



HAL
open science

Élaboration d'une méthodologie d'évaluation qualitative du risque biologique

Sarah Burzoni

► **To cite this version:**

Sarah Burzoni. Élaboration d'une méthodologie d'évaluation qualitative du risque biologique. Toxicologie. Université de Lorraine, 2021. Français. NNT : 2021LORR0175 . tel-03615486

HAL Id: tel-03615486

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03615486v1>

Submitted on 21 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

École Doctorale BioSE (Biologie-Santé-Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Sarah BURZONI**

Élaboration d'une méthodologie d'évaluation qualitative du risque biologique

21 avril 2021

Membres du jury :

Rapporteurs :	Madame Anne OPPLIGER	Docteure, Université de Lausanne
	Monsieur Maximilien DEBIA	Professeur, Université de Montréal
Examineurs :	Madame Isabelle THAON	Docteure, Centre Hospitalier Universitaire de Nancy
	Monsieur Pierre Le Cann	Professeur, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique (EHESP) de Rennes
	Monsieur Luc FERRARI	Professeur, Université de Lorraine
Membres invités:	Monsieur Philippe DUQUENNE	Chercheur, INRS de Vandoeuve

UMR 7198 - Laboratoire de Recherche en Sciences des Matériaux - Institut Jean Lamour -
Université de Lorraine, 2 allée André Guinier - Campus Artem, 54011 Nancy Cedex

« Tout le monde est un génie. Mais si on juge un poisson sur sa capacité à grimper à un arbre, il passera sa vie à croire qu'il est stupide. »

Albert Einstein

REMERCIEMENTS

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'Institut Jean Lamour (IJL), unité mixte de recherche (UMR 7198) rattachée à l'Institut de Chimie du CNRS et à l'Université de Lorraine, sous la direction du Professeur Luc Ferrari.

Avant de partager ces travaux présentés dans ce mémoire, il me paraît naturel et légitime de commencer par remercier les personnes qui m'ont permis d'effectuer ce travail ainsi que celles qui m'ont permis d'en faire une expérience riche aussi bien professionnelle que personnelle.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance au Professeur Luc Ferrari de l'accueil qu'il a approuvé au sein de l'Institut Jean Lamour, de l'intérêt qu'il a porté sur mon sujet, de nos échanges qui m'ont permis d'élargir mon esprit sur la recherche et ses multiples possibilités. Je lui adresse mes sincères remerciements pour ses judicieux conseils qu'il m'a apportés, sa disponibilité et sa gentillesse qu'il m'a témoignée tout au long de ces 4 années de thèse.

Mes remerciements vont également à Madame Anne Oppliger, docteure de l'Institut universitaire romand de Santé au Travail (IST) de Lausanne, à Madame Isabelle Thaon, maître de conférences des universités-praticien hospitalier (MCU-PH) au sein du laboratoire INGRES (Interaction gènes – Risques environnementaux et effets sur la santé) de l'Université de Lorraine, à Monsieur Maximilien Debia, Professeur à l'École de santé publique - Département de santé environnementale et santé au travail de l'Université de Montréal, à Monsieur, Pierre Le Cann, Professeur de microbiologie à l'École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP) de Rennes, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.

Je tiens aussi tout particulièrement à remercier Philippe Duquenne de m'avoir soutenue dans le développement de ce sujet, mais surtout pour tous nos échanges constructifs qui m'ont permis d'alimenter et de faire évoluer ma réflexion. Je tiens également à le remercier pour les conseils qu'il m'a apportés, pour son investissement et pour la patience dont il a fait preuve.

Mes remerciements s'adressent également à mon responsable de laboratoire, Gautier Mater. Je le remercie de m'avoir toujours soutenue dès le début et tout au long de ce projet, de m'avoir apporté ses conseils constructifs à des moments opportuns. Je tiens aussi à le remercier chaleureusement de sa disponibilité et de tous les échanges que l'on a pu avoir.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) qui m'a permis de me consacrer sereinement à l'élaboration de ces travaux de thèse dans le cadre de mes activités professionnelles.

Je tiens également à remercier M. Benoit Courrier, chef du Département de Métrologie des Polluants à l'INRS, pour ses encouragements au cours de ces années, pour son écoute, sa disponibilité, son intérêt quant aux « petites bêtes » et surtout pour sa confiance.

Un GRAND merci à tous mes collègues du département Métrologie des Polluants, mais aussi des départements Toxicologie et Biométrie, Ingénierie des Procédés, Ressources Humaines..., merci pour tous vos sourires, votre gentillesse et vos encouragements.

Je tiens également à remercier mes collègues du laboratoire Évaluation du Risque et des Expositions, Barbara, Marilyne, Jean-François et Andréa, pour leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont fait plus que partager mon quotidien durant ces années et qui ont fait de cette expérience, une étape de vie (*désolé ça risque d'être long !*). Merci à Virginie, Hélène, Nathalie, Élodie, Marion, Céline, Sylvain, Aurélie, Benoit, Véronique, Clotilde, Alain, Jean-Marie, Sandrine, Davy, Juliette, Mme Thérèse, Xavier, Eddy, Sébastien, Christian, Frédéric, Abir...

Un immense merci à ma « Tata loulous » et à tous mes amis extérieurs, Bettina, Mon Jean-Lou, Audrey, Chantal, Olivier, Ben, P'it Dav', Jean-Pierre... avec qui j'ai pu passer des moments de sourires et d'évasion.

Je tiens à remercier chaleureusement ma sœur Rachel, de m'avoir accompagnée, encouragée et soutenue depuis le début de cette aventure. Merci également à mon papa et à ma maman d'avoir cru en moi dans des moments difficiles et de leur accompagnement. Plus généralement merci à ma famille de m'avoir encouragée dans cette aventure.

À tous ceux que j'ai oublié, mais qui se reconnaîtront ici. Un immense merci !!

Enfin, une petite dédicace la plus méritée. Je tiens à remercier mes anges gardiens, Aïda et Naos. Merci de toute votre tendresse, de votre amour inconditionnel, et d'avoir été à mes côtés en toutes circonstances, Merci !!

VALORISATIONS SCIENTIFIQUES

Revue scientifique

- ❖ **Burzoni, S.**, Duquenne, P., Mater, G., & Ferrari, L. (2020). Workplace Biological Risk Assessment: Review of Existing and Description of a Comprehensive Approach. *Atmosphere*, 11(7), 741.

Article scientifique

- ❖ **Burzoni, S.**, Mater, G., Duquenne, P., & Ferrari, L. (2018). Développement d'une méthodologie d'évaluation qualitative du risque biologique : premiers résultats. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 79 (3), 413.
- ❖ Savary B., **Burzoni S.**, Mater G. (2019). Portrait rétrospectif (2008-2018) des expositions à des agents biologiques issues de la base Colchic. *Hygiène et sécurité du travail*, 256, pp. 88-91.
- ❖ Duquenne P., Aubry C., **Burzoni S.**, Courrier B., Dirrenberger P., Bayeux-Dunglas M.C., Demange V., Laurent L., Leclerc J.P., Levilly R., Loison P., Ndaw S., Simon X., Sponne I. (2019). Les risques biologiques – Conférence scientifique de l'INRS – Nancy, 5-7 juin 2019. *Références en santé au travail*, 160, pp. 145-153.
- ❖ Duquenne P., **Burzoni S.**, Simon X. (2018). Les méthodes disponibles pour la mesure des bioaérosols au poste de travail. *Hygiène et sécurité du travail*, 252, pp. 38-42.

Communication orale

- ❖ **Burzoni S.**, Ferrari L., Duquenne P., Mater G. (2019) Assessing biological risks in an occupational setting: review of existing data and critical analysis, Conférence "Les risques biologiques", Nancy.

Communication affichée

- ❖ **Burzoni S.**, Ferrari L., Duquenne P., Mater G. (2018) Comparaison des démarches existantes d'évaluation du risque biologique, 35^e Congrès National de Médecine et Santé au travail, Marseille.

TABLE DES MATIÈRES

PARTIE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	25
1. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE EN MATIÈRE D'ÉVALUATION DU RISQUE	25
1.1 <i>L'évaluation du risque en milieu professionnel.....</i>	<i>25</i>
1.2 <i>État des lieux de l'existant en matière d'évaluation du risque.....</i>	<i>25</i>
1.2.1 L'évaluation pour le risque chimique	26
1.2.1.1 L'évaluation qualitative.....	26
1.2.1.2 L'évaluation quantitative.....	33
1.2.2 L'évaluation du risque lié à l'utilisation des nanomatériaux.....	34
1.2.3 L'évaluation du risque biologique	34
2. LES AGENTS BIOLOGIQUES EN MILIEU DE TRAVAIL	35
2.1 <i>Les agents biologiques</i>	<i>35</i>
2.1 <i>Les dangers et les risques des agents biologiques.....</i>	<i>36</i>
3. LES EXPOSITIONS EN MILIEU PROFESSIONNEL	39
3.1 <i>Au sein des secteurs d'activité.....</i>	<i>39</i>
3.2 <i>Au sein des plateformes de compostage.....</i>	<i>40</i>
4. ENJEUX DES TRAVAUX DE THÈSE	41
PARTIE 2 : OBJECTIFS ET DÉMARCHE DES TRAVAUX DE THÈSE	45
PARTIE 3 : REVUE ET ANALYSE DES DÉMARCHES D'ÉVALUATION QUALITATIVE DU RISQUE BIOLOGIQUE ET DESCRIPTION D'UNE MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	48
1. INTRODUCTION.....	50
2. MATERIALS AND METHODS	54
2.1 <i>Fields of Investigation and Research Criteria.....</i>	<i>54</i>
2.2 <i>Analysis of Sources</i>	<i>55</i>
3. RESULTS	56
3.1 <i>Collection and Description of the Sources of Information Gathered.....</i>	<i>56</i>
3.1.1 Methods.....	63
3.1.2 Methodologies	64
3.2 <i>Analysis of Approaches Involving "Workstation Analysis" and "Analysis by Risk Level".....</i>	<i>66</i>
3.2.1 Description of the Approaches	66
3.2.2 Treatment Modes (Annexe 4)	68
4. DISCUSSION	68
4.1 <i>A Qualitative Methodology in Redaction Form</i>	<i>69</i>

4.2. Hazard Descriptors	70
4.3. Exposure Descriptors (Table 8).....	70
4.4. Risk Assessment Combining “Workstation Analysis” and “Assessment by Risk Level”	71
4.5. Identifiable or Quantifiable Determinants, Attribution Systems, and Simple Treatment Modes.....	71
4.6. The Contribution of Quantitative Assessment to Risk Assessment.....	72
5. LIMITATION AND INTERESTS	74
6. CONCLUSION AND PERSPECTIVES	75
PARTIE 4 : LE SECTEUR DU COMPOSTAGE.....	79
1. CADRE GLOBAL DU SECTEUR DE COMPOSTAGE	79
2. LES DÉCHETS.....	79
2.1 Les typologies des déchets.....	79
2.2 La production de déchets en France	80
3. LES PLATEFORMES DE COMPOSTAGE	81
3.1 Le procédé du compostage	81
3.2 Le fonctionnement d’une plateforme de compostage.....	82
4. LA BIODIVERSITÉ DANS LE SECTEUR DU COMPOSTAGE.....	84
5. EFFETS OBSERVÉS SUR LA SANTÉ DES TRAVAILLEURS.....	86
6. EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES MESURÉES SUR LES PLATEFORMES DE COMPOSTAGE.....	87
6.1 Concentration dans l’air des plateformes de compostage	87
6.2 Exposition des travailleurs sur les plateformes de compostage.....	88
6.3 État des lieux des mesures dans la base de données Colchic.....	88
PARTIE 5 : CONCEPTION D’UNE MÉTHODOLOGIE D’ÉVALUATION DU RISQUE BIOLOGIQUE APPLIQUÉE AU SECTEUR DU COMPOSTAGE.....	93
1. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	93
1.1 Description de la démarche.....	93
1.2 Identification des agents biologiques dans un réservoir	95
1.2.1 Généralités	95
1.2.2 Agents biologiques au sein des plateformes de compostage	95
1.3 DANGER.....	97
1.3.1 Cas des substances chimiques et des nanomatériaux.....	97
1.3.3 Détermination du danger d’un agent biologique	100
1.3.4 Détermination du danger d’un réservoir	102
1.4 Hiérarchisation des dangers.....	103
1.5 Processus d’attribution d’une bande de danger	106
1.6 Descripteurs d’exposition	106
1.6.1 Conception du pool initial de descripteurs.....	107
1.6.1.1 Sollicitation des futurs utilisateurs de la méthodologie	109

1.6.1.2	Identification des établissements pour l'enquête et les visites	109
1.6.2	Le traitement et l'interprétation des données recueillies	112
1.6.3	Choix des descripteurs d'exposition.....	112
1.6.4	Définition des bandes et choix des scores des descripteurs	112
1.7	<i>Calcul des bandes des niveaux de risque par inhalation et par contact cutané.....</i>	<i>113</i>
2.	RÉSULTATS – DISCUSSION.....	113
2.1	<i>Agents biologiques présents dans les réservoirs des plateformes de compostage</i>	<i>113</i>
2.1.1	Identification des AB dans les intrants.....	114
2.1.2	Identification des agents biologiques dans les composts.....	114
2.2	<i>Création de la base de classification franco-allemande.....</i>	<i>115</i>
2.2.1	La classification française	115
2.2.2	La classification allemande.....	115
2.2.3	La classification franco-allemande.....	116
2.3	<i>Matrice de hiérarchisation des dangers.....</i>	<i>117</i>
2.4	<i>Attribution d'une bande de danger aux réservoirs</i>	<i>120</i>
2.4.1	Attribution d'une bande de danger aux intrants.....	120
2.4.2	Attribution d'une bande de danger aux composts.....	121
2.4.3	Conclusions relatives aux dangers	123
2.4.4	Les descripteurs d'exposition	124
2.4.4.1	Constitution du pool initial de descripteurs.....	124
2.4.4.2	Retours de terrain.....	126
2.4.5	Conclusion à l'issue des résultats de l'enquête et des visites d'entreprise	130
2.5	<i>Sélection des descripteurs d'exposition.....</i>	<i>132</i>
2.6	<i>Les bandes et les scores des descripteurs retenus.....</i>	<i>134</i>
2.7	<i>La méthodologie d'évaluation du risque biologique</i>	<i>135</i>
2.7.1	Présentation générale.....	135
2.7.2	Le repérage des lieux et des expositions	136
2.7.3	Constitution des GES.....	136
2.7.4	Évaluation du risque par GES.....	137
2.7.4.1	Les descripteurs communs	138
2.7.4.2	Descripteurs spécifiques de l'exposition par inhalation	142
2.7.4.3	Descripteur spécifique du risque par contact cutané	147
2.7.5	Calcul du score de risque et caractérisation du risque	149
2.7.5.1	Calcul des scores de risque déterminant les niveaux de risque	149
2.7.5.2	Score et caractérisation du risque par inhalation	150

PARTIE 6 : VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE	155
1. MATÉRIELS ET MÉTHODES	155
1.1 <i>Mise en application de la méthodologie sur le terrain</i>	<i>155</i>
1.2 <i>Comparaison des résultats de la méthodologie avec d'autres démarches.....</i>	<i>156</i>
1.3 <i>Validation des résultats avec la base de données Colchic.....</i>	<i>158</i>
1.3.1 Comparaison des scores de la méthodologie de référence.....	159
1.3.2 Comparaison des résultats de l'EvRB avec les mesures de concentrations de Colchic	159
2.2 <i>Comparaison des résultats de la méthodologie avec d'autres démarches.....</i>	<i>169</i>
2.3 <i>Validation avec les données de la base Colchic.....</i>	<i>173</i>
2.3.1 Validation des scores	173
2.3.2 Validation de la méthodologie avec les mesures de concentrations de Colchic.	178
ORIGINALITÉS	187
LIMITES.....	191
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	195

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Processus général de l'évaluation du risque.....	28
Figure 2 : Classification et étiquetage de l'acétone selon le CLP.....	29
Figure 3 : The process used to select the sources used for proposing a qualitative approach to assess biological risks in an occupational setting.....	57
Figure 4 : Characteristics of the sources proposing a qualitative EvBR (number of sources taken into consideration n = 32).....	62
Figure 5 : Definition of approaches used for the qualitative assessment of biological risk.....	65
Figure 6 : Representation of an exposure determinant considered as an "intermediate" parameter (grey box).....	67
Figure 7 : Estimation and coding of risk levels based on the hazard levels and exposure levels measured in a working situation.....	72
Figure 8 : La production de déchets en France en 2017 (ADEME, 2020).....	80
Figure 9 : Structures d'andains (ADEME, 2015).....	83
Figure 10 : Schéma technique d'une plateforme de compostage de déchets verts (Source : Sydetom (http://www.sydetom66.fr/)).....	84
Figure 11 : Évolution de la température au cours des différentes phases du compostage (d'après (Mustin, 1987)).....	85
Figure 12 : Distribution des mesures de concentrations d'ambiance des cinq agents biologiques quantifiés pour les activités de compostage enregistrées dans Colchic.....	90
Figure 13 : Dispersion des mesures de concentrations individuelles des cinq agents biologiques quantifiés pour les activités de compostage enregistrées dans Colchic.....	90
Figure 14 : Présentation de la démarche générale entreprise pour concevoir la méthodologie d'évaluation du risque biologique appliquée au compostage.....	94
Figure 15 : Schématisation du croisement des données entre les contenus microbiens des intrants et des composts avec les communautés bactériennes et fongiques identifiées dans les aérosols de plateformes de compostage.....	96
Figure 16 : La nouvelle classification franco-allemande qui réunit les classifications française et allemande.....	99
Figure 17 : Les niveaux hiérarchiques de la classification scientifique du monde vivant : les rangs taxinomiques (Raven et al., 1971).....	100
Figure 18 : Détermination de la classification de danger d'un genre en fonction de la classification de danger des espèces de ce genre.....	101
Figure 19 : Attribution d'une classification de danger selon le rang taxinomique.....	102
Figure 20 : Détermination du groupe infectieux d'un réservoir constitué d'AB ayant des classifications différentes.....	102
Figure 21 : Détermination de la bande de danger d'un réservoir composé de plusieurs familles d'AB.....	103

Figure 22 : Détermination du pool initial de descripteurs d'exposition.....	108
Figure 23 : Répartition de la responsabilité des établissements des exploitants/maîtres d'ouvrage.....	126
Figure 24 : Répartition des activités des établissements.....	126
Figure 25 : Taux de réponses affirmatives dans le cadre de l'enquête portant sur les descripteurs de risque identifiables par les exploitants ou les gestionnaires de risque.	127
Figure 26 : Photographie de la zone de compostage de l'entreprise A.	128
Figure 27 : Photographie de la zone de compostage de l'entreprise B.	129
Figure 28 : Photographie de la zone de compostage de l'entreprise C.....	130
Figure 29 : Schématisation des niveaux de risque selon le modèle de gestion gradué.....	132
Figure 30 : Représentation du niveau de risque avec les descripteurs définissant le risque en général.....	132
Figure 31 : Domaine d'application de la méthodologie d'EvRB.	135
Figure 32 : Démarche globale de l'application de la méthodologie d'EvRB.....	135
Figure 33 : Présentation des descripteurs permettant l'évaluation du risque par inhalation et par contact cutané.....	137
Figure 34 : Photographies de quelques tâches de travail évaluées à l'aide de la méthodologie de référence [© Sarah Burzoni / INRS].....	163
Figure 35 : Variation de scores de toutes les clés des descripteurs de risque communs à la méthodologie de référence et à Colchic.....	175
Figure 36 : Variation des scores des clés des descripteurs de risque communs à la méthodologie de référence et à Colchic lorsque le descripteur de durée est associé à la bande de durée Du=1 et que la protection collective, le type de procédé et la fréquence d'exposition varient d'une bande à l'autre.....	176
Figure 37 : Régression linéaire entre les niveaux d'exposition Colchic et le niveau de risque..	181
Figure 38 : Représentation des trois clés uniques dans le système représentant le niveau de risque par la méthodologie de référence.....	182
Figure 39 : Photographie de la zone de méthanisation et de compostage de l'établissement D.	237

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Matrice des bandes de danger en fonction du niveau de danger (inspiré de (Brooke, 1998)).	30
Tableau 2 : Les mentions de danger regroupées par bandes de danger de quatre outils d'évaluation du risque chimique (Scheffers et al., 2016).	31
Tableau 3 : Estimation du niveau de risque à partir des niveaux de danger et d'exposition classés en cinq bandes (inspiré de (David M. Zalk & Nelson, 2008)).	32
Tableau 4 : Priorisation des actions à mettre en place en fonction du niveau de risque (inspiré de (Loud James, 2020; Vincent et al., 2005).	32
Tableau 5 : Classification des agents biologiques par groupe de danger pour le risque infectieux (Balty Isabelle & Bayeux-Dunglas Marie-Cécile, 2018).	37
Tableau 6 : Classement de quelques mycotoxines selon le CIRC et principales propriétés toxiques (Nodet P, 2020).	38
Table 7 : List of sources for the qualitative assessment of biological risk in the workplace.	58
Table 8 : Relationship of sources and qualitative assessment of biological risks in occupational settings.	60
Tableau 9 : Le traitement et la valorisation des déchets (ADEME, 2021).	81
Tableau 10 : Descripteurs statistiques des concentrations ambiantes et des niveaux d'exposition pour les cinq agents biologiques représentés dans Colchic.	89
Tableau 11 : Synthèse du nombre des phylums, de genres et d'espèces microbiens constituant les différents composts.	114
Tableau 12 : Nombre d'espèces classées selon la réglementation française.	115
Tableau 13 : Familles et genres de virus classés dans le groupe 2 dans la classification française des dangers.	115
Tableau 14 : Nombre d'espèces classées selon la réglementation allemande.	116
Tableau 15 : Liste franco-allemande des agents biologiques.	116
Tableau 16 : Proposition finale de la matrice de hiérarchisation des dangers des agents biologiques.	118
Tableau 17 : Matrice simplifiée de la hiérarchisation des dangers des agents biologiques.	119
Tableau 18 : Classification franco-allemande et du CIRC, et bandes de danger des intrants.	121
Tableau 19 : Classification des dangers retenue pour les espèces identifiées dans les aérosols de plateformes de compostage du phylum Firmicutes (extrait de l'annexe 8).	121
Tableau 20 : Bandes de danger définies pour les composts lors des différentes phases de compostage en fonction des phylums microbiens identifiés au cours de ces phases.	122
Tableau 21 : Bande de danger établie pour les composts au cours des phases de compostage.	123
Tableau 22 : Descripteurs du pool initial et leurs provenances.	124

Tableau 23 : Descripteurs intégrés dans la méthodologie.....	134
Tableau 24 : Bandes et scores de danger des matières mises en œuvre.	138
Tableau 25 : Bandes et scores de quantité.	139
Tableau 26 : Bandes et scores de la durée journalière de la tâche de travail.	140
Tableau 27 : Bandes et scores de la fréquence de la tâche de travail effectuée dans la semaine, toutes les semaines.	141
Tableau 28 : Bandes et scores de la fréquence de la tâche de travail effectuée dans le mois, tous les mois.....	141
Tableau 29 : Bandes et scores de la fréquence de la tâche de travail effectuée dans l'année, tous les ans.....	142
Tableau 30 : Bandes et scores de l'état physique pour les solides.	143
Tableau 31 : Bandes et scores de l'état physique pour les réservoirs sous forme pâteuse.	143
Tableau 32 : Bandes et scores du procédé de travail.....	144
Tableau 33 : Bandes et scores de la ventilation des locaux.....	145
Tableau 34 : Bandes et scores du captage à la source.	146
Tableau 35 : Bandes et scores du scénario d'exposition.	148
Tableau 36 : Bandes et scores de la surface de peau exposée.....	149
Tableau 37 : Grille de caractérisation du risque par inhalation.	151
Tableau 38 : Grille de caractérisation du risque par contact cutané.....	151
Tableau 39 : Comparaison des niveaux de risque de la méthodologie de référence avec D_{EvRB1} et D_{EvRB2}	158
Tableau 40 : Valeurs guides des agents biologiques retenues pour comparer les médianes des mesures de concentration de Colchic dans la présente étude.	161
Tableau 41 : Résultats de l'évaluation du risque par inhalation des situations de travail de plateformes de compostage visitées.	164
Tableau 42 : Résultats de l'évaluation du risque par contact cutané des situations de travail de plateformes de compostage visitées.	166
Tableau 43 : Résultats des niveaux de risque des situations de travail obtenues par la méthodologie de référence, par D_{EvRB1} et par D_{EvRB2}	170
Tableau 44 : Comparaison des niveaux de risque des situations de travail obtenus en appliquant la méthodologie de référence et les démarches comparatives D_{EvRB1} et D_{EvRB2}	172
Tableau 45 : Bandes et scores des descripteurs communs à la méthodologie de référence et à Colchic.....	174
Tableau 46 : Comparaison des niveaux d'exposition de Colchic et des niveaux de risque.	180
Tableau 47 : Comparaison du niveau d'exposition Colchic et du niveau de risque des trois clés tous AB confondus.....	183

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Principales activités exposant aux agents biologiques en milieu professionnel (Corrao et al., 2012; EU-OSHA, 2014; Su et al., 2019).....	221
Annexe 2 : Summary of the research process on the PubMed bibliographic database.....	222
Annexe 3 : Characteristics of the approaches used to assess biological risk.....	223
Annexe 4 : Characteristics of assessment approaches combining "workstation analysis" and "assessment by risk level.....	224
Annexe 5 : Contenu microbiologique des matières premières du compostage (Schlosser & Huyard, 2008).	230
Annexe 6 : Principaux micro-organismes pathogènes retrouvés dans les déchets (boues de stations d'épuration, effluents d'élevage, ordures ménagères) avant le compostage (de Guardia, 2018).....	232
Annexe 7 : Communautés bactériennes et fongiques au cours du compostage en fonction de leur importance numérique évaluée par les techniques culturales (de Guardia, 2018).	233
Annexe 8 : Bactéries dominantes identifiées dans les aérosols des plateformes de compostage par culture et par séquençage du gène ARNr 16s (Wéry, 2014).....	234
Annexe 9 : Champignons dominants identifiés dans les aérosols des plateformes de compostage par culture et par séquençage du gène ARNr 18s (Wéry, 2014).....	235
Annexe 10 : Liste des agents biologiques et de leurs produits classés par le CIRC (https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications).....	236
Annexe 11 : Présentation de la plateforme de compostage D, troisième établissement dans lequel la méthodologie de référence a été mise en application.....	237

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AB : agents biologiques

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AMDEC : Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité

BIT : Bureau international du travail

BPCO : BronchoPneumopathie Chronique Obstructive

BTP : Bâtiment et des Travaux Publics

CB : Control Banding

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

CLP : Classification, labelling and packaging

CMR : Cancérogènes, Mutagènes ou Reprotoxique

Cnam : Caisse nationale de l'assurance maladie

Colchic : COLlecte des données d'exposition CHImique des Caisses Régionales d'Assurance Maladie

COSHH : Control of Substances Hazardous to Health

CWED : Canadian Workplace Exposure Database

DAE : Déchets des Activités Economiques

Dares : Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques

DD : Déchets Dangereux

DMA : Déchets Ménagers et Assimilés

DND : Déchets Non Dangereux

DNDI : Déchets Non Dangereux Inertes

DNDNI : Déchets Non Dangereux Non Inertes

DUER : Document Unique d'Evaluation des Risques

EPI : Équipements de Protection Individuelle

EvBR : Évaluation of Biological risk

EvRB : Évaluation du Risque Biologique

EvRP : Évaluation des Risques Professionnels

FDS : Fiches de Données de Sécurité : Fiche de Données de Sécurité

GES : Groupes d'Exposition Similaires

HSE : Health and Safety Executive

IAA : Industrie AgroAlimentaire

IMIS : Integrated Management Information System

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

IOHA : l'International Occupational Hygiene Association

LD : Limite de Détection

LIC : Laboratoires Interrégionaux de Chimie

MEGA : Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz

MSDS : Material Safety Data Sheet

NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health

NM : NanoMatériaux

ODTS : Organic Dust Toxic Syndrom OEL : Occupational Exposure Limit

OGM : micro-organismes génétiquement modifiés

OMS : l'Organisation Mondiale de la Santé

PRISMA : Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

RDs : risk descriptors

RGPD : Règlement Général sur la Protection des Données

SEIRICH : Système d'Evaluation et d'Information sur les Risques Chimiques

SGH : Système Général Harmonisé

STEP : STation d'EPuration

SUMER : de Surveillance médicale des expositions des salariés aux risques professionnels

TMS : Troubles Musculo-Squelettiques

VLEP : Valeur Limite d'Exposition Professionnelle

VLEP-CT : VLEP-court terme

ORGANISATION DE LA THESE

Cette thèse est divisée en six parties.

La partie 1 présente le contexte général dans lequel s'inscrivent ces travaux. Elle consiste à présenter les micro-organismes, la place du risque biologique en milieu professionnel, la prévention et l'évaluation des risques en général et en particulier un modèle d'évaluation, la gestion graduée des risques et le domaine d'activité concerné par la proposition de notre méthodologie d'évaluation du risque biologique (EvRB).

La partie 2 présente les objectifs et la démarche des travaux de thèse.

La partie 3 propose une revue de la littérature des démarches d'EvRB, identifiant et analysant les approches qui permettent de réaliser ce genre d'évaluation en milieu professionnel. Ce travail repose d'une part, sur une revue de la littérature exploitant les articles scientifiques et la littérature grise et d'autre part, sur la recherche d'applications informatiques existant dans ce domaine. Les démarches inventoriées sont examinées à l'aide de critères tels que le type d'évaluation, les risques étudiés, les voies d'exposition... Par ailleurs, les paramètres qui composent les démarches proposant le type d'évaluation la plus représentative sont analysés. L'examen des 32 sources proposant une EvRB permet de faire le point sur les méthodes existantes et d'examiner leurs caractéristiques. À l'issue de cette analyse, la structure d'une démarche optimale d'EvRB est proposée. Cette partie a fait l'objet de la publication d'une *Review* dans le journal *Atmosphere*.

La partie 4 présente le secteur d'activité du compostage. Elle expose tout d'abord le cadre global du compostage, la typologie et le traitement des déchets et les procédés de travail. Ensuite est présentée la biodiversité issue du processus même du compostage. Finalement, après avoir dressé un bref portrait des effets observés sur la santé chez les travailleurs, cette partie expose les concentrations mesurées issues de la bibliographie ainsi que celles provenant de la base de données Colchic.

Le cœur de la thèse est formé par les parties 5 et 6 qui permettent de répondre aux objectifs.

La partie 5 décrit la proposition et la mise en application de notre méthodologie d'EvRB dans le domaine d'activité des plateformes de compostage.

Dans la mesure où l'objectif final est de mettre à disposition une méthodologie utilisable par les chefs d'établissement ou tout acteur de la prévention, il a été nécessaire de s'assurer que les informations qu'ils devront collecter pour réaliser cette évaluation peuvent être identifiables et accessibles. Des visites d'entreprises et une enquête par questionnaire ont été réalisées afin d'identifier les descripteurs de risque que les futurs utilisateurs pouvaient reconnaître. À l'issue des résultats, un prototype de méthodologie a été créé et testé en situations réelles de travail en entreprise.

La partie 6 explique la validation de la méthodologie. Cette étape a été réalisée en comparant les résultats issus de notre méthodologie et les résultats issus d'autres méthodologies identifiées lors de la revue de la littérature et aussi en comparant les données d'exposition de la base de données Colchic.

Partie 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PARTIE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte réglementaire en matière d'évaluation du risque

1.1 L'évaluation du risque en milieu professionnel

Dans le domaine des risques professionnels, l'une des obligations réglementaires de l'employeur est de prendre toutes les mesures nécessaires pour protéger la santé et la sécurité des travailleurs (directive 89/391/CE) (Journal officiel, 1989). La transposition de cette directive et de ses déclinaisons françaises (Journal officiel, 1992a, 1992b, 1994b), impose aux chefs d'établissements de mettre en place une démarche de prévention, basée sur les principes généraux de prévention (Art. L. 4121-1 et L. 4121-2 du Code du travail). L'Évaluation des Risques Professionnels (EvRP) figure parmi ces principes et relève de la responsabilité de l'employeur (Art. L. 5121-2 et L. 4121-3 du Code du travail). Elle consiste à identifier les risques auxquels sont soumis les salariés d'un établissement, en vue de mettre en place des actions de prévention pertinentes couvrant les dimensions techniques, humaines et organisationnelles. Elle constitue l'étape initiale de toute démarche de prévention en santé et sécurité au travail (Editions Tissot, 2019; INRS, 2014a). L'EvRP est une démarche structurée dont les résultats sont formalisés dans le Document Unique d'Évaluation des Risques (DUER) (Art. R. 4121-1 et suivants du Code du travail). Le risque est la probabilité qu'une personne subisse des dommages ou des effets néfastes sur la santé lorsqu'elle est exposée à un danger, c'est-à-dire à une source potentielle de dommage. En milieu de travail, plusieurs types de risques coexistent, tels que les risques chimiques, physiques, psychologiques ou biologiques. Le risque biologique correspond à l'exposition des salariés à des agents biologiques (AB). À l'instar de tout autre risque, la mise en œuvre d'une démarche de prévention du risque lié à l'exposition à des AB, s'appuie sur les principes généraux de prévention. Pour les activités susceptibles de présenter un risque d'exposition à des AB, des prescriptions minimales, telles que la détermination de la nature, le degré et la durée de l'exposition, sont requises pour réaliser cette évaluation (Journal officiel, 2000). En France, ces dispositions sont transposées respectivement aux articles L. 4121-1 et R. 4121-1 et R. 4421-1 à R. 4427-5 du Code du travail.

1.2 État des lieux de l'existant en matière d'évaluation du risque

L'évaluation du risque comprend deux étapes : l'évaluation qualitative (ou évaluation initiale) et l'évaluation quantitative. L'évaluation qualitative du risque constitue le préalable de toute démarche de prévention des risques et doit permettre de construire un plan d'action de prévention. Elle consiste à : (i) répertorier les dangers qui pourraient causer un préjudice ; (ii) analyser et évaluer les conditions d'exposition ; (iii) hiérarchiser les risques par priorités d'action et (iv) élaborer un plan d'action.

1.2.1 L'évaluation pour le risque chimique

1.2.1.1 L'évaluation qualitative

Dans le cadre du risque chimique, des démarches sont disponibles pour évaluer le risque des salariés lorsqu'ils sont exposés à des produits chimiques. Celles-ci se distinguent selon leurs typologies d'évaluation décrites en France et extrapolables aux démarches internationales (Triolet & Héry, 2009) :

- audit de conformité : la méthode est basée sur l'évaluation des écarts entre la situation observée et les prescriptions d'utilisation des produits chimiques (Payen & Boulat, 2006) ;
- analyse de type ergonomique : la méthode est basée sur l'observation de la situation réelle de travail et le recueil d'informations sur les produits chimiques (Abecassis *et al.*, 2004) ;
- approche systémique : la démarche est basée sur l'analyse fonctionnelle d'un système défini constitué d'éléments. Le risque est évalué à partir des défaillances de chacun des éléments du système. Ce principe est similaire à l'Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), outil de sûreté de fonctionnement et de gestion de la qualité, utilisé dans les domaines industriels, de sûreté de fonctionnement, de gestion de la qualité, etc. (Desroches Alain *et al.*, 2016) ;
- gestion graduée de risque (ou Control Banding (CB)) : cette méthode s'appuie sur une caractérisation par niveaux des critères de danger et des conditions d'exposition (quantité, fréquence, process, protection collective...) (Marquart *et al.*, 2008; Vincent *et al.*, 2005).

La gestion graduée des risques est l'approche privilégiée par la plupart des organismes de prévention.

Historique de la gestion graduée des risques

Cette approche a été développée il y a une vingtaine d'années dans le domaine pharmaceutique autour des procédés utilisant des produits pour lesquels il n'y avait pas de Valeur Limite d'Exposition Professionnelle (VLEP) ou pour lesquels peu d'informations étaient disponibles (Sargent & Kirk, 1988). Les nouveaux produits étaient classés dans des « catégories » définies en fonction du niveau de danger des produits connus et similaires à ceux employés (Naumann, 2005; Naumann *et al.*, 1996).

Cette technique a été ensuite développée dans le domaine du risque chimique, par le Health and Safety Executive (HSE) pour les établissements de petite taille. Le HSE a développé une méthode nommée « COSHH Essentials » en simplifiant le modèle des « catégories » par des « bandes » (Brooke, 1998; Gazzi, 2000). « COSHH Essentials » est l'une des premières méthodes d'évaluation permettant d'aider les entreprises à se conformer à la réglementation Control of Substances Hazardous to Health (COSHH) (HSE, 2003).

Cette approche a été reprise par plusieurs organismes qui œuvrent dans le domaine du service de santé au travail, dont le Bureau International du Travail (BIT) qui, en collaboration avec l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'International Occupational Hygiene Association (IOHA) et le HSE, travaille au développement d'un outil d'application le « Chemical control toolkit » (International Labour Organization, 2008). Aux États-Unis, l'AIHA a formé un groupe de travail sur le sujet et a publié un guide d'application de cette approche (American Industrial Hygiene Association, 2007). Des institutions ont apporté des améliorations à cette approche en proposant un développement supplémentaire qui consiste à combiner des bandes de danger à des bandes d'exposition (Cherrie *et al.*, 1996). Des méthodes et des outils ont ainsi été développés, tels que le Stoffenmanager® (Cosanta, 2019; Marquart *et al.*, 2008), GESTIS-Stoffmanager (Cosanta, 2019; IFA, 2015; Koppisch & Gabriel, 2012; Marquart *et al.*, 2008), le système de contrôle des substances dangereuses (EMKG) facile à utiliser sur le lieu de travail (Kahl *et al.*, 2012) ou encore la méthodologie simplifiée du risque chimique (Vincent *et al.*, 2005). Plus récemment, cette approche de gestion graduée des risques a également été employée dans le domaine des nanomatériaux (ANSES, 2010a; Hristozov *et al.*, 2016; Kuempel *et al.*, 2012; Vincent *et al.*, 2005).

La gestion graduée des risques est utilisée avec succès dans ces domaines depuis plusieurs années et fait l'objet de différentes revues et d'analyses critiques (Brouwer, 2012; Geraci *et al.*, 2009; NIOSH, 2009b; David M. Zalk & Nelson, 2008). La reconnaissance de ce modèle d'évaluation tient du fait qu'il nécessite un nombre limité de facteurs ce qui permet de faciliter son application par les non-experts. Cette approche, de plus en plus répandue, est considérée comme efficace, permettant d'augmenter la protection des travailleurs et de diminuer les effets des polluants sur la santé (Drolet *et al.*, 2010).

Principe de la gestion graduée du risque

Le principe de l'évaluation qualitative par CB repose sur l'analyse du travail et des conditions opératoires. Elle nécessite le repérage des tâches de travail effectuées par les salariés et permet d'estimer le risque associé à une tâche en considérant deux critères impliqués dans l'appréciation du risque : (i) le danger, qui est la propriété intrinsèque d'un produit, d'un équipement, d'une situation susceptible de causer un dommage à l'intégrité mentale ou physique du salarié (CCHST, 2020; INRS, 2014a) et (ii) l'estimation de l'exposition, en se reposant sur des informations disponibles dans les entreprises. L'estimation du risque inhérent à la tâche est issue de la combinaison du danger et de l'exposition et permet de déterminer les mesures de protection et de prévention à mettre en œuvre pour la santé et la sécurité des salariés. Le modèle de gestion du risque s'appuie sur des techniques simplifiées de modélisation et des méthodes de calcul de scores pondérés (Drolet *et al.*, 2010). L'objectif est d'identifier les moyens de maîtrise sans avoir recours à des mesures quantitatives de l'exposition. Le modèle de la gestion graduée des risques se repose donc, sur l'existence d'informations techniques et scientifiques disponibles dans les lieux de travail, sur une connaissance préalable de la situation à évaluer et sur le jugement professionnel. Par ailleurs, bien que les éléments qui constituent la démarche de gestion graduée reposent sur les connaissances scientifiques actuelles, cette démarche peut également s'appuyer sur un nombre d'hypothèses lorsqu'il manque des données d'entrée. Le processus général de l'évaluation du risque peut être défini par la **Figure 1**.

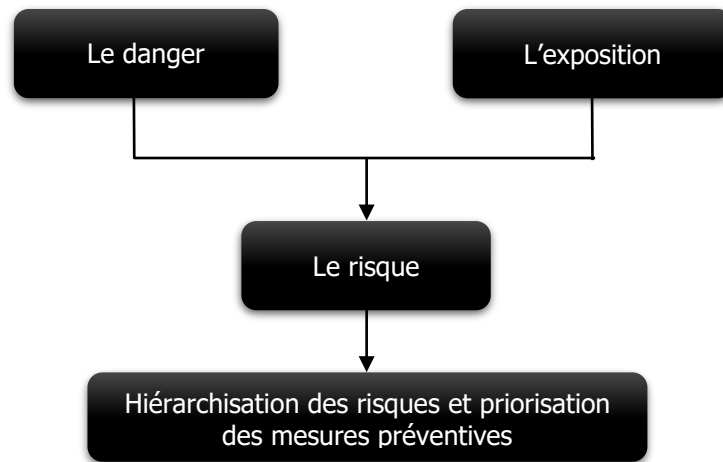


Figure 1 : Processus général de l'évaluation du risque.

✓ Bande de danger

Les dangers des agents chimiques sont identifiés à partir notamment des résultats d'études toxicologiques. Les agents chimiques dangereux peuvent engendrer des risques aigus, tels que la toxicité, l'irritation ou la corrosivité ou des effets chroniques tels que la sensibilisation, la cancérogénicité, la mutagénicité ou la toxicité pour la reproduction. Le système général harmonisé (SGH) des Nations Unies (UN SGH (Osha, 2013)) devenant la norme mondiale pour la classification des dangers des substances et des mélanges chimiques et, décliné en Europe par le règlement N°1278/2008, dit règlement « Classification, labelling and packaging » (CLP) de 2008, permet d'harmoniser les critères de classification afin d'identifier les dangers intrinsèques des produits chimiques et les éléments de communication sur ces dangers (contenu de l'étiquette et de la fiche de données de sécurité). Le CLP définit 28 classes de danger. Il reprend les 27 classes définies par le SGH :

- 16 classes de danger physique ;
- 10 classes de danger pour la santé intégrant les effets aigus et chroniques :
 - Toxicité aiguë ;
 - Corrosion cutanée/irritation cutanée ;
 - Lésions oculaires graves/irritations oculaires ;
 - Sensibilisation respiratoire ou cutanée ;
 - Mutagénicité sur les cellules germinales ;
 - Cancérogénicité ;
 - Toxicité pour la reproduction ;
 - Toxicité spécifique pour certains organes cibles-exposition unique ;
 - Toxicité spécifique pour certains organes cibles-exposition répétée ;
 - Danger par aspiration.
- 1 classe de danger pour l'environnement couvrant les dangers pour le milieu aquatique.

À ces classes, s'ajoute une 28^e « classe de danger supplémentaire pour l'Union européenne », à savoir la classe de danger « Dangereux pour la couche d'ozone ».

Classer un agent chimique ou un mélange consiste à définir les classes et les catégories de danger, associées à des mentions H. Par exemple, la classification et l'étiquetage de l'acétone comprennent les informations suivantes (**Figure 2**) :

- les pictogrammes :
 - « Flamme », code SGH02 ;
 - « Point d'exclamation », code SGH07 ;
- les mentions de danger :
 - H225 « Liquide et vapeurs très inflammables », de la classe de danger « Inflammable », de catégorie 2 ;
 - H319 « Provoque une sévère irritation des yeux », de la classe de danger « Lésions oculaires graves/irritation oculaire », de catégorie 2 ;
 - H336 « Peut provoquer somnolence ou vertiges », de la classe de danger « Toxicité spécifique pour certains organes cibles à la suite d'une exposition unique » de catégorie 3 ;
 - EUH 066 « L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau », propriété sanitaire.



Figure 2 : Classification et étiquetage de l'acétone selon le CLP.

La mention de danger est le reflet de la dangerosité intrinsèque d'un agent chimique ou d'un mélange.

Lors de la manipulation d'un mélange de plusieurs agents chimiques, la mesure des dangers du mélange pour la santé en tant que telle est impossible en raison des dangers spécifiques de chaque agent chimique pour la santé (Arnone *et al.*, 2015). Ce dernier a alors envisagé de classer les dangers en fonction de leur sévérité les uns par rapport aux autres. À ce classement sont associées des bandes, nommées « bandes de danger » pour la catégorie « danger » (Brooke, 1998).

Les dangers sont catégorisés et hiérarchisés par des bandes en plusieurs niveaux, du moins élevé au plus élevé. Les outils qui proposent une classification des dangers par bandes les catégorisent généralement en 5 niveaux croissants de A à E ou en rang numérique de 1 à 5, A/1 étant le niveau le moins élevé et E/5 étant le niveau le plus élevé (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Matrice des bandes de danger en fonction du niveau de danger (inspiré de (Brooke, 1998)).

Bandes de danger	Type de danger
1	Danger 1
2	Danger 2
3	Danger 3
4	Danger 4
5	Danger 5

Ces bandes de dangers peuvent être établies à partir des valeurs limites d'exposition professionnelle (Naumann *et al.*, 1996), des concentrations aéroportées (poussières, liquides), des phrases de risques (Brooke, 1998) et plus récemment des mentions de danger (Hazard statement), notés H (Scheffers *et al.*, 2016) (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Les mentions de danger regroupées par bandes de danger de quatre outils d'évaluation du risque chimique (Scheffers *et al.*, 2016).

Hazard band #	IFA	COSHH	EMKG (inhalation)	S-OEB
E/5	300, 310, 330 (Tox) 340, 350(i) (Car,M) EU032 (Tox gas release)	EU070 (Tox) 340, 341, 350(i) (Car,M) 334 (S)	340, 350(i) (Car,M) 360F (R)	372 (Tox) 340, 350(i) (Car,M) 334 (S)
D/4	301, 311, 331, 370, 372 (Tox) 341, 351, 360 _{xy} (Car,M,R) EUH029, EUH031 (Toxic gas release) 317, 334, 318, EUH070 (I,C,S)	300, 310, 330, 372 (Tox) 351, 360 _{xy} , 361, 362 (Car,R) EUH070 (I,C)	300, 330, 372 (Tox) 360D (R) EUH032 (Toxic gas release)	300, 310, 330; 370, 373 (Tox) 341, 351, 360 (Car,M,R) 314 cat A, EUH071 (I,C,S)
C/3	302, 312, 332, 371, 373 (Tox) 361 _{td} , 362 (R) 314 (pH ≥ 11,5, pH ≤ 2), EUH071 (I,C) non-toxic gases which may cause asphyxiation	301, 311, 331, 314, 370, 373 (Tox) 317, 318, 335, EUH071 (I,C)	301, 331, 314, 370, 371, 341, 351, 361f/d (Car,M,R) 373 (Tox) 334 (S) EUH031 (Toxic gas release)	301, 311, 331; 371,304, EUH070 [(lung, eye damage) (Tox) 361, 362 (R & Lact) 314 cat B and C, 317, 318, 335 (I,C,S)
B/2	315, 319, 335 (I) 304, EUH066, 336 (solvents)	302, 312, 332, 371 (Tox)	302, 332 (Tox) 318 (C)	302, 312, 332 (Tox) 315, 319 (Irr) 336, EUH066 (solvents)
A/1	substances for which experience showed them to be harmless (e.g. water, sugar, paraffin etc.)	303, 313, 333(Tox) 315, 319,316,320(I) 304, 305 (Aspiration hazard) 336 (Tox), EUH066 (solvent effect) and all H-numbers not otherwise listed	319, 335 (I) 336 (Tox) 304 (Aspiration hazard)	303, 313, 333 (Tox) 305 (Aspiration hazard) 316, 320 (I)

Non-health hazard H-codes REACH Annex IV or ES exempted

Lorsque l'agent chimique présente plusieurs mentions H, la bande de danger attribuée à l'agent chimique est la bande de danger la plus préventive, c'est-à-dire celle correspondant à la mention H qui est la plus sévère. En présence d'un mélange d'agents chimiques, l'attribution de la bande de danger se repose sur les mentions H indiquées au point réglementaire de la Fiche de Données de Sécurité (FDS ; en anglais Material Safety Data Sheet : MSDS), établie conformément au règlement CLP. Ces mentions H représentent les dangers intrinsèques du mélange des substances chimiques.

✓ Bandes d'exposition

Si le danger est la propriété intrinsèque d'un produit, l'exposition peut être déclinée en plusieurs variables, nommées « descripteurs ». Par exemple : le procédé de travail, la présence de protection collective, le type de manipulation, le taux d'émission des sources à proximité et loin des travailleurs, la présence de systèmes de ventilation locale et générale... (Cosanta, 2019; Marquart *et al.*, 2008).

Le principe général de la gestion du risque consiste tout d'abord à hiérarchiser les niveaux de danger et d'exposition classés par bandes et ensuite d'associer un système de pointage à chacune de ces bandes (Brooke, 1998).

✓ Niveau de risque

Le niveau de risque d'une tâche de travail est obtenu en combinant le niveau de danger et le niveau d'exposition par sommation ou multiplication. Le **Tableau 3** présente un exemple de l'obtention des niveaux de risque par la multiplication des scores des niveaux de danger et d'exposition comprenant cinq bandes chacun. Dans cet exemple, le niveau de risque peut être représenté par un code couleur. Les situations de travail dont le niveau de risque est vert sont des situations ayant un risque modéré, en orange, un niveau de risque préoccupant et en rouge un niveau de risque sérieux.

Tableau 3 : Estimation du niveau de risque à partir des niveaux de danger et d'exposition classés en cinq bandes (inspiré de (David M. Zalk & Nelson, 2008)).

		Niveau de danger				
		1	2	3	4	5
Niveau d'exposition	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	8	10
	3	3	6	9	12	15
	4	4	8	12	16	20
	5	5	10	15	20	25

Légende :

Vert : niveau de risque modéré

Orange : niveau de risque préoccupant

Rouge : niveau de risque sérieux

Le niveau de risque obtenu peut alors être combiné à un plan d'actions qui définit les mesures de prévention à mettre en œuvre. Le résultat de l'évaluation du risque est associé à une bande de maîtrise de risque en proposant des actions ou des moyens de prévention à mettre en place en cohérence avec le niveau de risque estimé (**Tableau 4**).

Tableau 4 : Priorisation des actions à mettre en place en fonction du niveau de risque (inspiré de (Loud James, 2020; Vincent *et al.*, 2005)).

Niveau de risque	Action et mesures préventives
Sérieux	Mesures correctives à mettre en place rapidement
Préoccupant	Mesures correctives probablement à mettre en place
Modéré	Mesures correctives non prioritaires

En complément du plan d'actions qui peut être mis en œuvre à l'issue de l'évaluation qualitative, une évaluation quantitative peut être réalisée.

1.2.1.2 L'évaluation quantitative

L'évaluation quantitative est complémentaire à l'évaluation qualitative. Son objectif est d'évaluer les niveaux d'exposition dans l'environnement de travail, en réalisant des mesures de concentrations.

La mesure de l'exposition doit suivre des méthodes reconnues de prélèvements et d'analyses. La comparaison d'une concentration à une Valeur Limite d'Exposition Professionnelle (VLEP), quand elle existe, nécessite d'ajuster la durée du prélèvement en fonction de la période de référence de la VLEP. Ainsi, l'évaluation des expositions d'une journée de travail s'effectue sur la durée totale du poste du travailleur concerné par la mesure pour être comparée à la VLEP-8h. Lorsque le travailleur est exposé lors d'une tâche de courte durée, la mesure est réalisée sur une période plus courte prenant en compte le pic d'exposition. Généralement cette durée est de 15 minutes afin d'être comparée à la VLEP-court terme (VLEP-CT). En France, les VLEP sont définies par décrets pour celles classées comme réglementaires contraignantes ou par arrêtés pour celles déterminées comme réglementaires indicatives. Ces valeurs sont reprises dans les articles R. 4412-149 et R. 4412-150 du Code du travail et sont également centralisées dans des bases de données (IFA, 2020; INRS, 2020).

L'existence de VLEP et la réalisation des mesures supposent l'existence de procédures pour élaborer la stratégie d'échantillonnage, prélever, analyser les échantillons et exploiter les résultats. Certaines méthodes de prélèvement et d'analyse font l'objet de normes françaises et européennes (AFNOR, 2020) et d'autres sont publiées par des organismes à l'étranger, par exemple par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). En France, la base de données MétroPol de l'INRS est un recueil de protocoles pour le prélèvement et l'analyse des agents chimiques et biologiques déposés sur les surfaces ou présents dans l'air et dans certains matériaux. Cette base comprend plus de 427 méthodes de prélèvements et d'analyses en fonction des polluants chimiques et biologiques. Par ailleurs, la base propose 27 fiches méthodologiques qui complètent la base de données avec un ensemble de conseils et de recommandations pour mener à bien une campagne d'évaluation de l'exposition professionnelle, de la stratégie de prélèvement à l'expression des résultats.

Les résultats de mesure de concentrations peuvent être centralisés dans des bases de données. Plusieurs pays ont développé de telles bases, par exemple, la base IMIS, pour Integrated Management Information System, aux États-Unis (Lavoue *et al.*, 2012), la base MEGA, pour Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz, en Allemagne (Meffert & Stückrath, 1992), la base CWED, pour Canadian Workplace Exposure Database, au Canada (Hall *et al.*, 2011), etc. En France, deux bases de données d'exposition professionnelle coexistent : la base de données Colchic (COLlecte des données d'exposition CHImique des Caisses Régionales d'Assurance Maladie) et la base Scola (Système de COLlecte des informations des organismes accrédités) qui sont administrées par l'INRS. Ces deux bases ont des objectifs différents.

Colchic, regroupe l'ensemble des mesures d'exposition effectuées sur les lieux de travail par les huit laboratoires interrégionaux de chimie (LIC) des Carsat et de la Cramif ainsi que les laboratoires de l'INRS (Mater *et al.*, 2016; Vincent & Jeandel, 2001). Créée à l'initiative de la Caisse nationale de l'assurance maladie (Cnam), son exploitation a un

objectif de prévention en identifiant les situations de travail ou les secteurs d'activité à traiter en priorité. Les données de Colchic sont mises à disposition du public de la prévention par l'intermédiaire d'une interface, la base Solvex, accessible gratuitement sur le site de l'INRS (<https://www.inrs.fr/publications/bdd/solvex.html>). Elle est destinée à toute personne recherchant de l'information sur les niveaux d'exposition par situation de travail.

Scola, base réglementaire, centralise les mesures à des substances chimiques faisant l'objet d'une VLEP réglementaire effectuées par les organismes accrédités (Mater *et al.*, 2016). L'enregistrement de ces résultats est une obligation qui fait suite à la publication du décret 2009-1570 du 15 décembre 2009 relatif au contrôle des VLEP et du décret 2012-639 du 4 mai 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante en vue d'une analyse par microscopie électronique à transmission analytique (Journal officiel, 2009, 2012). L'INRS a été désigné par décret pour collecter et exploiter ces résultats à des fins de prévention.

1.2.2 L'évaluation du risque lié à l'utilisation des nanomatériaux

La production et l'utilisation des nanomatériaux ont introduit de nouveaux risques plus ou moins connus pour l'instant. Dans ce contexte, pour avoir démontré sa pertinence dans la mise en œuvre d'une stratégie de gestion des risques, l'approche de CB a également été utilisée pour évaluer le risque lié à la manipulation des nanomatériaux. Inspirés d'un premier modèle, plusieurs pays ont développé des démarches ou des outils (Maynard, 2007). Par exemple, aux États-Unis le CB Nanotool (David M Zalk *et al.*, 2009), en Suisse le Precautionary Matrix (Höck *et al.*, 2008), en France un rapport intitulé « Développement d'un outil de gestion graduée des risques spécifique au cas des nanomatériaux » (Claude Ostiguy *et al.*, 2010), en Allemagne le Stofenmanager Nano (Van Duuren-Stuurman *et al.*, 2012), au Danemark le NanoSafer (Jensen *et al.*, 2013), etc.

Les modèles d'attribution des bandes de danger des différents outils se reposent sur la même philosophie que Brooke *et al.*, 1998 en associant des bandes de danger à des scores. Selon les outils, certains critères propres aux nanomatériaux, tels que la taille, la densité, la solubilité, la bio persistance, la chimie de surface, sont intégrés ou non dans la proposition des bandes de danger (Brouwer, 2012).

1.2.3 L'évaluation du risque biologique

En termes de méthodes ou d'outils d'évaluation du risque, le risque biologique est beaucoup moins documenté que les autres risques. Toutefois, des démarches existent et sont utilisées. Par exemple, la démarche appliquée en hygiène industrielle, qui consiste à évaluer, contrôler et prévenir l'exposition, peut être appliquée à l'exposition aux bioaérosols (Nicole Goyer *et al.*, 2001). Des guides d'évaluation du risque biologique, lorsque l'agent biologique est utilisé de manière délibérée, se développent, par exemple, pour les laboratoires (ANSES's Committee for the Control of Biological Risks in Laboratories (CMRBL), 2012; Caskey *et al.*, 2009; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007; Touche, 2008) ou pour les établissements de soins (Advisory Committee on Dangerous Pathogens, 2005). Par ailleurs, des méthodologies s'appuyant

sur le principe de gestion graduée du risque sont recensées. Elles sont appliquées en milieu de travail pour par exemple, évaluer le niveau de risque des personnels de stations d'épuration (Forestier *et al.*, 2012), des techniciens de dialyse (Pichenot *et al.*, 2008) ou pour les emplois verts (Cheneval *et al.*, 2017). Quelques outils informatiques se reposant sur ce principe sont également répertoriés, tels que des logiciels d'EvRP intégrant le risque biologique ou encore un modèle pour le choix de la protection respiratoire contre les bioaérosols (Cheneval *et al.*, 2017). Dans ces démarches, le modèle d'attribution des bandes de danger se repose également sur la philosophie de Brooke *et al.*, 1998. La hiérarchisation des dangers se base sur la classification du risque infectieux des AB (Cheneval *et al.*, 2017; J. Lavoie *et al.*, 2013).

2. Les agents biologiques en milieu de travail

2.1. Les agents biologiques

Par AB on entend : (i) les micro-organismes, y compris les micro-organismes génétiquement modifiés (OGM), (ii) les cultures cellulaires, résultant de la croissance in vitro de cellules isolées d'organismes multicellulaires et (iii) les endoparasites humains susceptibles d'avoir des effets néfastes sur l'organisme (Journal officiel, 2000).

Les AB sont représentés par diverses formes de vie capables de se reproduire ou de transmettre du matériel génétique. Ils se répartissent en différentes catégories parmi lesquelles :

- les bactéries : micro-organismes d'une seule cellule en bâtonnet (bacille) ou ronde (coque) ;
- les champignons microscopiques : micro-organismes d'une cellule (levure) à plusieurs cellules (moisissures) qui se dispersent facilement et créent une dissémination étendue ;
- les parasites : micro-organismes vivant à l'intérieur et aux dépens d'un organisme d'une autre espèce ;
- les virus : entité ne pouvant se développer qu'à l'intérieur d'une cellule vivante (hommes, animaux, insectes, végétaux ou micro-organismes).

En insérant des gènes d'autres organismes dans leur génome, les micro-organismes sont modifiés et ils sont capables de produire de nouvelles molécules telles que l'insuline des protéines... Ces nouveaux micro-organismes sont des OGM.

Les AB sont diversifiés et possèdent leurs propres caractéristiques leur permettant de se développer, soit au sein de leur hôte (hommes, animaux, plantes) en se développant uniquement chez l'homme, chez l'homme et certaines espèces animales, uniquement chez les animaux ou dans certains milieux environnementaux (sols, eaux). En tant qu'êtres vivants, ils ont besoin de se nourrir et de conditions précises pour se reproduire. Ils peuvent tirer profit de matières organiques et/ou de matières inorganiques pour leur métabolisme et leur croissance, certains pouvant nécessiter la présence d'oxygène (micro-organismes aérobies) et d'autres plutôt son absence (micro-organismes anaérobies). Les AB sont des organismes ubiquitaires et ils ont colonisé toutes les niches écologiques de l'environnement même les plus extrêmes (Fröhlich-Nowoisky *et al.*, 2016).

Cependant, la plupart des champignons, bactéries et protozoaires se multiplient en présence d'eau et à température moyenne.

Si la plupart sont inoffensifs, certains sont essentiels à la vie (Dewhirst *et al.*, 2010; Grice & Segre, 2011), d'autres présentent des avantages pour l'homme et sont utilisés dans des secteurs d'activité, alimentation, biotechnologie (Foucaud-Scheunemann & Helinck, 2009). Cependant, d'autres peuvent engendrer des effets néfastes sur la santé (Burd, 2015; J. Douwes *et al.*, 2003; National Research Council, 2002; Shereen *et al.*, 2020; Walser *et al.*, 2015).

2.1 Les dangers et les risques des agents biologiques

Le risque biologique résulte de l'effet néfaste sur la santé de certains AB, de leurs composés ou de leurs métabolites. Parmi les bactéries, champignons, virus ou parasites, certains peuvent être à l'origine de maladies plus ou moins graves chez l'homme et présentent des risques lorsqu'une personne y est exposée.

Premièrement, le risque le plus connu est le risque d'infection. Il est lié à la pénétration et la multiplication de l'agent biologique dans l'organisme. Selon l'agent biologique, les principales conséquences sur la santé dépendent de (i) leur localisation : lésion cutanée (tuberculose (*Mycobacterium tuberculosis* (bacille de Koch) (Flynn *et al.*, 1993))), hépatites virales (Hazara, Hépatite B...) (Lee, 1997), (ii) leur gravité, telles que les infections respiratoires (Covid-19 (severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) (Shi *et al.*, 2020)), (iii) leur délai d'apparition : quelques heures, jours ou mois, par exemple dans le cas d'infections respiratoires aiguës telles que la légionellose (*Legionella*...) (Horwitz & Silverstein, 1980). Pour les agents biologiques qui présentent des risques infectieux, une classification existe. L'article R. 4421-3 du Code du travail reprend les dispositions en matière de classification de la directive 2000/54/CE relative à la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents biologiques au travail. Le classement propose quatre groupes de pathogénicité croissante de 1 à 4 et tient compte de la pathogénicité chez l'homme, du danger des travailleurs, des possibilités de propagation dans la collectivité et de l'existence d'une prophylaxie ou d'un traitement. L'arrêté du 18 juillet 1994 modifié fixe la liste des agents biologiques pathogènes (bactéries, champignons, virus et parasites) du groupe 2, 3 et 4. Il n'existe pas de liste réglementaire d'agents biologiques classés dans le groupe 1. Le fait que des agents ne figurent pas dans la liste des agents pathogènes ne signifie pas forcément qu'ils soient classés dans le groupe 1 des non pathogènes et ceci tant que l'évaluation n'est pas réalisée. Ce classement repose uniquement sur le risque infectieux sans prendre en compte les risques toxiques, immuno-allergiques ou cancérogènes (**Tableau 5**).

Tableau 5 : Classification des agents biologiques par groupe de danger pour le risque infectieux (Balty Isabelle & Bayeux-Dunglas Marie-Cécile, 2018).

GROUPE	PATHOGÉNICITÉ CHEZ L'HOMME	DANGER POUR LES TRAVAILLEURS	PROPAGATION DANS LA COLLECTIVITÉ	EXISTENCE D'UNE PROPHYLAXIE ET/OU D'UN TRAITEMENT EFFICACE	EXEMPLES DE MALADIES INFECTIEUSES
1	Non	–	–	NA	–
2	Oui	Oui	Peu probable	Oui	Coqueluche Grippe Légionellose
3	Oui	Oui	Possible	Oui	Tuberculose Hépatite B Brucellose
4	Oui	Oui	Risque élevé	Non	Variole Maladie à virus Ebola

Deuxièmement, des pathologies immuno-allergiques, liées à une réponse exacerbée du système immunitaire peuvent être induites par une exposition à des AB ou à leurs produits. Les allergènes les plus connus sont les substances chimiques impliquées dans des produits, par exemple, dans les cosmétiques, les produits ménagers, etc., ou sont des produits végétaux, comme la farine, le pollen... Cependant, les agents biologiques peuvent également induire des manifestations allergiques pouvant être des allergies cutanées, mais le plus souvent ce sont des allergies respiratoires induites par certaines moisissures ou bactéries actinomycètes, par exemple, l'apparition d'asthme suite à l'exposition au champignon *Aspergillus fumigatus* (Farrant *et al.*, 2016), de rhinites allergiques.... Dans la liste de l'arrêté du 18 juillet 1994 modifié, les agents biologiques concernés par les effets allergisants sont signalés par la lettre A. Ce sont majoritairement des champignons qui sont concernés par cette annotation.

Troisièmement, l'intoxication est un ensemble de troubles résultant de l'action sur l'organisme par une ou des toxines issues de certains agents biologiques, comme le (1,3)- β -D glucanes, les endotoxines et les mycotoxines. Les endotoxines, composants de la paroi des bactéries dites à Gram négatif, peuvent être libérées lors de la mort et de la lyse des bactéries ou rester présentes dans les cellules intactes. Leurs effets sont variés. En cas d'exposition massive, les conséquences peuvent être une fièvre passagère accompagnée de courbatures ressemblant à un début d'état grippal appelé syndrome toxique des poussières organiques (Organic dust toxic syndrome (ODTS)) (Smit *et al.*, 2005). En cas d'exposition répétée, des atteintes broncho-pulmonaires peuvent devenir chroniques, avec une évolution possible vers une insuffisance respiratoire. La coexposition aux (1,3)- β -D glucanes présents dans les parois cellulaires d'autres moisissures, et aux mycotoxines peuvent induire des effets inflammatoires (Fogelmark *et al.*, 1994). La liste des agents pathogènes du 18 juillet 1994, indique par la lettre T, les bactéries susceptibles de produire des toxines (Journal officiel, 1994a).

Finalement, suite à une infection, certains AB ou leurs produits peuvent induire des cancers. Cette maladie est le résultat de la multiplication désordonnée de cellules

humaines. Les parasites du genre *Schistosoma* par exemple, peuvent induire la bilharziose, communément appelée schistosomiase. Cette maladie parasitaire sévit dans les régions tropicales et subtropicales. L'infection chronique par ce parasite peut conduire au cancer de la vessie (Diao *et al.*, 2008). Les mycotoxines produites par certaines moisissures et sur certaines denrées (céréales, fruits secs oléagineux, épices, fruits séchés, pommes, grains de café), peuvent également engendrer, par ingestion, des atteintes hépatique, rénale ou neurologique, des désordres immunologiques, voire des cancers (Mehrzaad *et al.*, 2017)].

Aucun agent biologique ou produit ne figure dans la liste des agents cancérigènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction de l'Union européenne. Cependant, certains AB et toxines le sont par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC)(IARC, 2020). Pour exemple, le **Tableau 6** présente le classement et les principales propriétés toxiques de quelques mycotoxines (Nodet P, 2020).

Tableau 6 : Classement de quelques mycotoxines selon le CIRC et principales propriétés toxiques (Nodet P, 2020).

Mycotoxines	Classement du CIRC	Toxicité principale
Aflatoxines	1	- Cancérogènes - Hépatotoxiques - Immunotoxiques - Tératogènes
Fumonisine B1 Fumonisine B2	2B	- Immunotoxiques - Tératogènes et embryotoxiques - Cancérogène pour l'œsophage
Ochratoxine A		- Néphrotoxique - Immunotoxique et myélotoxique - Neurotoxique - Cancérogène pour le rein, les voies urinaires et la vessie
Citrine	3	- Néphrotoxique
Patuline		- Neurotoxique
Nivalénol et déoxynivalénol (trichotécènes)		- Immunotoxiques - Hématotoxiques - Tératogènes
Zéaralénone		- Œstrogénique

Bien que seul un sous-ensemble de tous les AB (appelés pathogènes) induise des maladies chez l'homme, les effets des agents biologiques sur la santé ont un impact majeur sur la santé publique et certains ont été identifiés comme des vecteurs potentiels de maladies en milieu professionnel (Eduard *et al.*, 2012).

3. Les expositions en milieu professionnel

3.1 Au sein des secteurs d'activité

Dans le monde, environ 320 000 travailleurs meurent chaque année de maladies infectieuses liées au travail, dont 5 000 dans l'Union européenne (UE) (Driscoll *et al.*, 2005). Selon la Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques (Dares), en France en 2017, plus de 4,8 millions de travailleurs, soit environ 25 % des salariés, se déclarent exposés à des agents biologiques dans le cadre de leurs activités. Le secteur de l'agriculture est le secteur qui comptabilise le plus de salariés exposés, près d'un salarié sur deux. Les employés les plus exposés sont ceux de la catégorie socio-professionnelle du commerce et des services, parmi lesquels on retrouve les salariés « aides-soignants » et « aides à domicile, aides ménagères, travailleuses familiales » (Matinet & Rosankis, 2019). L'augmentation du nombre de salariés se déclarant exposés aux agents biologiques entre 2003 et 2017 s'explique en partie par l'amélioration du repérage du risque biologique et par une meilleure sensibilisation des salariés au risque biologique.

Il existe deux circonstances de travail où les salariés peuvent être exposés à des AB. La première, lorsque l'agent biologique fait l'objet même du travail. On parle de situation d'utilisation délibérée d'agents biologiques. Outre son identité, d'autres informations sont connues, comme les quantités utilisées, les étapes du procédé... Ces situations concernent les laboratoires de recherche, les industries pharmaceutiques, les entreprises utilisant des micro-organismes, par exemple dans des fontaines de dégraissage, pour la dépollution des effluents de cabines de peinture, etc. La deuxième, lorsque les agents biologiques sont présents soit du fait de l'activité elle-même, par exemple dans les métiers de la santé, du traitement de l'eau ou des déchets, soit du fait des caractéristiques de l'activité favorables à leur survie et à leur croissance. Dans ce cas de figure, ce n'est pas un seul agent biologique qui intervient, mais un mélange de micro-organismes. Le milieu dans lequel s'accumule et prolifère ce mélange est appelé « réservoir ». Dans ces deux circonstances, les salariés peuvent être exposés à des agents biologiques dangereux pour leur santé, par voie respiratoire, digestive, cutanée, oculaire et transcutanée (Corrao *et al.*, 2012; Meima *et al.*, 2020).

Les AB peuvent présenter des risques professionnels dans de nombreux secteurs d'activité, par exemple, les travaux au contact d'humains ou de produits d'origine humaine (milieu de soins, laboratoires d'analyses médicales, services à la personne...), au contact d'animaux ou de leurs produits (élevage, vétérinaires, animalerie...), l'agriculture (agriculteurs, horticulteurs, forestiers...), le nettoyage, l'entretien et l'assainissement (éboueurs, centres de tri des déchets, plateformes de compostage, stations d'épuration...) (Meima *et al.*, 2020)... (**Annexe 1**)

Le compostage est une branche d'activité du secteur de la collecte et du traitement des déchets pour laquelle les travailleurs sont potentiellement exposés à des AB (Corrao *et al.*, 2012; Pearson *et al.*, 2015).

3.2 Au sein des plateformes de compostage

En France, en 2017, selon l'enquête de Surveillance médicale des expositions des salariés aux risques professionnels (SUMER), l'activité des plateformes de compostage, qui appartient au secteur de la production et de la distribution d'eau, de l'assainissement, de la gestion des déchets et de la dépollution, comptabilise 143 900 salariés dont 43,6 % se déclarent potentiellement exposés à un ou plusieurs AB (Matinet *et al.*, 2020). Le secteur du compostage est un secteur d'intérêt. Depuis le début des années 1990 et encore à ce jour, ce secteur fait l'objet de travaux et de nombreuses publications. Les effets sanitaires induits par les centres de compostage tant chez les riverains (Domingo & Nadal, 2009; Giusti, 2009) que chez les salariés (Anzivino-Viricel *et al.*, 2012; Basu, 2020; Jacques Lavoie, 1997; Persoons *et al.*, 2010; Schlosser *et al.*, 2009), les caractérisations des expositions (Fischer *et al.*, 2008; Persoons *et al.*, 2010; Schlosser *et al.*, 2009; Stagg *et al.*, 2010), les études épidémiologiques (Jeroen Douwes *et al.*, 2000; Hambach *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2011) et les campagnes de mesures au sein de plateformes de compostage sont des thèmes présents dans la littérature. Ce secteur est autant étudié car il présente des risques biologiques pour les travailleurs (ANSES, 2019; Insam & De Bertoldi, 2007; Mathur, 1998).

Le compostage est un traitement biologique des déchets entraînant une conversion des matières organiques en compost, produit stabilisé, riche en composés humiques et donc valorisable (Insam & De Bertoldi, 2007; Mathur, 1998). Le processus même du compostage repose sur l'action de nombreux AB qui dégradent la matière et en retirent l'énergie nécessaire à leur métabolisme. Plusieurs phases se succèdent dans le processus de compostage et le relevé de la température permet de suivre l'évolution du processus de conversion. La première phase est une dégradation aérobie intense qui conduit à la production de compost frais. Les AB aérobies oxydent la partie la plus facilement biodégradable en consommant de l'oxygène et en libérant notamment de la chaleur. Cette phase se déroule à des températures comprises entre 40 et 70 °C et peut durer de quelques semaines à plusieurs mois. La seconde phase est une dégradation moins soutenue qui permet de transformer le compost frais en compost mûr, riche en humus. Cette phase se déroule à des températures moins élevées que la première phase, soit entre 30 et 40°C. La température diminue progressivement, pour finalement se stabiliser à une température ambiante. Cette étape dure entre 1 et 3 mois.

Le processus de dégradation résulte de l'action d'AB à chacune des phases de transformation, impliquant diverses populations microbiennes qui se succèdent au cours de ce processus. Au départ du compostage, les déchets compostés peuvent contenir des agents pathogènes d'origine fécale, tels que *Salmonella spp.*, *Escherichia Coli*, *Clostridium perfringens*.... Durant la première phase, la population mésophile, présente au début du processus, est remplacée par une population thermophile qui favorise certains organismes, tels *Aspergillus fumigatus*, les *Legionella spp.* et les actinomycètes. Au cours de l'élévation de la température, des endotoxines peuvent être libérées par la lyse cellulaire des bactéries. Lors de la diminution de la température, les thermophiles

disparaissent progressivement au profit d'une population à nouveau mésophile. Le processus de compostage permet de passer d'une matière organique issue des déchets et des résidus à un compost stable, hygiénisé, pouvant être répandu sur le sol.

Des AB sont donc présents tout au long du processus, dans les matières à composter et au cours des phases de transformation du compost. En plus des populations microbiennes, d'autres composés issus de ces derniers, tels que les endotoxines ou les mycotoxines sont présents et peuvent affecter la santé des salariés. Ces derniers sont donc potentiellement exposés à ces AB soit par inhalation des bioaérosols, soit par contact cutané.

4. Enjeux des travaux de thèse

Selon un constat réalisé en 2007 par l'observatoire des risques, créé par l'Agence européenne pour la santé et la sécurité au travail (EU-OSHA), le risque biologique constitue l'un des risques émergents. En plus des principales préoccupations citées par les experts de l'observatoire, qui sont les risques liés aux pandémies et aux organismes pharmacorésistants, des situations nouvelles et complexes d'exposition naissent dans les industries (Brun, 2007). Cependant, le risque biologique reste encore peu connu des salariés et des établissements susceptibles d'y être exposés, mis à part les professionnels du secteur de la santé. S'appuyant sur des entretiens avec des préventeurs, il a été constaté que la prise en compte de ce risque, au sein des entreprises, était entravé par certains handicaps : un manque de visibilité du risque, un report de ce risque au profit d'autres plus prioritaires, comme les risques mécaniques, chimiques ou les Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) et un manque de connaissance chez les préventeurs (Le Bâcle, 2007). Ce manque de connaissance et d'information sur le risque biologique a également été constaté à l'issue de l'enquête réalisée par l'agence européenne relative aux risques émergents (Brun, 2007).

Afin de prévenir les risques liés à la manipulation d'AB, et ainsi répondre à son obligation réglementaire, l'employeur doit réaliser une évaluation du risque biologique, à l'instar des autres risques. Cependant, une méthodologie d'évaluation du risque biologique, telle que celles appliquées pour les agents chimiques (Arndt *et al.*, 2005; Balsat *et al.*, 2003; U. HSE, 2002; Marquart *et al.*, 2008; Russell *et al.*, 1998; Vincent *et al.*, 2005) ou les nanomatériaux (ANSES, 2010b; Hristozov *et al.*, 2016; Kuempel *et al.*, 2012; Liao *et al.*, 2008; Ricaud & Witschger, 2012) considérées comme des méthodes de référence au niveau international, n'existe pas. Certes, des démarches sont proposées dans la littérature (ANSES, 2010b; Bonnard, 2001; Forestier *et al.*, 2012; J. Lavoie *et al.*, 2013), mais à ce jour, aucune démarche standardisée n'intègre tous les critères à travers lesquels le risque biologique peut être pleinement évalué. L'employeur est démuni face à la réalisation d'une démarche d'évaluation.

C'est pourquoi, afin d'apporter une aide et d'accompagner l'employeur et les acteurs de la prévention, ces travaux vont s'efforcer de répondre à la question « Dans quelle mesure une méthodologie d'évaluation du risque biologique peut-elle être proposée ? ».

Partie 2

OBJECTIFS ET DÉMARCHE DES TRAVAUX DE THÈSE

PARTIE 2 : OBJECTIFS ET DÉMARCHE DES TRAVAUX DE THÈSE

En milieu professionnel, plusieurs types de risques coexistent, dont le risque biologique. Ce dernier est caractérisé par l'exposition des salariés à des AB. L'une des obligations de l'employeur est de prendre toutes les mesures nécessaires pour protéger la santé et la sécurité des travailleurs en adoptant les principes généraux de prévention. L'évaluation du risque est le préalable à toute démarche de prévention. Lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre une démarche d'évaluation du risque, l'employeur peut s'appuyer sur des méthodes, des outils ou des guides pour déployer son estimation du risque. Pour les risques liés à la manipulation de produits chimiques ou liés à l'utilisation des nanomatériaux, des moyens existent et sont considérés comme des méthodes de références. Cependant, le domaine de l'EvRB reste assez peu développé et il n'existe pas, à ce jour, une démarche standardisée qui intègre tous les critères à travers lesquels le risque biologique peut être évalué.

1. L'objectif général de ces travaux de thèse consiste à élaborer une démarche d'EvRB qualitative dans le domaine d'activité des plateformes de compostage. Elle proposera aux chefs d'entreprises ou aux gestionnaires de risque un dispositif permettant de réaliser l'évaluation du risque biologique, en complément des évaluations des autres risques, afin de répondre à leur obligation d'assurer la sécurité et la santé de leurs salariés.

2. Objectifs spécifiques

Afin de répondre à cet objectif général, ces travaux sont déclinés en deux axes spécifiques :

- le recensement et l'analyse critique des démarches existantes traitant de l'évaluation qualitative du risque biologique et la définition de la structure et des composants d'une méthodologie d'évaluation du risque biologique la plus complète possible. Cette étape permet de faire un état des lieux des démarches disponibles et de les analyser en fonction de critères, tels que les risques étudiés, le type d'évaluation, etc., afin de déterminer la composition d'une démarche standardisée ;
- la conception, l'application et la validation de cette méthodologie en s'appuyant sur la gestion graduée du risque, adaptée au secteur d'activité des plateformes de compostage. Le développement d'une méthodologie dite « standardisée » dans un secteur professionnel permet d'estimer sa faisabilité et sa justesse.

Pour répondre à ces objectifs spécifiques, quatre étapes ont été réalisées :

- une revue de la littérature des démarches qui traitent de l'EvRB de manière qualitative en milieu professionnel ;
- une identification des informations accessibles par l'utilisateur, en réalisant une enquête par questionnaire et des visites d'entreprises ;
- la constitution de la démarche d'EvRB en s'appuyant sur le recensement et l'analyse de l'existant et des paramètres d'intérêt identifiables et accessibles par l'utilisateur;

- une validation de la démarche en la mettant en œuvre sur le terrain et en comparant les résultats obtenus aux résultats d'autres méthodes et à une base de données.

Partie 3

REVUE ET ANALYSE DES DÉMARCHES D'ÉVALUATION QUALITATIVE DU RISQUE BIOLOGIQUE ET DESCRIPTION D'UNE MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

PARTIE 3 : REVUE ET ANALYSE DES DÉMARCHES D'ÉVALUATION QUALITATIVE DU RISQUE BIOLOGIQUE ET DESCRIPTION D'UNE MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Résumé (FR)

Les risques biologiques affectent potentiellement les travailleurs de plusieurs secteurs professionnels en raison de leur exposition à des agents pathogènes. Ces risques doivent être soigneusement évalués pour éviter des effets néfastes sur la santé. Cet article identifie et analyse de manière critique les approches qui gèrent l'évaluation qualitative du risque biologique dans le cadre de la prévention en santé et sécurité au travail, pour lesquelles il n'existe pas encore de méthode standard.

Des références bibliographiques et informatiques ont été recherchées pour identifier des approches EvBR qualitatives, qui ont ensuite été analysées en fonction de critères définis tels que les risques étudiés, le type d'évaluation, etc.

Les approches proposant les types d'évaluation les plus représentatifs ont été analysées. Les approches EvBR en milieu professionnel ont été identifiées dans 32 sources.

« L'analyse du poste de travail » combinée à « l'évaluation par niveau de risque » étaient les approches les plus courantes. Les descripteurs de risque (DR) prédominants ont été définis de manière caractérisée et quantifiable, et une variété de niveaux de danger et d'indices d'exposition a été créée. Dans l'ensemble, le risque a été déterminé en additionnant ou en multipliant les niveaux de danger et les niveaux d'exposition.

Les résultats ont confirmé qu'il n'existe, actuellement, aucun consensus méthodologique concernant l'EvBR et qu'aucune approche intégrant tous les paramètres pour permettre une évaluation complète du risque biologique n'a encore été décrite. Sur la base de l'analyse détaillée des données existantes, le présent document propose une approche générale.

Résumé (EN)

Biological risks potentially affect workers in multiple occupational sectors through their exposure to pathogenic agents. These risks must be carefully assessed to prevent adverse health effects. This article identifies and critically analyzes approaches that manage the qualitative evaluation of biological risk (EvBR) as part of occupational health and safety prevention, for which no standard method yet exists.

Bibliographic and computing references were searched to identify qualitative EvBR approaches, which were then analyzed based on defined criteria, such as the risks studied, the type of assessment, etc.

Approaches proposing the most representative types of assessment were analyzed. EvBR approaches in an occupational setting were identified in 32 sources. “Workstation analysis” combined with “assessment by risk level” were the most common approaches. The predominant risk descriptors (RDs) were defined in a characterized and quantifiable way, and a variety of hazard levels and exposure indices were created. Overall, the risk was determined by summing or multiplying hazard levels and exposure levels.

The results confirmed that there is currently no methodological consensus on the EVB and that no approach incorporating all parameters to allow for a complete assessment of biological risk has yet been described. On the basis of the detailed analysis of existing data, this document describes a general approach

Review - Workplace Biological Risk Assessment: Review of Existing and Description of a Comprehensive Approach

Sarah Burzoni ^{1*}, Philippe Duquenne ¹, Gautier Mater ¹ and Luc Ferrari ²

¹ French National Research and Safety Institute for the Prevention of Occupational Accidents and Diseases (INRS) – 1, rue du Morvan – CS 60027 – 54519 Vandœuvre–Les-Nancy, France; philippe.duquenne@inrs.fr (P.D.), gautier.mater@inrs.fr (G.M.)

² Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS - Université de Lorraine, 2 allée André Guinier - Campus Artem, 54011 Nancy Cedex, France; luc.ferrari@univ-lorraine.fr

* Correspondence: sarah.burzoni@inrs.fr

Received: 2 June 2020; Accepted: 29 June 2020; Published: 13 July 2020

Abstract

Biological risks potentially affect workers in multiple occupational sectors through their exposure to pathogenic agents. These risks must be carefully assessed to prevent adverse health effects. This article identifies and critically analyzes approaches that manage the qualitative evaluation of biological risk (EvBR) as part of occupational health and safety prevention, for which no standard method yet exists. Bibliographic and computing references were searched to identify qualitative EvBR approaches, which were then analyzed based on defined criteria, such as the risks studied and the type of assessment. Approaches proposing the most representative types of assessment were analyzed. EvBR approaches in an occupational setting were identified in 32 sources. “Workstation analysis” combined with “assessment by risk level” were the most common approaches. The predominant risk descriptors (RDs) were defined in a characterized and quantifiable way, and a variety of hazard levels and exposure indices were created. Overall, the risk was determined by summing or multiplying the hazard level and exposure indicators. The results confirmed that no methodological consensus currently exists regarding the EvBR and no approach has yet been described that integrates all the parameters to allow for a full assessment of biological risk. Based on the detailed analysis of the existing data, the present paper proposes a general approach.

Keywords: assessment; qualitative; biological risk; occupational exposure; risk descriptors; analysis by risk level

1. Introduction

Biological agents are defined by the European directive “2000/54/EC—biological agents at work” as micro-organisms (including genetically modified ones), cell cultures, and human endoparasites (Journal officiel, 2000). Micro-organisms are ubiquitous in the environment and have colonized all ecological niches (Eldor, 2015; Fröhlich-Nowoisky *et al.*, 2016; Gibbons & Gilbert, 2015; Li *et al.*, 2012; Snelling *et al.*, 2016). In particular, biological agents occur in many working sectors where two types of situations can be

found: (i) the deliberate use of biological agents for which the agents are known as they are involved in the work, for example, in industrial processes, such as food production, or research microbiology and biotechnology laboratories; and (ii) the unintentional presence of biological agents for which the presence of micro-organisms is linked to or a consequence of the activity itself, such as for healthcare professions, or is due to the characteristics of the activity, which allows for the survival or growth of microbial communities, for example, in the cotton industry or effluent treatment plants.

Thus, occupational exposure to bacteria, fungi, and viruses, as well as to the associated microbial compounds (endotoxins, allergenic proteins, etc.) and toxins (e.g., mycotoxins) has been demonstrated in numerous working situations (Dutkiewicz *et al.*, 2011). Routes of exposure include the inhalation of airborne microbial entities (i.e., bioaerosols), contact with the mucous membrane and skin, stings and cuts, and wounds. Such exposures were found for occupations involving contact with the public or products of human origin, agriculture, agrifood business, the pharmaceutical industry, the mechanical industry waste treatment and elimination, healthcare, and maintenance (C. Herr *et al.*, 1999; Radon & Nowak, 2003; Rim & Lim, 2014; Yilmaz *et al.*, 2013).

The vast majority of micro-organisms are harmless or even essential for life (Cho & Blaser, 2012), where some present advantages for humans, for example, in the production of food products or biotechnology (Hazelwood *et al.*, 2008). However, others can have a detrimental effect on workers' health (J. Douwes *et al.*, 2003; Eduard *et al.*, 2012; Gehin *et al.*, 2009; Srikanth *et al.*, 2008; Walser *et al.*, 2015). Thus, occupational exposure to micro-organisms has been associated with four types of health disorders. First, the infection may occur following penetration of the body's defenses by the biological agent and its subsequent multiplication. Examples of infection are Covid-19 (severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) (Shereen *et al.*, 2020)), viral hepatitis (Hazara (Surtees *et al.*, 2015), hepatitis A, etc.), tuberculosis (*Mycobacterium tuberculosis* (Koch's bacillus)), and legionnaire's disease (e.g., *Legionella*) (Engelbrecht *et al.*, 2015). Second, immuno-allergic diseases, where the immune system mounts an extreme and inappropriate response (e.g., asthma (*Aspergillus fumigatus* (Cramer, 1998)), allergic rhinitis, etc.). Third, diseases linked to microbial components or toxins produced by some biological agents, such as molds and bacteria (e.g., sewer worker's syndrome and toxic shock syndrome (Duquenne *et al.*, 2014; Liebers *et al.*, 2008)). Finally, biological agents can induce occupational cancers. This disease, which manifests itself after infection, is the result of uncontrolled human cell multiplication (e.g., secondary liver cancer due to viral hepatitis (hepatitis B and C)) (Perz *et al.*, 2006). Beyond the four main risk families, exposure to bioaerosols or microbial compounds, such as (1,3)- β -D glucans, endotoxins, and mycotoxins, can also cause irritant effects, such as mucous membrane irritation syndrome (MMIS) (Fung & Hughson, 2003; C. E. W. Herr *et al.*, 2003; Sykes *et al.*, 2007).

Every year, 320,000 occupational deaths worldwide are estimated to be linked to transmissible diseases, where 5000 of these occur in the European Union (Driscoll *et al.*, 2005). According to the French research, development, studies, and statistics directorate (Dares), more than 4.8 million (22%) workers declare that they are exposed to biological agents as part of their occupational activities. In French public hospitals, the proportion increases to 76% of workers but is lower in other sectors: 37% in the agricultural sector and 35% in local government services (LGS). The highest exposure levels are estimated

to be in the healthcare, social activities, home care, hotel-restoration-food, care of green areas, or waste and pollution treatment sectors (Cavet *et al.*, 2013).

In the context of occupational risks, one of an employer's regulatory obligations is that they must take all the necessary measures to protect the health and safety of workers by enacting the general principles of prevention (Directive 89/391/EC) (Journal officiel, 1989). Risk is the probability that a person will suffer harm or adverse health effects when exposed to danger, i.e., a potential source of harm. In the workplace, several types of risk coexist, such as chemical, physical, psychological, and biological risks. Biological risks correspond to the exposure of workers to micro-organisms or their components, such as bacteria, viruses, microscopic fungi, and endoparasites. Risk assessment is one of the fundamental provisions of the regulatory prevention principles. For activities that may induce a risk of exposure to biological agents, minimum requirements are mandatory when performing this assessment (Directive 2000/54/EC) (Journal officiel, 2000). In France, these provisions are transposed respectively to Articles L. 4121-1 and R. 4121-1 and, R. 4421-1 to R. 4427-5 of the French Labour Code.

Two steps are used to assess the risk: qualitative and quantitative risk assessment. The qualitative risk assessment is based on the analysis of the work carried out and the operating conditions. Therefore, it requires identifying the tasks performed by the employees. Overall, it involves estimating the risk associated with a task by considering the independent variables associated with the risk level, named "risk descriptors" (RDs), for example, the danger, the duration and frequency of exposure, the physicochemical properties, the conditions of implementation (the type of process, temperature, etc.), and the means of prevention. These risk descriptors can be used in an evaluation approach called "evaluation by level of risk" or "control banding"; this consists of a rating system assigned to the danger descriptors and exposure descriptors, which are classified progressively by bands or by level to determine a level of risk according to the scores obtained following their multiplication or their summation. The result obtained then makes it possible to characterize the risk inherent in the work task. This approach is carried out upstream of a quantitative approach and makes it possible to prioritize risks according to their priority actions and to develop an action plan based on the results. The quantitative risk assessment is complementary and secondary to the qualitative evaluation and makes it possible to determine, in numerical terms, the level of exposure via measurements. Methods that can be used for the measurement of microbial concentration are numerous (Duquenne *et al.*, 2012; Reponen, 2011) and the quantitative exposure of workers to micro-organisms, their compounds, and their metabolites has been extensively documented during the last decade, especially for bioaerosols (Corrao *et al.*, 2012; Duquenne *et al.*, 2012; Oppliger & Duquenne, 2016; Robertson *et al.*, 2019; Schlosser *et al.*, 2018). The relationship between the exposure levels and the response in terms of health effects has been investigated for most microbial groups and specific compounds of microbiological origin (allergens and toxins) that are involved in immunological and toxicological risks. Thus, for some microbial enzymes, such as fungal alpha amylase, the exposure-response relationships are known from multiple studies (in humans and animals), and health-based exposure limits have been proposed (Health Council of the Netherlands, 2014; Nielsen *et al.*, 2012). Similar proposals were also made for airborne endotoxins (Health Council of the Netherlands, 2010b), and the effects of food-borne aflatoxins on aflatoxicosis and liver cancer are also well documented (IARC, 2018). However, recent reviews of epidemiological (Walser *et al.*, 2015) and animal

studies (Zamfir *et al.*, 2019) concluded that the published data are not sufficient for establishing health-based exposure limits values for most of the components of microbial bioaerosols. Therefore, there is no occupational exposure limit (OEL) value for airborne biological agents and the interpretation of non-infectious bioaerosol exposure data in terms of biological risks is still uncertain. For biological agents involved in infectious risk, the quantitative risk assessment is also difficult due to the lack of a minimal infectious dose value or exposure–response relationships for most agents. Furthermore, many agents are responsible (*Legionella pneumophila*, influenza virus, etc.) for outbreaks, and epidemiological studies with accurate exposure assessment strategies that can distinguish inter-human transmission from other sources are missing.

Although the quantitative evaluation has many benefits but also limitations, qualitative risk assessment, also known as initial risk assessment, is nevertheless a prerequisite for any prevention approach. However, the evaluation of biological risk (EvBR) presents inherent difficulties, such as the complexity of taking an inventory of the biological agents that are potentially present in the workplace, knowledge of the pathogenicity of these agents, and establishing their dose–effect relationships (Bonnard, 2001; Eduard *et al.*, 2012). Furthermore, the lack of visibility, the delay in analysis of this type of risk due to priority given to other risks, and occupational health and safety officers' lack of knowledge are major obstacles to the consideration of risks (Le Bâcle, 2007). However, the importance of treating the biological risk, in its entirety and in cooperation with health and safety professionals, was stated following a survey performed by the European Occupational Safety and Health Administration (Brun, 2007). The results of this survey underlined the limited knowledge and information available on biological risks due to the difficulty in assessing them. In the healthcare sector, such as in research and analysis laboratories, the pharmaceutical industry, and care institutions, biological risks are known to exist and are taken into account (Coelho & García Díez, 2015; Corrao *et al.*, 2012). Nevertheless, in other fields of activity, these risks remain poorly understood by the majority of workers that are likely to be exposed and by their employers.

Harmonized risk assessment approaches have been developed for chemical risks (Arndt *et al.*, 2005; Balsat *et al.*, 2003; HSE, 2003; Marquart *et al.*, 2008; Russell *et al.*, 1998; Vincent *et al.*, 2005) and risks related to nanomaterials (Hristozov *et al.*, 2016; Kuempel *et al.*, 2012; Liao *et al.*, 2008; Claude Ostiguy *et al.*, 2010; Ricaud & Witschger, 2012), where these are considered reference methods at the international level. For biological risk, assessment approaches have been proposed, but to date, no standard methodology has been adopted. Thus, to define the structure and components of a qualitative assessment methodology for biological risk, this work is broken down into two objectives:

- to describe existing approaches by carrying out an inventory and a critical analysis of existing and published qualitative biological risk assessment procedures in the workplace (this review does not consider implementing or testing the identified approaches).
- moreover, at the end of this analysis, a structure of the most appropriate approach is proposed and appropriate criteria that constitute a qualitative EvRB approach that is as exhaustive as possible are identified.

2. Materials and Methods

2.1 Fields of Investigation and Research Criteria

The overall approach undertaken to carry out an inventory of existing biological risk assessment approaches consisted of identifying and retrieving sources of information on this topic. The sources utilized were:

- bibliographic references, including:
 - scientific articles listed on the PubMed portal (whose last research update was carried out in March 2020; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) based on the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses guidelines (PRISMA) (Moher *et al.*, 2009). The terms used in combination were “agents,” “assessment,” “airborne,” “bioaerosol,” “biological,” “biologic*,” “exposure,” “hazard,” “methodology,” “occupational,” “pathogens,” “professional,” and “risk,” alongside the “AND” operator. The asterisk (*) is a truncation. It allows replacing a letter or a set of letters in a word. The use of this truncation for “biologic*” allows to be sufficiently exhaustive to write the search request. These terms were searched for in the title and abstract. The research considered articles in English and French without a specific period. The summary of the research process is presented in **Annexe 2** (Boehm *et al.*, 2018);
 - grey literature: books chapters and publications generally longer than scientific articles that were published by public or private institutions in the field of occupational risk prevention, and multimedia sources, such as websites. Searches were done using Google and Google Scholar search engines. The terms used in these searches were those used for scientific articles.
- moreover, to provide a more complete bibliography, the searches were extended to computing references. These corresponded to software tools in the field of the EvBR, with an interface allowing for the conversion and treatment of digital information. These applications were integrated into the study to identify the risk descriptors that they can use rather than to understand the algorithm used. The searches were carried out:
 - Through a security software provider and by contacting industrial users ;
 - By contacting industrialists encountered during training ;
 - On Google and Google Scholar search engines.

To be retained in our analyses, the sources had to meet the following criteria:

- a qualitative approach to biological risk assessment;
- an assessment of the situations leading to exposure during the use or handling of micro-organisms and/or a description of conditions when they are unintentionally present in the workplace;
- an assessment of the occupational health risks for workers.

No restrictions were set on the activity sector, the biological agents, or the type of risk or hazard identified. However, sources relating to the assessment of sanitary risks affecting human and animal health, as well as those linked to bioterrorism and biological safety,

were excluded as they were considered beyond the scope of this article. These sources involved considering analysis or the development of parameters that cannot be extrapolated or that are out of the scope of application of a straightforward occupational risk-assessment approach. In detail:

- sanitary risk refers to a risk to public health, which may be immediate or long-term and of variable likelihood. The identification and analysis of the risks linked to a phenomenon (flooding, contamination, etc.) generally make it possible to predict the impact of a sanitary risk on public health (Setbon. M., 2000);
- assessments linked to studies of bioterrorism and examining the intentional or potential use of micro-organisms (anthrax, smallpox, etc.) for terrorist means to cause disease or death in humans, animals, or plants (Rotz *et al.*, 2002);
- assessments linked to biological safety through defining all the means and practices that aim to protect and prevent risks of loss, stealing, hijacking, or inappropriate use of strains of highly pathogenic micro-organisms or toxins that present a danger to humans (Chyba, 2002).

2.2 Analysis of Sources

Beyond the analysis of the existing approaches, this work made it possible to take stock of the available methods, their characteristics, their mode of operation, and the conditions of their implementation. Biological risk assessment approaches exist and the purpose of this work was to establish what they offered in terms of performing a risk assessment study in a workplace and to analyze the criteria they consider during that assessment. The analysis and characterization of the sources describing the EvBR were performed with the help of a list of criteria. This list was created following an analysis of nationally promoted methods to assess chemical risk (Triolet & Héry, 2009). The main criteria are listed in **Annexe 3**.

Sources describing a similar type of frequently used EvBR were more extensively analyzed by studying:

- the stages proposed in the various approaches;
- the risk descriptors, systems by which these variables were attributed, and their treatment modes.

3. Results

3.1 Collection and Description of the Sources of Information Gathered

In the scientific literature, 1141 national and international publications were retrieved through the PubMed portal using the keywords mentioned above. After excluding articles beyond the scope of this study, 76 publications were retained for further analysis. Following our analysis, three of these references were retained (**Annexe 2**). Searches on Google and Google Scholar with the same keywords identified 22 references in the grey literature. Of the five manufacturers that were identified by the safety and security software provider, two were inclined to be contacted to discuss the use and deployment of this program within their institution. Based on this, three computer tools were selected following the exchanges with the industrialists met during training. The computer tools used by manufacturers are proprietary software, where it was only possible to use this software on the condition that the identity of those producing and using them remained anonymous. Regarding these tools, two computer applications were identified by performing searches using Google and Google Scholar search engines. **Figure 3** shows the source selection process.

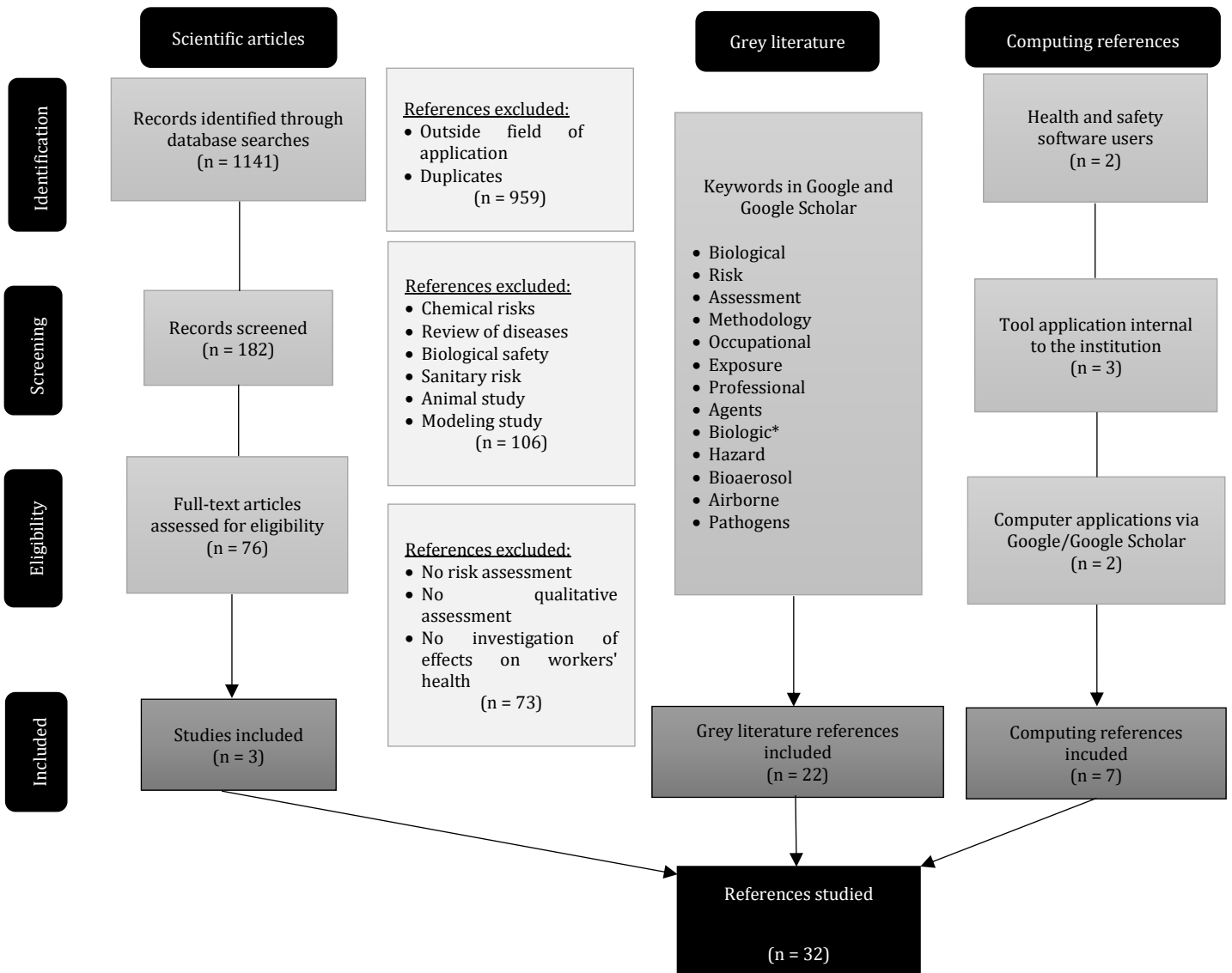


Figure 3: The process used to select the sources used for proposing a qualitative approach to assess biological risks in an occupational setting.

As a result, 32 references of interest to this study published since 2001 were identified. No relevant documents were published before 2001. Their names and authors are grouped in **Table 7**, their characteristics are listed in **Table 8**, and the results are presented in **Figure 4**.

Table 7 : List of sources for the qualitative assessment of biological risk in the workplace.

N°	Authors and Year of Publication	Title or Name of Source
		Bibliographical References
1	Forestier D., Lecornet E., Mosqueron L., and Lambolez, L. (2012) (Forestier <i>et al.</i> , 2012)	Exposure to bioaerosols for wastewater treatment plant workers: Prioritization of the areas and tasks involving the greatest exposure, and prevention
2	Pichenot O., Barbe A., Thiriet S., Benhassine R., Dion J.J., and Reveil J.C. (2008) (Pichenot <i>et al.</i> , 2008)	Assessment of the professional biological risks of dialysis technicians
3	Nuebling M. and Hofmann F. (2001) (Nuebling & Hofmann, 2001)	Task profile and risk of occupational hepatitis. A infection in sewerage workers
4	Touche, S. (2008) (Touche, 2008)	Évaluation et prévention des risques biologiques en laboratoires d'analyses médicales. Présentation d'un guide méthodologique
5	Académie de Grenoble (2010) (Académie de Grenoble, 2010)	Prévention des risques biologiques - Risques biologiques au laboratoire de génie biologique
6	ANSES's Committee for the Control of Biological Risks in Laboratories (CMRBL) (2012) (CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012)	Methodological guide to the assessment of biological safety and security risks
7	Bonnard R. (2001) (Bonnard, 2001)	Le risque biologique et la méthode d'évaluation du risque
8	Réseau Ressources Risque Biologique (3RB)- Éducation nationale /INRS (2016) (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016)	Évaluation des risques : éléments de méthodes
9	Goyer N., Lavoie J., Lazure L., Marchand G., Allard R., and Bhérer L. (2001) (N Goyer <i>et al.</i> , 2001)	Bioaerosols in the workplace: evaluation, control and prevention guide
10	Lavoie, J., Neesham-Grenon E., Debia M., Cloutier, Y., and Marchand, G. (2013) (J. Lavoie <i>et al.</i> , 2013)	Development of a control banding method for selecting respiratory protection against bioaerosols
11	Cheneval E., Busque, M.-A., Ostiguy C., Lavoie J., Bourbonnais, R., Labrèche F., and Zayed J. (2017) (Cheneval <i>et al.</i> , 2017)	Green Jobs in Quebec: Definition and Assessment of Potential Chemical and Biological Risks to Workers' Health
12	U.S. Department of Health and Human Services (2009) (U.S. Department of Health and Human Services <i>et al.</i> , 2009)	Biosafety in Microbiological and biomedical laboratories (5th Edition)
13	Advisory Committee on Dangerous Pathogens (HSE) (2003) (Advisory Committee on Dangerous Pathogens, 2003)	Infection at work: Controlling the risks—A guide for employers and the self-employed on identifying, assessing and controlling the risks of infections in the workplace
14	Advisory Committee on Dangerous Pathogens (HSE) (2005) (Advisory Committee on Dangerous Pathogens, 2005)	Biological agents: Managing the risks in laboratories and healthcare premises
15	Health & Safety Service (HSE) (2015) (Health & Safety Service, 2015)	Bio COSHH (Bio Control of Substances Hazardous to Health) Risk Assessment
16	Belgian Biosafety Server (2016) (Belgian Biosafety Server, 2016)	Biological Risk Assessment Sheets
17	Health Canada (2004) (Health Canada, 2004)	The Laboratory Biosafety Guidelines (3rd edition)

N°	Authors and Year of Publication	Title or Name of Source
18	Government of Alberta (2011) (Government of Alberta, 2011)	Best Practices for the Assessment and Control of Biological Hazards—Best Practices Guidelines for Occupational Health and Safety in the Healthcare Industry
19	Health Service Executive (HSE Ireland) (2011) (HSE, 2011)	Guidance for Developing a Biological Agents Risk Assessment for the Healthcare Sector
20	Société française d'hygiène hospitalière (2007) (Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007)	Prévention des risques infectieux dans les laboratoires d'analyse de biologie médicale
21	Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (2017) (CNRS, 2017)	Risques biologiques—Les cahiers de prévention (4e édition)
22	European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA) (2010) (EU-OSHA, 2010)	Risk assessment for biological agents (E-facts 53)
23	Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) (2014) (INRS, 2014b)	Les risques biologiques en milieu professionnel
24	Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) (2009) (INRS, 2009)	Laboratoires d'analyses médicales—Évaluation et prévention des risques infectieux
25	World Health Organization (2004) (WHO, 2004)	Laboratory Biosafety Manual—Third Edition
Computing References		
26	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en Sécurité du Travail (IRSST) (2015) (IRSST, 2015)	A support tool for choosing respiratory protection against bioaerosols
27	Caskey S., Gaudio J., and Salerno R., (2009) (Caskey <i>et al.</i> , 2009)	Biosafety Risk Assessment Methodology
28	User in the soil remediation sector	Proprietary software to assess biological risk
29	User in the biotechnology research and development sector	Proprietary software to assess biological risk
30	User in the research laboratory sector	Proprietary software to assess biological risk
31	User in the medical biology laboratory sector	Proprietary software to assess biological risk
32	User in the food product manufacturing sector	Proprietary software to assess biological risk

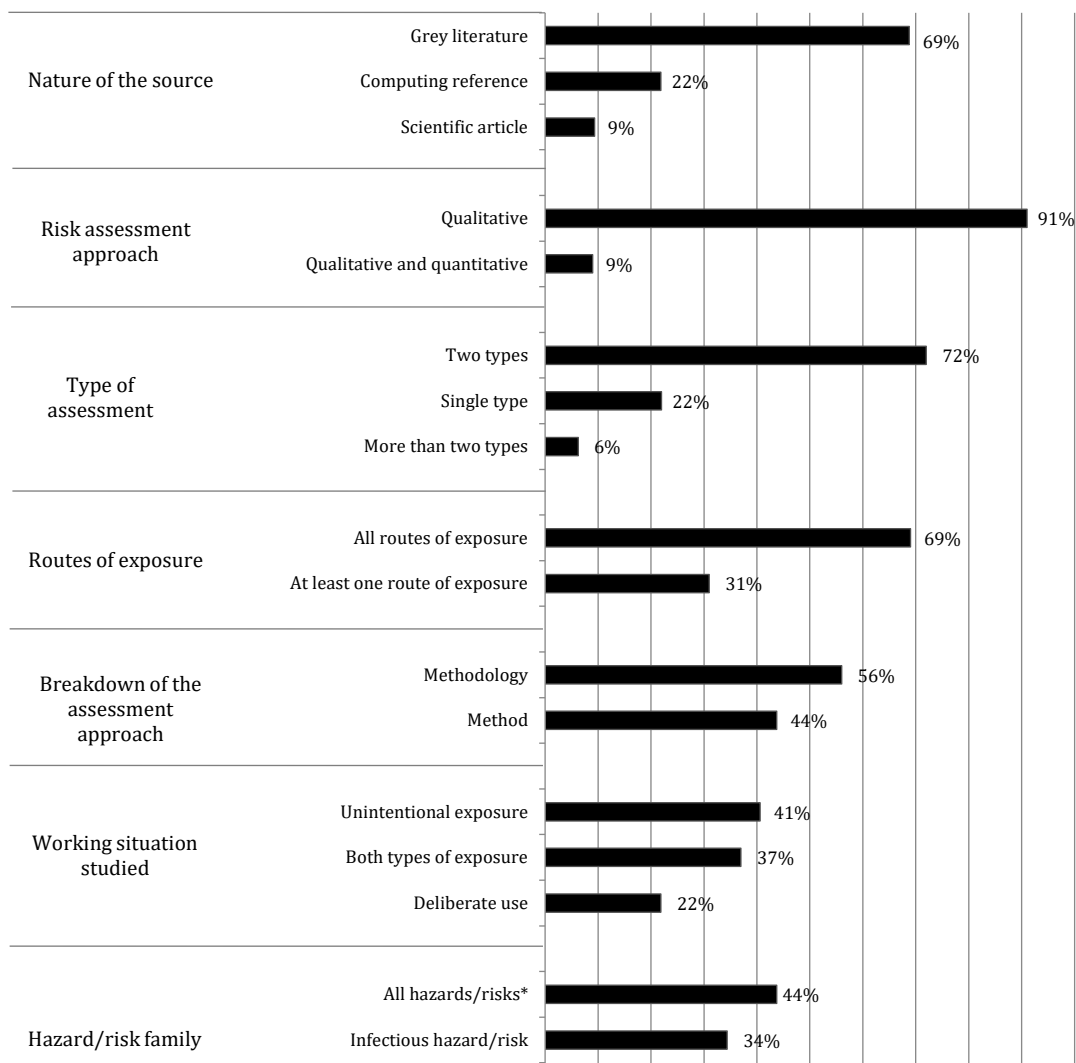
Table 8: Relationship of sources and qualitative assessment of biological risks in occupational settings.

Reference No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32																									
Nature of Source	Scientific Article																																																								
	X	X	X																																																						
	Grey Literature			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																															
	Computing Reference																																																								
	Method			X				X				X				X	X	X				X	X	X	X	X																															
Breakdown of Approach	Methodology			X	X	X				X	X				X				X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																						
	Qualitative Approach			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																							
	Quantitative Approach			X				X				X																																													
Type	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1																								
	T4	T4	T4	T3	T4	T2	T1	T4	T1	T4	T4	T1	T1	T3	T4	T1	T3	T3	T4	T3	T3	T1	T1	T3	T3	T4	T4	T4	T4	T4	T4	T4	T4																								
Occupational Situations Studied	Deliberate Use					X	X	X	X	X				X	X	X	X				X	X	X				X				X	X	X	X																							
	Unintentional Presence					X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																						
	Includes an Inventory of Biological Agents					X				X				X	X	X	X				X				X	X				X																											
	Related to a Single Activity Sector					X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																							
	Covers Several/All Activity Sectors								X	X	X	X				X				X	X				X																																
Includes	Analysis of Tasks/Operations			X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																								
	Ranking of Risks			X	X	X				X	X				X				X	X				X	X				X	X	X	X	X	X	X																						
	Development of a Plan of Action/Prevention			X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																							
Hazards/Risks	Infectious			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																							
	Immuno-allergic			X				X	X	X	X				X				X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																						
	Toxic			X				X	X	X	X	X				X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																						

PARTIE 3 : REVUE ET ANALYSE DES DÉMARCHES D'ÉVALUATION QUALITATIVE DU RISQUE BIOLOGIQUE ET DESCRIPTION D'UNE MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

	Carcinogenic	X		X			X	X	X	X											X	X	X			X	X	X		X	X
Considers Exposure by	Inhalation	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Skin Contact	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Digestive	X	X		X	X		X	X			X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Eye Contact	X	X		X	X	X	X	X			X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Inoculation				X	X	X	X	X				X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Integrates the Implementation of																															
	Means to Control Risks in General		X			X		X	X			X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X
Integrates the Availability of																															
	Collective Protective Equipment		X		X	X				X	X	X		X		X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Integrates the Availability of																															
	Personal Protective Equipment		X		X	X				X		X		X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X

T1—Workstation analysis.
T2—Systemic approach.
T3—Conformity analysis.
T4—Assessment by risk level (control banding)



*: All hazards/risks included infectious, immune-allergic, toxic, and carcinogenic hazards/risks.

Figure 4: Characteristics of the sources proposing a qualitative EvBR (number of sources taken into consideration n = 32).

Approaches used for an EvBR were mainly found in the grey literature (69%) (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; Académie de Grenoble, 2010; Advisory Committee on Dangerous Pathogens, 2003, 2005; Belgian Biosafety Server, 2016; Bonnard, 2001; Cheneval *et al.*, 2017; CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; CNRS, 2017; EU-OSHA, 2010; Government of Alberta, 2011; N Goyer *et al.*, 2001; Health & Safety Service, 2015; Health Canada, 2004; HSE, 2011; INRS, 2009, 2014b; J. Lavoie *et al.*, 2013; Société Française de Microbiologie, 2014; Touche, 2008; U.S. Department of Health and Human Services *et al.*, 2009; WHO, 2004). Half of these descriptions presented the elements to be considered when assessing the biological risk. The other half included directly useable elements, such as data collection tables or practical factsheets to facilitate the collection of the information required to assess the risk (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; Advisory Committee on

Dangerous Pathogens, 2003; CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; CNRS, 2017; EU-OSHA, 2010; Government of Alberta, 2011; Health & Safety Service, 2015; HSE, 2011; INRS, 2009). The computing references mainly corresponded to software that helps with assessing biological risks, which are used in companies (Sandia National Laboratories, 2010). Among all approaches identified, only 9% proposed a combination of qualitative and quantitative assessments. In contrast, 72% associated a main type of evaluation with a complementary secondary method. A total of 56% of the sources proposed a combination of “workstation analysis” and “assessment by risk level,” while 69% considered all routes of exposure, where the respiratory route was common to all the approaches (Figure 2).

The proportions of approaches presented as a method (44%) (Advisory Committee on Dangerous Pathogens, 2003, 2005; Belgian Biosafety Server, 2016; Bonnard, 2001; CNRS, 2017; EU-OSHA, 2010; Government of Alberta, 2011; N Goyer *et al.*, 2001; Health Canada, 2004; INRS, 2009, 2014b; Touche, 2008; U.S. Department of Health and Human Services *et al.*, 2009; WHO, 2004) or a methodology (56%) (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; Académie de Grenoble, 2010; Cheneval *et al.*, 2017; CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; Forestier *et al.*, 2012; Health & Safety Service, 2015; HSE, 2011; J. Lavoie *et al.*, 2013; Nuebling & Hofmann, 2001; Pichenot *et al.*, 2008; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007) were similar.

3.1.1 Methods

A method is a general approach. It is defined as the proposal of orderly and logical steps that allow for the collection of the information necessary for the evaluation and to integrate (or not integrate) risk descriptors contributing to the estimation of the risk.

References from the grey literature only presented methods. These methods were either based on a single type of “workstation analysis” or a combination of a “workstation analysis” with a “conformity analysis.” Apart from these two methods (Bonnard, 2001; N Goyer *et al.*, 2001), which combine qualitative and quantitative assessments, all the other sources used a qualitative approach for assessing biological risk. For example, some of these approaches were proposed by health and safety institutes, such as Health Canada (Health Canada, 2004), a Belgian public health institute: Belgian Biosafety Server (Belgian Biosafety Server, 2016), the Department of Health and Human Services in the United States (U.S. Department of Health and Human Services *et al.*, 2009), the Advisory Committee on Dangerous Pathogens of the Health & Safety Executive (ACDP - HSE) (Advisory Committee on Dangerous Pathogens, 2003), the European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA) (EU-OSHA, 2010), the French National Institute for the Industrial Environment and Risks (INERIS) (Bonnard, 2001), the French National Centre for Scientific Research (CNRS) (CNRS, 2017), the French Research and Safety Institute for the Prevention of Occupational Accidents and Diseases (INRS) (INRS, 2009, 2014b), and the Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) (N Goyer *et al.*, 2001).

These generalist approaches present the guidelines that are to be implemented to enhance biosafety at work. They describe the nature of the pathogenic agents, their hazards and risks, and present the elements that must be considered when performing

risk assessment, such as identification of the hazards, characterization of the activity, and the definition of the operating conditions. Other sources are specific to particular activities, e.g., biological laboratories (Health Canada, 2004; INRS, 2009; Touche, 2008) or healthcare institutions (Advisory Committee on Dangerous Pathogens, 2005; Government of Alberta, 2011), where a biological risk is known to exist.

3.1.2 Methodologies

A methodology is a variation of a method but is more precise. It integrates distinct steps, risk descriptors, and methods of processing risk descriptors.

Qualitative methodologies for EvBRs were found in scientific articles, the grey literature, and in the form of computing references. In the large majority of cases, these methods combined “workstation analysis” as the main method with “analysis by risk level” as a secondary method (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; Académie de Grenoble, 2010; Cheneval *et al.*, 2017; CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; Forestier *et al.*, 2012; Health & Safety Service, 2015; HSE, 2011; J. Lavoie *et al.*, 2013; Nuebling & Hofmann, 2001; Pichenot *et al.*, 2008; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007). Two other sources included a third type of analysis, which were classed as “systemic analysis” when it related to failure-mode, effects, and criticality analysis (FMECA) (CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012) or an “analysis of conformity” (Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007). The methodologies described were mainly qualitative approaches. A single source combined qualitative and quantitative assessments (Forestier *et al.*, 2012). Methodologies were mainly proposed by institutional health and safety organizations, such as the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES) (CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012), the Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) (Cheneval *et al.*, 2017; J. Lavoie *et al.*, 2013), the Health Service Executive of Ireland (HSE) (HSE, 2011), and the French Society for Hospital Hygiene (SF2H) (Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007). The other methodologies corresponded to feedback following the implementation of an EvBR approach in companies and presenting a description of the actions performed in an industrial setting, for example, within a multinational firm collecting and treating wastewater (Forestier *et al.*, 2012) or in a hospital department (Pichenot *et al.*, 2008).

The approaches presented in the computing references were considered as methodologies since they presented concepts combining stages, RDs, and means of treatment, which were converted to be compatible with a computerized system (**Figure 5**).

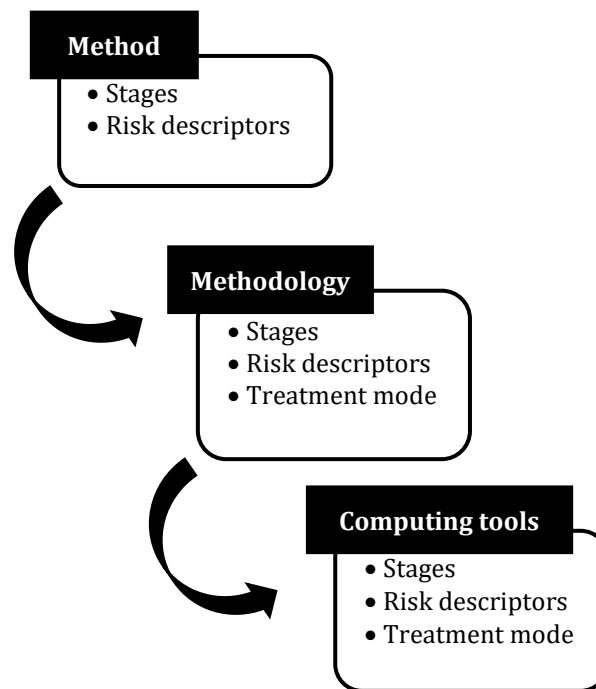


Figure 5: Definition of approaches used for the qualitative assessment of biological risk.

These references mainly presented tools for qualitatively assessing biological risks in an industrial setting (Caskey *et al.*, 2009; Sandia National Laboratories, 2010). They included an application (IRSST, 2015), which was initially the subject of a guide (J. Lavoie *et al.*, 2013), to help select appropriate respiratory protective devices used to manage exposure to aerosols. This application is also useful in healthcare and other sectors (agriculture, local authorities, industrial, etc.) as it provides information on the potential presence of biological agents in the different activity sectors and for individual work tasks.

All these tools link “workstation analysis” as the main type of analysis to “analysis by level of risk” as a secondary analysis. They are mainly used in companies and involve a variety of activity sectors. The industrial groups or companies produce some of them in-house, while companies producing risk-assessment software develop others. The latter can personalize the options and contents of the software application for the particular industrial sector, the specific activity, and to meet the requirement of the health/safety manager in the company.

The capacity to assess all working situations potentially leading to exposure to multiple micro-organisms or only a single micro-organism is not specific to the breakdown of the approach. Whatever the type of method or methodology, they can be used to assess the biological risk during deliberate use, when micro-organisms are intentionally present, and/or when they are present unintentionally. Similarly, whether one family of risks, at least two families, or all risks are taken into account depends on how the approach is broken down **Table 8**.

This analysis revealed several progressive approaches for assessing biological risks in an occupational setting. In the absence of a methodological consensus, the methods assess the biological risk in different ways, do not address the same areas of application, and rely

on distinct principles and criteria. The approaches are diverse and can be broken down heterogeneously. They can be used to assess all or individual working situations in which workers may be exposed and cover all or just one family of hazards or risks relating to micro-organisms. The assessment methods used are diverse, as are the risk descriptors and the treatment systems.

In the remainder of this article, we analyze the assessment approaches that are linked to both “workstation analysis” and “analysis by risk level”.

3.2. Analysis of Approaches Involving “Workstation Analysis” and “Analysis by Risk Level”

3.2.1 Description of the Approaches

Sources combining the typologies “workstation analysis” and “risk level analysis” were studied. Two other sources also included a third type of analysis based on a “systematic approach” or “conformity analysis” and are also presented in this section.

The different steps in these approaches are listed (**Annexe 4**: Characteristics of assessment approaches combining "workstation analysis" and "assessment by risk level).

). They are similar and can be used to progressively collect the data required to assess the “risk level.” The following common stages were observed:

- Identification of the hazards (CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; Health & Safety Service, 2015; HSE, 2011; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007);
- Identification of risks (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; HSE, 2011; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007);
- Identification or description of the means of control (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012);
- Assessment of the exposure or risk (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; HSE, 2011; Nuebling & Hofmann, 2001; Sandia National Laboratories, 2010; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007).

While not explicitly broken down into structured steps, the different phases of the risk assessment process used in computing tools can also be defined. They are determined from incremental information inputs: the biological agent’s hazard level, the frequency of exposure, the handling conditions, etc. (**Annexe 4**: Characteristics of assessment approaches combining "workstation analysis" and "assessment by risk level).

Risk descriptors can be classified into three categories:

- Subjective: the determinant is imprecisely defined and can be interpreted differently depending on the individual (Académie de Grenoble, 2010;

Health & Safety Service, 2015; HSE, 2011; Nuebling & Hofmann, 2001; Pichenot *et al.*, 2008). For example, the frequency of exposure can be qualified as “low” or “high.”

- identifiable: the determinant is defined or associated with example situations (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; Académie de Grenoble, 2010; Cheneval *et al.*, 2017; CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; IRSST, 2015; J. Lavoie *et al.*, 2013; Pichenot *et al.*, 2008; Sandia National Laboratories, 2010; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007). For example, a frequency of exposure that is qualified as “very rare” corresponds to an “exposure that may occur at most once a year, is unlikely, or is never encountered.”
- identifiable and quantifiable: the determinant is defined and can be associated with sample situations and/or with countable/quantifiable characteristics (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; Cheneval *et al.*, 2017; CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; Forestier *et al.*, 2012; HSE, 2011; IRSST, 2015; J. Lavoie *et al.*, 2013; Nuebling & Hofmann, 2001; Pichenot *et al.*, 2008; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007). For example, the duration of the exposure is quantified or characterized by time intervals, such as “less than 30 min” or “from 30 min to 2 h.”

A total of 79% of RDs were defined in an identifiable or in an identifiable and quantifiable manner.

“Intermediate” variables are created by the combination of two RDs (3RB (Réseau Ressources Risque biologique), 2016; Académie de Grenoble, 2010; Cheneval *et al.*, 2017; IRSST, 2015; J. Lavoie *et al.*, 2013). For example, the “frequency of exposure to the hazard” combined with the “probability of occurrence of a hazardous event” defines an intermediate parameter, namely, the “probability of incurring consequences.” This parameter is associated with the “severity of consequences” and can be used to estimate the “risk level” (**Figure 6**) (Académie de Grenoble, 2010).

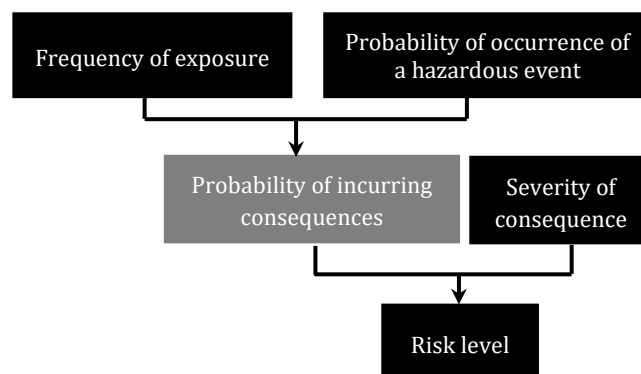


Figure 6: Representation of an exposure determinant considered as an “intermediate” parameter (grey box).

The risk level can be described, for example, as a “level of gross risk,” a “level of controlled risk,” or an “estimated risk level,” especially for proprietary software (**Annexe 4** :

Characteristics of assessment approaches combining "workstation analysis" and "assessment by risk level.

). The passage from one degree to another requires considering the existing implemented preventive measures that modulate the level of gross risk.

3.2.2 Treatment Modes (Annexe 4: Characteristics of assessment approaches combining "workstation analysis" and "assessment by risk level.

4.2.2)

The different levels of RDs classified into bands can be characterized as:

- qualitative, involving the use of a qualifying adjective;
- quantitative, associated with a point, index, or score;
- qualitative and quantitative, combining an adjective with an index.

Indices can be combined by summing or multiplying their values; for example, "intrinsic severity," "extrinsic severity," "probability of occurrence of an event," and "detectability," where all of which have values from 1 to 5 and can be multiplied to produce the "risk priority index," which will be ranked in bands (CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012). The same mathematical mode of treatment can be used to rank the different working situations assessed. A matrix combining RDs can also be used as a mode of treatment. Matrices do not involve a mathematical system but propose a logical means of combining RDs. The combination of two RDs with high indices results in a priority risk index. Hazard and exposure level indices can be combined to define a gross risk. The intermediates and results obtained by combining RDs are defined as bands and are associated with:

- risk levels, e.g., "high," "medium," or "low" (Cheneval *et al.*, 2017; Health & Safety Service, 2015; HSE, 2011);
- priorities for actions, e.g., "strong," "moderate," or "weak" priorities depending on the risk index obtained (Académie de Grenoble, 2010; Forestier *et al.*, 2012; Société Française d'Hygiène Hospitalière, 2007);
- an assigned protection factor and a corresponding respiratory protection device (Cheneval *et al.*, 2017; IRSST, 2015).

An examination of the approaches jointly proposing "workstation analysis" and "analysis by risk level" revealed the diversity of the RDs, systems of attribution, and modes of treatment that can be used.

4. Discussion

Qualitative risk assessment in the workplace is a prerequisite for risk prevention and the implementation of preventive measures. In this context, the present review identified and analyzed existing EvBR approaches in an occupational setting. These approaches

represent the results of evolution in the development of methods for the EvBR. However, in contrast to chemical risks (Arndt *et al.*, 2005; Balsat *et al.*, 2003; HSE, 2003; Marquart *et al.*, 2008; Russell *et al.*, 1998; Vincent *et al.*, 2005) and risks related to nanomaterials (Hristozov *et al.*, 2016; Kuempel *et al.*, 2012; Liao *et al.*, 2008; Claude Ostiguy *et al.*, 2010; Ricaud & Witschger, 2012), the qualitative assessment methods for biological risk have not yet been developed. In addition, there is no universal, standardized approach, and without a harmonized consensus, they can only be distinguished from one another based on their intrinsic characteristics **Table 8**.

To contribute to the development of methods for the assessment of exposure to biological agents, a complementary study was carried out to define the structure of the most appropriate and most complete possible approach (Brun, 2007). It was with this in mind that this census and critique of the data was performed. Relying on an analysis of the approaches studied, the characteristics of this methodology were identified from criteria that compose a shared core. None of the sources studied included all the criteria but each one uses some of them (**Table 8**). In addition, the computing tools, which have different characteristics, appear to be closer to a complete approach.

Thus, on the one hand, we have proposed the structure of an approach to risk assessment, and on the other hand, have relied on the control banding approach (NIOSH, 2009a; David M. Zalk & Nelson, 2008) to define hazards and RDs.

4.1. A Qualitative Methodology in Redaction Form

Two types of approach breakdown were distinguished. The 14 methods identified defined guidelines and good practices to be implemented when performing an assessment. Their generalized approach makes them adaptable to a wide range of applications and provides the variability required to meet the needs of several fields. However, although the assessment methods recommend data that should be taken into account, they do not explain how this data should be collected, treated, or interpreted. In addition, no data treatment system is presented that would allow for the highest-risk situations to be identified or to rank situations. The 18 methodologies identified have the advantage of being more structured and more precise. Their approach is more structured and more explicit in terms of both the steps to be followed and the information to be collected. In addition, they are associated with two types of analysis, namely, “workstation analysis” and “assessment by risk level,” the combination of which presents the advantages described later. The “qualitative” criterion, shared by all the approaches studied, can be used to estimate risk by collecting information and by examining the activities of the workers observed. This approach does not require expertise in atmospheric metrology nor investment to acquire specific material.

An assessment approach must be as accessible as possible to anyone involved in risk management. It appears obvious that the seven software tools identified can simplify the treatment of the information gathered to obtain a result, which is a risk level in this case. These tools have the advantage of being adaptable: the RDs and associate risk level bands can be selected and personalized. Nevertheless, these tools require knowledge and expertise in the field of biological risk, as well as training for their use. In addition, the acquisition or development of this type of tool necessitates a financial investment. An

approach to assess risks that is available in written form, for example, as a document associated with factsheets or tables to be completed, can facilitate data collection, implementation of the assessment approach, and has a wider availability (Académie de Grenoble, 2010; CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; EU-OSHA, 2010; Health & Safety Service, 2015).

4.2. Hazard Descriptors

The step of creating an inventory of the biological agents potentially present in the work environment, which was proposed by 11 approaches (**Table 8**), provides knowledge of the potential dangers and risks incurred by workers. This inventory, which must be as complete as possible, can be carried out in fields where the biological agents present are known and voluntarily used, for example, in the food sector or research laboratories (CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire), 2012; Health & Safety Service, 2015). In addition, in these use conditions, the quantities of biological agents involved are known and generally identifiable. This criterion can thus be integrated into the risk estimation. When biological agents are present unintentionally, establishing an inventory and quantification of the biological agents requires extensive analysis of the literature relating to the most likely biological agents, as well as measuring the concentrations and the diseases most frequently encountered for each activity (Cheneval *et al.*, 2017; HSE, 2011). Once this inventory stage has been completed and quantities involved have been estimated, the two types of working situations leading to exposure can be assessed.

Once the biological agents present in the workplace have been identified, all the risks that may result in exposure to these biological agents must be taken into account, as proposed in 14 of the approaches analyzed. The infectious risk is the best-known risk in an occupational setting and was assessed in all the approaches. Considered an “acute” risk, the infectious risk is determined based on knowledge of the pathogenicity of the micro-organisms and existing regulatory classifications. To propose a global biological risk methodology, it is necessary to take into account the set of biological effects, namely, infectious, allergenic, toxic, and carcinogenic effects. Biological agents are classified by a level of pathogenicity in the range from 1 to 4; groups 2, 3, and 4 are considered pathogenic biological agents.

The immuno-allergic and toxic effects do not have a classification by level of risk but they are the subject of a report on the margin of the infectious classification (Journal officiel, 2000). Given the other possible effects, it seems necessary that the risk assessment should not be limited solely to the infectious effect on which the risk level classification of the micro-organisms is based. Therefore, by considering allergenic effects or the ability to produce toxins (Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS), 2017; Gouvernement du Canada, 2017; Journal officiel, 2017), “chronic” toxicity is also taken into account in the proposed EvBR.

4.3. Exposure Descriptors (Table 8)

As proposed in 22 approaches, all the routes of assimilation into the human body must be taken into consideration. This overall approach allows for all the forms of contamination

with micro-organisms to be considered. Although inhalation is the main route of penetration into humans, other routes of contamination can damage a person's health. Skin contact, cutaneous projections, and inoculations are routes of penetration that must be considered in the assessment approach.

Considering the existing technical and organizational preventive measures that are described in the 14 approaches studied present two advantages. The first is that it can be used to determine the status of what has already been implemented. The second is that the risk level of the working situation can be broken down into a "gross" risk level without these measures and a "residual" risk level once preventive measures have been implemented. A few sources propose these different "risk levels" by taking into account the existing (or not) technical and organizational preventive measures. Beyond diagnosing workers' exposure, this approach also provides a close assessment of the real circumstances and conditions in the workplace by considering the existing preventive measures. In addition, in the context of the implementation of corrective or preventive measures, these approaches can be used to re-assess the risk and thus provide useful feedback on the efficacy of the measures implemented.

4.4. Risk Assessment Combining "Workstation Analysis" and "Assessment by Risk Level"

The approaches studied propose various types of assessments. The seven approaches combining "workstation analysis" and "conformity analysis" can be used to answer a series of questions relating to the design of workplaces, appropriate manipulation conditions, equipment, etc. (Advisory Committee on Dangerous Pathogens, 2005; CNRS, 2017; Government of Alberta, 2011; Health Canada, 2004; INRS, 2009; WHO, 2004). Proposed in particular for research laboratories, they have the advantage of asking the right questions about the conditions required to handle biological agents safely (Journal officiel, 2007). However, this type of typology assesses the differences between the situation observed and the design and use requirements. It does not constitute an assessment of the work situation. The 18 approaches that combined "workstation analysis" with "assessment by risk level" are not highly subjective and are simpler to implement (J. Lavoie *et al.*, 2013). Used in several fields, the progressive approach relies on an identification system, which attributes levels by classifying RDs into bands (Brouwer, 2012; Cheneval *et al.*, 2017; Marquart *et al.*, 2008; RIVM, 2017; Vincent *et al.*, 2005). Thus, the exposure in the real working situation can be observed by selecting the levels of each exposure determinant. The application and feasibility of this grading system have been tested in the field (Forestier *et al.*, 2012; Nuebling & Hofmann, 2001; Pichenot *et al.*, 2008) and in the software tools studied.

4.5. Identifiable or Quantifiable Determinants, Attribution Systems, and Simple Treatment Modes

The RDs, hazard levels, and exposure levels must be defined as objectively as possible and must be understood and correctly interpreted. As they generate less confusion than subjectively defined RDs, "identifiable" or "identifiable and quantifiable" definitions are more precise. Once clearly defined, these terms can be associated with quantitative

notions to allow for a better definition of the hazard or exposure level in the working situation assessed.

The association of the level of danger, corresponding to the dangerousness of the micro-organisms or the mixture of micro-organisms, and the level of exposure, which is the combination of exposure descriptors, such as the duration and frequency of exposure, physicochemical properties, conditions of implementation (type of process, temperature, etc.), and means of prevention, gives a level of risk. To achieve this result, the system classifying the hazard and exposure levels in bands, as well as the treatment methods, must be simple to understand and use (**Figure 7**). For example, indices or number-based scores for the different levels are easy to use. These numbers can then be added or multiplied to facilitate their combination. This simple treatment produces a quantitative result, which represents and ranks the “risk level” of a working situation. This result can also be associated with a priority-of-action band, which is given a color code to facilitate perception of the risk level and the priorities. For example, situations representing a “high risk level” can be indicated in red, while those with a “low risk level” are indicated in green to facilitate risk perception (Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS), 2017).

		Hazard level				
		1	2	3	4	5
Exposure level	1	1	1	1	2	3
	2	1	1	2	2	3
	3	1	2	2	3	3
	4	1	2	2	3	3
	5	2	2	3	3	3

1	Low level of risk
2	Moderate level of risk
3	High level of risk

Figure 7: Estimation and coding of risk levels based on the hazard levels and exposure levels measured in a working situation.

4.6. The Contribution of Quantitative Assessment to Risk Assessment

A quantitative approach can be used to characterize exposures by expressing it as a numbered value determined from concentration measurements. A major effort has been made in recent decades to quantify biological agents in occupational environments. Thus, airborne concentrations of microbial agents have been fully documented in numerous occupational settings for (i) specific microbial groups, including culturable bacteria, fungi, and actinomycetes (Haas *et al.*, 2010; Oppliger & Duquenne, 2016; Pearson *et al.*, 2015; Szymanska, 2007); (ii) vegetal structures, such as pollen (Peden & Reed, 2010); (iii) viruses (Bailey *et al.*, 2018); (iv) microbial compounds, such as endotoxin (Duquenne *et al.*, 2012; Schlosser, 2019), (1-3)- β -D-glucans (Noss *et al.*, 2010), allergens (Raulf *et al.*,

2014), and ergosterol (Poole *et al.*, 2010); and (v) microbial toxins, such as mycotoxins (Viegas *et al.*, 2018).

Additionally, the number of published scientific works aimed at determining the composition of occupational environments in microbial taxa has increased sharply in recent years. Studies were carried out by characterizing the biodiversity of microbial communities through the cultivation of micro-organisms, followed by the identification of isolates using macroscopic and microscopic observations, biochemical tests, and chemical methods, such as fatty acid methyl ester (FAME) and matrix-assisted laser desorption/ionization time of flight (MALDI-TOF) analyses (Duquenne, 2018). Non-culture-based biodiversity studies are usually carried out using a polymerase chain reaction (PCR), followed by the sequencing of DNA and bioinformatic analysis of sequences (Degois *et al.*, 2017; Mbareche *et al.*, 2017; White *et al.*, 2019).

The quantitative assessment of microbial communities and microbial compounds, as well as biodiversity studies, improves knowledge of the micro-organisms present in a given professional environment. Therefore, it provides essential input for the qualitative approach for EvBRs. However, in the current state of knowledge, the quantitative approach alone does not allow for biological risks to be assessed with sufficient precision. Indeed, the health effects of micro-organisms on workers depend on the species and the compounds to which workers are exposed, where a recent literature review on that issue concluded “that none of the analyzed studies provided suitable dose–response relationships for derivation of exposure limits” (Walser *et al.*, 2015). Helpful guideline values, which are generally not health-related, were published for bacteria and molds in general, but they vary from country to country. For example, the values that can be described as acceptable at the workplace for molds are 10^3 CFU/m³ in Switzerland (SUVA, 2015), 5×10^4 CFU/m³ in the air of household waste sorting centers in Germany (Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt, 2013), and 10^4 spores/m³ in Canada (J Lavoie *et al.*, 2007). Thus, research is therefore still needed regarding quantifying exposure levels to define realistic indicator parameters that can be measured for quantitative risk assessment in a given working sector, to develop standardized measurement methods for indicator parameters that allow for identifying the real risk potential of exposures, and to carry out studies combining different measurement methods with valid dose–response outputs.

Additionally, the quantification of exposure levels can be used to quantify only what is sought or measurable, and it provides a snapshot of the working situation for a given period, generally during a working shift or a specific task. These metrological campaigns require technical knowledge and have a controlled level of expertise. Furthermore, a financial cost must be borne by the company.

Finally, the complementarity of the quantitative assessment with the qualitative assessment, namely, the two steps used to assess the risk, was highlighted by three of the references studied (Bonnard, 2001; Forestier *et al.*, 2012; N Goyer *et al.*, 2001).

5. Limitation and Interests

One of the limits of this work could be the non-exhaustiveness of the inventory of sources related to procedures for assessing biological risk in the workplace. This theme is still underdeveloped (Brun, 2007; Crook, 2007), which is why the identification of sources presenting this type of evaluation was not easy. On the one hand, the listed bibliographic references revealed that the publications concerning the evaluation of biological health risks, or those related to bioterrorism or biological safety, were the subject of a large number of references in comparison to those on the evaluation of biological risk in the workplace. One explanation is the place and importance of considering health risks, particularly in the context of the prevention of epidemics or other effects on the health of the population (Dasaklis *et al.*, 2012; Fauci & Morens, 2012). Another one is the increase in the number of assessment-related tools related to bioterrorism, especially after the events of 11 September 2001 (Roberts & Horgan, 2010; Woo, 2002). Finally, the existence and application of diversified measurement and analysis techniques for micro-organism measurement campaigns (Eduard *et al.*, 2012; Ghosh *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2011) or the increasing development of modeling systems (Carducci *et al.*, 2016; Paccha *et al.*, 2016; Rose *et al.*, 2013) may also explain why published data are scarce. In the context of this work, the grey literature is presumably infinite. It is not possible to review all guidelines issued by private companies about occupational risk prevention, and internal documents are not generally accessible. Moreover, a database from a copyright library or an appropriate publishing database could have been consulted but the use of search engines, such as Google and Google Scholar, made it possible to achieve our objectives in terms of finding our bibliographic references.

On the other hand, regarding finding users of health and safety software, only one provider was contacted and few manufacturers use this type of software to assess biological risks.

The evaluation of biological risks is admittedly a recognized difficulty for experts, as evidenced by the lack of sources on this subject. However, the strength of this unconventional research is that it has incorporated various sources of biological risk assessment, such as conceptual approaches, notably proposed by regulatory agencies; professional methodologies; and computer applications. These are functional approaches whose evaluation principle is based on the regulatory provisions of the country in which they are developed. This work made it possible to draw up a representative inventory of the existing situation in terms of the qualitative assessment of biological risk. In addition, the analysis of these sources made it possible to define the structure of an approach by describing the components of the risk, descriptors of the danger, and descriptors of the exposure. The proposal of such a methodology is a first step. The following steps will focus on the construction of such a methodology, its implementation, and validation to verify its feasibility. This methodology can thus evolve with scientific and technical advances in the field of biological risk in the workplace.

6. Conclusion and Perspectives

Critical analysis of the 32 sources considering the initial or qualitative assessment of the biological risk in an occupational setting indicates that today, there is no universal approach that exhaustively integrates all the criteria through which this risk can be fully assessed. By analyzing existing approaches and formalizing the findings, we defined the main characteristics of a complete EvBR methodology. The proposed approach was inspired by all the studied approaches, and therefore contains similarities with them, but allows for defining a comprehensive approach. The proposed approach has the following features:

- a qualitative methodology in the form of writing because it is a more structured approach that facilitates its availability and the collection of data during its implementation.
- it takes into account the hazard descriptors by carrying out an inventory of the micro-organisms that are potentially present and of all the hazards.
- it takes into account exposure descriptors, such as routes of exposure, as well as technical and organizational preventive measures.
- it is based on a risk assessment that combines the “analysis of workstations” and “assessment by level of risk,” which is a progressive approach that allows for classifying the descriptors of hazards and experiences classified into bands through observation.
- it presents identifiable or quantifiable descriptors that are more precise and more understandable and includes a simple points system that is easier for users to implement.

Based on these elements, a methodology is being developed for a particular sector of activity, namely, composting waste. This sector is the subject of a certain number of studies relating to bioaerosols and metrological campaigns. The next works, which will consist of defining a qualitative methodology in this sector of activity, will make it possible to compare the results obtained from such an approach to the results from the quantitative evaluations. Currently, this approach is in the testing phase for real work situations in companies. Based on the generated feedback, improvements will be made to this methodology to ensure its feasibility in the field, with the ultimate goal being to contribute to the development of a method of biological risk assessment in the workplace

Partie 4

LE SECTEUR DU COMPOSTAGE

PARTIE 4 : LE SECTEUR DU COMPOSTAGE

Cette partie a pour objectif de 1- présenter le secteur de compostage en décrivant la typologie des déchets, leur production et leur traitement en France, 2- présenter le procédé de compostage, le fonctionnement d'une plateforme, 3- décrire la biodiversité présente au sein des atmosphères de travail, 4- dépeindre les effets sur la santé des agents biologiques, 5- présenter les expositions décrites dans ce secteur.

1. Cadre global du secteur de compostage

Selon l'ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010, est considéré comme constituant un déchet : « *toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire* » (Art. L. 541-1-1 C. env.). Avec l'émergence de la notion d'économie circulaire et son intégration dans la politique française (Beaussonie, 2016), la politique « déchets » s'intègre dans des objectifs visant à éviter de produire des déchets par la prévention et le réemploi, d'augmenter la valorisation matière, ainsi que la valorisation énergétique des déchets inévitables qui ne sont pas valorisables sous forme matière.

2. Les déchets

2.1 Les typologies des déchets

Les déchets peuvent être classés selon leur nature. Dans ce cas, deux grandes catégories se distinguent : les déchets dangereux (DD) et les déchets non dangereux (DND).

Les déchets sont considérés comme dangereux lorsqu'ils contiennent des éléments susceptibles de présenter des risques pour la santé humaine ou pour l'environnement. Le code de l'environnement reprend la liste des 15 propriétés de danger définies au niveau européen et induisant le classement en qualité de déchets dangereux (Annexe 1 de l'article R. 541.8 C. env.).

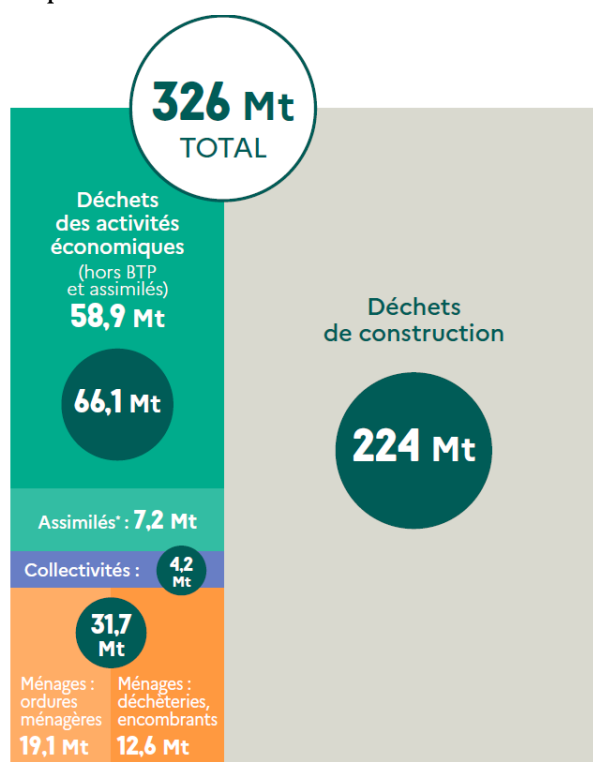
Les déchets non dangereux sont les déchets qui ne présentent aucune des 15 propriétés de danger définies au niveau européen. Cette catégorie de déchets se décline en deux sous catégories :

- les déchets non dangereux non inertes (DNDNI), tels que des matériaux recyclables (verre, métaux, papiers, plastiques, des déchets organiques (déchets verts, bio déchets, déchets sous-produits d'animaux), des déchets résiduels ou refus de tri riche en matériaux plastiques... ;
- les déchets non dangereux inertes (DNDI), il s'agit principalement de déchets minéraux provenant du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) (déchets de béton, de briques, de tuiles, vitrages) qui peuvent être soit valorisés sous forme de recyclage matière dans des applications du BTP soit utilisés pour le tremblement des carrières ou éliminés en installations de stockage.

Les déchets peuvent aussi être caractérisés selon leur origine, ou leur producteur, selon deux grandes familles. Les déchets ménagers et assimilés (DMA), qui sont produits initialement par des ménages et gérés par les collectivités territoriales, et les déchets des activités économiques (DAE). Ce sont les déchets, dangereux ou non dangereux, dont le producteur initial n'est pas un ménage. Les activités économiques regroupent plusieurs grands secteurs de production : agriculture, pêche, construction, secteur tertiaire et industrie.

2.2 La production de déchets en France

En 2017, la production de déchets en France représente 326 millions de tonnes (ADEME, 2020). La **Figure 8** présente la répartition des déchets produits selon les secteurs d'activités économiques, en millions de tonnes. Les déchets ménagers représentent environ 10 % des déchets produits.



* : Déchets des activités économiques (DAE) collectés par le service public

Figure 8 : La production de déchets en France en 2017 (ADEME, 2020).

2.3 Le traitement de déchets

Le traitement des déchets débute après les opérations de collecte, de transport et de prétraitement. Il doit être mis en œuvre en respectant une hiérarchie qui privilégie la valorisation matière puis la valorisation énergétique. Il est réalisé par des opérateurs privés ou publics, dans le cadre du service public ou dans un cadre privé. Plusieurs types de traitement existent et sont variables en fonction du type de déchets. Le compostage est une valorisation de la matière et permet de traiter les déchets ménagers et assimilés (DMA), les déchets non dangereux et non inertes (**Tableau 9**).

Valorisation (matière et énergie)		Élimination
Valorisation matière		Stockage
Valorisation énergétique		
Recyclage	Remblaiement Conversion de déchets en combustibles	Incinération sans valorisation énergétique
Réutilisation		
Régénération		
Compostage		

Tableau 9 : Le traitement et la valorisation des déchets (ADEME, 2021).

La valorisation est définie comme toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets (Art. L. 541-1-1 C. env.).

3. Les plateformes de compostage

Depuis les années 2000, le nombre de sites de compostage de déchets ménagers et assimilés s'est intensifié, passant de 278 sites à 669 en 2016. L'augmentation du tonnage de déchets a suivi le nombre de sites. Entre 2000 et 2016, les DMA envoyés aux sites de compostage sont passés de 3,8 millions de tonnes à 8,7 millions de tonnes (ADEME, 2020) et la production de compost de 1,6 à 3 millions de tonnes.

3.1 Le procédé du compostage

Le compostage est un procédé de traitement biologique aérobie (en présence d'oxygène) des déchets organiques permettant de transformer ces derniers en un résidu organique stabilisé et hygiénisé, le compost. Le processus de transformation est une opération durant laquelle des déchets organiques sont dégradés dans des conditions contrôlées, en présence de l'oxygène de l'air et d'humidité (eau), par l'action conjuguée des bactéries, champignons, micro-organismes et de macro-organismes. Cette dégradation s'accompagne par la production de chaleur et de gaz. Le compostage peut concerner deux types de déchets organiques :

- les déchets « fermentescibles » issus exclusivement de matière organique biodégradable, donc compostable. Par exemple, les déchets verts (feuilles mortes, tontes de gazon, résidus d'égavage...), les biodéchets ménagers (déchets de cuisine des particuliers : épluchures, restes de repas ...), les boues de station d'épuration (STEP), les sous-produits de l'industrie agroalimentaire... ;
- les ordures ménagères résiduelles qui désignent la part des déchets qui restent après le tri sélectif des matériaux recyclables par les ménages.

Le compostage peut être réalisé par les ménages (dans les jardins, au niveau d'un quartier, à la ferme...) et par des installations industrielles de différentes capacités de traitement (de 1 000 à 100 000 tonnes/an).

3.2 Le fonctionnement d'une plateforme de compostage

Les plateformes de compostage mettent en œuvre une succession d'étapes qui sont communes à toutes les installations, quelle que soit la taille de la plateforme, le type de déchet traité et les différentes techniques mises en œuvre.

La pesée : effectuée sur le pont-bascule, elle permet de connaître la masse de déchets apportés ou de compost repris.

La réception et le stockage : en arrivant, les déchets sont soumis à un contrôle qualité et peuvent subir un dernier tri avant un prétraitement, tel que le broyage. Ensuite, ils sont mis en tas ou déposés dans des fosses. Dans le cas de boues, des échantillons de boues sont prélevés et seront conservés jusqu'à l'utilisation du lot de compost correspondant.

Prétraitement des déchets : cette opération de prétraitement consiste à mélanger et à homogénéiser les déchets afin de leur donner une certaine granulométrie et une porosité favorables à leur biodégradation et aération. Compte tenu de la porosité et de la teneur en eau des autres types de déchets, un structurant est nécessaire pour pouvoir les composter. Un complément carboné est souvent indispensable. L'ajout du refus de criblage de déchets verts ou de morceaux de palettes permet de répondre à ces besoins.

L'alimentation des broyeurs ou de mélanges de matières est réalisée sur les dalles à l'aide de godets ou de chargeuses à fourche. Les ordures ménagères résiduelles sont manipulées à l'aide d'un grappin piloté par un opérateur.

La phase active ou phase de fermentation : cette phase correspond à la phase de dégradation aérobie de la matière organique avec une augmentation des températures jusqu'à 80°C. Cette phase peut se dérouler :

- à ciel ouvert, c'est la méthode la plus pratiquée car elle est simple et économique. Elle est adaptée aux traitements des déchets verts qui sont placés en andains d'une hauteur de 2 à 3 mètres, par exemple, dans des box équipés ou non d'une aération forcée. Les andains sont retournés mécaniquement par le biais de chargeurs ou de retourneurs d'andains ;
- dans des espaces semi-clos (box, casier, couloir...). Ce procédé est employé par exemple pour les boues de STEP. L'aération forcée peut être effectuée par insufflation (aération positive) ou par aspiration (aération négative). Dans le cas d'un bâtiment fermé, l'air vicié est capté et traité. Les boues sont ajoutées à un structurant, constitué habituellement de déchets de bois ou d'écorces ou de déchets verts broyés, avec un éventuel retournement ;
- en réacteur fermé, procédé qui s'apparente au compostage en casier, mais avec un niveau de confinement supérieur et avec des dispositifs automatiques de retournement (vis sans fin, roue pelleteuse...). Ce procédé est par exemple utilisé pour les biodéchets industriels ou ménagers.

Les andains peuvent se présenter sous forme :

- triangulaire, associés à un compostage lent ;
- tabulaire, lorsque la plateforme est équipée d'un retourneur d'andains ;
- ou être contenus dans une structure fermée ou non (casiers béton, couloirs, tunnels béton ou biodôme, bennes, cylindres...) (**Figure 9**).

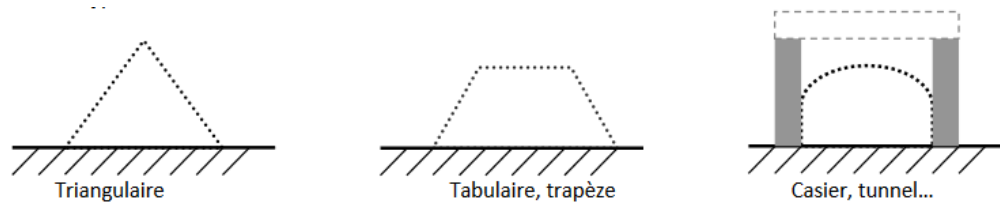


Figure 9 : Structures d'andains (ADEME, 2015).

Au cours de cette phase de fermentation, l'apport en oxygène est important (freinage du processus, mauvaises odeurs...). Ainsi, les installations sont équipées d'aération forcée positive ou négative à l'aide de réseaux de drains au niveau du sol pour apporter cet oxygène. Par ailleurs, au cours de cette phase, la matière est brassée mécaniquement une ou plusieurs fois à l'aide de chargeuses ou de retourneurs d'andains.

La phase de maturation : cette phase correspond à la période pendant laquelle la température du compost décroît puis se stabilise. Cette phase peut durer de 4 à 6 mois et peut être réalisée à l'air libre ou en intérieur.

Le criblage : il consiste à tamiser le compost en fin de maturation d'une part, pour pouvoir commercialiser un compost adapté aux besoins agronomiques et d'autre part, pour récupérer le refus qui est réutilisé pour un nouveau lot de compost.

Le stockage : il peut être réalisé sous hangar ou sous bâche pour prémunir le compost des intempéries qui peuvent faire perdre la valeur du compost produit (dessèchement, humidité, ensemencement par des graines, perte de potassium par lessivage...).

Le procédé industriel de compostage permet ainsi l'obtention d'une matière fertilisante stabilisée riche en composés humiques, le compost, susceptible d'être utilisé en qualité d'amendement organique améliorant la structure et la fertilité des sols. Le compostage permet de réduire les masses et les volumes de la matière de l'ordre de 60 à 70 % et une diminution de la demande en oxygène de 90 %. (Marchand *et al.*, 2017). La **Figure 10** présente le dessin technique d'une plateforme de compostage de déchets verts.

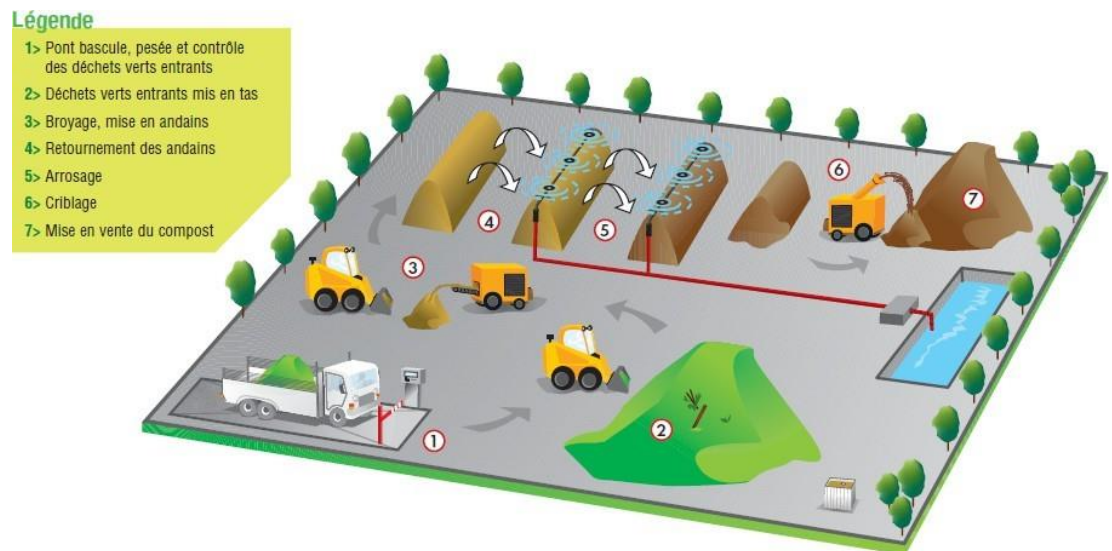


Figure 10 : Schéma technique d'une plateforme de compostage de déchets verts (Source : Sydetom (<http://www.sydetom66.fr/>)).

4. La biodiversité dans le secteur du compostage

Dans le domaine du compostage, les micro-organismes et leurs constituants potentiellement dangereux pour la santé proviennent (Beffa *et al.*, 1998) des :

- organismes pathogènes d'origine fécale, présents dans les intrants (bactéries, virus, kystes ou œufs de parasites intestinaux) ;
- agents biologiques pathogènes développés lors du compostage au cours des phases mésophile et thermophile. Ce sont surtout des actinomycètes thermophiles et des champignons ;
- toxines et des allergènes produits par certaines bactéries et certaines moisissures ou entrant dans leur constitution.

Les principaux agents biologiques pathogènes présents dans les matières premières à composter proviennent de la matière fécale des boues de STEP et des effluents d'élevage. Parmi les pathogènes rencontrés, on retrouve : l'*Yersinia enterocolitica* provenant des porcs, les *Escherichia Coli* entérohémorragiques provenant des troupeaux de bovins et la *Listeria monocytogenes* provenant de l'homme et de l'animal (de Guardia, 2018; Schlosser & Huyard, 2008).

Les principales bactéries pathogènes présentes dans les intrants du compostage sont : les salmonelles, les campylobactères thermotolérants, les *Escherichia Coli* entérohémorragiques (EHEC), *Listeria monocytogenes* et *Yersinia enterocolitica*. Les parasites principaux sont de deux types : les protozoaires unicellulaires (*Cryptosporidium* spp., *Giardia* spp.) et les helminthes incluant les nématodes (ascaris, trichures, strongles...). La majorité des virus sont spécifiques à l'espèce humaine et proviennent surtout des stations d'épuration : rotavirus, entérovirus, virus de l'hépatite A...).

Au cours du processus de compostage, d'autres agents biologiques se développent. Le processus même du compostage se compose de quatre phases successives, en lien avec la chaleur générée par l'activité microbienne et par des oxydations chimiques exothermiques : la phase mésophile, thermophile, de refroidissement et de maturation. Au niveau des procédés qui ne font référence qu'à deux phases, la phase active comprend la phase mésophile, thermophile et une partie de la phase de refroidissement. La phase de maturation comprend la fin de la phase de refroidissement et la maturation (**Figure 11**).

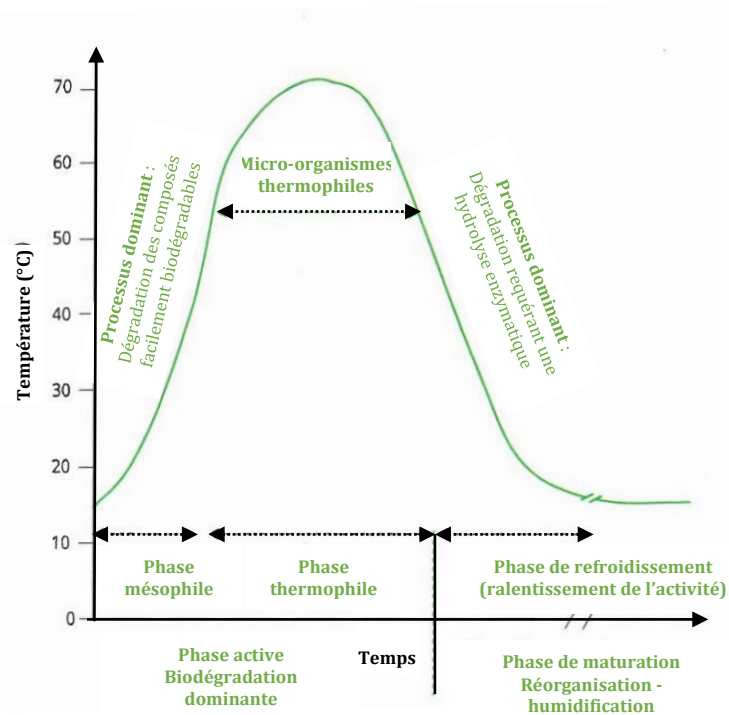


Figure 11 : Évolution de la température au cours des différentes phases du compostage (d'après (Mustin, 1987)).

La phase **mésophile** est la phase initiale du compostage. Les micro-organismes (mésophiles) présents se développent en utilisant comme substrat les matières organiques facilement biodégradables. La croissance et l'activité métabolique des communautés microbiennes provoquent l'augmentation de la température au cœur de la matière autour de 30 à 40°C.

L'augmentation rapide de la température conduit à la phase **thermophile** pendant laquelle les températures peuvent atteindre 80°C dans le compost. Les pathogènes et les herbacés nuisibles sont alors détruits par cette chaleur. Seuls les micro-organismes thermorésistants (ou thermophiles), tels que certaines bactéries, moisissures et actinomycètes thermophiles survivent (Laveine A., 2009). Cette augmentation de la température favorise la dégradation des composés complexes et permet l'hygiénisation du déchet (Ryckeboer *et al.*, 2003). Au cours de cette phase, une part importante de la matière organique est dégradée et un assèchement du compost est observé.

Par la suite, la diminution de la quantité de matières organiques facilement dégradables provoque un ralentissement de l'activité microbienne, entraînant une diminution de la température du compost, c'est la phase de **refroidissement**. Durant cette baisse de température, les micro-organismes mésophiles colonisent à nouveau le milieu, mais ils sont d'une nature différente de ceux présents lors de la phase mésophile.

Au cours de la dernière phase, dite de **maturation**, les processus d'humidification prédominent pouvant s'étaler sur plusieurs mois. Durant cette phase, il est observé une augmentation de la biomasse microbienne et l'arrivée de macro-organismes (lombrics...). À la fin de cette phase, le compost stabilisé constitué d'humus peut être épandu pour fertiliser la terre.

Le contenu microbien du compost provient ainsi des matières premières à composter, mais aussi du processus de compostage ainsi que de l'environnement ambiant.

5. Effets observés sur la santé des travailleurs

Divers symptômes et des pathologies ont été rapportés dans des études épidémiologiques menées dans ce secteur. Bien qu'elles présentent des limites, des articles de synthèse s'accordent sur le fait que l'exposition aux bioaérosols induit des effets sur la santé (Anzivino-Viricel *et al.*, 2012; Pearson *et al.*, 2015).

L'exposition des salariés aux agents biologiques dans le secteur du compostage est associée à un risque au niveau respiratoire provoquant des pneumopathies d'hypersensibilité, reconnues en tant que maladies professionnelles en France (Tableaux des maladies professionnelles 66 bis du régime général et 45 BCD du régime agricole (Deportes *et al.*, 2012; Schlosser & Huyard, 2008), des asthmes (Deportes *et al.*, 2012), des bronchites chroniques (Bünger *et al.*, 2007; Hoffmeyer *et al.*, 2015) et des irritations respiratoires (Bünger *et al.*, 2000; Bünger *et al.*, 2007; Hambach *et al.*, 2012; Heldal *et al.*, 2015). Par ailleurs, il existe une association entre ces expositions et l'apparition de symptômes gastro-intestinaux (Bünger *et al.*, 2000; van Kampen *et al.*, 2012), des irritations des yeux et symptômes cutanés (Bünger *et al.*, 2000; Hambach *et al.*, 2012) et des irritations des muqueuses (Bünger *et al.*, 2007).

6. Expositions professionnelles mesurées sur les plateformes de compostage

6.1 Concentration dans l'air des plateformes de compostage

L'air des installations traitant des déchets ménagers, des déchets verts, de la sciure de bois, des boues de station d'épuration, des déchets fermentescibles ou des produits de méthanisation fait l'objet de mesures de concentrations d'agents biologiques.

Pour les moisissures mésophiles, en France, les concentrations sont comprises entre $1,0 \times 10^5$ et $5,0 \times 10^6$ UFC/m³ (Duquenne *et al.*, 2012; Persoons *et al.*, 2010; Poirot *et al.*, 2010), aux États-Unis, entre $4,8 \times 10^2$ et $1,7 \times 10^4$ UFC/m³ (Hryhorczuk *et al.*, 2001) et en Autriche entre $1,2 \times 10^2$ et $3,0 \times 10^5$ UFC/m³ (Reinthal *et al.*, 2004).

Pour les moisissures thermophiles, en France, les concentrations varient entre la limite de détection (LD) et $3,4 \times 10^7$ UFC/m³ (Duquenne *et al.*, 2012; Poirot *et al.*, 2010) et en Allemagne à une concentration moyenne de $3,0 \times 10^5$ UFC/m³ (Fischer *et al.*, 2008).

Les mesures des concentrations des bactéries cultivables rapportées par les travaux de plusieurs pays (France, Allemagne, Pays-Bas, Italie...) varient dans des gammes plus étendues. Pour les bactéries mésophiles, les concentrations varient entre la LD de la méthode et $5,5 \times 10^9$ UFC/m³, et pour les bactéries étudiées, les concentrations varient entre la LD de la méthode et $2,0 \times 10^8$ UFC/m³.

La présence de composés microbiens dans l'air des plateformes de compostage est témoinnée par plusieurs études. Parmi ces composés, les endotoxines ont été mesurées. Les mesures de concentrations sont comprises entre 213 et $3,2 \times 10^6$ UE/m³ dans l'air ambiant de plateformes situées en France, en Espagne et en Angleterre (Fischer *et al.*, 2008; Schlosser *et al.*, 2009). À titre de comparaison, dans des zones peu contaminées, comme l'air extérieur, les concentrations d'endotoxines sont généralement inférieures à 10 UE/m³ (Duquenne *et al.*, 2012). Les 1,3-β-D-glucanes ont été mesurés à des concentrations entre < 0,001 et 16, 2 ng/m³ dans l'air de plateformes des Pays-Bas, de l'Angleterre et des États-Unis (Jeroen Douwes *et al.*, 2000; Hryhorczuk *et al.*, 2001; Sykes *et al.*, 2011). Dans des environnements typiquement peu contaminés, les concentrations de 1,3-β-D-glucanes sont inférieures à 10 ng/m³.

6.2 Exposition des travailleurs sur les plateformes de compostage

La littérature illustre également l'exposition des salariés au sein des plateformes de compostage.

Les mesures de concentrations en bactéries cultivables varient dans un éventail assez vaste. Les concentrations peuvent atteindre $4,5 \times 10^9$ UFC/m³ pour les bactéries mésophiles et $5,3 \times 10^7$ UFC/m³ pour les bactéries thermophiles et actinomycètes associées (Bünger *et al.*, 2007; Jacques Lavoie *et al.*, 2006; Schlosser *et al.*, 2009).

Les mesures d'exposition aux endotoxines diffèrent d'une étude à l'autre. Des niveaux de concentrations plutôt faibles sont compris entre 8 et 340 UE/m³ sur plusieurs sites en Allemagne (Bünger *et al.*, 2007) et les niveaux les plus élevés ont été mesurés en Allemagne, en France et en Espagne avec des niveaux d'exposition médians de l'ordre de 50 119 UE/m³ et un pic enregistré à $1,3 \times 10^7$ UE/m³ (Bünger *et al.*, 2007; Schlosser *et al.*, 2009).

Pour les 1,3-β-D-glucanes, les données d'exposition des salariés sont concordantes avec les mesures d'ambiance mesurées au sein des plateformes de compostage. Aux États-Unis, les niveaux d'exposition sont plutôt faibles (< 14 ng.m³) et aux Pays-Bas elles sont comprises entre < 0,15 et 53,2 ng/m³ (Jeroen Douwes *et al.*, 2000; Hryhorczuk *et al.*, 2001; Wouters *et al.*, 2006).

6.3 État des lieux des mesures dans la base de données Colchic

La base de données d'exposition professionnelle aux agents chimiques Colchic regroupe l'ensemble des mesures d'exposition effectuées sur les lieux de travail par les huit laboratoires interrégionaux de chimie (LIC) des Carsat et de la Cramif et les laboratoires de l'INRS. Elle est gérée par l'INRS et a été créée en 1987 à l'initiative de la Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés. À ce jour, Colchic compte plus d'un million de résultats pour 745 substances chimiques et agents biologiques.

Les résultats des prélèvements des agents biologiques sont enregistrés dans la base depuis 2008. Au 20 septembre 2020, la base comportait plus de 8 500 mesures, dont 11 % d'entre elles réalisées dans des entreprises comportant une activité de compostage (plateformes de compostage ou site de méthanisation). Pour cette activité, 84 % des mesures concernent des prélèvements d'ambiance et 16 % des prélèvements individuels. Les agents biologiques mesurés, pour les prélèvements d'ambiance et individuels, sont les bactéries et les moisissures cultivables à 25°C, les endotoxines et les bactéries cultivables à 56 °C et les moisissures cultivables à 47°C, respectivement dans 25 %, 22 % et 14 % des cas. Pour cette activité, les mycotoxines et les 1,3-β-D-glucanes n'ont pas été mesurés.

Pour ce secteur d'activité, les mesures d'ambiance sont supérieures aux mesures individuelles. Les plus fortes concentrations enregistrées concernent les bactéries cultivables à 25°C pouvant atteindre $3,0 \times 10^7$ UFC/m³ en mesure d'ambiance et $4,1 \times 10^6$ UFC/m³ en mesure individuelle (**Tableau 10**).

Tableau 10 : Descripteurs statistiques des concentrations ambiantes et des niveaux d'exposition pour les cinq agents biologiques représentés dans Colchic.

Prélèvements d'ambiance							Prélèvements individuels					
n	min	Q25	Q50	Q75	max		n	min	Q25	Q50	Q75	max
187	18	4 116	76 800	7,2x10 ⁵	3,0x10 ⁷	Bactéries cultivables à 25°C (UFC/m ³)	46	1 198	23 225	61 455	2,5x10 ⁵	4,1x10 ⁶
108	11	8 848	166 538	9,1x10 ⁵	8,4x10 ⁶	Bactéries cultivables à 56°C (UFC/m ³)	19	220	2 753	19 145	8,8x10 ⁴	1,2x10 ⁶
187	5	5 206	81 902	3,6x10 ⁵	6,1x10 ⁶	Moisissures cultivables à 25°C (UFC/m ³)	46	249	9 365	32 166	2,3x10 ⁵	3,6x10 ⁶
108	11	2 122	38 650	3,1x10 ⁵	9,9x10 ⁶	Moisissures cultivables à 47°C (UFC/m ³)	19	107	374	2 440	3,4x10 ⁴	1,5x10 ⁶
186	< 1	6	46	393	8 515	Endotoxines (UE/m ³)	22	6	15	48	89	2 985

n : nombre de mesures
min : minimum
max : maximum
Q25 et Q75 : 25^e et 75^e centiles de la distribution
Q50 : médiane

Les distributions des mesures de concentrations des cinq agents biologiques quantifiés pour les activités de compostage sont présentées à la **Figure 12** pour les mesures d'ambiance et la **Figure 13** pour les mesures individuelles.

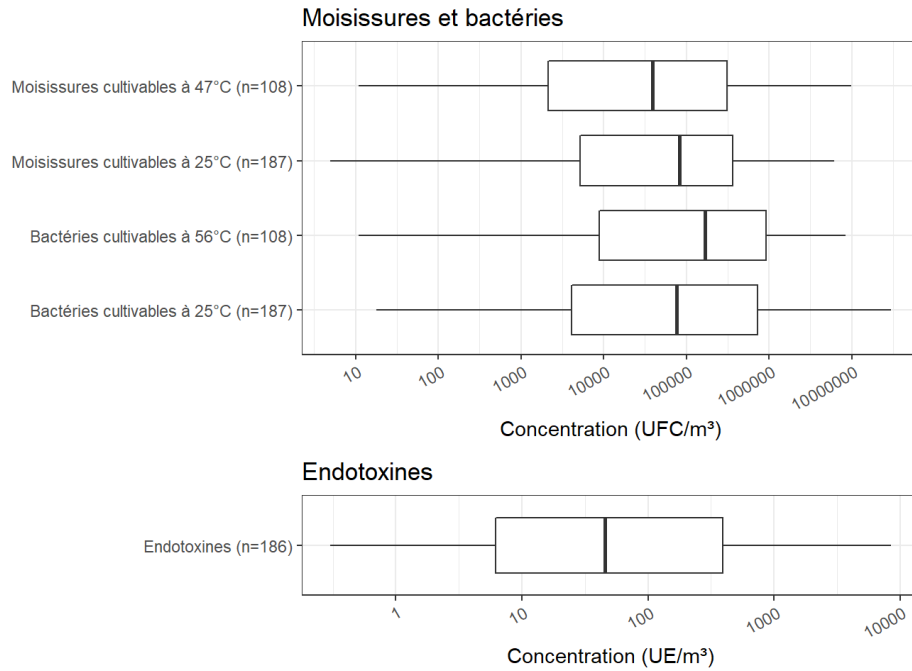


Figure 12 : Distribution des mesures de concentrations d’ambiance des cinq agents biologiques quantifiés pour les activités de compostage enregistrées dans Colchic.

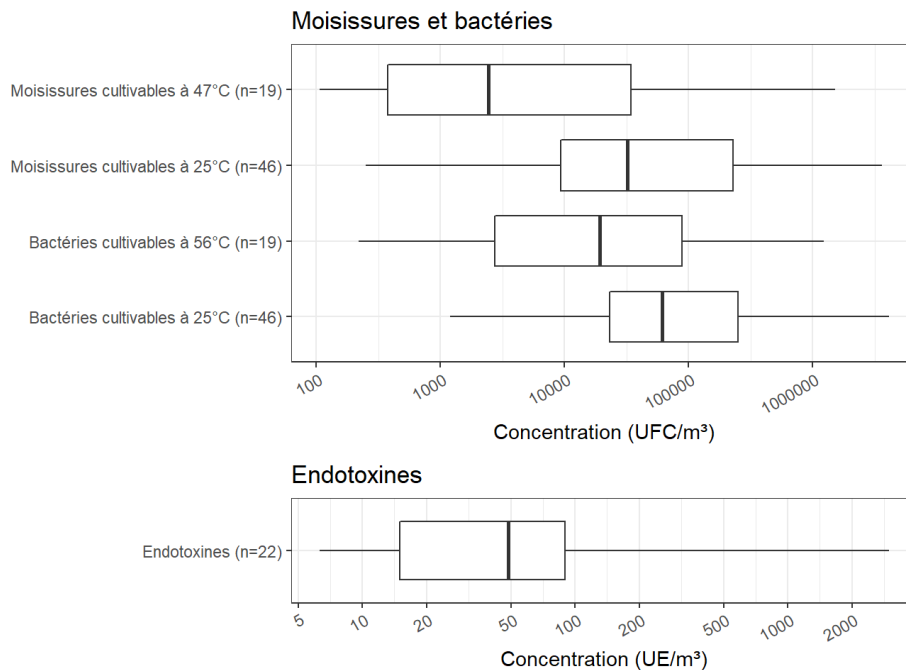


Figure 13 : Dispersion des mesures de concentrations individuelles des cinq agents biologiques quantifiés pour les activités de compostage enregistrées dans Colchic.

Le secteur de compostage fait l’objet de publications, de mesures de concentrations et il est proposé, dans les paragraphes suivants, de présenter et de valider une méthodologie d’évaluation qualitative du risque biologique pour ce secteur d’activité.

Partie 5

CONCEPTION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DU RISQUE BIOLOGIQUE APPLIQUÉE AU SECTEUR DU COMPOSTAGE

PARTIE 5 : CONCEPTION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DU RISQUE BIOLOGIQUE APPLIQUÉE AU SECTEUR DU COMPOSTAGE

Cette partie traite de la conception d'une méthodologie d'évaluation du risque biologique selon le principe de la gestion du risque appliquée dans un secteur particulier, à savoir le secteur de compostage, domaine d'activité où les AB sont présents du fait de l'activité elle-même.

1. Matériels et Méthodes

1.1 Description de la démarche

Ce paragraphe a pour objectif de décrire la démarche entreprise pour concevoir une méthodologie d'évaluation du risque biologique se basant sur le principe de la gestion graduée du risque pour les activités de compostage (paragraphe « L'évaluation qualitative »).

Dans ces travaux de thèse, pour faciliter le déploiement de la méthodologie par le gestionnaire de risque, notamment par la méconnaissance des agents biologiques présents au sein des plateformes de compostage et de leur dangerosité, il est proposé d'identifier le danger et le bande de danger des matières mises en œuvre. Un inventaire des agents biologiques potentiellement présents dans les matières est réalisé en se basant sur la littérature. La classification des agents biologiques est recherchée dans une base permettant de définir la dangerosité des matières. En parallèle, une matrice de hiérarchisation des dangers des agents biologiques est construite. La bande de danger des matières est déterminé à partir de cette matrice.

Cependant, les descripteurs de l'exposition doivent être identifiés lors de l'observation des tâches de travail. Ils doivent donc être accessibles aux gestionnaires de risque. Pour ce faire, un pool de descripteurs, identifié lors de la revue de la littérature, est alors créé. Une enquête et des visites d'entreprises sont réalisées pour questionner les futurs utilisateurs sur l'accessibilité ou la connaissance de ces descripteurs. À l'issue des résultats, les descripteurs définitifs et leurs niveaux par bandes sont définis et intégrés dans la méthodologie.

La **Figure 14** présente les étapes qui ont permis de définir la dangerosité et les descripteurs d'exposition de la méthodologie.

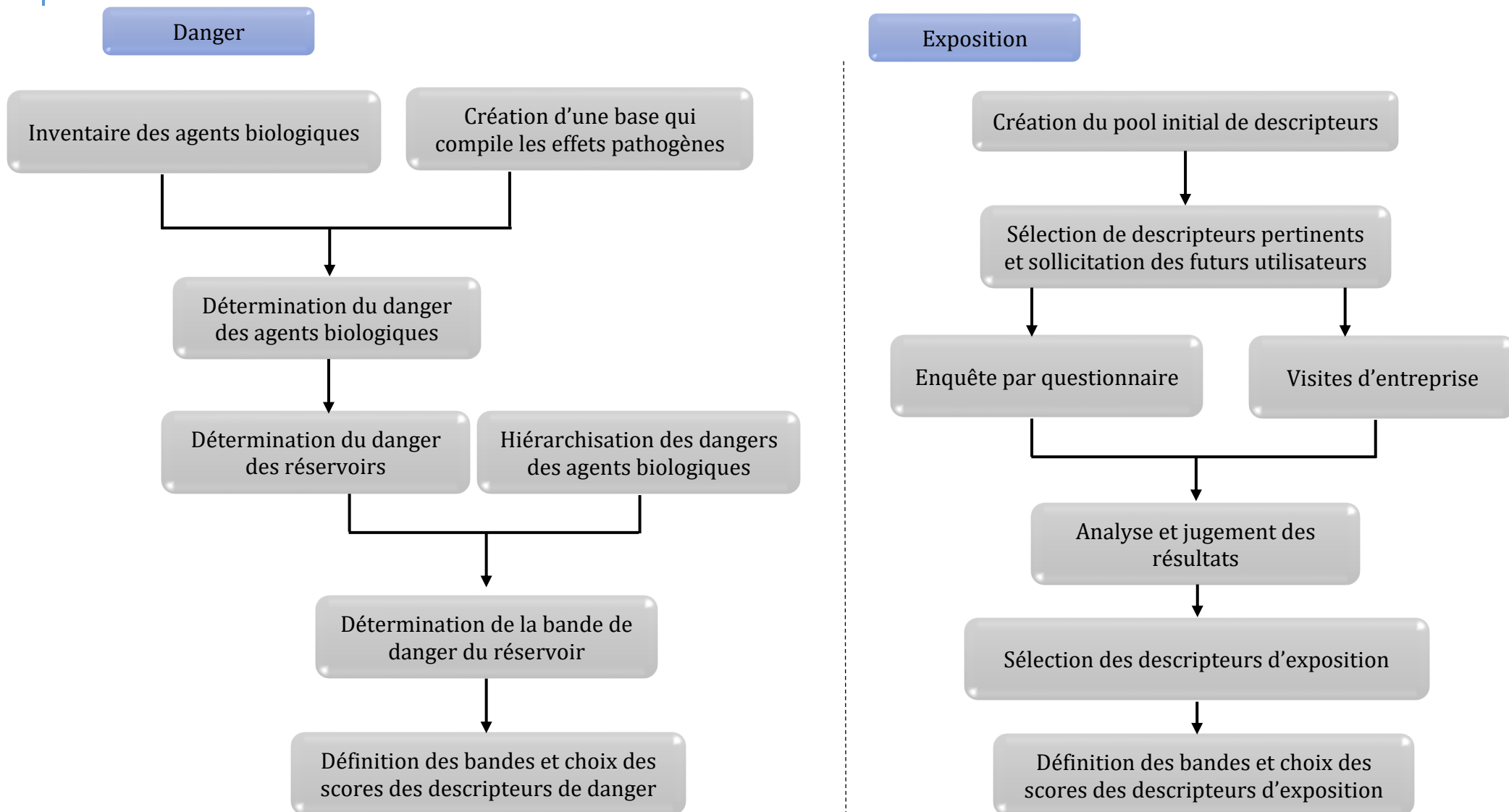


Figure 14 : Présentation de la démarche générale entreprise pour concevoir la méthodologie d'évaluation du risque biologique appliquée au compostage.

1.2 Identification des agents biologiques dans un réservoir

1.2.1 Généralités

Quelle que soit l'activité professionnelle, les agents biologiques se transmettent en suivant une chaîne de transmission. Cette chaîne part du réservoir d'agents biologiques, jusqu'à l'hôte potentiel, le salarié. Le réservoir est la source, le lieu où s'accumulent et prolifèrent les agents biologiques. Le réservoir peut être tout ou partie d'un être vivant (peau, salive, cuir, laine...) ou inanimé (sol, eau, objet contaminé). Pour qu'il y ait contamination, les agents biologiques doivent pouvoir sortir du réservoir ou que le travailleur ait accès à ce réservoir. La transmission peut se faire par voie respiratoire (inhalation), par contact avec la peau ou les muqueuses, par inoculation (blessure, morsure ou piqûre d'insecte) ou plus rarement par voie digestive.

1.2.2 Agents biologiques au sein des plateformes de compostage

Au sein des activités de compostage, les agents biologiques sont présents en mélange tout au long du processus de fabrication du compost dans différents réservoirs :

- dans les matières premières à composter, les intrants, tels que les ordures ménagères, les déchets verts, les boues de STEP... ;
- dans les matières qui constituent les phases de compostage : les phases mésophile, thermophile, de refroidissement et de maturation.

La détermination des agents biologiques les plus probables au sein de ces réservoirs s'est reposée sur l'exploitation de synthèses de la littérature :

- le contenu microbiologique des matières premières, telles que les déchets verts, les ordures ménagères, les biodéchets... (de Guardia, 2018; Schlosser & Huyard, 2008) (**Annexe 5** et **Annexe 6**) ;
- les communautés fongiques et bactériennes au cours du compostage en fonction de leur importance numérique évaluée par les techniques culturales (**Annexe 7**) (de Guardia, 2018).

Ces données dressent un portrait général de la diversité microbienne des intrants et des matières des phases de compostage. Dans ces inventaires, la diversité microbienne est définie de manière peu précise, par exemple, par le rang taxinomique du « genre » ou du « phylum » et peu de micro-organismes sont identifiés selon leur nomenclature binomiale. Or, pour permettre d'attribuer une classification des dangers la plus représentative des réservoirs, la détermination de la diversité microbienne des intrants et des composts doit être la plus précise possible.

Les AB identifiés dans les aérosols sont à l'image des communautés microbiennes contenues dans les intrants et dans les composts (Schlosser & Huyard, 2008). Ainsi, les données concernant le contenu biologique des intrants et des composts ont été croisées

avec les informations d'une revue qui synthétise la diversité bactérienne et fongique identifiée dans les aérosols au sein des plateformes de compostage par les techniques de culture et de séquençage des gènes ARNr 16S et ARNr 18S (**Annexe 8** et **Annexe 9**) (Wéry, 2014) (**Figure 15**). Les données de cette référence bibliographique, faisant office de référence de la biodiversité dans les aérosols, ont été mises en forme informatiquement pour faciliter le croisement des données.

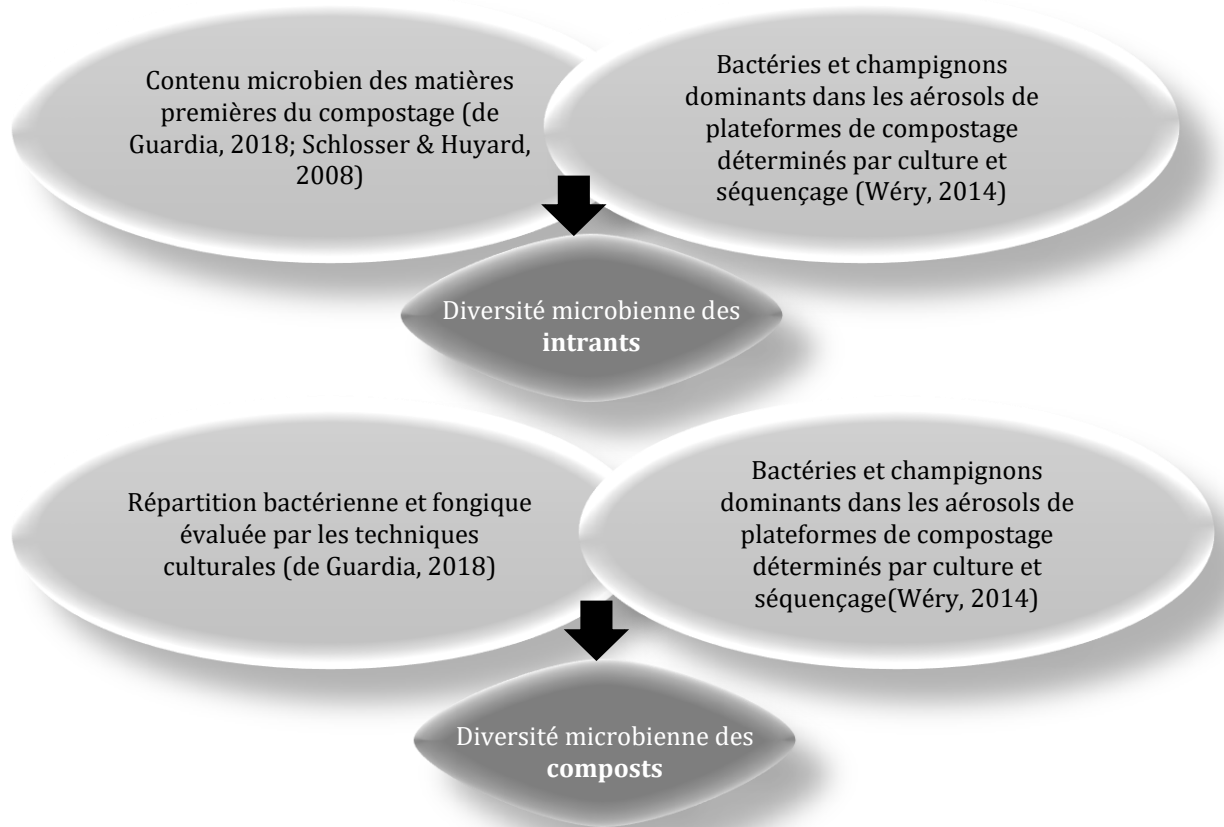


Figure 15 : Schématisation du croisement des données entre les contenus microbiens des intrants et des composts avec les communautés bactériennes et fongiques identifiées dans les aérosols de plateformes de compostage.

L'étape d'identification des espèces a consisté :

- pour les intrants, à associer les « espèces » identifiées dans les aérosols (Wéry, 2014) aux genres identifiés dans les matières premières (de Guardia, 2018; Schlosser & Huyard, 2008) ;
- pour les composts, à déterminer par phylums (de Guardia, 2018) la répartition bactérienne et fongique. La diversité microbienne identifiée dans les aérosols (Wéry, 2014) a donc été regroupée par phylum pour déterminer les espèces des différents composts. Seuls les « phylums » les plus représentatifs ont été recréés. Les phylums pour lesquels aucune espèce n'est identifiée dans les aérosols ont été reconstitués en recherchant les cinq « genres » majoritaires dans une base de données. Cette base, mise à disposition par Species 2000, fédération autonome de

dépositaires de bases de données taxonomiques, est disponible sur internet (<http://www.catalogueoflife.org/>).

Nous avons retenu les publications de Schlosser, de de Guardia et de Wery, mais nous avons conscience que le domaine d'activité des plateformes de compostage fait l'objet de publications qui paraissent régulièrement (Franchitti *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2020; Robertson *et al.*, 2019). Cependant, les publications retenues sont des synthèses d'articles, et le choix d'autres références n'altère en rien l'identification et la caractérisation des communautés microbiennes identifiées dans les plateformes de compostage.

1.3 Danger

1.3.1 Cas des substances chimiques et des nanomatériaux

Le danger est la propriété intrinsèque d'un produit, d'un équipement, d'une situation susceptible de causer un dommage à l'intégrité mentale ou physique du salarié (INRS, 2014a).

Pour les substances et les mélanges chimiques, l'identification et les éléments de communications des dangers intrinsèques sont définis selon le système général harmonisé (SGH) des Nations Unies (UN SGH (Osha, 2013)) décliné en Europe par le règlement N°1278/2008, dit règlement de 2008 (Règlement, 2008) (paragraphe « L'évaluation qualitative »).

Concernant les nanomatériaux, il n'existe pas de classification spécifique pour les nanomatériaux (NM). Ils sont à considérer comme des substances chimiques dangereuses, au même titre que d'autres composés chimiques. Les paramètres les plus influents qui sont susceptibles d'expliquer la toxicité accrue d'un NM sont liés à (Gatoo *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2012; Lynch *et al.*, 2014; Schmid & Stoeger, 2016) :

- la surface spécifique, expliquant une plus grande biodisponibilité (surface géométrique développée par un gramme de produit) ;
- la chimie de surface (et par conséquent la propension d'un NM à générer des espèces réactives de l'oxygène et in fine un stress oxydant) ;
- la morphologie / forme des particules constitutives du NM.

Cette liste s'est considérablement réduite par rapport à une liste plus ancienne. Une meilleure connaissance des NM a permis de mieux cibler les paramètres influant (Oberdörster *et al.*, 2005).

1.3.2 Cas des agents biologiques

Dans le contexte des agents biologiques, la directive 2000/54/CE a pour objet de protéger les travailleurs contre les risques pour leur sécurité et leur santé résultant ou susceptibles de résulter d'une exposition à des agents biologiques au travail, y compris par la prévention de ces risques. Au-delà de définir les agents biologiques, elle les classe en quatre groupes de risque en fonction de la sévérité de l'effet pathogène, du danger pour les travailleurs, du risque de propagation dans la collectivité et de l'existence de

prophylaxie ou d'un traitement efficace qu'ils présentent (paragraphe « Les dangers et les risques des agents biologiques »).

En France, cette classification réglementaire est reprise par l'arrêté du 18 juillet 1994 modifié et par le Code du travail (R. 4421-3 et R. 4421-4 et arrêté du 18 juillet 1994 modifié).

On distingue un groupe dit « non susceptible de provoquer une maladie chez l'homme », le groupe 1 et trois groupes pouvant présenter un risque d'infection dit pathogène : les groupes 2, 3 et 4. La liste des agents biologiques pathogènes est fixée par l'arrêté du 18 juillet 1994 modifié par l'arrêté du 27 décembre 2017. Elle dénombre 152 bactéries, 131 espèces, 6 genres et 8 familles de virus, 69 parasites et 26 champignons et classe chacun de ces agents biologiques dans l'un des groupes 2, 3 ou 4. Il n'existe pas de liste réglementaire d'agents biologiques classés dans le groupe 1.

La limite de cette classification est qu'elle se repose uniquement sur le risque infectieux sans prendre en compte les risques toxiques, immuno-allergiques ou cancérigènes. Cependant, l'arrêté précise pour chaque agent biologique les risques immuno-allergiques et toxiques en affectant une lettre A ou T aux agents biologiques considérés.

- A : agent biologique pathogène pouvant avoir des effets allergisants ;
- T : agent biologique susceptible de produire des toxines.

En Allemagne, l'ordonnance sur les agents biologiques (Biostoffverordnung, BioStoffV) met en œuvre la directive européenne 2000/54/CE. Les agents biologiques sont classés en fonction de leur espèce en quatre « règles techniques pour les agents biologiques » (*Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe*, TRBA) (BAuA, 2021) :

- TRBA 460 version du 14 avril 2020 : Einstufung von Pilzen in Risikogruppen (classification des 1 164 champignons dans les groupes à risque) ;
- TRBA 462 version du 14 avril 2020 : Einstufung von Viren in Risikogruppen (classification des 1 279 virus dans les groupes à risque) ;
- TRBA 464 version de juillet 2013 : Einstufung von Parasiten in Risikogruppen (classification des 977 parasites dans les groupes à risque) ;
- TRBA 466 version du 5 juin 2020 : Einstufung von Prokaryonten (Bacteria und Archaea) in Risikogruppen (classification des 14 931 procaryotes (bactéries et archées) dans les groupes à risque).

La classification allemande va bien au-delà de la classification européenne. En effet, dans la directive européenne, seuls les agents biologiques classés dans les groupes de risque 2, 3 et 4 sont mentionnés. Ceux appartenant au groupe 1 ne le sont pas. Dans la classification allemande, les agents biologiques classés dans les groupes 2, 3 et 4 dans les TRBA sont plus nombreux et les informations plus détaillées que celles de l'annexe III du règlement 2000/54/CE. De plus, les TRBA mentionnent les agents biologiques du groupe 1.

C'est pourquoi il est paru important et nécessaire de créer une base unique pour la méthodologie qui réunit la classification française et la classification allemande (**Figure 16**).

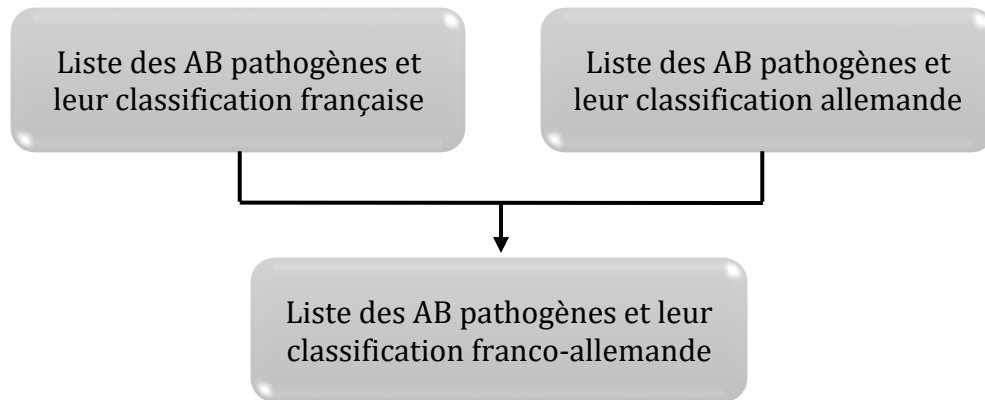


Figure 16 : La nouvelle base franco-allemande qui réunit les classifications française et allemande.

Dans cette nouvelle base, l'attribution du groupe de risque des AB répond à deux critères :

- si, pour une espèce d'agents biologiques, une classification française existe, alors, cette classification est conservée ;
- sinon, la classification allemande est retenue.

Pour les bactéries, les champignons et les parasites, les espèces sont spécifiquement identifiées selon leur nomenclature binomiale. La classification retenue répond exactement aux deux critères mentionnés.

Pour les virus, la classification française est attribuée à des espèces, des genres et des familles. La classification retenue dans la base franco-allemande dépendra de la classification française des espèces déclinées par genre ou par famille dans la classification allemande. Par exemple, dans la classification française, la famille des *Adenoviridae*, a une classification de 2. Quelle que soit la classification des espèces de cette famille dans la classification allemande, toutes les espèces de cette famille auront une classification de 2 dans la base franco-allemande.

Dans la suite de ma méthodologie, cette base franco-allemande selon le risque infectieux, sera la référence dans l'attribution de la classification des AB pathogènes.

Par ailleurs, la cancérogénicité des AB et des toxines et des allergènes produits par certains d'entre eux ou entrant dans leur constitution se repose sur la classification du CIRC (**Annexe 10**).

1.3.3 Détermination du danger d'un agent biologique

✚ Lorsque l'AB est défini selon sa nomenclature binomiale

Dans la littérature, la dénomination d'un AB peut être définie de plusieurs manières. Dans le meilleur des cas, l'identité d'un AB est donnée selon sa nomenclature binomiale, c'est-à-dire associant le nom du « *genre* » au nom de « *l'espèce* » (**Figure 17**). Dans cette situation, la dangerosité de cet AB est recherchée dans la classification franco-allemande et dans celle du CIRC.

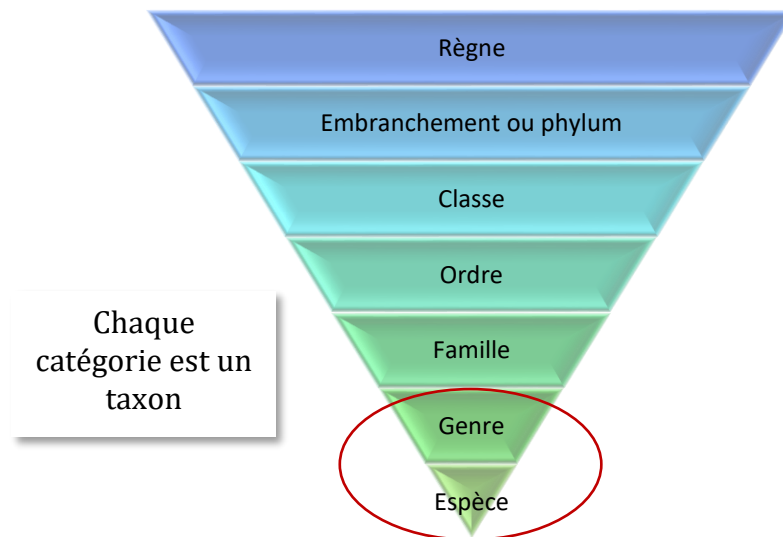


Figure 17 : Les niveaux hiérarchiques de la classification scientifique du monde vivant : les rangs taxinomiques (Raven *et al.*, 1971).

Par exemple, on souhaite déterminer la dangerosité du champignon *Aspergillus fumigatus*. Ce champignon est responsable d'infections sévères chez les humains et chez les oiseaux. Chez les humains, il est responsable de maladies comme l'aspergillose broncho-pulmonaire et l'aspergillose, chez les oiseaux il est responsable de l'aspergillose aviaire (INRS, 2013). L'*Aspergillus fumigatus*, défini par sa nomenclature binomiale, est une espèce de champignon du genre *Aspergillus*. Selon le classement franco-allemand, l'*Aspergillus fumigatus* a une classification de 2 avec la note A, et selon le CIRC, il n'est pas classé. La classification retenue est alors de 2 avec la note A. Autre exemple, la bactérie *Helicobacter pylori* est responsable de gastrite chronique qui persiste si l'infection n'est pas traitée. Dans de rares cas, le portage chronique de cette bactérie peut être responsable d'un certain type de cancer de l'estomac qui peut guérir en traitant cette infection (IARC, 1994). Dans la classification franco-allemande, cette bactérie a une classification de 2. Par ailleurs, cette bactérie est également classée dans le groupe 1 selon le CIRC. Dans cette situation, les deux types de dangers sont retenus pour cette bactérie.

Par ailleurs, la détermination du danger d'un AB tient compte de la possibilité qu'il produise des métabolites potentiellement cancérigènes. Dans ces circonstances, la classification de l'AB et de ses produits est recherchée dans la classification franco-allemande et dans celle du CIRC. La dangerosité retenue associera les dangers identifiés pour l'AB et ceux de ses métabolites. Par exemple, le champignon *Aspergillus flavus* est un

champignon qui produit l'un des plus puissants cancérigènes génotoxiques naturels, l'aflatoxine B1 (AFB1). Cette toxine est responsable de la contamination des céréales (maïs, graines, arachides, etc.) engendrant des aflatoxicoses aiguës en élevage. L'homme peut être exposé aux aflatoxines par voie alimentaire et par inhalation (ANSES, 2018). L'*Aspergillus flavus* a une classification dans la base franco-allemande de 2 avec la note A et T, tandis que l'AFB1 est classée dans le groupe 1 du CIRC. Pour l'*Aspergillus flavus*, la dangerosité retenue prend en compte ces deux types de danger.

Cependant, la dénomination des AB peut aussi être définie de manière moins précise, en employant des termes plus généralistes ou par des taxons différents comme ceux du « genre » ou de « l'espèce ». Ainsi, afin d'être exhaustif dans la prise en compte des dangers induits par ces AB, il est pertinent de proposer une manière de déterminer la dangerosité de ces AB.

✚ Lorsque l'agent biologique est défini autrement

Des AB peuvent être définis en associant par exemple le « genre » à une ou plusieurs « espèces » non identifiées, noté sp. ou spp :

- dans un premier cas, l'AB ayant cette nomenclature a une classification et son danger est identifié ;
- dans un second cas, il n'existe pas de classification pour cet AB et son danger n'est pas reconnu.

Ainsi, afin de prendre en compte le danger de cet AB : (i) la classification de danger de toutes les « espèces » du « genre » est recherchée dans la classification franco-allemande et (ii), dans un objectif de prévention, la plus haute classification de danger identifiée pour toutes les espèces du même genre sera attribuée à cet AB (**Figure 18**).

La classification de danger du genre correspondra à la plus haute classification de danger de toutes les espèces retrouvées au sein du genre.

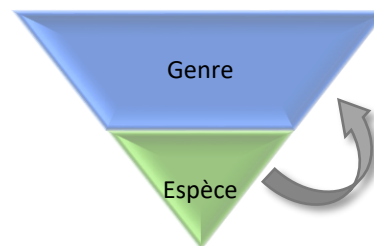


Figure 18 : Détermination de la classification de danger d'un genre en fonction de la classification de danger des espèces de ce genre.

Par exemple, dans le classement franco-allemand, une bactérie non identifiée du genre *Neisseria*, nommée *Neisseria* sp. ou spp, ne possède pas de classification de danger. Cependant, la plus haute classification de toutes les espèces du genre « *Neisseria* » est de 2. Ainsi, en présence d'une bactérie du genre *Neisseria* sp ou spp, la classification 2 lui sera attribuée.

D'autres AB sont définis de manière encore moins précise, par exemple par des taxons, tels que la « famille » ou plus généralement, le « phylum ». Dans cette situation, le concept utilisé précédemment est appliqué. La classification de toutes les espèces présentes au sein de cette « famille » ou de ce « phylum » est recherchée. La classification du rang taxinomique supérieur correspondra à la plus haute classification du rang taxinomique inférieur (**Figure 19**).

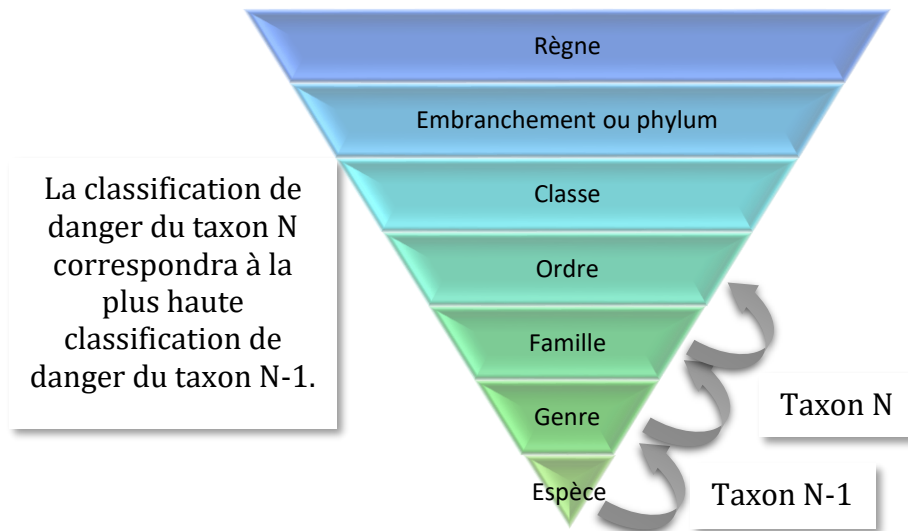


Figure 19 : Attribution d'une classification de danger selon le rang taxinomique. Lorsque les AB sont présents en mélange, la détermination du danger est différente.

1.3.4 Détermination du danger d'un réservoir

Le réservoir est la source, le lieu où s'accumulent et prolifèrent les agents biologiques. Il est alors constitué d'un mélange de micro-organismes. La détermination du danger du réservoir se repose sur le concept proposé au paragraphe « Identification des agents biologiques dans un réservoir », à savoir identifier les AB présents, rechercher la dangerosité de chacun d'entre eux, retenir la plus haute classification identifiée pour finalement, définir la dangerosité du réservoir.

Par exemple, un réservoir est constitué d'un mélange d'AB dont certains ont une classification de 2 et les autres une classification de 3 (**Figure 20**). La classification qui est retenue pour le réservoir est de 3.

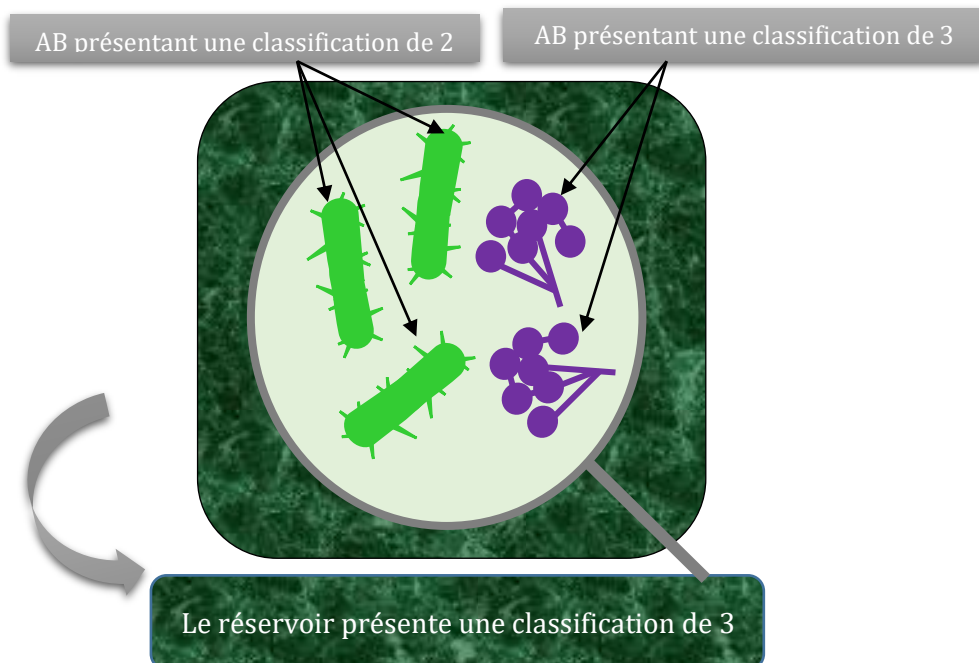


Figure 20 : Détermination du groupe infectieux d'un réservoir constitué d'AB ayant des classifications différentes.

En extrapolant ce concept à un réservoir constitué d'une communauté microbienne diversifiée, comprenant par exemple, des bactéries, des moisissures, des virus..., la classification du réservoir correspondra à la plus haute classification retrouvée au sein de tous les types d'AB (**Figure 21**).

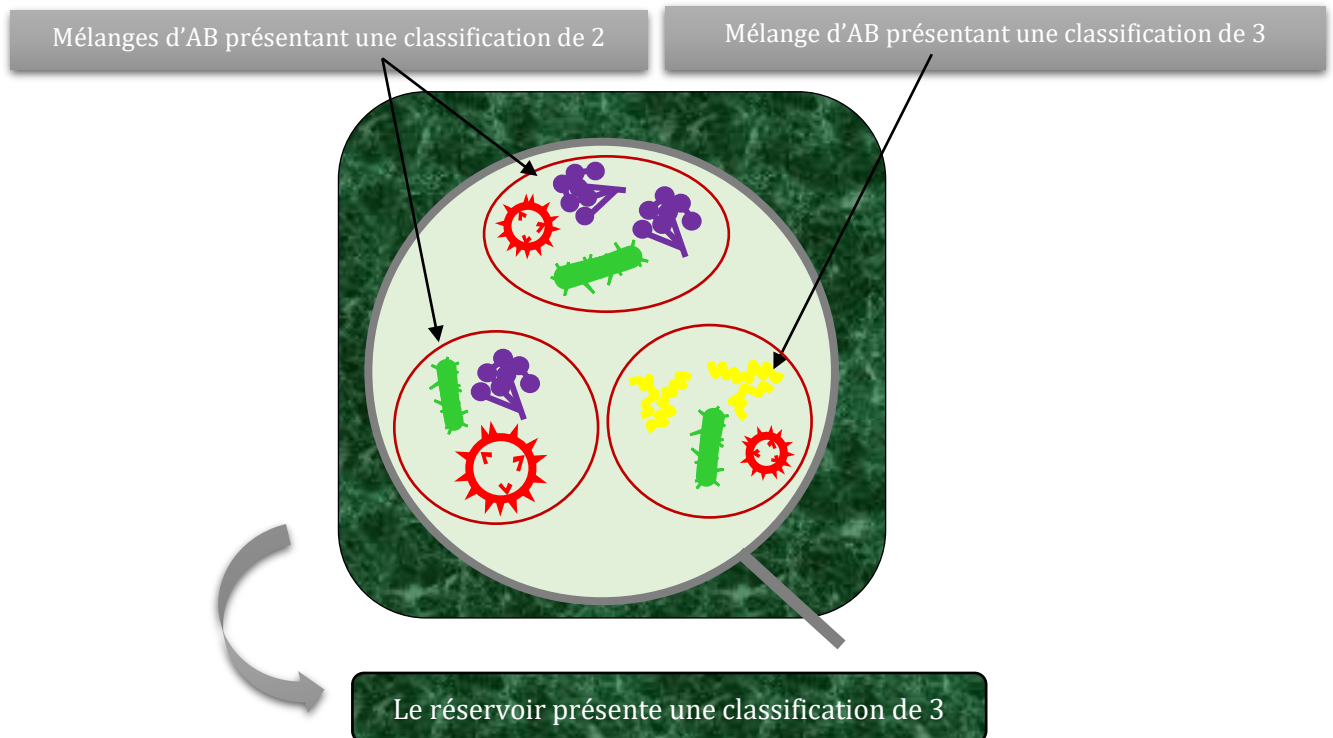


Figure 21 : Détermination de la bande de danger d'un réservoir composé de plusieurs familles d'AB.

1.4 Hiérarchisation des dangers

La dangerosité des micro-organismes n'est pas une information accessible ou qui peut être connue pour tous les micro-organismes à l'instar des substances chimiques. Les agents biologiques ne font pas l'objet d'une réglementation relative à la classification, à l'emballage et à l'étiquetage comme pour les substances et les produits chimiques (Règlement, 2008). Au-delà de la classification selon le risque infectieux, aucune catégorie de danger, ni aucune mention de danger n'est attribuée aux agents biologiques comme étant le reflet de leur dangerosité intrinsèque. Par ailleurs, il existe très peu de fiches de données de sécurité (FDS) pour les agents biologiques ou les réservoirs. Et bien que des valeurs guides ou des valeurs seuils de concentrations susceptibles d'induire des effets sur la santé soient proposées (Dacarro *et al.*, 2005; Eduard *et al.*, 2012; Fracchia *et al.*, 2006; Gladding & Gwyther, 2017), il n'existe pas de VLEP.

Même si la classification européenne se repose uniquement sur le risque infectieux, elle apporte tout de même une information sur le potentiel allergisant d'un AB ou sur la production de toxines. Par ailleurs, certains virus et certaines mycotoxines, même non classés Cancérogènes, Mutagènes ou Reprotoxiques (CMR) par l'Union européenne, le sont par le CIRC. Par exemple, les aflatoxines, le déoxynivalénol, les fumonisines... (IARC, 1993).

La hiérarchisation des dangers des agents biologiques s'inspire des modèles de gestion graduée des risques (Control Banding) appliqués aux substances chimiques (Marquart *et al.*, 2008; Naumann, 2005), à l'utilisation des nanomatériaux (ANSES, 2010a; Brouwer, 2012) et aux agents biologiques (Forestier *et al.*, 2012; J. Lavoie *et al.*, 2013; Pichenot *et al.*, 2008). Dans ces domaines, la hiérarchisation du danger par bande est une des composantes clés des méthodes d'évaluation du risque en milieu professionnel par control banding.

Ainsi, à défaut de mention de danger, de réglementation relative à la classification, à l'emballage et à l'étiquetage des AB, de VLEP, il est proposé de hiérarchiser les niveaux de dangers des AB, par bandes, en comparant leur potentiel toxique sur la base de la classification :

- franco-allemande ;
- du CIRC.

Initialement, une première hiérarchisation des dangers par bandes a été élaborée en s'inspirant du modèle de Brooke (Brooke, 1998). Celle-ci :

- intègre les différents types de risques, infectieux, toxiques, immuno-allergiques et cancérigènes tout en essayant de distinguer les effets aigus des effets chroniques, ce qui amène au second point ;
- s'inspire de la classification des dangers des substances chimiques du règlement CLP en déclinant :
 - le risque de type toxique en deux catégories : les agents ayant une toxicité spécifique pour certains organes cibles après une exposition unique (effet aigu) et les agents ayant une toxicité spécifique pour certains organes cibles après une exposition répétée (effet chronique). Les mycotoxines et les endotoxines, substances produites par les agents biologiques sont responsables des effets toxiques. Les mycotoxines sont des métabolites secondaires de moisissures appartenant notamment aux genres *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium*. Elles peuvent se développer sur la plante au champ ou en cours de stockage et sont douées de potentialité toxique à l'égard de l'homme et des animaux. Plus de 300 métabolites secondaires ont été identifiés, mais seule une trentaine possèdent des propriétés toxiques préoccupantes (Ostry *et al.*, 2017). La toxicité des mycotoxines dépend de la molécule en cause, de la fréquence d'exposition et de la quantité absorbée. Certaines mycotoxines ont une toxicité aiguë très marquée (exposition unique à forte dose) elles vont entraîner une intoxication aiguë avec apparition rapide de symptômes (diarrhées, vomissements...), mais ce type d'exposition est exceptionnelle. D'autres mycotoxines présentent des effets chroniques, avec des effets cumulatifs sur le long terme, pouvant induire des cancers ou des déficiences immunitaires. L'exposition répétée à de faibles doses (effets chroniques) est la plus redoutée en raison des habitudes alimentaires ainsi que du pouvoir de rémanence de ces toxines. Les effets néfastes des mycotoxines sont très vastes : cancérigènes, mutagènes, toxiques pour la reproduction, immunomodulateurs, œstrogéniques, nécrosants, neurotoxiques, néphrotoxiques, hépatotoxiques et hématotoxiques. Par ailleurs,

l'exposition aux endotoxines a également des effets délétères. Une exposition massive par inhalation à des poussières organiques contaminées par des endotoxines (effet aigu) est associée au syndrome toxique des poussières organiques (Organic Dust Toxic Syndrom : ODTS), qui se traduit par une réaction générale (fièvre, malaises, douleurs diffuses) et respiratoire (gêne thoracique, toux). La répétition des expositions et les phénomènes inflammatoires qu'elles provoquent sont à l'origine de troubles respiratoires plus marqués de type bronchite. En cas d'exposition prolongée (effet chronique), ces affections prennent la forme d'une bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) ;

- le risque de type immuno-allergique en distinguant les allergisants respiratoires et les allergisants cutanés. En effet, les micro-organismes ou leurs métabolites secondaires peuvent avoir des effets allergisants. Certaines moisissures par exemple ou les bactéries actinomycètes peuvent engendrer des manifestations allergiques telles que des allergies cutanées et, plus souvent des rhinites, asthmes ou pneumopathies d'hypersensibilité. Par exemple, parmi les maladies provoquées par les moisissures du genre *Aspergillus spp.*, figurent des allergies cliniques telles que l'aspergillose broncho-pulmonaire allergique, rhinite, maladie du poumon du fermier. Autre exemple, deux espèces, l'une du genre *Aspergillus*, *Aspergillus sydowii* et l'autre du genre *Penicillium*, *penicillium griseofulvum*, produisent une mycotoxine responsable de réactions allergiques cutanées, un érythème multiforme, au-delà d'être une substance qui peut être cancérigène pour l'homme (groupe 2B) (IARC, 2001; Rustin *et al.*, 1989; Tabuc, 2007).
- prend en compte la classification des métabolites classés par le CIRC :
 - Groupe 1 : aflatoxines... ;
 - Groupe 2B : fumonisines B1, B2, ochratoxine A... ;
 - Groupe 3 : citrinine, patuline, zéaralénone....

Cette première proposition a fait l'objet de discussions entre experts en microbiologie, en toxicologie, en pharmacie, en évaluation du risque, dans la cadre de la présente thèse. À l'issue de ces échanges, il a été conclu que, par manque de connaissance sur la toxicité des agents biologiques ou de leurs métabolites, il n'était pas envisageable de :

- distinguer les agents présentant une toxicité spécifique pour certains organes cibles après une exposition unique et les agents présentant une toxicité spécifique pour certains organes cibles après une exposition répétée ;
- décliner les agents allergisants respiratoires des agents allergisants cutanés.

Par ailleurs, au cours des échanges, l'aspect cumulatif des effets a été remis en question notamment par manque de données sur cet aspect. Cependant, si la distinction des agents biologiques ayant une toxicité pour un organe cible suite à une exposition unique ou une exposition répétée ne peut pas se faire, à l'instar des effets allergisants, il n'y aurait plus qu'une hiérarchisation des risques infectieux. La prise en compte des différents types de risque et d'effets ne serait pas exhaustive et la distinction entre les effets aigus et les effets chroniques ne se ferait plus. Par ailleurs, l'effet cumulatif des dangers potentiels des agents biologiques n'apparaîtrait pas.

Ainsi, une seconde matrice de hiérarchisation des dangers classée par bandes en fonction de la classification des AB et du potentiel cancérigène, considérée comme la matrice finale, est créée pour la suite du travail.

1.5 Processus d'attribution d'une bande de danger

Une bande de danger est une catégorie qui définit le niveau de danger d'un toxique.

Le processus qui permet d'attribuer une bande de danger à un AB, à un réservoir et leurs métabolites produits est commun. Il consiste à :

- identifier l'AB utilisé seul, les AB les plus probables au sein du réservoir et les métabolites produits par ces AB ;
- déterminer la dangerosité de l'AB, du réservoir et des métabolites ;
- attribuer une bande de danger à partir de la classification de l'AB, de la classification du réservoir et de la classification des métabolites en se référant à la matrice de hiérarchisation des dangers. En présence de plusieurs types de dangers que présente l'AB, le mélange d'AB et les métabolites, c'est la bande de danger la plus élevée qui est retenue.

Reprenons les exemples cités au paragraphe « Détermination du danger d'un agent biologique ». *L'Aspergillus fumigatus* a une classification franco-allemande de 2 avec la note A et n'est pas classé selon le CIRC. En se référant à la matrice de hiérarchisation des dangers, la bande de danger attribuée à ce champignon est la bande N°3. Second exemple, la bactérie *Helicobacter pylori* présente deux types de dangers. Elle est classée 2 dans la classification franco-allemande et est classée dans le groupe 1 selon le CIRC. La bande de danger retenue pour cette bactérie est la bande de danger la plus élevée, soit la bande N°4. Dernier exemple, *Aspergillus flavus* a une classification franco-allemande de 2 avec la note A et T et son métabolite l'AFB1 est classé dans le groupe 1 du CIRC. La bande de danger attribuée à ce champignon est la bande la plus élevée, la bande N°4.

1.6 Descripteurs d'exposition

Le déploiement d'une méthodologie se reposant sur le modèle de la gestion de risque graduée est d'autant plus favorisé si elle présente des descripteurs accessibles et en nombre limité. Ces modalités permettent de diminuer la complexité de la méthodologie et de faciliter son application par des non-experts (Maidment, 1998). Selon la **Figure 14**, pour assurer l'accessibilité des descripteurs d'exposition de la méthodologie aux futurs utilisateurs, les étapes ont consisté tout d'abord à définir un pool initial de descripteurs en exploitant des démarches d'EvRB existant dans le domaine du risque biologique, mais également dans d'autres domaines. Des descripteurs ont été sélectionnés et ont été soumis aux futurs utilisateurs potentiels afin d'estimer l'accessibilité des informations. Pour ce faire, deux moyens ont été utilisés. D'une part, une enquête a été réalisée par questionnaire auprès des exploitants de plateformes de compostage et d'unités de méthanisation. D'autre part, des visites d'entreprises des mêmes secteurs d'activité ont été réalisées. Celles-ci avaient trois objectifs : se rendre sur site et se conforter à la réalité de terrain, confronter les résultats issus de l'enquête et échanger avec le chef d'établissement ou le gestionnaire de risque pour recueillir leur regard critique sur les

descripteurs. Les réponses des exploitants collectées par l'enquête et les visites d'entreprise ont été analysées et des descripteurs définitifs ont été sélectionnés pour intégrer la méthodologie.

1.6.1 Conception du pool initial de descripteurs

La constitution du pool initial des descripteurs d'exposition soumis aux exploitants repose sur un inventaire de descripteurs intervenant dans l'estimation du risque provenant de sources différentes.

Premièrement, les descripteurs inventoriés sont ceux qui participent à la définition du risque en général. Celui-ci est caractérisé par les deux composantes :

- **la probabilité de la survenance d'un dommage**, liée à la *fréquence d'exposition et/ou à la durée d'exposition* au danger et à la *probabilité d'apparition du phénomène dangereux* ;
- **la gravité du dommage**.

Notre choix s'est orienté vers ces descripteurs, d'une part parce que le nombre de descripteurs est faible et d'autre part, pour établir si le risque biologique peut être évalué par les futurs utilisateurs avec des descripteurs généraux.

Deuxièmement, les descripteurs qui constituent les démarches d'EvRB combinant conjointement les typologies « analyse au poste de travail » et « analyse par niveau de risque » (Burzoni *et al.*, 2020) ont été inclus dans cet inventaire (**Annexe 4** : Characteristics of assessment approaches combining "workstation analysis" and "assessment by risk level).

). Ces descripteurs sont par exemple :

- la mesure de concentration des agents biologiques ;
- le temps d'exposition ;
- la fréquence d'exposition ;
- la gravité du dommage ;
- l'efficacité des moyens de prévention ;
- ...

Troisièmement, les descripteurs de démarches ou d'outils d'évaluation du risque liés à l'utilisation de produits chimiques ou liés à la manipulation des nanomatériaux ont été inventoriés. Les sources exploitées sont :

- l'outil SEIRICH, Système d'Évaluation et d'Information sur les Risques Chimiques (Miraval, 2018) ;
- le Stoffenmanager (Marquart *et al.*, 2008) ;
- le Coshh essentials (Maidment, 1998) ;
- l'EMKG tool (BAuA, 2016) ;
- l'outil développé par l'ANSES : Développement d'un outil de gestion graduée des risques spécifique au cas des nanomatériaux (C Ostiguy *et al.*, 2011) ;

- le guide pour travailler en toute sécurité avec les nanomatériaux et les produits, le guide pour les employeurs et les employés (Guidance working safely with nanomaterials and products, the guide for employers and employees) (Ralf, 2011).

Quatrièmement, la méthodologie proposée permet de réaliser une évaluation qualitative. Celle-ci peut être complétée par une évaluation quantitative et faire l'objet de campagnes de mesures dont les résultats sont renseignés dans la base. Ainsi, pour qu'il y ait une correspondance entre l'évaluation d'une situation de travail et la caractérisation de l'exposition de cette même situation, les descripteurs de la démarche d'évaluation qualitative doivent être communs avec les descripteurs de Colchic. Par exemple, la fréquence, la durée d'exposition, le procédé de travail... Ces descripteurs complètent cet inventaire.

Enfin, des descripteurs caractéristiques liés aux procédés techniques de compostage et de méthanisation ont été intégrés, par exemple, la température ou l'humidité. Les descripteurs spécifiques ou intrinsèques au domaine du risque chimique ou des nanomatériaux ont été écartés, car inadéquats pour évaluer le risque biologique. Ce sont par exemple, la structure cristalline, la solubilité, la chimie de surface...

L'inventaire de ces descripteurs a permis de définir un pool initial (**Figure 22**).

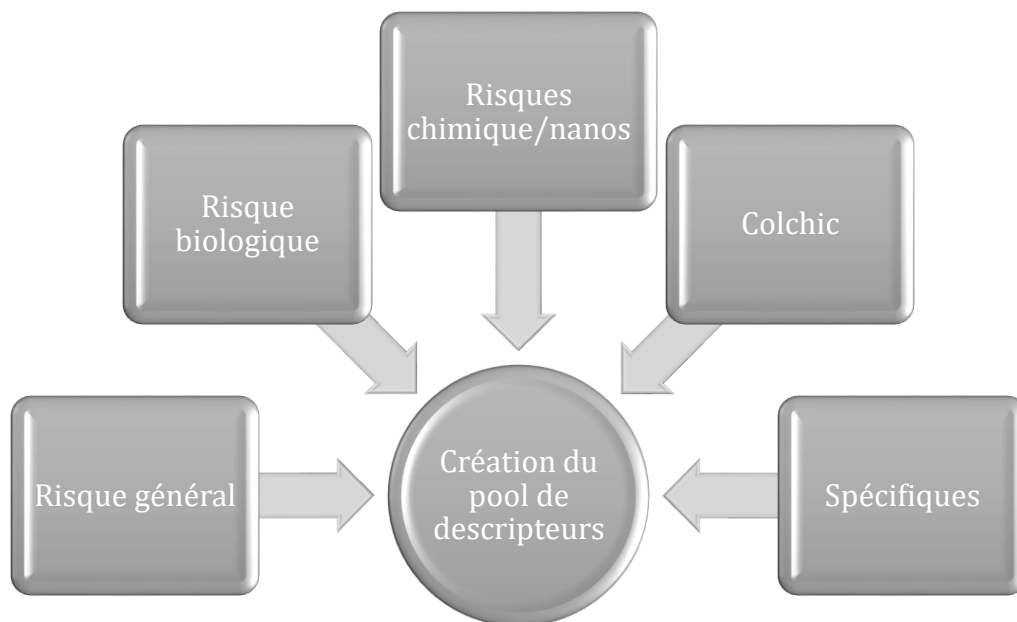


Figure 22 : Détermination du pool initial de descripteurs d'exposition.

1.6.1.1 Sollicitation des futurs utilisateurs de la méthodologie

L'accessibilité des descripteurs par les futurs utilisateurs a été estimée en sollicitant leur avis par l'intermédiaire d'une enquête par questionnaire et de visites d'entreprises.

L'enquête a été réalisée par le biais d'un questionnaire. Ce dernier expose les objectifs de l'enquête, présente les différents descripteurs et leur définition, et sollicite l'avis du futur utilisateur quant à l'accessibilité de l'information.

Le questionnaire a été envoyé aux exploitants de plateformes de compostage et d'unités de méthanisation. Il a également servi de base d'échanges lors des visites d'entreprises.

1.6.1.2 Identification des établissements pour l'enquête et les visites

L'identification des établissements s'est reposée sur l'exploitation d'une base de données mise à disposition sur le site internet Sinoé® ou « Système d'INformation et d'Observation de l'Environnement », mis en place par l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Cette base a été conçue pour apporter des informations sur la collecte et l'élimination des déchets à tous les types de public. La thématique « Déchets organiques » présente les données concernant les déchets organiques non dangereux (déchets de stations d'épuration, déchets des industriels agroalimentaires...), le compostage domestique, les installations de méthanisation et les plateformes de compostage. Le site permet également de géolocaliser les établissements sur une carte interactive. Les établissements de la région Grand Est de la France ont été privilégiés pour réaliser les interventions dans la mesure où il y a une représentativité des établissements au niveau national.

L'enquête

Dans le cadre de l'enquête, les établissements répertoriés pour les activités de compostage et de méthanisation ont été retenus dès lors que l'activité de méthanisation peut être une activité en aval du compostage. Le fichier d'adresses mail provient de l'extraction de la base de données Sinoé®.

Les adresses mail retenues dans ce fichier sont celles des exploitants et, à défaut des maîtres d'ouvrage. Le fichier est construit de telle sorte qu'un seul questionnaire soit envoyé par exploitant/maître d'ouvrage, quel que soit le nombre d'établissements dont l'exploitant ou le maître d'ouvrage est responsable. Les établissements répertoriés en double dans les différents domaines d'activités ont été supprimés.

Le questionnaire a été construit avec le logiciel éditeur de questionnaires Sphinx IQ2®. Il permet de rendre le questionnaire interactif en fonction des réponses et de le combiner avec le fichier d'adresses mail. Chaque destinataire, directeur de site, exploitant, maître d'ouvrage ou toute personne impliquée dans la gestion du risque, reçoit par mail un lien unique permettant de compléter le questionnaire en ligne. Les réponses sont enregistrées sur un serveur local sécurisé de l'INRS. Il a été prévu que le questionnaire puisse être complété en plusieurs fois tant que l'enquête n'est pas clôturée. La collecte et le traitement

des données ont été effectués dans le respect du Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD).

Le questionnaire se compose de deux parties. Les questions de la première partie étaient destinées à vérifier des informations pré remplies obtenues à partir de la base Sinoé®. Ces questions portaient sur le nom de l'établissement, le code postal et la ville. Ensuite pour chaque établissement, les questions portaient sur l'effectif salarié et le type d'activité concerné par l'établissement. La deuxième partie du questionnaire portait sur les descripteurs suggérés du risque biologique, comptabilisant 24 questions. Les descripteurs étaient présentés un à un et par catégorie : les descripteurs définissant le danger, les descripteurs d'exposition, les descripteurs de prévention et d'autres descripteurs potentiels.

Le but de l'enquête n'était pas de s'intéresser à la démarche d'évaluation du risque mise en œuvre dans les établissements, mais de savoir quelles étaient les informations que les répondants peuvent collecter pour mener à bien leur évaluation. Par souci de simplification du questionnaire, pour chaque descripteur, la question posée était « Êtes-vous capable d'identifier, de connaître ou d'estimer le descripteur proposé ? » Le répondant avait le choix entre deux réponses : « Oui » ou « Non ». Pour aider l'exploitant, des exemples et/ou des schémas étaient présentés pour chaque descripteur. Voici en exemple une question de l'enquête : « Connaissez-vous la dangerosité des agents biologiques ou les risques qu'ils peuvent engendrer sur la santé ? », par exemple pouvez-vous dire si les agents biologiques présentent :

- pas ou peu de danger pour l'individu et la collectivité ;
- un danger pour l'individu et un risque de propagation dans la collectivité probable ;
- un danger sérieux pour l'individu et un risque de propagation dans la collectivité élevée.

Avant la phase d'envoi du questionnaire, une étape de validation interne (cinq experts de l'INRS), puis une étape de validation externe (huit experts acteurs de prévention dans le domaine du compostage/méthanisation) ont permis de finaliser le questionnaire.

L'envoi a été planifié le 20 décembre 2018. Deux relances ont été programmées, les 10 janvier et 5 février 2019 afin de garantir un taux de réponse satisfaisant. L'enquête a été clôturée le 4 mars 2019.

Les visites

Pour être représentative de l'activité au niveau national, la sélection des établissements s'est reposée sur la typologie des plateformes de compostage caractérisée en cinq classes de plateformes (ADEME Département gestion biologique et sols, 2007) :

- les plateformes traitant plus de 20 000 t/an de déchets, tous types d'intrants confondus (12 %) ;
- les plateformes de moins de 20 000 t/an traitant :
 - des déchets verts seuls (où les déchets verts représentent plus de 95 % des intrants) (50 %) ;

- des boues d'épuration (y compris les installations qui traitent également d'autres déchets) (17 %) ;
- des biodéchets des ménages (6 %) ;
- d'autres types de déchets organiques (principalement : effluents d'élevage, marcs de raisin, sous-produits de l'industrie agroalimentaire (IAA...)) (15 %).

La sélection de plateformes de compostage a été effectuée sur le type de déchets traités, les déchets verts et sur la capacité de traitement, inférieur à 20 000 t/an.

Les exploitants des entreprises ont été contactés afin de leur présenter l'objectif et les motifs de ces visites et de convenir d'une date d'intervention.

Il a été proposé de décliner l'intervention en deux parties. La première partie consistait en une présentation de l'activité par l'exploitant en réalisant une visite des installations selon le cheminement du process de traitement, de l'entrée des matières premières au stockage du compost frais. La deuxième partie était réalisée en salle pour pouvoir échanger sur les descripteurs de risque. Le support utilisé lors des échanges et qui présentait les différents descripteurs était une déclinaison du questionnaire utilisé pour l'enquête.

En vue de préparer les visites, il a été réalisé un inventaire des travaux menés par les équipes de L'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) dans les secteurs de compostage et de méthanisation. En 2005, la nécessité d'études épidémiologiques auprès des travailleurs du compostage avait été démontrée (Gagnaire F, 2005). Ainsi en 2007, une évaluation de la stabilité dans le temps des structures techniques utilisées ainsi que des salariés a été réalisée dans l'objectif de mener une étude épidémiologique sur la santé respiratoire (Demange *et al.*, 2020). Par ailleurs, en 2006, d'autres travaux ont consisté à caractériser les risques chimiques et biologiques liés aux activités de compostage (Poirot *et al.*, 2010). Depuis 2013, des unités de méthanisation, dont certaines ont une activité de compostage, font l'objet d'investigations afin de prévenir les risques chimiques et biologiques (Dabert, 2019). Les investigateurs de ces recherches ont été contactés afin d'échanger sur les travaux de cette thèse pour avoir davantage de connaissances sur la filière de compostage et de méthanisation et pour permettre d'inventorier les établissements qui ont fait l'objet d'interventions.

1.6.2 Le traitement et l'interprétation des données recueillies

Les réponses collectées lors des visites d'établissements ont complété les réponses du questionnaire en ligne pour former un seul et unique fichier à traiter. Le traitement statistique a été réalisé avec Sphinx iQ2® et Excel 2016.

1.6.3 Choix des descripteurs d'exposition

Le choix des descripteurs constituant la méthodologie d'évaluation du risque biologique s'est reposé sur :

- l'expertise concernant les descripteurs prioritaires ayant une implication dans l'estimation du risque (Cherrie *et al.*, 1996) ;
- la définition du descripteur. Les descripteurs identifiables sont privilégiés (Burzoni *et al.*, 2020) ;
- les résultats issus de l'enquête. Le taux de réponse des répondants reflète l'accessibilité ou la connaissance de l'information. Un taux élevé semble indiquer que le descripteur est une donnée connue ou accessible. Les descripteurs ayant des taux élevés sont ceux qui peuvent être sélectionnés. Un taux de réponse plus faible met en évidence l'inaccessibilité, la méconnaissance ou l'incompréhension de l'information. Ces réponses permettent de nous orienter dans le choix des descripteurs à conserver et dans le degré de précision des définitions à apporter ;
- les échanges réalisés lors des visites d'établissements qui permettent, non seulement d'avoir un point de vue relatif aux descripteurs, mais également sur la clarté des définitions des descripteurs.

1.6.4 Définition des bandes et choix des scores des descripteurs

Plusieurs sources ont été consultées pour définir les bandes des descripteurs et pour attribuer un score aux différentes bandes :

- les démarches existant dans les domaines du risque biologique, chimique et des nanomatériaux qui ont été étudiées en Partie 3 ;
- les descripteurs de la base de données Colchic ;
- le référentiel Reach des procédés (PROC), le « guide des exigences d'informations et d'évaluation de la sécurité chimique » (ECHA, 2015).

Par ailleurs, des précisions ont été apportées dans la définition de certains descripteurs en se référant aux caractéristiques propres à l'activité de compostage.

La détermination du nombre de bandes des descripteurs de la méthodologie s'inspire du nombre de bandes existant dans les démarches étudiées et dans Colchic. Ces outils ou ces démarches sont déjà utilisés par les gestionnaires de risque. Il paraît pertinent de s'inspirer de ce qui existe, de ce qui est connu et utilisé.

Les sources bibliographiques qui publient les scores des bandes de descripteurs sont très rares. En s'appuyant sur celles-ci, l'attribution et la pondération des scores associés aux

bandes tiennent compte de leur importance. Le choix des scores s'apparente à des modèles logarithmiques (Marquart *et al.*, 2008; Miraval, 2018). Par ailleurs, des pondérations ont été choisies afin de mieux tenir compte de la réalité. Par exemple, la proximité de la source contribue de façon plus importante au niveau global d'exposition que les procédés de captage (J. Lavoie *et al.*, 2013). Pour déterminer les scores définitifs, plusieurs tests ont été effectués pour évaluer la logique dans le choix de ces scores.

Le mode de traitement des scores qui permet de définir le niveau de risque doit être simple pour les utilisateurs. Le choix s'est porté sur une opération mathématique pratique, telle qu'une multiplication (J. Lavoie *et al.*, 2013; Marquart *et al.*, 2008; Vincent *et al.*, 2005).

1.7 Calcul des bandes des niveaux de risque par inhalation et par contact cutané

Le score de risque est associé à un niveau de risque classé en trois bandes : le niveau de risque « sérieux » en rouge, le niveau de risque « préoccupant » en orange et le niveau de risque « modéré » en vert. Les scores des descripteurs de risque sont donc associés aux bandes du niveau de risque.

La première situation estimée « modérée », ayant le niveau de risque le plus faible, est associée aux scores de descripteurs de risque ayant tous les niveaux les plus faibles. La dernière situation considérée comme la plus « sérieuse », ayant le niveau de risque le plus élevé, est associée aux scores de descripteurs de risque ayant les niveaux les plus élevés.

L'identification des niveaux de risque intermédiaires, définissant ainsi les trois bandes de niveaux de risque, se repose sur la détermination de la première situation considérée comme « préoccupante », soit la première situation orange et la détermination de la première situation considérée comme « sérieuse », soit la première situation rouge. La délimitation du niveau de risque modéré au niveau préoccupant et du niveau préoccupant au niveau sérieux a été calculée à partir des scores de descripteurs intermédiaires de risque. Ce calcul a été effectué pour déterminer les bandes du niveau de risque par inhalation et par contact cutané.

2. Résultats – Discussion

2.1 Agents biologiques présents dans les réservoirs des plateformes de compostage

Le travail a permis d'obtenir un inventaire des agents biologiques par « phylums », « genres » et « espèces ». Ainsi, il a été dénombré, pour la répartition bactérienne et fongique, 9 phylums, 100 genres et 140 espèces différentes.

La diversité microbienne dans les intrants et les composts a été déterminée comme préconisé au paragraphe « Identification des agents biologiques dans un réservoir ».

2.1.1 Identification des AB dans les intrants

Pour les intrants, le croisement des données a permis de préciser la communauté d'AB dans sept réservoirs :

- les boues de stations d'épuration ;
- les déchets d'élevage de bétail ;
- les effluents d'élevage ;
- les ordures ménagères ;
- les coproduits (déchets verts, écorces, palettes broyées, sciure, copeaux de bois) ;
- les bio déchets ;
- les résidus agricoles et de l'industrie agroalimentaire.

Pour ces réservoirs, il a été dénombré six types d'AB (bactéries, virus, protozoaires et helminthes, champignons et levures) qui comprennent 23 phylums, 72 genres et 114 espèces.

2.1.2 Identification des agents biologiques dans les composts

La diversité taxinomique bactérienne et fongique des composts est déterminée par phylums en fonction de leur importance numérique évaluée par les techniques culturales (de Guardia, 2018). Les espèces identifiées dans les aérosols (Wéry, 2014) ont été regroupées par phylum pour déterminer la diversité microbienne des différents composts.

Sur les dix phylums majoritaires identifiés dans les composts (de Guardia, 2018), quatre ne sont pas représentés dans les aérosols : *Deinococcus -Thermus*, *Oomycota*, *Deuteromycota* et *Chytridiomycota*. Comme énoncés au paragraphe « Identification des agents biologiques dans un réservoir », les 5 genres principaux de ces phylums ont été recherchés (**Tableau 11**).

Tableau 11 : Synthèse du nombre des phylums, de genres et d'espèces microbiens constituant les différents composts.

Phases de compostage	Nombre		
	De phylums	De genres	D'espèces
Mésophile	5	88	129
Thermophile	5	78	176*
De refroidissement	8	97	1 538*
Maturation	9	103	2 435*
*: ce nombre comprend le nombre total d'espèces des genres principaux identifiées dans la base de données (Species 2000, 2020)			

Cette démarche a permis de préciser l'identité des espèces majoritaires présentes dans les réservoirs. Cette étape était essentielle pour (i) faciliter la recherche de la classification

des dangers pour la santé des espèces, (ii) définir la classification des dangers pour la santé des réservoirs et (iii) déterminer les bandes de danger de ces réservoirs.

2.2 Création de la base de classification franco-allemande

2.2.1 La classification française

La réglementation française attribue une classification des dangers à 378 espèces (**Tableau 12**). Elle attribue également une classification de groupe 2 à six familles et huit genres de virus (**Tableau 13**).

Tableau 12 : Nombre d'espèces classées selon la réglementation française.

Type d'agents biologiques	Nombre d'espèces	Classification			
		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Bactéries	152	/	124	28	/
Champignons	26	/	19	7	/
Virus	131	/	55	60	16
Parasites	69	/	59	10	/
Total	378	/	257	105	16

Tableau 13 : Familles et genres de virus classés dans le groupe 2 dans la classification française des dangers.

Familles	Genres
Adenoviridae	Autres complexes de la chorioméningite lymphocytaire-Lassa
Astroviridae	Autres complexes Tacaribe
Autres Caliciviridae	Autres Hantavirus
Autres Coronaviridae	Autres Orthobunyavirus connus comme pathogènes)
Autres Flavivirus connus pour être pathogènes	Coltivirus
Torovirida	Rotavirus
	Orbivirus
	Reovirus

2.2.2 La classification allemande

La classification allemande a été sélectionnée parmi d'autres classifications étrangères, par exemple celle du Canada (Loi sur les agents pathogènes humains et les toxines), des Pays-Bas (Classification des agents biologiques du RIVM (Klein, 2012)), du Royaume-Uni

(La liste approuvée des agents biologiques du HSE (HSE, 2013)), etc. En effet, d'une part, elle présente davantage d'espèces classées selon la directive 2000/54/CE et d'autre part, elle comptabilise des espèces classées dans le groupe 1.

La classification allemande comptabilise 18 351 espèces et sous-espèces classées (**Tableau 14**).

Tableau 14 : Nombre d'espèces classées selon la réglementation allemande.

Type d'agents biologiques	Nombre d'espèces	Classification des dangers			
		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Bactéries et archées	14 931	13 550	1 344	37	/
Champignons	1 164	987	164	13	/
Virus	1 279	592	555	112	20
Parasites	977	656	304	17	/
Total	18 351	15 785	2 367	179	20

2.2.3 La classification franco-allemande

Le regroupement des deux classifications a permis de créer une liste franco-allemande des AB. La base correspondante comptabilise 18 388 classifications d'espèces et de sous-espèces de bactéries, de champignons, de virus et de parasites répartis dans les quatre groupes de danger (**Tableau 15**).

Tableau 15 : Liste franco-allemande des agents biologiques.

Type d'agents biologiques	Nombre d'espèces	Classification des dangers			
		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Bactéries et archées	14 956	13 549	1 367	40	/
Champignons	1 166	987	166	13	/
Virus	1 282	465	704	93	20
Parasites	984	656	312	16	/
Total	18 388	15 657	2 549	162	20

Le nombre total de classifications franco-allemande des différents AB s'explique par l'existence d'une classification :

- de certains synonymes d'AB et de sous espèces dans la classification allemande ;
- d'AB sous la nomenclature « genre » + spp. dans la classification française ;
- d'un genre ou d'une famille dans la classification française, notamment pour les virus.

La création de cette base franco-allemande enrichit le nombre d'agents biologiques ayant une classification pour lesquels une classification des dangers existe, ce qui est apparu plus pertinent pour une démarche d'évaluation des risques.

2.3 Matrice de hiérarchisation des dangers

Des outils d'évaluation du risque chimique s'inspirant du modèle de gestion graduée des risques proposent des bandes de danger pour les substances chimiques en se reposant sur les mentions de dangers (Gazzi, 2000; Marquart *et al.*, 2008; Naumann, 2005; Vincent & Jeandel, 2001). Bien que la détermination des bandes de danger diffère selon les outils, il y a toujours une hiérarchisation des dangers, des moins dangereux classés A ou 1, aux plus dangereux classés E ou 5 (Scheffers *et al.*, 2016). Mais les dix classes de danger pour la santé définies pour les substances chimiques, telles que la toxicité aiguë, les lésions oculaires graves/irritations oculaires, la sensibilisation respiratoire ou cutanée, la mutagénicité, la cancérogénicité... sont intégrées dans les cinq bandes de danger. Les classes de danger sont ainsi brassées au sein d'une même bande. Par exemple, au sein de la bande de danger D, les mentions de dangers associées aux dangers des agents corrosifs, engendrant des lésions oculaires graves, toxiques pour la reproduction, mutagènes, cancérigènes, ayant une toxicité spécifique pour certains organes cibles et présentant une toxicité aiguë par inhalation sont présentes au sein de cette bande (Arnone *et al.*, 2015).

À défaut de catégorie de danger, de mention de danger, de FDS ou de VLEP, qui permettraient de réaliser une hiérarchisation des dangers des agents biologiques ou de leurs métabolites secondaires, il est proposé de hiérarchiser les dangers biologiques par catégories en comparant leur potentiel toxique.

La hiérarchisation des dangers par bande intègre tous les types de dangers des agents biologiques : l'infectiosité, le toxique, l'immuno-allergie et la cancérogénicité. La prise en compte de l'ensemble de ces dangers traduit l'intégration des effets aigus et des effets chroniques. Dans ce travail, pour limiter les contraintes, nous n'avons retenu que l'hypothèse de l'additivité des dangers. C'est-à-dire qu'un agent infectieux d'un groupe de risque susceptible de produire des toxines ou qui peut avoir des effets allergisants présente plus de risque qu'un agent infectieux du même groupe sans ces effets. Par exemple, deux champignons :

- *l'Aspergillus fumigatus*, responsable d'infections chez les humains et les oiseaux (Latge, 1999), peut induire une aspergillose broncho-pulmonaire allergique chez l'homme, maladie pulmonaire causée par une hypersensibilité à *l'Aspergillus fumigatus* dont les signes principaux sont un asthme mal contrôlé et des infiltrats pulmonaires récidivants (Greenberger, 2002). Ce champignon est classé dans le groupe 2 avec une mention A ;
- le champignon *Candida albicans*, quant à lui, peut induire des infections superficielles de la peau, des muqueuses et des ongles (onyxis). Il est classé dans le groupe 2 sans mention.

En tenant compte d'une part, de l'infectiosité de *l'Aspergillus fumigatus* et d'autre part, de son potentiel allergisant, celui-ci aura une classification et donc une bande de danger supérieure au *Candida tropicalis* qui présente uniquement une infectiosité.

Sur la base de ces hypothèses il a été possible de constituer une matrice de hiérarchisation considérée comme la hiérarchisation finale des dangers qui est proposée dans le **Tableau 16**, suivi d'une matrice simplifiée dans le **Tableau 17**.

Tableau 16 : Proposition finale de la matrice de hiérarchisation des dangers des agents biologiques.

Bandes de danger	Description
Ba1	<i>Pas de classification / Pas de connaissance actuelle</i>
	<p>Groupe 1, selon le risque infectieux sans mention T, ni mention A <i>Agents biologiques non ou peu susceptibles de provoquer une maladie chez l'homme. Ces agents biologiques ne sont pas susceptibles de produire des toxines et n'ont pas d'effets allergisants.</i> Exemples : genres <i>Azotobacter</i>, <i>Bizionia</i>..., <i>Bacillus aerius</i>, <i>Saccharopolyspora hirsuta</i>... majorités des moisissures</p>
Ba2	<p>Groupe 1, selon le risque infectieux avec une mention T ou une mention A <i>Agents biologiques non ou peu susceptibles de provoquer une maladie chez l'homme. Ces agents biologiques sont susceptibles de produire des toxines ou ont des effets allergisants.</i> Exemples : <i>Aspergillus versicolor</i>, <i>Fusarium graminearum</i>, <i>Mucor plumbeus</i>...</p>
	<p>Groupe 2 selon le risque infectieux sans mention T, ni mention A <i>Agents biologiques pouvant entraîner ou provoquer une maladie chez l'homme et constituer un danger pour les travailleurs. Leur propagation dans les collectivités est peu probable et il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficace.</i> <i>Ces agents biologiques ne sont pas susceptibles de produire des toxines et n'ont pas d'effets allergisants.</i> Exemples : Bactéries : <i>Clostridium perfringens</i>, <i>Streptococcus sanguinis</i>, <i>treponema carateum</i>... Moisissures : <i>Candida tropicalis</i>, <i>Trichoderma citrinoviride</i>, <i>Trichophyton rubrum</i>... Virus : de la chorioméningite lymphocytaire (autres souches) ; Mopeia, de l'hépatite A, Hazara... Parasites : <i>Acanthamoeba castellanii</i>, <i>Giardia lamblia</i>, <i>Leushmania mexicana</i>...</p>
	<p>Cancérogènes de catégorie 3 (CIRC) <i>Agent inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme.</i> Exemples : Bactéries : extraits de <i>Microcystis</i> (cyanobactérie) Toxines : toxines de <i>Fusarium graminearum</i>, <i>F. culmorum</i> et <i>F. crookwellense</i> : zéaralénone, déoxynivalénol, nivalénol et fusarénone X, toxines du <i>Fusarium sporotrichioides</i> : toxine T-2, Citrinine (mycotoxine)... Virus : papillomavirus humain (PVH) types 6 et 11, virus T-lymphotropique humain de type 2 (HTLV-2), de l'hépatite D... Parasites : <i>Opisthorchis felineus</i> (douve du foie du chat), <i>Schistosoma mansoni</i> (bilharziose intestinale)</p>
Da3	<p>Groupe 2 selon le risque infectieux avec une mention T ou une mention A <i>Agents biologiques pouvant entraîner ou provoquer une maladie chez l'homme et constituer un danger pour les travailleurs. Leur propagation dans les collectivités est peu probable et il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficace.</i> <i>Ces agents biologiques sont susceptibles de produire des toxines ou ont des effets allergisants.</i> Exemples : Bactéries : <i>Bacillus cereus</i>, <i>Clostridium botulinum</i>, <i>Escherichia Coli</i> (non pathogènes)... Moisissures : <i>Aspergillus fumigatus</i>, <i>A. flavus</i>, <i>Candida albicans</i> ... Parasites : <i>Ascaris lumbricoides</i>, <i>A. suum</i></p>
	<p>Groupe 3 selon le risque infectieux, sans mention T, ni mention A <i>Agents biologiques pouvant causer une maladie grave chez l'homme et constituer un danger sérieux pour les travailleurs. Ils peuvent se propager dans la collectivité, mais il existe généralement un traitement ou une prophylaxie efficace.</i> <i>Ces agents biologiques ne sont pas susceptibles de produire des toxines et n'ont pas d'effets allergisants.</i> Exemples : Bactéries : <i>Bacillus anthracis</i>, <i>Mycobacterium tuberculosis</i>, <i>Coxiella burnetti</i>...</p>

Bandes de danger	Description
	<p>Moisissures : <i>Cladophialophora bantiana</i> (anciennement <i>Cladosporium bantianum</i>), <i>Histoplasma capsulatum</i>, <i>Paracoccidioides brasiliensis</i>...</p> <p>Virus : de la chorioméningite lymphocytaire (souches neurotropes), Séoul, Andes...</p> <p>Parasites : <i>Echinococcus granulosus</i>, <i>Naegleria fowleri</i>, <i>Trypanosoma cruzi</i>...</p> <p>Cancérogènes de catégorie 2A et 2B (CIRC) <i>Agents probablement cancérogènes pour l'homme et agents peut être cancérogènes pour l'homme.</i></p> <p>Exemples :</p> <p>Virus : papillomavirus humain (PVH) type 6, Papillomavirus humain (PVH) types 26, 30, 34, 53, 66, 67, 69, 70, 73, 82, 85, 97, Papillomavirus humain bêta types 5 et 8...</p> <p>Toxines : toxines dérivées du <i>Fusarium moniliforme</i> (fumonisine B1 et B2, fusarine C), ochratoxine A, aflatoxine M1)</p> <p>Parasites : <i>Schistosoma japonicum</i> (bilharziose intestinale)</p>
Da4	<p>Groupe 3 selon le risque infectieux avec une mention T ou une mention A <i>Agents biologiques pouvant causer une maladie grave chez l'homme et constituer un danger sérieux pour les travailleurs. Ils peuvent se propager dans la collectivité, mais il existe généralement un traitement ou une prophylaxie efficaces.</i> <i>Ces agents biologiques sont susceptibles de produire des toxines ou ont des effets allergisants.</i></p> <p>Exemples :</p> <p>Bactéries : <i>Escherichia Coli</i> souches cytotoxiques (par exemple O157 : H7 ou O103...), <i>Shigella dysenteriae</i></p> <p>Moisissures : <i>Coccidioides immitis</i>, <i>Paracoccidioides brasiliensis</i></p> <p>Cancérogènes de catégorie 1 (CIRC) <i>Agents cancérogènes pour l'homme.</i></p> <p>Exemples :</p> <p>Toxines : mélanges naturels d'aflatoxines</p> <p>Virus : d'Epstein-Barr (EBV), de l'hépatite B (VHB), de l'hépatite C (VHC)...</p> <p>Parasites : <i>Clonorchis sinensis</i> (douve du foie), <i>Opisthorchis viverrini</i> (douve du foie), <i>Schistosoma haematobium</i> (bilharziose urogénitale)</p>
Da5	<p>Groupe 4 selon le risque infectieux <i>Agents biologiques provoquant des maladies graves chez l'homme et constituant un danger sérieux pour les travailleurs. Le risque de propagation dans la collectivité est élevé et en général, aucune prophylaxie ni aucun traitement efficace n'existent.</i></p> <p>Exemples :</p> <p>Virus : de Lassa, de la fièvre hémorragique de Crimée/Congo, Ebola...</p>

Tableau 17 : Matrice simplifiée de la hiérarchisation des dangers des agents biologiques.

Bandes de danger	Description
Da1	<i>Pas de classification / Pas de connaissance actuelle</i>
	Groupe 1, sans mention T, ni mention A
Da2	Groupe 1, affecté d'une mention T et/ou d'une mention A
	Groupe 2 sans mention T, ni mention A
	Cancérogènes de catégorie 3 (CIRC)
Da3	Groupe 2, affecté d'une mention T ou d'une mention A
	Groupe 3, sans mention T, ni mention A
	Cancérogènes de catégorie 2A et 2B (CIRC)
Da4	Groupe 3, affecté d'une mention T ou d'une mention A
	Cancérogènes de catégorie 1 (CIRC)
Da5	Groupe 4

2.4 Attribution d'une bande de danger aux réservoirs

L'attribution d'une bande de danger à un réservoir repose sur le croisement de données vu au paragraphe « Identification des agents biologiques dans un réservoir » et est présentée par des exemples.

2.4.1 Attribution d'une bande de danger aux intrants

Dans les données des intrants (Schlosser & Huyard, 2008), une bactérie du genre *Saccharomonospora* a été identifiée au sein des déchets verts, écorces, palettes... Dans les aérosols de compostage (Wéry, 2014), plusieurs espèces du genre *Saccharomonospora* ont été déterminées dans les aérosols par culture et séquençage : *Saccharomonospora* sp., *S. glauca*, *S. caesia*, *S. viridis*.

Dans la base franco-allemande, une dizaine d'espèces du genre *Saccharomonospora* sont classées, dont *S. glauca* et *S. viridi*. Ces deux espèces sont classées dans le groupe 1, sans être affectées d'une mention A ou T. La classification de *Saccharomonospora* sp., est définie comme indiqué au paragraphe « Détermination du danger d'un agent biologique », la plus haute classification de toutes les espèces du genre est attribuée pour une espèce non identifiée (s. ou spp.). Dans la mesure où toutes les espèces du genre *Saccharomonospora* sont classées dans le groupe 1 et qu'aucune n'est classée selon le CIRC, la classe retenue pour l'espèce *Saccharomonospora* sp. est donc de 1. En considérant la hiérarchisation des dangers (**Tableau 17**), la bande de danger pour *Saccharomonospora* sp., *S. glauca*, et *S. viridis*, est la bande N° 1.

Ce concept a été généralisé à tous les AB identifiés dans les intrants. La classification de toutes les espèces a été recherchée dans la base franco-allemande et dans la classification du CIRC et une bande de danger leur a été attribuée. La bande de danger la plus élevée du mélange des espèces d'un intrant représente la bande de danger de cet intrant. Le **Tableau 18** compile les résultats obtenus pour les intrants ainsi que leur bande de danger.

Tableau 18 : Classification franco-allemande et du CIRC, et bandes de danger des intrants.

Intrants*	Classification franco-allemande et du CIRC retenue	Bande de danger du réservoir
Boues résiduaires urbaines	Non définissable**	Non définissable*
Coproduits (déchets verts, écorces, palettes broyées, sciure, copeaux de bois, résidus agricoles...)	3 ; A	4
Ordures ménagères, biodéchets	3 ; A, T	4
Déchets d'élevage de bétail	3 ; T	4
Résidus agricoles et de l'industrie agroalimentaire	Non définissable*	Non définissable*
Boues de station d'épuration, effluents d'élevages, ordures ménagères	3 ; A, T	4

* : la liste des AB provient de (de Guardia, 2018; Schlosser & Huyard, 2008)

** : l'information ne peut pas être définie à partir des données de la littérature

Les résultats indiquent donc que tous les intrants possèdent une bande de danger 4. En conséquence, en fonction des connaissances relatives à la biodiversité microbienne dans les matières premières et de la classification des dangers des espèces qui ont été utilisées, il y a une homogénéité dans la classification des dangers et dans l'attribution de la bande de dangers des intrants.

2.4.2 Attribution d'une bande de danger aux composts

Les espèces identifiées dans les aérosols ont été classées par phylum. La classification et la bande de danger la plus élevée retrouvée au sein d'un phylum sont considérées comme la classification et la bande de danger de ce phylum. Par exemple, au sein du phylum *Firmicutes*, l'espèce *Bacillus sp.* présente la plus haute classification franco-allemande (Tableau 19). La classification de 3 associée à la note T représente donc la classification de danger pour le phylum *Firmicutes*.

Tableau 19 : Classification des dangers retenue pour les espèces identifiées dans les aérosols de plateformes de compostage du phylum *Firmicutes* (extrait de l'annexe 8).

Agents biologiques	Phylum	Genre	Espèce	Classification retenue
Bactéries	Firmicutes	Ammoniphilus	Ammoniphilus sp.	1
Bactéries	Firmicutes	Bacillus	Bacillus coagulans	1
Bactéries	Firmicutes	Bacillus	Bacillus smithii	1
Bactéries	Firmicutes	Bacillus	Bacillus sp.	3, T
Bactéries	Firmicutes	Bacillus	Bacillus subtilis	1
Bactéries	Firmicutes	Clostridium	Clostridium peptidivorans (peptidivorans)	1
Bactéries	Firmicutes	Geobacillus	Geobacillus caldxylosilyticus	1
Bactéries	Firmicutes	Geobacillus	Geobacillus sp.	1
Bactéries	Firmicutes	Geobacillus	Geobacillus thermodenitrificans	1

Agents biologiques	Phylum	Genre	Espèce	Classification retenue
Bactéries	Firmicutes	Planifilum	Planifilum sp.	1
Bactéries	Firmicutes	Planifilum	Planifilum yunnanense	1
Bactéries	Firmicutes	Staphylococcus	Staphylococcus epidermidis	2
Bactéries	Firmicutes	Staphylococcus	Staphylococcus sp.	2
Bactéries	Firmicutes	Streptococcus	Streptococcus sanguinis	2
Bactéries	Firmicutes	Symbiobacterium	Symbiobacterium thermophilum	1
Bactéries	Firmicutes	Thermoactinomyces	Thermoactinomyces intermedius	1
Bactéries	Firmicutes	Thermoactinomyces	Thermoactinomyces sacchari	1
Bactéries	Firmicutes	Thermoactinomyces	Thermoactinomyces sp.	1
Bactéries	Firmicutes	Thermoactinomyces	Thermoactinomyces thalophilus	1
Bactéries	Firmicutes	Thermoactinomyces	Thermoactinomyces vulgaris	1
Bactéries	Firmicutes	Ureibacillus	Ureibacillus koreensis	Non retrouvée*
Bactéries	Firmicutes	Ureibacillus	Ureibacillus sp.	1

* : la classification n'est pas retrouvée dans la base franco-allemande ni dans la classification du CIRC

La bande de danger du phylum *Firmicutes*, déterminée à l'aide de la hiérarchisation des dangers (**Tableau 16**) est donc la bande N°4.

Le processus de classification des dangers pour les espèces est appliqué à tous les phylums des communautés bactériennes et fongiques identifiés dans les composts, et ce pour toutes les phases de compostage (de Guardia, 2018).

Les genres et les classifications des phylums non représentés dans les aérosols, *Deinococcus-Thermus*, *Oomycota*, *Deuteromycota* et *Chytridiomycota*, ont été recherchés. À l'issue de ce travail, les phylums des composts ont été reconstitués en associant la classification de danger identifiée et la bande de danger associée (**Tableau 20**).

Tableau 20 : Bandes de danger définies pour les composts lors des différentes phases de compostage en fonction des phylums microbiens identifiés au cours de ces phases.

Composts au cours des phases du compostage	Phylum	Classification franco-allemande et du CIRC retenue pour les dangers du phylum	Bande de danger
Phase mésophile	Firmicutes	3 ; T	4
	Actinobacteria	2	2
	Proteobacteria	2	2
	Ascomycota	3 ; A	4
	Basidiomycota	1 ; A	2
Phase thermophile	Firmicutes	3 ; T	4
	Actinobacteria	2	2
	Deinococcus-Thermus	1	1
	Ascomycota	3 ; A	4
	Basidiomycota	1 ; A	2

Composts au cours des phases du compostage	Phylum	Classification franco-allemande et du CIRC retenue pour les dangers du phylum	Bande de danger
Phase de refroidissement	Firmicutes	3 ; T	4
	Actinobacteria	2	2
	Proteobacteria	2	2
	Ascomycota	3 ; A	4
	Basidiomycota	1 ; A	2
	Zygomycota	1	1
	Deuteromycota	Groupe 1	4
	Chytridiomycota	1	1
Phase de maturation	Firmicutes	3 ; T	4
	Actinobacteria	2	2
	Proteobacteria	2	2
	Ascomycota	3 ; A	4
	Basidiomycota	1 ; A	2
	Zygomycota	1	1
	Oomycota	2	2
	Deuteromycota	Groupe 1	4
	Chytridiomycota	1	1

En tenant compte du fait que la bande de danger la plus élevée retrouvée au sein d'un mélange de phylums représente la bande de danger de ce mélange, les composts, au cours des différentes phases de compostage, présentent tous une bande de danger N°4 (Tableau 21).

Tableau 21 : Bande de danger établie pour les composts au cours des phases de compostage.

Composts au cours des phases du compostage	Bande de danger du réservoir
Phase mésophile	4
Phase thermophile	
Phase de refroidissement	
Phase de maturation	

2.4.3 Conclusions relatives aux dangers

La création de la base franco-allemande s'est avérée utile pour déterminer la classification des phylums. Ces résultats indiquent que les intrants et les composts présentent une bande de danger N°4. Il n'y a donc pas de variabilité dans la classification des intrants et des composts ni de variabilité dans leur bande de danger. Il en résulte que la mise en

œuvre des différentes matières lors des activités de compostage n'induit pas de variabilité du danger qu'elles représentent. Le descripteur de danger n'a pas d'implication dans l'estimation du risque des tâches de travail manipulant des intrants ou des composts.

2.4.4 Les descripteurs d'exposition

2.4.4.1 Constitution du pool initial de descripteurs

Le pool initial de descripteurs a été constitué et il comprend les descripteurs sélectionnés dans les diverses sources évoquées dans le paragraphe « L'évaluation qualitative ». Ils sont catégorisés en cinq familles :

1. les descripteurs du risque en général ;
2. les descripteurs de danger ;
3. les descripteurs d'exposition ;
4. les descripteurs de prévention ;
5. les descripteurs spécifiques à l'activité professionnelle.

Le **Tableau 22** présente les descripteurs qui ont été retenus pour le pool initial et leurs provenances. Pour « la caractérisation des émissions potentielles » et pour « la potentialité d'inhalation des aérosols », deux et trois définitions sont proposées.

Tableau 22 : Descripteurs du pool initial et leurs provenances.

Descripteurs	Sources
Les descripteurs du risque en général	
La fréquence d'exposition	Stoffenmanager ; COSHH essentials ; EvRB ; EvR général ; Colchic
La durée de l'exposition	Seirich ; Stoffenmanager ; COSHH essentials ; EMKG-Expo-Tool ; EvRB ; EvR général ; Colchic
La probabilité d'apparition du dommage (maladie, accident...)	EvRB ; EvR général
Les effets potentiels sur la santé (gravité du dommage)	EvRB ; EvR général
Les descripteurs du danger	
La nature des agents biologiques	EvRB
La dangerosité des agents biologiques	Seirich ; Stoffenmanager ; COSHH essentials ; Anses' nano ; EvRB
Les descripteurs d'exposition	
L'état physique de la matière	Seirich ; Stoffenmanager ; COSHH essentials ; EMKG-Expo-Tool ; Anses' nano
La caractérisation des émissions potentielles	
➤ Le type de procédé de travail	Seirich ; Stoffenmanager ; EvRB ; Colchic
➤ Le potentiel de mise en suspension	EMKG-Expo-Tool ; Anses' nano
La potentialité d'inhalation des aérosols	
➤ La ventilation au poste de travail	Seirich ; Stoffenmanager ; COSHH essentials ; EMKG-Expo-Tool ; Colchic

Descripteurs	Sources
➤ Le type de captage	Seirich ; Stoffenmanager ; EMKG-Expo-Tool ; Colchic
➤ La probabilité d'inhalation	COSHH essentials ; EvRB
La quantité journalière de matière mise en œuvre lors d'une tâche de travail	Seirich ; COSHH essentials
La fréquence de l'exposition	Stoffenmanager ; COSHH essentials ; EvRB ; EvR général ; Colchic
La durée de l'exposition	Seirich ; Stoffenmanager ; COSHH essentials ; EMKG-EXPO-TOOL ; Colchic
Le contact cutané (scénario d'exposition)	Seirich ; Stoffenmanager
La surface de la peau en contact avec les polluants	Seirich ; Stoffenmanager ; COSHH essentials
Les descripteurs de prévention	
Les Équipements de Protection Individuelle (EPI) portés par les salariés	Stoffenmanager ; EvRB ; Colchic
Le type de mesures préventives mises en œuvre	EvRB ; EvRB
La vérification des systèmes de ventilation	EvRB
L'accidentologie de l'établissement tous risques confondu	EvRB
Les descripteurs spécifiques à l'activité professionnelle	
Le taux d'humidité	Spécifique à l'activité
La température au poste de travail	Spécifique à l'activité ; Colchic

Légende :

EvRB : descripteurs issus des démarches d'évaluation du risque biologique étudiées à la partie 2

EvR : descripteurs de l'évaluation du risque en général

Colchic : descripteurs communs à la base Colchic

Lors de la constitution de cet inventaire, il est observé que les descripteurs sont diversifiés et que la déclinaison de l'exposition peut prendre en compte un certain nombre de critères, tels que les modes opératoires mis en place, les quantités manipulées, la durée et la fréquence de l'exposition, mais également les procédés de travail existants et les moyens de protection collectifs mis en place, etc. Certains descripteurs sont redondants d'une démarche à l'autre et d'autres sont définis de manière différente, reflétant la pertinence ou l'accessibilité du descripteur. D'une part, ce type de descripteur est retenu pour appartenir au pool de descripteurs et d'autre part, différentes définitions sont proposées pour un même descripteur (J. Lavoie *et al.*, 2013). Finalement, des sources proposent des informations précises, voire difficiles à recueillir, par exemple, « la hauteur de travail à laquelle l'opération est faite » ou la « surface de produit étalé » (Marquart *et al.*, 2008). Ces descripteurs ont été examinés, mais n'ont pas été sélectionnés pour faire partie du pool.

2.4.4.2 Retours de terrain

✚ Les résultats issus de l'enquête

✓ Typologie des répondants et des établissements

Le fichier d'établissements extraits à partir de la base Sinoé® pour les domaines de compostage et de méthanisation comportait 1 293 établissements distincts. À partir des coordonnées mail disponibles par l'intermédiaire de la base et tenant compte qu'un exploitant/maître d'ouvrage pouvait être responsable de plusieurs établissements, 499 destinataires ont été répertoriés pour recevoir un questionnaire.

À la clôture de l'enquête, 120 questionnaires ont été complétés pour 135 établissements, certains exploitants ayant en charge plusieurs établissements. Ce résultat représente un taux de réponse de 24 %. Parmi les répondants, 84 % des établissements ont pour seule activité le compostage (**Figure 24**) et 83 % étaient responsables d'un seul établissement (**Figure 23**).

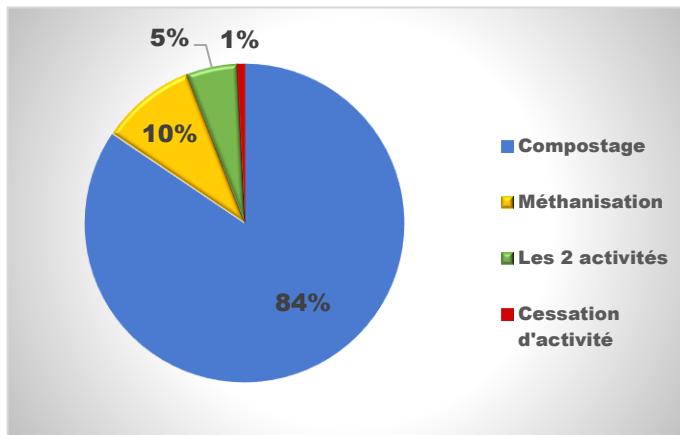


Figure 24 : Répartition des activités des établissements.

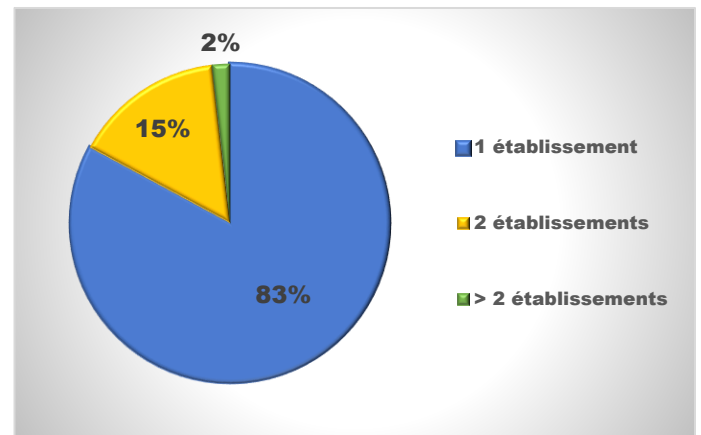


Figure 23 : Répartition de la responsabilité des établissements des exploitants/maîtres d'ouvrage.

Sachant qu'un établissement peut avoir plusieurs activités, la typologie de l'activité industrielle des répondants est représentative de la typologie nationale (ADEME Département gestion biologique et sols, 2007).

- 13 % sont des installations d'une capacité nominale de plus de 20 000 tonnes/an ;
- 80 % des établissements traitent des déchets verts ;
- 28 % des boues de station d'épuration ;
- 22 % des bio déchets des ménages.

Pour les unités de méthanisation, les données portant sur les tonnages et sur les types de déchets traités ne sont pas disponibles via Sinoé®.

✓ Réponses concernant les descripteurs

L'objectif de l'enquête était de déterminer quels sont les descripteurs de risque que les futurs utilisateurs pouvaient identifier, estimer ou reconnaître. La **Figure 25** présente le pourcentage de répondants ayant répondu par l'affirmative dans la reconnaissance des descripteurs de risque pour les cinq catégories définies dans la section précédente.

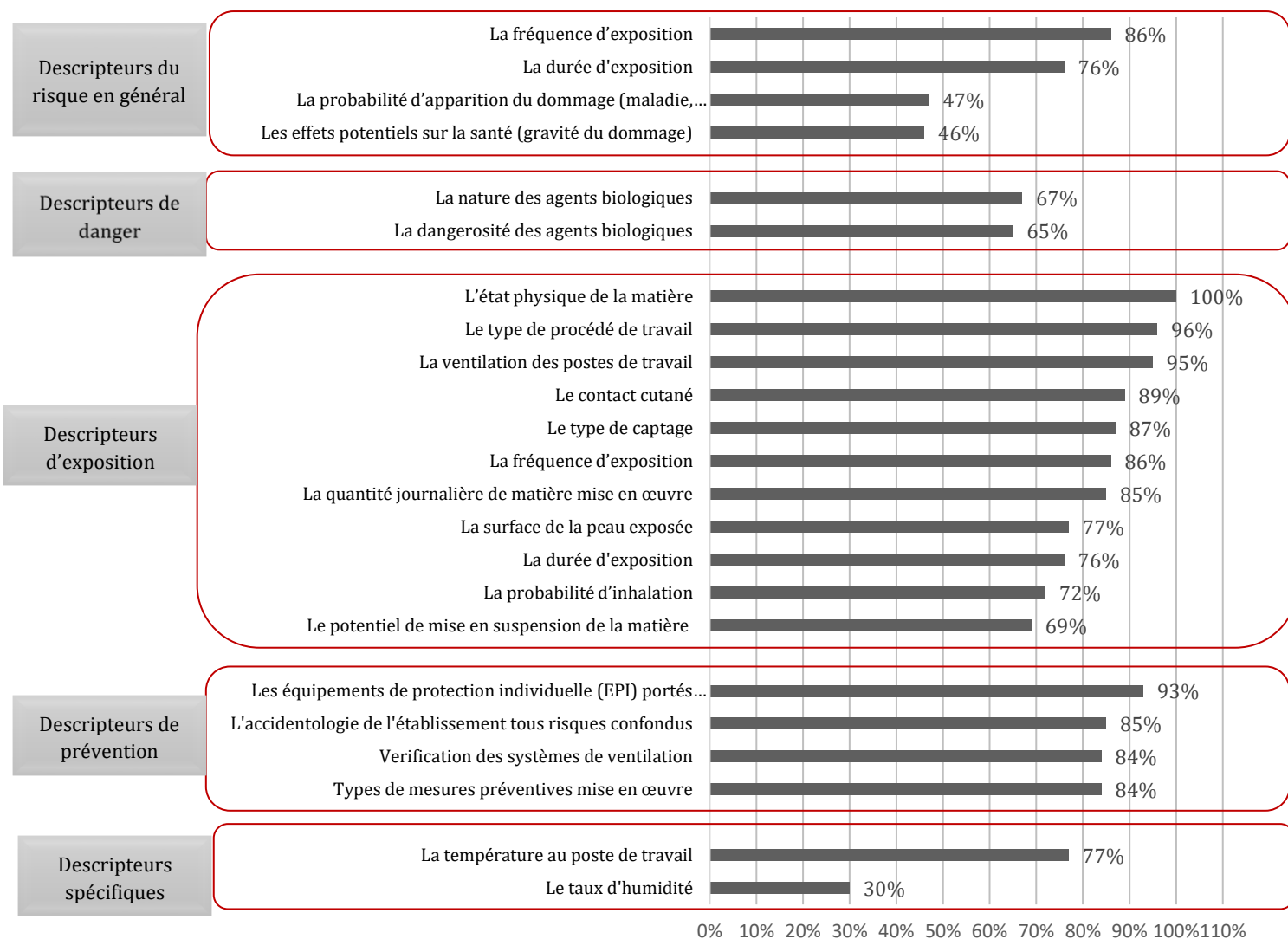


Figure 25 : Taux de réponses affirmatives dans le cadre de l'enquête portant sur les descripteurs de risque identifiables par les exploitants ou les gestionnaires de risque.

✚ Les visites d'entreprises

Trois établissements ont été visités entre octobre 2018 et septembre 2019.

✓ Activités des entreprises

L'entreprise A est une plateforme multi activités et de valorisation des déchets dont l'une des activités est le compostage. La plateforme est composée de sept grandes surfaces de tri consacrées aux mâchefers, à la dépollution des sols, aux sables, au compostage, aux déchets des BTP, au bois et aux matériaux de démolition. Environ 70 000 tonnes de déchets sont prises en charge annuellement sur le site. L'activité de compostage (**Figure 26**) est considérée comme une petite activité au sein de la plateforme. Le site traite 3 000 tonnes/an de déchets verts, provenant principalement de déchèteries ou d'artisans. Le processus de compostage permet de fabriquer 1 500 tonnes de compost normé.



Figure 26 : Photographie de la zone de compostage de l'entreprise A.

L'entreprise B, est une unité de méthanisation et de compostage. L'unité traite 45 000 tonnes par an de biodéchets, ménagers ou non ménagers. Les intrants sont constitués des sacs verts des ménages (32 000 tonnes/an), de biodéchets issus de collecte en vrac (restauration collective, supermarchés, industries agroalimentaires, métiers de la bouche : 5 000 tonnes/an), de déchets verts broyés, de biodéchets liquides (graisse...) et de récoltes issues d'une ferme énergétique (culture de miscanthus ayant un fort pouvoir méthanogène). L'installation produit 5 500 000 Nm³ de biogaz par an dont 85 % sont utilisés pour la cogénération d'électricité (10 900 MWh/an) et de chaleur (12 400 MWh/an), et 15 % sont épurés pour produire du biométhane réinjecté dans le réseau GDF via un poste d'injection ou utilisé comme carburant pour une flotte de camions. L'installation produit également 8 000 tonnes par an de compost à partir de digestat déshydraté, ainsi que 20 000 m³ par an d'engrais liquides (**Figure 27**).



Figure 27 : Photographie de la zone de compostage de l'entreprise B.

L'entreprise C est une unité de méthanisation et de compostage. Elle traite 15 000 tonnes par an de déchets verts d'origine ménagère, agroalimentaire et agricole. L'installation produit 2 millions de mètres cubes de biogaz par an, injectés dans le réseau public de gaz naturel, soit l'équivalent de 12 000 MWh/an de biocarburant utilisé par les véhicules de collecte et les bus de transport urbain. À la fin du processus, l'installation produit 4 500 tonnes de compost à destination des maraîchers et des particuliers et 6 000 tonnes d'engrais liquides épandues par les agriculteurs (**Figure 28**).



Figure 28 : Photographie de la zone de compostage de l'entreprise C.

✓ Organisation des visites

Dans chaque établissement, les interventions se sont déroulées en deux parties. La première étape a consisté à réaliser une visite des sites selon le processus de fabrication du compost. Cette visite a permis d'approfondir les connaissances dans les domaines des déchets, de la méthanisation et du compostage. Ces interventions ont également permis de visiter les installations, de comprendre leur mode de fonctionnement et également d'observer les salariés au cours de leurs tâches de travail.

La deuxième partie des interventions consistait à échanger sur les descripteurs de risque. Ces échanges étaient réalisés en présence du directeur du site, du responsable hygiène-sécurité ou de l'environnement, du chef d'équipe ou encore d'opérateurs. Pour présenter les différents descripteurs, un document de travail était remis aux différents interlocuteurs. Ce support était une déclinaison des questions de l'enquête.

Les réponses collectées lors de ces interventions ont été enregistrées et jointes aux autres réponses issues de l'enquête.

2.4.5 Conclusion à l'issue des résultats de l'enquête et des visites d'entreprise

Au total 77 % des répondants se sont avérés capables d'identifier dans leur entreprise les descripteurs (**Figure 25**).

Les descripteurs de « prévention » et les descripteurs « d'exposition » semblent être des informations plus accessibles pour respectivement 87 et 85 % des répondants. Tandis que les descripteurs de « danger » (66 %), les descripteurs « du risque en général » (64 %) et les descripteurs « spécifiques à l'activité » (54 %) sont des informations moins accessibles ou peu connues.

Concernant les deux définitions proposées pour le descripteur relatif à « la caractérisation des émissions potentielles » et les trois propositions présentées pour « la potentialité

d'inhalation des aérosols », la définition qui présente le taux de réponse le plus élevé correspond à la définition retenue pour ces descripteurs. Le descripteur de la probabilité d'inhalation est défini par le procédé de travail (96 %) au profit du potentiel de mise en suspension (69 %). La définition retenue pour le descripteur de la potentialité d'inhalation des aérosols est le captage à la source (87 %) et la ventilation des postes de travail (95 %). Par ailleurs, la définition conservée pour ces deux premiers descripteurs est connue et existe déjà dans d'autres méthodologies. Les descripteurs connus ou communs à d'autres méthodologies sont préférés. Il a été privilégié de conserver les définitions de descripteurs qui sont connues.

Ces résultats ont été confortés par les échanges réalisés avec les exploitants. Ces derniers s'interrogeaient, par exemple, sur leur capacité d'identifier le danger des agents biologiques potentiellement présents, sur la probabilité d'évaluer la possible apparition d'un dommage, etc. Ces descripteurs ont effectivement des taux de réponse par l'affirmative inférieurs aux autres descripteurs. Les remarques concernant le danger confortent l'un des axes de ces travaux de thèse qui a consisté à identifier le danger et le niveau de danger des matières mises en œuvre. La dangerosité des intrants ou celle des matières fabriquées au cours du processus n'est pas une donnée connue, ou reconnue, selon les personnes interrogées. Les exploitants ont également mis en évidence que lorsque la définition d'un descripteur était accompagnée de schémas, cela permettait de faciliter la compréhension du descripteur et le choix de la bande d'exposition correspondant à la situation de travail.

Au-delà d'avoir permis de recueillir le regard critique des exploitants concernant les descripteurs et les différentes bandes d'exposition, ces échanges ont donné la possibilité d'avoir un retour direct de la part des chefs d'établissements, des gestionnaires de risque et des opérateurs sur l'EvRB. Il en ressort que cette problématique n'est ni simple ni évidente pour les acteurs de l'entreprise. La perception du risque biologique est bien moindre par rapport aux risques chimiques, par exemple à ceux rencontrés sur les sites de méthanisation.

2.5 Sélection des descripteurs d'exposition

Le risque est la résultante de la combinaison du danger et de l'exposition. La **Figure 29** présente les niveaux de risque selon le modèle de gestion graduée du risque.

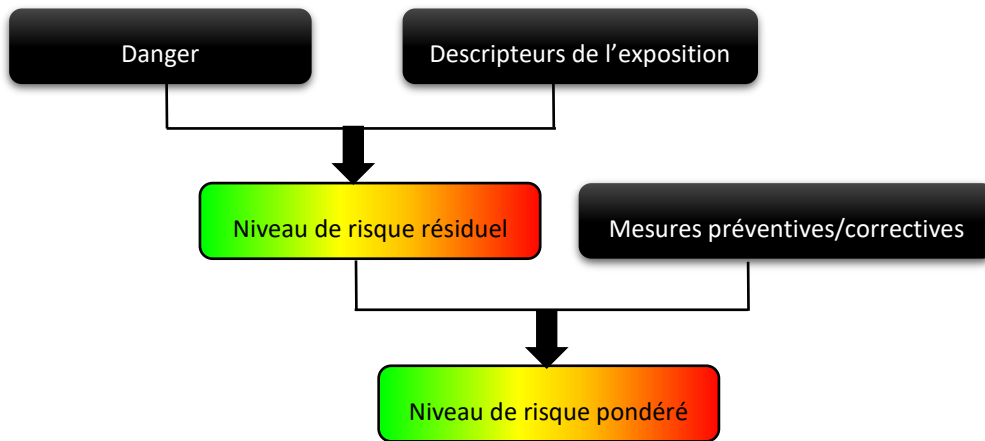


Figure 29 : Schématisation des niveaux de risque selon le modèle de gestion gradué.

Les niveaux de risque résiduel et pondéré peuvent varier entre le niveau le plus faible, représenté en vert, et le niveau de risque le plus élevé, représenté en rouge.

Selon cette représentation de l'évaluation du risque, la **Figure 30** présente les descripteurs qui définissent le risque en général.

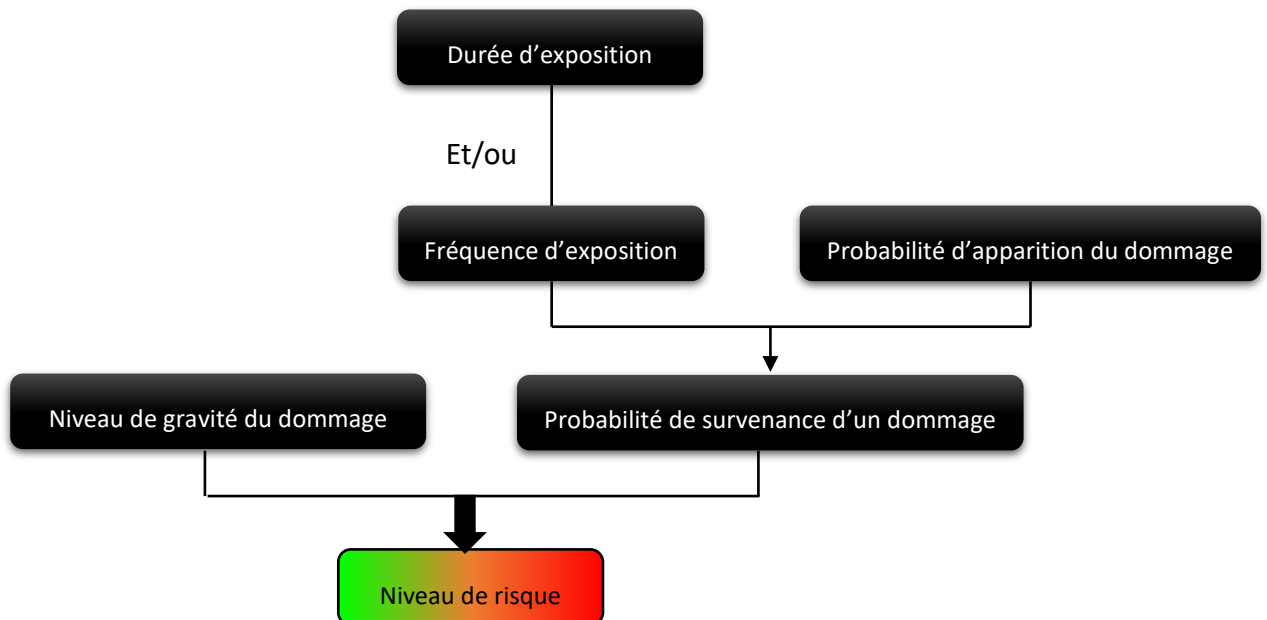


Figure 30 : Représentation du niveau de risque avec les descripteurs définissant le risque en général.

Le retour de l'enquête indique que 50 % des répondants ont la connaissance de la probabilité d'apparition et du niveau de gravité du dommage lié à l'exposition aux agents biologiques (**Figure 25**). Une méthodologie intégrant ces descripteurs de risque aurait pu être proposée. Mais au regard des résultats de l'enquête et des échanges, cette approche était compromise.

Le choix des descripteurs finaux s'est donc reposé donc sur le taux de réponse et sur les observations des situations de travail sur le terrain.

Deux descripteurs, « la caractérisation des émissions potentielles » et « la potentialité d'inhalation des aérosols » ont été soumis aux exploitants avec respectivement deux et trois définitions. Ces définitions sont issues des démarches qui ont été analysées et sont donc déjà utilisées par les gestionnaires de risque. Pour choisir la définition finale, il est privilégié de conserver la définition la plus évocatrice pour les exploitants interrogés. La définition retenue pour ces descripteurs est celle qui présente le taux de réponse le plus élevé. Le descripteur de la probabilité d'inhalation est défini par le procédé de travail (96 %) au profit du potentiel de mise en suspension (69 %). La définition retenue pour le descripteur de la potentialité d'inhalation des aérosols est le captage à la source (87 %) et la ventilation des postes de travail (95 %) au profit de la probabilité d'inhalation (72 %).

Par ailleurs, il avait été envisagé d'intégrer des descripteurs de prévention dans la méthodologie. Cependant, bien que ces descripteurs soient des informations accessibles, les exploitants interrogés lors des visites d'entreprises ont indiqué qu'ils ne disposaient pas de cette information, par exemple « l'accidentologie de l'établissement » ou au contraire, qu'ils se reposaient essentiellement sur la mise en œuvre d'une action de prévention pour réduire le risque, à savoir le port d'EPI. Cependant, selon les principes généraux de prévention (L. 4121-2 du Code du travail), le recours à l'utilisation d'un EPI intervient en dernier recours, lorsque la mise en place de solutions de prévention collective est techniquement impossible, que des modifications du procédé de travail et des améliorations des systèmes de ventilation/captage ne sont pas envisageables... L'emploi des EPI doit être limité à des situations de travail courtes et exceptionnelles. Par ailleurs, ils doivent être sélectionnés après une étude du poste de travail et en tenant compte des dangers et des conditions d'exposition. Lors de la mise en œuvre de la méthodologie par les futurs utilisateurs, rien ne garantit que les EPI utilisés par les salariés soient adéquats et bien portés, notamment la protection respiratoire. C'est pourquoi il ne semble pas préventif d'intégrer des descripteurs de prévention dans la méthodologie.

Les descripteurs retenus pour être intégrés dans la méthodologie sont présentés dans le **Tableau 23**.

Tableau 23 : Descripteurs intégrés dans la méthodologie.

<p>Le descripteur du danger</p> <ul style="list-style-type: none">• Le danger
<p>Les descripteurs d'exposition</p> <ul style="list-style-type: none">• La quantité journalière de matière mise en œuvre lors d'une tâche de travail• L'état physique de la matière• La durée de l'exposition d'une tâche• La fréquence de la tâche• Le type de procédé de travail• La ventilation au poste de travail et le type de captage• Le contact cutané (scénario d'exposition)• La surface de la peau en contact avec les polluants (scénario d'exposition).

Ces descripteurs ont donc été intégrés dans la méthodologie pour évaluer le risque des situations de travail dans le secteur de compostage.

2.6 Les bandes et les scores des descripteurs retenus

Les bandes et les scores des descripteurs retenus pour être intégrés dans la méthodologie ont été définis en s'inspirant des démarches et des outils existant en matière d'évaluation du risque chimique, biologique et des nanomatériaux étudiés au paragraphe « État des lieux de l'existant en matière d'évaluation du risque ». Il est proposé :

- cinq bandes pour le danger. Cependant à l'issue des résultats obtenus concernant la dangerosité des réservoirs dans le secteur de compostage, une seule bande de danger est à considérer ;
- quatre bandes pour la quantité ;
- trois bandes pour définir l'état physique ;
- quatre bandes pour la durée de la tâche ;
- quatre bandes pour la fréquence de la tâche ;
- quatre bandes pour le procédé de travail ;
- cinq bandes pour la protection collective ;
- cinq bandes pour le scénario d'exposition cutanée et/ou oculaire ;
- trois bandes pour les surfaces cutanées exposées.

Concernant les scores associés aux différentes bandes des descripteurs, après avoir effectué différents tests, il a été choisi d'affecter au danger et à la quantité des scores avec des multiples décimaux et non décimaux. Des sous-multiples ont été associés aux scores des autres descripteurs pour être dégressifs.

2.7 La méthodologie d'évaluation du risque biologique

2.7.1 Présentation générale

La méthodologie d'évaluation, qui doit être mise en œuvre par l'employeur, s'applique aux activités de compostage et considère uniquement le domaine du risque pour la santé des salariés dans les conditions normales de travail. L'évaluation du risque pour la santé porte sur le risque par inhalation et par contact cutané. Ce dernier type de risque inclut les risques par inoculation et par voie digestive (contact main bouche). Dans la mesure où un contact cutané peut induire ces deux autres types de risques. La méthodologie ne prend pas en considération l'évaluation des situations accidentelles et ne porte pas sur les domaines des risques environnementaux ni des risques incendie/explosion. (**Figure 31**).



Figure 31 : Domaine d'application de la méthodologie d'EvRB.

La démarche globale de la méthodologie consiste à (**Figure 32**) :

- effectuer un repérage des lieux et des situations d'exposition ;
- définir des Groupes d'Exposition Similaires (GES), c'est-à-dire des sous-ensembles d'individus présentant une exposition similaire ;
- évaluer le risque pour la santé de chaque GES, avec objectif final d'évaluer le risque par inhalation et par contact cutané des GES.

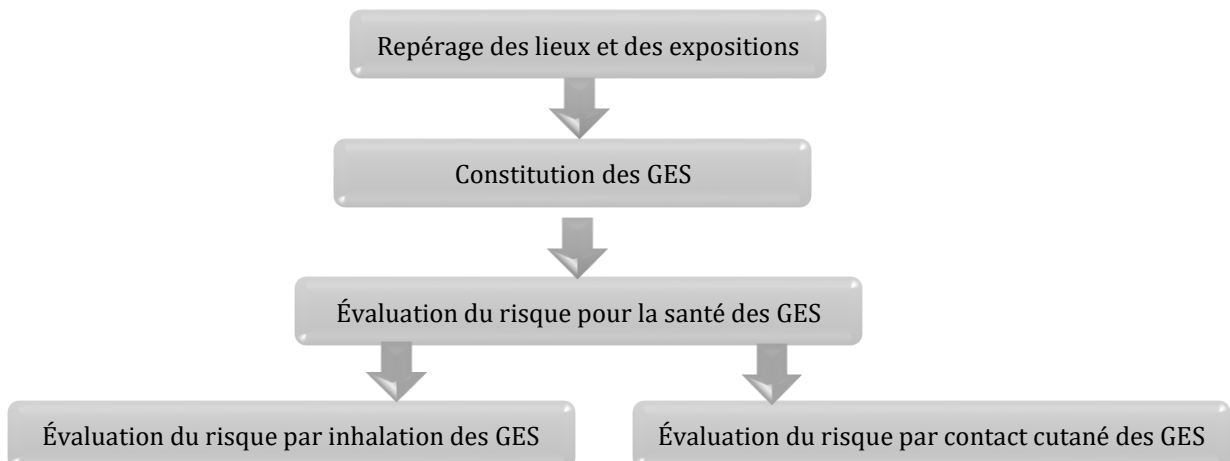


Figure 32 : Démarche globale de l'application de la méthodologie d'EvRB.

2.7.2 Le repérage des lieux et des expositions

Le repérage des lieux et des expositions permet de faciliter le déploiement de la méthodologie. Cette étape consiste à recueillir des informations techniques concernant l'établissement et l'activité des salariés, par exemple en :

- consultant le DUER pour connaître les résultats de la précédente EvRB, si celle-ci a déjà été réalisée ;
- prenant connaissance des rapports d'intervention antérieurs, si des actions ont été réalisées en matière d'EvRB ;
- réalisant une cartographie des différentes zones de travail de l'établissement : extérieur, intérieur, atelier, unité... ;
- identifiant les salariés affectés aux différentes zones de travail ou susceptibles d'effectuer des tâches au sein de ces zones ;
- recensant les métiers et les tâches des salariés ;
- identifiant les différents types de composts manipulés au cours des phases de compostage : compost au cours de la phase mésophile, thermophile...

2.7.3 Constitution des GES

Dans la pratique, réaliser l'évaluation du risque ou la caractérisation du risque de chaque travailleur d'une entreprise est peu envisageable, notamment dans des établissements où l'effectif des salariés est important ou par manque de moyens fonctionnels ou humains. Ainsi, il est proposé une approche qui optimise l'utilisation des ressources.

L'évaluation qualitative du risque ou la caractérisation du risque par des mesures repose sur la notion d'échantillonnage. Cela consiste à extraire un sous-ensemble d'individus supposés représentatifs d'une population. Cette notion est utilisée dans le domaine de l'évaluation du risque chimique (AFNOR, 2018; Drolet *et al.*, 2010; Vincent *et al.*, 2005) et est courante notamment dans le domaine du sondage d'opinion : un sous-ensemble de personnes est choisi pour représenter la population française (tranche d'âge, catégorie socio-professionnelle...). La représentativité de l'échantillon est donc importante puisqu'elle permet d'élaborer des conclusions sur l'ensemble de la population en ayant seulement un échantillon disponible.

L'échantillonnage consiste à constituer des GES à partir de la population de salariés. Cette approche, fondée sur l'observation des conditions de travail, permet de réaliser une évaluation d'un petit nombre de salariés appartenant à un GES en vue d'attribuer les résultats de l'évaluation du risque de ces personnes représentantes du GES dans sa globalité. Un GES est constitué de travailleurs dont le gestionnaire de risque suppose que l'exposition est du même ordre de grandeur. L'estimation de l'exposition des GES sera ainsi représentative de la population de travailleurs sans à avoir à réaliser l'exposition de tous les salariés.

La constitution de GES est développée pour simplifier l'évaluation de l'exposition si plusieurs travailleurs présentent le même profil d'exposition. Si le profil d'exposition est spécifique à un salarié, ce salarié constitue en lui-même un GES et l'évaluation du risque s'effectue de la même manière que pour les autres GES.

Pour élaborer les GES et y affecter les salariés, le gestionnaire de risque identifie tous les facteurs qui peuvent influencer la variabilité de l'échantillon afin qu'il soit représentatif. Cela fait appel à des paramètres ou des informations que l'observateur devra obtenir soit, à partir d'un descriptif clair des tâches et des procédés de travail soit, au mieux en effectuant l'observation et la collecte sur le terrain. Il identifiera :

- le produit ou le réservoir mis en œuvre ;
- les propriétés physico-chimiques : pour un aérosol, la morphologie, la granulométrie... ;
- les quantités correspondantes ;
- la fréquence d'exposition ;
- le procédé mis en œuvre ;
- les caractéristiques environnementales comme l'utilisation en plein air ou la taille de l'atelier ;
- les mesures de protection collective mises en œuvre ;
- l'organisation du travail (posté, en journée, travail batch...) ;
- tout autre facteur pertinent dépendant du contexte.

2.7.4 Évaluation du risque par GES

L'estimation du risque par inhalation et par contact cutané propose des descripteurs communs et spécifiques pour les deux voies d'exposition (**Figure 33**).

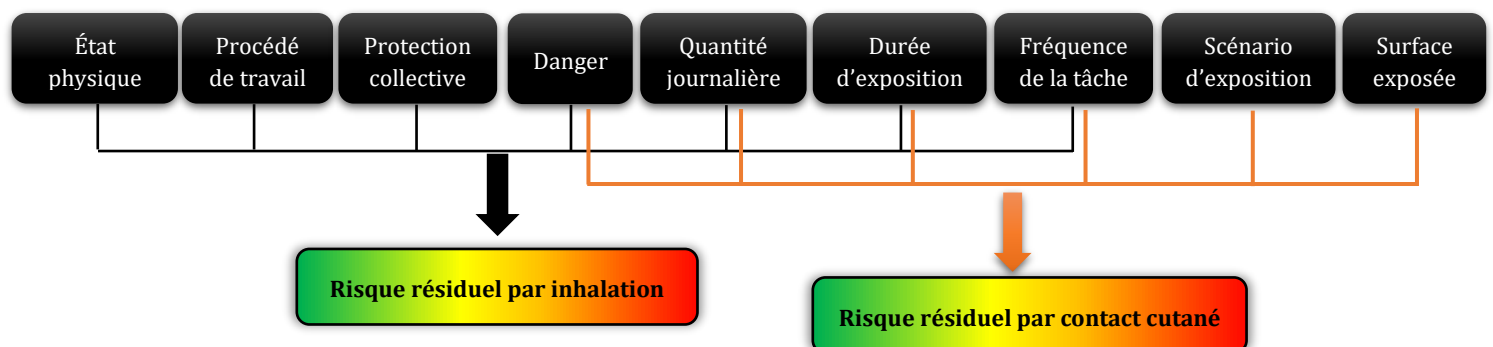


Figure 33 : Présentation des descripteurs permettant l'évaluation du risque par inhalation et par contact cutané.

La démarche générale d'évaluation consiste à collecter des informations relatives à chaque descripteur lors des tâches de travail effectuées pour les GES considérés par une observation et une analyse de leur travail.

2.7.4.1 Les descripteurs communs

Le danger

Dans le cadre de l'évaluation du risque biologique, il est difficile de réaliser un inventaire des micro-organismes potentiellement présents dans les environnements de travail et notamment dans les produits ou les matières qui peuvent en contenir. Aussi, un travail a été réalisé en interne pour identifier les populations microbiennes présentes au cours des activités de compostage (de Guardia, 2018; Schlosser & Huyard, 2008; Wéry, 2014) :

- les intrants :
 - coproduits (déchets verts, écorces, palettes broyées, sciure, copeaux de bois, résidus agricoles...);
 - ordures ménagères, biodéchets;
 - intrants : déchets d'élevage de bétail;
 - boues de station d'épuration, effluents d'élevages, ordures ménagères;
- les composts :
 - lors de la phase de fermentation (phase mésophile);
 - lors de la phase de fermentation (phase thermophile);
 - mature (phase de maturation);
 - lors de la phase de refroidissement.

À l'issue de ce travail, une bande de danger de ces réservoirs a été attribuée.

Bien que toutes les matières manipulées ou mises en œuvre dans le secteur du compostage possèdent la **même bande de danger, c'est-à-dire la bande N°4, le Tableau 24** présente toutes les bandes de dangers et leurs scores qui ont été déterminés pour effectuer ce travail.

Tableau 24 : Bandes et scores de danger des matières mises en œuvre.

Bandes de danger	Réservoirs/matières mis en œuvre	Score
Da1	/	1
Da2	/	10
Da3	/	100
Da4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coproduits (déchets verts, écorces, palettes broyées, sciure, copeaux de bois, résidus agricoles...); ➤ Ordures ménagères, bio déchets; ➤ Déchets et effluents d'élevage de bétail; ➤ Boues de stations d'épuration; ➤ Composts au cours des phases de compostage : mésophile, thermophile, de refroidissement, de maturation 	1 000
Da5	/	10 000

Dans le cadre de la mise en œuvre de la démarche d'EvRB au sein de plateformes de compostage ou de sites de méthanisation, l'utilisateur a un seul choix dans l'attribution de la bande de danger et du score de danger, la bande de danger N°4 associée au score de 1 000.

La quantité journalière

Ce descripteur correspond à la quantité de produit, de matière ou de réservoir mise en œuvre lors d'une tâche spécifique sur une **journée de travail** ou lors d'une séquence de travail sans que cette quantité soit moyennée ou calculée au prorata de la durée d'exposition (**Tableau 25**). Cependant, si pendant une tâche de travail, il n'y a aucune manipulation de produit ou de matière, ce descripteur n'a pas d'influence sur le niveau d'exposition et sera affecté d'un coefficient de 1 dans la formule de calcul.

Tableau 25 : Bandes et scores de quantité.

Bandes de quantité	Quantités de réservoirs/matières mises en œuvre lors de la tâche/opération	Score
Q1	< à 1 litre ou < à 1 kg	5
Q2	De 1 à moins de 100 litres ou de 1 à moins de 100 kg	10
Q3	De 100 litres au mètre cube ou de 100 kg à la tonne	50
Q4	> Au mètre cube ou > à la tonne	100

Il existe différentes manières de déterminer la quantité journalière :

- ❖ si une opération de travail se déroule sur plusieurs jours dans les mêmes conditions, par exemple charger/décharger de la matière (intrants, composts...), retourner des andains..., il est possible de moyennner la quantité par le nombre de jours de l'opération. Par exemple, si un opérateur décharge sur 5 jours 10 tonnes de matière première, alors la quantité journalière de 2 000 tonnes correspond à la bande N°3 ;
- ❖ lors d'une opération de courte durée dans une journée de travail, la quantité de matière manipulée ou mise en œuvre ne doit pas être rapportée à la journée. Il faut considérer la quantité de matière mise en œuvre lors de cette tâche. Par exemple, lors de la prise d'un échantillon de compost pour analyse, si la tâche dure 10 minutes et que 2 kg de compost sont échantillonnés, c'est la quantité de 2 kg qui est prise en compte, correspondant à la bande N°2 ;
- ❖ si une tâche est réalisée de temps en temps, il est nécessaire de l'évaluer le jour où cette tâche est effectuée pour renseigner la quantité journalière. Par exemple, si une tâche est réalisée une fois par mois, il faut relever la quantité impliquée dans cette situation de travail pour évaluer la tâche ;
- ❖ si plusieurs opérateurs travaillent à proximité ou sur le même procédé de travail, il faut considérer qu'ils sont exposés de façon similaire. Par exemple, lorsque pendant le chargement d'un cribleur deux personnes travaillent à proximité du cribleur. Pour évaluer l'exposition des 2 opérateurs, il faut prendre

en considération la quantité manipulée lors du chargement du cribleur, sans la diviser par le nombre d'opérateurs. Au contraire si des opérateurs effectuent des tâches similaires, mais de manière isolée, sans que les émissions de l'un affectent l'exposition de l'autre, alors il faut prendre en considération la quantité manipulée par chaque opérateur ;

❖ lors d'une tâche de travail n'impliquant pas la manipulation de matière, le score à attribuer à cette tâche est égal à 1.

La durée d'exposition

La durée d'exposition lors de la tâche est toujours prise en compte, quelle que soit la nature des dangers des micro-organismes potentiellement présents dans le produit/matière manipulé. La durée d'exposition par inhalation est la **durée journalière de la tâche effectuée par le salarié à proximité de la source**. La **durée d'exposition par contact cutané** est la durée pendant laquelle le produit peut être en contact avec la peau (sans prise en compte des EPI). En tenant compte de la durée d'exposition, les risques chroniques sont pris en compte, c'est le cas notamment des composants cancérigènes produits par certains agents biologiques, tels que les mycotoxines produites par certains champignons.

La durée d'exposition correspond à la durée totale d'une tâche sur la totalité de la journée (**Tableau 26**). Si cette tâche est effectuée à plusieurs reprises dans la journée, il faut intégrer cette répétitivité dans l'estimation de cette durée.

Tableau 26 : Bandes et scores de la durée journalière de la tâche de travail.

Bandes de durée	Durée journalière de la tâche de travail	Score
Du1	< 15 min dans la journée	0,13
Du2	De 15 min à moins de 2 heures dans la journée	0,25
Du3	De 2 à 4 heures dans la journée	0,5
Du4	> 4 heures dans la journée	1

Voici quelques exemples pour définir la durée de la tâche de travail, notamment si elle est effectuée à plusieurs reprises dans la journée :

❖ un opérateur conduit un engin 2h le matin et 1h l'après-midi, la durée journalière de la tâche est alors de 3h. La bande de durée journalière de la tâche est donc la bande N°3 ;

❖ un opérateur effectue des prélèvements d'échantillons. La tâche unitaire du prélèvement d'échantillon est d'environ 5 minutes, mais il effectue 10 prélèvements dans la journée. La durée journalière totale de la tâche « prélèvements d'échantillons » est alors de 50 minutes. La bande de durée journalière de la tâche est la bande N° 2 ;

❖ un opérateur effectue sa ronde une demi-heure le matin et une demi-heure l'après-midi. La durée totale de sa tâche qui consiste à faire sa ronde est d'une heure, correspondant à une bande de durée N°2.

 La fréquence hebdomadaire, mensuelle ou annuelle de la tâche

Pour sélectionner la bande et le score de la fréquence de la tâche, il est possible de se rapporter au référentiel temporel le plus approprié : hebdomadaire, mensuel ou annuel. Pour choisir le référentiel adéquat, la question à se poser est de savoir quelle est la fréquence de la tâche réalisée :

- ❖ est-ce une tâche réalisée dans la semaine et toutes les semaines ? Le référentiel choisi sera « hebdomadaire », **Tableau 27** ;
- ❖ est-ce une tâche réalisée dans le mois et tous les mois ? Le référentiel choisi sera « mensuel », **Tableau 28** ;
- ❖ Est-ce une tâche réalisée dans l'année et tous les ans ? Le référentiel choisi sera « annuel », **Tableau 29** ;

Chaque référentiel est décliné par bandes. Par prévention, lors de l'attribution de bandes de fréquence, quel que soit le référentiel choisi, il faut conserver celui qui indique la bande de fréquence la plus élevée.

Tableau 27 : Bandes et scores de la fréquence de la tâche de travail effectuée dans la semaine, toutes les semaines.

Référentiel temporel : hebdomadaire		
Bandes de fréquence	Fréquence de la tâche	Score
F1	< ½ journée /semaine toutes les semaines	0,13
F2	De ½ journée à moins d'un jour/semaine toutes les semaines	0,25
F3	De 1 à 3 jours/semaine toutes les semaines	0,5
F4	> 3 jours/semaine toutes les semaines	1

Tableau 28 : Bandes et scores de la fréquence de la tâche de travail effectuée dans le mois, tous les mois.

Référentiel temporel : mensuel		
Bandes de fréquence	Fréquence de la tâche	Score
F1	< 1 jour/ mois tous les mois	0,13
F2	De 1 à moins de 6 jours/mois tous les mois	0,25
F3	De 6 à 15 jours/mois tous les mois	0,5
F4	> 15 jours/mois tous les mois	1

Tableau 29 : Bandes et scores de la fréquence de la tâche de travail effectuée dans l'année, tous les ans.

Référentiel temporel : annuel		
Bandes de fréquence	Fréquence de la tâche	Score
F1	< 15 jours/an tous les ans	0,13
F2	De 15 jours à moins de 2 mois/an tous les ans	0,25
F3	De 2 à 5 mois/an tous les ans	0,5
F4	> 5 mois/an tous les ans	1

Voici des exemples qui permettent de choisir au mieux la bande de fréquence d'une tâche de travail :

- ❖ un opérateur effectue des prélèvements d'échantillons. La tâche unitaire est d'environ 5 minutes. Mais il effectue 10 prélèvements dans la journée, 2 jours par semaine toutes les semaines. La durée journalière totale de la tâche est de 50 minutes, comme indiqué dans l'exemple concernant la durée journalière et le référentiel temporel est la « semaine ». La bande de fréquence est de la bande N°3 (de 1 à 3 jours/semaine toutes les semaines).
- ❖ un opérateur fait une ronde des installations. Cette tâche dure 2h dans la journée et elle est effectuée tous les jours de l'année. Quel que soit le référentiel choisi, la bande de fréquence de cette tâche est la bande N°4.
- ❖ un opérateur met en place des sondes de température sur les andains. Cette tâche dure environ 30 minutes et elle est effectuée une fois toutes les deux semaines. En tenant compte du référentiel hebdomadaire, la bande de fréquence est la bande N° 2, soit de ½ journée à moins d'un jour par semaine. Ou en tenant compte du référentiel mensuel, soit 2 fois dans le mois, la bande de fréquence est la bande N°2, de 1 à 6 jours par mois tous les mois.
- ❖ un opérateur fait des prélèvements de digestat. Cette tâche dure environ 45 minutes et elle est effectuée toutes les 3 semaines, soit plus de 17 fois dans l'année. La bande de fréquence est la bande N°2, de 15 jours à 2 mois par an.

2.7.4.2 Descripteurs spécifiques de l'exposition par inhalation

L'état physique

La sélection de ce paramètre dépend de l'état physique du produit, de la matière ou du réservoir mis en œuvre lors de la tâche de travail : solide, liquide, gazeux ou sous forme pâteuse. Dans le secteur du compostage, deux états physique ont été identifiés : solides et sous forme pâteuse.

Pour l'état **solide**, c'est la taille du matériau et la possibilité d'émettre des poussières plus ou moins fines qui sont influentes (**Tableau 30**). Plus les matériaux sont grossiers, moins

ils émanent de la poussière et l'exposition est alors plus faible. Plus les matériaux sont fins, plus l'exposition est importante.

Tableau 30 : Bandes et scores de l'état physique pour les solides.

Bandes de l'état physique	Description du matériau solide mis en œuvre	Score
Ph1	Solides peu friables qui forment peu de poussières lors de la manipulation (par exemple déchets verts, compost non criblé , pastilles, granules, flocons fermes, écorce, coton en fibres liées...)	0,1
Ph2	Poudre plus grossière avec formation de poussières se déposant rapidement lors de la manipulation (par exemple compost criblé , grains, cristaux, sucre, fertilisant...)	0,5
Ph3	Poudre fine ou légère formant de la poussière, ou des panaches de poussières restant en suspension dans l'air lors de la manipulation (par exemple farine, ciment, talc...)	1

Les produits/matières/réservoir *sous forme pâteuse* sont considérés comme favorisant une exposition faible, ils sont donc associés à la bande de l'état physique la plus petite, la bande N°1 (**Tableau 31**).

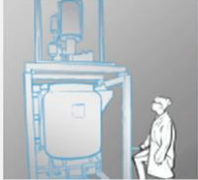



Tableau 31 : Bandes et scores de l'état physique pour les réservoirs sous forme pâteuse.

Bandes de l'état physique	Produit/matière/réservoir mis en œuvre	Score
Ph1	Sous forme pâteuse (par exemple boues de STEP, graisse, glaise...)	0,1

Le procédé de travail

Le procédé de travail est une variable influente de l'exposition. Plus le procédé est dispersif ou émissif, plus l'exposition est importante. Les activités ou les tâches de travail qui impliquent la mise en œuvre non intentionnelle de micro-organismes sont davantage associées à des situations où le procédé de travail est « émissif/dispersif » et « ouvert ». À l'inverse, les procédés « totalement fermés/clos » et « fermés, mais quelques fois ouverts » sont davantage associés à des situations de travail où les micro-organismes sont mis en œuvre de manière délibérée et dans des conditions de production/manipulation contrôlées, par exemple les secteurs de production industrielle agroalimentaire (**Tableau 32**). Les images permettant d'illustrer les procédés de travail proviennent de la base de données Colchic et de l'outil d'évaluation du risque chimique Seirich (Miraval, 2018; Vincent & Jeandel, 2001).

Tableau 32 : Bandes et scores du procédé de travail.

Bandes de procédés	P1	P2	P3	P4
Type	Totalement fermé/clos 	Fermé, mais quelques fois ouvert 	Ouvert 	Émissif/dispersif 
Score	0,3	0,6	0,8	1
Libellés	<p>Procédés dans lesquels la mise en œuvre de produits/matières se déroule dans des processus (réacteurs) fermés. Les transferts, tels que les chargements/déchargements et les échantillonnages sont compris dans le processus fermé.</p> <p><i>Exemple : réacteur de production, de mélange entièrement fermé (production en continu...)</i></p>	<p>Procédés dans lesquels les produits/matières sont mélangés dans le contexte des secteurs de la fabrication, formulation, utilisation finale et dans lesquels il y a chargement/déchargement du récipient de mélange et des échantillonnages réguliers.</p> <p><i>Exemple : mise en œuvre de produits dans des réacteurs fermés avec des chargements/déchargements et des prises d'échantillons réguliers (machines à dégraisser...)</i></p>	<p>Procédé pour lequel, de par sa conception, la mise en œuvre de produits/matières est moins émissive (conduite de machines à imprimer, conduite d'une ligne de production...).</p> <p><i>Exemple : conduite de grappins en cabine, de malaxeurs ouverts, de camions, de chargeuses... Prise d'échantillons (boues, compost...). Opération d'exploitation de site... Application de produit avec des outils tenus à la main tels que pinceaux, brosses, rouleaux, pelles Emballage de produits, mise en sacs, mise en balles, mise en barquettes...</i></p>	<p>Procédés dans lesquels les produits/matières produisent une émission importante de poussières, de fumées de vapeurs, de brouillards...</p> <p>Procédés de travail qui nécessitent la manipulation de matières/produits dans lesquels la haute pression, la vitesse ou la force produit un brouillard, une propagation de matières/produits, une brume.</p> <p><i>Exemple : ouverture, vidange, retournement de sacs, manipulation de produits pulvérulents... Opérations de balayage, de découpe, de soudage... Nettoyage des trommels, meuleuses, caisses-palettes... Utilisation de la soufflette, de spray, de karcher... Broyage de déchets, criblage... Pulvérisation de produits/mélanges pour le revêtement de surface, d'adhésif, de produits lustrant, de produits nettoyants, de produits d'assainissement de l'air, de sablage...</i></p>

 La protection collective : ventilation et captage

La mise en place d'une ventilation ou de captage participe à la protection collective des salariés. Ces dispositions permettent de réduire les niveaux de concentration des polluants dans l'air et donc des expositions.

La sélection de la bande et du score de protection collective se choisit par le biais de deux observations :

- tout d'abord, lors de l'analyse de la tâche de travail, il est nécessaire d'observer initialement les modalités se rapportant aux postes de travail dans le lieu de travail, c'est-à-dire le type de ventilation se rapportant au local, à l'atelier... et de relever la bande et le score associés à la ventilation générale du lieu de travail (**Tableau 33**) ;
- ensuite, il est nécessaire d'observer les modalités se rapportant à la tâche de travail. Il faut identifier le type de captage à la source mis en place et relever la bande et le score associés (**Tableau 34**).

La bande et le score de la tâche de travail correspondent à la bande et au score le plus protecteur, c'est-à-dire la bande et le score associé le plus petit relevé.

Les images permettant d'illustrer le type de protection collective proviennent notamment de la base de données Colchic et de l'outil d'évaluation du risque chimique Seirich (Miraval, 2018; Vincent & Jeandel, 2001). Par ailleurs, une image supplémentaire a été créée tout particulièrement pour le secteur de compostage. Il s'agit de la « cabine non pressurisée », qui peut être impliquée dans des situations de travail employant un engin qui ne possède pas de cabine pressurisée ou qui a les fenêtres ouvertes lors de l'acheminement la matière.

Tableau 33 : Bandes et scores de la ventilation des locaux.


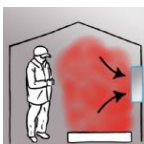

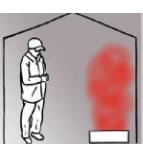


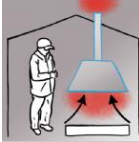


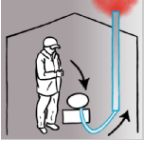
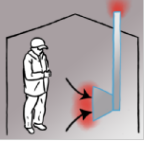
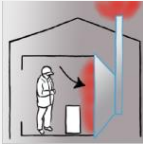
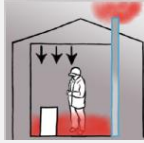

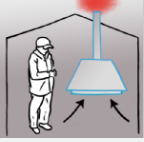
Types de protection collective : ventilation des locaux (V)			
V5	V4	V3	
Absence de ventilation mécanique	Présence d'une ventilation générale mécanique	Travail en extérieur	Éloignement du salarié par rapport à la source d'émission
			
Score = 1	Score = 0,7	Score = 0,5	

Tableau 34 : Bandes et scores du captage à la source.

Types de protection collective : captage à la source (V)			
V5		V3	
Absence de captage localisé		Cabine non pressurisée	
			
Score = 1		Score = 0,5	
V2			
Présence de captage localisé inducteur ou récepteur			
Hotte	Fente d'aspiration	Table aspirante	Aspiration intégrée
			
Cabine ventilée de petites dimensions	Cabine à flux horizontal	Cabine à flux vertical	
			
Cabine pressurisée à air épuré (CPAE)			
			
Score = 0,3			
V1			
Captage enveloppant, sorbonne de laboratoire			
			
Score = 0,1			

Voici quelques exemples :

- ❖ un opérateur effectue des opérations de maintenance sur un engin dans un local disposant d'une ventilation générale mécanique. À son poste de travail, il n'y a pas de captage localisé. Pour cette tâche de travail :

- la bande de la ventilation générale correspond à la bande N°4 associée à un score de 0,7 ;
- la bande du captage à la source est de 5, associée à un score de 1.
→ la bande et le score de la protection collective pour la tâche de maintenance sont donc ceux se rapportant à la ventilation générale, la bande N°4 associée à un score de 0,7.
- ❖ cette même tâche de maintenance est réalisée dans ce même local pourvu d'une ventilation générale mécanique, mais son poste de travail dispose d'une fente d'aspiration :
 - la bande de la ventilation générale correspond toujours à la bande N°4 associée à un score de 0,7 ;
 - la bande du captage à la source est de 2, associée à un score de 0,3 : dans ces circonstances, la bande et le score de la protection collective pour la tâche de maintenance sont donc ceux se rapportant au captage à la source, la bande N°2 associée à un score de 0,3.
- ❖ un opérateur effectue le chargement d'un cribleur à l'aide d'un engin en extérieur. L'opérateur est assis dans son engin dont la cabine n'est pas pressurisée :
 - la bande de ventilation générale correspond à la situation de travail en extérieur, soit la bande N°3 et un score de 0,5 ;
 - la bande de captage à la source correspond à la bande N°3, associée au score de 0,5 ;
→ les bandes et les scores sont identiques pour la ventilation générale ou pour le captage à la source, il n'y a pas de choix à faire. La bande et le score de la protection collective pour la tâche de chargement du cribleur sont la bande N°3 associée à un score de 0,5.
- ❖ un opérateur effectue sa ronde à pied sur le site de compostage :
 - la bande de ventilation générale correspond à une situation de travail en extérieur. La bande de ventilation est la bande N°3 associée à un score de 0,5 ;
 - la bande du captage à la source correspond à une situation où il n'y a pas de captage à la source. La bande de captage est la bande N°5 associée à un score de 1 ;
→ la bande et le score de la protection collective pour la tâche de ronde sont donc ceux se rapportant à la ventilation générale, la bande N°3 associée à un score de 0,5.

2.7.4.3 Descripteurs spécifiques du risque par contact cutané

Le scénario d'exposition

Ce descripteur correspond aux types de manipulations réalisées par l'opérateur et des situations de contact possible avec la peau que peut rencontrer l'opérateur pendant cette tâche. Lors du choix d'un scénario d'exposition, il ne faut pas tenir compte des EPI portés par les salariés et en cas de doutes, il faut sélectionner la situation la plus pénalisante c'est-à-dire la plus exposante (**Tableau 35**).

Tableau 35 : Bandes et scores du scénario d'exposition.

Bandes de scénarios d'exposition	Scénario d'exposition cutanée/oculaire	Score
Sce1	Pas de contact possible <i>La situation de travail rend impossible le contact entre le réservoir/matière et la peau (capotage, vitre de protection, utilisations d'engins pour manipuler le produit, la matière...)</i>	0,0001
Sce2	Application de produit/matière avec un outil tenu à la main ne générant pas d'aérosol ou de projection <i>Utilisation d'un pinceau, d'une pelle, d'un balai, d'un seau</i>	0,3
Sce3	Génération possible de panaches d'aérosols, d'éclaboussures <i>La situation de travail où les procédés de travail sont dits «dispersifs/ émissifs» avec création d'aérosols, de projections de gouttes lors de la tâche de travail, lors de déversement, projections de brouillards d'huile par des machines, production d'aérosols par le passage d'engins, projections possibles lors de l'ouverture de tubes...</i>	0,5
Sce4	Contact possible du produit, de la matière avec une partie du corps ou avec des objets/surfaces sur lesquels le produit, la matière a été en contact (objets/surfaces souillés) <i>Manipulation de chiffons imbibés de produit ou souillés par de la matière, utilisation de matériel piquant ou coupant...</i>	0,7
Sce5	Trempe ou immersion possible d'une partie du corps dans le produit/matière <i>Pose ou retrait de pièces ou de matériels dans le produit/la matière</i>	1

Exemples :

- ❖ un opérateur effectue une ronde des installations à proximité d'engins qui mettent en suspension des aérosols ou il se tient à proximité d'un camion en train de décharger des déchets verts. Bien que l'opérateur ne mette pas directement en œuvre des produits ou de la matière, il se trouve dans les panaches d'aérosols et la bande à sélectionner est la bande N°3, avec la génération possible de panaches d'aérosols ;
- ❖ un opérateur effectue des manœuvres avec un engin, telles que le chargement d'un cribleur ou le retournement d'andains. Dans ces circonstances, il n'y a pas de contact possible entre le réservoir, la matière et la peau. La bande à sélectionner est la bande N°1.

La surface de peau exposée

Pour ce descripteur, il faut comprendre que les surfaces exposées correspondent aux surfaces de peau qui ne sont pas couvertes et pouvant être exposées aux matières/produits lors de la manipulation sans tenir compte des EPI. Plus la surface est importante, plus le risque est élevé. Si plusieurs possibilités coïncident à la situation de travail observée, il est nécessaire de sélectionner la situation la plus pénalisante (**Tableau 36**).

Ce descripteur n'est pas à renseigner si, lors du choix du scénario d'exposition, il n'y a pas de contact possible avec le réservoir, la matière pouvant contenir des micro-organismes.

Tableau 36 : Bandes et scores de la surface de peau exposée.

Bandes de surface exposée	Surface exposée	Score
S1	1 ou 2 mains	0,1
S2	Une ou tout en partie du(des) bras ou d'une(des) jambe(s)	0,5
S3	Tout le corps et/ou le visage	1

2.7.5 Calcul du score de risque et caractérisation du risque

À l'instar d'autres méthodologies, le score de risque est obtenu par la multiplication des scores (Marquart *et al.*, 2008; Miraval, 2018; Vincent *et al.*, 2005). Les scores de risques relatifs à une ou plusieurs tâches effectuées par les GES peuvent être additionnés pour définir un score de risque global par GES. Cette démarche permet de hiérarchiser les GES en fonction de leur score de risque global.

2.7.5.1 Calcul des scores de risque déterminant les niveaux de risque

Par inhalation, les scores des descripteurs de risque intérimaires qui ont été retenus sont :

- pour délimiter le niveau modéré au niveau de risque préoccupant, le niveau 3 du danger, le niveau 2 de la quantité, le niveau 2 de l'état physique, le niveau 2 de la durée d'exposition, le niveau 2 de la fréquence de la tâche, le niveau 2 du procédé de travail et le niveau 3 de la ventilation/captage à la source, soit $100 \times 10 \times 0,5 \times 0,25 \times 0,25 \times 0,6 \times 0,5 = 9,375$ arrondi à 10 ;
- pour délimiter le niveau préoccupant au niveau de risque sérieux, le niveau 4 du danger, le niveau 3 de la quantité, le niveau 2 de l'état physique, le niveau 3 de la durée d'exposition, le niveau 3 de la fréquence de la tâche, le niveau 3 du procédé de travail et le niveau 4 de la ventilation/captage à la source, soit $1\ 000 \times 50 \times 0,5 \times 0,5 \times 0,5 \times 0,8 \times 0,7 = 3\ 500$

Pour cette voie d'exposition, les situations de travail ayant un score de risque :

- inférieur à 10 ont un niveau de risque modéré ;
- compris entre 10 et 3 500, un niveau de risque préoccupant ;
- supérieur à 3 500 un niveau de risque sérieux.

Par contact cutané, les scores des descripteurs de risque intérimaires qui ont été retenus sont :

- pour délimiter le niveau modéré au niveau de risque préoccupant, le niveau 3 du danger, le niveau 2 de la quantité, le niveau 2 de la durée d'exposition, le niveau 2 de la fréquence de la tâche, le niveau 2 du scénario d'exposition et le niveau 2 de la surface exposée, soit $100 \times 10 \times 0,25 \times 0,25 \times 0,5 \times 0,5 = 15,625$ arrondi à 16 ;
- pour délimiter le niveau préoccupant au niveau de risque sérieux, le niveau 4 du danger, le niveau 3 de la quantité, le niveau 3 de la durée d'exposition, le niveau 3 de la fréquence de la tâche, le niveau 3 du scénario d'exposition et le niveau 3 de la surface exposée, soit $1\ 000 \times 50 \times 0,50 \times 0,50 \times 0,7 \times 0,5 = 4\ 375$.

Pour cette voie d'exposition, les situations de travail ayant un score de risque :

- inférieur à 16 ont un niveau de risque modéré ;
- compris entre 16 et 4 375, un niveau de risque préoccupant ;
- supérieur à 4 375, un niveau de risque sérieux.

2.7.5.2 Score et caractérisation du risque par inhalation

Le score de risque résiduel par inhalation (**S.Inh-R**) est calculé à l'aide de la **Formule 1** :

Formule 1 : Calcul du score de risque résiduel par inhalation (**S.Inh-R**)

$$\mathbf{S.Inh-R} = \text{Score de danger} \times \text{Score de quantité} \times \text{Score de l'état physique} \times \text{Score de la durée d'exposition} \times \text{Score de la fréquence} \times \text{Score du procédé de travail} \times \text{Score de protection collective}$$

Le score de risque calculé pour chaque tâche de travail correspond à un niveau de risque et aux mesures de prévention à mettre en œuvre. Trois niveaux de risque sont proposés :

- un niveau de risque modéré, en vert, où des mesures correctives ne sont pas à mettre en place de manière prioritaire ;
- un niveau de risque préoccupant, en orange, nécessitant probablement la mise en place de mesures correctives ;
- un niveau de risque sérieux, en rouge, où des mesures correctives sont à mettre en place rapidement.

Le **Tableau 37** présente la grille décisionnelle du risque par inhalation.

Tableau 37 : Grille de caractérisation du risque par inhalation.

Score de risque	< 10	10 - 3 500	> 3 500
Niveau de risque	Modéré	Préoccupant	Sérieux
Caractérisation du risque et plan d'actions	Le risque est probablement modéré. Des mesures correctives ne sont pas à mettre en place de manière prioritaire.	Le risque est préoccupant nécessitant probablement la mise en place de mesures correctives.	Le risque est sérieux. Des mesures correctives sont à mettre en place rapidement.

2.7.5.3 Score et caractérisation du risque par contact cutané

Le score du risque résiduel par contact cutané (**S.Cut-R**) est calculé à l'aide de la **Formule 2**.

Formule 2 : Calcul du score de risque résiduel par contact cutané.

$\mathbf{S.Cut-R} = \text{Score de danger} \times \text{Score de quantité} \times \text{Score de la durée d'exposition} \times \text{Score de la fréquence} \times \text{Score du scénario d'exposition} \times \text{Score des parties exposées}$
--

Le **Tableau 38** présente la grille décisionnelle pour le risque par contact cutané.

Tableau 38 : Grille de caractérisation du risque par contact cutané.

Score de risque	< 16	16 - 4 375	> 4 375
Niveau de risque	Modéré	Préoccupant	Sérieux
Caractérisation du risque et plan d'actions	Le risque est probablement modéré. Des mesures correctives ne sont pas à mettre en place de manière prioritaire.	Le risque est préoccupant nécessitant probablement la mise en place de mesures correctives	Le risque est sérieux. Des mesures correctives sont à mettre en place rapidement.

Partie 6

VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE

PARTIE 6 : VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE

Cette partie a pour objectif de valider la méthodologie proposée dans la partie 5 du présent manuscrit, que l'on nommera méthodologie de référence. Cette méthodologie de référence sera, 1- mise en application sur le terrain en situation réelle de travail pour commenter les résultats obtenus, 2- comparée à d'autres méthodologies d'EvRB et 3- soumise à une étape de confirmation des scores utilisés.

1. Matériels et méthodes

1.1 Mise en application de la méthodologie sur le terrain

La méthodologie de référence a été mise en application dans trois plateformes de compostage ou sur des sites de méthanisation mettant en œuvre une étape de compostage en complément de cette activité. Ces trois établissements sont :

- les entreprises A et C (paragraphe « Retours de terrain ») qui avaient fait l'objet de visites pour constituer le pool de descripteurs de risques ;
- l'entreprise D, centre de valorisation organique couplé avec une unité de méthanisation qui n'avait pas été contactée lors de la constitution du pool de descripteurs.

La mise en application dans ces trois établissements totalement indépendants permet ainsi de valider la méthodologie.

Un prototype de méthodologie de référence a été rédigé et validé en interne auprès d'experts dans le domaine de la biologie et de l'évaluation du risque. Il comporte :

- le cadre réglementaire d'une démarche d'évaluation du risque biologique ;
- la méthodologie présentée/explicitée de manière générale ;
- les étapes préliminaires à réaliser ;
- la démarche d'évaluation du risque en soi : une première partie portant sur l'exposition par inhalation et une seconde sur l'exposition par contact cutané ;
- des grilles de recueil et des tableaux de référence permettant de collecter les informations sur le terrain.

La mise en application de la méthodologie de référence a consisté à présenter et à transmettre le prototype de méthodologie à l'employeur ou au gestionnaire de risque de l'entreprise. Ce dernier a été sollicité afin de réaliser sa propre démarche d'évaluation. L'objectif est que l'utilisateur observe la situation de travail à évaluer, consulte les tableaux de référence, identifie la bande et le score correspondant à chaque descripteur. Ces éléments sont reportés dans les grilles de recueil et un niveau de risque peut ainsi être calculé. À chaque retour d'expérience de terrain des améliorations ont été apportées au prototype de la méthodologie pour assurer une robustesse. Par exemple, les définitions de bandes des descripteurs ont été précisées pour faciliter leur compréhension, un niveau intermédiaire a été ajouté pour un descripteur d'exposition pour affiner la justesse dans

le choix du niveau, les scores des descripteurs ont été améliorés permettant d'ajuster l'estimation du niveau de risque.

Cette mise en application sur le terrain a permis d'évaluer le risque biologique pour des situations de travail et de les hiérarchiser en fonction du niveau de risque.

1.2 Comparaison des résultats de la méthodologie avec d'autres démarches

Les situations de travail évaluées par la méthodologie de référence ont été estimées simultanément avec deux autres démarches. Celles-ci ont été identifiées lors du recensement et de l'analyse des démarches d'EvRB existantes. Ces démarches estiment un niveau de risque biologique, mais ne distinguent pas les voies d'exposition. Ces deux démarches ont été choisies, car considérées comme les plus abouties parmi toutes celles qui ont été analysées. Ces démarches sont issues d'un logiciel commercial dont la méthodologie d'EvRB est personnalisable. Dans la mesure où l'objectif n'est ni de faire de la promotion, ni de faire de la dévalorisation des produits commerciaux, les sources sont confidentielles. Les deux démarches s'appuient sur le modèle de gestion graduée des risques, utilisent une formule simple pour déterminer le score de risque et associent ce score à un niveau de risque. Les deux démarches intègrent deux types de descripteurs : des descripteurs communs à la méthodologie de référence, mais déclinés par des bandes et des scores différents, et des descripteurs différents à la méthodologie de référence. Les informations supplémentaires requises pour ces descripteurs ont été recueillies lors de la mise en application de la méthodologie sur le terrain.

La première démarche, nommée D_{EvRB1} intègre :

- la fréquence d'exposition, déclinée en quatre bandes ;
- la durée de l'exposition, déclinée en quatre bandes ;
- un intermédiaire, nommé « indice E », déterminé à l'aide d'une matrice combinant quatre bandes de fréquence et quatre bandes de durée. Le résultat obtenu est catégorisé en trois niveaux ;
- la gravité du dommage, déclinée en cinq bandes ;
- les facteurs aggravants pour la situation de travail ;
- le nombre de personnes exposées ;
- un indice de maîtrise M, qui correspond au nombre de mesures de prévention mises en œuvre (collective, signalisation, formation, individuelle...) ;
- un indice de maîtrise M', décliné en sept bandes, qui détermine la qualité de maîtrise des mesures de prévention, d'excellente à insuffisante.

Trois niveaux de risque sont calculés :

- le niveau de risque brut, qui est le produit de la gravité, de l'indice E, des facteurs aggravants et du nombre de personnes exposées ;
- le niveau de risque maîtrisé, qui est la division du niveau de risque brut et du nombre de mesures de prévention mises en œuvre ;

- le niveau de risque estimé, qui est la multiplication du niveau de risque brut et de du nombre de mesures de prévention mises en œuvre, le tout divisé par la qualité de maîtrise des mesures de prévention.

Ces trois niveaux de risque sont caractérisés en trois bandes et un code couleur :

- un **risque mineur**, en vert
- un **risque majeur**, en jaune
- un **risque critique**, en rouge.

La deuxième démarche, **D_{EvRB2}**, prend en compte :

- la fréquence d'exposition, déclinée en dix bandes ;
- la durée de l'exposition, déclinée en cinq bandes ;
- un intermédiaire, nommé « exposition E » obtenu par la multiplication de la fréquence et de la durée d'exposition, le tout divisé par 5 ;
- les facteurs aggravants pour la situation de travail ;
- la gravité du dommage, décliné en huit bandes ;
- les mesures de prévention, déclinées en 9 bandes.

L'indice de risque est le produit de l'exposition E, de la gravité, des mesures de prévention et des facteurs aggravants. Le score obtenu est catégorisé en cinq niveaux de risque, associés à un code couleur :

- **négligeable**, en blanc ;
- **faible**, en jaune clair ;
- **moyen**, en jaune foncé ;
- **important**, en orange foncé ;
- **très important**, en rouge.

La caractérisation des niveaux de risque de **D_{EvRB1}** et de **D_{EvRB2}** oriente les priorités d'action à mettre en œuvre.

La méthodologie de référence et **D_{EvRB1}** propose un nombre identique de niveaux de risque au nombre de trois. Les niveaux de risque des situations de travail évaluées par ces deux méthodologies sont comparables. Cependant, la **D_{EvRB2}** propose cinq niveaux de risque. Un appariement de niveaux de risque de la **D_{EvRB2}** a donc été effectué. Les niveaux de risque « négligeable » et « faible » de la **D_{EvRB2}** ont été joints pour être comparés au niveau de risque « modéré » de la méthodologie de référence. Les niveaux de risque « important » et « très important » de la **D_{EvRB2}** ont été unis pour être comparés au niveau de risque « sérieux » de la méthodologie de référence. Le niveau de risque « moyen » de la **D_{EvRB2}** a été comparé au niveau de risque « préoccupant » de la méthodologie de référence (**Tableau 39**).

Tableau 39 : Comparaison des niveaux de risque de la méthodologie de référence avec **D_{EvRB1}** et **D_{EvRB2}**.

D_{EvRB1}		Méthodologie de référence		D_{EvRB2}
Risque mineur	↔	Risque modéré	↔	Risque négligeable & Risque faible
Risque majeur	↔	Risque préoccupant	↔	Risque moyen
Risque critique	↔	Risque sérieux	↔	Risque important & Risque très important

1.3 Validation des résultats avec la base de données Colchic

L'étape de validation de la méthodologie avec les informations de Colchic repose sur la validation des scores de la méthodologie et de la comparaison avec les mesures de concentrations. L'objectif est de comparer les résultats obtenus à l'aide de la méthodologie de référence, en se référant au risque par inhalation, aux résultats d'une estimation quantitative du risque reflétée par les mesures de concentrations dans l'air des lieux de travail enregistrées dans Colchic.

Des informations collectées au cours du prélèvement sont jointes à l'enregistrement d'une mesure de concentration dans Colchic. Celles-ci sont codifiées à l'aide :

- d'une classification internationale, par exemple le numéro CAS (Chemical Abstract Service) pour les substances chimiques ;
- d'une classification nationale, par exemple, le secteur d'activité est codifié en se référant à la Nomenclature des Activités Françaises (NAF révision 2, 2008) ;
- d'un système propre à Colchic, par exemple des informations, telles que la méthode de prélèvement ou d'analyse, l'objectif de la mesure, sa représentativité, la ventilation, etc. sont codées à partir de tables de références communes.

Certaines informations accompagnant les mesures sont des descripteurs de risque. La sélection des bandes de ces descripteurs permet de caractériser la situation de travail quantifiée. La mesure d'une concentration d'une situation est donc associée à une clé, qui est un regroupement unique de bandes de descripteurs.

Pour comparer les niveaux de risque obtenus par notre méthodologie avec les niveaux de concentration de Colchic, les descripteurs de risque doivent être communs à ces deux sources.

1.3.1 Comparaison des scores de la méthodologie de référence

La clé est un regroupement unique de modalités de variables.

Les descripteurs de risque communs à la méthodologie de référence et à Colchic ont été identifiés. Dans la mesure où une clé est une combinaison unique de bandes de descripteurs, il existe une multitude de combinaisons qui est fonction du nombre de descripteurs et du nombre de bandes de chacun de ces descripteurs.

Le résultat numérique de chaque clé est calculé en multipliant le score de chaque bande des descripteurs de la méthodologie de référence. Les résultats ont été comparés entre eux pour apprécier leur cohérence par rapport à la situation de travail qu'ils caractérisent.

1.3.2 Comparaison des résultats de l'EvRB avec les mesures de concentrations de Colchic

Les niveaux de risques obtenus en utilisant la méthodologie de référence ont été comparés avec les mesures de concentrations centralisées dans Colchic. La démarche générale a consisté (i) à extraire toutes les mesures de concentrations des AB centralisées dans la base, (ii) de conserver celles qui ont été réalisées dans le secteur du compostage, (iii) d'identifier toutes les clés apparentées aux mesures et d'effectuer une analyse statistique simple, (iv) de calculer le niveau d'exposition et le niveau de risque de ces clés et de les comparer.

Colchic centralise des niveaux d'exposition de cinq AB pour le secteur de compostage :

- les bactéries cultivables à 25°C ;
- les bactéries cultivables à 56°C ;
- les moisissures cultivables à 25°C ;
- les moisissures cultivables à 47°C ;
- les endotoxines ;
- l'ochratoxine A.

Pour ces agents biologiques, et afin être le plus exhaustif possible, la démarche de travail a consisté à identifier toutes les clés et d'y associer :

- le nombre de mesures individuelles ;
- le nombre de mesures d'ambiance ;
- la durée minimale et maximale de prélèvement.

Une analyse statistique simple a été calculée pour chaque clé. Elle comprend :

- le minimum ;
- le maximum ;
- la moyenne et la moyenne géométrique ;
- l'écart type et l'écart type géométrique ;
- la médiane.

En s'appuyant sur cette analyse associée à chaque clé, l'hypothèse proposée est de comparer la médiane des concentrations aux valeurs guides à ne pas dépasser pour les agents biologiques. Pour assurer la représentativité des résultats, seules les clés représentant plus de 10 mesures ont été conservées. Dans la littérature, il existe des valeurs guides publiées (**Tableau 40**), mais elles varient généralement d'un pays à l'autre et ne sont pas en relation « prouvée » avec des effets sur la santé et dont la méthode de genèse n'est pas très homogène d'une valeur à l'autre (exploitation de statistique, simple avis d'experts, etc.). Selon la littérature exploitée, les bactéries thermophiles et les moisissures thermophiles ne disposent pas de valeur guide. Cependant, les mesures :

- de bactéries cultivables à 25°C sont en général comparées à la valeur de référence des bactéries mésophiles ;
- de bactéries cultivables à 47°C sont généralement comparées à la valeur de référence des bactéries thermophiles ;
- de moisissures cultivables à 25°C sont en général comparées à la valeur de référence de moisissures mésophiles ;
- d'endotoxines à la valeur de référence la plus citée pour les endotoxines (**Tableau 40**).

Les bactéries mésophiles et thermophiles ou les moisissures mésophiles et thermophiles représentent respectivement les bactéries cultivables et les moisissures cultivables. Bien qu'il existe une valeur guide pour les bactéries totales ou pour les moisissures totales, nous ne pouvons pas les comparer à la somme des bactéries mésophiles et thermophiles ou à la somme des moisissures mésophiles et thermophiles. En effet, les mesures de concentration des bactéries ou des moisissures totales représentent les bactéries ou les moisissures cultivables et non cultivables. Les mesures de bactéries ou de moisissures cultivables sous-estiment donc la mesure.

Tableau 40 : Valeurs guides des agents biologiques retenues pour comparer les médianes des mesures de concentration de Colchic dans la présente étude.

Mesures de concentration de Colchic	Valeurs de référence utilisées	Sources
Bactéries cultivables à 25°C	Bactéries mésophiles : 1 x 10 ⁴ UFC/m ³	(SUVA, 2015)
Bactéries cultivables à 47°C	Bactéries thermophiles : 2 x 10 ⁴ UFC/m ³	(Fracchia <i>et al.</i> , 2006)
Moisissures cultivables à 25°C	Moisissures mésophiles : 5 x 10 ⁴ UFC/m ³	(BAuA, 2018)
Endotoxines	Endotoxines : 90 UE/m ³	(Health Council of the Netherlands, 2010a) (Eduard <i>et al.</i> , 2012) (The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemical and the Dutch Expert Committee on Occupational Safety, 2011)

À l'instar des agents chimiques, le niveau d'exposition Colchic a été considéré comme :

- modéré, lorsque la médiane est inférieure à 10 % de la valeur guide ;
- préoccupant, lorsque la médiane est comprise entre 10 et 100 % de la valeur guide ;
- sérieux, lorsque la médiane est supérieure à la valeur guide.

Les niveaux de risque des clés identifiées dans Colchic ont été calculés avec la méthodologie de référence. Le calcul correspond à la multiplication des scores correspondant au niveau de chaque descripteur. De nouvelles bandes de niveaux de risque par inhalation ont été calculées afin de pouvoir comparer les niveaux de risque de ces clés. Le calcul de ces nouvelles bandes s'inspire du calcul des bandes de risque par inhalation de la méthodologie de référence, mais est restreint aux descripteurs communs à la méthodologie de référence et à Colchic. Les niveaux de risque ont finalement été comparés au niveau d'exposition Colchic.

2. Résultats-Discussion

2.1 Application de la méthodologie sur le terrain

Une vingtaine de tâches de travail ont été globalement évaluées à travers les visites des trois établissements comprenant les tâches observables lors de l'activité et les tâches simulées avec le questionnaire de risque car non observable par manque d'activité. Par exemple :

- la prise d'échantillon d'un compost mature non criblé (**Figure 34, (a)**). Cette opération implique le prélèvement de 1 à 2 kg de compost de granulométrie importante à l'aide d'une pelle utilisée à une main. La durée de prélèvement est

inférieure à 15 minutes et est réalisée 3 à 4 fois par an. Cette opération est un procédé dit ouvert, elle est réalisée en extérieur et ne possède pas de captage à la source. Le personnel n'utilise pas d'EPI au cours de cette tâche de travail ;

- la conduite d'un engin pour retourner des andains composés d'un mélange de digestat et de structurants (**Figure 34, (b)**). Cette opération implique la mise en œuvre de plus de 200 t/jour d'un solide peu friable. L'opération dure plus de 4h/jour et est réalisée toutes les 3 semaines. Dans son engin, il n'y a pas de contact possible entre la matière et le salarié. Cette opération est un procédé dit ouvert, elle est réalisée en extérieur et ne possède pas de captage à la source. Le personnel n'utilise pas d'EPI au cours de cette tâche de travail ;
- l'alimentation d'un cribleur à l'aide d'un engin (**Figure 34, (c)**). Cette opération implique la mise en œuvre de plus d'une tonne par jour de compost peu friable. La durée de la tâche est de plus de 4h/jour et est réalisée tous les jours de l'année. Le procédé est dit ouvert et le salarié est dans un engin dont la cabine n'est pas pressurisée. Le contact avec la matière et le salarié n'est pas possible.
- le criblage de compost frais (**Figure 34, (d)**). Cette opération implique la mise en œuvre de plus de 200 t/jour d'un solide peu friable. L'opération dure plus de 4h/jour et est réalisée toutes les 3 semaines. Dans son engin, il n'y a pas de contact possible entre la matière et le salarié. Cette opération est un procédé dit ouvert, elle est réalisée en extérieur et ne possède pas de captage à la source. Le personnel n'utilise pas d'EPI au cours de cette tâche de travail ;
- la réalisation de prélèvements de boues de STEP (**Figure 34, (e)**). Cette tâche implique la prise d'échantillon d'environ 1 L de matière pâteuse qui dure environ 5 minutes, mais est réalisée 5 fois/jour et tous les jours de l'année. Lors du prélèvement, il existe un contact possible entre les boues et le visage. Cette opération est un procédé dit ouvert, elle est réalisée en extérieur et ne possède pas de captage à la source. Le salarié n'utilise pas d'EPI pendant cette opération ;
- le dépoussiérage d'engin en fin de journée (**Figure 34 (f)**). Cette opération implique la mise en suspension de 1 à 100 kg de poussières de compost. L'opération dite dispersive, dure entre 15 minutes et 2 heures et est réalisée de 1 à 3 jours/semaine. L'opération est effectuée en extérieur sans captage à la source. Cette tâche génère des aérosols qui sont en contact possible avec le visage. Le salarié n'utilise pas d'EPI pendant cette opération ;
- le déchargement de déchets verts (**Figure 34, (g)**). Cette tâche implique la mise en œuvre de plus d'une tonne de déchets verts tous les jours en extérieur. La durée de la tâche est comprise entre 15 minutes et 2 heures. Le procédé est dit ouvert et il n'y a pas de captage à la source. Cette opération génère des aérosols qui peuvent être en contact avec les bras ou les jambes. Le salarié n'utilise pas d'EPI pendant cette opération...



(a) La prise d'échantillon d'un compost mature non criblé



(b) Le retournement d'andain à l'aide d'un engin



(c) L'alimentation d'un cribleur à l'aide d'un engin



(d) Le criblage de compost frais



(e) Le prélèvement de boues de STEP



(f) Le dépoussiérage d'un engin à l'aide d'une soufflette



(g) Le déchargement de déchets verts par un camion

| **Figure 34** : Photographies de quelques tâches de travail évaluées à l'aide de la méthodologie de référence [© Sarah Burzoni / INRS].

Le **Tableau 41** et le **Tableau 42** présentent les résultats de l'évaluation du risque par inhalation et par contact cutané des situations de travail, hiérarchisées par niveau de risque.

Tableau 41 : Résultats de l'évaluation **du risque par inhalation** des situations de travail de plateformes de compostage visitées.

Tâche de travail	Matière mise en œuvre	Bande et Score de danger potentiel		Bande et score de quantité		Bande et score de l'état physique		Bande et score de durée		Bande et score de fréquence		Bande et score de procédé		Bande et score de ventilation ou de captage		Score risque résiduel	Niveau de risque résiduel
		4	1000	1	5	1	0,10	1	0,13	1	0,13	3	0,80	3	0,50		
Prélèvement d'échantillon 1	Compost mature non criblé	4	1000	1	5	1	0,10	1	0,13	1	0,13	3	0,80	3	0,50	3,38	Modéré
Mise en place de sonde	Compost lors de la phase de fermentation	4	1000	1	5	1	0,10	1	0,13	2	0,25	3	0,80	3	0,50	6,50	Modéré
Prélèvement d'échantillon 2	Compost frais non criblé	4	1000	2	10	1	0,10	1	0,13	1	0,13	3	0,80	3	0,50	6,76	Modéré
Ronde 1 (vérification des installations)	Tous types de matières (Intrants, compost, digestat...)	4	1000	1	1	3	1,00	2	0,25	2	0,25	3	0,80	3	0,50	25,00	Préoccupant
Ronde 2 (vérification des installations)	Tous types de matières (Intrants, compost, digestat...)	4	1000	1	1	3	1,00	2	0,25	2	0,25	3	0,80	3	0,50	25,00	Préoccupant
Prélèvement d'échantillon de boues intrant	Boues	4	1000	1	5	1	0,10	2	0,25	4	1,00	3	0,80	3	0,50	50,00	Préoccupant
Conduite d'engin pour retourner les andains	Compost de la phase maturation	4	1000	3	50	1	0,10	2	0,25	1	0,13	3	0,80	3	0,50	65,00	Préoccupant
Ronde 3 (vérification des installations)	En présence de tous les produits, dont le compost	4	1000	1	1	3	1,00	3	0,50	4	1,00	1	0,40	3	0,50	100,00	Préoccupant
Chargement du cribleur pour le broyage à l'aide d'un engin	Déchets verts	4	1000	3	50	1	0,10	3	0,50	2	0,25	3	0,80	3	0,50	250,00	Préoccupant

Tâche de travail	Matière mise en œuvre	Bande et Score de danger potentiel		Bande et score de quantité		Bande et score de l'état physique		Bande et score de durée		Bande et score de fréquence		Bande et score de procédé		Bande et score de ventilation ou de captage		Score risque résiduel	Niveau de risque résiduel
Dépoussiérage des engins	Compost sous forme de poussières	4	1000	2	10	3	1,00	2	0,25	3	0,50	1	0,40	3	0,50	250,00	Préoccupant
Déchargement de déchets verts des gros camions	Déchets verts	4	1000	4	100	1	0,10	2	0,25	2	0,25	3	0,80	3	0,50	250,00	Préoccupant
Chargement de la trémie avec un godet (conducteur engin)	Intrants tout type : Fruits, déchets verts déchiquetés, structurants, fumier...	4	1000	4	100	1	0,10	2	0,25	4	1,00	3	0,80	3	0,50	1000,00	Préoccupant
Mélange du digestat avec du refus pour faire un andain (conducteur engin)	Digestat et déchets verts	4	1000	4	100	1	0,10	2	0,25	4	1,00	3	0,80	3	0,50	1000,00	Préoccupant
Retournement d'andain	Mélange (digestat, structurant...)	4	1000	4	100	1	0,10	4	1,00	2	0,25	3	0,80	3	0,50	1000,00	Préoccupant
Criblage	Compost frais	4	1000	4	100	1	0,10	4	1,00	2	0,25	3	0,80	3	0,50	1000,00	Préoccupant
Acheminement de la matière dans le cribleur à l'aide d'un chargeur 1	Compost à maturation	4	1000	4	100	1	0,10	4	1,00	4	1,00	3	0,80	3	0,50	4000,00	Sérieux
Criblage de déchets verts	Déchets verts	4	1000	4	100	3	1,00	3	0,50	3	0,50	3	0,80	3	0,50	10000,00	Sérieux
Acheminement de la matière à l'aide d'un chargeur 2	Compost	4	1000	4	100	2	0,50	4	1,00	4	1,00	3	0,80	3	0,50	20000,00	Sérieux

Tableau 42 : Résultats de l'évaluation du **risque par contact cutané** des situations de travail de plateformes de compostage visitées.

Tâche	Matière manipulée	Bande et Score de danger		Bande et score de quantité		Bande et score de durée		Bande et score de fréquence		Bande et score du scénario d'exposition		Bande et score de la surface exposée		Score risque résiduel	Niveau de risque résiduel
Ronde 1 (vérifications des installations)	Tous types de matières (Intrants, compost, digestat...)	4	1000	1	1	2	0,25	2	0,25	1	1E-04	/	/	0,01	Modéré
Conduite d'engin pour retourner les andains	Compost de la phase maturation	4	1000	3	50	2	0,25	1	0,13	1	1E-04	/	/	0,16	Modéré
Chargement du cribleur pour le broyage à l'aide d'un engin	Déchets verts	4	1000	3	50	3	0,5	2	0,25	1	1E-04	/	/	0,63	Modéré
Broyage/ciblage déchets	Déchets verts	4	1000	4	100	3	0,5	3	0,5	1	1E-04	/	/	2,50	Modéré
Chargement de la trémie avec un godet	Intrants tout type : Fruits, DV déchiquetés, structurant, fumier... (conducteur engin)	4	1000	4	100	2	0,25	4	1	1	1E-04	/	/	2,50	Modéré
Mélange de digestat avec du refus pour faire un andain (conducteur engin)	Digestat et déchets verts	4	1000	4	100	2	0,25	4	1	1	1E-04	/	/	2,50	Modéré
Retournement d'andain	Mélange (digestat, structurant...)	4	1000	4	100	4	1	2	0,25	1	1E-04	/	/	2,50	Modéré
Criblage	Compost frais	4	1000	4	100	4	1	2	0,25	1	1E-04	/	/	2,50	Modéré
Prélèvement d'échantillon 1	Compost mature	4	1000	1	5	1	0,13	1	0,13	2	0,3	1	0,1	2,54	Modéré

PARTIE 6 : VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE

Tâche	Matière manipulée	Bande et Score de danger		Bande et score de quantité		Bande et score de durée		Bande et score de fréquence		Bande et score du scénario d'exposition		Bande et score de la surface exposée		Score risque résiduel	Niveau de risque résiduel
Mise en place de sonde	Compost lors de la phase de fermentation	4	1000	1	5	1	0,13	2	0,25	2	0,3	1	0,1	4,88	Modéré
Prélèvement d'échantillon 2	Compost frais	4	1000	2	10	1	0,13	1	0,13	3	0,5	1	0,1	8,45	Modéré
Conduite d'un engin	Compost	4	1000	4	100	4	1	4	1	1	1E-04	/	/	10,00	Modéré
Acheminement de la matière dans le cribleur à l'aide d'un chargeur	Compost à maturation	4	1000	4	100	4	1	4	1	1	1E-04	/	/	10,00	Modéré
Ronde 2 (vérifications des installations)	Tous types de matières (Intrants, compost, digestat...)	4	1000	1	1	2	0,25	2	0,25	3	0,5	3	1	31,25	Préoccupant
Ronde 3 (vérifications des installations)	En présence de tous les produits, dont le compost	4	1000	1	1	3	0,5	4	1	3	0,5	3	1	250,00	Préoccupant
Dépoussiérage des engins	Compost sous forme de poussières	4	1000	2	10	2	0,25	3	0,5	3	0,5	3	1	625,00	Préoccupant
Prélèvement d'échantillon de boues intrant	Boues	4	1000	1	5	2	0,25	4	1	4	0,7	3	1	875,00	Préoccupant
Déchargement de déchets verts des gros camions	Déchets verts	4	1000	4	100	2	0,25	2	0,25	3	0,5	2	0,5	1562,50	Préoccupant

Les résultats indiquent que les situations de travail évaluées présentent davantage de risques élevés par inhalation que par contact cutané :

- 17 % des situations présentent des risques sérieux par inhalation et aucune par contact cutané ;
- 66 % des situations présentent des risques préoccupants par inhalation, tandis que 28 % présentent ce même niveau de risque par contact cutané ;
- 17 % des situations présentent des risques modérés par inhalation, tandis que 72 % des situations présentent ce même niveau de risque par contact cutané ;
- 17 % des situations présentent le même niveau de risque modéré par inhalation et par contact cutané ;
- 28 % des situations présentent le même niveau de risque préoccupant par inhalation et par contact cutané.

Les niveaux d'exposition obtenus semblent cohérents, bien que le niveau de danger n'influence pas le niveau de risque. En effet, l'étude préalable de la dangerosité des réservoirs a montré que tous les intrants et les composts présentaient la même bande de danger, la bande N°4.

Concernant l'exposition par inhalation, les sources d'émission d'aérosols impliquant de grandes quantités de matière ou de durée importante (par exemple, le retournement d'andains ou le criblage) influent sur le niveau de risque et présentent des risques sérieux. Pour ces situations prioritaires, les études publiées confirment ces situations de travail à risque et indiquent la nécessité de mettre en œuvre des mesures de prévention (Kummer & Thiel, 2008; Pearson *et al.*, 2015). Pour les situations de travail impliquant la manipulation de petites quantités de matière, l'absence d'émission d'aérosols et de courte durée (par exemple le prélèvement d'échantillon ou la mise en place de sonde), le niveau de risque est modéré.

Concernant l'exposition par contact cutané, les situations de travail n'impliquant pas de contact entre le réservoir et la peau, même si elles se déroulent sur une longue durée, présentent des niveaux de risque modéré. Les tâches qui impliquent un contact possible avec la matière et dont la surface exposée est non négligeable présentent des risques préoccupants. Ce sont ces dernières qui doivent être considérées pour améliorer les conditions de travail.

Pour une même voie d'exposition, le niveau de risque peut différer pour des tâches de travail similaires mais estimées sur des sites différents. Par exemple, pour l'évaluation de la tâche de vérification des installations, le scénario d'exposition change selon le gestionnaire de risque. Pour un site de petite taille ayant une faible activité de compostage, la présence de panache est faible, ce qui induit une exposition par contact cutané modéré. Au contraire, sur des sites de plus grande taille où l'activité est plus importante, la mise en suspension de la matière dans l'air induit un risque de contact cutané plus élevé.

2.2 Comparaison des résultats de la méthodologie avec d'autres démarches

Les résultats obtenus par la méthodologie de référence, par D_{EvRB1} et par D_{EvRB2} ont été confrontés selon les deux voies d'exposition (**Tableau 43**).

Tableau 43 : Résultats des niveaux de risque des situations de travail obtenues par la méthodologie de référence, par D_{EvRB1} et par D_{EvRB2}

Tâche de travail	Matière mise en œuvre	Méthodologie de référence		D _{EvRB1}			D _{EvRB2}
		Niveau de risque résiduel par inhalation	Niveau de risque brut résiduel par contact cutané	Catégorisation du risque brut	Catégorisation du risque maîtrisé	Catégorisation du risque estimé	Catégorisation du risque maîtrisé
Prélèvement d'échantillon	Compost mature non criblé	Modéré	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Mise en place de sonde	Compost lors de la phase de fermentation	Modéré	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Prélèvement d'échantillon	Compost frais non criblé	Modéré	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Ronde 1 (vérifications installations)	Tous types de matières (Intrants, compost, digestat...)	Préoccupant	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Ronde 2 (vérifications installations)	Tous types de matières (Intrants, compost, digestat...)	Préoccupant	Préoccupant	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Prélèvement d'échantillon de boues intrant	Boues	Préoccupant	Préoccupant	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Conduite d'engin pour retourner les andains	Compost de la phase maturation	Préoccupant	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Ronde 3 (vérifications installations)	En présence de tous les produits, dont le compost	Préoccupant	Préoccupant	Mineur	Mineur	Mineur	Faible
Chargement du cribleur pour le broyage à l'aide d'un engin	Déchets verts	Préoccupant	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Dépoussiérage des engins	Compost sous forme de poussières	Préoccupant	Préoccupant	Mineur	Mineur	Mineur	Faible

PARTIE 6 : VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE

Tâche de travail	Matière mise en œuvre	Méthodologie de référence		DEvRB1			DEvRB2
		Niveau de risque résiduel par inhalation	Niveau de risque brut résiduel par contact cutané	Catégorisation du risque brut	Catégorisation du risque maîtrisé	Catégorisation du risque estimé	Catégorisation du risque maîtrisé
Déchargement de déchets verts des gros camions	Déchets verts	Préoccupant	Préoccupant	Mineur	Mineur	Mineur	Faible
Chargement de la trémie avec un godet	Intrants tout type : Fruits, DV déchiquetés, structurant, fumier... (conducteur engin)	Préoccupant	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Mélange de digestat avec du refus pour faire un andain (conducteur engin)	Digestat et bois	Préoccupant	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Retournement d'andain	Mélange (digestat, structurant...)	Préoccupant	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Faible
Criblage	Compost frais	Préoccupant	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Faible
Acheminement de la matière dans le cribleur à l'aide d'un chargeur	Compost à maturation	Sérieux	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Faible
Criblage de déchets verts	Déchets verts	Sérieux	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Négligeable
Acheminement de la matière à l'aide d'un chargeur	Compost	Sérieux	Modéré	Mineur	Mineur	Mineur	Faible

L'une des premières constatations est que la méthodologie de référence est, dans 56 % des cas, plus préventive que D_{EVRB1} et D_{EVRB2} (**Tableau 44**).

Tableau 44 : Comparaison des niveaux de risque des situations de travail obtenus en appliquant la méthodologie de référence et les démarches comparatives D_{EVRB1} et D_{EVRB2} .

	Méthodologie de référence	
	Niveaux de risque par inhalation	Niveaux de risque par contact cutané
D_{EVRB1}	17 % niveaux homogènes 83 % niveaux sous-estimés	17 % niveaux homogènes 83 % niveaux sous-estimés
D_{EVRB2}	72 % niveaux homogènes 28 % niveaux sous-estimés	72 % niveaux homogènes 28 % niveaux sous-estimés

Pour comprendre ces résultats, prenons un exemple. Les niveaux de risque par inhalation ont été estimés avec la méthodologie de référence et avec D_{EVRB1} . Dans 17 % des cas, la méthodologie de référence et D_{EVRB1} ont estimé des niveaux de risque homogènes, tandis que dans 83 % des cas, D_{EVRB1} sous-estime les niveaux de risque par rapport à la méthodologie de référence.

D_{EVRB1} et D_{EVRB2} s'inspirent de la manière d'évaluer le risque en général et ingèrent d'autres descripteurs (paragraphe « Mise en application de la méthodologie sur le terrain »). Cependant, certains d'entre eux sont des descripteurs subjectifs, tels que la gravité du dommage ou le facteur aggravant. La détermination de la bande associée à ces descripteurs peut varier selon le gestionnaire de risque, peu sensibilisé ou trop préventif face au risque biologique. Par ailleurs, ces démarches prennent en compte les mesures de prévention et imposent au gestionnaire de risque de se prononcer sur l'efficacité de celles-ci. Il n'est pas garanti que le gestionnaire de risque, s'il est interne à l'entreprise, effectue le bon choix en toute impartialité. Ainsi, le niveau de risque peut varier en fonction du choix des bandes associées à ces descripteurs. L'aspect préventif de la démarche de référence peut s'expliquer parce que les démarches comparatives impliquent davantage des descripteurs subjectifs et moins de descripteurs d'exposition identifiables, tels que le type de procédé, la protection collective, le scénario d'exposition en cas de contact cutané, etc.

Les résultats obtenus avec la D_{EVRB1} indiquent qu'il n'y a aucune fluctuation du niveau de risque qu'il soit brut, maîtrisé ou estimé. Toutes les situations ont le niveau de risque homogène le plus faible, le niveau de risque « mineur ». L'application de cette démarche pour évaluer ces situations de travail ne permet pas de hiérarchiser ou distinguer les situations qui nécessiteraient des améliorations. Il semblerait que la démarche D_{EVRB1} ne soit pas très réaliste, cela peut être explicité par la nature des éléments requis pour évaluer les situations qui sont des éléments peu objectifs. Quant aux résultats obtenus

avec D_{EVRB2} , il existe une variation des niveaux de risque pour les tâches de travail. 61 % d'entre elles présentent le premier niveau de risque des plus faibles, le niveau de risque « négligeable » et 39 % présentent le second niveau de risque, le niveau de risque « faible ». Pour ces situations qui ont été estimées avec ce niveau de risque, qui est seulement le deuxième niveau de risque sur cinq, il est envisageable de proposer des mesures correctives, bien que le risque obtenu par D_{EVRB2} ne soit pas très élevé. À l'instar des commentaires effectués pour les résultats issus de la démarche d' $EVRB1$, les résultats ne semblent pas être tout à fait en adéquation avec les risques réellement encourus.

L'étude comparative des risques, obtenus avec la méthodologie de référence et les deux démarches D_{EVRB1} et D_{EVRB2} , indique que la méthodologie de référence présente des niveaux de risque hétérogènes, variant du niveau de risque le plus faible (i.e. le risque modéré), au plus élevé (i.e. le risque « sérieux »). Elle permet non seulement une hiérarchisation des risques, mais aussi de prioriser des actions à mettre en œuvre pour des situations qui sont documentées comme exposantes (Kummer & Thiel, 2008; Pearson *et al.*, 2015).

La dernière observation est que la démarche de référence permet d'estimer, de façon différenciée, le risque par inhalation et par contact cutané alors que les deux démarches comparatives estiment un niveau de risque sans vraiment préciser la voie d'exposition.

2.3 Validation avec les données de la base Colchic

2.3.1 Validation des scores

Un quadruplet de descripteurs permettant d'estimer le risque par inhalation est commun à la méthodologie de référence et à Colchic :

- la durée de l'exposition (Du) ;
- la fréquence (F) ;
- le procédé de travail (P).
- la ventilation/le captage à la source (V) ;

Dans la méthodologie de référence, les trois premiers descripteurs sont déclinés en quatre bandes et le dernier en cinq bandes. Les niveaux 1 des descripteurs sont les niveaux les plus faibles, les plus préventifs et les niveaux 4 et 5 sont les niveaux les plus élevés, les plus exposants (**Tableau 45**).

Tableau 45 : Bandes et scores des descripteurs communs à la méthodologie de référence et à Colchic.

Bandes de durée d'exposition	Score
Du1	0,13
Du2	0,25
Du3	0,5
Du4	1

Bandes de fréquence d'exposition	Score
F1	0,13
F2	0,25
F3	0,5
F4	1

Bandes de procédés de travail	Score
P1	0,3
P2	0,6
P3	0,8
P4	1

Bandes de ventilation/captage à la source	Score
V1	0,1
V2	0,3
V3	0,5
V4	0,7
V5	1

Au total 320 combinaisons de clés sont possibles, associées à 320 scores. La variation de ces scores est présentée en ordonnées à la **Figure 35**. Chaque point correspond à un score de clé unique. En abscisse de ce graphique, il n'a pas été possible d'y faire figurer les descripteurs de risque. Un zoom (encadré rouge) a donc été réalisé sur ce graphique représentant la variation des scores des clés lorsque le descripteur de la durée d'exposition est associé à une bande de durée de niveau 1, soit lorsque $Du=1$, affecté du score de 0,13 et que les niveaux des autres descripteurs varient d'une bande à une autre (**Figure 36**).

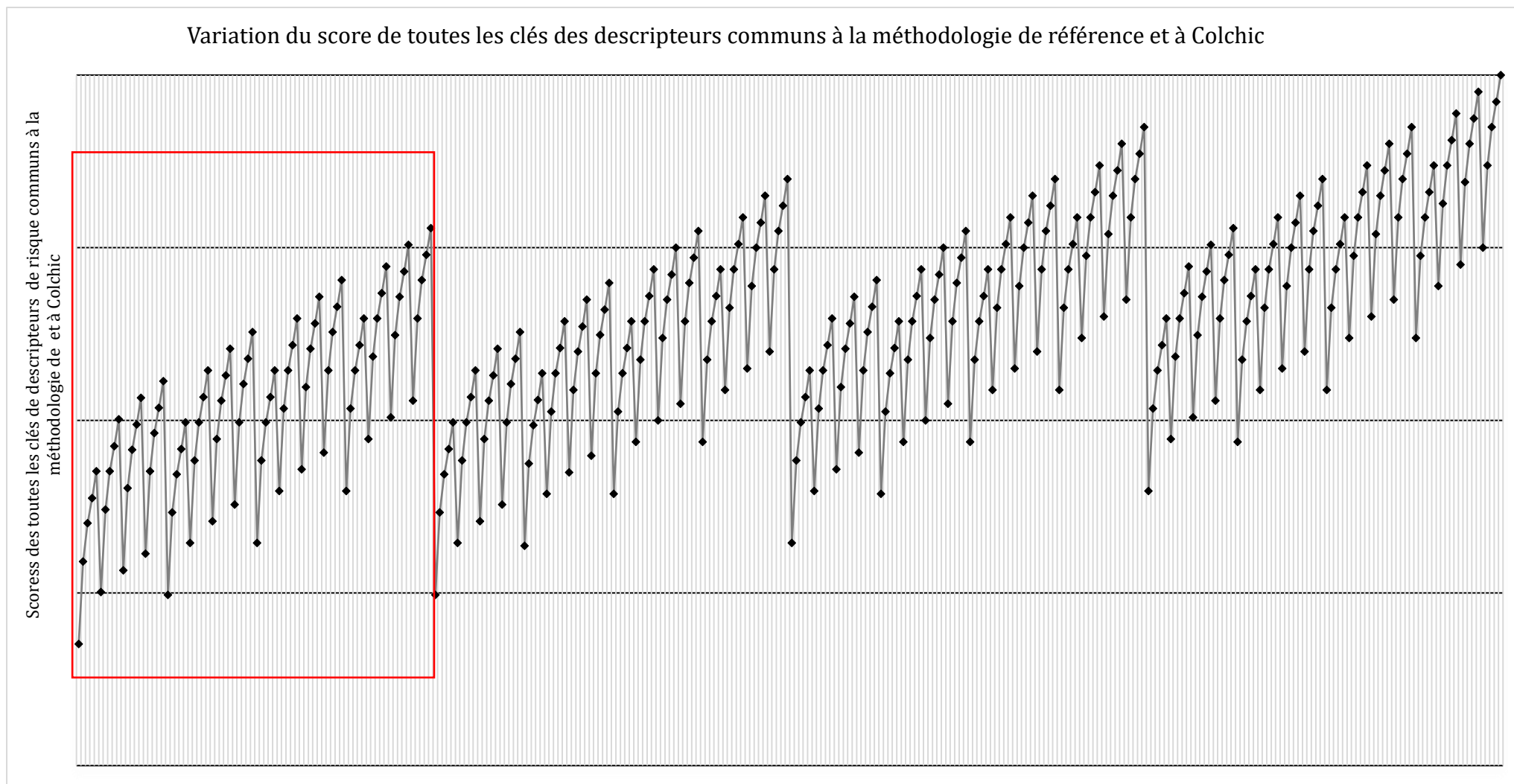


Figure 35 : Variation de scores de toutes les clés des descripteurs de risque communs à la méthodologie de référence et à Colchic.

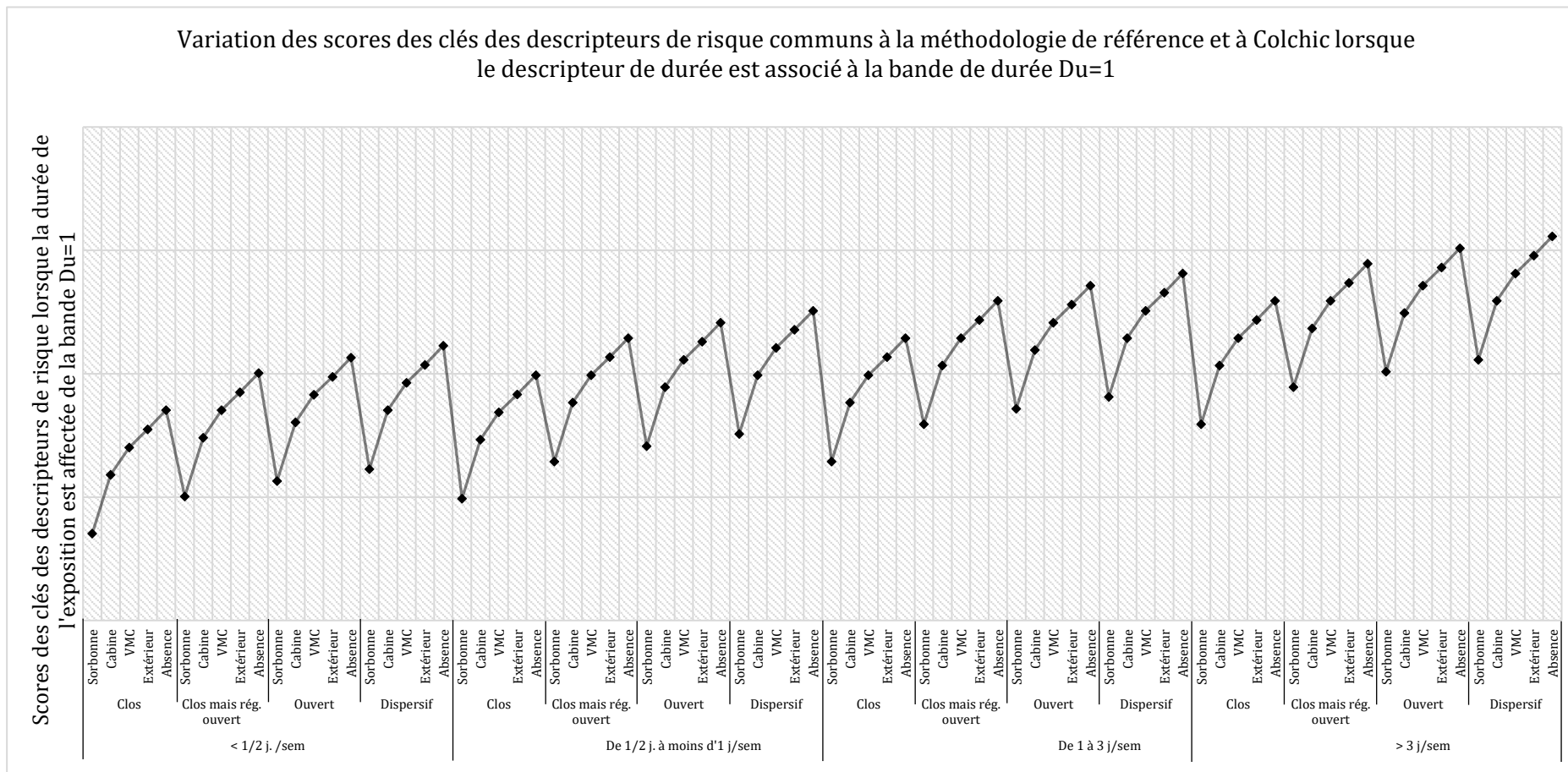


Figure 36 : Variation des scores des clés des descripteurs de risque communs à la méthodologie de référence et à Colchic lorsque le descripteur de durée est associé à la bande de durée Du=1 et que la protection collective, le type de procédé et la fréquence d'exposition varient d'une bande à l'autre.

D'une manière générale, les graphiques montrent une augmentation des scores des clés de descripteurs en fonction de l'accroissement des niveaux de chaque descripteur. Des situations de travail particulières ont été sélectionnées et leurs scores de risque ont été calculés et comparés. Ces situations ont été choisies afin d'observer l'influence des conditions de travail sur le score de risque en faisant varier les descripteurs tels que la fréquence, le type de procédé, la ventilation... Ces scores ont été obtenus en utilisant la formule S.Inh-R appliquée aux quatre descripteurs (**Formule 1**).

Formule 1 : Calcul du score de risque résiduel par inhalation (**S.Inh-R**)

$\text{S.Inh-R} = \text{Score de danger} \times \text{Score de quantité} \times \text{Score de l'état physique} \times \text{Score de la durée d'exposition} \times \text{Score de la fréquence} \times \text{Score du procédé de travail} \times \text{Score de protection collective}$
--

Premier cas, les situations de travail les plus extrêmes ont été comparées. La situation de travail la plus préventive, c'est-à-dire de courte durée, de faible fréquence, ayant pour procédé de travail totalement fermé et réalisé sous sorbonne, associée au quadruplet D1F1P1V1 est comparée à la situation de travail la plus exposante, c'est-à-dire de longue durée, de fréquence élevée, avec un procédé de travail dispersif en l'absence de captage, associée au quadruplet D4F4P4V5 :

- $\text{Du1F1P1V1} = 0,13 \times 0,13 \times 0,3 \times 0,1 = 0,000507$;
- $\text{Du4F4P4V5} = 1 \times 1 \times 1 \times 1 = 1$.

La situation de travail la plus exposante a bien un score de risque supérieur à la situation de travail la plus préventive. Ces premiers résultats sont cohérents.

Deuxième cas, lorsque les situations sont associées à des descripteurs de risque dont l'un passe d'un niveau à un autre. Par exemple, une situation de courte durée, de faible fréquence, ayant pour procédé de travail totalement fermé et réalisé sous sorbonne, D1F1P1V1, comparée à une situation de courte durée, d'une fréquence un peu plus élevée, ayant pour procédé de travail totalement fermé et réalisé sous sorbonne, D1F2P1V1 :

- $\text{Du1F1P1V1} = 0,000507$;
- $\text{Du1F2P1V1} = 0,13 \times 0,25 \times 0,3 \times 0,1 = 0,000975$.

Le score de risque de la deuxième situation supérieur au score de risque de la deuxième situation. Dans les mêmes conditions de travail, une situation de travail même un peu plus fréquente augmente bien le niveau de risque. Ces résultats sont cohérents.

Troisième cas, deux situations de travail présentent une durée et une fréquence identiques (D1F1). L'une présente un procédé de travail ouvert (P3) réalisé en présence d'une ventilation générale mécanique (V4). L'autre est une opération dispersive (P4) réalisée sous sorbonne (V1) :

- $\text{Du1F1P3V4} = 0,13 \times 0,13 \times 0,8 \times 0,7 = 0,009464$;
- $\text{Du1F1P4V1} = 0,13 \times 0,13 \times 1 \times 0,1 = 0,00169$.

L'opération dispersive réalisée sous sorbonne présente un niveau de risque plus faible qu'une opération ayant un procédé ouvert réalisée en présence d'une ventilation générale mécanique. Une opération même dispersive réalisée sous un captage enveloppant est moins exposante qu'une situation de travail quelconque réalisée en présence d'une ventilation générale mécanique. Ce résultat est cohérent.

Dernier cas, trois situations de travail sont comparées. Il s'agit des deux situations présentées au deuxième cas, Du1F1P1V1 comparée avec Du1F2P1V1, et cette dernière comparée à une situation de courte durée, de faible fréquence, ayant un procédé de travail ouvert réalisé sous sorbonne Du1F1P2V1 :

- D1F1P1V1 = 0,000507 ;
- D1F2P1V1 = 0,000975 ;
- D1F1P2V1 = $0,13 \times 0,13 \times 0,6 \times 0,1 = 0,001014$

Comme il a été montré précédemment, le score de risque d'une situation de travail de courte durée, de faible fréquence ayant un procédé totalement fermé réalisée sous sorbonne (Du1F1P1V1) est bien inférieur au score de risque d'une situation de travail similaire avec une fréquence un peu plus élevée (Du1F2P1V1). Par ailleurs, le score de cette deuxième situation est inférieur à une situation de travail de courte durée, de faible fréquence, ayant un procédé de travail fermé, mais quelques fois ouvert, réalisé sous sorbonne (Du1F1P2V1).

Une situation de travail de fréquence peu élevée, fermée et réalisée sous sorbonne est bien moins exposante qu'une situation de travail de faible fréquence, mais dont le procédé est fermé, mais quelques fois ouvert et toujours sous sorbonne. Des procédés de travail fermés et une protection collective optimale influent davantage sur la diminution des niveaux de risque que la fréquence de la tâche. Ce résultat est cohérent.

Les résultats obtenus ont permis de s'assurer de la cohérence de l'affectation des scores aux différents niveaux des descripteurs communs à la méthodologie de référence et à Colchic. Il a bien été observé que les situations de travail dont les conditions sont les plus protectrices présentent des niveaux de risque faible. Par ailleurs, à l'inverse les situations de travail les plus exposantes, par exemple ayant des procédés dispersifs ou sans ventilation présentent des niveaux de risque élevés (Tickner *et al.*, 2005).

2.3.2 Validation de la méthodologie avec les mesures de concentrations de Colchic

L'extraction de toutes les mesures de concentrations des AB a été effectuée sur la période 2008 à 2019. Au total, 20 AB sont décrits pour un nombre de 6 393 mesures. Concernant le secteur du compostage, cinq AB ont été mesurés représentant 835 mesures.

Pour les AB qui peuvent être comparés à une valeur guide (paragraphe « Comparaison des résultats de l'EvRB avec les mesures de concentrations de Colchic »), 58 clés ont été identifiées sur 320 combinaisons possibles, représentant 575 mesures de concentrations. En conservant les clés pour lesquels le nombre de mesures est supérieur à 10, le jeu de mesures concerne 475 concentrations, soit 77 % des mesures.

Pour chaque combinaison AB/clé, la médiane des concentrations a été calculée et rapportée à la valeur guide de l'AB (**Tableau 40**) pour calculer un indice d'exposition. La comparaison avec les 10 % de la valeur guide détermine le niveau d'exposition. Par exemple, pour une clé spécifique, la médiane des concentrations est de 55 UE/m³. Avec une valeur guide de 90 UE/m³ pour les endotoxines, le niveau de risque de cette clé est considéré comme « préoccupant ».

Les nouvelles bandes de niveaux de risque restreintes aux descripteurs communs ont été calculées. Les scores des descripteurs intermédiaires qui ont été retenus sont pour délimiter :

- le niveau modéré au niveau de risque préoccupant : le niveau 2 de la durée d'exposition, le niveau 2 de la fréquence de la tâche, le niveau 2 du procédé de travail et le niveau 3 de la ventilation/captage à la source, soit $0,25 \times 0,25 \times 0,6 \times 0,5 = 0,001875$;
- le niveau préoccupant au niveau de risque sérieux, le niveau 3 de la durée d'exposition, le niveau 3 de la fréquence de la tâche, le niveau 3 du procédé de travail et le niveau 4 de la ventilation/captage à la source, soit $0,5 \times 0,5 \times 0,8 \times 0,7 = 0,14$.

Dans ces circonstances, les clés ayant un score de risque :

- inférieur à 0,001875 ont un niveau de risque modéré ;
- compris entre 0,001875 et 0,14 ont un niveau de risque préoccupant ;
- supérieur à 0,14 ont un niveau de risque sérieux.

Les scores de chaque clé ont été obtenus en utilisant les scores de la méthodologie de référence et le niveau de risque a pu être identifié.

Finalement pour les quatre AB concernées, le niveau d'exposition de Colchic a été comparé au niveau de risque de la méthodologie de référence. Les niveaux ont été illustrés par leur code couleur (**Tableau 46**).

PARTIE 6 : VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE

Tableau 46 : Comparaison des niveaux d'exposition de Colchic et des niveaux de risque.

Agents biologiques	Nombre de clés totales	Nombre de clés (n>10)	Type de clé (n>10)	Médiane	Unités	Valeur guide	Niveau d'exposition Colchic	Score EvBR	Niveau EvRB	EvRB versus Colchic
Bactéries mésophiles	15	4	Du3_F4_P4_V5	117 900	UFC/m ³	10 000 UFC/m ³	> VG	0,5	Sérieux	Homogène
			Du4_F4_P4_V5	320 000			> VG	1	Sérieux	Homogène
			Du3_F4_P4_V5	159 000			> VG	0,5	Sérieux	Homogène
			Du3_F4_P2_V5	4 178			entre 10 % de VG et VG	0,3	Sérieux	Plus préventive
Bactéries thermophiles	12	3	Du3_F4_P4_V5	165 493	UFC/m ³	20 000 UFC/m ³	> VG	0,5	Sérieux	Homogène
			Du3_F4_P2_V5	2 759			entre 10 % de VG et VG	0,3	Sérieux	Plus préventive
			Du4_F4_P4_V5	503 287			> VG	1	Sérieux	Homogène
Moisissures mésophiles	14	4	Du3_F4_P4_V5	143 861	UFC/m ³	50 000 UFC/m ³	> VG	0,5	Sérieux	Homogène
			Du4_F4_P4_V5	196 000			> VG	1	Sérieux	Homogène
			Du3_F4_P4_V5	99 900			> VG	0,5	Sérieux	Homogène
			Du3_F4_P2_V5	8 553			entre 10 % de VG et VG	0,3	Sérieux	Plus préventive
Endotoxines	17	3	Du3_F4_P4_V5	55,9	UE/m ³	90 UE/m ³	entre 10 % de VG et VG	0,5	Sérieux	Plus préventive
			Du4_F4_P4_V5	59,5			entre 10 % de VG et VG	1	Sérieux	Plus préventive
			Du3_F4_P2_V5	5			<10 % VG	0,3	Sérieux	Plus préventive

VG : valeur guide

A l'issue des résultats, la première observation est que les niveaux de risque de toutes les clés présentent un niveau sérieux avec la méthodologie de référence. Les niveaux d'exposition de Colchic sont plus hétérogènes, du niveau le plus faible au niveau le plus élevé.

Les niveaux de risque sont homogènes avec les niveaux d'exposition de Colchic dans 57 % des situations. La méthodologie de référence est plus préventive dans 43 % des situations. Il est constaté que pour ces dernières situations, 83 % d'entre elles sont plus préventives avec un niveau de risque élevé et que 17 % sont plus préventives de deux niveaux de risque.

Une régression linéaire entre les niveaux d'exposition et le niveau de risque a permis d'obtenir un coefficient de détermination linéaire de Pearson $R^2 = 0,3273$ (**Figure 37**).

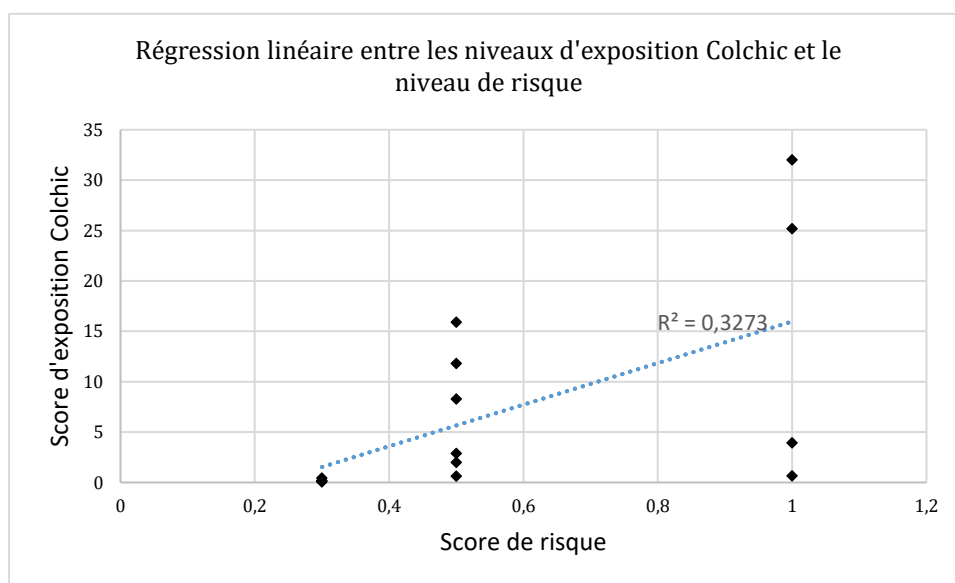
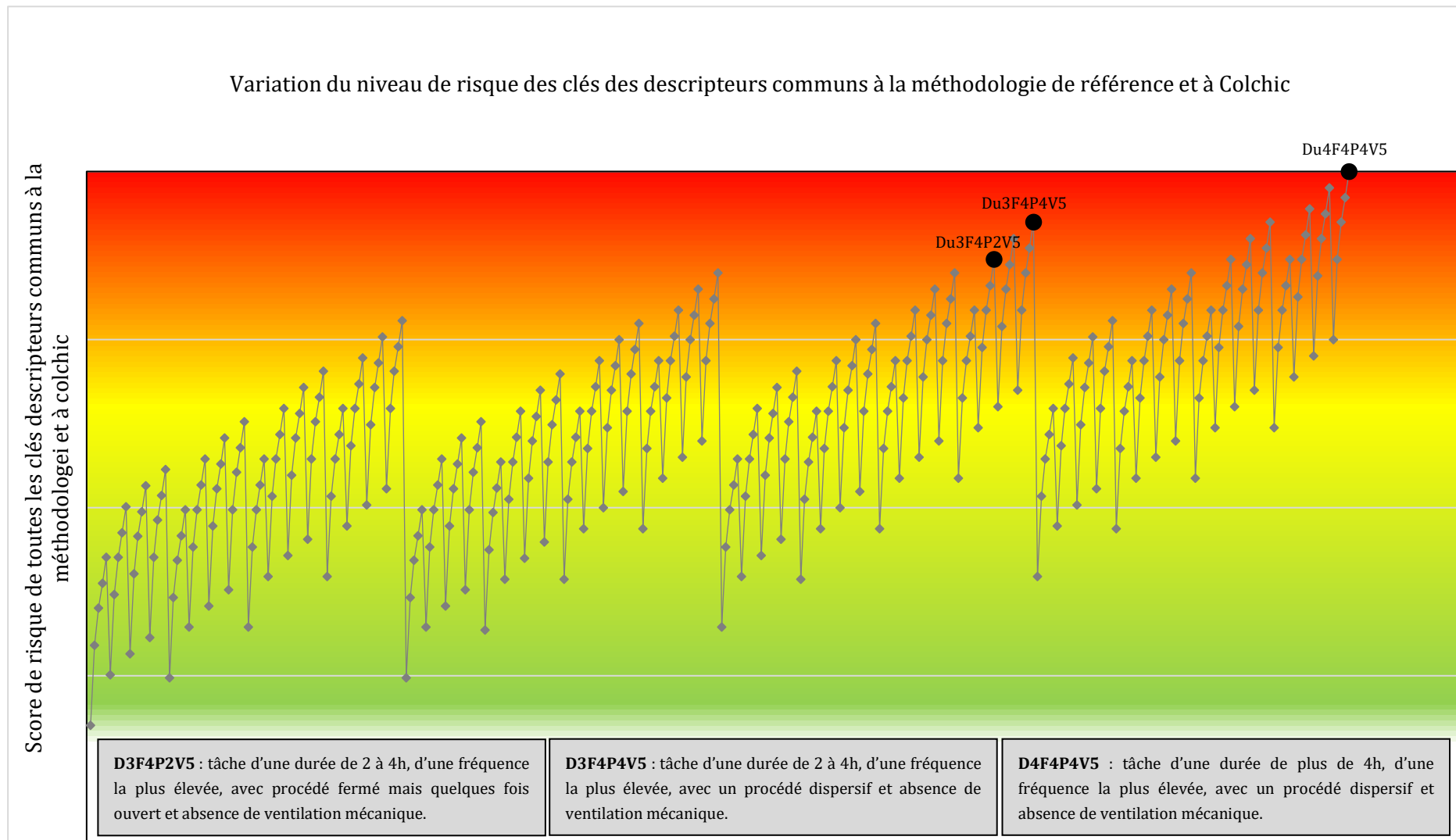


Figure 37 : Régression linéaire entre les niveaux d'exposition Colchic et le niveau de risque

Pour les quatre AB, 14 clés ont été identifiées. Cependant, pour tous les AB confondus, il y a seulement trois clés uniques. Les niveaux de risque obtenus par la méthodologie de référence pour ces trois clés ont été reportés sur le graphique de variation des scores des descripteurs communs à la méthodologie et à Colchic en intégrant le code couleur par niveaux (**Figure 38**).

Figure 38 : Représentation des trois clés uniques dans le système représentant le niveau de risque par la méthodologie de référence.



Les niveaux de risque et d'exposition Colchic des trois clés tous AB confondus ont été comparés (**Tableau 47**).

Tableau 47 : Comparaison du niveau d'exposition Colchic et du niveau de risque des trois clés tous AB confondus.

Clé	Nombre d'occurrences	Niveau d'exposition Colchic	Niveau de risque
Du3_F4_P2_V5	4	entre 10 % de VG et VG	Sup VG
		entre 10 % de VG et VG	Sup VG
		entre 10 % de VG et VG	Sup VG
		< 10% VG	Sup VG
Du3_F4_P4_V5	6	Sup VG	Sup VG
		Sup VG	Sup VG
		Sup VG	Sup VG
		Sup VG	Sup VG
		Sup VG	Sup VG
		entre 10 % de VG et VG	Sup VG
Du4_F4_P4_V5	4	Sup VG	Sup VG
		Sup VG	Sup VG
		Sup VG	Sup VG
		entre 10 % de VG et VG	Sup VG

VG : valeur guide

Pour les clés Du3_F4_P4_V5 et Du_F4_P4_V5, les niveaux d'exposition Colchic et les niveaux de risque sont plus homogènes que la clé Du3_F4_P2_V5. Cela peut s'expliquer par le fait que la dernière combinaison est la seule à impliquer une clé dont le procédé de travail est un système fermé, mais quelques fois ouvert. Par ailleurs, cette combinaison ne représente que des mesures d'ambiance. Une étude plus approfondie des situations de travail impliquées par cette clé permettrait peut-être de répondre en quoi la méthodologie de référence est plus préventive.

L'alimentation de la base de données Colchic et une approche qui ne prendrait en compte que les mesures individuelles permettraient une évolution des scores de la méthodologie de référence et ainsi que l'obtention d'une meilleure concordance entre les niveaux de risque et les niveaux d'exposition.

La mise en œuvre de cette méthodologie a montré qu'elle est plus préventive en comparaison à d'autres démarches utilisées en parallèle, et à l'exploitation des niveaux d'exposition enregistrés dans la base Colchic. La méthodologie de référence est en cohérence avec les niveaux de risque connus pour les situations de travail évaluées, a contrario des autres démarches. Cette méthodologie apporte une nouvelle aide dans l'estimation des risques encourus par les salariés.

ORIGINALITÉS

ORIGINALITÉS

Ces travaux ont ainsi fait émerger des hypothèses innovantes qui ont été formulées pour développer la méthodologie EvRB dans un secteur cible, le compostage.

D'abord, la méthodologie EvRB développée repose sur l'inventaire des espèces microbiennes présentes dans les réservoirs des plateformes de compostage qui a pu être dressé précisément en croisant les données de la littérature. Les communautés microbiennes présentes dans les aérosols sont à l'image de celles contenues dans les réservoirs (Schlosser & Huyard, 2008). Ainsi, les travaux publiés dressant un portrait général de la diversité microbienne dans les réservoirs ont été croisés avec d'autres qui synthétisent cette diversité dans les aérosols par des techniques de cultures et de séquençage.

Ensuite, les travaux de recherche menés dans cette thèse ont permis d'identifier la dangerosité des agents biologiques dont on a pu largement améliorer la pertinence en créant une nouvelle classification enrichie, et ainsi plus complète. En effet, cette nouvelle classification intègre non seulement la classification française, mais aussi la classification allemande qui va au-delà de la classification européenne, qui dispose d'un nombre de pathogènes plus nombreux et qui mentionne des AB du groupe 1.

Par ailleurs, l'exhaustivité des risques que peuvent présenter les espèces a été renforcée dans la méthodologie développée par rapport à l'existant. En effet, la méthodologie prend en compte non seulement les effets aigus, mais aussi les effets chroniques. Cela a été possible en tenant compte d'une part, de la classification franco-allemande et des dangers supplémentaires (mentionné par les notes A et T) et d'autre part, de la classification du CIRC. Cette approche constitue une réelle plus-value par rapport à l'existant pour lequel le risque des agents biologiques est seulement caractérisé par l'infectiosité.

Enfin, l'une des originalités de ces travaux réside dans la constitution d'une nouvelle hiérarchisation des dangers, en intégrant non seulement la classification du CIRC, mais aussi l'aspect cumulatif des dangers. Jusqu'alors, les travaux publiés avaient permis de classer les AB uniquement selon le risque infectieux (Cheneval *et al.*, 2017; J Lavoie *et al.*, 2007; J. Lavoie *et al.*, 2013).

LIMITES

LIMITES

Les travaux de thèse présentent certaines limites qui sont évoquées ci-après.

En effet, l'analyse des données bibliographique a permis de déterminer les espèces microbiennes présentes dans les réservoirs des plateformes de compostage. Cependant, les références correspondantes ne sont exhaustives en termes de réservoirs et d'AB présents dans ces derniers. Ceci pourrait affecter la représentativité de la méthodologie. Pour pallier ce problème, nous avons effectué un compromis pour le choix de ces références afin de répondre à nos objectifs. Ainsi, l'approche utilisée repose sur la prise en compte des principaux réservoirs mis en œuvre et leurs diversités microbiennes majoritaires.

De même, la détermination des dangers des réservoirs a reposé sur un compromis concernant l'identification des espèces présentes. Comme l'estimation du danger d'un taxon à un autre est possible à partir de cette identification, le manque de connaissance exhaustive des espèces potentiellement présentes dans les réservoirs fragilise de fait la détermination des dangers des réservoirs.

La hiérarchisation des dangers intégrant la classification du CIRC et l'aspect cumulatif des dangers reste perfectible, notamment au regard du manque de données concernant cet aspect cumulatif. À ce jour, il n'y a pas d'autre moyen de pallier cela que par l'apport de connaissance sur la dangerosité des agents biologiques, d'une part en intégrant tous les dangers, en ne se limitant pas seulement au potentiel infectieux, et d'autre part, en considérant les possibles interactions de ce danger avec d'autres dangers que présentent les AB.

La base Colchic est peu documentée en termes de mesures de concentrations d'AB au sein du secteur de compostage. Cela peut être induit d'une part, par l'enregistrement des mesures d'AB plus récent, depuis 2008, au regard de l'enregistrement des mesures d'agents chimiques, depuis 1987. D'autre part, Colchic, source importante dans la connaissance des expositions professionnelles en France, n'a pas été créée avec un objectif d'être représentative de la population de travailleurs en général. Les situations rapportées sont orientées vers celles pour lesquelles un risque a été préalablement identifié. Ainsi, les étapes conduisant à la mesure et à l'enregistrement sont susceptibles d'induire un biais de cette mesure par rapport à la population générale (Mater, 2016).

Finalement, les niveaux d'exposition Colchic identifiés sont davantage représentés par des mesures d'ambiances que par des mesures individuelles. Cependant, les mesures d'ambiance ne sont pas représentatives des mesures d'exposition, elles sous-estiment l'exposition (J. W. Cherrie, 2003). Dans ce contexte les niveaux d'exposition Colchic qui ont été déterminés seraient probablement supérieurs s'ils étaient représentatifs des mesures individuelles. Ainsi, ces niveaux d'exposition se rapprocheraient des niveaux de risque estimés par la méthodologie de référence.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse a permis, après une analyse approfondie et critique de démarches existantes dans le domaine du risque biologique en milieu de travail, de concevoir, appliquer et valider une méthodologie d'évaluation qualitative du risque biologique de référence en ciblant le secteur du compostage comme secteur expérimental.

La mise en œuvre de cette méthodologie a montré qu'elle est plus préventive en comparaison à d'autres démarches utilisées en parallèle, et à l'exploitation des niveaux d'exposition enregistrés dans la base Colchic. La méthodologie de référence comble le déficit existant en matière d'évaluation du risque biologique. Elle répond au développement de méthodes d'évaluation meilleures, car elle est davantage exhaustive que les démarches existantes. La méthodologie de référence est en cohérence avec les niveaux de risque connus pour les situations de travail évaluées, a contrario des autres démarches. Les démarches actuelles pourraient donc ne pas être suffisamment protectrices. La méthodologie de référence intègre un nombre plus important de descripteurs de risque, qui sont définis de manière plus objective et associés à des scores plus appropriés que les autres démarches. Ceci pourrait constituer, avec l'application de ces démarches, une déficience dans la protection des travailleurs. L'adaptation de cette méthodologie de référence à d'autres secteurs d'activité est une opportunité permettant d'acquérir de nouvelles connaissances sur les risques encourus par les salariés en milieu de travail.

La méthodologie de référence proposée dans ces travaux comporte une partie qui n'est pas spécifique au secteur d'activité et une autre partie qui lui est spécifique, telle que la connaissance des agents biologiques présents dans un réservoir et leur dangerosité. Cependant, toute application dans un autre secteur nécessite de connaître la biodiversité des AB présents dans ce secteur. Il est donc nécessaire de synthétiser cette connaissance au préalable et de promouvoir le développement des connaissances sur la biodiversité des AB dans les environnements professionnels. La démarche utilisée pour la partie spécifique pourrait alors être mise à disposition pour différents secteurs. Ce prérequis, nécessaire au gestionnaire de risque, lui permettrait d'adapter cette étape à son secteur d'activité et d'être en capacité de réaliser son évaluation de risque.

Diverses pistes d'évolution de notre travail ont été identifiées. Dans la méthodologie conçue, l'estimation de la dangerosité d'un réservoir repose sur la connaissance bibliographique de la biodiversité des communautés microbiennes présentes au sein de ce réservoir en y associant la classification de danger propre à chaque AB. Il serait profitable de compléter cette connaissance en estimant la proportion numérique de chaque taxon, par exemple par phylum, au sein du réservoir. Les agents biologiques présents étant davantage précisés, l'attribution d'une bande de danger sera *de facto* plus pertinente. Cette classification des dangers, combinée avec l'importance numérique, permettrait alors d'ajuster la dangerosité du réservoir.

Par ailleurs, l'amélioration des informations relatives à la toxicité des agents biologiques, notamment en termes d'effets cumulatifs, permettrait de perfectionner la matrice de hiérarchisation des dangers. Ainsi, ces évolutions permettraient de préciser davantage la

distinction des niveaux de danger, le niveau de danger attribué aux réservoirs et donc, celui des risques associés aux situations de travail les mettant en œuvre.

Enfin, deux améliorations pourraient être apportées à la méthodologie proposée. D'abord, une fois le danger des réservoirs précisé, la hiérarchisation des risques potentiels pourrait intégrer la méthodologie comme une étape intermédiaire. En présence de plusieurs situations de travail à évaluer, il est utile d'établir des priorités d'évaluation en hiérarchisant les tâches de travail en fonction de leur risque potentiel le plus important. Cette étape tient compte de deux descripteurs particuliers, le danger et la quantité. La hiérarchisation des risques potentiels fournit des éléments objectifs de décision pour déterminer les situations nécessitant une évaluation plus détaillée des risques par inhalation et par contact cutané. Ensuite, en plus de cette étape intermédiaire, un niveau de risque supplémentaire pourrait être intégré. Il s'agit d'un niveau de risque pondéré par inhalation et un niveau de risque pondéré par contact cutané qui prendrait en compte les équipements de protection individuelle (EPI), tout en s'assurant de leur adéquation et de leur bonne utilisation. Le risque pondéré ne supplanterait pas le risque résiduel. Ce dernier serait celui sur lequel les préventeurs devraient se baser pour mettre en place des mesures de prévention collectives. Le risque pondéré viendrait en complément en donnant de l'information sur l'impact des EPI.

Nos travaux fournissent une méthodologie propre à l'évaluation du risque plus complète que l'existant. La méthodologie de référence pourrait être utilisée dans des études épidémiologiques portant sur l'évaluation du risque sanitaire des salariés, notamment du secteur de compostage en regard de leurs expositions aux AB. Ceci pourrait se faire non seulement par une approche relative à la biodiversité microbienne, mais également en intégrant la dimension de la toxicité propre des AB, donnée qui est pour le moment trop peu documentée. Les résultats de ces études épidémiologiques seraient de nouveaux éléments à comparer avec les résultats des niveaux de risque estimés par la méthodologie de référence qui serait ainsi davantage améliorée.

Au-delà de ces perspectives, les travaux de thèse ont permis de proposer une méthodologie d'évaluation qualitative du risque biologique. Cette méthodologie constitue une aide supplémentaire permettant aux employeurs d'estimer les risques et d'améliorer les conditions de travail des salariés pouvant être exposés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 3RB (Réseau Ressources Risque biologique). (2016). Evaluation des risques : éléments de méthodes. Retrieved from http://www.esst-inrs.fr/3rb/afftexte.php?p1=cotation_risque. (accessed on 27 march 2020)
- Abecassis, P., Bediot, G., Goliro, M., Le Quang, X., Marguet, G., Petit, P., & Picard, D. (2004). La méthode Oper@ pour l'évaluation chiffrée du risque chimique. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 65(2-3), 116.
- Académie de Grenoble. (2010). Prévention des risques biologiques - Risques biologiques au laboratoire de génie biologique. Retrieved from <https://sti-biotechnologies-pedagogie.web.ac-grenoble.fr/> (accessed on 27 march 2020)
- ADEME. (2015). Le compostage. In Expertises (Ed.), *Fiche technique* (pp. 20). Angers: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.
- ADEME. (2020). Déchets chiffres-clés - Edition 2020 - Collection : Faits & chiffres. 80.
- ADEME. (2021). Le traitement des déchets. Retrieved from <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/traitement-dechets> (consulté le 20 janvier 2021)
- ADEME Département gestion biologique et sols. (2007). *Audit des plates-formes de compostage de déchets organiques en France avec analyses de composts, d'eaux de ruissellement et bilan des aides ADEME au compostage des déchets verts* Retrieved from Angers:
- Advisory Committee on Dangerous Pathogens. (2003). Infection at work: Controlling the risks—A guide for employers and the self-employed on identifying, assessing and controlling the risks of infections in the workplace. Retrieved from <https://www.hse.gov.uk/pubns/infection.pdf> (accessed on 06 july 2020)
- Advisory Committee on Dangerous Pathogens. (2005). Biological Agents: Managing the Risks in Laboratories and Healthcare Premises. In (pp. 80). Norwich, UK: Health and Safety Executive (HSE).
- AFNOR. (2018). Norme française NF EN 689 "Exposition sur les lieux de travail — Mesurage de l'exposition par inhalation d'agents chimiques — Stratégie pour vérifier la conformité à des valeurs limites d'exposition professionnelle". In (pp. 66). La plaine Saint-Denis: Association française de normalisation.
- AFNOR. (2020). Air des lieux de travail - Santé et Sécurité. Retrieved from <https://www.afnor.org/> (consulté le 15 juillet 2020)
- American Industrial Hygiene Association. (2007). *Guidance for conducting control banding analyses* (Vol. 9): AIHA.

- ANSES's Committee for the Control of Biological Risks in Laboratories (CMRBL). (2012). Methodological guide to the assessment of biological safety and security risks. In (pp. 32). Maisons-Alfort: Agence Nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES).
- ANSES. (2010a). Development of a specific Control Banding Tool for Nanomaterials. 50.
- ANSES. (2010b). *Development of a specific Control Banding Tool for Nanomaterials*. Retrieved from Maisons-Alfort: <https://www.anses.fr/en/system/files/AP2008sa0407RaEN.pdf>
- ANSES. (2018). *Aspergillus flavus et autres moisissures productrices d'aflatoxines*. Retrieved from Maisons-Alfort
- ANSES. (2019). *Evaluation des risques sanitaires pour les professionnels du secteur de la gestion des déchets en France*. Retrieved from Maisons-Alfort:
- Anzivino-Viricel, L., Falette, N., Carretier, J., Montestrucq, L., Guye, O., Philip, T., & Fervers, B. (2012). Gestion des déchets ménagers et assimilés: bilan des connaissances et évaluation des effets sanitaires en population générale et au travail. *Environnement, Risques & Santé*, 11(5), 360-377.
- Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt. (2013). TRBA (Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe) 214—Abfallbehandlungsanlagen. 978-989.
- Arndt, R., Packroff, R., Gorner, B., Guhe, C., Lechtenberg-Auffarth, E., Lotz, G., & Tischer, M. (2005). An easy-to-use workplace control scheme for hazardous substances-A guidance for small and medium enterprises to comply with the new German Ordinance on hazardous substances for hazardous chemical agents without an occupational exposure limit value. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*, 65(1-2), 13.
- Arnone, M., Koppisch, D., Smola, T., Gabriel, S., Verbist, K., & Visser, R. (2015). Hazard banding in compliance with the new Globally Harmonised System (GHS) for use in control banding tools. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 287-295.
- Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS). (2017). TRBA 400 Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung und für die Unterrichtung der Beschäftigten bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen. In. Dortmund, Germany: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- Bailey, E. S., Choi, J. Y., Zemke, J., Yondon, M., & Gray, G. C. (2018). Molecular surveillance of respiratory viruses with bioaerosol sampling in an airport. *Tropical diseases, travel medicine and vaccines*, 4(1), 11.
- Balsat, A., De Graeve, J., & Mairiaux, P. (2003). A structured strategy for assessing chemical risks, suitable for small and medium-sized enterprises. *Annals of Occupational Hygiene*, 47(7), 549-556.

- Balty Isabelle, & Bayeux-Dunglas Marie-Cécile. (2018). De l'évaluation à la prévention. *Hygiène et sécurité du travail*, 252, 24-28.
- Basu, S. (2020). *The health of compost workers*. University of Sheffield,
- BAuA. (2016). EMKG Easy-to-use Workplace Control Scheme for Hazardous Substances In. Dortmund (Allemagne): Federal Institute for Occupational Safety and Health.
- BAuA. (2018). *Anlagen zur Behandlung und Verwertung von Abfällen*. Retrieved from Dortmund, Allemagne:
- BAuA. (2021). Technical Rules for Biological Agents (TRBA). Retrieved from https://www.baua.de/EN/Home/Home_node.html (consulté le 20 mai 2020)
- Beaussonie, G. (2016). Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. *Revue de science criminelle et de droit pénal comparé*(4), 919.
- Beffa, T., Staib, F., Lott Fischer, J., Lyon, P., Gumowski, P., Marfenina, O., ... Gallaz, L. (1998). Mycological control and surveillance of biological waste and compost. *Medical Mycology*, 36(1), 137-145.
- Belgian Biosafety Server. (2016). Biological Risk Assessment Sheets. Retrieved from <https://www.biosafety.be/> (accessed on 27 march 2020)
- Boehm, A. B., Graham, K. E., & Jennings, W. C. (2018). Can We Swim Yet? Systematic Review, Meta-Analysis, and Risk Assessment of Aging Sewage in Surface Waters. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9634-9645. doi:10.1021/acs.est.8b01948
- Bonnard, R. (2001). *Le risque biologique et la méthode d'évaluation du risque*. Retrieved from Verneuil-en-Halatte, France:
- Brooke, I. (1998). A UK scheme to help small firms control health risks from chemicals: toxicological considerations. *The Annals of Occupational Hygiene*, 42(6), 377-390.
- Brouwer, D. (2012). Control Banding Approaches for Nanomaterials. *Annals of Work Exposures and Health*, 56(5), 506-514. doi:10.1093/annhyg/mes039
- Brun, E. (2007). *Expert forecast on emerging biological risks related to occupational safety and health*. Brussels, Belgium: Office for Official Publications of the European Communities.
- Bünger, J., Antlauf-Lammers, M., Schulz, T. G., Westphal, G. A., Müller, M. M., Ruhnau, P., & Hallier, E. (2000). Health complaints and immunological markers of exposure to bioaerosols among biowaste collectors and compost workers. *Occupational and Environmental Medicine*, 57(7), 458-464.

- Bürger, J., Schappler-Scheele, B., Hilgers, R., & Hallier, E. (2007). A 5-year follow-up study on respiratory disorders and lung function in workers exposed to organic dust from composting plants. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80(4), 306-312.
- Burd, E. M. (2015). Ebola virus: a clear and present danger. *Journal of clinical microbiology*, 53(1), 4-8.
- Burzoni, S., Duquenne, P., Mater, G., & Ferrari, L. (2020). Workplace Biological Risk Assessment: Review of Existing and Description of a Comprehensive Approach. *Atmosphere*, 11(7), 741.
- Carducci, A., Donzelli, G., Cioni, L., & Verani, M. (2016). Quantitative Microbial Risk Assessment in Occupational Settings Applied to the Airborne Human Adenovirus Infection. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(7), 733.
- Caskey, S., Gaudio, J., & Salerno, R. (2009). Biosecurity Risk Assessment Methodology (BioRAM) v. 2.0 (Version 00). Livermore, CA, USA: U.S. Department of Energy - Office of Scientific and Technical Information. Retrieved from <https://www.osti.gov/biblio/1231181-biosecurity-risk-assessment-methodology-bioram> Accessed 15 september 2017
- Cavet, M., Coutrot, T., & Rivalin, R. (2013). Les risques professionnels en 2010: de fortes différences d'exposition selon les secteurs. In (pp. 12). Corbevoie, France: Dares Analyses.
- CCHST. (2020). Danger et risque. Retrieved from https://www.cchst.ca/oshanswers/hsprograms/hazard_risk.html (Consulté le 14 septembre 2020)
- Cheneval, E., Busque, M. A., Ostiguy, C., Lavoie, J., Bourbonnais, R., Labrèche, F., & Zayed, J. (2017). *Green Jobs in Quebec: Definition and Assessment of Potential Chemical and Biological Risks to Workers' Health*. Montreal, QC, Canada: Institut de recherche Robert-Sauvé en sante et en securite du travail (IRSST).
- Cherrie, Schneider Thomas, Spankie Sally, & Quinn Margaret. (1996). A new method for structured, subjective assessments of past concentrations. *Occupational Hygiene*, 3, 75-83.
- Cherrie, J. W. (2003). Commentary: The Beginning of the Science Underpinning Occupational Hygiene. *The Annals of Occupational Hygiene*, 47(3), 179-185. doi:10.1093/annhyg/meg030
- Cho, I., & Blaser, M. J. (2012). The human microbiome: at the interface of health and disease. *Nature Reviews Genetics*, 13, 260. doi:10.1038/nrg3182
- Chyba, C. F. (2002). Toward biological security. *Foreign Affairs*(81), 122-136.

- CMRBL (Comité de Maîtrise des Risques Biologiques en Laboratoire). (2012). Methodological guide to the assessment of biological safety and security risks. In (pp. 32). Maisons-Alfort, France: Agence Nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES).
- CNRS. (2017). Risques biologiques : les cahiers de prévention. Retrieved from <http://www.dgdr.cnrs.fr/SST/CNPS/guides/risquebio.htm> (accessed on 27 march 2020)
- Coelho, A. C., & García Díez, J. (2015). Biological Risks and Laboratory-Acquired Infections: A Reality That Cannot be Ignored in Health Biotechnology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 3(56). doi:10.3389/fbioe.2015.00056
- Corrao, C. R. N., Mazzotta, A., La Torre, G., & De Giusti, M. (2012). Biological risk and occupational health. *Industrial health*, 50(4), 326-337.
- Cosanta. (2019). Stoffenmanager®8. Retrieved from <https://stoffenmanager.com/> (Consulté le 16 juillet 2020)
- Crameri, R. (1998). Recombinant *Aspergillus fumigatus* allergens: from the nucleotide sequences to clinical applications. *International archives of allergy and immunology*, 115(2), 99-114.
- Crook, B. H. S. L. (2007). Difficulty of assessing biological risks in the workplace. In (pp. 19). Bruxelles, Belgium: An Agency of the Health and Safety Executive
- Dabert, P. (2019). Les émissions d'ammoniac en usine de méthanisation-compostage des déchets. *Les cahiers de la Recherche. Santé, Environnement, Travail*(14), 34-36.
- Dacarro, C., Grisoli, P., Del Frate, G., Villani, S., Grignani, E., & Cottica, D. (2005). Micro-organisms and dust exposure in an Italian grain mill. *Journal of Applied Microbiology*, 98(1), 163-171. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2004.02437.x>
- Dasaklis, T. K., Pappis, C. P., & Rachaniotis, N. P. (2012). Epidemics control and logistics operations: A review. *International Journal of Production Economics*, 139(2), 393-410. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.05.023>
- de Guardia, A. (2018). *Compostage et Composts. Avancées scientifiques et techniques*: Lavoisier Tec & Doc.
- Degois, J., Clerc, F., Simon, X., Bontemps, C., Leblond, P., & Duquenne, P. (2017). First metagenomic survey of the microbial diversity in bioaerosols emitted in waste sorting plants. *Annals of Work Exposures and Health*, 61(9), 1076-1086.
- Demange, V., Barrera, C., Laboissière, A., Duquenne, P., Simon, X., Millon, L., . . . Grzebyk, M. (2020). Effects of plant features on symptoms and airway inflammation in compost workers followed over 18 months. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 75(4), 191-200.

- Deportes, I., Loyon, L., Mallard, P., & Guiziou, F. (2012). *Programme de recherche de l'Ademe sur les émissions atmosphériques du compostage. Connaissances acquises et synthèse bibliographique-rapport final*. irstea,
- Desroches Alain, Federighi Michel, Garbolino Emmanuel, Grandamas Olivier, Guarnieri Franck, Iddir Olivier, . . . Zwingelstein Gilles. (2016). Méthodes d'analyse des risques. *Techniques de l'ingénieur*. Retrieved from <https://www.techniques-ingenieur.fr> (consulté le 2 mars 2018)
- Dewhirst, F. E., Chen, T., Izard, J., Paster, B. J., Tanner, A. C. R., Yu, W.-H., . . . Wade, W. G. (2010). The Human Oral Microbiome. *Journal of Bacteriology*, 192(19), 5002-5017. doi:10.1128/jb.00542-10
- Diao, B., Amath, T., Fall, B., Fall, P., Diémé, M., Steevy, N., . . . Diagne, B. (2008). Les cancers de vessie au Sénégal: particularités épidémiologiques, cliniques et histologiques. *Progrès en urologie*, 18(7), 445-448.
- Domingo, J. L., & Nadal, M. (2009). Domestic waste composting facilities: a review of human health risks. *Environment international*, 35(2), 382-389.
- Douwes, J., Thorne, P., Pearce, N., & Heederick, D. (2003). Bioaerosol health effects and exposure assesment : Progress and prospects. *The Annals of Occupational Hygiene*, 47(3), 187-200.
- Douwes, J., Wouters, I., Dubbeld, H., van Zwieten, L., Steerenberg, P., Doekes, G., & Heederik, D. (2000). Upper airway inflammation assessed by nasal lavage in compost workers: a relation with bio-aerosol exposure. *American Journal of Industrial Medicine*, 37(5), 459-468.
- Driscoll, T., Takala, J., Steenland, K., Corvalan, C., & Fingerhut, M. (2005). Review of estimates of the global burden of injury and illness due to occupational exposures. *American Journal of Industrial Medicine*, 48(6), 491-502. doi:10.1002/ajim.20194
- Drolet, D., Goyer, N., & Roberge, B. (2010). Stratégies de diagnostic de l'exposition des travailleurs aux substances chimiques. *Montréal: IRSST*.
- Duquenne, P. (2018). On the identification of culturable microorganisms for the assessment of biodiversity in bioaerosols. *Annals of Work Exposures and Health*, 62(2), 139-146.
- Duquenne, P., Ambroise, D., Görner, P., Clerc, F., & Greff-Mirguet, G. (2014). Exposure to Airborne Endotoxins among Sewer Workers: An Exploratory Study. *The Annals of Occupational Hygiene*, 58(3), 283-293. doi:10.1093/annhyg/met085
- Duquenne, P., Marchand, G., & Duchaine, C. (2012). Measurement of Endotoxins in Bioaerosols at Workplace: A Critical Review of Literature and a Standardization Issue. *Annals of Work Exposures and Health*, 57(2), 137-172. doi:10.1093/annhyg/mes051

- Dutkiewicz, J., Cisak, E., Sroka, J., Wojcik-Fatla, A., & Zaj, V. (2011). Biological agents as occupational hazards – selected issues. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 18(2), 286-293.
- ECHA. (2015). Guide des exigences d'information et évaluation de la sécurité chimique - Chapitre R.12 : Description de l'utilisation. 101.
- Editions Tissot. (2019). Définition Evaluation des risques professionnels. Retrieved from <https://www.editions-tissot.fr/droit-travail/dictionnaire-droit-travail-st-definition.aspx?idDef=1222&definition=Evaluation+des+risques+professionnels> (Consulté le 12 septembre 2020)
- Eduard, W., Heederik, D., Duchaine, C., & Green, B. J. (2012). Bioaerosol exposure assessment in the workplace: the past, present and recent advances. *J Environ Monit*, 14(2), 334-339. doi:10.1039/c2em10717a
- Eldor, A. P. (2015). *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry (Fourth Edition)*. Cambridge, MA, USA: Academic Press.
- Engelbrecht, M., van Rensburg, A., Rau, A., Yassi, A., Spiegel, J., O'Hara, L., . . . Nophale, L. (2015). Tuberculosis and blood-borne infectious diseases: workplace conditions and practices of healthcare workers at three public hospitals in the Free State. *Southern African Journal of Infectious Diseases*, 30(1), 23-28. doi:10.1080/23120053.2015.1103958
- EU-OSHA. (2010). Risk assessment for microbiological agents. In (Vol. E-Facts 53, pp. 14): Agence européenne pour la santé et la sécurité au travail.
- EU-OSHA. (2014). Exposition aux cancérigènes et cancer lié au travail : une analyse des méthodes d'évaluation - Observatoire européen des risques. In (pp. 31). Luxembourg: Agence européenne pour la santé et la sécurité au travail.
- Farrant, J., Brice, H., Fowler, S., & Niven, R. (2016). Fungal sensitisation in severe asthma is associated with the identification of *Aspergillus fumigatus* in sputum. *Journal of Asthma*, 53(7), 732-735.
- Fauci, A. S., & Morens, D. M. (2012). The Perpetual Challenge of Infectious Diseases. *New England journal of medicine*, 366(5), 454-461. doi:10.1056/NEJMra1108296
- Fischer, G., Albrecht, A., Jäckel, U., & Kämpfer, P. (2008). Analysis of airborne microorganisms, MVOC and odour in the surrounding of composting facilities and implications for future investigations. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211(1-2), 132-142.
- Flynn, J. L., Chan, J., Triebold, K. J., Dalton, D. K., Stewart, T. A., & Bloom, B. R. (1993). An essential role for interferon gamma in resistance to *Mycobacterium tuberculosis* infection. *The Journal of experimental medicine*, 178(6), 2249-2254.

- Fogelmark, B., Sjöstrand, M., & Rylander, R. (1994). Pulmonary inflammation induced by repeated inhalations of beta (1, 3)-D-glucan and endotoxin. *International journal of experimental pathology*, 75(2), 85.
- Forestier, D., Lecornet, É., Mosqueron, L., & Lambomez, L. (2012). Exposure to bioaerosols for wastewater treatment plant workers: Prioritization of the areas and tasks involving the greatest exposure, and prevention. *Environnement, Risques & Santé*, 11(2), 137-148.
- Foucaud-Scheunemann, C., & Helinck, S. (2009). Les micro-organismes au cœur des biotechnologies.
- Fracchia, L., Pietronave, S., Rinaldi, M., & Martinotti, M. (2006). The assessment of airborne bacterial contamination in three composting plants revealed site-related biological hazard and seasonal variations. *Journal of Applied Microbiology*, 100(5), 973-984.
- Franchitti, E., Pascale, E., Fea, E., Anedda, E., & Traversi, D. (2020). Methods for Bioaerosol Characterization: Limits and Perspectives for Human Health Risk Assessment in Organic Waste Treatment. *Atmosphere*, 11(5), 452.
- Fröhlich-Nowoisky, J., Kampf, C. J., Weber, B., Huffman, J. A., Pöhlker, C., Andreae, M. O., . . . Pöschl, U. (2016). Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, 182, 346-376. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>
- Fung, F., & Hughson, W. G. (2003). Health effects of indoor fungal bioaerosol exposure. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 18(7), 535-544.
- Gagnaire F. (2005). Faisabilité d'une étude épidémiologique auprès des travailleurs des centres de compostage de déchets. Mémoire ingénieur du génie sanitaire (ENSP). 85.
- Gao, M., Yang, Z., Guo, Y., Chen, M., Qiu, T., Sun, X., & Wang, X. (2020). The size distribution of airborne bacteria and human pathogenic bacteria in a commercial composting plant. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 15(3), 1-10.
- Gatoo, M. A., Naseem, S., Arfat, M. Y., Mahmood Dar, A., Qasim, K., & Zubair, S. (2014). Physicochemical properties of nanomaterials: implication in associated toxic manifestations. *BioMed research international*, 2014.
- Gazzi, D. (2000). COSHH Essentials: Easy Steps to Control Chemicals, HSG193. HSE Books, 1999.£ 15, ISBN: 0 7176 2421 8; The Technical Basis for COSHH Essentials. HSE Books, 1999.£ 10, ISBN: 0 7176 2434 X. *Annals of Occupational Hygiene*, 44(2), 160-161.
- Gehin, D., Faure, M., Duquenne, P., Simon, X., Vallet, D., Montjoffre, F., & Le Bâcle, C. (2009). Fabrication de saucissons secs et pneumopathie d'hypersensibilité - Point des connaissances et étude de poste. *Documents pour le Médecin du Travail (DMT)*, 120, 437-452.

- Geraci, C. L., Lentz, T., & Niemeier, R. (2009). Qualitative risk characterization and management of occupational hazards: control banding (CB); a literature review and critical analysis.
- Ghosh, B., Lal, H., & Srivastava, A. (2015). Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms. *Environ Int*, *85*, 254-272. doi:10.1016/j.envint.2015.09.018
- Gibbons, S. M., & Gilbert, J. A. (2015). Microbial diversity--exploration of natural ecosystems and microbiomes. *Current opinion in genetics & development*, *35*, 66-72. doi:10.1016/j.gde.2015.10.003
- Giusti, L. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste management*, *29*(8), 2227-2239.
- Gladding, T. L., & Gwyther, C. L. (2017). A study of the potential release of bioaerosols from containers as a result of reduced frequency residual waste collections. *Science of the Total Environment*, *576*, 481-489.
- Gouvernement du Canada. (2017). Fiche Technique Santé-Sécurité : Agents Pathogènes, et évaluation des risques. In Montréal, QC, Canada: Gouvernement du Canada.
- Government of Alberta. (2011). Best Practices for the Assessment and Control of Biological Hazards - Best Practices Guidelines for Occupational Health and Safety in the Healthcare Industry In (Vol. Volume 2, pp. 200). Ottawa, Ontario, Canada: Health Canada.
- Goyer, N., Lavoie, J., Lazure, L., Marchand, G., Allard, R., & Bhérier, L. (2001). Bioaerosols in the workplace: evaluation, control and prevention guide. In *Studies and Research Projects, Technical Guide T-24, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec* (Vol. 94). Montréal, QC, Canada.
- Goyer, N., Lavoie, J., Lazure, L., Marchand, G., Allard, R., & Bhérier, L. (2001). Bioaerosols in the workplace: evaluation, control and prevention guide. *Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail du Québec*.
- Greenberger, P. A. (2002). Allergic bronchopulmonary aspergillosis. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, *110*(5), 685-692.
- Grice, E. A., & Segre, J. A. (2011). The skin microbiome. *Nature reviews microbiology*, *9*(4), 244-253.
- Haas, D., Unteregger, M., Habib, J., Galler, H., Marth, E., & Reinthaler, F. F. (2010). Exposure to bioaerosol from sewage systems. *Water, air, and soil pollution*, *207*(1-4), 49-56.
- Hall, A., Demers, P., Peters, C., & Davies, H. (2011). Establishment of a national Canadian workplace exposure database: progress and challenges. *Occupational and Environmental Medicine*, *68*(Suppl 1), A26-A26. doi:10.1136/oemed-2011-100382.82

- Hambach, R., Droste, J., François, G., Weyler, J., Van Soom, U., De Schryver, A., . . . van Sprundel, M. (2012). Work-related health symptoms among compost facility workers: a cross-sectional study. *Archives of Public Health*, 70(1), 13.
- Hazelwood, L. A., Daran, J.-M., van Maris, A. J. A., Pronk, J. T., & Dickinson, J. R. (2008). The Ehrlich Pathway for Fusel Alcohol Production: a Century of Research on *Saccharomyces cerevisiae* Metabolism. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(8), 2259-2266. doi:10.1128/aem.02625-07
- Health & Safety Service. (2015). BioCOSHH Risk Assessment. In (pp. 28). Newcastle upon Tyne, UK. (Newcastle University): Health & Safety Service.
- Health Canada. (2004). The Laboratory Biosafety Guidelines. In (Vol. 3rd édition, pp. 136). Ottawa, ON, Canada: Santé Canada.
- Health Council of the Netherlands. (2010a). Endotoxins - Health-based recommended occupational exposure limit. In (pp. 100). Den Haag: Health Council of the Netherlands.
- Health Council of the Netherlands. (2010b). *Endotoxins. Health-based recommended occupational exposure limit*. Retrieved from The Hague, the Netherlands: <file:///C:/Philippe/Biblio/Articles/Bioaerosol/Health%20Council%20of%20the%20Netherlands,%202010a.pdf>
- Health Council of the Netherlands. (2014). *Fungal alpha-amylase (derived from the fungus Aspergillus oryzae) - Health-based recommended occupational exposure limit*. Retrieved from The Hague: www.healthcouncil.nl.
- Heldal, K. K., Madso, L., & Eduard, W. (2015). Airway inflammation among compost workers exposed to actinomycetes spores. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 22(2).
- Herr, C., Bittighofer, P. M., Bungler, J., Eikmann, T., Fischer, A. B., Gruner, C., . . . Velcovsky, H. G. (1999). Effect of microbial aerosols on the human. *Schriftenr Ver Wasser Boden Lufthyg*, 104, 403-481.
- Herr, C. E. W., zur Nieden, A., Jankofsky, M., Stilianakis, N. I., Boedeker, R.-H., & Eikmann, T. F. (2003). Effects of bioaerosol polluted outdoor air on airways of residents: a cross sectional study. *Occupational and Environmental Medicine*, 60(5), 336-342. doi:10.1136/oem.60.5.336
- Höck, J., Hofmann, H., Krug, H., Lorenz, C., Limbach, L., Nowack, B., . . . Stark, W. (2008). Precautionary matrix for synthetic nanomaterials. *Berne, Switzerland, Swiss Federal Office of Public Health and Federal Office for the Environment*.
- Hoffmeyer, F., van Kampen, V., Deckert, A., Neumann, H.-D., Buxtrup, M., Willer, E., . . . Büniger, J. (2015). Evaluation of airway inflammation in compost workers exposed to bioaerosols using exhaled breath condensate and fractional exhaled nitric oxide. In *Pulmonary Function* (pp. 57-67): Springer.

- Horwitz, M. A., & Silverstein, S. C. (1980). Legionnaires' disease bacterium (*Legionella pneumophila*) multiplies intracellularly in human monocytes. *The Journal of clinical investigation*, 66(3), 441-450.
- Hristozov, D., Zabeo, A., Alstrup Jensen, K., Gottardo, S., Isigonis, P., Maccalman, L., . . . Marcomini, A. (2016). Demonstration of a modelling-based multi-criteria decision analysis procedure for prioritisation of occupational risks from manufactured nanomaterials. *Nanotoxicology*, 10(9), 1215-1228. doi:10.3109/17435390.2016.1144827
- Hryhorczuk, D., Curtis, L., Scheff, P., Chung, J., Rizzo, M., Lewis, C., . . . Moomey, M. (2001). Bioaerosol emissions from a suburban yard waste composting facility. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 8(2), 177-185.
- HSE. (2003). COSHH essentials: easy steps to control chemicals—control of substances hazardous to Health regulations. In (Vol. HSG193). London, UK: Health and Safety Executive.
- HSE. (2011). Guidance for developing a Biological Agents Risk Assessment for Healthcare Sector In (pp. 34). Dublin, Ireland: Health Service Executive (HSE).
- HSE. (2013). The Approved List of biological agents. In (pp. 35). Royaume-Uni: Advisory Committee on Dangerous Pathogens (Health and Safety Executive).
- HSE, U. (2002). COSHH Essentials—Easy Steps to Control Chemicals. *London, HSE*. <http://www.coshhessentials.org.uk>.
- IARC. (1993). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 56: Some naturally occurring substances: food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins. In: IARC Lyon, France.
- IARC. (1994). Infection with *Helicobacter pylori*. In *Schistosomes, Liver Flukes and Helicobacter Pylori*: International Agency for Research on Cancer.
- IARC. (2001). IARC MONOGRAPHS ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS - Some Thyrotropic Agents (N°79). In. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer.
- IARC. (2018). *IARC Monogrpah 100F - Aflatoxins*. Retrieved from Lyon, France:
- IARC. (2020). IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans. *World Health Organization*. Retrieved from <https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications> (Consulté le 31 octobre 2020)
- IFA. (2015). GESTIS-Stoffenmanager®. Retrieved from <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffenmanager/index-2.jsp> (Consulté le 20 mars 2020)

- IFA. (2020). GESTIS International Limit Values. Retrieved from <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index-2.jsp> (Consulté le 12 septembre 2020)
- INRS. (2009). Laboratoires d'analyses médicales : Evaluation et prévention des risques infectieux. In (pp. 57). Paris, France: Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS).
- INRS. (2013). Risques biologiques en milieu de travail et maladies respiratoires d'origine allergique et/ou toxique. In (pp. 4). Paris: Institut National de Recherche et de Sécurité.
- INRS. (2014a). Évaluation des risques professionnels. Retrieved from <http://www.inrs.fr/demarche/evaluation-risques-professionnels/ce-qu-il-faut-retenir.html> (Consulté le 10 septembre 2020)
- INRS. (2014b). *Les risques biologiques en milieu professionnel*. Retrieved from Paris, France:
- INRS. (2020). Liste des VLEP françaises. from Institut National de Recherche et de Sécurité <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil65> (Consulté le 13 septembre 2020)
- Insam, H., & De Bertoldi, M. (2007). Microbiology of the composting process. *Compost science and technology*, 8(1), 25-48.
- International Labour Organization. (2008). *Programme on safety and health at work and the environment « International Chemical control toolkit »* Retrieved from Geneva, Switzerland:
- IRSST. (2015). A support tool for choosing respiratory protection against bioaerosols. from Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST) <https://www.irsst.qc.ca/bioaerosol/Accueil.aspx?l=en> Accessed 15 september 2017
- Jensen, K. A., Saber, A. T., Kristensen, H. V., Koponen, I. K., Liguori, B., & Wallin, H. (2013). *NanoSafer vs. 1.1-nanomaterial risk assessment using first order modeling*. Paper presented at the 6th International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health.
- Journal officiel. (1989). Directive 89/391/CEE du Conseil, du 12 juin 1989, concernant la mise en oeuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail In (pp. 0001-0008). Luxembourg, Luxembourg: Journal officiel.
- Journal officiel. (1992a). Décret n°92-1261 du 3 décembre 1992 relatif à la prévention du risque chimique et modifiant la section V du chapitre 1er du titre III du livre II du code du travail (deuxième partie : Décrets en Conseil d'Etat). In (pp. 16653-16659): Journal officiel.

- Journal officiel. (1992b). Loi n° 91-1414 du 31 décembre 1991 modifiant le code du travail et le code de la santé publique en vue de favoriser la prévention des risques professionnels et portant transposition de directives européennes relatives à la santé et à la sécurité du travail. In (pp. 319-324): Journal officiel.
- Journal officiel. (1994a). Arrêté du 18 juillet 1994 fixant la liste des agents biologiques pathogènes. In (pp. 14). Paris: Journal officiel.
- Journal officiel. (1994b). Décret n°94-352 du 4 mai 1994 relatif à la protection de travailleurs contre les risques résultant de leur exposition à des agents biologiques et modifiant le code du travail (deuxième partie : Décrets en Conseil d'Etat). In (pp. 6620-6623): Journal officiel.
- Journal officiel. (2000). Directive 2000/54/CE du parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents biologiques au travail. In (pp. 25). Journal officiel.
- Journal officiel. (2007). Arrêté du 16 juillet 2007 fixant les mesures techniques de prévention, notamment de confinement, à mettre en œuvre dans les laboratoires de recherche, d'enseignement, d'analyses, d'anatomie et cytologie pathologiques, les salles d'autopsie et les établissements industriels et agricoles où les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des agents biologiques pathogènes. In (pp. 13106). Paris, France: Journal officiel.
- Journal officiel. (2009). Décret n° 2009-1570 du 15 décembre 2009 relatif au contrôle du risque chimique sur les lieux de travail. In. Paris: Journal officiel.
- Journal officiel. (2012). Décret n° 2012-639 du 4 mai 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante. In (pp. 9). Paris: Journal officiel.
- Journal officiel. (2017). Arrêté du 27 Décembre 2017 Relatif à la liste des agents Biologiques Pathogènes et aux Mesures Techniques de Prévention à Mettre en Oeuvre dans les Laboratoires où les Travailleurs sont Susceptibles d'être Exposés à des Agents Biologiques Pathogènes. In (pp. 3). Paris, France: Journal officiel.
- Kahl, A., Wilmes, A., Guhe, C., Packroff, R., Lotz, G., & Tischer, M. (2012). Einfaches Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe (EMKG) Version 2.2. *Eine Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung für Sicherheitsfachkräfte und andere fachkundige Personen. Dortmund Berlin Dresden.*
- Klein, M. (2012). Classification of biological agents.
- Koppisch, D., & Gabriel, S. (2012). Der GESTIS-Stoffmanager–ein Instrument aus dem IFA zur Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*, 72(6), 267-273.
- Kuempel, E. D., Geraci, C. L., & Schulte, P. A. (2012). Risk assessment and risk management of nanomaterials in the workplace : translating research to practice. *The Annals of Occupational Hygiene*, 56(5), 491-505.

- Kummer, V., & Thiel, W. R. (2008). Bioaerosols—sources and control measures. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211(3-4), 299-307.
- Latge, J. P. (1999). *Aspergillus fumigatus* and aspergillosis. *Clin Microbiol Rev*, 12(2), 310-350.
- Laveine A. (2009). Gestion & Valorisation des déchets par le Compostage. Retrieved from <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiere/node/11.html> (consulté le 29 août 2020)
- Lavoie, J. (1997). *Détermination des caractéristiques à considérer d'un point de vue de santé et sécurité des travailleurs dans les centres de compostage des déchets domestiques*: Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec.
- Lavoie, J., Cloutier, Y., Lara, J., & Marchand, G. (2007). *Guide sur la protection respiratoire contre les bioaérosols: recommandations sur le choix et l'utilisation*. Retrieved from Montréal, QC, Canada:
- Lavoie, J., Dunkerley, C. J., Kosatsky, T., & Dufresne, A. (2006). Exposure to aerosolized bacteria and fungi among collectors of commercial, mixed residential, recyclable and compostable waste. *Science of the Total Environment*, 370(1), 23-28.
- Lavoie, J., Neesham-Grenon, E., Debia, M., Cloutier, Y., & Marchand, G. (2013). Development of a control banding method for selecting respiratory protection against bioaerosols - Rapport R-804. In. Montréal, QC, Canada: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en Sécurité du travail (IRSST).
- Lavoue, J., Friesen, M. C., & Burstyn, I. (2012). Workplace Measurements by the US Occupational Safety and Health Administration since 1979: Descriptive Analysis and Potential Uses for Exposure Assessment. *The Annals of Occupational Hygiene*, 57(1), 77-97. doi:10.1093/annhyg/mes055
- Le Bâcle, C. (2007). Les risques biologiques en milieu professionnel. *Hygiène et Sécurité du Travail*, 85-96.
- Lee, W. M. (1997). Hepatitis B virus infection. *New England journal of medicine*, 337(24), 1733-1745.
- Li, K., Bihan, M., Yooseph, S., & Methé, B. A. (2012). Analyses of the microbial diversity across the human microbiome. *PloS one*, 7(6), e32118-e32118. doi:10.1371/journal.pone.0032118
- Liao, C. M., Chiang, Y. H., & Chio, C. P. (2008). Model-based assessment for human inhalation exposure risk to airborne nano/fine titanium dioxide particules. *Science of the Total Environment*, 407, 165-177.
- Liebers, V., Raulf-Heimsoth, M., & Brüning, T. (2008). Health effects due to endotoxin inhalation (review). *Archives of Toxicology*, 82(4), 203-210. doi:DO - 10.1007/s00204-008-0290-1

- Liu, J., Pankhurst, L. J., Deacon, L. J., Abate, W., Hayes, E. T., Drew, G. H., . . . Tyrrel, S. F. (2011). Evaluation of inflammatory effects of airborne endotoxin emitted from composting sources. *Environmental toxicology and chemistry*, 30(3), 602-606.
- Loud James. (2020). Does Your Corrective Action Program Need Corrective Action? *Predictive Solutions is an Industrial Scientific Company*.
- Lynch, I., Weiss, C., & Valsami-Jones, E. (2014). A strategy for grouping of nanomaterials based on key physico-chemical descriptors as a basis for safer-by-design NMs. *Nano Today*, 9(3), 266-270.
- Maidment, S. C. (1998). Occupational hygiene considerations in the development of a structured approach to select chemical control strategies. *Ann Occup Hyg*, 42(6), 391-400.
- Marchand, G., Bonifait, L., Veillette, M., Pépin, C., Beaudet, Y., Légaré, É., . . . Cloutier, Y. (2017). *Évaluation des bioaérosols et des composés gazeux émis lors des compostages de résidus agroalimentaires et résidentiels*: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.
- Marquart, H., Heussen, H., Le Feber, M., Noy, D., Tielemans, E., Schinkel, J., . . . Van Der Schaaf, D. (2008). 'Stoffenmanager', a web-based control banding tool using an exposure process model. *Ann Occup Hyg*, 52(6), 429-441. doi:10.1093/annhyg/men032
- Mater, G. (2016). *Caractérisation des mesures d'exposition à des produits chimiques dans les bases de données françaises COLCHIC et SCOLA pour la prévention des maladies professionnelles*. Université de Lorraine,
- Mater, G., Paris, C., & Lavoué, J. (2016). Descriptive analysis and comparison of two French occupational exposure databases: COLCHIC and SCOLA. *American Journal of Industrial Medicine*, 59(5), 379-391.
- Mathur, S. (1998). Composting processes. In *Bioconversion of waste materials to industrial products* (pp. 154-193): Springer.
- Matinet, B., & Rosankis, E. (2019). Les expositions aux risques professionnels dans la fonction publique et le secteur privé en 2017: Enquête SUMER 2017.
- Matinet, B., Rosankis, E., & Tassy, V. D. (2020). Les expositions aux risques professionnels. Par secteur d'activité.
- Maynard, A. D. (2007). Nanotechnology: the next big thing, or much ado about nothing? *The Annals of Occupational Hygiene*, 51(1), 1-12.
- Mbareche, H., Veillette, M., Bonifait, L., Dubuis, M.-E., Benard, Y., Marchand, G., . . . Duchaine, C. (2017). A next generation sequencing approach with a suitable bioinformatics workflow to study fungal diversity in bioaerosols released from two different types of composting plants. *Science of the Total Environment*, 601, 1306-1314.

- Meffert, K., & Stückrath, M. (1992). MEGA Exposure database: organisation, origin and use of the data. *Systems for the monitoring of working conditions relating to health and safety. Dublin, Ireland: European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions.*
- Mehrzad, J., Malvandi, A. M., Alipour, M., & Hosseinkhani, S. (2017). Environmentally relevant level of aflatoxin B1 elicits toxic pro-inflammatory response in murine CNS-derived cells. *Toxicology letters*, 279, 96-106.
- Meima, M., Kuijpers, E., van Berg, C., Kruizinga, A., van Kesteren, N., & Spaan, S. (2020). Biological agents and prevention of work-related diseases: A review.
- Miraval, S. (2018). Seirich: outil d'aide à l'évaluation des risques chimiques. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 79(3), 391.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Group, a. t. P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Annals of Internal Medicine*, 151(4), 264-269. doi:10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135
- Mustin, M. (1987). Le compost: gestion de la matière organique.
- National Research Council. (2002). Biological Agents. In *The airliner cabin environment and the health of passengers and crew*: National Academies Press (US).
- Naumann, B. D. (2005). *Control banding in the pharmaceutical industry*. Paper presented at the Occupational Hygienists Conference.
- Naumann, B. D., Sargent, E. V., Starkman, B. S., Fraser, W. J., Becker, G. T., & Kirk, G. D. (1996). Performance-based exposure control limits for pharmaceutical active ingredients. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 57(1), 33-42.
- Nielsen, G. D., Larsen, S. T., Hansen, J. S., & Poulsen, L. K. (2012). Experiences from occupational exposure limits set on aerosols containing allergenic proteins. *The Annals of Occupational Hygiene*, 56(8), 888-900. doi:10.1093/annhyg/mes035
- NIOSH. (2009a). Qualitative risk characterisation and management of occupational hazards : control banding (CB), a literature review and critical analysis. In (pp. 118). Atlanta, Georgia: CDC/NIOSH.
- NIOSH. (2009b). Qualitative risk characterization and management of occupational hazards: Control Banding (CB); a literature review and critical analysis. Cincinnati (OH). In: National Institute for Occupational Safety and Health (US).
- Nodet P. (2020). Mycologie. Retrieved from <https://www.univ-brest.fr> (Consulté le 14 mars 2020)

- Noss, I., Wouters, I. M., Bezemer, G., Metwali, N., Sander, I., Raulf-Heimsoth, M., . . . Doekes, G. (2010). β -(1, 3)-Glucan exposure assessment by passive airborne dust sampling and new sensitive immunoassays. *Appl. Environ. Microbiol.*, 76(4), 1158-1167.
- Nuebling, M., & Hofmann, F. (2001). Task profile and risk of occupational hepatitis. A infection in sewerage workers *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 74, 589-593.
- Oberdörster, G., Maynard, A., Donaldson, K., Castranova, V., Fitzpatrick, J., Ausman, K., . . . Lai, D. (2005). Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Particle and fibre toxicology*, 2(1), 8.
- Oppliger, A., & Duquenne, P. (2016). Chapter 8 - Highly contaminated workplaces. In C. Viegas, A. C. Pinheiro, R. Sabino, S. Viegas, J. Brandão, & C. Veríssimo (Eds.), *Environmental Mycology in Public Health : Fungi and Mycotoxins Risk Assessment and Management* (pp. 79-105). Amsterdam, The Netherlands: Academic Press.
- Osha, U. (2013). Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS). *UN Econ. Comm. Eur*, 224.
- Ostiguy, C., Riediker, M., & Triolet, J. (2011). Développement d'un outil de gestion graduée des risques spécifiques au cas des nanomatériaux. *Paris, France: Agence nationale de santé sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail (ANSES)*. 55.
- Ostiguy, C., Riediker, M., Triolet, J., Troisfontaines, P., & Vernez, D. (2010). Development of a specific control banding tool for nanomaterials: report. In (pp. 50): Afsset, Maisons-Alfort.
- Ostry, V., Malir, F., Toman, J., & Grosse, Y. (2017). Mycotoxins as human carcinogens—the IARC Monographs classification. *Mycotoxin research*, 33(1), 65-73.
- Paccha, B., Jones, R. M., Gibbs, S., Kane, M. J., Torremorell, M., Neira-Ramirez, V., & Rabinowitz, P. M. (2016). Modeling risk of occupational zoonotic influenza infection in swine workers. *J Occup Environ Hyg*, 13(8), 577-587. doi:10.1080/15459624.2016.1159688
- Payen, D., & Boulat, J. (2006). LARA-BTP: Méthode d'évaluation du risque chimique dans le BTP. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 67(2), 179.
- Pearson, C., Littlewood, E., Douglas, P., Robertson, S., Gant, T. W., & Hansell, A. L. (2015). Exposures and health outcomes in relation to bioaerosol emissions from composting facilities: a systematic review of occupational and community studies. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 18(1), 43-69.
- Peden, D., & Reed, C. E. (2010). Environmental and occupational allergies. *J Allergy Clin Immunol*, 125(2 Suppl 2), S150-S160. doi:10.1016/j.jaci.2009.10.073

- Persoons, R., Parat, S., Stoklov, M., Perdrix, A., & Maitre, A. (2010). Critical working tasks and determinants of exposure to bioaerosols and MVOC at composting facilities. *Int J Hyg Environ Health*, 213(5), 338-347. doi:10.1016/j.ijheh.2010.06.001
- Perz, J. F., Armstrong, G. L., Farrington, L. A., Hutin, Y. J. F., & Bell, B. P. (2006). The contributions of hepatitis B virus and hepatitis C virus infections to cirrhosis and primary liver cancer worldwide. *Journal of Hepatology*, 45(4), 529-538. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhep.2006.05.013>
- Pichenot, O., Barbe, A., Thiriet, S., Benhassine, R., Dion, J. J., & Reveil, J. C. (2008). Assessment of the professional biological risks of dialysis technicians (réf 2). *Hygiènes, XVI*, 5, 407-415.
- Poirot, P., Grosjean, J., Monta, N., Nicot, T., & Zimmermann, F. (2010). Approche des risques chimiques et microbiologiques dans le secteur du compostage. *Hygiène et sécurité du travail (Paris)*(221), 3-16.
- Poole, J. A., Dooley, G. P., Saito, R., Burrell, A. M., Bailey, K. L., Romberger, D. J., . . . Reynolds, S. J. (2010). Muramic acid, endotoxin, 3-hydroxy fatty acids, and ergosterol content explain monocyte and epithelial cell inflammatory responses to agricultural dusts. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 73(10), 684-700.
- Radon, K., & Nowak, D. (2003). Atemwegs- und Lungenerkrankungen in der Europäischen Landwirtschaft. [Respiratory Diseases in European Farmers]. *Pneumologie*, 57(08), 444-448. doi:10.1055/s-2003-41545
- Ralf, C. (2011). Guidance working safely with nanomaterials and-products, the guide for employers.
- Raulf, M., Buters, J., Chapman, M., Cecchi, L., De Blay, F., Doekes, G., . . . Kespohl, S. (2014). Monitoring of occupational and environmental aeroallergens-EAACI Position Paper: Concerted action of the EAACI IG Occupational Allergy and Aerobiology & Air Pollution. *Allergy*, 69(10), 1280-1299.
- Raven, P. H., Berlin, B., & Breedlove, D. E. (1971). The origins of taxonomy. *Science*, 174(4015), 1210-1213.
- Règlement, C. (2008). Règlement (CE) N 1272/2008 du parlement européen et du conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45. In: CE.
- Reinthal, F. F., Wüst, G., Haas, D., Feierl, G., Ruckebauer, G., & Marth, E. (2004). Simple emission-reducing measures in an open biological waste treatment plant. *Aerobiologia*, 20(1), 83-88.
- Reponen, T. (2011). Methodologies for assessing bioaerosol exposures. In E.-i.-C. J. O. Nriagu (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health* (pp. 722-730). Burlington, NJ, USA: Elsevier.

- Ricaud, M., & Witschger, O. (2012). Les nanomatériaux - Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention. In (pp. 52). Paris, France: Insitut National de Recherche et Sécurité (INRS).
- Rim, K.-T., & Lim, C.-H. (2014). Biologically Hazardous Agents at Work and Efforts to Protect Workers' Health: A Review of Recent Reports. *Safety and Health at Work*, 5(2), 43-52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.03.006>
- RIVM. (2017). The Stoffenmanager Nano Module. In. Bilthoven, The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
- Roberts, K., & Horgan, J. (2010). Risk Assessment and the Terrorist In Perspectives on Terrorism Vol. 2. In 2010 (Vol. 2). Netherlands: Terrorism Research Initiative.
- Robertson, S., Douglas, P., Jarvis, D., & Marczylo, E. (2019). Bioaerosol exposure from composting facilities and health outcomes in workers and in the community: A systematic review update. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(3), 364-386. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.02.006>
- Rose, J. B., Gurian, P. L., Haas, C. N., Eisenberg, J., Koopman, J., Nicas, M., . . . Weir, M. H. (2013). Theory and practice of quantitative microbial risk assessment: An introduction. In. East Lansing, MI, USA: Center for Advancing Microbial Risk Assessment (CAMRA).
- Rotz, L. D., Khan, A. S., Lillibridge, S. R., Ostroff, S. M., & Hughes, J. M. (2002). Public health assessment of potential biological terrorism agents. *Emerging infectious diseases*, 8(2), 225-230. doi:10.3201/eid0802.010164
- Russell, R. M., Maidment, S. C., Brooke, I., & Topping, M. D. (1998). An introduction to a UK scheme to help small firms control health risks from chemicals. *Ann Occup Hyg*, 42(6), 367-376.
- Rustin, M. H. A., Bunker, C. B., Dowd, P. M., & Robinson, T. W. E. (1989). Erythema multiforme due to griseofulvin. *British Journal of Dermatology*, 120(3), 455-458. doi:10.1111/j.1365-2133.1989.tb04174.x
- Ryckeboer, J., Mergaert, J., Coosemans, J., Deprins, K., & Swings, J. (2003). Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin. *Journal of Applied Microbiology*, 94(1), 127-137.
- Sandia National Laboratories. (2010). Biosafety Risk Assesement Methodology. In (pp. 69). Livermore, CA, USA: Sandia National Laboratories.
- Sargent, E. V., & Kirk, G. D. (1988). Establishing Airborne Exposure Control Limits in the Pharmaceutical Industry. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 49(6), 309-313. doi:10.1080/15298668891379792

- Scheffers, T., Doornaert, B., Berne, N., van Breukelen, G., Leplay, A., & van Miert, E. (2016). On the strength and validity of hazard banding. *Annals of Occupational Hygiene*, 60(9), 1049-1061.
- Schlosser, O. (2019). Bioaerosols and health: Current knowledge and gaps in the field of waste management. *Detritus*(5).
- Schlosser, O., & Huyard, A. (2008). Bioaerosols in composting plants: occupational exposure and health. *Environnement, Risques & Santé*, 7(1), 37-45.
- Schlosser, O., Huyard, A., Cartnick, K., Yañez, A., Catalán, V., & Do Quang, Z. (2009). Bioaerosol in composting facilities: occupational health risk assessment. *Water Environment Research*, 81(9), 866-877.
- Schlosser, O., Robert, S., Debeaupuis, C., & Huyard, A. (2018). Inhalable dust as a marker of exposure to airborne biological agents in composting facilities. *Waste management*, 81, 78-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.051>
- Schmid, O., & Stoeger, T. (2016). Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung. *Journal of Aerosol Science*, 99, 133-143.
- Setbon. M. (2000). Les risques sanitaires. *Médecine/Sciences*, 16, 1203-1206.
- Shereen, M. A., Khan, S., Kazmi, A., Bashir, N., & Siddique, R. (2020). COVID-19 infection: Origin, transmission, and characteristics of human coronaviruses. *Journal of Advanced Research*, 24, 91-98. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.03.005>
- Shi, Y., Wang, Y., Shao, C., Huang, J., Gan, J., Huang, X., . . . Melino, G. (2020). COVID-19 infection: the perspectives on immune responses. In: Nature Publishing Group.
- Smit, L. A., Spaan, S., & Heederik, D. (2005). Endotoxin exposure and symptoms in wastewater treatment workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 48(1), 30-39.
- Snelling, W. J., Joshi, P., & Pande, V. (2016). Microbial diversity of aquatic ecosystem and its industrial potential *Journal of Bacteriology & Mycology*, 3(1), 177-179 doi:DOI: 10.15406/jbmoa.2016.03.00048
- Société Française d'Hygiène Hospitalière. (2007). Prévention des risques infectieux dans les laboratoires d'analyse de biologie médicale. *Hygiènes*, XV(6), 405-524.
- Société Française de Microbiologie. (2014). Manuel de sécurité et de sûreté biologiques. In (1ère ed., pp. 224). Paris, France: Société Française de Microbiologie (SFM).
- Species 2000. (2020). Catalogue of life. Retrieved from <https://www.catalogueoflife.org/> (consulté le 21 novembre 2020)
- Srikanth, P., Sudharsanam, S., & Steinberg, R. (2008). Bio-aerosols in indoor environment: composition, health effects and analysis. *Indian J Med Microbiol*, 26(4), 302-312.

- Stagg, S., Bowry, A., Kelsey, A., & Crook, B. (2010). Bioaerosol emissions from waste composting and the potential for workers' exposure. *Health and Safety Executive research report*, 786.
- Su, C.-p., de Perio, M. A., Cummings, K. J., McCague, A.-B., Luckhaupt, S. E., & Sweeney, M. H. (2019). Case investigations of infectious diseases occurring in workplaces, United States, 2006–2015. *Emerging infectious diseases*, 25(3), 397.
- Surtees, R., Ariza, A., Punch, E. K., Trinh, C. H., Dowall, S. D., Hewson, R., . . . Edwards, T. A. (2015). The crystal structure of the Hazara virus nucleocapsid protein. *BMC structural biology*, 15(1), 24.
- SUVA. (2015). Valeurs limites D'exposition aux Postes de Travail 2015, Edition 2015. Retrieved from <http://www.suva.ch> (accessed on 13 March 2020)
- Sykes, P., Jones, K., & Wildsmith, J. D. (2007). Managing the potential public health risks from bioaerosol liberation at commercial composting sites in the UK: An analysis of the evidence base. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 410-424. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.05.005>
- Sykes, P., Morris, R., Allen, J. A., Wildsmith, J. D., & Jones, K. (2011). Workers' exposure to dust, endotoxin and β -(1–3) glucan at four large-scale composting facilities. *Waste management*, 31(3), 423-430.
- Szymanska, J. (2007). Dental bioaerosol as an occupational hazard in a dentist's workplace. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 14(2).
- Tabuc, C. (2007). *Flore fongique de différents substrats et conditions optimales de production des mycotoxines*.
- The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemical and the Dutch Expert Committee on Occupational Safety. (2011). 144. Endotoxins. In Gothenburg Arbete och Hälsa.
- Tickner, J., Friar, J., Creely, K. S., Cherrie, J. W., Pryde, D. E., & Kingston, J. (2005). The development of the EASE model. *Annals of Occupational Hygiene*, 49(2), 103-110.
- Touche, S. (2008). Évaluation et prévention des risques biologiques en laboratoires d'analyses médicales. Présentation d'un guide méthodologique. In (pp. 31). Lausanne, Switzerland: Association Nationale Médecine du Travail d'Ergonomie du Personnel des Hôpitaux (ANMTEPH).
- Triolet, J., & Héry, M. (2009). Les méthodes d'évaluation des risques chimiques - Une analyse critique. *Hygiène et Sécurité du Travail*(216), 11-22.
- U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, & National Institutes of Health. (2009). Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories. In (Vol. 5th Edition, pp. 438). Atlanta, Georgia: Centers for Disease Control and Prevention.

- Van Duuren-Stuurman, B., Vink, S. R., Verbist, K. J., Heussen, H. G., Brouwer, D. H., Kroese, D. E., . . . Fransman, W. (2012). Stoffenmanager nano version 1.0: a web-based tool for risk prioritization of airborne manufactured nano objects. *Annals of Occupational Hygiene*, 56(5), 525-541.
- van Kampen, V., Deckert, A., Hoffmeyer, F., Taeger, D., Brinkmann, E., Brüning, T., . . . Bünger, J. (2012). Symptoms, spirometry, and serum antibody concentrations among compost workers exposed to organic dust. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 75(8-10), 492-500.
- Viegas, S., Viegas, C., & Oppliger, A. (2018). Occupational exposure to mycotoxins: current knowledge and prospects. *Annals of Work Exposures and Health*, 62(8), 923-941.
- Vincent, R., Bonthoux, F., Mallet, G., Iparraguirre, J.-F., & Rio, S. (2005). Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique: un outil d'aide à la décision. *Les Cahiers de notes documentaires-Institut national de sécurité*, 200, 39-62.
- Vincent, R., & Jeandel, B. (2001). COLCHIC-occupational exposure to chemical agents database: current content and development perspectives. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 16(2), 115-121.
- Walser, S. M., Gerstner, D. G., Brenner, B., Bünger, J., Eikmann, T., Janssen, B., . . . Herr, C. E. W. (2015). Evaluation of exposure–response relationships for health effects of microbial bioaerosols – A systematic review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 218(7), 577-589. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2015.07.004>
- Wéry, N. (2014). Bioaerosols from composting facilities—a review. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 4, 42.
- White, J. K., Nielsen, J. L., & Madsen, A. M. (2019). Microbial species and biodiversity in settling dust within and between pig farms. *Environmental research*, 171, 558-567.
- WHO. (2004). *Laboratory Biosafety Manual, 3rd ed.* Geneva, Switzerland: World Health Organization (WHO).
- Woo, G. (2002). Quantitative Terrorism Risk Assessment. *The Journal of Risk Finance*, 4(1), 7-14. doi:10.1108/eb022949
- Wouters, I. M., Spaan, S., Douwes, J., Doekes, G., & Heederik, D. (2006). Overview of personal occupational exposure levels to inhalable dust, endotoxin, β (1→3)-glucan and fungal extracellular polysaccharides in the waste management chain. *Annals of Occupational Hygiene*, 50(1), 39-53.
- Xu, Z., Wu, Y., Shen, F., Chen, Q., Tan, M., & Yao, M. (2011). Bioaerosol Science, Technology, and Engineering: Past, Present, and Future. *Aerosol Science and Technology*, 45(11), 1337-1349. doi:10.1080/02786826.2011.593591

- Yilmaz, I., Oner Erkeköl, F., Secil, D., Misirligil, Z., & Mungan, D. (2013). Cat and dog sensitization in pet shop workers. *Occupational Medicine*, 63(8), 563-567. doi:10.1093/occmed/kqt116
- Zalk, D. M., & Nelson, D. I. (2008). History and Evolution of Control Banding: A Review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(5), 330-346. doi:10.1080/15459620801997916
- Zalk, D. M., Paik, S. Y., & Swuste, P. (2009). Evaluating the control banding nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures. *Journal of Nanoparticle Research*, 11(7), 1685.
- Zamfir, M., Gerstner, D. G., Walser, S. M., Bünger, J., Eikmann, T., Heinze, S., . . . Herr, C. E. W. (2019). A systematic review of experimental animal studies on microbial bioaerosols: Dose-response data for the derivation of exposure limits. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(2), 249-259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.11.004>

ANNEXES

Annexe 1 : Principales activités exposant aux agents biologiques en milieu professionnel (Corrao *et al.*, 2012; EU-OSHA, 2014; Su *et al.*, 2019).

Secteurs	Secteurs d'activité
Travaux en contact d'humains ou de produits d'origine humaine	Activités pour la santé humaine (personnel soignant, soins à domicile, personnel des laboratoires de biologie médicale...) Enseignement (métiers de la petite enfance, activité éducative ou associative)
Agroalimentaire	Culture et production animale, chasse et services annexes (personnel travaillant dans le transport, stockage et transformation de produits animaux ou végétaux...) Pêche en mer Vinification
Travaux en contact d'animaux	Production animale (éleveurs, inséminateur, vétérinaires...) Animaux de compagnie (animaliers) Sylviculture et exploitation forestière
BTP	Activités de soutien aux autres industries extractives Génie civil
Agriculture	Agriculteurs, forestiers, conducteurs d'engins agricoles...
Assainissement	Collecte, traitement et élimination des déchets Collecte et traitement des eaux usées
Nettoyage, entretien	Blanchisserie-teinturerie de gros Activités des ménages en tant qu'employeurs de personnel domestique Employés de maintenance (maintenance d'automates de laboratoires, électriciens ou plombiers intervenant dans des zones à risques...)
Laboratoires de recherche en biologie	Recherche-développement en biotechnologie Industrie pharmaceutique
Portuaires	Construction d'ouvrages maritimes et fluviaux Services auxiliaires des transports par eau
Energétique	Distribution d'électricité Travaux d'installation d'eau et de gaz en tous locaux

Annexe 2 : Summary of the research process on the PubMed bibliographic database.

Target-specific search term	Number papers identified through database	Total number of abstracts studied	Total number of articles studied	Total number of articles included in the final analysis
biological AND risk AND assessment*	116	22	13	0
biological AND risk AND assessment AND methodology	267	27	14	1
biological AND occupational AND risk AND assessment	335	24	8	0
biological AND occupational AND risk AND assessment AND methodology	17	10	3	0
biological AND agents AND occupational AND exposure AND assessment	75	25	7	1
biologic* AND professional AND hazard	26	6	5	0
bioaerosol AND exposure AND assessment	102	36	14	0
airborne AND pathogens AND exposure	153	25	8	1
assessment AND professional AND biological AND risk	50	7	4	0
Total	1141	182	76	3

**: Research in titles*

Annexe 3 : Characteristics of the approaches used to assess biological risk.

Risk-assessment approach	
Qualitative	Consists in providing an appreciation, a risk estimation. Qualitative analysis involves possible occurrences attributed for risk descriptors, which contribute to the emergence of the risk. For example, a “frequency of exposure” could have a “very low”, “low”, “medium” or “high” frequency of occurrence
Quantitative	Numerically characterises the system analysed by applying the methods. This approach can be used to determine the concentration of the different components sought (chemical, biological, etc.). It assumes levels of judgement
Type of assessment	
Workstation analysis (T1)	Approach based on observation of the real working situation and information collected on biological agents, such as the hazards linked to the biological agents, the duration of the work tasks, the exposure conditions, etc.
Systemic approach (T2)	Approach based on functional analysis of a defined system, composed of elements. Risk assessed based on faults identified in each of the elements of the system
Conformity analysis (T3)	Approach relying on assessment of the discrepancies between the working situation and the prescriptions for use/handling. It is presented in the form of a questionnaire or check-list to establish whether the design of the work areas and handling/usage conditions are complied with
Assessment by risk-level (Control Banding) (T4)	Qualitative assessment approach relying on characterisation by criteria based on hazard levels and the real usage conditions
Nature of the sources	
Bibliographic reference	Scientific article: article published in scientific journals
	Grey literature: book chapters and publications generally longer than scientific articles edited by public or private institutions in the field of prevention of occupational risks, and multimedia sources
Computing reference	Software application allowing the conversion and treatment of information as numerical data
Breakdown of the assessment approach	
Method	Proposal of ordered and logical steps used to gather the information required for the assessment and integrating (or not) the risk descriptors contributing to the emergence of the risk
Methodology	Collection of methods, integrating steps, risk descriptors and modes of treatment of risk descriptors
Type of situations studied to which workers could be exposed	
Biological agents used deliberately	The biological agents are part of the industrial manufacturing process
Biological agents unintentionally present in the workplaces	The biological agents can be present either due to the activity itself (healthcare professions, water treatment, etc.) or due to the characteristics of the activity which promotes the survival or development of some microbial populations
Hazard/risk family	
Infectious	Infections are due to the penetration of a micro-organism into the body, followed by its multiplication
Immuno-allergic	Hypersensitivity reactions due to excessive stimulation of immune defences following exposure to an allergen
Toxin-based	All disorders resulting from the action exerted on the body by a toxin - such as endotoxins or mycotoxins - produced by biological agents
Carcinogens	Appearance of a malignant tumour as a result of uncontrolled cell division
Routes of exposure	
Inhalation	Penetration into the body by the nose, or the airways, of droplets (coughing), contaminated dust, aerosols produced by the use of a high-pressure water jet on contaminated surfaces, etc.
Contact with the skin/eyes	Contact of a biological agent with skin/mucosa (projection of dirty water into the eyes, manipulation of contaminated objects, etc.)
Ingestion	Penetration into the body via the mouth, linked to a failure in personal hygiene measures (ineffective hand-washing) or to technical errors (mouth-pipetting)
Inoculation	Penetration into the body as a result of insect bites (mosquito, tick) or with a syringe, cut with a scalpel

Annexe 4 : Characteristics of assessment approaches combining "workstation analysis" and "assessment by risk level.

No.	Title/Name of the source	Stages	Risk descriptors	Type of RD	System attributed to the different levels	Mode of treatment of the levels/bands	Process associated with the intermediate/result
1	Exposure to bioaerosols for wastewater treatment plant workers: Prioritization of the areas and tasks involving the greatest exposure, and prevention	<i>Measuring concentrations of bioaerosols, determining work durations, ranking and definition of associated priority levels</i>	Measuring concentrations of biological agents	Identifiable and quantifiable	Quantitative	/	/
			Exposure duration	Identifiable and quantifiable		/	/
			Matrix of hierarchisation and definition of associated priority levels	Result		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of priority of action</i>
2	Assessment of the professional biological risks of dialysis technicians	<i>Inventory of situations presenting a risk, identification of the frequency of exposure, the severity of consequences, preventive action implemented and ranking of risks depending on their criticality</i>	Frequency of exposure	Identifiable and quantifiable	Quantitative	/	/
			Severity of consequences	Identifiable		/	/
			Initial criticality level	Intermediate		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of levels of criticality</i>
			Efficacy of preventive measures	Subjective		/	/
			Residual criticality level	Result		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of levels of criticality, priority and actions to be undertaken</i>
3	Task profile and risk of occupational hepatitis A infection in sewage workers	<i>Identification of tasks, estimation of the risk-level for tasks, determination of the frequency of exposure, assessment of the level of risk</i>	Level of risk for each task	Subjective	Qual. + Quant.	/	/
			Frequency of the task	Identifiable and quantifiable		/	/
			Exposure linked to the task	Result		<i>Matrix</i>	<i>Risk factors</i>
5	Prévention des risques biologiques - Risques biologiques au laboratoire de génie biologique	<i>Estimation of exposure to the biohazard, estimation of the probability, estimation of the severity of consequences, estimation of the risk</i>	Frequency and/or duration of exposure	Subjective	Qual. + Quant.	/	/
			Probability of the emergence of a hazardous event	Subjective		/	/
			Probability of incurring consequences	Intermediate		/	/
			Severity of consequences	Identifiable		/	/
			Risk-level	Result	<i>Matrix with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of priority of action</i>	

No.	Title/Name of the source	Stages	Risk descriptors	Type of RD	System attributed to the different levels	Mode of treatment of the levels/bands	Process associated with the intermediate/result
6	Methodological guide to the assessment of biological safety and security risks	<i>Identification of dangerous situations, description of means of control, risk analysis, assessment of risk levels, acceptability of residual risk</i>	Intrinsic severity	Identifiable and quantifiable	Quantitative	/	/
			Severity of the consequences/Exposure/Spreading	Identifiable		/	/
			Frequency of the emergence of a hazardous event	Identifiable		/	/
			Detectability of occurrence of the hazardous event	Identifiable		/	/
			Index of priority of risk	Result		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of risk and priority of action</i>
8	Evaluation des risques : éléments de méthodes	<i>Risk-assessment methods (identify risks, classify risks), establishing the reading frame (establishing the severity of consequences and frequency of exposure, calculating the potential risk score, calculating the risk, taking preventive measures into account)</i>	Severity of consequences	Identifiable	Quantitative	/	/
			Frequency of exposure	Identifiable and quantifiable		/	/
			Potential risk	Intermediate		Multiplication with definition of the intervals/bands	Band of priority of action
			Existing preventive measures	Identifiable		/	/
			Real risk	Result		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of priority of action</i>
10	Development of a control banding method for selecting respiratory protection against bioaérosols	<i>Identification of the level of control, rate of generation and level of exposure, identification of the risk group, selection of the assigned protection factor (APF)</i>	Level of control	Identifiable and quantifiable	Quantitative	/	/
			Rate of generation	Identifiable		/	/
			Level of exposure	Intermediate		/	Addition
			Risk group	Identifiable		/	/
			Assigned protection factor (APF)	Result		<i>Assigned protection factor (APF)</i>	<i>Matrix with definition of the intervals/bands</i>

No.	Title/Name of the source	Stages	Risk descriptors	Type of RD	System attributed to the different levels	Mode of treatment of the levels/bands	Process associated with the intermediate/result
11	Green Jobs in Quebec: Definition and Assessment of Potential Chemical and Biological Risks to Workers' Health	<i>Identification of the means of control, the frequency of exposure, and the level of exposure, identification of the risk group, estimation of the overall exposure level</i>	Means of control and frequency of exposure	Identifiable and quantifiable	Quantitative	/	/
			Level of exposure	Identifiable		/	/
			Overall exposure level	Intermediate		Addition	/
			Risk group	Identifiable		/	/
			Potential risk	Result	Qualitative	<i>Matrix with definition of the bands</i>	<i>Band of levels of risk</i>
15	BioCOSHH Risk Assessment	<i>Definition of the project and activity, identification of the hazard, risk estimation (estimation of the severity of consequences and the probability of incurring consequences), definition of preventive measures and emergency procedures</i>	Severity of consequences	Subjective	Qualitative	/	/
			Probability of incurring consequences	Subjective		/	/
			Risk of prejudice	Result		<i>Matrix with definition of the bands</i>	<i>Band of levels of risk</i>
19	Guidance for developing a Biological Agents Risk Assessment for the Healthcare Sector	<i>Identification of the hazards, identification of the associated risks, risk assessment, identification of the means of control</i>	Probability of incurring consequences	Identifiable and quantifiable	Quantitative	/	/
			Impact of injury (or severity of consequences)	Subjective		/	/
			Risk matrix	Result		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of levels of risk</i>
20	Prévention des risques infectieux dans les laboratoires d'analyse de biologie médicale	<i>Identification of the risk, analysis of the risks, risk assessment (identify the hazard, assess exposure and the infectious nature, estimate the risk, assess risk-perception), hierarchisation of risks, development and implementation of action plans, assessment and follow-up</i>	Severity of consequences	Identifiable	Quantitative	/	/
			Frequency of exposure	Identifiable and quantifiable		/	/
			Risk estimation and hierarchisation of priorities	Result	<i>Bands</i>	<i>Matrix with definition of the bands</i>	<i>Band of priority of action</i>

No.	Title/Name of the source	Stages	Risk descriptors	Type of RD	System attributed to the different levels	Mode of treatment of the levels/bands	Process associated with the intermediate/result
26	A support tool for choosing respiratory protection against bioaerosols	<i>Identification of the activity sector, the risk group for the biological agent, the level of control over air quality, the rate of bioaerosol generation. Determining the assigned protection factor and selection of the respiratory protective device</i>	Activity sectors	Identifiable	Quantitative	/	/
			Risk group	Identifiable		/	/
			Level of control over air quality	Identifiable and quantifiable		/	/
			Rate of generation	Identifiable		/	/
			Assigned protection factor (APF)	Intermediate	Assigned protection factor (APF)	Matrix with definition of the bands	Protection factor band
			Suggested respiratory protective equipment	Result	Quantitative	<i>Matrix with definition of the bands</i>	<i>Suggested respiratory protective equipment</i>
27	Biosecurity Risk-Assessment Methodology	<i>Identification of exposure scenarios, probability and consequence models. Risk determination</i>	Exposure scenarios	Identifiable	Quantitative	/	/
			Probability models	Identifiable		/	/
			Consequence models	Identifiable		/	/
			Risk	Result	<i>Bands</i>	<i>Graph</i>	<i>Band of levels of risk</i>
28	Proprietary software to assess biological risk (User in soil mediation sector)	<i>Identification of the operation presenting a risk, of the hazard, the hazardous situations, the means of control and the family of risks. Risk assessment</i>	Frequency/duration of exposure	Subjective	Qual. + Quant.	/	/
			Probability of occurrence of an event	Subjective		/	/
			Probability of incurring damage	Intermediate		Matrix	
			Severity of potential damage	Identifiable		/	/
			Assessing gross risk	Intermediate		Multiplication with definition of the intervals/bands	Band of levels of risk and priority of action
			Technical preventive measures	Identifiable		/	/
			Organisational preventive measures	Identifiable		/	/
			Human preventive measures	Identifiable		/	/
			Accidentology	Identifiable and quantifiable		/	/
			Assessing residual risk	Result		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of levels of risk and priority of action</i>

No.	Title/Name of the source	Stages	Risk descriptors	Type of RD	System attributed to the different levels	Mode of treatment of the levels/bands	Process associated with the intermediate/result
29	Proprietary software to assess biological risk (User in biotechnology research and development sector)	<i>Identification of the unit, the workstation, the task, the protective measures and risk assessment</i>	Handling conditions (type of procedure)	Identifiable	Quantitative	/	/
			Compliance with work procedures	Identifiable		/	/
			Exposure index	Intermediate		Multiplication with definition of the intervals/bands	
			Hazard class	Identifiable		/	/
			Gross risk	Intermediate		Matrix with definition of the bands	Band of levels of risk
			Protective measures	Identifiable		/	/
			Residual risk	Result		<i>Matrix with definition of the bands</i>	<i>Band of levels of risk</i>
30	Proprietary software to assess biological risk (User in research laboratory sector)	<i>Identification of the source of danger, the situation representing a risk, the potential consequences of the risk, the preventive measures, and risk assessment</i>	Frequency of exposure	Identifiable	Quantitative	/	/
			Duration of exposure	Identifiable and quantifiable		/	/
			Exposure index	Intermediate		Multiplication	/
			Severity	Identifiable		/	/
			Preventive measures	Identifiable		/	/
			Exacerbating factor	Subjective		/	/
			Calculated risk index (CRI)	Result		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of levels of risk</i>

No.	Title/Name of the source	Stages	Risk descriptors	Type of RD	System attributed to the different levels	Mode of treatment of the levels/bands	Process associated with the intermediate/result
31	Proprietary software to assess biological risk (User in medical biology laboratory sector)	<i>Identification of the work site, the work unit and the activity. Identification of the frequency of exposure, the duration of exposure, the severity, the numbers of staff exposed, means of control and exacerbating factors. Estimating the risk-level</i>	Frequency of exposure	Subjective	Quantitative	/	/
			Duration of exposure	Identifiable and quantifiable		/	/
			Exposure	Intermediate		Matrix with definition of the bands	/
			Severity	Identifiable		/	/
			Exacerbating factor	Subjective		/	/
			Number of persons exposed	Identifiable and quantifiable		/	/
			Level of gross risk	Result 1		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Priority band</i>
			Index of control (C)	Identifiable		/	/
			Level of controlled risk	Result 2		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Priority band</i>
			Index of control (C')	Subjective		/	/
Estimated level of risk	Result 3	<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Priority band</i>				
32	Proprietary software to assess biological risk (User in food product manufacturing sector)	<i>Identification of the frequency of exposure, the duration of exposure, the severity, the numbers of staff exposed, means of control and exacerbating factors. Estimating the risk-level</i>	Frequency of exposure	Identifiable and quantifiable	Quantitative	/	/
			Duration of exposure	Identifiable and quantifiable		/	/
			Exposure index	Intermediate		Matrix with definition of the bands	Identification
			Severity	Identifiable		/	/
			Exacerbating factors	Subjective		/	/
			Number of persons exposed	Identifiable and quantifiable		/	/
			Level of gross risk	Result 1		<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of levels of risk</i>
			Index of control	Identifiable		/	/
Level of controlled risk	Result 2	<i>Multiplication with definition of the intervals/bands</i>	<i>Band of levels of risk</i>				

Annexe 5 : Contenu microbiologique des matières premières du compostage (Schlosser & Huyard, 2008).

Matières premières	Contenu microbien	Genre des agents biologiques
Boues résiduaires urbaines	Bactéries	/
	Virus	/
	Parasites d'origine fécale	/
	Champignons	/
Coproduct (déchets verts, écorces, palettes broyées, sciure, copeaux de bois, résidus agricoles...)	Bactéries Gram négatif	Achromobacter
		Enterobacter
		Pseudomonas
		Klebsiella
	Bactéries Gram positif non sporulées	Micrococcus
		Streptococcus
	Bactéries Gram positif sporulées	Bacillus
	Bactéries filamenteuses : actinomycètes mésophiles	Streptomyces
		Rhodococcus
		Agromyces
	Bactéries filamenteuses : actinomycètes thermophiles	Saccharopolyspora
		Thermoactinomyces
		Saccharomonospora
		Thermomonospora
	Moisissures saprophytes se développant sur des végétaux frais	Alternaria
		Cladosporium
		Didymella
		Fusarium
	Moisissures de décomposition	Verticillium
		Aspergillus
pénicillium		
Eurotium		
Trichoderma		
Absidia		
Mucor		
Rhizopus		
Ordures ménagères, bio déchets	Bactéries Gram négatif	Proteus
		Escherichia
		Pseudomonas
		Klebsiella
		Serratia
	Moisissures de décomposition	Citrobacter
		Aspergillus
	Bactéries Gram positif	pénicillium
		Staphylococcus
		Streptococcus

Matières premières	Contenu microbien	Genre des agents biologiques
	Micro-organismes d'origine fécale liés aux couches culottes et excréments d'animaux de compagnie	/
Déchets d'élevage de bétail	Micro-organismes d'origine fécale	/
	Bactéries Gram positif	Corynebacteria
		Bacillus
		Stapylococcus
		Micrococcus
	Streptococcus	
Résidus agricoles et de l'industrie agroalimentaire	Bactéries Gram positif	/
	Moisissures de décomposition	/

Annexe 6 : Principaux micro-organismes pathogènes retrouvés dans les déchets (boues de stations d'épuration, effluents d'élevage, ordures ménagères) avant le compostage (de Guardia, 2018).

Bactéries	Virus	Protozoaires	Helminthe	Champignons et levures
<i>Aeromonas</i> spp.	Adenovirus	<i>Acanthamoeba</i> sp.	<i>Ancylostoma duodenale</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>
<i>Bacillus cereus</i>	Astrovirus	<i>Cryptosporidium parvum</i>	<i>Ascaris lumbricoides</i>	<i>Candida albicans</i>
<i>Bacillus anthracis</i>	Calicivirus	<i>Dientamoeba fragilis</i>	<i>Ascaris suum</i>	<i>Epidermophyton</i> sp.
<i>Camphylobacter jejuni</i>	Entérovirus :	<i>Entamoeba histolytica</i>	<i>Echinococcus granulosus</i>	<i>Geotrichum candidum</i>
<i>Clostridium botulinum</i>	- Virus Coxsackie	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Enterobius vermicularis</i>	<i>Trichosporon cutaneum</i>
<i>Clostridium perfringens</i>	- Echovirus	<i>Naegleria fowleri</i>	<i>Necator americanus</i>	<i>Trichophyton</i> sp.
<i>Escherichia coli</i> pathogènes	- Poliovirus	<i>Toxoplasma gondii</i>	<i>Strongyloides stercoralis</i>	
<i>Klebsiella</i> spp.	- Enterovirus		<i>Taenia saginata</i>	
<i>Legionella</i> spp.	Reovirus		<i>Taenia solium</i>	
<i>Leptospira</i> spp.	Rotavirus		<i>Toxocara canis</i>	
<i>Listeria monocytogenes</i>	Virus de l'hépatite A		<i>Trichuris trichiura</i>	
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Virus de l'hépatite E			
<i>Proteus</i> spp.	Virus de Norwalk			
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>				
<i>Salmonella</i> spp.				
<i>Shigella</i> spp.				
<i>Staphylococcus aureus</i>				
<i>Yersinia enterocolitica</i>				

Annexe 7 : Communautés bactériennes et fongiques au cours du compostage en fonction de leur importance numérique évaluée par les techniques culturales (de Guardia, 2018).

Phylum	Phase active			Phase de maturation
	Phase mésophile	Phase thermophile	Phase de refroidissement	
Communautés bactériennes				
<i>Firmicutes</i>	+++	+	++	+
<i>Actinobacteria</i>	+++	+	++	++
<i>Proteobacteria</i>	+++	-	++	++
<i>Bacteroidetes</i>	-	-	-	-
<i>Deinococcus-Thermus</i>	-	+++	-	-
Communauté fongique				
<i>Ascomycota</i>	++	+	++	++
<i>Basidiomycota</i>	+	+	++	++
<i>Zygomycota</i>	-	-	++	++
<i>Oomycota</i>	-	-	-	+
<i>Deuteromycota</i>	-	-	+	+
<i>Chytridiomycota</i>	-	-	+	+

Annexe 8 : Bactéries dominantes identifiées dans les aérosols des plateformes de compostage par culture et par séquençage du gène ARNr 16s (Wéry, 2014).

Phyla	Genus	Species	Technique*
FIRMICUTES			
	<i>Bacillus</i>	sp. <i>B. subtilis</i> , <i>B. smithii</i> , <i>B. coagulans</i>	Cult., Seq. Seq.
	<i>Ureibacillus</i>	sp. <i>U. koreensis</i>	Seq. Seq.
	<i>Geobacillus</i>	sp. <i>G. thermodenitrificans</i> , <i>G. caldoxylosilyticus</i>	Seq. Seq.
	<i>Thermoactinomyces</i>	sp. <i>T. intermedius</i> , <i>T. sacchari</i> <i>T. thalophilus</i> <i>T. vulgaris</i>	Seq. Seq. Cult., Seq. Cult., qPCR
	<i>Planifilum</i>	sp. <i>P. yunnanensis</i>	Seq. Seq.
	<i>Clostridium</i>	<i>C. peptidovorans</i>	Seq.
	<i>Symbiobacterium</i>	<i>S. thermophilum</i>	Seq.
	<i>Ammoniphilus</i>	sp.	Seq.
	<i>Streptococcus</i>	<i>S. sanguinis</i>	Seq.
	<i>Staphylococcus</i>	sp. <i>S. epidermidis</i>	Cult. Cult.
ACTINOBACTERIA			
	<i>Saccharopolyspora</i>	<i>S. rectivirgula</i> (syn: <i>Faenia rectivirgula</i> , <i>Micropolyspora faeni</i>) <i>S. hirsuta</i>	Cult., Seq.
	<i>Saccharomonospora</i>	sp. <i>S. glauca</i> , <i>S. caesia</i> <i>S. viridis</i>	Cult., Seq. Seq. Cult., Seq.
	<i>Thermomonospora</i>	sp. <i>T. mesouviformis</i> , <i>T. chromogena</i>	Cult., Seq. Seq.
	<i>Thermobifida</i>	<i>T. fusca</i>	Seq.
	<i>Streptomyces</i>	sp. <i>S. thermoviolaceus</i> , <i>S. cellulosae</i> , <i>S. thermoatroviridis</i>	Cult., Seq. Seq.
	<i>Corynebacterium</i>	sp. <i>C. variabile</i> , <i>C. efficiens</i> , <i>C. glutamicum</i>	Seq. Seq.
	<i>Nocardiopsis</i>	<i>N. composta</i>	Seq.
	<i>Thermocrispum</i>	<i>T. agreste</i> , <i>T. municipale</i>	Seq.
	<i>Actinomadura</i>	<i>A. hallensis</i>	Seq.
	<i>Rhodococcus</i>	sp.	Seq.
	<i>Rothia</i>	sp.	Seq.
	<i>Arthrobacter</i>	sp.	Seq.
	<i>Microbacterium</i>	sp.	Seq.
	<i>Kutzneria</i>	sp.	Seq.

Phyla	Genus	Species	Technique*
ALPHAPROTEOBACTERIA			
	<i>Sphingomonas</i>	sp. <i>S. suberifaciens</i>	Seq. Seq.
	<i>Brevundimonas</i>	<i>B. nasdae</i>	Seq.
	<i>Mesorhizobium</i>	sp.	Seq.
	<i>Devosia</i>	sp.	Seq.
GAMMAPROTEOBACTERIA			
	<i>Pseudomonas</i>	sp. <i>P. aeruginosa</i> , <i>P. fluorescens</i> , <i>P. oryzae</i>	Cult., Seq. Cult.
	<i>Acinetobacter</i>	sp. <i>A. calcoaceticus</i> , <i>A. lwoffii</i>	Seq. Seq.
	<i>Enhydrobacter</i>	<i>E. aerosaccus</i>	Seq.
	<i>Moraxella</i>	<i>M. osloensis</i>	Seq.
	<i>Enterobacter</i>	<i>E. cloacae</i>	Cult.
	<i>Pantoea</i>	<i>P. agglomerans</i>	Cult.
	<i>Klebsiella</i>	<i>K. oxytoca</i>	Cult.
	<i>Proteus</i>	<i>P. mirabilis</i>	Cult.
	<i>Xanthomonas</i>	<i>X. maltophilia</i>	Cult.
	<i>Serratia</i>	<i>S. rubidea</i> , <i>S. marcescens</i>	Cult.
BETAPROTEOBACTERIA			
	<i>Delftia</i>	<i>D. acidovorans</i>	Seq.
	<i>Alcaligenes</i>	<i>A. faecalis</i>	Cult.
BACTEROIDETES			
	<i>Flavobacteriaceae</i>	sp.	Seq.

* Cult., Culture; Seq., Séquençage 16SrRNA; pour les données de séquençage de l'ARNr, les noms de genre et d'espèce sont donnés pour un pourcentage de similitude supérieur à 95 et 97 %,

Annexe 9 : Champignons dominants identifiés dans les aérosols des plateformes de compostage par culture et par séquençage du gène ARNr 18s (Wéry, 2014).

Phylum or subphylum	Genus	Species	Technique*	Phylum or subphylum	Genus	Species	Technique*
ASCOMYCOTA				BASIDIOMYCOTA			
	<i>Aspergillus</i>	sp.	Cult., Seq.		<i>Dichostereum</i>	sp.	Cult., Seq.
		<i>A. fumigatus</i>	Cult., Seq.		<i>Coprinus</i>	<i>C. comatus</i>	Cult., Seq.
		<i>A. versicolor</i>	Cult., Seq.		<i>Athelia</i>	<i>A. bombacina</i>	Cult., Seq.
		<i>A. candidus</i>	Cult.		<i>Ustilago</i>	<i>U. hordei</i>	Seq.
		<i>A. nidulans</i>	Cult.		<i>Clitocybe</i>	<i>C. candicans</i>	Seq.
		<i>A. niger</i>	Cult.		<i>Filobasidium</i>	<i>F. globisporum</i>	Seq.
		<i>A. flavus</i>	Cult.		<i>Sistotrema</i>	<i>S. sernanderi</i>	Seq.
		<i>A.eburneo-cremeus</i>	Cult.		<i>Vuilleminia</i>	<i>V. comedens</i>	Seq.
	<i>Penicillium</i>	sp.	Cult., Seq.		<i>Exidiopsis</i>	sp.	Seq.
	<i>Eurotium</i>	sp.	Cult.		<i>Acanthophysium</i>	<i>A. cerussatum</i>	Seq.
	<i>Thermomyces</i>	<i>T. lanuginosus</i>	Seq.		<i>Boletellus</i>	<i>B. projectellus</i>	Seq.
	<i>Clathrospora</i>	<i>C. diplospora</i>	Seq.		<i>Exidiopsis</i>	sp.	Seq.
	<i>Illosporium</i>	<i>I. carneum</i>	Seq.		<i>Peniophora</i>	<i>P. nuda</i>	Seq.
	<i>Microascus</i>	<i>M. cirrosus</i>	Seq.		<i>Itersonilia</i>	<i>I. perplexans</i>	Seq.
	<i>Neurospora</i>	sp.	Seq.		<i>Filobasidium</i>	sp.	Seq.
	<i>Paraphaeosphaeria</i>	<i>P. nolinae</i>	Seq.		<i>Perenniporia</i>	<i>P. subacida</i>	Seq.
	<i>Pithia</i>	sp.	Seq.		<i>Botryobasidium</i>	<i>B. subcoronatum</i>	Seq.
	<i>Cladosporium</i>	sp.	Cult., Seq.		<i>Dioszegia</i>	<i>D. aurantiaca</i>	Seq.
	<i>Marcelleina</i>	sp.	Seq.		<i>Coleosporium</i>	<i>C. asterum</i>	Seq.
	<i>Talaromyces</i>	<i>T. byssochlamydoides</i>	Seq.		<i>Rhodotorula</i>	<i>R. minuta</i>	Seq.
	<i>Madurella</i>	<i>M. mycetomatis</i>	Seq.		<i>Classicula</i>	<i>C. fluitans</i>	Seq.
	<i>Chalara</i>	<i>hyalina</i>	Seq.		<i>Sporobolomyces</i>	sp.	Seq.
	<i>Geotrichum</i>	<i>G. candidum</i>	Seq.		<i>Rhodotorella</i>	sp.	Cult.
	<i>Pichia</i>	<i>P. guilliermondii</i>	Seq.	MUCOROMYCOTINA			
	<i>Phoma</i>	sp.	Seq.		<i>Mucor</i>	<i>M. plumbeus</i>	Cult., Seq.
		<i>P. herbarum</i>	Seq.		<i>Absidia</i>	<i>A. corymbifera</i>	Cult., Seq.
	<i>Ascolobus</i> sp.	sp.	Seq.		<i>Pilobolus</i>	<i>P. phaerosporus</i>	Seq.
	<i>Anguillospora</i> sp.	<i>A. rubsecens</i>	Seq.		<i>Rhizopus</i>	sp.	Cult.
	<i>Trichoderma</i>	sp.	Cult.		<i>Circinella</i>	<i>C. umbellata</i>	Seq.
	<i>Emericella</i>	sp.	Cult.	ENTOMOPHTHOROMYCOTINA			
	<i>Tritirachium</i>	sp.	Cult.		<i>Furia</i>	<i>F. ithacensis</i>	Seq.
	<i>Alternaria</i>	sp.	Cult.	ZYGOMYCETES			
	<i>Verticillium</i>	sp.	Cult.		<i>Conidiobolus</i>	<i>C. thromboides</i>	Seq.
	<i>Didymella</i>	sp.	Cult.		<i>Pandora</i>	<i>P. neoaphidis</i>	Seq.
	<i>Candida</i>	sp.	Cult.		<i>Rhizomucor</i>	<i>R. miehei</i>	Seq.

* Cult., Culture; séquençage de la séquence ANRr 18S ; pour les données de séquençage de l'ARNr, seuls les phototypes avec une abondance supérieure à 1% du nombre total de séquences sont

Annexe 10 : Liste des agents biologiques et de leurs produits classés par le CIRC (<https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications>).

Agents biologiques et leurs produits	Groupe	Monographies	Année
Human herpesvirus type 4 (voir le virus Epstein-Barr)			
Human herpesvirus type 8 (voir Kaposi sarcoma herpesvirus)			
Toxins derived from certain Fusarium species (voir Fusarium)			
Clonorchis sinensis (infection avec)	1	61, 100B	2012
Virus Epstein-Barr	1	70, 100B	2012
Helicobacter pylori (infection avec)	1	61, 100B	2012
Virus de l'hépatite B (infection chronique avec)	1	59, 100B	2012
Virus de l'hépatite C (infection chronique avec)	1	59, 100B	2012
Virus de l'immunodéficience humaine de type 1 (infection avec)	1	67, 100B	2012
Papillomavirus humain de types 16, 18, 31, 33, 35, 39, 45, 51, 52, 56, 58, 59	1	64, 90, 100B	2012
Virus T-lymphotropique humain 1	1	67, 100B	2012
Herpèsvirus humain de type 8	1	70, 100B	2012
Opisthorchis viverrini (infection avec)	1	61, 100B	2012
Papillomavirus humain de type 68	2A	100B	2012
Malaria (causée par une infection à Plasmodium falciparum dans les zones holoendémiques)	2A	104	2014
Polyomavirus à cellules de Merkel (MCV)	2A	104	2014
Aloe vera, extrait de feuille entière	2B	108	2016
Polyomavirus BK (BKV)	2B	104	2014
Virus de l'immunodéficience humaine de type 2 (infection avec)	2B	67	1996
Papillomavirus humain de types 26, 53, 66, 67, 70, 73, 82	2B	100B	2012
Papillomavirus humain de types 30, 34, 69, 85, 97	2B	100B	2012
Papillomavirus humain de types 5 and 8 (chez les patients atteints d'épidermodysplasie verruciforme)	2B	100B	2012
Polyomavirus JC (JCV)	2B	104	2014
Schistosoma japonicum (infection avec)	2B	61	1994
Fusarium graminearum, F. culmorum, et F. crookwellense, toxines dérivées de (zéaralénone, désoxynivalénol, nivalénol et fusarénone X)	3	Sup 7, 56	1993
Fusarium sporotrichioides, toxines dérivées de (toxine T-2)	3	56	1993
Virus de l'hépatite D	3	59	1994
Papillomavirus humain genre beta (sauf types 5 et 8) et genre gamma	3	90, 100B	2012
Papillomavirus humain de types 6 et 11	3	90, 100B	2012
Virus lymphotrope à cellules T humaines de type II	3	67	1996
Opisthorchis felinus (infection avec)	3	61	1994
Schistosoma mansoni (infection avec)	3	61	1994
Polyomavirus SV40	3	104	2014

Annexe 11 : Présentation de la plateforme de compostage D, troisième établissement dans lequel la méthodologie de référence a été mise en application.

L'établissement D est un centre de valorisation organique couplé avec une unité de méthanisation (**Figure 39**). Il traite 35 000 t/an de déchets organiques par compostage et 20 000 t/an par méthanisation. Les produits valorisés sont des matières issues du traitement des eaux (boues de STEP), de sous-produits organiques d'origine agroalimentaire et des déchets végétaux. Le centre produit plus de 4 000 MWh de chaleur verte, utilisée pour les besoins du process (hygiénisation, maintien à température), le chauffage des eaux destinées au lavage des citernes et pour l'unité de séchage de biomasse, de 4 000 MWh d'électricité verte, soit l'équivalent de la consommation d'électricité de 1 000 foyers, et de 35 000 t/an de matières fertilisantes valorisées en agriculture.

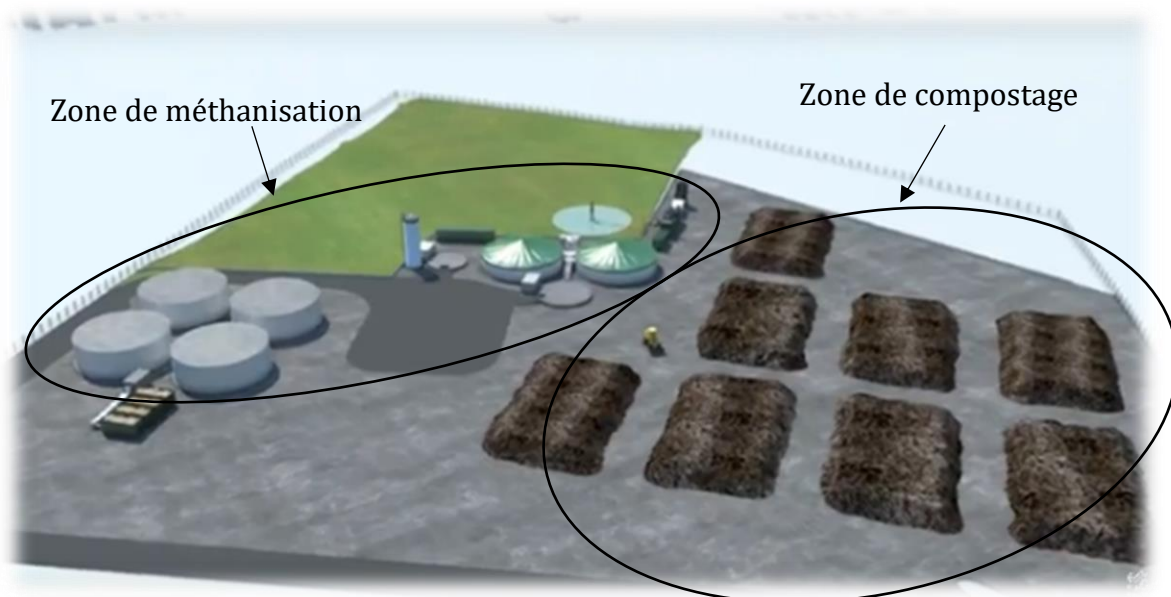


Figure 39 : Photographie de la zone de méthanisation et de compostage de l'établissement D.

Laissez-moi vous présenter votre capitaine, le commandant Avant ».

« Messieurs, bienvenue à bord ».

« Commandant, voici le navigateur, Monsieur Arrière, et le co-pilote, Monsieur Toute ».

(Serrage de mains et salutations réciproques)

« Avant – Arrière, Arrière – Toute ! ».

Y'a-t-il un pilote dans l'avion, 1980

Élaboration d'une méthodologie d'évaluation qualitative du risque biologique

Résumé

En France, plus de 4,8 millions de travailleurs, soit environ 25 % des salariés, se déclarent exposés à des agents biologiques dans le cadre de leurs activités. Dans certains secteurs professionnels, le risque biologique est pris en compte. Néanmoins, dans d'autres, ce risque biologique reste méconnu et mal évalué. Le défaut d'évaluation du risque biologique (EvRB) s'explique en partie par la méconnaissance de ce risque encore peu documenté, mais aussi par l'absence d'une démarche standardisée et adaptée à l'évaluation du risque biologique. Afin de faire progresser les connaissances sur ce sujet nous avons engagé des travaux de recherche dont l'objectif était de proposer une méthodologie d'aide à l'évaluation du risque biologique à destination des employeurs et des préventeurs leur permettant de définir un plan d'actions en matière de prévention et ainsi d'améliorer la santé des salariés.

Pour atteindre cet objectif, nous avons d'abord effectué un recensement et une analyse approfondie et critique des démarches existantes traitant de l'EvRB en milieu professionnel. Ensuite, un travail a été mené en vue d'identifier la structure d'une méthodologie la mieux appropriée et d'identifier les descripteurs de risque permettant de réaliser une évaluation la plus exhaustive possible. Enfin, sur la base de ces premières réalisations, une méthodologie a été conçue, appliquée et validée en entreprise en ciblant le secteur du compostage comme secteur expérimental.

Au-delà de l'exploitation des connaissances bibliographique et de la contribution des entreprises, la construction de cette méthodologie de référence a nécessité de nouvelles dispositions : (i) la détermination des agents biologiques au sein des réservoirs, (ii) la création d'une classification basée sur les classifications franco-allemandes comptabilisant 18 388 espèces, et (iii) la confection d'une hiérarchisation des dangers en cinq niveaux qui intègre tous les dangers autres qu'infectieux. La méthodologie développée est opérationnelle et a été déployée en entreprises, ce qui a permis d'évaluer une vingtaine de situations de travail diverses. La mise en œuvre de la méthodologie de référence montre qu'elle est plus préventive que d'autres démarches utilisées en parallèle et que les niveaux d'exposition enregistrés dans la base Colchic.

Le travail réalisé au cours de la thèse a donc permis de concevoir une méthodologie d'EvRB qui constitue une aide supplémentaire pour les employeurs. Elle leur permet de mieux estimer les risques en vue d'améliorer les conditions de travail des salariés exposés. Il ouvre aussi des perspectives de recherche et de développement qui sont nécessaires et permettront d'en améliorer sa justesse, notamment concernant la biodiversité et la dangerosité des agents biologiques, la mesure des expositions et, plus largement, les études épidémiologiques.

Mots-clés : évaluation du risque biologique en milieu de travail, compostage, descripteurs de risque, niveaux de risques, prévention des risques

Abstract

In France, more than 4.8 million workers, or about 25 % of employees report they are exposed to biological agents during their activities. The biological risk is taken into account in several occupational sector but, in other ones, this risk remains unknown and poorly assessed. The lack of an evaluation of biological risk (EvBR) is partly due to a lack of knowledge of this risk, which is still poorly documented, but also to the absence of a standardised approach adapted to the assessment of biological risk. In order to advance knowledge on this issue, we have undertaken research works with the aim was to propose a methodology to aid in the evaluation of biological risk (EvBR) for employers and prevention specialists allowing them to define an action plan in terms of prevention and thus improve the health of employees.

To achieve this objective, we first carried out an inventory and an in-depth and critical analysis of existing approaches to EvBR. Next, work was carried out to identify the structure of the most appropriate methodology and to identify the risk descriptors that would allow the most exhaustive assessment possible. Finally, on the basis of these initial achievements, a methodology was designed, applied and validated in companies, targeting the composting sector as an experimental sector. Beyond the exploitation of bibliographical knowledge and the contribution of companies, the construction of this reference methodology requires new provisions: (i) the determination of biological agents within reservoirs, (ii) the creation of a classification based on Franco-German classifications accounting for 18,388 species, and (iii) the creation of a five-level hierarchy of hazards that integrates all hazards other than infectious ones. The methodology developed is operational and has been deployed in companies, making it possible to assess some twenty different work situations. The implementation of the reference methodology shows that it is more preventive than other approaches used in parallel and the exposure levels recorded in the Colchic database.

The work carried out during the thesis therefore made it possible to design an EvBR methodology, which is an additional aid for employers. It enables them to better estimate the risks with a view to improving the working conditions of exposed employees. It also opens up necessary research and development prospects that will make it possible to improve its accuracy, particularly with regard to biodiversity and the dangerousness of biological agents, the measurement of exposures and, more broadly, epidemiological studies.

Keywords: biological risk assessment in the workplace, composting, risk descriptors, risk levels, risk prevention