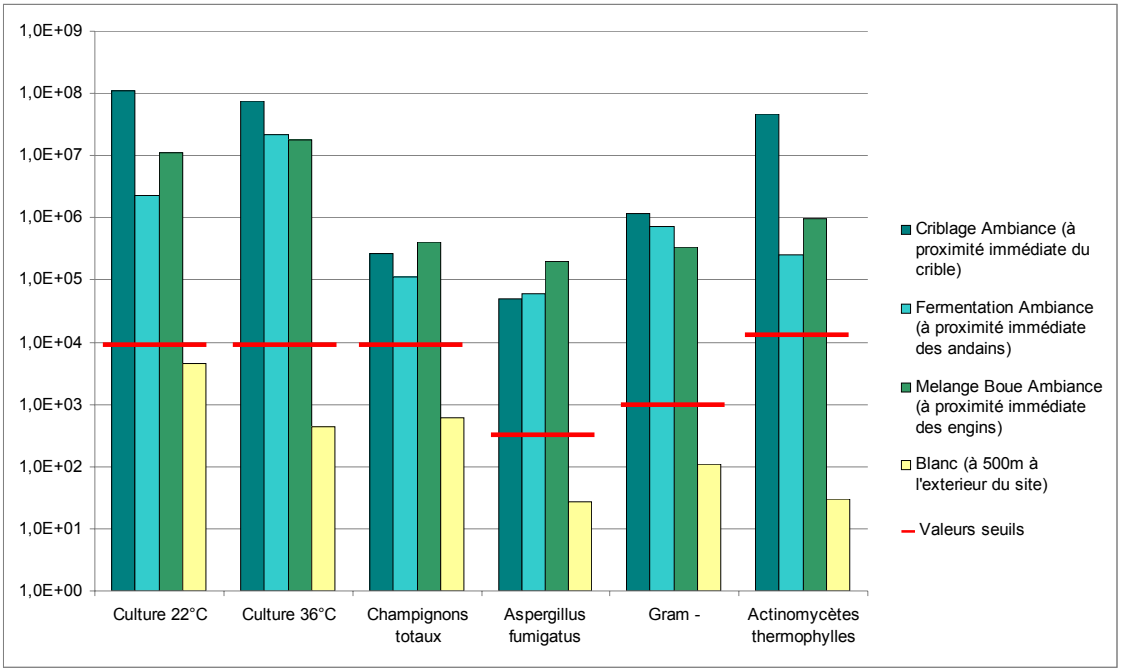


Figure 1 : Différences de concentration en agents biologiques entre le bruit de fond et les 3 ambiances retenues

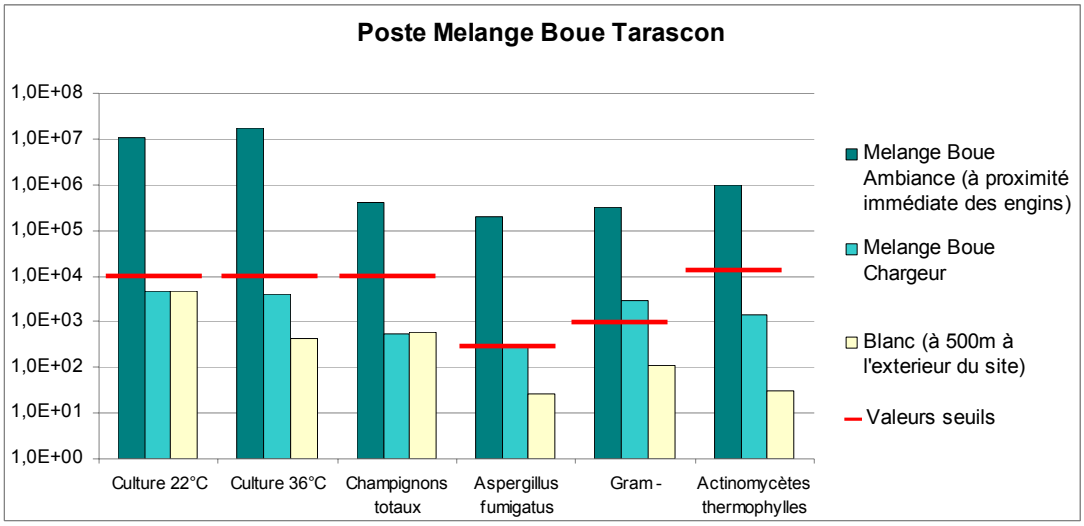


Figure 2 : Mesures de concentration en agents biologiques au mélange et au niveau du blanc

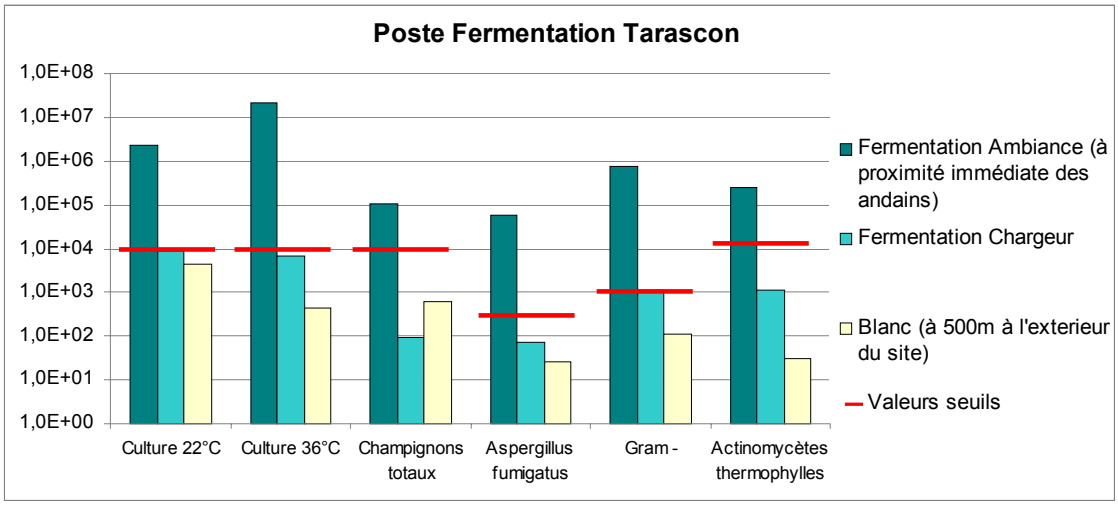


Figure 3 : Mesures de concentration en agents biologiques à la fermentation et au niveau du blanc

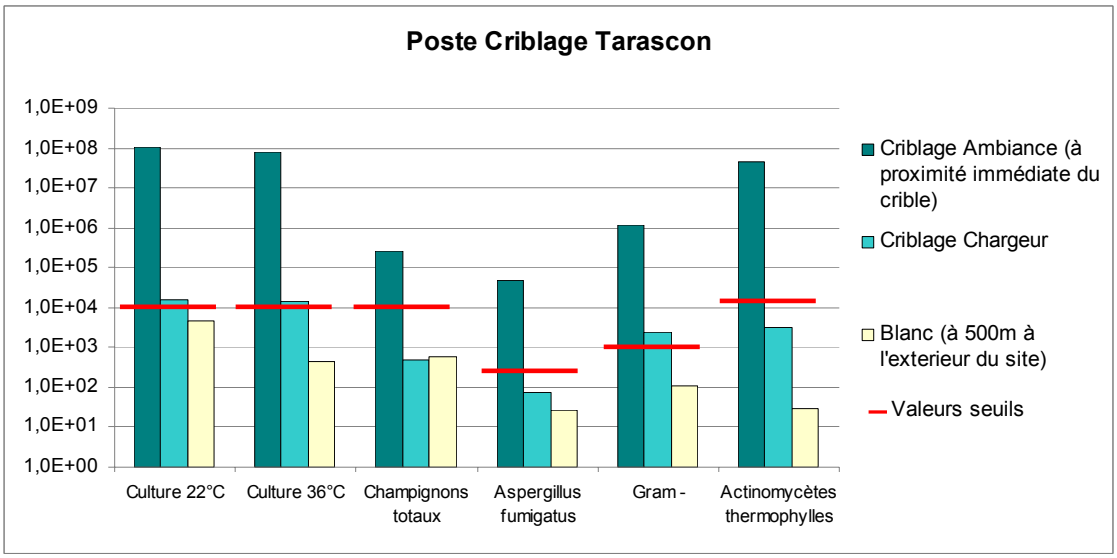


Figure 4 : Mesures de concentration en agents biologiques au criblage et au niveau du blanc

Abstract

SEDE Environnement operates 17 compost plants of sewage sludge. As a biological process, composting involves the presence of biological agents, but some of which may be pathogenic to humans. The aim of this research project is firstly to evaluate the health impact on workers of the presence in aerosols of micro-organisms and constituents from these micro-organisms (toxins…), and secondly to respond to a legislative obligation and to workers queries.

The approach used is an health risk assessment method with the hazard, dose-response and exposure assessments and the risk characterization. The biological agents selected are the total bacteria and gram-negative, actinomycetes, fungi, *Aspergillus fumigatus* and endotoxins. These agents are known to have health effects and recommended thresholds or toxicological reference value have been established in scientific literature. Only the exposition of these agents by inhalation is studied in this project because of the lack of reference value for the others exposure pathways.

The results of this study show an over-concentration on all biological agents selected in the working environment (blending, fermentation and screening) and only on bacteria Gram- in vehicles compared to the thresholds. This involves the presence of sanitary risks (infectious, inflammatory and allergic) without using individual protection equipment.

To respond to the precautionary principle and in order to limit exposure to these biological agents, technical and management solutions are in place (individual protection equipment, sanitation) or will be (dust filter, …). However, the evolution of measuring techniques and identification of agents and the determination of dose-effect relationships seem to be essential to validate the conclusion of this study.

LEDUNOIS	Bérengère	25/09/2008

Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion 2007

Risques sanitaires d'origine biologique encourus pour les travailleurs des plates-formes de compostage de boues de station d'épuration

Résumé **:**

La société SEDE Environnement gère 17 plates-formes de compostage (PFC) de boues de station d'épuration. En tant que processus biologique, le compostage implique la présence d'agents d'origine biologique dont certains peuvent être pathogènes pour l'homme. L'objectif de l'étude est d'évaluer les risques sanitaires encourus pour les travailleurs de ces PFC (52 personnes) afin de répondre à une obligation législative et à leur demande.

La démarche employée pour y répondre est celle de l'évaluation des risques sanitaires avec la description des dangers, le choix des valeurs de référence, l'évaluation de l'exposition et la caractérisation des risques. Les agents retenus sont les bactéries totales et Gram négatif, les actinomycètes, les champignons totaux, *Aspergillus fumigatus* et les endotoxines. Ces agents présentent, d'une part, des effets sanitaires connus par inhalation et, d'autre part, des seuils recommandés ou valeur toxicologique de référence dans la littérature. Les autres voies d'exposition n'ont pu être étudiées par manque de données.

Les mesures de concentrations de ces agents dans l'air, réalisées sur une PFC SEDE, montrent un dépassement des concentrations par rapport aux seuils pour l'ensemble des agents retenus pour les ambiances de travail (mélange, fermentation et criblage) et pour les bactéries Gram $^-$ dans les engins. Ceci implique la présence potentielle de risques sanitaires pour les travailleurs de nature infectieuse, inflammatoire et allergique en ambiance principalement.

Afin de limiter l'exposition à ces agents et par principe de précaution, des solutions techniques et organisationnelles sont déjà mises en place (équipement de protection individuelle, équipements sanitaires) ou vont l'être prochainement (filtres, brumisation des postes de travail…). Toutefois, l'évolution et la normalisation des techniques de mesures et d'identification des agents ainsi que la détermination de relations doses-effets semblent essentielles pour valider les conclusions de cette étude.

Mots clés **:**

Compostage, agents biologiques pathogènes, travailleurs, obligation législative, risques sanitaires, inhalation, principe de précaution, exposition

L'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les mémoires : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.