

RAPPORT D'ÉTUDE
DRC-07-76413-00350A

30/01/2007

Endotoxines

**Éléments disponibles pour une
évaluation des risques sanitaires en lien
avec les émissions des installations
classées pour la protection de
l'environnement**

Endotoxines

Éléments disponibles pour une évaluation des risques sanitaires en lien avec les émissions des installations classées pour la protection de l'environnement

Verneuil-en-Halatte (Oise)

Client (ministère, industriel, collectivités locales) :

Ministère de l'écologie et du développement durable

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Laure Déléry, unité d'évaluation des risques sanitaires, direction des risques chroniques

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Laure DELERY	Roseline BONNARD	André CICOLELLA
Qualité	Ingénieur d'étude	Ingénieur d'étude	Responsable de l'unité ERSA
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. GLOSSAIRE ET ACRONYMES	6
2. RESUME.....	7
3. INTRODUCTION	9
4. IDENTIFICATION DES DANGERS	9
4.1 Présentation de l'agent biologique	9
4.2 Effets sur la santé	11
4.3 Mesurage dans l'air	12
4.3.1 Méthode.....	13
4.3.1.1 Lieux de travail	13
4.3.1.2 Environnement	14
4.3.1.3 Conclusion.....	14
4.3.2 Concentrations mesurées dans l'environnement (hors sources de type industriel ou agricole).....	14
5. EVALUATION DE LA RELATION DOSE-REPONSE	18
5.1 Etudes sources	18
5.2 Valeurs de référence	19
6. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES INSTALLATIONS CLASSÉES ÉMETTRICES.....	21
6.1 Réglementation	21
6.2 Evaluation des sources d'endotoxine en milieu de travail	21
6.2.1 Populations professionnelles exposées.....	21
6.2.2 Caractérisation des concentrations en endotoxines dans différentes installations classées	22
6.2.2.1 Activités d'élevage.....	22
6.2.2.1.1 Elevage porcin	23
6.2.2.1.2 Elevage avicole	24
6.2.2.2 Manipulation de céréales, grains, végétaux	26
6.2.2.3 Alimentation animale.....	28
6.2.2.4 Industrie du textile	28
6.2.2.5 Industrie du bois	29
6.2.2.6 Industrie papetière.....	30

6.2.2.7	Traitement des déchets	31
6.2.2.7.1	Plates-formes de transfert des déchets.....	31
6.2.2.7.2	Tri des déchets.....	31
6.2.2.7.3	Compostage	32
6.2.2.7.4	Stockage de déchets.....	36
6.2.2.7.5	Stations d'épuration des eaux usées.....	36
6.2.2.8	Synthèse	40
7.	EVALUATION DES EXPOSITIONS : CONCENTRATIONS MESURÉES À PROXIMITÉ DES INSTALLATIONS	52
8.	CONCLUSION.....	55
9.	BIBLIOGRAPHIE	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Effets sur la santé liés aux endotoxines dans différents milieux de travail (d'après (Douwes 2003))	12
Tableau 2 : Concentrations ambiantes en endotoxines dans l'air	17
Tableau 3 : Valeurs seuils d'endotoxines dans l'air proposées dans la littérature	20
Tableau 4 : Résultats des mesures d'endotoxines aux principales étapes du traitement des effluents des industries papetières (Goyer and Lavoie 1998)	37
Tableau 5 : Concentrations en endotoxines mesurées au niveau des 6 étapes de procédé de 4 STEPS (Lee 2006)	39
Tableau 6 : Concentrations en endotoxines dans l'air par secteur d'activité professionnelle	50
Tableau 7 : Concentrations en endotoxines inhalables (UE/m ³) mesurées à proximité des installations d'activité industrielle et agricole.....	52

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Structure schématique du LPS (d'après le réseau STI - Biotechnologies Sciences Médico Sociales de l'Académie de Grenoble)	10
Figure 2 : Vue d'ensemble des niveaux d'exposition aux poussières inhalables et aux endotoxines pour 4 activités de traitement de déchets étudiées par (Wouters, Spaan et al. 2005)	35
Figure 3 : Ordre de grandeur des concentrations en endotoxines (ng/m ³) retrouvées dans différents secteurs d'activité agricoles et industriels	51

1. GLOSSAIRE ET ACRONYMES

ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists

AFSSA : agence française de sécurité sanitaire des aliments

Bioaérosol (norme EN 13098 : 2000) : particules en suspension dans l'air d'origine biologique

DECOS : Dutch Expert Committee on Occupational Standards

Endotoxine (norme EN 13098 : 2000) : constituant de la paroi externe des bactéries gram-négatif (lipopolysaccharide), constitué d'un lipide complexe, le lipide A, lié de manière covalente à un polysaccharide

FDA : food and drug administration

FEV1 : volume expiratoire forcé en 1 seconde

ICOH : Commission internationale de santé au travail (CIST en français)

LAL (norme EN 13098 : 2000) : Lysat d'Améboocytes de Limule. Enzymes provenant des cellules sanguines du crabe limule (*Limulus polyphemus*) activées par l'endotoxine

LPS (norme EN 143031 : 2003) : lipopolysaccharide. Molécules présentes dans les bactéries gram-négatif, solubles dans l'eau et stables, composées de lipides et de polysaccharide

NIOSH : institut national américain de sécurité au travail et de santé

NOAEL : dose sans effet nocif observé (DSENO en français)

ODTS : Organic Dust Toxic Syndrome (syndrome toxique de la poussière organique)

OSHA : administration de santé et de sécurité au travail américaine

Poussières organiques (norme EN 14031 : 2003) : entités aussi variées que les matières végétales, les moisissures et les spores, les mycotoxines, les bactéries, leurs composants biochimiques – endotoxine par exemple -, les excréments, les enzymes et les matières animales y compris déchets d'insectes, de rongeurs, d'oiseaux ainsi que leurs excréments

Pyrogène : capable d'induire la fièvre

STEP : station d'épuration des eaux usées

UE (norme EN 13098 : 2000) : unité d'endotoxine. Unité normalisée par rapport au matériau de référence défini.

Par convention, 1 UE/m³ correspond à 0,1 ng/m³ de l'étalon d'endotoxine de référence international (RSE) provenant d'*Escherichia coli*. En pratique, on utilise un étalon d'endotoxine de contrôle (CSE) qui est traçable par rapport à l'étalon d'endotoxine de référence trop onéreux et rare. L'actuel RSE utilisé aux Etats-Unis est appelé EC6 (*E. coli* O113 :H10 :K LPS).

2. RESUME

Ce rapport d'étude fournit des informations générales sur un contaminant biologique d'origine bactérienne, les endotoxines, dans le contexte des études de risques sanitaires des installations classées pour la protection de l'environnement. Les secteurs d'activité étudiés sont principalement d'origine industrielle et agricole. Seule la voie d'exposition humaine par inhalation est étudiée.

Les endotoxines sont des substances toxiques biologiques (toxines) libérées lors de la lyse ou de la multiplication des bactéries à Gram négatif.

Les effets sur la santé sont principalement des syndrômes respiratoires allant de la fièvre d'inhalation pour une exposition aiguë à la diminution de la fonction pulmonaire pour une exposition chronique.

La norme européenne NF EN 14031 (mai 2003) permet de standardiser la détermination des endotoxines inhalables en suspension dans l'air dans les atmosphères de travail. La méthode d'analyse repose sur le dosage LAL cinétique chromogène. Les résultats de mesure sont exprimés en unités d'endotoxines (UE)/m³. Il n'existe pas l'équivalent pour le mesurage des endotoxines dans l'environnement.

Le bruit de fond moyen en endotoxines rapporté dans la littérature varie entre 0,3 et 4,4 UE/m³ en zone urbaine, entre 1,3 et 30 UE/m³ en zone industrielle en amont des vents, la valeur moyenne de 9 UE/m³ est rapportée à 30 m en amont des vents d'élevages d'engraissement de truies et la valeur moyenne de 0,4 UE/m³ est rapportée pour des environnements naturels.

Des relations dose-réponse ont été observées à l'occasion d'études expérimentales ou d'enquêtes épidémiologiques. La Commission internationale de santé au travail (ICOH) a fixé un niveau sans risque en dessous de 100 UE/m³ selon l'AFSSA. L'ACGIH considère qu'il n'existe pas suffisamment de données à l'heure actuelle pour proposer des valeurs limites d'exposition aux endotoxines. Un comité spécialisé a été mis en place pour réfléchir à l'élaboration de telles valeurs. Aux Pays-Bas et au Canada, des valeurs-guides comprises entre 50 et 300 UE/m³ sont recommandées. Il n'existe pas pour l'instant de valeur définie en population générale.

Les endotoxines ne font pas partie des polluants surveillés dans le cadre de la réglementation des installations classées en France. De nombreux secteurs professionnels sont concernés par l'exposition aux endotoxines par inhalation. Le rapport présente différentes activités agricoles et industrielles émettrices d'endotoxines ainsi que les données de la littérature concernant les concentrations mesurées dans l'air qui les caractérisent. En résumé, les secteurs les plus étudiés sont les élevages (porcin et avicole), l'industrie du bois, le tri des déchets, le compostage et les stations d'épuration. Les concentrations les plus fortes en endotoxines inhalables sont mesurées dans les élevages (jusqu'à 10⁵ UE/m³) ainsi que dans les sites traitant des grains /végétaux (jusqu'à 10⁷ UE/m³). Les études sont assez isolées et difficiles à interpréter du fait des nombreux paramètres entraînant une variabilité des résultats. On peut également s'interroger quant à leur représentativité du fait du peu de données françaises retrouvées.

Il existe peu d'études ayant évalué la qualité de l'air à l'extérieur d'installations. Les concentrations les plus fortes ont été mesurées dans l'environnement d'usines textile traitant du coton, d'une usine de traitement biologique d'effluent d'industrie papetière, d'élevages d'engraissement de truies. En l'absence de valeur seuil d'exposition environnementale, ces valeurs peuvent seulement être comparées à la valeur d'exposition professionnelle de 50 UE/m³ qui avait été proposée en 1998 aux Pays-Bas.

A l'issue de ce travail, la conduite d'études d'impact sanitaire concernant les endotoxines dans le contexte réglementaire des installations classées semble encore prématurée. Toutefois, l'importance des concentrations rapportées dans la littérature qui ont été mesurées en environnement professionnel justifie de mieux connaître les niveaux d'exposition au travail en France et les concentrations en extérieur associées. Il semble également nécessaire de travailler à l'élaboration d'une valeur seuil en population générale permettant de protéger des populations sensibles.

Enfin, des travaux de recherche sont nécessaires pour éclaircir le rôle joué par d'autres agents environnementaux présents avec les endotoxines comme le (1→3)- β -D-glucane des moisissures par exemple.

3. INTRODUCTION

L'exposition aux poussières organiques touche de nombreux secteurs d'activité. Actuellement, il est admis que les endotoxines, contaminants biologiques d'origine bactérienne, pourraient jouer un rôle important dans le développement des maladies causées par les poussières organiques en environnement professionnel.

Les endotoxines sont les agents biologiques les plus étudiés de ces dernières décennies. Ainsi, des études expérimentales chez l'animal et environnementales ont été publiées dans les années 1980 puis un grand nombre de publication sur les endotoxines dans l'environnement a été publié à la fin des années 1990.

Ce rapport d'étude vise à fournir des informations générales sur les endotoxines dans le contexte des études de risques sanitaires des installations classées pour la protection de l'environnement : présentation de l'agent biologique et de ses dangers pour l'homme, évaluation de la relation dose-réponse, identification et caractérisation des sources d'émission, niveaux d'exposition humaine (travailleurs et population générale).

Il a été rédigé dans le cadre du programme d'appui au ministère de l'écologie et du développement durable intitulé "Evaluation des risques pour l'homme liés aux activités industrielles".

Une recherche bibliographique a été conduite pour les années 1996-2006 à partir des bases de données Medline et Web of Knowledge de l'ISI¹ et du mot « endotoxin ». Des contacts ont également été pris avec différentes structures susceptibles d'avoir mené des études sur le sujet (ADEME, INRS, AFSSA...).

Le champ d'application de cette étude est délimité à la voie d'exposition humaine par inhalation. Les secteurs d'activité étudiés sont principalement d'origine industrielle et agricole. L'environnement intérieur domestique a été exclu de l'analyse.

4. IDENTIFICATION DES DANGERS

4.1 PRESENTATION DE L'AGENT BIOLOGIQUE

Références : (Deschamps, Momas et al. 1994; Euzéby 2004)

Les endotoxines sont des substances toxiques extracellulaires associées de manière constitutive à la membrane externe des bactéries Gram négatif. *Pseudomonas sp.*, *Enterobacter agglomerans*, *Klebsiella sp.*, *Salmonella sp.*, *Escherichia coli sp.* sont les genres les plus fréquemment retrouvés (Perdrix, Madon et al. 1997).

Sur le plan structural, ce sont des lipopolysaccharides (LPS) constitués d'un lipide A enfoui dans la membrane externe de la bactérie et d'une partie polysaccharidique (chaîne O) émergeant à l'extérieur de la bactérie. Cette partie constitue la fraction variable du LPS et assure une spécificité antigénique au sein

¹ Institute for Scientific Information

d'une même espèce bactérienne (et donc induit une réponse immunitaire spécifique) (Figure 1). Chaque genre et chaque espèce de bactérie produit un LPS spécifique.

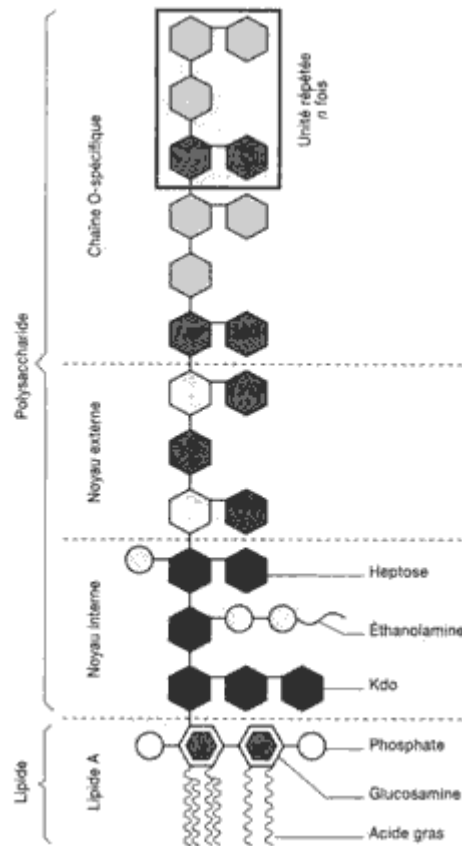


Figure 1 : Structure schématique du LPS (d'après le réseau STI - Biotechnologies Sciences Médico Sociales de l'Académie de Grenoble²)

C'est principalement lors de la lyse ou de la multiplication des bactéries que ces toxines sont libérées et produisent leur effet toxique. Ce dernier est provoqué par la fraction lipidique (lipide A), fraction la plus constante du LPS.

Les endotoxines ont des propriétés différentes selon les espèces et le stade de développement des bactéries (Deschamps, Momas et al. 1994).

Le LPS est résistant à de nombreux agents physiques ou chimiques. Sa thermorésistance est très élevée (il faut un traitement thermique de 7 heures à 126 °C ou de 30 minutes à 145 °C en chaleur humide pour la détruire) (Euzéby 2004).

² http://www.ac-grenoble.fr/sti-biotechnologies/Lexique/lexique_definitions/endotoxine.htm

4.2 EFFETS SUR LA SANTE

Références : (Deschamps, Momas et al. 1994; Marchand 1996; Deloraine 2002; Joly 2003)

Les effets sur la santé des endotoxines sont bien décrits par inhalation. C'est l'un des contaminants biologiques les mieux connus pour conduire à des syndromes respiratoires dans différents environnements (professionnels et autres).

Les endotoxines ont un faible pouvoir antigénique (non allergènes) et n'ont pas d'action spécifique (elles produisent toutes les mêmes effets biologiques).

Dans l'organisme contaminé, le LPS agit par des mécanismes inflammatoires, toxiques et immunologiques.

Une fois libérées par les bactéries, les endotoxines ont un effet indirect en activant des molécules circulantes ou en se liant sur des récepteurs cellulaires : elles font sécréter des médiateurs chimiques par différentes cellules de l'hôte (les macrophages sont les plus sollicités) qui vont provoquer différents effets en fonction de la quantité d'endotoxines impliquées. Les effets biologiques suivants sont décrits : apparition de fièvre, hypertension, troubles de la coagulation inflammation des voies aériennes, voire un état de choc endotoxinique ou de mort à très forte dose.

Les effets aigus de l'inhalation d'endotoxines sont un syndrome pseudo-grippal connu sous le nom de fièvre d'inhalation (Organic Dust Toxic Syndrome, ODTS) bien connue comme maladie des climatiseurs et humidificateurs et chez les travailleurs du coton. Les symptômes sont ceux de toux sèche, d'essoufflement, de diminution des capacités respiratoires, de malaise, de maux de tête etc.

Selon la concentration inhalée, les effets seront différents, voire opposés.

A faible dose, les endotoxines ont un effet de stimulation du système immunitaire (risque de cancer réduit, amélioration de l'efficacité de la couverture vaccinale).

Les symptômes d'une exposition répétée aux endotoxines sont souvent ceux d'une fatigue inexplicée, de symptômes digestifs (nausée, vomissement, diarrhée...) et de maux de tête.

De nombreuses études chez l'homme et l'animal suggèrent que l'exposition chronique aux endotoxines peut entraîner une bronchite chronique et une diminution de la fonction pulmonaire (Heederik and Douwes 1997).

Les effets sur la santé liés au milieu de travail ont été synthétisés par (Douwes 2003) et sont reproduits dans le Tableau 1.

Environnement de travail	Effets sur la santé
Industrie du coton	Symptômes respiratoires aigus et chroniques incluant l'asthme
Industrie agricole (élevage notamment porcs et volaille, grain)	
Alimentation animale et industrie du grain	Diminution aiguë et chronique des capacités respiratoires
Industrie de traitement des pommes de terre	
Industrie des fibres de verre	Inflammation des voies aériennes non allergique
Abattoirs	Réponse bronchique exacerbée
Industries du déchet et du compostage	Syndrome toxique des poussières organiques
Production de fibres végétales	
Industrie automobile	Bronchite chronique (?)

Tableau 1 : Effets sur la santé liés aux endotoxines dans différents milieux de travail (d'après (Douwes 2003))

Les endotoxines sont connues pour exacerber les réactions inflammatoires de l'asthme (obstruction réversible des voies aériennes) chez les ouvriers du coton, les travailleurs du secteur agricole et ceux du secteur des fibres de verre.

On suppose, par ailleurs, que l'exposition chronique aux endotoxines peut augmenter la réponse immunitaire aux antigènes chez l'Homme (effet adjuvant).

Des signes inflammatoires souvent modérés des voies aériennes supérieures, regroupés sous le terme de syndrome respiratoire non spécifique peuvent également être associés à l'exposition aux endotoxines par inhalation (Deloraine 2002).

L'asthme allergique et la sensibilité aux allergènes sont des facteurs de risque de l'exposition aux endotoxines.

4.3 MESURAGE DANS L'AIR

Les aérosols contenant les endotoxines ont des spectres larges de distribution en taille des particules (Jacobs 1997 cité par (Greff-Mirguet 2002)).

Il existe des spectres de distribution spécifiques au type d'aérosols étudiés pour une activité émettrice donnée (élevage, industrie textile, activité de traitement de déchets etc.).

4.3.1 METHODE

4.3.1.1 LIEUX DE TRAVAIL

La norme européenne NF EN 14031³ (mai 2003) « donne des indications relatives à l'évaluation de l'exposition des lieux de travail aux endotoxines bactériennes en suspension dans l'air ». Elle décrit des « méthodes d'échantillonnage, de transport et de stockage des échantillons [(T < -20°C)] et de détermination des endotoxines». Elle recommande l'utilisation d'un échantillonnage individuel, l'échantillonnage de zone (fixe) étant réservé à l'identification des sources d'exposition.

L'échantillonnage des bioaérosols inhalables (fraction massique pouvant être inhalée par le nez et la bouche et correspondant à un diamètre aérodynamique $\leq 100 \mu\text{m}$) contenant les endotoxines est réalisé sur un filtre à l'aide d'une pompe. Un certain nombre d'exigences générales sont énoncées dans cette norme notamment la recommandation d'utiliser des filtres en fibre de verre. En effet, l'utilisation d'autres types de filtres (esters de cellulose, PVC, téflon et polycarbonate) adsorbent les endotoxines et produisent par conséquent des résultats sous-évalués.

Dans la norme NF EN 13098⁴ (décembre 2000), on trouve quelques informations supplémentaires, notamment sur les types d'échantillonneurs disponibles. Mais il n'existe pas de protocole d'échantillonnage standardisé (débit et durée d'échantillonnage) d'où une variabilité des résultats disponibles d'une étude à l'autre.

Plusieurs méthodes de dosage des endotoxines ont été proposées et sont décrites par (Greff-Mirguet 2002). La norme NF EN 14031 requiert que la détection et la quantification des niveaux d'endotoxines dans l'air soient réalisées par dosage LAL (Lysat d'Améboocytes de Limule) cinétique chromogène. Il s'agit d'une réaction enzymatique in vitro permettant de détecter une activité biologique correspondant à un phénomène de coagulation du sang du Limule ou crabe en fer à cheval (arthropode marin). Cette méthode a pour caractéristique d'être très sensible. Le dosage LAL a été adopté dès 1980 aux Etats-Unis par la FDA.

Les échantillons analysés sont ensuite référencés à l'aide d'un échantillon d'endotoxines de contrôle (CSE), lui-même corrélé à un étalon d'endotoxine de référence international (RSE) déterminé à partir d'une souche d'*E. coli*.

La fidélité⁵ du résultat d'analyse doit être inférieure à 20%.

Les résultats de mesure sont exprimés en unités d'endotoxines (UE)/m³.

Limites de la méthode LAL

Des phénomènes d'inhibition ou de majoration des endotoxines détectées sont susceptibles de se produire du fait de l'existence d'interférence dans le test LAL. La présence de certains constituants dans les échantillons peut ainsi conduire à

³ Titre : Atmosphère des lieux de travail, Détermination des endotoxines en suspension dans l'air

⁴ titre : Atmosphère des lieux de travail, Règles pour le mesurage de micro-organismes et d'endotoxine en suspension dans l'air

⁵ différence entre les résultats d'analyse en double obtenus à partir du dosage LAL

une sur-estimation du dosage en endotoxines (faux-positif) ou à une sous-estimation (modification de la conformation des endotoxines qui réagissent moins bien, masque des endotoxines par d'autres constituants de la paroi bactérienne).

L'annexe B.2 de la norme NF EN 14031 précise une méthode de détection d'une sous-évaluation ou d'une surélévation de la concentration d'endotoxines mesurée de façon à obtenir une différence de $\pm 25\%$ par rapport à la valeur attendue.

4.3.1.2 ENVIRONNEMENT

Il n'existe pas, pour le moment, de procédure généralisée et stabilisée de mesurage des endotoxines environnementales.

4.3.1.3 CONCLUSION

Les endotoxines en suspension dans l'air font l'objet d'une norme européenne récente (2003) d'évaluation de l'exposition des lieux de travail. Cette norme standardise la méthode d'analyse mais par l'échantillonnage des prélèvements. Les résultats doivent être exprimés en UE/m³.

En France, l'INRS travaille sur le mesurage des endotoxines dans l'air depuis près de trois ans et à ce jour, la méthode "développée" est disponible sur le site WEB (<http://www2.inrs.fr>, page du site : Métropol : liste alphabétique D-L (2005), fiche 89 endotoxines).

4.3.2 CONCENTRATIONS MESUREES DANS L'ENVIRONNEMENT (HORS SOURCES DE TYPE INDUSTRIEL OU AGRICOLE)

Les endotoxines sont naturellement répandues dans l'environnement et on peut les retrouver dans des milieux très divers.

D'après l'ACGIH (1999), les niveaux dans l'air ambiant atteignent environ 3 UE/m³ au printemps du fait de l'aérosolisation des bactéries Gram négatif des feuilles.

Une publication récente (Madsen 2006) a fait une synthèse des données de la littérature de 1982 à 2005 incluant des données environnementales de fond en endotoxines dans l'air. Ce travail présente également des résultats de mesures de bioaérosols inhalables qui ont été obtenus dans différents environnements au Danemark.

Des données supplémentaires, non citées dans cette publication, ont également été exploitées. Elles proviennent :

- de 3 publications du Centre national de recherche pour l'environnement et la santé de l'Institut d'épidémiologie de Neuherberg en Allemagne (Carty, Gehring et al. 2003; Heinrich, Pitz et al. 2003; Morgenstern, Carty et al. 2005),
- de la publication de l'université de l'Iowa aux USA (Mueller-Anneling, Avol et al. 2004),
- d'une étude de l'IRSST (Goyer and Lavoie 1998).

L'ensemble des données collectées provenant des différentes études ayant utilisé la méthode d'analyse LAL et différentes méthodes d'échantillonnage des aérosols est présenté dans le Tableau 2.

On notera que Heinrich (2003), Carty (2003), Morgenstern (2005) et Mueller-Anneling (2004) ont analysé les PM_{2,5} et/ou PM_{2,5-10} et/ou PM₁₀.

Résultats

Le bruit de fond moyen en endotoxines totales varie entre 0,3 et 4,4 UE/m³ en zone urbaine, entre 1,3 et 30 UE/m³ en zone industrielle en amont des vents, la valeur moyenne de 9 UE/m³ est rapportée à 30 m en amont des vents d'élevages d'engraissement de truies et la valeur moyenne de 0,4 UE/m³ est rapportée pour des environnements naturels.

Heinrich (2003) a observé que les concentrations en endotoxines dans les PM_{2,5-10} étaient 10 fois plus élevées que dans les PM_{2,5} dans l'air de 2 petites villes allemandes. Il a également remarqué une grande variabilité temporelle des concentrations en endotoxines qui pourrait s'expliquer par des propriétés biologiques des PM différentes en fonction du temps.

Morgenstern (2005), qui a mesuré les endotoxines (PM_{2,5} et PM₁₀) dans l'air de la ville de Munich, note que les sources potentielles d'endotoxines à proximité des points de prélèvement expliquent seulement en partie la variation de concentration en endotoxines dans l'air qui est observée.

Heinrich (2003), Park (2000), Carty (2003) et Madsen (2006) ont remarqué⁶ une saisonnalité dans la concentration dans l'air des endotoxines : les concentrations mesurées au printemps (avril, mai, juin) sont plus élevées que celles mesurées en hiver. Carty (2003) a, de plus, mis en évidence le rôle joué par la température ambiante qui est un bon prédicteur de la concentration en endotoxines dans l'air : si la température augmente, la concentration en endotoxines augmente. A contrario, Mueller-Anneling (2004) et Schultz (2006) n'ont pas détecté de tendance saisonnière remarquable.

Heinrich (2003) et Morgenstern (2005) n'ont pas mis en évidence de variabilité spatiale dans les zones urbaines étudiées au contraire de Mueller-Anneling (2004) et de Madsen (2006) qui avaient étudié des sites plus variés.

⁶ uniquement pour les échantillons prélevés dans les villes et en zone industrielle

Environnement	Pays	Nombre d'échantillons	Période de mesurage ou température	Concentration en endotoxines UE/m ³		Référence
				Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
300 m en amont d'une usine de traitement biologique d'effluent d'industries papetières	Canada	1	np	30		(Goyer and Lavoie 1998)
Extérieur d'usines de recyclage de papier (en amont des vents)	Danemark	19	Avril-octobre	0,21-5,6	Médiane = 1,3	Breum et al., 1999 D'après (Madsen 2006)
Extérieur d'une installation de compostage (en amont des vents)	Illinois, USA	10	Septembre-novembre	0,1-3,59	M= 1,4	(Hryhorczuk 2001)
Extérieur d'une installation de compostage	Stapefeld, Allemagne	point de contrôle : 3 ~ 75 m en amont des vents : 1	np	0,2 1,6	np	(Danneberg 1997)
Zone urbaine	Massachusetts, USA	32	Toute l'année	np	GM = 0,51	(Park 2000)
Zone suburbaine		35			GM= 0,39	
Entrée d'air d'un bâtiment de bureaux	St Louis, USA	14	Juillet-septembre	0,73-2,1	GM =1,2	(Hines 2000)
Zones résidentielles de villes	Danemark	53	Janvier-avril et novembre-décembre 2003-2004	np	Médiane =0,33	(Madsen 2006)
Rues avec beaucoup de trafic, centre de Copenhague		5	Mai 2005	np	Médiane = 4,4	

Environnement	Pays	Nombre d'échantillons	Période de mesure ou température	Concentration en endotoxines UE/m ³		Référence
				Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
Petites zones industrielles avec des usines de biocarburant		68	Janvier-février et octobre –décembre 2004-2005	np	Médiane =1,3	
Deux petites villes (~20 000 habitants)	Allemagne	21 (PM _{2,5} et PM _{2,5-10})	Janvier-juin 2002	PM _{2,5} : 0,002-0,031 PM _{2,5-10} : 0,01-0,24	GM _{2,5} = 0,006-0,008 GM _{2,5-10} = 0,063-0,071	(Heinrich, Pitz et al. 2003)
Munich	Allemagne	158 (PM _{2,5})	Mars 1999- juillet 2000	0,0005-0,74	GM _{2,5} = 0,015	(Carty, Gehring et al. 2003)
Munich	Allemagne	48 (PM _{2,5} et PM ₁₀)	Mars 1999- juillet 2000	PM _{2,5} : 0,009-0,034 PM ₁₀ : 0,041-0,141	GM _{2,5} = 0,019 GM = 0,081	(Morgenstern, Carty et al. 2005)
30 m en amont des vents d'élevages d'engraissement de truies	Californie du sud, USA	np	np	np	9,3	(Mueller-Annelling, Avol et al. 2004)
13 sites (côtier, montagne, désert, urbain, rural)		104 (PM ₁₀)				

Tableau 2 : Concentrations ambiantes en endotoxines dans l'air (bruit de fond)

5. EVALUATION DE LA RELATION DOSE-REPONSE

5.1 ETUDES SOURCES

Des relations dose-réponse ont été observées à l'occasion d'études expérimentales ou d'enquêtes épidémiologiques décrites ci-dessous (ACGIH 1999) :

Des expositions expérimentales de l'Homme aux poussières de coton ont mis en évidence une relation dose-réponse entre l'exposition aux endotoxines et une obstruction aiguë des voies respiratoires avec un seuil situé entre 90 et 330 UE/m³ (Castellan et al. 1987 ; Rylander et al. 1985). Quelques études épidémiologiques ont confirmé l'observation de ces effets aigus pour de forts niveaux d'exposition en endotoxines.

Les effets chroniques des endotoxines sur les fonctions et symptômes respiratoires ont été suggérés par des études transversales⁷. Le seuil apparent d'exposition aux endotoxines était d'environ 10 000 UE/m³ pour la plus ancienne des études qui a permis de déterminer une relation dose-réponse quantitative (Thelin et al. 1984). Dans les études ultérieures, le seuil variait entre 10 et 400 UE/m³ et toute exposition située entre le bruit de fond et 100 UE/m³. Quatre études longitudinales⁸ entre l'exposition aux endotoxines et les fonctions pulmonaires sont en outre citées. Deux ont observé une association entre les endotoxines et une diminution accélérée des fonctions respiratoires, les deux autres non. Une relation dose-réponse log-linéaire a été démontrée dans le travail le plus récent (Peter, Vogelzang et al. 1998) en élevage porcin : la multiplication par 2 de la concentration en endotoxines était associée à une diminution du volume respiratoire forcé en 1 minute de 20 mL/an.

Milton et al. (1996, cité par (Hryhorczuk 2001)) rapportent une diminution de la fonction pulmonaire chez des travailleurs de l'industrie de la fibre de verre exposés à des concentrations en endotoxines supérieures à 4 ng/m³.

En 2000, une étude épidémiologique a été conduite en Allemagne de l'ouest auprès de 114 ouvriers masculins d'une usine de coton pour étudier la relation dose-effet entre l'exposition aux endotoxines et les symptômes respiratoires (Latza, Oldenburg et al. 2004). Une relation statistiquement significative a été déterminée entre l'exposition aux endotoxines et les symptômes de toux et de difficultés respiratoires. Les résultats suggèrent qu'il existe une augmentation des

⁷ (cross-sectional study) : Étude qui examine la relation entre une maladie et d'autres facteurs présents dans une population, à une période donnée. Ce type d'étude ne permet pas nécessairement de déterminer la séquence temporelle des causes et de leurs effets. D'après la définition donnée par le site web <http://www.wirc.org/welcome/indexfr.shtml> du Centre R. Samuel McLaughlin d'évaluation du risque pour la santé des populations, Ottawa

⁸ ou étude de cohorte (cohort study) : Étude dans le cadre de laquelle une population (c.-à -d., une cohorte) est définie en fonction de la présence ou de l'absence d'un facteur susceptible d'influer sur la probabilité d'apparition d'une maladie donnée ou d'un autre résultat. La cohorte fait ensuite l'objet d'un suivi qui vise à déterminer si les personnes exposées au facteur présentent véritablement un risque plus grand de présenter le résultat à l'étude. D'après la définition donnée par le site web <http://www.wirc.org/welcome/indexfr.shtml> du Centre R. Samuel McLaughlin d'évaluation du risque pour la santé des populations, Ottawa

symptômes bronchiques dose-dépendante pour des concentrations supérieures à 100 UE/m³ avec des effets marqués pour les expositions dépassant 450 UE/m³. Pour les sujets atopiques (présentant des symptômes de rhume des foins, de dermatite atopique ou de dermatite allergique), l'association entre exposition aux endotoxines et symptômes de difficultés respiratoires est encore plus prononcée.

Des études récentes rapportent une faible prévalence de sensibilisation atopique et d'allergie respiratoire chez les enfants élevés dans des fermes. Une étude de la relation, chez les adultes, entre exposition aux endotoxines et sensibilité à des allergènes courants a été conduite à partir des résultats obtenus lors d'une étude cas-témoins auprès de 162 éleveurs de porcs (Portengen, Preller et al. 2005). Une forte relation inverse a été déterminée pour des expositions aux endotoxines de 75 ng/ m³ ou moins (odd ratio de 0,03 ; 95 % CI : 0 - 0,34). Aucune association n'a été trouvée entre l'exposition aux endotoxines et les niveaux totaux d'IgE dans le sérum. L'exposition aux endotoxines était associée à une hyperréactivité bronchique aux histamines et une fonction pulmonaire plus faible chez les fermiers sensibilisés, sans preuve d'une relation non-linéaire. Les auteurs concluent que la prévalence de la sensibilisation atopique chez des éleveurs porcins adultes est faible. Les expositions aux endotoxines, ou des expositions reliées, pourraient protéger de la sensibilisation, même pour une population adulte exposée à de forts niveaux en endotoxines. Mais cette exposition est un facteur de risque d'augmentation de l'hyperréactivité des voies respiratoires et de diminution du volume pulmonaire.

Les symptômes de 468 travailleurs de stations d'épuration (STEP) et leurs liens avec l'exposition aux endotoxines ont été étudiés en 2003 aux Pays-Bas (Smit, Spaan et al. 2005). Les auteurs rappellent qu'une étude similaire avait été conduite pour les éboueurs et les employés d'usines de compostage dans le cadre de la thèse de Wouters (2003). Dans ce dernier travail, une prévalence élevée de symptômes avait été associée à une exposition accrue aux endotoxines et aux poussières inhalables. (Smit, Spaan et al. 2005) se sont appuyés sur l'exploitation de questionnaires portant sur 3 types de symptômes (symptômes des voies respiratoires inférieures et symptômes cutanés ; symptômes grippaux et systémiques ; symptômes des voies respiratoires supérieures). Ils ont observé une augmentation modérée des ratios de prévalence des symptômes grippaux, des symptômes des voies respiratoires supérieures et autres symptômes pour les sujets exposés à des concentrations en endotoxines supérieures à 50 UE/m³. Bien que ces associations ne soient pas statistiquement significatives, des relations dose-réponse ont été déterminées pour les symptômes des voies respiratoires inférieures / symptômes cutanés et pour les symptômes grippaux et systémiques.

5.2 VALEURS DE REFERENCE

L'ACGIH considère qu'il n'existe pas suffisamment de données à l'heure actuelle pour proposer des valeurs limites d'exposition aux endotoxines (ACGIH 2006). Un comité spécialisé a été mis en place pour réfléchir à l'élaboration de telles valeurs.

Toutefois, des valeurs-guides pour les endotoxines environnementales ont été proposées par le comité « poussières organiques » de la Commission internationale de santé au travail (ICOH) (Rylander 1997) :

- 200 ng/m³ pour l'ODTS,
- 100 ng/m³ pour les effets systémiques,
- 10 ng/m³ pour les signes d'inflammation des voies aériennes.

L'ICOH a fixé un niveau sans risque en dessous de 100 UE/m³ d'après l'AFSSA (Michel, Huneau et al. 2006).

Comme les effets des endotoxines sur la santé pourraient varier avec le type d'endotoxines et la présence d'autres facteurs, des valeurs limites d'exposition spécifiques d'un environnement donné devraient être requises.

D'après Deloraine, l'ICOH a proposé des valeurs limites en milieu de travail pour des expositions chroniques :

- 1 –20 ng/m³ dans les filatures de coton,
- 0,2 –470 ng/m³ dans l'industrie d'aliments pour animaux.

Une valeur limite d'exposition de 100 à 200 ng/m³ a été proposée au Danemark pour les usines de tri de déchets (étude citée par Deloraine, 2002).

Plusieurs équipes de recherche ont également proposé des valeurs seuil. Elles ont été établies sur des populations de travailleurs. Elles sont présentées dans le Tableau 3.

Valeur seuil en endotoxines	Valeur associée seuil en poussières (mg/m ³)	Environnement concerné	Type d'effet	Source
50 UE /m ³ (5 ng/m ³) pour 8 heures d'exposition journalière	Non précisée	Industrie pomme de terre	Déclin de la fonction pulmonaire	(Zock 1998)
< 1000 UE /m ³ (endotoxines totales) (100 UE /m ³ endotoxines alvéolaires)	Poussières totales : 2,5 Poussières alvéolaires : 0,23	Elevage de porcs	Déclin de la fonction pulmonaire	(Donham 1995; Reynolds 1996; Donham 2000)
< 614 UE /m ³ (endotoxines totales : 61,4 ng/m ³) (0,35 UE /m ³ endotoxines alvéolaires)	Poussières totales : 2,4 Poussières alvéolaires : 0,16	Elevage de volaille	Déclin de la fonction pulmonaire	(Donham 2000)
< 200 UE /m ³	Non précisée	Industrie papetière	Déclin de la fonction pulmonaire	(Sigsgaard, Jensen et al. 2004)

Tableau 3 : Valeurs seuils d'endotoxines dans l'air proposées dans la littérature

Aux Pays-Bas, le DECOS (Dutch Expert Committee on Occupational Standards) a proposé en 1998 (DECOS 1998) la valeur limite d'exposition professionnelle de 50 UE/m³ (environ 5 ng/m³) sur la base d'une exposition moyenne pondérée sur 8 heures : dans la littérature, les niveaux d'exposition n'entraînant pas d'effet par inhalation d'endotoxines sont compris entre 9 et 170 ng/m³ ; le NOAEL de 9 ng/m³,

basé sur des effets respiratoires aigus observés dans une étude sur la population générale ayant été exposée à des endotoxines provenant de poussières de coton, a été retenu ; un facteur de sécurité de 2 a été appliqué pour prendre en compte la sensibilité des travailleurs et le fait que les endotoxines peuvent avoir des effets pulmonaires chroniques à des concentrations inférieures à celles entraînant des effets aigus (Heederick et Douwes, 1997). Cette valeur a été modifiée en 2001 à 200 UE/m³ pour prendre en compte des considérations économiques dans le milieu agricole ; la valeur limite a été retirée mi-2003 (Martinez, Rao et al. 2004).

Au Canada, la valeur guide recommandée en milieu de travail qui est indiquée dans un rapport récent (Lavoie, Beaudet et al. 2006) est comprise entre 50 (d'après l'étude de Heederick et Douwes (1997)) et 300 UE/m³ (d'après les travaux de Donham et al. (2000), Lavoie et Pigeon (2001) et Lavoie et al. (1997)) pour une concentration en poussières totales de 10 mg/m³.

En attendant de nouvelles données, l'ACGIH recommande la mise en œuvre de la démarche d'évaluation et de contrôle de l'exposition aux bioaérosols (ACGIH 1999). Elle recommande également de retenir les valeurs limites relatives d'action suivantes :

- en présence de symptômes respiratoires, un niveau d'action correspondant à 10 fois le niveau bruit de fond,
- en l'absence de symptômes, un niveau d'action maximum correspondant à 30 fois le niveau bruit de fond.

6. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES INSTALLATIONS CLASSEES EMETTRICES

6.1 REGLEMENTATION

A l'heure actuelle, les endotoxines ne font pas partie des polluants surveillés dans le cadre de la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement en France.

6.2 EVALUATION DES SOURCES D'ENDOTOXINE EN MILIEU DE TRAVAIL

Le rôle des endotoxines en santé environnementale est très important car elles sont ubiquistes dans de nombreux milieux naturels et d'origine anthropique. Les sources d'exposition aux endotoxines sont principalement constituées par les **poussières organiques** animales ou végétales contaminées par des bactéries Gram négatives, par le traitement des déchets et par les aérosols d'eaux contaminées (NF EN 14031).

6.2.1 POPULATIONS PROFESSIONNELLES EXPOSEES

De nombreux secteurs professionnels sont concernés par l'exposition aux endotoxines par inhalation (NF EN 14031), par exemple :

- en milieu agricole, l'élevage intensif en environnement clos (porcs, poulets...) ; la production de céréales, les silos à grain, les minoteries,
- en milieu industriel :

- le recyclage d'eaux de procédés industriels, les huiles de coupe contaminées, la fabrication de fibres de verre,
- l'industrie agro-alimentaire (pomme de terre, abattoirs de volaille, installation de fabrication d'aliments pour animaux),
- l'industrie textile (coton, jute, lin),
- le secteur de l'assainissement : tri des déchets, stockage, compostage, travail dans les égouts, traitement des eaux usées, valorisation des boues,
- le secteur du conditionnement d'air avec climatisation et humidification.

6.2.2 CARACTERISATION DES CONCENTRATIONS EN ENDOTOXINES DANS DIFFERENTES INSTALLATIONS CLASSEES

Les concentrations d'endotoxines dans l'air de milieux professionnels industriels et agricoles dépassent souvent 45 UE/m³ (ACGIH 1999).

Les publications récentes des 10 dernières années ont été privilégiées pour refléter les pratiques agricoles et industrielles ainsi que la mise en œuvre des techniques de prélèvement et d'analyse des endotoxines.

Les études qui sont présentés ci-après relèvent soit d'études de métrologie environnementale, soit d'études à visée épidémiologique. Les mesures sont réalisées suite à un prélèvement fixe ou personnel (caractéristique précisée lors de la présentation des études lorsque l'information est donnée par l'auteur). Les fractions aérodynamiques des endotoxines qui sont mesurées sont de 2 types :

- Fraction inhalable (diamètre médian de 100 µm) assimilable aux endotoxines totales,
- Fraction alvéolaire (« respirable » en anglais) correspondant à un diamètre médian de 4,25 µm.

6.2.2.1 ACTIVITES D'ELEVAGE

Les émissions atmosphériques associées aux activités d'élevage agricole proviennent principalement des bâtiments d'élevage, des structures d'entreposage des déjections et de l'épandage (CSE 2000).

Les endotoxines des fractions inhalable et alvéolaire des poussières ont été mesurées le jour et la nuit dans l'air de 241 bâtiments d'élevage (vaches laitières, bovins, veaux, truies, porcelets, porcs d'engraissement, poules pondeuses en cage ou perchoir, poulet de chair) dans 4 pays d'Europe du nord (Angleterre, Pays-Bas, Danemark et Allemagne) (Seedorf 1998). La fraction alvéolaire représentait généralement 10 % de la fraction inhalable. De faibles différences ont été observées entre le jour et la nuit et entre les espèces d'animaux. La distribution des fréquences relatives de concentrations en endotoxines en différentes classes de concentrations pour tous les échantillons analysés dans l'ensemble des élevages indique qu'environ 60 % des échantillons ont une concentration en endotoxines inhalables comprise entre 0 et 50 ng/m³ et qu'environ 90 % des échantillons ont une concentration en endotoxines alvéolaires comprise entre 0 et 50 ng/m³. Pour une même fraction de poussières, des différences significatives entre les divers types d'élevage ont été observées et estimées.

Au Royaume-Uni, une campagne de mesure d'exposition personnelle aux poussières inhalables et aux endotoxines a été réalisée sur 36 installations professionnelles appartenant à 9 types d'activité agricole soit un total de 259 échantillons analysés (Simpson 1999). Les résultats sont détaillés dans les chapitres suivants.

Les concentrations d'exposition personnelle professionnelle aux endotoxines totales ont été étudiées dans 213 environnements agricoles (élevages porcins et avicoles et serres - fleurs et plantes d'ornement-) dans 4 pays européens (Danemark, Allemagne, Suisse et Espagne) (Radon 2002). Les résultats sont détaillés dans les chapitres suivants.

Toutes les publications consultées indiquent que les concentrations aéroportées en endotoxines les plus basses sont mesurées dans les élevages de bovins et les concentrations les plus élevées dans les élevages avicoles.

Concernant les élevages de bovins, les concentrations moyennes en endotoxines inhalables mesurées par Seedorf (1998) (n= 67) sont comprises entre 7,4 et 63,9 ng/m³ et, pour les endotoxines alvéolaires, les concentrations sont comprises entre 0,6 et 6,7 ng/m³. Des concentrations en endotoxines plus élevées sont obtenues pour les élevages de veaux par rapport aux élevages de vaches laitières et de bovins.

6.2.2.1.1 ELEVAGE PORCIN

Une étude épidémiologique a été conduite au début des années 1990 aux Etats-Unis pour évaluer la relation dose-réponse entre l'exposition environnementale de 201 professionnels d'élevages porcins et la fonction pulmonaire (Reynolds 1996). Les endotoxines et les poussières totales et alvéolaires ont été mesurées lors de mesures d'exposition personnelle. Une moyenne géométrique de 0,26 mg/m³ a été déterminée pour les poussières alvéolaires (3,45 mg/m³ pour les poussières totales). En ce qui concerne les endotoxines alvéolaires, une moyenne géométrique de 11,86 UE/m³ a été déterminée (176,12 UE/m³ pour les endotoxines totales).

Les concentrations moyennes en endotoxines inhalables mesurées par Seedorf (1998) sur 110 élevages sont comprises entre 52,3 et 186,5 ng/m³ et, pour les endotoxines alvéolaires, les concentrations sont comprises entre 7,4 et 18,9 ng/m³. Les concentrations les plus élevées ont été mesurées dans les élevages de porcelets.

Une concentration moyenne de 105 ng/m³ est rapportée dans une étude épidémiologique longitudinale de 3 ans qui avait pour objectif la détermination de relations dose-réponse entre les endotoxines de poussières inhalables et la diminution de la fonction respiratoire chez 171 éleveurs de porcs (Vogelzang, van der Gulden et al. 1998). L'exposition moyenne aux poussières et aux endotoxines inhalables a été déterminée par mesurage personnel en été et en hiver. La concentration moyenne annuelle en poussières qui a été mesurée était de 2,63 mg/m³.

La moyenne géométrique des concentrations en endotoxines inhalables mesurées par Simpson (1999) sur 11 élevages (27 échantillons) est de 660 ng/m³ (intervalle min-max : 60 – 14 923 ng/m³). La moyenne géométrique des concentrations en

poussières inhalables étaient de $5,8 \text{ mg/m}^3$ (intervalle min-max : $0,76 - 19,1 \text{ mg/m}^3$).

Les concentrations personnelles en endotoxines totales ont été mesurées par Radon (2002) sur 40 fermiers danois et 100 fermiers allemands. Les principales différences, relevées par l'auteur, entre les élevages danois et allemands sont les suivantes : plus longue durée de stockage des lisiers et plus long intervalle de nettoyage en Allemagne ; les fermes allemandes avaient plus souvent des ventilations naturelles. La médiane pour les élevages danois était de 58 ng/m^3 (intervalle min-max : $1,3 - 1\ 101,7 \text{ ng/m}^3$) pour une concentration médiane en poussières totales de $3,95 \text{ mg/m}^3$ (intervalle min-max : $1,1 - 13,7 \text{ mg/m}^3$). La médiane pour les élevages allemands était de $76,3 \text{ ng/m}^3$ (intervalle min-max : $0,01 - 2\ 090,1 \text{ ng/m}^3$) pour une concentration médiane en poussières totales de 5 mg/m^3 (intervalle min-max : $< \text{LD} - 76,7 \text{ mg/m}^3$).

(Portengen, Preller et al. 2005) ont modélisé une exposition chronique moyenne individuelle aux endotoxines pour 162 éleveurs porcins à partir de résultats de mesures personnelles d'endotoxines inhalables et des paramètres suivants : caractéristiques de 12 fermes, température extérieure, 8 types d'activité dans les élevages, durée d'exposition pour chaque activité pendant 2 semaines. Ils ont calculé une exposition chronique moyenne aux endotoxines allant de 36 à 316 ng/m^3 (moyenne géométrique de $105 \text{ ng/m}^3 \pm 1,4$ chez les témoins, sensiblement proche de celle des cas avec 103 ng/m^3).

Au Canada, (Lavoie, Beaudet et al. 2006) ont évalué une approche de gestion des lisiers provenant d'élevages porcins consistant en une séparation sous les animaux et un retrait rapide des déjections des bâtiments d'élevage. Cette approche permettrait de réduire les émissions de gaz, d'odeurs et de bioaérosols et de constituer une solution de gestion agroenvironnementale du phosphore et de l'azote. La qualité de l'air a été mesurée pour 6 types de configuration du système de séparation sur des installations expérimentales permettant d'obtenir des conditions contrôlées. Toutes les deux semaines pendant 16 semaines d'expérimentation, différents paramètres (dont les endotoxines) ont été suivis. Les auteurs soulignent que les conditions de qualité de l'air dans les installations expérimentales sont différentes des conditions retrouvées dans les fermes commerciales (les concentrations mesurées sont souvent plus faibles que dans les élevages commerciaux). Ceci étant, les auteurs ont mesuré des concentrations moyennes en endotoxines allant de 1 430 à 2 140 UE/m^3 selon le type de séparation étudié. Ces concentrations sont plus faibles (d'un ordre de grandeur) que les concentrations habituellement retrouvées au Canada dans les élevages porcins (environ 10^4 UE/m^3).

6.2.2.1.2 ELEVAGE AVICOLE

Les concentrations moyennes en endotoxines inhalables mesurées par Seedorf (1998) sur 64 élevages sont comprises entre 338,9 et $860,4 \text{ ng/m}^3$ (moyenne globale de 692 ng/m^3) et, pour les endotoxines alvéolaires, les concentrations sont comprises entre 29,6 et $71,8 \text{ ng/m}^3$ (moyenne globale de 49 ng/m^3).

Simpson (1999) a mesuré les concentrations en endotoxines les plus élevées au niveau des 8 élevages de poules investigués (33 échantillons) avec une moyenne géométrique de $8\ 431 \text{ ng/m}^3$ (intervalle min-max : $755 - 71\ 995 \text{ ng/m}^3$). La

moyenne géométrique des concentrations en poussières inhalables étaient de $10,6 \text{ mg/m}^3$ (intervalle min-max : $1,5 - 34,5 \text{ mg/m}^3$).

Une étude américaine a investigué la relation entre l'exposition sur 2 à 4 heures de 257 ouvriers avicoles (élevage de dinde, élevage de poulets, production d'œufs) aux poussières (totale et alvéolaire), aux endotoxines (totale et alvéolaire) d'une part, et à l'ammoniac et les symptômes respiratoires et la fonction pulmonaire d'autre part (Donham 2000). Les mesures ont été réalisées avec des capteurs personnels. Les résultats de concentrations moyennes en poussières sont de $6,5 \pm 7,8 \text{ mg/m}^3$ pour les poussières totales avec un intervalle de $0,02 - 81,3 \text{ mg/m}^3$ ($0,63 \pm 0,98 \text{ mg/m}^3$ pour les poussières alvéolaires, intervalle $0,01 - 7,7 \text{ mg/m}^3$). Les résultats de concentrations moyennes en endotoxines sont de $1589,1 \pm 3394,1 \text{ UE/m}^3$ pour les endotoxines totales ($58,9 \pm 97,3 \text{ UE/m}^3$ pour les endotoxines alvéolaires, intervalle de $0,35 - 694 \text{ UE/m}^3$).

Les concentrations personnelles en endotoxines totales ont été mesurées par Radon (2002) pour 36 fermiers suisses. Les fermes suisses avaient un cheptel d'environ 20 000 animaux par ferme. Par rapport aux élevages porcins, les auteurs notent que l'intervalle de nettoyage est plus long et la ventilation plus faible dans les élevages avicoles investigués. La médiane était de $257,6 \text{ ng/m}^3$ (intervalle min-max : $19 - 1\,634,8 \text{ ng/m}^3$) pour une concentration médiane en poussières totales de 7 mg/m^3 (intervalle min-max : $0,4 - 21,7 \text{ mg/m}^3$).

La qualité de l'air en élevage de poules pondeuses a fait l'objet d'un rapport récent de l'AFSSA (Michel, Huneau et al. 2006)⁹. Des mesures d'exposition personnelle¹⁰ aux poussières alvéolaires sont rapportées dans le tableau 17 (p 35) :

- $1,45 \pm 0,96 \text{ mg/m}^3$ en élevage au sol, $0,32 \pm 0,3 \text{ mg/m}^3$ en période d'élevage pour volières, $0,21 \pm 0,22 \text{ mg/m}^3$ et $1,12 \pm 0,5 \text{ mg/m}^3$ en période de ponte respectivement pour les élevages en cages et en volière,
- $2,24 - 2,86 \text{ mg/m}^3$ lors du transfert ou de l'enlèvement des animaux d'un élevage au sol, $0,22 - 1,4 \text{ mg/m}^3$ lors du transfert ou de l'enlèvement des animaux d'un élevage en volière, $1,7 - 2,1 \text{ mg/m}^3$ lors du transfert ou de l'enlèvement des animaux en période de ponte pour les élevages en cages et en volière,
- $4,4 - 61,1 \text{ mg/m}^3$ pour les élevages en cages et en volière lors du démontage des nids en volière,
- $24,1 - 37,6 \text{ mg/m}^3$ lors de l'évacuation des fientes en période de ponte d'un élevage en volière.

En ce qui concerne les endotoxines alvéolaires, les concentrations mesurées dans l'air sont toujours plus élevées en volières qu'en cage :

⁹ communication personnelle avec S. Le Bouquin et D. Huonnic, AFSSA Ploufragan : rapport non encore publié

¹⁰ 20 mesures : système volière (7 mesures d'ambiance, capteur placé dans la salle d'élevage, et 3 mesures d'exposition du personnel, capteur porté par le personnel) ; système cage (7 mesures d'ambiance, capteur placé dans la salle d'élevage, et 3 mesures d'exposition du personnel, capteur porté par le personnel)

- 187 ± 189 UE/m³ en cage et 681 ± 372 UE/m³ en volière pour les prélèvements dans l'ambiance des bâtiments (n=7),
- 92 ± 5 UE/m³ en cage et 433 ± 244 UE/m³ en volière pour les prélèvements par capteur personnel (n=3).

Une étude bibliographique réalisée pour l'AFSSA sur l'exposition et les effets sanitaires respiratoires dans les élevages avicoles (Sépia-Santé 2006) rapporte les résultats d'une étude suédoise (Larsson, Larsson et al. 1999) ayant porté sur 3 élevages de poules pondeuses résidant soit en cage (1 élevage 2500 animaux) soit en volière (2 élevages 10 000 animaux). Les concentrations en poussières inhalables qui sont rapportées varient entre 3,3 et 5,2 mg/m³ pour les élevages en volière et entre 1,9 et 2,7 mg/m³ pour l'élevage en cage. Les concentrations en endotoxines sont comprises entre 83 et 175 ng/m³ en volière et entre 96 et 108 ng/m³ en cage.

6.2.2.2 MANIPULATION DE CEREALES, GRAINS, VEGETAUX

L'aérobiocontamination de l'industrie de traitement du grain a été étudiée aux Pays-Bas au niveau de 12 usines à l'occasion de 2 enquêtes épidémiologiques s'étant successivement déroulées en 1986 et 2000 (Post, Heederik et al. 1998). L'exposition moyenne personnelle aux poussières inhalables et aux endotoxines a été évaluée sur 12 postes de travail à partir de 350 échantillons de poussières collectés et analysés sur les 2 périodes d'étude. Pour l'ensemble des sites, la concentration moyenne en poussières est comprise entre 2,5 et 20,3 mg/m³ selon le poste de travail. La concentration moyenne en endotoxines est comprise entre 3,6 et 99 ng/m³ selon le poste de travail.

Simpson (1999) a mesuré des concentrations en endotoxines inhalables à l'intérieur d'une **zone portuaire de stockage de grains et de 2 usines de fabrication de farine** (31 échantillons) avec une moyenne géométrique de 115 ng/m³ (intervalle min-max : 3 – 2 247 ng/m³). La moyenne géométrique des concentrations en poussières inhalables étaient de 4,4 mg/m³ (intervalle min-max : 0,08 – 72,5 mg/m³).

Une étude a été conduite en Finlande au niveau de 14 environnements professionnels pour d'une part évaluer l'exposition des travailleurs aux endotoxines et aux peptidoglycanes et d'autre part, pour étudier l'association entre les symptômes rapportés par les travailleurs et les expositions biologiques détectées (Laitinen, Kangas et al. 2001) L'auteur a mesuré les endotoxines totales dans l'air de 2 **installations de stockage de grain/végétaux** (5 échantillons en prélèvement fixe et 4 échantillons en prélèvement personnel). Il a déterminé des concentrations médianes de 17 000 ng/m³ (intervalle de variation : 1 700 – 38 000 ng/m³) pour le prélèvement fixe et de 5 600 ng/m³ (intervalle de variation 4 000 et 8 000 ng/m³) pour le prélèvement personnel.

A la fin des années 1990 les concentrations en poussières (n = 101) et endotoxines (n = 37) inhalables de 8 **industries de semences agricoles** (herbe, céréale, végétaux) ont été évaluées aux Pays-Bas par le suivi personnel de 57 professionnels en fonction de différents postes de travail (Smit, Wouters et al. 2006). Une moyenne géométrique de 1,6 mg/m³ en poussières inhalables a été calculée (intervalle : 0,1 – 98 mg/m³). Une moyenne géométrique de 1800 UE/m³ en endotoxines inhalables est également calculée pour l'ensemble des

échantillons avec notamment une valeur maximale mesurée dans un laboratoire d'inspection de semences (274 000 UE/m³).

Les expositions personnelles aux endotoxines inhalables ont été mesurées auprès de 61 employés d'une **usine de transformation de pommes de terre** localisée aux Pays-Bas. Les résultats ont été classés en catégorie de faible exposition (2,1 ng/m³) et de forte exposition (5,6 ng/m³) (Zock 1998).

Des mesures fixes de poussières et d'endotoxines totales dans l'air couvrant l'ensemble du procédé de production ont été réalisées en Pologne dans une **usine de transformation de pommes de terre** employant 140 personnes (Dutkiewicz, Krysinska-Traczyk et al. 2002). Les résultats indiquent des concentrations en poussières allant de 1,4 à 26,6 mg/m³ avec des concentrations beaucoup plus élevées (114,9 – 200,5 mg/m³) pour une opération de transformation de l'amidon de pomme de terre en sirop. En ce qui concerne les endotoxines, les auteurs ont mesuré des concentrations allant de 0,011 à 0,089 µg/m³ pendant les étapes initiales de transformation en passant par des concentrations comprises entre 45,9 et 1893,9 µg/m³ après l'opération de blanchiment. Pour l'opération de transformation de l'amidon de pomme de terre en sirop, des concentrations comprises entre 0,029 et 0,156 µg/m³ sont rapportées.

L'OSHA a mené une inspection dans une usine de traitement de pommes de terre suite à une plainte déposée en 2000 portant sur des syndrômes grippaux signalés de manière régulière depuis 1985 dans la même usine à un bureau local de l'OSHA (Ingalls 2003). Une étude du NIOSH l'année précédente avait mis en évidence des concentrations en endotoxines élevées dans les zones de travail où l'eau était utilisée. L'évaluation de l'OSHA a donc porté sur l'exposition des travailleurs aux aérosols d'eau. Des échantillons d'endotoxines ont été collectés soit de manière fixe dans des zones de travail soit de manière personnelle par l'intermédiaire de capteurs portés par les employés de l'usine. Les résultats indiquent des concentrations relativement élevées en endotoxines dans l'air allant de 0,4 à 298 ng/m³ pour les échantillons prélevés dans les zones de travail et allant de 5 à 62 ng/m³ pour les échantillons personnels. La valeur la plus forte a été obtenue dans une zone de forte aérosolisation de l'eau au niveau d'un réservoir équipé d'une pompe. L'OSHA conclut son rapport en reconnaissant la possibilité d'effets sur la santé des employés résultant de l'exposition aux endotoxines dans les zones où de l'eau est utilisée. L'OSHA recommande d'installer un système de ventilation et d'utiliser des moyens de protection respiratoire pour réduire l'exposition aux bioaérosols.

La concentration des endotoxines totales dans l'air a été étudiée en Pologne pendant 10 activités agricoles confinées incluant la **manipulation et le traitement de 6 types de végétaux** : grain, foin, semences horticoles, herbes, pommes de terre (Dutkiewicz, Krysina-cuteska-Traczyk et al. 2000). Les valeurs médianes mesurées allaient de 0,0125 µg/m³ lors de la manipulation de foin à 54,9 µg/m³ lors du broyage des grains.

Les endotoxines ont également été mesurées par le même auteur dans 2 usines de traitement d'herbes polonaises (Dutkiewicz, Krysinska-Traczyk et al. 2001). Ces usines utilisent 11 types d'herbes (ortie, cumin, feuille de bouleau, chélidoine, marjolaine, menthe, menthe poivrée, sauge, millepertuis, acore aromatique, achillée millefeuille) pour la production de médicaments, de cosmétiques et

d'épices. Des échantillons d'air ont été prélevés en 14 points pendant différentes opérations (n= 28). Les valeurs mesurées étaient comprises entre 0,8 et 2 681 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la 1^{ère} usine et entre 0,2 et 71,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la 2^{nde} usine (médiane pour l'ensemble des résultats 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les concentrations en poussières étaient comprises entr 3,2 et 946 mg/m^3 sur la 1^{ère} usine et entre 4,1 et 58,9 mg/m^3 sur la 2^{nde} usine (médiane pour l'ensemble des résultats : 18,1 mg/m^3).

6.2.2.3 ALIMENTATION ANIMALE

Simpson (1999) a mesuré des concentrations en endotoxines inhalables au niveau d'une installation d'alimentation animale (6 échantillons) avec une moyenne géométrique de 30 ng/m^3 (intervalle min-max : 6 – 85 ng/m^3). La moyenne géométrique des concentrations en poussières inhalables étaient de 5,9 mg/m^3 (intervalle min-max : 3 – 9,1 mg/m^3).

Laitinen (2001) a mesuré les endotoxines totales dans l'air de 3 industries d'alimentation animale (13 échantillons en prélèvement fixe et 17 échantillons en prélèvement personnel). Il a déterminé des concentrations médianes de 6,5 ng/m^3 (intervalle de variation : 0,3 - 20 ng/m^3) pour le prélèvement fixe et de 19 ng/m^3 (intervalle de variation 0,2 - 50 ng/m^3) pour le prélèvement personnel.

6.2.2.4 INDUSTRIE DU TEXTILE

On sait depuis de nombreuses années que les travailleurs du coton constituent une population à risque en ce qui concerne le développement de maladies pulmonaires professionnelles. L'inhalation de poussières de coton est associée à une maladie appelée la byssinose ou fièvre des usines textiles (syndrome des poussières organiques). La poussière de coton est un mélange complexe qui comprend une grande variété de substances (débris de plantes, de fibres, des bactéries, des moisissures, des particules de sols, des pesticides etc.). Les endotoxines ont été identifiées par certains chercheurs comme un agent étiologique potentiel de certains problèmes respiratoires rencontrés chez ces professionnels. Plusieurs facteurs sont susceptibles d'influencer la concentration d'endotoxines dans l'air (matière brute, type de transformation, type de procédé appliqué, caractéristique du système de ventilation, humidité et température de l'air etc.) (Marchand, Lalonde et al. 2003).

Simpson (1999) a mesuré au Royaume-Uni les endotoxines inhalables dans l'air de 2 installations de filature de coton (31 échantillons) avec une moyenne géométrique de 454 ng/m^3 (intervalle min-max : 66 – 6 936 ng/m^3). La moyenne géométrique des concentrations en poussières inhalables étaient de 1,1 mg/m^3 (intervalle min-max : 0,22 – 5,4 mg/m^3). Il a également étudié 28 échantillons provenant d'une filature de lain. Il a calculé une moyenne géométrique de 83 ng/m^3 (intervalle min-max : 1 – 3 045 ng/m^3). La moyenne géométrique des concentrations en poussières inhalables étaient de 3,9 mg/m^3 (intervalle min-max : 0,8 – 61,7 mg/m^3).

Laitinen (2001) a mesuré les endotoxines totales dans l'air d'une installation de traitement du coton (5 échantillons en prélèvement fixe et 4 échantillons en prélèvement personnel). Il a déterminé des concentrations médianes de 11 ng/m^3 (intervalle de variation : 1,9 - 223 ng/m^3) pour le prélèvement fixe et de 120 ng/m^3 (intervalle de variation 14 - 960 ng/m^3) pour le prélèvement personnel.

Le Québec possède 350 usines textiles traitant la fibre de coton. Un rapport a été réalisé en 2003 pour renseigner la présence d'endotoxines dans l'air ambiant au niveau de 4 usines (Marchand, Lalonde et al. 2003). Des mesures d'endotoxines inhalables (n = 1018) ont été réalisées de mai 2000 à mars 2001 sur 3 périodes (T0, T 6 semaines, T 6 mois) et pour différents postes de travail (de 6 à 18 postes étudiés selon les usines). Les résultats indiquent une grande variabilité des concentrations dans l'air avec des niveaux en endotoxines inhalables allant de 3 à 14 866 UE/m³ en fonction des usines et des procédés de transformation utilisés. Les procédés de transformation les plus générateurs d'endotoxines dans l'air ambiant ont été identifiés.

Dans l'air d'une usine de filature de coton allemande, des concentrations en endotoxines alvéolaires (n=57, prélèvement fixe) comprises entre 9 et 7 177 UE/m³ (médiane de 450 UE/m³) ont été rapportées (Lacza, Oldenburg et al. 2004). Les concentrations moyennes en poussières alvéolaires sur 8 heures de travail associées pour les différentes zones de travail étaient inférieures à la limite de détection de 0,17 mg/m³ pour 71,4 % des mesures (la concentration maximale mesurée étant de 0,69 mg/m³).

Enfin, une méta-analyse (Lane, Nicholls et al. 2004) rapporte des concentrations moyennes en endotoxines totales dans l'air d'usines de coton comprises entre 2 et 485 ng/m³ selon les stades de production. Les concentrations en poussières (< 5 µm) associées sont comprises entre 0,15 et 1,7 mg/m³.

6.2.2.5 INDUSTRIE DU BOIS

Simpson (1999) a mesuré au Royaume-Uni les endotoxines inhalables dans l'air de 6 scieries (37 échantillons) avec une moyenne géométrique de 19 ng/m³ (intervalle min-max : 2 – 266 ng/m³). La moyenne géométrique des concentrations en poussières inhalables étaient de 1,4 mg/m³ (intervalle min-max : 0,3 – 10,2 mg/m³).

L'exposition personnelle aux endotoxines inhalables et alvéolaires de poussières de bois a été évaluée dans différents environnements de travail dans l'État du New South Wales en Australie (Alwis 1999). Les sites investigués étaient les suivants : 2 centres d'abattage, 4 scieries, une usine de broyage et 5 menuiseries. Les résultats sont les suivants :

- centres d'abattage : moyenne (géométrique) en endotoxines inhalables de 1,5 ng/m³ (moyenne géométrique en endotoxines alvéolaires de 0,14 ng/m³) ; moyenne (géométrique) en poussières inhalables de 0,56 mg/m³ (moyenne géométrique en poussières alvéolaires de 0,03 mg/m³) ;
- scieries : moyenne (géométrique) en endotoxines inhalables de 4,3 ng/m³ (moyenne géométrique en endotoxines alvéolaires de 0,65 ng/m³) ; moyenne (géométrique) en poussières inhalables de 1,59 mg/m³ (moyenne géométrique en poussières alvéolaires de 0,29 mg/m³) ;
- usine de broyage : moyenne (géométrique) en endotoxines inhalables de 3,27 ng/m³ (moyenne géométrique en endotoxines alvéolaires de 0,81 ng/m³) ; moyenne (géométrique) en poussières inhalables de 2,86 mg/m³ (moyenne géométrique en poussières alvéolaires de 0,26 mg/m³) ;
- menuiseries : moyenne (géométrique) en endotoxines inhalables de 2,41 ng/m³ (moyenne géométrique en endotoxines alvéolaires de 0,33 ng/m³) ;

moyenne (géométrique) en poussières inhalables de 3,68 mg/m³ (moyenne géométrique en poussières alvéolaires de 0,48 mg/m³).

La contamination de l'air de 17 scieries de bois canadiennes de différentes tailles, traitant différents types de bois a été étudiée (n=17, prélèvement personnel) de mai 1996 à octobre 1997 (Cormier, Merlaux et al. 2000). Ce travail, qui avait pour objectif d'évaluer l'impact sanitaire respiratoire de l'exposition des employés de ce secteur d'activité, a mis en évidence des concentrations en endotoxines comprises entre 124 et 17 067 UE/m³ (selon les sites, les médianes variaient de 318 à 2 802 UE/m³). La concentration en poussières inhalables associée a seulement été mesurée sur 8 des 17 sites. Les concentrations mesurées étaient comprises entre 0,04 et 5,1 mg/m³ (selon les sites étudiés, les médianes variaient de 0,16 à 2,2 mg/m³).

L'exposition personnelle (8 h) aux poussières inhalables (n=57) et aux endotoxines associées (n=20) a été évaluée auprès de 112 ouvriers travaillant dans une usine de fabrication de contre-plaqué réalisé à partir de bois de pin en Nouvelle-Zélande (Wouters, Spaan et al. 2005). La moyenne géométrique en poussières inhalables qui a été calculée était de 0,7 mg/m³ et celles en endotoxines était de 23 UE/m³.

6.2.2.6 INDUSTRIE PAPETIERE

Dans leur étude, (Goyer and Lavoie 1998) rapportent des données bibliographiques de concentration dans l'air pour des usines de fabrication de pâtes et papier comprises entre 10 et 760 UE/m³.

Laitinen (2001) a mesuré les endotoxines totales dans l'air de 3 sites industriels : une usine de pâte à papier, une usine de fabrication de papier et une usine de recyclage de papier (22 échantillons en prélèvement fixe et 11 échantillons en prélèvement personnel). Il a déterminé des concentrations médianes de 3,3 ng/m³ (intervalle de variation : 0,1 – 51 ng/m³) pour le prélèvement fixe et de 6 ng/m³ (intervalle de variation : 1 - 36 ng/m³) pour le prélèvement personnel.

Les concentrations en endotoxines totales dans l'air (n=10, prélèvement fixe) ont été mesurées en 2000-2001 dans 2 usines de fabrication de papier du nord de la Pologne traitant du pin Scots (Prazmo, Dutkiewicz et al. 2003). Les résultats étaient étalés entre 4,2 et 2 500 ng/m³ d'endotoxines dans l'air selon les postes de travail. Les concentrations en poussières étaient comprises entre 0,13 et 3,9 mg/m³. Les auteurs rapportent les résultats de l'étude de Rylander en 1999 qui avait déterminé des concentrations comprises entre 23 et 230 ng/m³ dans une usine de fabrication de papier.

L'exposition personnelle de 97 employés d'une usine danoise de fabrication de papier à partir de papier recyclé a été évaluée en 2000 (Sigsgaard, Jensen et al. 2004). En fonction des postes de travail, les concentrations en endotoxines totales qui ont été mesurées sont comprises entre 6 et 370 UE/m³ (médiane : 69 UE/m³) dans la zone terminale humide des machines à papier et comprises entre 16 et 19 UE/m³ (médiane 6 UE/m³) dans la zone de travail de la pulpe de papier. L'exposition aux poussières totales associée variait entre 0,07 et 2,1 mg/m³ (médiane : 0,2 mg/m³) dans la zone terminale humide des machines à papier et entre 0,01 et 0,34 mg/m³ (médiane 0,09 mg/m³) dans la zone de travail de la pulpe de papier.

6.2.2.7 TRAITEMENT DES DECHETS

Ce chapitre s'appuie essentiellement sur des documents récents qui traitent du risque biologique et des déchets :

- étude RECORD 2003 intitulée « Etat des connaissances sur les micro-organismes dans la filière déchets » (Hours 2003),
- étude INERIS 2003 intitulée « Données disponibles pour l'évaluation des risques liés aux bioaérosols émis par les installations de stockage des déchets ménagers et assimilés » (Déléry 2003),
- étude CAREPS 2002 intitulée « Etude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bioaérosols générés par le compostage des déchets » (Deloraine 2002).

6.2.2.7.1 PLATES-FORMES DE TRANSFERT DES DECHETS

Les stations de transfert sont très peu étudiées. Hours (2003), Wouters, Spaan et al. (2005) mentionnent les résultats d'une seule étude réalisée aux Pays-Bas (van Tongeren et al. 1997) conduite au niveau de 3 stations de transfert de déchets ménagers (n=26) dont une pratiquait le pré-tri manuel avant transport. Les résultats d'analyse d'exposition personnelle aux poussières inhalables et aux endotoxines font état :

- de concentrations moyennes (géométriques) en endotoxines dans l'air comprises entre 290 et 520 UE/m³ (intervalle : 159 – 3536 UE/m³) selon de poste de travail dans l'usine pratiquant le pré-tri manuel (poussières : GM = 7,3 – 8,3 mg/m³) ;
- de concentrations moyennes (géométriques) en endotoxines dans l'air comprises entre 30 et 71 UE/m³ (intervalle : 16 – 137 UE/m³) selon de poste de travail dans les 2 autres usines (poussières : GM = 0,5 – 2,7 mg/m³).

6.2.2.7.2 TRI DES DECHETS

La plupart des études publiées à ce jour sont d'origine danoise. Les résultats d'études parues depuis 1996 et citées par (Hours 2003) sont les suivants :

- étude de Würst (1997, Danemark) : concentrations en endotoxines comprises entre 0,4 et 1 ng/m³ pour le tri de papiers d'origine domestique (poussières totales : 0,3 – 0,5 mg/m³), 0,4 – 2 ng/m³ pour le tri de papiers provenant de commerces (poussières totales : 0,2 – 0,5 mg/m³) ;
- étude de van Tongeren (1997, Pays-Bas, prélèvements sur une usine de tri sur collecte séparative) : concentrations moyennes en endotoxines de 35,5 ng/m³ (intervalle : 15,9 – 68,4 ng/m³) au niveau du poste de chargement, de 131,1 ng/m³ (intervalle : 19,5 – 353,6 ng/m³) au niveau du poste de tri ;
- étude de Sigsgaard (1997, Danemark) : concentration moyenne en endotoxines de 2,5 ng/m³ au niveau d'une usine de tri d'OM (poussières totales : moyenne 0,74 mg/m³) et de 1,3 ng/m³ au niveau d'une usine de tri de papiers (poussières totales : moyenne 0,83 mg/m³) ;

- étude de Breum (1999, Danemark, 9 centres de tri du papier) : concentration médiane en endotoxines de 5,7 UE/m³ (¹¹) (intervalle : 0,63 – 66 UE/m³ ; poussières totales : moyenne 0,55 mg/m³) au niveau de la réception (n = 23), concentration moyenne de 9,7 UE/m³ (intervalle : 1,2 – 100 UE/m³ ; poussières totales : moyenne 0,57 mg/m³) au niveau du tri (n=48), concentration moyenne de 11 UE/m³ (intervalle : 2,2 – 140 UE/m³ ; poussières totales : moyenne 0,78 mg/m³) au niveau de la presse (n=16), concentration moyenne de 2,7 UE/m³ (intervalle : 0,93 – 69 UE/m³ ; poussières totales : moyenne 0,2 mg/m³) au niveau d'un poste « multitâche » (n=12).

Laitinen (2001) a mesuré les endotoxines totales dans l'air d'une installation de tri de déchets (8 échantillons en prélèvement fixe et 1 échantillon en prélèvement personnel). Il a déterminé des concentrations médianes de 120 ng/m³ (intervalle de variation : 0,9 - 1400 ng/m³) pour le prélèvement fixe et de 260 ng/m³ pour le prélèvement personnel.

Les concentrations dans l'air en poussières totales et en endotoxines ont été mesurées (échantillons prélevés par capteur personnel) au niveau de 9 centres de tri anglais et gallois traitant des déchets ménagers et des déchets provenant de commerce (Gladding 2003). Les seules différences portant sur les centres étaient la façon dont ils collectaient les déchets (bennes, sacs, poubelles de tri, collecte mixte). Les résultats indiquent des concentrations moyennes en endotoxines (n= 128) allant de 1,9 à 31 ng/m³ (intervalle : 0,19 – 198,2 ng/m³) selon les sites. Les concentrations moyennes en poussières totales (n=260) étaient comprises entre 2,1 et 20,3 mg/m³.

Une série de prélèvements fixes d'air d'une journée a été organisée au cours de l'été 2004 dans le hall d'un centre de tri de déchets ménagers de Lorraine pour évaluer la distribution des endotoxines dans les fractions aérodynamiques des bioaérosols (Duquenne 2006). Trois méthodes d'échantillonnage ont été utilisées : impacteur Marple, échantillonnage par filtration, échantillonnage d'air par centrifugation liquide. Les résultats montrent que :

- les mesures obtenues par filtration de l'air sur filtre de verre étaient significativement supérieures (moyenne de 45 UE/m³) aux mesures obtenues par filtration d'air sur membrane en polycarbonate et par impaction liquide (IP 10-M) (moyennes respectives de 27,5 et 29,5 UE/m³),
- les endotoxines sont majoritairement véhiculées par les particules de diamètre supérieur à 3,5 µm.

6.2.2.7.3 COMPOSTAGE

On dispose de quelques études fournissant des résultats de concentration en endotoxines dans l'air ambiant d'usines de compostage.

Les concentrations en poussières totales (n=49) et en endotoxines (n=32) ont été mesurées dans l'air d'une installation de compostage américaine traitant des boues de station d'épuration urbaine (Darragh 1997). Les résultats indiquent des concentrations en endotoxines comprises entre 28 et 5 930 ng/m³ pour une

¹¹ 1 ng = 12,5 à 15,5 UE selon le kit d'analyse utilisé, selon la note de Hours (2003)

concentration moyenne (géométrique) en poussières totales comprise entre 1,2 et 35,2 mg/m³ (0,2 – 3 mg/m³ pour les poussières alvéolaires).

Les concentrations en endotoxines dans l'air ont été mesurées dans un centre de compostage allemand (déchets compostés non précisés) fonctionnant selon un système de traitement fermé (Herhof box-system) (Danneberg 1997). Trois points de prélèvement ont été étudiés (un seul échantillon par point de mesure) : près du tamis rotatif, à environ 150 m sous les vents dominants et à environ 75 m en amont des vents dominants. Près du tamis rotatif, une concentration en endotoxines de 20 ng/m³ a été mesurée. L'air émis par le biofiltre a également été analysé et une concentration d'environ 0,01 ng/m³ a été déterminée.

Aux Pays-Bas, les concentrations en endotoxines (n=20) et en poussières totales ont été mesurées au niveau d'un centre de compostage traitant des ordures ménagères à l'air libre (van Tongeren 1997). Les auteurs ont mesuré une concentration en endotoxines comprise entre 0,7 et 55 ng/m³ (moyenne géométrique de 9,7 ng/m³). Les concentrations en poussières étaient comprises entre 9,7 et 14,3 mg/m³.

En Finlande, (Tolvanen 1998) a mesuré les endotoxines dans l'air d'un centre de compostage de déchets mixtes à ciel ouvert (1/3 OM, 1/3 copeaux de bois, 1/3 déchets de construction). Les concentrations rapportées (mesures lors du broyage, du retournement et du criblage) varient entre 0,8 et 344 ng/m³ pour une concentration en poussière comprise entre < 0,1 et 0,9 mg/m³.

Aux Etats-Unis, (Hryhorczuk 2001) a mesuré des concentrations en endotoxines totales comprises entre 0,1 et 6 ng/m³ (moyenne de 1,9 ng/m³) dans l'air d'une usine de compostage à l'air libre traitant des déchets verts de jardin (n=18, prélèvement fixe). La concentration en poussières associée était de 0,6 mg/m³.

De septembre à novembre 1995, une étude a été menée aux Etats-Unis sur un centre de compostage ouvert traitant des déchets verts suite à une inquiétude du voisinage portant sur les odeurs et l'exposition aux bioaérosols (Hryhorczuk 2001). Des échantillons de poussières totales, d'endotoxines et de bioaérosols ont été analysés pendant 10 jours au niveau de 5 points de prélèvement répartis sur site et dans son environnement proche (1-environ 300 m au nord/nord-est dans une prairie, 2- environ 100 m au sud, 3- environ 300 m à l'est/nord-est ou environ 200 m à l'ouest/sud-ouest en aval des vents dominants selon l'orientation principale des vents, 4- au centre de l'usine, 5- capteur personnel porté par un employé ou fixé à côté de l'employé sur le chargeur). Concernant les échantillons prélevés sur site (n=18), la concentration moyenne en endotoxines était de 1,9 ng/m³ (intervalle : 0,1 – 6 ng/m³) et la concentration moyenne en poussières totales était de 0,6 mg/m³ (intervalle : 0,05 – 1,8 mg/m³).

En Finlande, une étude d'exposition professionnelle a été conduite entre 2001 et 2003 au niveau d'un centre de compostage (bioréacteur en caisson) traitant des biodéchets d'origine domestique ou de commerce et des déchets d'abattoirs (Tolvanen, Nykanen et al. 2005). Trois points de prélèvement ont été étudiés : aire de réception des biodéchets, hall de compostage, pièce de contrôle. La concentration moyenne en poussières totales était comprise entre 0,6 et 0,7 mg/m³ (intervalle : 0 – 2,7 mg/m³, 31 échantillons). La concentration moyenne en endotoxines était de 100 UE/m³ pour la pièce de contrôle (intervalle : 0,8 – 870, n= 9), 1900 UE/m³ pour l'aire de réception (intervalle : 60 – 8200, n=8) et de 2 340 UE/m³ pour le hall de compostage (intervalle : 0,2 – 18 000, n=10).

Deux études présentées par (Wouters, Spaan et al. 2005) conduites respectivement en novembre 1995 et en novembre 1996 au niveau d'un centre de compostage de déchets organiques ménagers (usine fermée, compostage en tunnel) et une étude conduite de mars à mai 2001 au niveau de 13 centres de compostage (3 centres fermés traitant des déchets organiques domestiques, 6 centres ouverts traitant des déchets verts, 4 centres traitant les 2 types de déchets –pas de précision des auteurs sur la description des centres-) sont rapportées (Douwes, McLean et al. 2000). L'exposition personnelle des employés aux poussières inhalables et aux endotoxines a été étudiée.

Pour les centres traitant des déchets organiques domestiques, les concentrations moyennes (géométrique) en poussières inhalables sont comprises entre 0,3 et 3,1 mg/m³ selon les postes de travail (intervalle : < 0,3 – 130,7 mg/m³) ; les concentrations moyennes (géométrique) en endotoxines sont comprises entre 17 et 1 038 UE/m³ selon les postes de travail (intervalle : < 3 – 37 043 UE/m³).

Pour les centres traitant des déchets verts, la concentration moyenne (géométrique) en poussières inhalables est d'environ 0,8 mg/m³ (intervalle : < 0,2 – 2,4 mg/m³) ; les concentrations moyennes (géométrique) en endotoxines sont comprises entre 6 et 32 UE/m³ selon les postes de travail (intervalle : < 3 – 345 UE/m³).

Pour les centres traitant des déchets mixtes, la concentration moyenne (géométrique) en poussières inhalables est d'environ 1 mg/m³ (intervalle : 0,6 – 2 mg/m³) ; les concentrations moyennes (géométrique) en endotoxines sont comprises entre 76 et 238 UE/m³ selon les postes de travail (intervalle : ? – 321 UE/m³).

La Figure 2 synthétise les différents niveaux d'exposition aux poussières inhalables et aux endotoxines pour 4 opérations de traitement de déchets étudiées par (Wouters, Spaan et al. 2005).

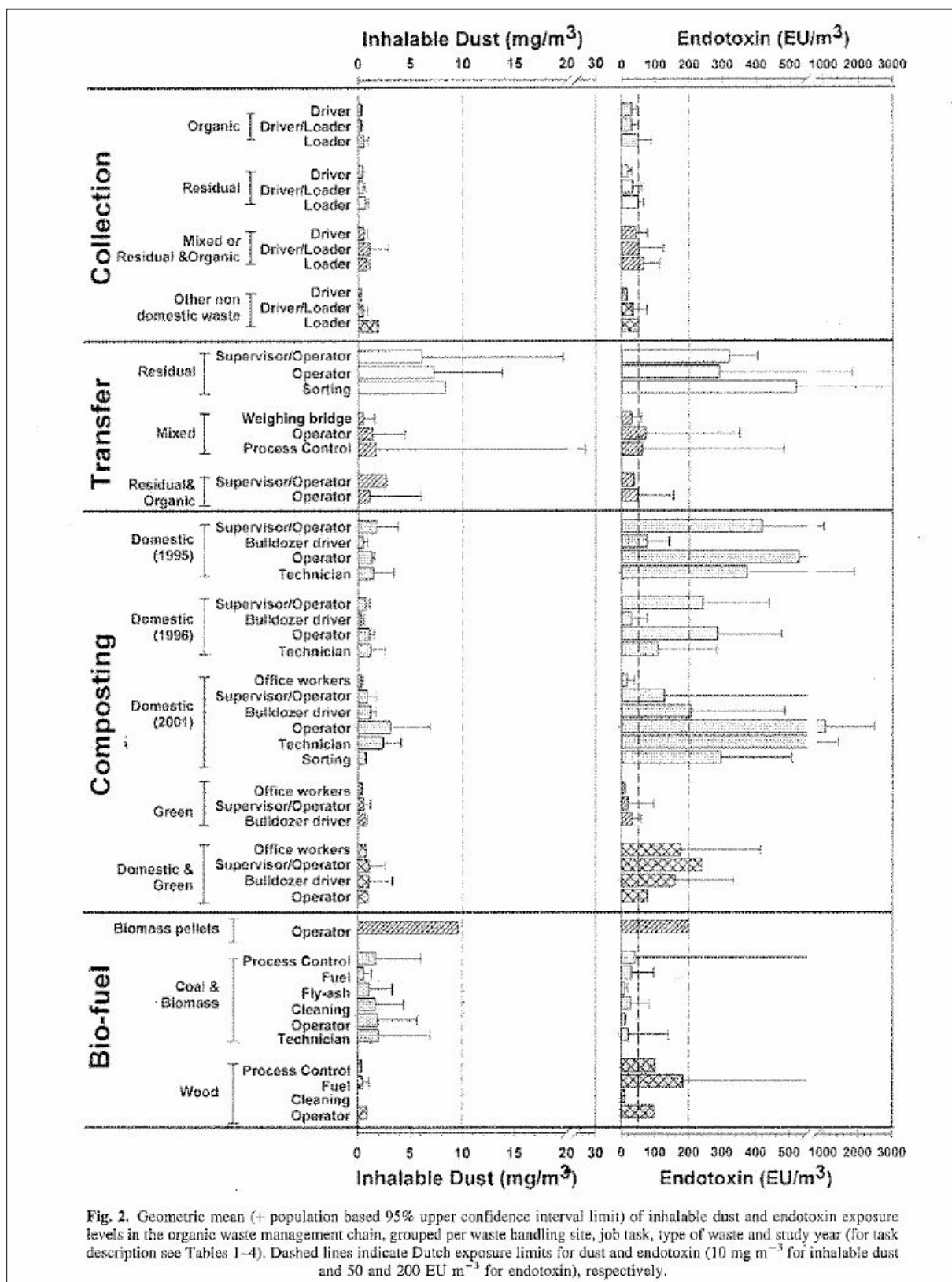


Figure 2 : Vue d'ensemble des niveaux d'exposition aux poussières inhalables et aux endotoxines pour 4 activités de traitement de déchets étudiées par (Wouters, Spaan et al. 2005)

6.2.2.7.4 STOCKAGE DE DECHETS

La caractérisation de la présence d'endotoxines dans l'air des centres de stockage de déchets ménagers et assimilés a fait l'objet de rares études.

Au début des années 1990, Rahkonen avait mis en évidence, au niveau de 2 centres de stockage finlandais (n=20, prélèvement fixe), des concentrations en endotoxines dans l'air des zones de travail comprises entre 0,4 et 29 ng/m³ (moyenne : 5,3 ng/m³) (Rahkonen and Ettala 1990).

La seule étude que nous ayons trouvée depuis est l'étude française de (Hours 2000) qui avait mesuré des concentrations en endotoxines au niveau de 2 centres de stockage de déchets ménagers. Deux points de prélèvements avaient été étudiés : le premier au niveau d'alvéoles en exploitation a permis de mesurer des concentrations en endotoxines comprises entre 1,3 et 12 UE/m³ (concentration en poussières totales associée : 0,1 – 1,9 mg/m³) ; le second au niveau du traitement des lixiviats (voir chapitre 6.2.2.7.5).

6.2.2.7.5 STATIONS D'EPURATION DES EAUX USEES (STEP)

A la fin des années 1990, l'IRSST a conduit une étude de caractérisation des émissions dans l'air, de nature chimique et biologique, de onze usines de traitement biologique des effluents d'industries papetières (Goyer and Lavoie 1998). Ces installations représentaient différents types de procédés de fabrication ou d'utilisation de pâte de papier (kraft, bisulfite, thermomécanique et désencrée), différents types d'effluents traités (eaux de procédé seules, eaux de procédés + eaux sanitaires) et différents systèmes de traitement secondaire (boues activées conventionnelles, boues activées à l'oxygène, réacteur biologique séquentiel, étang aéré). Les endotoxines ont été mesurées au niveau de différents postes de travail de ces 11 installations ainsi que dans l'environnement proche d'une seule des usines (résultats détaillés au chapitre 7). Sept étapes du procédé de traitement secondaire des effluents ont été étudiées. Certaines sont situées à l'intérieur (dégrillage, traitement des boues), d'autres sont situées à l'extérieur (clarification primaire, refroidissement, aération et digestion, clarification secondaire), une dernière (disposition des boues) peut être située à l'intérieur ou à l'extérieur selon les installations.

Les résultats ont démontré que, pour les bioaérosols (dont font partie les endotoxines), les étapes qui favorisent l'aérosolisation de l'eau ou de la poussière présentent les concentrations les plus élevées ; le type de pâte à papier n'influence pas le niveau de bioaérosols ; le type de traitement secondaire n'influence pas les émissions de contaminants chimiques ou biologiques. Les résultats des mesures d'endotoxines aux principales étapes du traitement des effluents sont présentées dans le Tableau 4.

Les étapes où des concentrations significatives ont été mesurées sont la clarification primaire (900 UE/m³ et > 5 000 UE/m³ sur 2 installations) et le traitement des boues (2 065 UE/m³ et > 5 000 UE/m³ sur 2 installations).

Étape du procédé	Min –max (UE/m ³)	Moyenne (UE/m ³)	Nombre d'installations ayant fait l'objet de mesures
Dégrillage *	1 - 250	50	10
Clarification primaire	1 - > 5 000		9
Refroidissement	1 – 57	13	9
Aération	1 - 135	31	10 endotoxines non détectées pour une installation
Clarification secondaire	1 - 65	11	7
Traitement des boues*	6 - > 5 000		10
Disposition des boues (chargement/réception)**	2 - 20	11	5

* étape à l'intérieur

** étape à l'intérieur ou à l'extérieur

Tableau 4 : Résultats des mesures d'endotoxines aux principales étapes du traitement des effluents des industries papetières (Goyer and Lavoie 1998)

Les auteurs concluent que les concentrations moyennes en endotoxines ont dépassé les niveaux proposés dans la littérature pour 8 heures d'exposition (50 – 300 UE/m³) à seulement 4 endroits sur 122 postes de travail échantillonnés, soit 3 % des cas.

En Suède, (Rylander 1999) a déterminé des concentrations en endotoxines dans l'air de 8 stations d'épuration grâce à des capteurs fixes. Les concentrations les plus élevées ont été déterminées dans la zone de manutention des boues et pendant les phases de nettoyage (concentrations comprises entre 2 et 32 170 ng/m³).

(Hours 2000) a mesuré des concentrations en endotoxines comprises entre 1,5 et 1,7 UE/m³ (concentration en poussières totales associée : 0,02 – 0,9 mg/m³) au niveau du traitement des lixiviats de 2 centres de stockage de déchets ménagers français.

Aux Pays-Bas, (Douwes 2001) a évalué l'exposition personnelle de 11 salariés de 2 stations d'épuration aux poussières inhalables et aux endotoxines (n=79). Des prélèvements (n=56) ont également été réalisés à l'air ambiant des STEP. Les auteurs ont déterminé une concentration moyenne personnelle en endotoxines de 9,5 UE/m³ (intervalle : 0,3 – 143,2 UE/m³) et une concentration ambiante (ne prenant pas en compte la zone de séchage des boues confinée) de 3,4 UE/m³ (intervalle : 0,2 – 99,8 UE/m³). Sans fournir les résultats, les auteurs précisent que les concentrations en poussières étaient faibles, la majorité des mesures étant inférieures à la limite de détection de 0,3 mg/m³.

En Pologne, les endotoxines ont été mesurées en mai 1999 dans l'air d'une STEP moderne située en plein air (9 points de prélèvement représentant les principales étapes de traitement) et à 2-3 km du site au niveau de 3 points de prélèvement du réseau de collecte (2 stations de pompage et un collecteur d'égoût) (Prazmo, Kryszka-Traczyk et al. 2003). Deux échantillons ont été collectés par point de prélèvement. La concentration en endotoxines était comprise entre 0,2 et

5,2 ng/m³ au niveau de la STEP et entre 0,1 et 1,6 ng/m³ pour les points situés à l'extérieur du site.

L'exposition personnelle de 99 employés d'une très grande STEP polonaise a été évaluée pour étudier les relations entre des symptômes subjectifs rapportés par les employés et 2 paramètres environnementaux (endotoxines totales et (1→3)-β-D-glucane) (Krajewski, Cyprowski et al. 2004). Les expositions ont été évaluées pour 3 types de postes de travail (traitement mécanique des eaux usées, traitement biologique et traitement des boues). Les concentrations moyennes mesurées pour ces postes de travail sont les suivantes :

- Pour le traitement mécanique des eaux usées : 49,5 ng/m³ (intervalle : 0,3 – 205 ng/m³),
- Pour le traitement biologique des eaux usées : 44,6 ng/m³ (intervalle : 1,1 – 134,3 ng/m³),
- Pour le traitement des boues : 95,3 ng/m³ (intervalle : 1,2 – 233 ng/m³).

Les auteurs ont calculé une moyenne arithmétique de 65 ng/m³ pour l'ensemble des mesures couvrant les différents postes de travail.

L'exposition personnelle (8 heures, n= 260 échantillons) aux endotoxines inhalables de 216 employés provenant de 40 STEP hollandaises a été évaluée sur 3 périodes allant de juin à novembre 2003 (Smit, Spaan et al. 2005). Les concentrations vont de 1,5 à 1 081 UE/m³ (moyenne géométrique de 27 UE/m³).

La qualité de l'air de 4 STEP traitant des effluents d'origine urbaine et industrielle a été étudiée pendant 1 an (2001-2002) dans l'Iowa (USA) (Lee 2006). 104 échantillons d'endotoxines totales ont été collectés au niveau de 6 étapes du procédé de chaque station. Plusieurs techniques de traitement existaient entre les stations pour une même étape du procédé. Les concentrations moyennes géométriques (GM) qui ont été mesurées varient entre 6 et 1 247 UE/m³. Les résultats complets sont présentés dans le tableau suivant.

		Dégrillage *	Clarification primaire	Traitement biologique	Clarification secondaire	Déshydratation des boues *	Digestion des boues*
STEP I	Nb échantillons	5	4	4	2	5	4
	GM (UE/m ³)	40,7	66,8	89,1	66	308,5	34,1
	Intervalle (UE/m ³)	3,9 – 162,6	2,4 – 1 585,7	6,5 – 1 394,9	65,4 – 66,6	70,9 – 2 261,9	5,3 – 594,7
STEP II	Nb échantillons	8	5	-	4	6	4
	GM (UE/m ³)	103,1	60,9	-	38,6	1 247,6	27,4
	Intervalle (UE/m ³)	31,8 – 22 281,5	14,2 – 155,2	-	32,6 - 51	87,1 – 34 727,8	14,6 – 82,5
STEP III	Nb échantillons	4	4	6	4	6	-
	GM (UE/m ³)	534,2	35,6	147,8	68,2	393,4	-
	Intervalle (UE/m ³)	244,2 – 2 139,8	16,4 – 82,7	29 – 4 097,3	14,4 – 168,1	26,1 – 3 201,1	-
STEP IV	Nb échantillons	8	4	4	4	5	4
	GM (UE/m ³)	58,6	88,8	62,4	55,9	15,5	6,3
	Intervalle (UE/m ³)	17,1 – 319,5	3 – 12 983	6,4 – 312,6	0,9 – 12 234,1	2,6 – 49,7	3,3 – 11,1

* étapes à l'intérieur

Tableau 5 : Concentrations en endotoxines mesurées au niveau des 6 étapes de procédé de 4 STEPS (Lee 2006)

6.2.2.8 SYNTHÈSE

Le tableau suivant présente l'ensemble des résultats qui ont été étudiés dans le cadre de ce rapport par secteur d'activité.

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Concentration en poussières inhalables (mg/m ³) * totales nm : non mesuré	Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M		
Élevage bovin	Pays-Bas, Danemark, Allemagne	67 (prélèvement fixe)	np	M : 7,4 – 63,9	nm	Seedorf (1998)
Élevage porcin	Etats-Unis	207 (prélèvement personnel)	np	GM : 17,6	GM : 3,45 *	Reynolds 1996
	Pays-Bas	171 (prélèvement personnel)	np	M : 105	GM : 2,63	Vogelzang (1998)
	Pays-Bas, Danemark, Allemagne, R.-U	110 (prélèvement fixe)	np	M : 52,3 – 186,5	nm	Seedorf (1998)
	R.-U	27 (prélèvement personnel)	60 – 14 923	GM : 660	GM : 5,8	Simpson (1999)
	Danemark	40 (prélèvement personnel)	1,3 – 1 101,7	58	Médiane : 3,95 *	Radon (2002)
	Allemagne	100 (prélèvement personnel)	0,01 – 2 090,1	76,3	Médiane : 5 *	Radon (2002)
	Pays-Bas	162 (prélèvement personnel)	36 -316	GM : 103	nm	Portengen (2005)
Québec	143 (prélèvement fixe)	np	M : 143-214	nm	Lavoie (2006)	

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
Elevage avicole (volaille)	Pays-Bas, Danemark, Allemagne, R.-U	64 (prélèvement fixe)	np	M : 338,9 – 860,4 Global : 692	Seedorf (1998)
	R.-U	33 (prélèvement personnel)	755 – 71995	GM : 8 431	Simpson (1999)
	Etats-Unis	236 (prélèvement personnel)	0,024 – 3 916	M : 1589,1	Donham (2000)
	Suisse	36 (prélèvement personnel)	19 – 1 634,8	257,6	Radon (2002)
	France	6 (prélèvement personnel)	np	<u>Endotoxines alvéolaires</u> : 9,2 – 43,3 (resp. en cage et en volière)	(Michel, Huneau et al. 2006)
Manipulation de céréales, grains végétaux	Suède	34 (prélèvement personnel)	np	83 – 175 (volière) 96 – 108 (cage)	Larsson et al. 1999 d'après (Sépia-Santé 2006)
	Pays-Bas Traitement du grain	350 (prélèvement personnel)	np	M : 3,6 – 99	(Post, Heederik et al. 1998)
	R.-U Stockage de grain, fabrication farine	31 (prélèvement personnel)	3 – 2 247	GM : 115	Simpson (1999)

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
	Finlande Stockage de grains/végétaux	4 (prélèvement personnel)	4 000 – 8 000	Médiane : 5 600	(Laitinen, Kangas et al. 2001)
	Pays-Bas Semences agricoles	37 (prélèvement personnel)	1 – 27 400	GM : 180	(Smit, Wouters et al. 2006)
	Pays-Bas Transformation pommes de terre	? (prélèvement personnel)		2,1 (exposition classée faible) 5,6 (exposition classée forte)	(Zock 1998)
	Pologne Transformation pommes de terre	12 (prélèvement fixe)	11 – 89 (étapes initiales) 45 900 – 1 893 900 *après blanchiment	np	(Dutkiewicz, Kryszynska-Traczyk et al. 2002)
	Etats-Unis Transformation pommes de terre	? (prélèvement personnel)	5 - 62	np	(Ingalls 2003)
	Pologne Manipulation et traitement de végétaux	np	np	Médiane : 12,5 (manipulation foin) 54 900 (broyage de grain)	(Dutkiewicz, Kryszynska-Traczyk et al. 2000)

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
	Pologne Traitement d'herbes	28 (prélèvement fixe)	200 – 2 681 000	Médiane : 16 000	(Dutkiewicz, Kryszynska-Traczyk et al. 2001)
Production d'aliments animaux	R.-U	6 (prélèvement personnel)	6 – 85	GM : 30	Simpson (1999)
	Finlande	17 (prélèvement personnel)	0,2 – 50	Médiane : 19	(Laitinen, Kangas et al. 2001)
	R.-U Filature de coton	31 (prélèvement personnel)	66 – 6 936	GM : 454	Simpson (1999)
Industrie textile	Finlande Filature coton	4 (prélèvement personnel)	14 – 960	Médiane : 120	(Laitinen, Kangas et al. 2001)
	Québec Filature de coton	1018 (prélèvement fixe)	0,3 – 1 486	np	(Marchand, Lalonde et al. 2003)
	Allemagne Filature de coton	57 (prélèvement fixe)	0,9 - 717	Endotoxines alvéolaires : Médiane : 45	(Latza, Oldenburg et al. 2004)
	Finlande de coton Méta-analyse	np	2 - 485		(Lane, Nicholls et al. 2004)
	R.-U Filature de laine	28 (prélèvement personnel)	1 – 3 045	GM : 83	Simpson (1999)

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
Industrie du bois	R.-U sciérie	37 (prélèvement personnel)	2 – 266	GM : 19	Simpson (1999)
	Australie	(prélèvement personnel)			
		7 : 2 centres d'abattage	0,99 – 2,28	GM : 1,52	GM : 0,56
		83 : 4 sciéries	0,29 – 78,4	GM : 4,3	GM : 1,59
		4 : 1 usine de broyage	2 – 4,87	GM : 3,27	GM : 2,86
	66 : 5 menuiseries	0,1 – 27,88	GM : 2,41	GM : 3,68	(Alwis 1999)
Industrie papetière	Canada sciérie	17 (prélèvement personnel)	12,4 – 1 707	Médiane : 31,8 – 280,2 (selon les sites)	(Cormier, Meriaux et al. 2000)
	Nouvelle-Zélande (fabrication contre-plaqué)	20 (prélèvement personnel)	np	GM : 2,3	(Wouters, Spaan et al. 2005)
	Finlande	11 (prélèvement personnel)	1 – 36	6	(Laitinen, Kangas et al. 2001)

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
	Pologne	10 (prélèvement fixe)	4,2 – 2 500		(Prazmo, Dutkiewicz et al. 2003)
	Danemark	np (prélèvement personnel)	0,6 – 37	Médiane : 6,9	(Sigsgaard, Jensen et al. 2004)
Traitement de déchets					
Plates-formes de transfert	Pays-Bas (OM)	26 (prélèvement personnel)	1,6 – 353,6	GM : 3 – 52 (selon les sites et les postes de travail)	(van Tongeren 1997) d'après (Wouters, Spaan et al. 2005)
	Danemark	np	0,4 – 1 (papiers d'origine domestiques) 0,4 – 2 (papiers provenant de commerces)	np	(Wurtz 1997)
Tri des déchets	Pays-Bas (tri sur collecte séparative)	np	15,9 – 68,4 (poste chargement) 19,5 – 353,6 (poste de tri)	M : 35,5 M : 131,1	(van Tongeren 1997) d'après (Hours 2003)

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence	
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M		
Compostage	Danemark (OM)	np	np	M : 2,5 * (OM) M : 1,3 (papier)	(Sigsgaard 1997) d'après (Hours 2003)	
	Danemark (papier)	48 (prélèvement fixe)	~ 0,1 – 10	M : ~ 1	(Breum 1999) d'après (Hours 2003)	
	Finlande (OM)	8 (prélèvement fixe)	0,9 – 1 400	Médiane : 120	(Laitinen, Kangas et al. 2001)	
	R.- U. (OM et DIB)	128 (prélèvement personnel)	0,2 – 198,2	M : 1,9 – 31 (selon les sites)	(Gladding 2003)	
	Etats-Unis (site fermé traitant boues de STEP)	32 (prélèvement fixe)	28 - 5 930	np	(Darragh 1997)	
	Allemagne (site fermé)	1 (prélèvement fixe)	20 (tamis rotatif) 0,01 (air biofiltre)	np	(Danneberg 1997)	
	Pays-Bas (OM, air libre)	20	0,7 – 55	M : 9,7	(van Tongeren 1997) d'après (Hours 2003)	
					Concentration en poussières inhalables (mg/m ³) * totales nm : non mesuré	
					0,74 * 0,83 * 0,6 *	
					M : 2,1 – 20,3 * (n=260) GM : 1,2 - 35,2 * Maximum : 173,8 *	
				nm		
				9,7 – 14,3		

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence	
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M		
	Finlande (déchets mixtes)	np	0,8 - 344	np	(Tolvanen 1998) d'après (Hours 2003)	
	USA (DV ¹² , site ouvert)	18 (prélèvement fixe)	0,1 - 6	M : 1,9	(Hryhorczuk 2001)	
	Pays-Bas	prélèvement personnel FFOM ¹³ : n=169 DV: n=37 Déchets mixtes: n=9	< 0,3 - 3704 < 0,3 - 34,5 ? - 32,1	GM : 1,7 - 103,8 GM : 0,6 - 3,2 GM : 7,6 - 23,8	0,3 - 3,1 0,8 1	(Wouters, Spaan et al. 2005)
Stockage	Finlande (FFOM et déchets d'abattoirs)	8 (Aire de réception) 10 (Hall de compostage) (prélèvement fixe)	6 - 820 0,02 - 1800 *	M : 190 M : 234 *	0,6 - 0,7 * nm	(Tolvanen, Nykanen et al. 2005)
	Finlande (OM)	20 (prélèvement fixe)	0,4 - 29	M : 5,3	nm	(Rankonen and Ettala 1990)

¹² DV : déchet vert

¹³ FFOM : fraction fermentescible des ordures ménagères

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
	France (OM)	2 (prélèvement fixe)	0,1 – 1,2	/	(Hours 2000)
STEP	Canada (11 installations)	? (prélèvement fixe)	90 – 500 (clarification primaire) 206 – 500 (traitement des boues)	np	(Goyer and Lavoie 1998)
	Suède	6 (prélèvement fixe)	Maximum : 2 – 32 170 (zone de manutention des boues et pendant la phase de nettoyage)	/	(Rylander 1999)
	France (traitement lixiviats centre de stockage)	2 (prélèvement fixe)	0,1 – 0,2	/	(Hours 2000)
	Pays-Bas	79 (prélèvement personnel) 56 (prélèvement fixe ambiant)	0,03 – 14,3 0,02 – 9,9	M : 0,9 M : 0,3	(Douwes 2001)

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
	Pologne	18 (prélèvement fixe)	0,2 – 5,2 *	np	(Prazmo, Kryszka-Traczyk et al. 2003)
	Pologne	99 (prélèvement personnel) traitement mécanique eaux usées traitement biologique traitement des boues	0,3 – 205 1,1 – 134,3 1,2 – 233	49,5 44,6 95,3	(Krajewski, Cyprowski et al. 2004)
	Pays-Bas	260 (prélèvement personnel)	0,2 - 108	2,7	(Smit, Spaan et al. 2005)
	USA	104 (prélèvement fixe) traitement biologique (n=14)	0,6 – 409,7	6,2 – 8,9	(Lee 2006)
Autres résultats non cités dans le présent rapport					
Filature de laine	R.-U	28 (prélèvement personnel)	1 – 3 045	GM : 83	Simpson (1999)
Abattoirs	Finlande	6 (prélèvement personnel)	1,4 - 520	Médiane : 87	(Laitinen, Kangas et al. 2001)

Activité	Pays	Nombre d'échantillons pour la mesure d'endotoxines	Concentration en endotoxines inhalables (ng/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
Imprimerie	Finlande	5 (prélèvement personnel)	0,03 – 0,1	Médiane : 0,05	(Laitinen, Kangas et al. 2001)
Production d'électricité à partir de biomasse	Pays-Bas	(prélèvement personnel)	<0,3 – 210,4 (selon les postes de travail)	GM : 0,9 – 4 (selon les postes de travail)	(Wouters, Spaan et al. 2005)
		37 : 3 usines (pâte à papier, bois, farine animale + charbon)	<0,3 – 43,8 (selon les postes de travail)	GM : 2,1 – 18,2 (selon les postes de travail)	
Champignonnière	R.-U	30 (prélèvement personnel)	1- 130	GM : 7	Simpson (1999)

Tableau 6 : Concentrations en endotoxines dans l'air par secteur d'activité professionnelle

En résumé, les secteurs les plus étudiés sont les élevages (porcin et avicole), l'industrie du bois, le tri des déchets, le compostage et les stations d'épuration. On notera le peu de données françaises.

Les concentrations les plus fortes en endotoxines inhalables sont mesurées dans les élevages ainsi que dans les sites traitant des grains /végétaux.

Les études sont assez isolées et difficiles à interpréter du fait des nombreux paramètres entraînant une variabilité des résultats et amenant une interrogation quant à leur représentativité française :

- Stratégie de prélèvement : fixe ou personnel, nombre de points de prélèvement, hauteur, durée, fréquence, matériel (type de filtre par exemple, fraction aérodynamique mesurée (inhalable, thoracique, alvéolaire, PM_{2,5}),
- Configuration du site étudiée (ouvert, fermé), ventilation naturelle ou mécanique peu décrite, système de traitement de l'air ?,
- Fonctionnement de l'activité : intrants, matériel, procédés,
- Expression des résultats : souvent en ng/m³ et non en UE/m³.

La Figure 3 présente les différents ordres de grandeur des concentrations en endotoxines retrouvées dans les données de la littérature la concentration moyenne en poussières associée.

Concentration en endotoxines (ng/m ³)	10 ⁰ 10 ¹ 10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶	Concentration moyenne en poussières (mg/m ³)
Activité		
Production d'aliments pour animaux	←————→	~ 6
Tri des déchets	←————→	~ 0,2 - 20
Stations d'épuration	←————→	/
Compostage	←————→	~ 0,1 – 14
Industrie textile	←————→	~ 2
Industrie du bois	←————→	~ 1 – 5
Elevage porcin	←————→	~ 2 - 6
Elevage avicole	←————→	~2 - 10
Manipulation de grain/végétaux	←————→	~ 2- 20

Figure 3 : Ordre de grandeur des concentrations en endotoxines (ng/m³) retrouvées dans différents secteurs d'activité agricoles et industriels

7. EVALUATION DES EXPOSITIONS : CONCENTRATIONS MESUREES A PROXIMITE DES INSTALLATIONS

Il existe peu d'études ayant évalué la qualité de l'air à l'extérieur d'installations ayant une activité agricole ou industrielle.

Les principaux résultats retrouvés lors de la recherche bibliographique sont présentés dans le Tableau 7.

Environnement	Pays	Nombre d'échantillons	Concentration en endotoxines inhalables (UE/m ³)		Référence
			Intervalle np : non précisé	Médiane Moyenne géométrique GM Moyenne arithmétique M	
250-350 m en aval des vents dominants d'usines de biocarburant	Danemark	20	np	Médiane = 5,3	(Madsen 2006)
Extérieur d'usines textile traitant la fibre de coton	Canada	21	np	M = 28	(Marchand, Lalonde et al. 2003)
150 m sous les vents dominants d'un centre de compostage	Allemagne	1	2	-	(Danneberg 1997)
Environnement proche d'un centre de compostage	Etats-Unis	28	0,1 -4	M= 1	(Hryhorczuk 2001)
100 m en aval d'une usine de traitement biologique d'effluent d'industrie papetière	Canada	1	40		(Goyer and Lavoie 1998)
30 m et 160 m sous les vents d'élevages d'engraissement de truies	USA	np	np	30 m : GM = 95,5 160 m : GM = 30,7	(Mueller-Anneling, Avol et al. 2004)
Commune très proche de fermes de vaches laitières		np	<u>Fraction thoracique</u> 0,48 -5,44	<u>Fraction thoracique</u> GM = 1,85	
2 villages avec une activité d'élevage intensif	Allemagne	64	Hiver : <1,3 – 20 Été <1,3 – 23,2	GM= 2 (hiver) et 2,9 (été)	(Schulze 2006)

Tableau 7 : Concentrations en endotoxines inhalables (UE/m³) mesurées à proximité des installations d'activité industrielle et agricole

Les concentrations les plus fortes à proximité des installations ont été mesurées dans l'environnement d'usines textile traitant du coton, d'une usine de traitement biologique d'effluents d'industrie papetière, d'élevages d'engraissement de truies.

Ces valeurs sont inférieures à la valeur d'exposition professionnelle de 50 UE/m³ qui avait été proposée aux Pays-Bas (DECOS 1998). En population générale, on pourrait raisonnablement considérer une valeur-seuil 10 fois plus faible compte tenu de la variabilité intra-humaine.

Concernant le cas particulier de l'exposition potentielle des populations vivant dans le voisinage des fermes d'élevage, une étude (Reynolds, 1997 cité par (CSE 2000)) réalisée dans le voisinage immédiat de porcheries de différentes dimensions a observé que le niveau de poussières et d'endotoxines était inférieur aux seuils de détection (< 0,5 mg/m³ et < 10 UE/m³). Seul l'ammoniac avait pu être mesuré (1 ppm). Une autre étude (Platz et coll. 1995 cité par (CSE 2000)) a également noté que les concentrations en poussières à l'extérieur des bâtiments diminuent de façon importante avec l'éloignement des installations (niveau en poussières alvéolaires à 10 m à l'extérieur de la sortie du bâtiment situé à 11 % de leur concentration initiale).

Dans son étude, Mueller-Anneling (2004) a mesuré sur 1 an les plus fortes concentrations dans l'air en endotoxines (moyenne géométrique sur un an : 1,85 UE/m³ ; intervalle de variation : 0,48 – 5,44 UE/m³ ; PM₁₀ : 66,6 µg/m³, intervalle de variation : 15,4 – 135,1 µg/m³) dans une commune très proche de fermes de vaches laitières (> 15 000 animaux dénombrés). L'auteur cite également des mesures réalisées dans une zone rurale de l'Iowa pendant 15 mois à une distance de 30 m et 160 m sous les vents d'élevages d'engraissement de truies : les moyennes géométriques étaient de 95,5 UE/m³ à proximité du site et de 30,7 UE/m³ pour le point le plus éloigné. Les valeurs mesurées 30 m en amont des vents étaient de 9,3 UE/m³ et les valeurs mesurées au niveau des élevages de 3 100 UE/m³.

La santé respiratoire d'adultes vivant dans des zones rurales caractérisées par une concentration importante d'élevages intensifs (bovin, porcin et avicole) a été étudiée en Allemagne dans le cadre du projet NiLS (Lower Saxony Lung Study) (Schulze 2006). Les arrières-cours de 32 participants habitant 2 villages ont fait l'objet de mesures en endotoxines inhalables à l'occasion de 2 campagnes (été et hiver) de 24 h chacune. Sur la zone d'étude, les concentrations en endotoxines variaient entre une valeur inférieure à la limite de détection (LD=1,3 UE/m³) et 20 UE/m³ en hiver et entre la LD et 23,2 UE/m³ en été. Une mesure « témoin » dans une ville située à environ 40 km au nord de la zone d'étude a fait état d'une valeur de 0,6 UE/m³. Des différences spatiales significatives entre les concentrations en endotoxines mesurées ont été déterminées selon les points de prélèvements étudiés.

8. CONCLUSION

Les endotoxines font partie des contaminants biologiques (d'origine bactérienne) les mieux connus à l'heure actuelle. Leurs effets par inhalation sont bien décrits dans la littérature. La norme européenne NF EN 14031 (2003) permet d'harmoniser le mesurage des endotoxines en suspension dans l'air en milieu de travail.

Seules des valeurs-guides pour l'évaluation des expositions chroniques de populations professionnelles sont disponibles à ce jour. Du fait de résultats éparpillés voire controversés, il semble difficile d'élaborer une unique valeur. Les Pays-Bas et le Canada ont toutefois proposé des valeurs situées entre 50 et 300 UE/m³. Du fait de la nature très différente des aérosols contenant les endotoxines en fonction du secteur d'activité professionnelle concerné, il semblerait qu'il soit nécessaire de définir des valeurs spécifiques par secteur d'activité.

Une recherche bibliographique sur les dix dernières années a montré que le nombre d'études ayant donné lieu à des mesures d'endotoxines en lien avec un environnement agricole ou industriel sont peu nombreuses. La plupart des études sont réalisées en milieu professionnel. Si la méthode d'analyse des endotoxines est commune aux différentes études (test LAL), il n'en va pas de même du protocole d'échantillonnage ce qui entraîne un premier niveau de difficulté pour l'interprétation et la comparaison des résultats. Par ailleurs, les expositions aux endotoxines sont multifactorielles (caractéristiques des installations émettrices, autres agents environnementaux présents avec les endotoxines etc.) ce qui rajoute un second niveau de difficulté. La variabilité de la distribution dans le temps est rarement évaluée. Les principaux secteurs d'activité émetteurs qui ont été identifiés dans ce rapport sont les élevages et les activités de manipulation/traitement de végétaux. En France, seul l'INRS réalise actuellement, à notre connaissance, des études consacrées à des mesures d'exposition des salariés aux bioaérosols ou à la caractérisation d'environnements de travail, une étude sur le secteur du compostage est ainsi en cours.

Il existe peu d'études conduites dans l'environnement proche des installations. Les études disponibles mettent en évidence des résultats de mesure inférieurs aux valeurs-guides d'exposition professionnelle.

Il est donc encore prématuré de recommander la conduite études d'impact sanitaire pour les endotoxines dans le contexte réglementaire des installations classées. En effet, il manque à la fois une valeur de référence pour évaluer les expositions de la population générale mais aussi des résultats de mesure provenant d'études de terrain menées en France tant au niveau des installations que dans leur environnement proche. Ces derniers permettraient d'une part d'évaluer la représentativité des données de la littérature dans le contexte français mais aussi de mieux connaître l'exposition des riverains d'installations classées émettrices d'endotoxines.

Enfin, les endotoxines ne sont souvent pas les seules en cause dans la genèse des troubles professionnels décrits. Des travaux de recherche sont nécessaires pour éclaircir le rôle joué par d'autres agents environnementaux présents avec les endotoxines comme le (1→3)- β-D-glucane des moisissures par exemple.

9. BIBLIOGRAPHIE

ACGIH (1999). Bioaerosols Assessment and Control, J Macher.

ACGIH (2006). TLVs and BEIs, threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices.

Alwis, K. U. (1999). "Exposure to Biohazards in Wood Dust: Bacteria, Fungi, Endotoxins, and (1, 3)-beta-D-Glucans." Applied Occupational and Environmental Hygiene **14**(9): 598-608.

Breum, N. O. (1999). "Dustiness and bioaerosol exposure in sorting recyclable paper." Waste Management & Research **17**: 100-108.

Carty, C. L., U. Gehring, et al. (2003). "Seasonal variability of endotoxin in ambient fine particulate matter." Journal of Environmental Monitoring **5**(6): 953-958.

Cormier, Y., A. Merlaux, et al. (2000). "Respiratory Health impact of working in sawmills in eastern Canada." Archives of Environmental Health **55**(6): 424-430.

CSE (2000). Les risques à la santé associés aux activités de production animale au Québec, Comité de santé environnementale du Québec pour le ministère de la santé et des services sociaux.

Danneberg, G. (1997). "Microbial and endotoxin immissions in the neighborhood of a composting plant." Ann Agri Environ Med **4**(1): 169-173.

Darragh, A. (1997). "Quantification of air contaminants at a municipal sewage sludge composting facility." Applied Occupational and Environmental Hygiene **12**: 190-194.

DECOS (1998). Endotoxines, health-based recommended occupational exposure limit. Gezondheidsraad, Pays-Bas.

Déléry, L. (2003). Données disponibles pour l'évaluation des risques liés aux bioaérosols émis par les installations de stockage des déchets ménagers et assimilés, INERIS, rapport pour le ministère de l'écologie: 31.

Deloraine, A. (2002). Etude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bioaérosols générés par le compostage des déchets, CAREPS: 215.

Deschamps, S., I. Momas, et al. (1994). "Quelques aspects du risque professionnel lié à l'inhalation d'endotoxines." Archives des maladies professionnelles **55**(5): 327-333.

Donham, K. J. (1995). "Respiratory dysfunction in swine production facility workers : dose-response relationships of environmental exposures and pulmonary function." Am. J. Respir. Crit. Care Med. **27**: 405-418.

Donham, K. J. (2000). "Dose-response relationship between occupational aerosol exposures and cross-shift declines of lung function in poultry workers: recommendations for exposure limits." Journal of Occupational and Environmental Medicine **42**(3): 260-269.

Douwes, J. (2001). "Work-related symptoms in sewage treatment workers." Ann Agri Environ Med **8**: 39-45.

Douwes, J. (2003). "Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects." Ann. Occup. Health **47**(3): 187-200.

Douwes, J., D. McLean, et al. (2000). "Worker exposures to airborne dust, endotoxin and beta(1,3)- Dglucan in two New Zealand sawmills." Am J Ind Med. **38**(426-430).

Duquenne, P. (2006). Répartition des endotoxines dans les différentes fractions aérodynamiques dans l'air d'un centre de tri des ordures ménagères. 22ème congrès français sur les bioaérosols, Paris, ASFERA.

Dutkiewicz, J., E. Krysina-Traczyk, et al. (2000). "Exposure of agricultural workers to airborne microorganisms and endotoxin during handling of various vegetable products." Arobiologia **16**(2): 193-198.

Dutkiewicz, J., E. Krysinska-Traczyk, et al. (2002). "Exposure to airborne microorganisms and endotoxin in a potato processing plant." Annals of Agricultural and Environmental Medicine **9**(2): 225-235.

Dutkiewicz, J., E. Krysinska-Traczyk, et al. (2001). "Exposure to airborne microorganisms and endotoxin in herb processing plants." Annals of Agricultural and Environmental Medicine **8**(2): 201-211.

Euzéby (2004). Dictionnaire de bactériologie vétérinaire. **2006**.

Gladding, T. (2003). "Organic dust exposure and work-related effects among recycling workers." Am J of Ind Med **43**: 584-591.

Goyer, N. and J. Lavoie (1998). Emissions du traitement secondaire des effluents des papetières, IRSST.

Greff-Mirguet, G. (2002). "Echantillonnage et analyse des endotoxines dans l'air - étude bibliographique." Cahiers de notes documentaires -Hygiène et sécurité du travail **187**(2e trimestre): 73-87.

Heederik, D. and J. Douwes (1997). "Towards an occupational exposure limit for endotoxins ?" Ann Agri Environ Med **4**: 17-19.

Heinrich, J., M. Pitz, et al. (2003). "Endotoxin in fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{2.5-10}) particle mass of ambient aerosols. A temporo-spatial analysis." Atmospheric Environment **37**(26): 3659-3667.

Hines, C. J. (2000). "Characterization and variability of endotoxin and 3-hydroxy fatty acid levels in an office building during a particle intervention study." Indoor Air **10**(1): 2-12.

Hours, M. (2000). Etude des polluants atmosphériques émis dans 2 centres de stockage des ordures ménagères: caractérisation et mesure des niveaux d'exposition; mise au point d'outils de suivi en vue de l'évaluation des risques sanitaires: 264.

Hours, M. (2003). Etat des connaissances sur les micro-organismes dans la filière déchets, RECORD: 122.

Hryhorczuk, D. (2001). "Bioaerosol emissions from a suburban yard waste composting facility." Ann Agri Environ Med **8**: 177-185.

Ingalls, R. (2003). "An endotoxin exposure in the food industry." Applied Occupational and Environmental Hygiene **18**(5): 318-320.

Joly, J. (2003). Infectiologie. Environnement et Santé Publique fondements pratiques. T. DOC: 145-162.

Krajewski, J. A., M. Cyprowski, et al. (2004). "Health complaints from workplace exposure to bioaerosols: A questionnaire study in sewage workers." Annals of Agricultural and Environmental Medicine **11**(2): 199-204.

Laitinen, S., J. Kangas, et al. (2001). "Evaluation of exposure to airborne bacterial endotoxins and peptidoglycans in selected work environments." Annals of Agricultural and Environmental Medicine **8**(2): 213-219.

Lane, S. R., P. J. Nicholls, et al. (2004). "The measurement and health impact of endotoxin contamination in organic dusts from multiple sources: Focus on the cotton industry." Inhalation Toxicology **16**(4): 217-229.

Larsson, B., K. Larsson, et al. (1999). "Airway responses in naive subjects to exposure in poultry houses : comparison between cage rearing system and alternative rearing system for laying hens." Am J of Ind Med **35**(2): 142-149.

Latza, U., M. Oldenburg, et al. (2004). "Endotoxin exposure and respiratory symptoms in the cotton textile industry." Archives of Environmental Health **59**(10): 519-525.

Lavoie, J. and G. Marchand (1997). "Pit ventilation in pig-housing facilities." Canadian Agricultural Engineering **39**(4): 317-326.

Lavoie, J. and S. Pigeon (2001). "Evaluation des agents chimiques et des bioaérosols dans une porcherie utilisant la technique d'élevage sur couche mince." Travail et santé **17**(2): 28-31.

Lavoie, J., Y. Beaudet, et al. (2006). Evaluation de la qualité de l'air dans les porcheries équipées d'un système de séparation liquide-solide des déjections, IRSST.

Lee, J. A. (2006). "Indoor and outdoor air quality assessment of four wastewater treatment plants." Journal of Occupational and Environmental Hygiene **3**(1): 36-43.

Madsen, A.-M. (2006). "Airborne endotoxin in different background environments and seasons." Ann Agri Environ Med **13**: 81-86.

Marchand, G. (1996). Les endotoxines en milieu de travail, IRSST.

Marchand, G., M. Lalonde, et al. (2003). Documentation des endotoxines présentes dans l'air ambiant des usines textiles du Québec traitant la fibre de coton: 40.

Martinez, K. F., C. Y. Rao, et al. (2004). "Exposure assessment and analysis for biological agents." Grana **43**(4): 193-208.

Michel, V., A. Huneau, et al. (2006). Qualité de l'air en élevage de poules pondeuses : caractérisation des composants aériens et conséquence sur la santé animale et humaine. Ploufragan, en cours de publication.

Morgenstern, V., C. L. Carty, et al. (2005). "Lack of spatial variation of endotoxin in ambient particulate matter across a German metropolitan area." Atmospheric Environment **39**(36): 6931-6941.

Mueller-Anneling, L., E. Avol, et al. (2004). "Ambient endotoxin concentrations in PM10 from Southern California." Environmental Health Perspectives **112**(5): 583-588.

Park, J. H. (2000). "Longitudinal Study of Dust and Airborne Endotoxin in the Home." Environmental Health Perspectives **108**(11): 1023-1028.

Perdrix, A., N. Madon, et al. (1997). Risques biologiques autres qu'infectieux. Encycl Méd Chir. E. Paris.

Peter, F., J. Vogelzang, et al. (1998). "Endotoxin Exposure as a Major Determinant of Lung Function Decline in Pig Farmers." J. Am. J. Respir. Crit. Care Med. **157**: 15-18.

Portengen, U., L. Preller, et al. (2005). "Endotoxin exposure and atopic sensitization in adult pig farmers." Journal of Allergy and Clinical Immunology **115**(4): 797-802.

Post, W., D. Heederik, et al. (1998). "Decline in lung function related to exposure and selection of processes among workers in the grain processing and animal feed industry." Occup. Environ. Med. **55**: 349 - 355.

Prazmo, Z., J. Dutkiewicz, et al. (2003). "Exposure to airborne Gram-negative bacteria, dust and endotoxin in paper factories." Annals of Agricultural and Environmental Medicine **10**(1): 93-100.

Prazmo, Z., E. Krysinska-Traczyk, et al. (2003). "Exposure to bioaerosols in a municipal sewage treatment plant." Annals of Agricultural and Environmental Medicine **10**(2): 241-248.

Radon, K. (2002). "Air contaminants in different european farming environments." Ann Agri Environ Med **9**(1): 41-48.

Rahkonen, P. and M. Ettala (1990). "Airborne microbes and endotoxins in the work environment of two sanitary landfills in Finland." Aerosol Science and Technology **13**: 505-513.

Reynolds, S. J. (1996). "Longitudinal evaluation of dose-response relationships for environmental exposures and plumonary function in swine production workers." Am. J. Industrial Med. **29**: 33-40.

Rylander, R. (1997). "Evaluation of the risk of endotoxin exposure." Int J Occup Env Health **3**: S32-S36.

Rylander, R. (1999). "Health effects among workers in sewage treatment plants." Occup. Environ. Med. **56**(5): 354-357.

Schulze, A. (2006). "Ambient endotoxin level in an area with intensive livestock production." Ann Agri Environ Med **13**: 87-91.

Seedorf, J. (1998). "Concentrations and Emissions of Airborne Endotoxins and Microorganisms in Livestock Buildings in Northern Europe." J. Agric. Eng. Res. **70**: 97-109.

Sépia-Santé (2006). Exposition et effets sanitaires respiratoires dans les élevages avicoles : étude bibliographique, en cours de publication.

Sigsgaard, T. (1997). "Biomonitoring and work related symptoms among garbage handling workers." Annals of Agricultural and Environmental Medicine **4**: 107-112.

- Sigsgaard, T., L. D. Jensen, et al. (2004). "Endotoxins isolated from the air of a Danish paper mill and the relation to change in lung function: An 11-year follow-up." American Journal of Industrial Medicine **46**(4): 327-332.
- Simpson, J. C. G. (1999). "Comparative personal exposures to organic dusts and endotoxin." Ann. Occup. Hyg. **43**(2): 107-115.
- Smit, L. A. M., S. Spaan, et al. (2005). "Endotoxin exposure and symptoms in wastewater treatment workers." American Journal of Industrial Medicine **48**(1): 30-39.
- Smit, L. A. M., I. Wouters, et al. (2006). "Agricultural seed dust as a potential cause of organic dust toxic syndrome." Occup. Environ. Med. **63**: 59-67.
- Tolvanen, O. (1998). "Occupational hygiene in biowaste composting." Waste Management & Research **16**: 525-540.
- Tolvanen, O., J. Nykanen, et al. (2005). "Occupational hygiene in a Finnish drum composting plant." Waste Management **25**(4): 427-433.
- van Tongeren, M. (1997). "Exposure to organic dusts, endotoxins and microorganisms in the municipal waste industry." International Journal of Environmental Health **3**(1): 30-36.
- Vogelzang, P., J. van der Gulden, et al. (1998). "Endotoxin exposure as a major determinant of lung function decline in pig farmers." Am J Respir Crit Care Med. **157**(1): 15-18.
- Wouters, I. M., S. Spaan, et al. (2005). "Overview of personal occupational exposure levels to inhalable dust, endotoxin, beta(1 -> 3)-glucan and fungal extracellular polysaccharides in the waste management chain." Annals of Occupational Hygiene **50**(1): 39-53.
- Wurtz, H. (1997). "Exposure to microorganisms during manual sorting of recyclable paper of different quality." Annals of Agricultural and Environmental Medicine **4**: 129-135.
- Zock, J. P. (1998). "Acute lung functions changes and low endotoxin exposures in the potato processing industry." Am. J. Industrial Med. **33**(4): 384-391.