



**EHESP**



---

**Ingénieur du Génie sanitaire**

Promotion : **2010 - 2011**

Date du Jury : **Octobre 2011**

---

**Risques de contamination des riverains par des Bio-aérosols provenant de stations d'épuration : pertinence d'une distance d'éloignement minimum des zones d'urbanisation**

---

**Stephanie HO-A-CHUCK**

**Lieu de stage :**

SAFEGE, Saint Grégoire

**Référent Professionnel :**

Marc LESAOUT/Laurence NOEL

**Référent pédagogique :**

Laurent Madec

---

# Remerciements

---

Je souhaite remercier Mrs Nicolas CAZOTTES et Bertrand LÉBOUCHER, respectivement ancien et nouveau chef du service Hydraulique-Environnement de SAFEGE Saint Grégoire, pour m'avoir permis d'effectuer mon mémoire au sein de leur service.

J'adresse ma gratitude à Mr Marc LESAOUT, pour m'avoir accordée sa confiance en acceptant de me proposer un sujet de mémoire en relation avec mes attentes professionnelles ainsi que pour sa disponibilité.

Ma reconnaissance va à mon second référent pédagogique, Laurence NOEL pour sa disponibilité, sa pédagogie, sa gentillesse ainsi que ses nombreuses aides dans la relecture de mon mémoire.

Merci à mon référent pédagogique Mr Laurent MADEC, pour les conseils apportés au cours de nos échanges et les suggestions amenées à mon rapport.

Je remercie Mme Michèle LEGEAS pour m'avoir apporté ses précieux conseils lors de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie Mrs Guillaume BOULASSIER et Thierry CHOCHON du service maîtrise d'œuvre pour m'avoir éclairée dans le domaine de la construction des stations d'épuration.

Je remercie également Mr Yannick MARCHE de la DDTM et Mr Marc FAUJOUR de l'ARS 35 pour m'avoir fournie des informations concernant les nuisances liées aux stations d'épurations.

Enfin, merci à tous mes collègues stagiaires pour les bons moments que nous avons partagés.

---

# Sommaire

---

<b>Contexte de l'étude:</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>Partie 1 : caractérisation du danger :</b> .....	<b>- 5 -</b>
1. Les agents biologiques composants les bio-aérosols.....	5 -
1.1 Les bio-aérosols : définition et processus de formation dans les STEP .....	5 -
1.2 Les dangers liés aux bio-aérosols : .....	5 -
1.3 Paramètres intervenant dans la survie des agents et leur capacité à provoquer des pathologies : .....	6 -
1.4 Identification des agents biologiques émis par aérosolisation présentant un intérêt sanitaire : .....	8 -
1.5 Relation dose-réponse : .....	13 -
2. Identification des principaux systèmes et activités responsables de l'émission de Bio-aérosols :.....	16 -
2.1 Généralité sur le fonctionnement des STEP : .....	16 -
2.2 Étude des principales étapes de traitement des eaux usées : .....	17 -
2.3 Modalités d'exploitation entraînant la formation de bio-aérosols de manière anecdotique :.....	21 -
2.4 Paramètres intervenant dans la dispersion des bio-aérosols :.....	22 -
<b>Partie 2 : Caractérisation de l'exposition.....</b>	<b>- 25 -</b>
1. Population exposée .....	25 -
2. Voies d'exposition : .....	25 -
3. Niveaux d'exposition : .....	26 -
3.1 Évaluation des niveaux d'exposition : .....	26 -
3.2 Les données d'exposition connues : .....	30 -
3.3 Les données d'exposition extrapolées : .....	32 -
4. Durée d'exposition : .....	33 -
<b>Partie 3 : Évaluation du risque sanitaire potentiel .....</b>	<b>- 35 -</b>
1. Évaluation des risques liés aux contaminations d'origine microbienne.....	35 -
1.1 Analyse des données qualitatives et quantitatives provenant de la littérature	35 -
1.2 Comparaison entre les niveaux d'expositions liées aux STEP et celles provenant d'autres activités industrielles .....	40 -
2. Évaluation des risques liés à l'inhalation d'endotoxines .....	42 -
<b>Partie 4 : Nécessité des mesures préventives .....</b>	<b>- 46 -</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>-50-</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b> </b>
<b>Liste des annexes .....</b>	<b> </b>

---

## Liste des Tableaux

---

Tableau 1 : Durée de survie de pathogènes caractéristiques à 20°C et 30°C .....	6 -
Tableau 2: Exemples de facteurs physiques ayant un impact sur les risques de contamination.....	7 -
Tableau 3: Exemples de facteurs biologiques ayant un impact sur les risques de contamination.....	7 -
Tableau 4 : Agents bactériens aéroportés représentant un risque pour la santé des riverains .....	8 -
Tableau 5 : Virus aéroportés représentant un risque pour la santé des riverains.....	9 -
Tableau 6 : Champignons aéroportés représentant un risque pour la santé des riverains .-	9 -
Tableau 7 : VLE professionnelles proposées par différents organismes pour 8 heures d'exposition .....	13 -
Tableau 8 : Valeurs guides proposées par différents organismes.....	14 -
Tableau 9 : VTR établies par l'OQAI.....	14 -
Tableau 10 : Techniques de traitement biologique des eaux usées.....	16 -
Tableau 11 : Concentrations médianes en amont du site et au niveau des procédés de pré-traitement.....	18 -
Tableau 12: Technologies de traitement biologiques des eaux usées et émission de bio-aérosols .....	18 -
Tableau 13 : Apport atmosphérique en germes provenant de procédés de traitement par culture aérobie .....	19 -
Tableau 14 : Concentration en bio-aérosols émis lors du traitement des boues .....	20 -
Tableau 15 : Concentration atmosphérique moyenne en endotoxines au cours de différentes étapes de traitements des effluents .....	20 -
Tableau 16 : Concentrations des indicateurs au niveau de dépôt des eaux de vidange et transport des boues et dans l'environnement non contaminé .....	21 -
Tableau 17 : Concentrations en agents biologiques contenues dans les bio-aérosols.-	31 -
Tableau 18 : Concentrations en germes sur différentes distances mesurées le jour et la nuit.....	31 -
Tableau 19 : Concentrations au cours de pics de pollution autour des bassins de boues activées.....	33 -
Tableau 20 : Concentrations moyennes en UFC/m <sup>3</sup> pour différents bio-aérosols au niveau des principales sources de bio-contamination sur différents sites industriels.....	40 -
Tableau 21: Concentration médiane en bactéries à Gram- sur plusieurs distances depuis plusieurs étapes de traitement des eaux usées.....	45 -

---

## Liste des Figures

---

Figure 1: Échelle de taille des particules présentant un intérêt .....	- 23 -
Figure 2 : Schéma conceptuel de la dispersion des bio-aérosols en fonction de leur taille et des phénomènes de turbulence .....	- 24 -
Figure 3: Schéma conceptuel des diverses voies d'exposition des riverains de STEP aux bio-aérosols.....	- 25 -
Figure 4: Schéma de contamination .....	- 1 -

---

## Liste des sigles utilisés

---

*A. lombrocoïdes* : *Ascaris lombrocoïdes*

ACGIH : Industrial Hygiene, Environmental, Occupational Health

ADMS 4 : Atmospheric Dispersion Modelling System 4

AFNOR : Agence Française de Normalisation

AFSSET : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail

ARS : Agence Régionale de Santé

BDSP : Banque de données de Santé Publique

C : Carbone

CEMAGREF : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

CIRCEE : Centre d'Information, de Recherche et de Consultation sur les Expériences Exceptionnelles

DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer

DMI : Dose Minimale Infectieuse

DOHA : Dutch Occupational Health Association

*E.coli* : *Escherichia coli*

*E. histolytica* : *Entamoeba histolytica*

E.E.A : European Environment Agency

EH : Équivalent Habitant

EU : Endotoxin Unit

H1N1 : Hyaluronidase 1, Neuraminidase 1

ICOH : International Commission on Occupational Health

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des RISques

InVS : Institut National de Veille Sanitaire

IRSST : Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail

J.O : Journal Officiel

L.A.L : Lysat d'Amoebocyte de la Limule

N : Azote

ND : Non Déterminé

NR : Non Référencé

ODTS : Organic Dust Toxicity Syndrome

OMS : Organisme Mondial de la Santé

OQAI : Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur

P : Phosphore

PLU : Plans Locaux d'Urbanismes

QD : Quotient de Danger

RSD : Réseau Santé Déchets

SPP : Sans Propriété Particulière

STEP : Station d'EPuration

UFC : Unité Formant Colonies

US EPA : United States Environmental Protection Agency

VLE : Valeurs Limites d'Exposition

## **Contexte de l'étude:**

En France, tout projet de construction ou de modification significative d'une station d'épuration (ou STEP) de capacité équivalente ou supérieure à 10.000 EH, doit faire l'objet d'une étude d'impact. La réalisation d'une telle étude est faite au titre de la Loi sur la protection de la nature, codifiée à l'article L122-1 du Code de l'Environnement. Cette étude doit obligatoirement contenir un volet sanitaire et l'application de mesures compensatoires de protection et d'hygiène pour les riverains vis-à-vis de nuisances.

Au travers de ce volet, bien qu'il apparaisse des études en lien avec le risque microbiologique, aucune n'évoque la question des risques de contamination des riverains par les bio-aérosols. Pourtant, au cours des opérations normales de traitement des eaux usées, les agents biologiques contenus dans les effluents peuvent être projetés dans l'air ambiant où ils peuvent être transportés sur de plus ou moins longues distances.

Selon l'American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH), les bio-aérosols sont des particules aéroportées constituées d'organismes vivants tels que des virus, des bactéries et des moisissures, ou de composés provenant de ces micro-organismes (toxines, métabolites, fragments de germes) (ACGIH, 1999). Lors du traitement des eaux usées, le transfert des agents biologiques, des effluents vers l'air, se produit essentiellement par aérolisation ou par aspersion. Malgré les avancées technologiques réalisées dans le domaine du traitement des eaux usées, les sources d'émissions des bio-aérosols sont très fréquentes et souvent reliées à l'utilisation de procédés physiques. Les concentrations en germes alors mesurées dans les gouttelettes peuvent être de l'ordre de 10 à 100 fois supérieures à celles retrouvées dans les eaux usées (Brown N., 1997).

Bien que la quantité de projection émise varie selon la typologie de la STEP, les risques provoqués par les bio-aérosols dépendent quant à eux, du danger que représente l'agent biologique, des conditions environnementales, de la capacité de survie et de résistance de l'agent dans l'air, ainsi que de la réponse immunologique du récepteur.

La question de l'impact des bio-aérosols sur la santé des riverains est donc un aspect à prendre en compte lors de la réalisation d'une étude d'impact. Pour autant, très peu d'études ont été réalisées à ce jour sur ce sujet, contrairement à celui des travailleurs, chez qui des pathologies respiratoires ont été référencées et notamment le syndrome toxique des poussières organiques (ou ODTS) liés à l'inhalation d'endotoxines sous forme de bio-aérosols (Brown N., 1997 ; Douwes J., Thorne P., Pearce N. *et al* 2002).. En l'absence de données tangibles, plusieurs structures publiques (DDTM et ARS) et privées (Bureaux d'études), recommandent une distance d'éloignement de 100 mètres entre les

habitations et les STEP par principe de précaution. L'application d'une telle distance s'appuie principalement sur la distance de 100 mètres mise en place dans le cadre de la préservation des habitants contre les nuisances auditives et olfactives, selon les commentaires additionnels (section 3.2) de l'article 17 de l'arrêté du 21 juin 1996. Ainsi, la distance préconisée est établie sur des critères liés aux odeurs et aux bruits, et non de manière scientifique en lien avec des critères sanitaires. L'objectif n'est pas de limiter les risques de contamination biologique par aérosolisation mais de limiter ceux liés aux bruits et aux odeurs. Des questions demeurent alors quant à la pertinence de la mise en place de cette distance de 100 mètres d'un point de vue sanitaire ; est-elle justifiée et si oui, est-elle suffisante ou surestimée vis-à-vis du risque encouru par les riverains?

Ces questions sont d'autant plus importantes qu'actuellement, les ARS tendent à tolérer une diminution des limites d'urbanisation autour des STEP, lorsque des mesures anti-bruit et anti-odeurs sont mises en place, et ce, sans qu'il n'y ai plus d'indications sur d'éventuels risques de contamination pour les riverains par des bio-aérosols.

### **Objectifs du mémoire :**

L'objectif de ce mémoire est de discuter la pertinence d'établir une distance d'éloignement des zones d'urbanisation aux alentours des STEP dans le but de protéger les riverains d'une contamination par des bio-aérosols. La discussion portera plus particulièrement sur la distance de 100 mètres actuellement préconisée.

Les indications apportées au cours de ce mémoire permettront aux bureaux d'études d'amener des éléments de réponse quant aux impacts sanitaires des bio-contaminations atmosphériques sur les riverains de stations d'épuration. Des mesures compensatoires ou préventives appropriées pourraient donc être proposées en cas de risques avérés.

Dans le cadre de ce mémoire, seules les STEP situées en France métropolitaine de capacité égale ou supérieure à 10.000EH et traitant des eaux usées d'origine domestique sont étudiées. Les systèmes de lagunage sont quant à eux exclus du fait des technologies employées. De même, la réflexion de ce mémoire est uniquement centrée sur les urbanisations de type habitations individuelles (maisons, camping-cars ou mobil-homes) ou collectives, et non industrielles ou agricoles, situées à proximité des STEP.

## **Méthodologie employée**

Afin de juger la pertinence d'une distance d'éloignement entre les habitations et les STEP, il est nécessaire d'étudier s'il existe un risque de contamination des riverains par les bio-aérosols et jusqu'à quelle distance. La démarche employée est celle d'une évaluation des risques sanitaires. Celle-ci est organisée en 4 étapes que sont :

- **La caractérisation du danger** : Cette première partie permet d'identifier les agents biologiques aéroportés pouvant représenter un danger pour personnes exposées et leur différente source d'émission. Seule la principale source d'émission sera conservée afin d'établir un scénario maximisant les risques de contamination des riverains. En effet, dans le cas présent, la prise en compte d'une hypothèse « majorante », cumulant plusieurs éléments défavorables, permet une évaluation générale du risque en l'absence de connaissance ou dans le cas de données incertaines (Bonnard R., 2001).
- **La caractérisation de l'exposition** : Cette seconde partie s'attachera à cibler les voies d'expositions des individus et les scénarios qui y sont associés. L'analyse des données bibliographiques ainsi que des essais de modélisation serviront d'hypothèses à l'étude. Ces essais permettront de juger la possibilité d'employer le logiciel ADMS 4 pour modéliser des émissions de bio-aérosols provenant d'une source diffuse surfacique.
- **La caractérisation du risque** : Cette partie correspond à une synthèse des données disponibles sur le sujet. Elle repose notamment sur une analyse quantitative et qualitative des émissions par rapport au bruit de fond environnemental exempt du fonctionnement de la STEP. En l'état actuel des connaissances, cette évaluation ne peut aboutir au calcul d'indicateurs sanitaires tels que des quotients de danger ou des excès de risque unitaire. Pour autant, même si la démarche ne peut pas être menée jusqu'au bout, l'utilisation des données provenant de la littérature permet une discussion du risque en fonction des hypothèses testées. La comparaison des résultats obtenus par rapport aux études réalisées chez des riverains d'industries émettant des bio-aérosols de même nature, permet également de situer le risque encourus par les riverains de STEP.
- **La mise en place de moyens de gestion des risques** : Il sera possible d'établir un ensemble de préconisations ou du moins d'identifier des priorités d'action en fonction des situations à risques mises en évidences.

## Recherche Bibliographique :

- Utilisation des bases de données : SCIRUS, United States Environmental Protection Agency (US EPA), Réseau Santé Déchets (RSD), Santé Canada, European Environment Agency (E.E.A), Pubmed, Institut national de Veille Sanitaire (InVS), Institut National de l'Environnement industriel et des risques (INERIS), Centre d'Information, de Recherche et de Consultation sur les Expériences Exceptionnelles (CIRCEE), Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI), Banque de Données en Santé Publique (BDSP), Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST), Editions législatives et ScienceDirect.

- Échantillons de mots clés utilisés

Stations d'épuration (STEP)

Distance de protection

Urbanisation / riverains

Bio-aérosols / Aérosolisation

Risques biologiques

Impacts sanitaires / Évaluation des risques

Santé des travailleurs

Riverains

Évaluation des expositions

} Et/ou

## **Partie 1 : caractérisation du danger :**

### **1. Les agents biologiques composants les bio-aérosols**

#### 1.1 Les bio-aérosols : définition et processus de formation dans les STEP

De manière classique, les bio-aérosols sont définis comme étant un mélange complexe de micro-organismes associés à des particules solides ou liquides et maintenues en suspension dans un gaz (ACGIH 1999 ; Schlosser O. Loret J-F, 2005). Dans les STEP, les bio-aérosols sont issus de la projection d'eaux usées. Celle-ci peut se produire via deux phénomènes (Brown N., 1997) :

- Lorsqu'il se crée une agitation des eaux usées, il se forme des bulles qui atteignent la surface puis qui éclatent. De fines gouttelettes sont projetées et emportent avec elles des organismes en suspension à la surface de l'eau, ou qui sont adsorbés à la surface des bulles avant qu'elles n'éclatent. Plus la taille des bulles est importante, plus le nombre de projections est important (Bauer H., Fuerkacker M., Zlibuschka F., *et al.*, 2002).
- Lors de l'aspersion des eaux usées sur des surfaces solides : il se produit un impact dont l'intensité augmente avec la hauteur et de la vitesse d'émission. Des gouttelettes de différentes tailles sont éjectées et transportent avec elles des agents biologiques.

La concentration en agents biologiques contenue dans ces aérosols peut être proportionnelle à celle retrouvée dans les effluents, 10 à 100 fois supérieure par effet de concentration, ou nulle. Il n'existe donc aucune relation simple entre la taille des aérosols et la quantité d'agents biologiques qu'ils renferment (Boutin P., Moline J. Torre M. *et al* 1984).

#### 1.2 Les dangers liés aux bio-aérosols :

Les bio-aérosols formés sont composés d'une matrice liquide et d'un mélange d'agents biologiques. Principalement d'origine fécale, ces agents peuvent être de type infectieux tels que des bactéries, des parasites, des virus, des moisissures et des levures, et de type non infectieux. Ces derniers sont potentiellement responsables d'affections toxémiques ou immuno-allergiques; il s'agit de toxines (endotoxines, exotoxines ou encore mycotoxines), d'enzymes, de protéines ou encore de fragments de parois (bactériennes ou mycéliennes) libérés lors de la mort des cellules ou par action mécanique (Douwes J., Thorne P., Pearce N. *et al* 2002 ; Schlosser O., Loret J-F, 2005).

Au cours de leur trajet, microgouttelettes bio-contaminées peuvent atteindre la taille de particules inhalables ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ). Les particules dont le diamètre est inférieur à  $3 \mu\text{m}$  pourront pénétrer profondément dans les poumons, jusqu'aux alvéoles, tandis que celles dont le diamètre est supérieur sont arrêtées au niveau du carrefour rhino-pharyngé. Ces dernières sont, soit dégluties et peuvent potentiellement provoquer des infections digestives, soit éliminées par expectoration ou lors de mouchages. Par conséquent, les particules virales, les toxines et autres composés allergisants qui ont de très petites tailles (entre  $0,02$  et  $0,25 \mu\text{m}$  de diamètre) sont aptes à accéder aux alvéoles pulmonaires, alors que les bactéries (diamètre variant entre  $0,3$  et  $15 \mu\text{m}$ ) et les moisissures-levures (diamètre de  $1$  à  $50 \mu\text{m}$ ) sont pour partie dégluties. (Boutin P., Moline J. Torre M. *et al* 1984 ; Goyer, N., Lavoie, J., Lazure, L., Marchand 2001). Les principales voies de contamination étudiées au cours de ce mémoire sont donc **l'inhalation et la digestion après déglutition**.

Les particules non inhalées se déposeront sur une multitude de support et de lieux, dont principalement les sols. Il peut ainsi se produire une accumulation de différents agents biologiques au niveau de la première couche de terre, avec une composition qui varie en fonction de leur persistance sur le sol ou sur les plantes. Outre l'inhalation, d'autres voies de contamination indirectes sont donc envisageables (voir partie 2, paragraphe2).

Généralement, entre  $20^\circ\text{C}$  et  $30^\circ\text{C}$ , le temps de survie des virus non enveloppés, des parasites et des formes sporulées est plus long que celui des formes végétatives bactériennes (tableau 1). La persistance sur les sols des toxines et autres composés allergisants est quant à elle peu référencée.

**Tableau 1 : Durée de survie de pathogènes caractéristiques à  $20^\circ\text{C}$  et  $30^\circ\text{C}$**

Pathogènes		Temps de survie en jours	
		sur les plantes	sur le sol
Virus	Entérovirus	$\leq 60$ mais souvent $\leq 15$	$\leq 100$ mais souvent $\leq 20$
Bactéries	<i>Coliformes fécaux</i>	$\leq 30$ mais souvent $\leq 15$	$\leq 70$ mais souvent $\leq 20$
	<i>Salmonella</i>	$\leq 30$ mais souvent $\leq 15$	$\leq 70$ mais souvent $\leq 20$
	<i>Shigella</i>	$\leq 10$ mais souvent $\leq 5$	$\leq 70$ mais souvent $\leq 20$
	<i>Vibrio cholerae</i>	$\leq 5$ mais souvent $\leq 2$	$\leq 20$ mais souvent $\leq 10$
	Formes sporulées	Jusqu'à plusieurs années en condition non favorable à la sporulation	
Protozoaires	Kystes d' <i>E.histolytica</i>	$\leq 10$ mais souvent $\leq 2$	$\leq 20$ mais souvent $\leq 10$
Helminthes	œufs d' <i>A.lombricoïdes</i>	$\leq 60$ mais souvent $\leq 30$	Plusieurs mois

Source: DEVAUX I., 1999

1.3 Paramètres intervenant dans la survie des agents et leur capacité à provoquer des pathologies :

Quelque soit la concentration en agents aéroportés, certains facteurs environnementaux ou intrinsèques aux agents peuvent avoir un impact sur les risques de contamination et

d'apparition de pathologies dans la population. Il s'agit principalement de facteurs physiques (tableau 2) et biologiques (tableau 3) (Boutin P., Moline J. Torre M. *et al*,1984 ; Altmeyer N., Abadia G., Schmitt S., 1990 ; Bouvet E., 2007).

**Tableau 2: Exemples de facteurs physiques ayant un impact sur les risques de contamination**

La température	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une augmentation de la température inactive un grand nombre de pathogènes, mais provoque également la libération de certaines toxines.</li> </ul>
L'humidité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les bactéries sont incapables de croître dans une humidité relative inférieure à 0,95.</li> <li>• Les moisissures peuvent survivre à des taux d'humidité plus basse et sont donc plus résistant dans l'environnement.</li> <li>• <b>Dans des conditions atmosphériques classiques, la diminution du taux d'humidité dans l'air autour des sources d'émission provoque une déshydratation des bio-aérosols qui s'accompagne de la mort, ou de l'inactivation d'un grand nombre de germes. Les taux de mortalité observés sont variables selon les micro-organismes et les espèces concernées.</b></li> </ul>
Le rayonnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La survie des germes est plus importante à l'obscurité qu'en présence de rayonnement solaire.</li> </ul>
Les phénomènes de diffusion et de déposition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Une fois aérosolisés, les concentrations en agents biologiques tendent à diminuer au cours de leur trajet, à la fois par dilution via un phénomène de diffusion dans l'atmosphère et par déposition des agents sur le sol.</b></li> </ul>
L'adsorption sur phase solide	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'adsorption des germes sur des particules solides leur procure un effet protecteur envers certains facteurs environnementaux tel que le rayonnement solaire.</li> </ul>

**Tableau 3: Exemples de facteurs biologiques ayant un impact sur les risques de contamination**

La présence de composés associés aux bio-aérosols	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lors de l'aérosolisation, une partie des composés présents, tels que les nutriments peuvent assurer une source d'énergie pour les germes. De même, la présence de composés solides peut servir de support aux germes et ralentissent leur dessiccation. A contrario, la présence de composés soufrés en forte concentration ralentit la survie des germes.</li> </ul>
La période de latence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il s'agit de la durée nécessaire pour qu'un agent pathogène excrété devienne infectieux.</li> <li>• Les phénomènes d'aérosolisation ont tendance à fragiliser les bactéries qui peuvent avoir un temps de latence plus long qu'à l'accoutumé.</li> </ul>
La virulence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Génétiquement programmée, la virulence correspond à la capacité d'un agent pathogène à se multiplier dans un organisme et à y entraîner une pathologie.</li> <li>• Lors de l'aérosolisation des germes ou de leur dessiccation pendant le trajet, de nombreux germes sont inactivés. Fragilisés ces germes sont incapables de contrer le système immunitaire.</li> </ul>
La mort cellulaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Celle-ci dépend de la capacité des germes à tolérer le phénomène d'aérosolisation et de leur durée de survie dans l'environnement (particulièrement vis-à-vis de facteurs physiques astringents tels que la température ou encore l'humidité).</li> </ul>
La réponse de l'hôte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cette réponse dépend de l'état du système immunitaire de l'hôte et de la dose avec laquelle il est en contact. Pour une même dose, les patients fragilisés (enfants, malades et personnes âgées) développeront des symptômes qui seront non visibles chez des sujets sains. <b>Cette dose correspond à la dose minimale infectieuse ou DMI</b>, qui correspond à la plus petite quantité de germes nécessaire pour provoquer l'infection.</li> <li>• Lorsque qu'un adulte rentre en contact avec des doses trop faibles pour être infectante, il se produit une immunisation sur le long terme.</li> <li>• <b>Capacité immunogène des germes : virus ≥ bactéries ≥ parasites</b></li> </ul>

1.4 Identification des agents biologiques émis par aérosolisation présentant un intérêt sanitaire :

1.4.1 Démarche d'identification (récapitulatif annexe 1)

Parmi les agents biologiques présents dans les effluents urbains, certains sont capables de résister aux phénomènes d'aérosolisation et peuvent représenter un danger pour la santé. Afin d'identifier ces agents, plusieurs éléments ont ainsi été pris en considération. Tout d'abord, nous avons considéré la liste, non exhaustive, des agents biologiques potentiellement présents dans les eaux usées établie via différentes études (Altmeyer N., Abadia G., Schmitt S., 1990 ; Beaupoil A., Le Borgne C., Moussa Atto A., 2010) (annexe 2 à 5). A partir de cette liste, les micro-organismes effectivement présents en France métropolitaine ont été sélectionnés selon leur capacité à être aérosolisés (annexes 2 à 5). Les germes restants ont ensuite été différenciés selon le classement des agents pathogènes établi dans l'article R.4421-3 du Code du Travail (J.O, 30 juillet 1994) (annexe 6). Ce classement est basé sur une évaluation des risques infectieux, prescrite par le décret n° 94-352 du 4 mai 1994 relatif à la protection des travailleurs contre les risques d'exposition à des agents biologiques (J.O., 6 mai 1994). Les micro-organismes précédemment retenus (bactéries, virus et moisissures) sont ensuite classés selon ces 4 groupes, en fonction de l'importance du risque sanitaire qu'ils représentent (annexe 6 à 8). Les agents n'apparaissant pas dans le classement ou appartenant au groupe 1 n'ont pas été conservés puisqu'ils sont considérés comme incapables de provoquer une maladie chez l'Homme ou n'ont, pour l'instant, pas fait l'objet d'étude pour le code du travail. Ainsi, seuls les agents faisant partie des groupes 2 à 4 ont été retenus. Les agents sélectionnés ont été classés selon le groupe de micro-organisme auxquels ils appartiennent (tableaux 4 à 6).

**Tableau 4 : Agents bactériens aéroportés représentant un risque pour la santé des riverains**

<i>Mycobacterium tuberculosis</i> (groupe 3)		<i>Salmonella spp</i> (groupe 2)	
<i>Escherichia coli cytotoxiques</i> (groupe 3)		<i>Shigella spp</i> (groupe 2)	
<i>Campylobacter spp</i> (groupe 2)		<i>Streptococcus pneumoniae</i> (groupe 2)	
<i>Enterobacter spp</i> (groupe 2)		<i>Actinomyces israeli</i> (groupe 2)	
<i>Escherichia coli</i> (groupe 2)		Clostridium (groupe 2)	
<i>Klebsiella pneumoniae</i> (groupe 2)			<i>C. perfringens</i>
<i>Legionella pneumophila</i> (groupe 2)			<i>C. botulinum</i>
<i>Pseudomonas</i> (groupe 2)		<i>C. tetani</i>	
	<i>aeruginosa</i>	<i>Micrococcus spp</i> (groupe 2)	
	<i>fluorescens</i>	<i>Staphylococcus aureus</i> (groupe 2)	
	<i>putida</i>	<i>Leptospira interrogans</i> (groupe 2)	
	<i>alcaligenes</i>	<i>Actinomycètes thermophiles</i>	

**Tableau 5 : Virus aéroportés représentant un risque pour la santé des riverains**

Genre	Espèce
<i>Enterovirus</i> (groupe 2)	<i>Virus coxsackie A</i>
	<i>Virus coxsackie B</i>
	<i>Echovirus</i>
<i>Hépatovirus</i> (groupe 2)	Virus de l'hépatite A
<i>Mastadénovirus</i> (groupe 2)	<i>Adénovirus</i> Humain
<i>Norovirus</i> (groupe 2)	Genogroupe I et II
<i>Parvovirus</i> (groupe 2)	<i>Parvovirus</i> Humain
<i>Rotavirus</i> (groupe 2)	<i>Rotavirus</i> Humain
<i>Coronavirus</i> (groupe 2)	<i>Coronavirus</i> Humain

**Tableau 6 : Champignons aéroportés représentant un risque pour la santé des riverains**

<i>Aspergillus spp</i> (groupe 2A)	<i>Penicillium spp</i>
<i>Cladosporium</i>	<i>Geotrichum</i>
<i>Fusarium spp</i>	<i>Cryptococcus neoformans</i> (groupe 2)

Bien que la sélection des micro-organismes soit basée sur des critères en rapport avec la santé des travailleurs, il est envisageable que les agents reconnus comme pathogènes pour les travailleurs via aérosolisation, le soient également pour les riverains. De même, l'ensemble des germes retenus sont considérés comme capables de provoquer des pathologies à la fois chez des sujets fragilisés et en bonne santé ; l'objectif étant de réaliser une étude pertinente pour l'ensemble des populations exposées.

#### 1.4.2 Analyse des micro-organismes retenus comme présentant un intérêt sanitaire :

##### A. Les Bactéries :

La majorité des bactéries présentes dans les eaux usées n'est pas pathogène pour l'Homme. Certaines d'entre elles peuvent le devenir lorsque leur concentration dans le milieu devient anormalement élevée ou lors de contact avec des personnes immunodéprimées ou fragilisées. On parle alors de pathogènes opportunistes. Les pathologies provoquées peuvent être de type respiratoire, cutanéomuqueux ou digestif selon le ou les organismes impliqués (Brown N., 1997 ; Goyer N., Lavoie J., Lazure L., et al., 2001 ; Lannuzel A.2009).

Parmi les germes retenus (tableau 4), figurent en premier lieu ceux appartenant au groupe 3 de la classification de l'article R.4421-3 du Code du Travail. Dans le classement, ces germes correspondent aux espèces *E. coli* cytotoxiques et *Mycobacterium tuberculosis* (agent de la tuberculose). Le risque de contamination par ces germes peut cependant être exclu par le fait que leur présence soit très rare dans les effluents domestiques français.

Concernant l'espèce *Klebsiella pneumoniae*, bien qu'il ne fasse partie que du groupe 2, ce germe représente un risque élevé pour les riverains puisqu'il est capable de provoquer des maladies respiratoires et qu'il possède une capsule. Cet élément assure à la bactérie une résistance aux conditions environnementales défavorables. De même, bien que l'espèce Actinomycètes thermophiles ne soit pas répertoriée au niveau du classement R.4421-3 du Code du Travail, celle-ci est fréquemment isolée dans les aérosols de STEP et est responsable de manifestations allergiques respiratoires. Cependant, hors période d'apparition de mousse à la surface des bassins, les concentrations mesurées dans l'environnement restent faibles. Pour le genre *Pseudomonas*, une contamination n'est envisagée que pour les personnes immunodéprimées.

Enfin, bien qu'il soit peu fait mention de contamination par inhalation, par des bactéries à Gram+, ces dernières représentent environ 50% des bactéries retrouvées dans les bio-aérosols. De plus, grâce à la structure de leur paroi, ces germes sont capables de mieux résister au phénomène d'aérosolisation que les bactéries à Gram- et de mieux survivre dans l'environnement. Afin de prendre en considération ces germes, les Streptocoques fécaux ont été choisis comme indicateurs. En effet, il s'agit d'un germe à Gram+ présent de manière quasi-systématique dans les bio-aérosols de STEP et pour lequel des données environnementales existent.

Pour l'ensemble des espèces bactériennes non citées précédemment, sachant que leur risque de contamination est majoritairement dû à des expositions par voie cutanée ou digestive, l'étude ne s'intéressera pas à ces dernières.

→ **Parmi les bactéries recensées, les espèces qui serviront d'indicateurs sanitaires dans le cadre de ce mémoire sont les espèces *Klebsiella pneumoniae* et le genre *Pseudomonas*. Les Streptocoques fécaux servent quant à eux d'indicateurs généraux pour les bactéries à Gram+.**

#### B. Les Virus:

Ces organismes sont considérés comme des parasites stricts, car incapables de se développer hors d'une cellule hôte. Généralement les virus dit « nus » (non enveloppé) sont les plus résistants dans l'environnement (eau, air, sol). Ainsi, la durée de survie des virus hors d'un organisme hôte varie de quelques heures à plusieurs jours selon les caractéristiques du virus et les conditions environnementales. Les virus contenus dans les effluents sont principalement de type entérique ou respiratoire (Brown N., 1997 ; Goyer N., Lavoie J., Lazure L., *et al.*, 2001 ; Lannuzel A.2009)

L'ensemble des virus retenus (tableau 5) appartiennent au groupe 2 du classement de la réglementation professionnelle et sont donc tous susceptibles d'entraîner des pathologies. Concernant les infections liées aux coronavirus, ces dernières sont généralement liées à une contamination par ingestion plutôt que par inhalation. Les pathologies provoquées sont de plus bénignes, tout comme celles liées aux adénovirus. Cependant, une contamination par un adénovirus peut devenir mortelle pour les sujets immunodéprimés. Le virus Coxsackie B est quant à lui transmis par voies respiratoires et est connu pour être responsable de pathologies extra-intestinales souvent graves (Carducci A. Tozzi E., Rubulotta E., *et al.*, 2000). La persistance de ce virus étant importante dans le sol, il pourrait faire partie des agents à surveiller pour la prévention des risques chez les enfants avec un comportement PICA (enfant consommant de la terre).

Les Norovirus et les Parvovirus peuvent également être transmis par voie respiratoire, contrairement aux Rotavirus qui sont principalement transmis par voie digestive.

Enfin, il est important de signaler que le virus H1N1 a été exclu des germes potentiellement dangereux grâce aux conclusions émises par un rapport de l'AFSSET sur les risques sanitaires encourus par les travailleurs de l'assainissement des eaux usées, vis à vis du virus H1N1 (AFSSET, 2009). En effet, les conclusions de ce document indiquent que le risque de contamination par aérosolisation d'eaux usées est négligeable par rapport à la voie de contamination interhumaine. Il est donc peu probable que ce virus représente un risque pour les riverains.

→ **Les virus représentant un risque par inhalation pour les riverains sont les virus Coxsackie B, les Adénovirus, les Norovirus et les Parvovirus.**

### C. Les champignons:

Les eaux usées contiennent principalement des champignons microscopiques (entre 1 et 100 µm). Il s'agit d'organismes eucaryotes pluricellulaires (moisissures) ou unicellulaires (levures) capables de se développer grâce aux sources nutritives (C, N, P) présentes dans les effluents. Leur dispersion s'effectue principalement par la dissémination de spores via l'atmosphère.

Au seul regard d'une contamination par inhalation, la classification professionnelle des agents permet de retenir 1 moisissure (*Aspergillus spp*) et 1 levure (*Cryptococcus neoformans*). Cependant, il est également important de prendre en considération les moisissures capables de produire des mycotoxines (tableau 6). En effet, il est reconnu que ces composés sont capables de provoquer des pathologies graves chez des sujets en bonne santé. Les spores et les mycotoxines étant des formes très résistantes capables

de supporter des transports sur une longue durée, ces éléments peuvent avoir un impact sur la santé des riverains.

→ **Au vu de leurs pouvoirs immuno-allergisant et toxémique, l'ensemble des champignons étudiés peuvent représenter un danger selon leur concentration dans l'environnement.**

#### D. Les parasites:

Au vu de la taille et du poids des formes végétatives et enkystées, il est peu probable que ces dernières puissent être aérosolisées. Le risque de contamination des parasites par voie respiratoire est donc quasi nul dans ce contexte.

En conclusion, à l'exception des parasites, non retenus car faiblement transmissibles par aérosolisation, l'ensemble des micro-organismes sélectionné représente un risque de contamination pour les riverains. Certains agents, plus résistants dans l'environnement tels que les formes sporulées, encapsulées ou les virus nus peuvent présenter un danger supplémentaire. Pour autant, les micro-organismes ne doivent pas être considérés de manière individuelle mais plutôt comme un mélange complexe, de par leur origine. Enfin, bien que les agents sélectionnés soient capables de supporter le choc de l'aérosolisation, un grand nombre d'entre eux sont transmis préférentiellement par voie digestive. Sans déglutition ou ingestion directe des agents, l'apparition de pathologies devient difficile.

Outre une possible contamination par ces organismes, les bio-aérosols peuvent contenir des composés toxiques ou allergisants dérivés de différents germes. Parmi les agents responsables d'affection toxémiques sont retrouvés (Bonnard R., 2001 ; Goyer N., Lavoie J., Lazure L., *et al.*, 2001 ; Douwes J., Thorne P., Pearce N., *et al.* 2002 ; Lannuzel A., 2009).

- Les endotoxines : Elles sont principalement impliquées dans les cas du syndrome toxique des poussières organiques (Organic Dust Toxic Syndrome ou ODTS), qui se manifeste entre autres, par de la fièvre, une arthralgie, des malaises et une inflammation respiratoire à neutrophile. Ce syndrome apparaît dans les 4 à 6 heures après exposition et disparaît spontanément en 24 à 48 heures.
- Des mycotoxines : Ces composés sont non volatils mais peuvent être dispersés par aéroaspersion. Les effets induits sont très variés (irritation des muqueuses, étourdissements, nausées, effet immunosuppresseur, etc.), et peuvent aller jusqu'à l'induction de cancer. Pour exemple, le cas de l'aflatoxine sécrétée par *Aspergillus flavus*, considérée comme cancérigène et tératogène par ingestion par le Centre International de Recherche contre le Cancer.

- Des  $\beta$ -(1-3)-D-glucan : Ce polymère provenant de la paroi cellulaire des moisissures, bactéries et plantes est considéré comme agent irritant des voies respiratoires.

D'autres composés tels que des fragments de parois bactériennes, ou mycéliennes sont des composés pro-inflammatoires responsables d'affections de type immuno-allergiques telles que des rhinites, des sinusites, ou encore de l'asthme.

Malgré les effets observés chez les travailleurs, à l'exception des endotoxines, il existe une méconnaissance sur leur concentration dans les bio-aérosols, leur mécanisme de dispersion et leur DMI. Ce manque de donnée tend à diminuer la connaissance des risques des riverains vis-à-vis des bio-aérosols.

### 1.5 Relation dose-réponse :

Actuellement, il n'existe quasiment aucune donnée disponible concernant des DMI par inhalation spécifiques à chaque micro-organisme. Néanmoins, plusieurs auteurs ont proposé des valeurs limites d'expositions (VLE) pour des groupes de micro-organismes présents dans l'air des STEP à partir d'études épidémiologiques chez les travailleurs et de mesures d'air extérieur (tableau 7) (Leftah N., 1999 ; Delery L.,2003). Ces valeurs représentent les conditions dans lesquelles on estime que presque tous les travailleurs peuvent être exposés de façon répétée sur 8 heures, pendant toute une vie professionnelle, sans subir d'effet nocif.

**Tableau 7 : VLE professionnelles proposées par différents organismes pour 8 heures d'exposition**

		Flore totale (UFC/m <sup>3</sup> )	Bactéries Gram- (UFC/m <sup>3</sup> )	Moisissures (différence avec le milieu extérieur en UFC/m <sup>3</sup> )	Auteurs
France	IRSST	1,0E+04	1,0E+03	Concentration $\geq$ concentration de base dans l'air au site de référence ou Espèces différentes du site de référence (dans l'air)	
	CIRSEE	1,0E+04	1,0E+03	5,0E+04	
Danemark		1,0E+04	1,0E+03	ND	
Canada		4,50E+03	ND	ND	
Valeurs guides Dutch Occupational Health Association (DOHA)		1,0E+04	1,0E+03	1,0E+04 avec 0,5E+03 par espèce	Heida, 1995 Rapporté par RDS,200
Scandinavie		5E+03 à 1,0E+04	1,0E+03	5,00E+04	Dutkiewicz, 1997
Pologne		1,00E+05	2,00E+04	ND	ND

ND : non déterminé

Il est important de souligner que ces VLE ne permettent pas de distinction nette entre un milieu sain et un milieu malsain et ne représentent pas un point à partir duquel des troubles de la santé surviennent (ACGIH 1999). De plus, au cours de la construction des

VLE, certaines nuisances ou effets réversibles sont tolérés, les populations à risques ou fragilisées (enfants, malades, personnes âgées) ne pas sont différenciées et la durée d'exposition mesurée est restreinte à celle d'un travailleur (8h/jour, 5j/semaine pendant 40 ans). Ainsi, l'utilisation de ces valeurs pour la population générale paraît difficile.

À l'exception des recommandations faites par l'ACGIH, indiquant qu'un environnement est considéré comme malsain pour les sujets fragilisés lorsque le nombre de bactéries à gram- est supérieur à 100 UFC/m<sup>3</sup>, il n'existe pas de valeur limite d'exposition pour la population générale.

Contrairement aux micro-organismes, plusieurs effets dose-réponse ont pu être établis de manière précise pour les endotoxines. Pour exemple, les études de Rylander ont démontré pour des expositions chroniques, les relations suivantes (Rylander 1999):

- 20 ng/m<sup>3</sup> (soit entre 200 et 280 EU/m<sup>3</sup>) : augmentation de l'activité bronchique
- 200 ng/m<sup>3</sup> (2000-2800 EU/m<sup>3</sup>) : apparition d'une altération de la fonction pulmonaire
- 300 ng/m<sup>3</sup> (3000-4200 EU/ m<sup>3</sup>): apparition de symptômes d'oppression respiratoires
- 1000 ng/m<sup>3</sup> (10000 à 14 000 EU/m<sup>3</sup>): apparition d'une pneumopathie toxique

De même, selon l'International Commission on Occupational Health (ICOH) le syndrome de l'ODTS apparaîtrait pour des niveaux d'endotoxines correspondant à 0,2 µg/m<sup>3</sup>, des effets systémiques à partir de 0,1 µg/m<sup>3</sup> et une inflammation des voies aériennes dès inhalation de 0,01 µg/m<sup>3</sup> d'endotoxines.

Actuellement, seul l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) va au-delà de la simple proposition de valeurs guide (tableau 8) et met en évidence deux VTR distincts selon qu'il s'agisse d'une exposition chronique ou aiguë (tableau 9) (Mosqueron L, Nedellec V, 2002).

**Tableau 8 : Valeurs guides proposées par différents organismes**

Organismes		Endotoxines (µg/m <sup>3</sup> )
France	IRSST	Concentration ≥ 30 fois la concentration de base dans l'air au site de référence
EPA		0,01
Hollande		0,0045
DOHA		0,005

**Tableau 9 : VTR établies par l'OQAI**

Exposition	Endotoxines (µg/m <sup>3</sup> )
VTR aiguë	4,1
VTR chronique	0,092

Enfin, concernant la voie digestive, globalement, selon l'OMS, les protozoaires intestinaux et l'ensemble des virus ont une DMI basse (inférieur à 100 éléments) et la majorité des bactéries ont une dose infectante plus élevée aux environs de 10<sup>4</sup> germes minimum (Altmeyer M., Abadia G., Schmitt S., *et al.*, 1990).

## Sélection des indicateurs biologiques

Les agents biologiques qui serviront d'indicateurs dans le cadre de ce mémoire sont :

1. L'espèce ***Klebsiella pneumonia*** et le genre *Pseudomonas*. Ces espèces aérosolisables sont responsables d'affection avérées par inhalation chez des sujets en bonne santé et fragilisés pour le genre *Klebsiella* et uniquement fragilisés pour le genre *Pseudomonas*.

2. À cet indicateur s'ajoute des indicateurs de contamination plus généraux tels que les **bactéries à gram-**, dont le surnombre est lié à des manifestations allergiques et l'espèce ***Geotrichum*** (moisissures) permettant d'évaluer si l'air autour des stations représente ou non un environnement malsain pour les riverains.

3. Il est également intéressant d'intégrer des indicateurs de contamination fécale qui certes ne sont pas impliqués de manière avérée dans des infections par inhalations (à l'exception de l'espèce *Klebsiella pneumoniae*), mais qui sont faiblement retrouvés dans l'environnement et donc, plus informatifs sur le comportement des contaminants aéroportés provenant des STEP. Il s'agit des **Coliformes totaux et fécaux** et des **Streptocoques fécaux**. L'information apportée par les streptocoques fécaux est d'autant plus intéressante qu'il s'agit d'une bactérie à Gram+. Sa concentration dans l'environnement apporte un reflet de celle d'autres germes tout aussi résistants à la dessiccation.

Les Moisissures et les bactéries totales sont exclues des indicateurs étudiés puisque leur origine peut être diverse, notamment dans le cadre d'une étude réalisée sur les niveaux de bio-contamination sur différentes distances.

Les **endotoxines** sont des agents biologiques, autres que microbiens, pour lesquels des données existent et qui sont reconnus de manière officielle comme responsables de pathologies chez les travailleurs.

Enfin, bien que certains virus aient été identifiés comme potentiellement dangereux pour la santé des populations, ces derniers sont rarement mesurés en routine de par le coût des méthodes employées et des moyens technologiques à mettre en place. Ainsi le choix des bactéries comme indicateur semble favorable par rapport aux contraintes rencontrées lors de la détection et du dénombrement des virus.

## 2. Identification des principaux systèmes et activités responsables de l'émission de Bio-aérosols :

### 2.1 Généralité sur le fonctionnement des STEP :

Schématiquement, les STEP sont définies par une succession d'étapes de traitements comprenant, un prétraitement (associant des étapes de dégrillage, de dessablage et de déshuilage), un traitement primaire, un traitement secondaire (biologique ou physico-chimique) et enfin, un traitement tertiaire (Altmeyer M., Abadia G., Schmitt S., *et al.*, 1990).

Dans le cadre de ce mémoire, l'étape du traitement primaire n'est pas abordée puisqu'il s'agit d'une technique de moins en moins utilisée lors de la construction ou la rénovation de STEP en France. Dorénavant, le traitement biologique est considéré comme la principale voie de traitement des eaux usées.

Ces traitements biologiques peuvent être effectués par voie aérobie ou anaérobie, sur des cultures libres ou fixées, en systèmes intensifs ou extensifs. Dans le cas présent, le mode extensif (lagunage et lits d'infiltration) est exclu de l'étude. Par soucis de représentativité, seules les techniques de traitement biologique les plus employées sont présentées dans ce mémoire. Le tableau 10 regroupe l'ensemble de ces techniques.

**Tableau 10 : Techniques de traitement biologique des eaux usées**

Mode de culture	Technologie	Principe
culture libre en aérobie	boues activées	Croissance des micro-organismes dans des bassins comprenant un apport en oxygène par agitation mécanique (brosses, turbines) ou par système d'insufflation d'air (aérateur fines bulles)
culture fixée en aérobie	lit bactérien	Développement des micro-organismes sur un support de type galets ou alvéolaire. Les eaux usées sont apportées par aspersion ou ruissellement et percolent à travers ces matériaux.
	Bio-filtres	Les eaux usées sont apportées par aspersion ou par ruissellement au niveau du bio-film formé par des amas bactériens. Ces derniers sont fixés sur des matériaux de petite taille.
culture fixée ou libre en anaérobie	Digesteur	L'épuration des effluents a lieu dans un ouvrage closensemencé en germes anaérobies pouvant s'être fixés ou non.

En fin de traitement biologique, une séparation entre l'eau traitée et la biomasse formée est réalisée dans un ouvrage spécifique nommé «clarificateur». Une partie des boues d'épuration ainsi récupérées peuvent être remises en circulation ou traitées par épaissement et/ou par déshydratation sur site, avant élimination ou recyclage. Enfin, certaines collectivités sont contraintes d'appliquer des traitements tertiaires avant le rejet

des eaux dans le milieu naturel afin de les rendre compatibles avec la sensibilité du milieu (par exemple : zone de baignade, conchylicole, piscicole ou sensible à l'eutrophisation). Ce traitement comprend alors une élimination de l'azote total et du phosphore ou une désinfection des eaux.

## 2.2 Étude des principales étapes de traitement des eaux usées :

Bien qu'il existe un certain nombre de données disponibles, il est difficile de pouvoir les comparer. En effet, selon les études, les paramètres de prélèvement et d'analyse appliqués diffèrent. De même, au sein d'une même étude des résultats peuvent varier pour une ou plusieurs STEP. Des variations dans les conditions météorologiques et la typologie des STEP pourraient aussi expliquer ces résultats. Malgré tout, la majorité des études réalisées offrent des résultats cohérents. En se basant sur l'hypothèse que ces résultats sont comparables, il est possible d'en dégager des informations concordantes, apportant des indications quant aux principaux points d'émissions en bio-aérosols dans les STEP. Ces informations proviennent des études de : Randall C., *et al.*, 1966 ; Majeti V., *et al.*, 1980 ; Fannin K., *et al.*, 1985 ; Lavoie J., 1997 ; Brandi G., *et al.*, 2000 ; Bauer H., *et al.*, 2002 ; Prazmo Z., *et al.*, 2003 ; Schlosser O *et al.*, 2005 ; Sanchez-Manedero M., *et al.*, 2008.

Dans un premier temps, l'analyse des différentes étapes de traitement est basée sur la comparaison des concentrations des indicateurs microbiologiques précédemment sélectionnés (paragraphe sélection des indicateurs biologiques). En l'absence de données disponibles pour l'ensemble de ces indicateurs au niveau de chacune des étapes de traitement, l'analyse comparative s'arrêtera aux indicateurs bactéries à Gram- et *Geotrichum*. Pour chaque concentration mesurée, les concentrations de références, représentant le bruit de fond du germe dans l'environnement sont indiquées en parallèle.

Dans une seconde partie, l'analyse portera plus spécifiquement sur les émissions d'endotoxines, puisqu'il s'agit du seul agent biologique pour lequel des effets sur la santé des travailleurs en STEP sont référencés.

### 2.2.1 Étude des principales étapes de traitement en fonction des émissions de divers micro-organismes :

#### A. L'étape de pré-traitement :

Cette étape est effectuée via deux procédés que sont le dégrillage et le dessablage. Les concentrations médianes mesurées pour chaque dispositif par Lavoie en 1997 au niveau de différentes stations sont présentées dans le tableau 11.

**Tableau 11 : Concentrations médianes en amont du site et au niveau des procédés de pré-traitement**

Auteur	Étape de pré-traitement	Agents biologiques	Concentration médiane en UFC/m <sup>3</sup>	
			Concentration de référence	sur le site
Lavoie 1997	Dégrillage	Bactéries à Gram-	70	220
		<i>Geotrichum</i>	1467	451,5
	Dessableur	Bactéries à Gram-	70	120
		<i>Geotrichum</i>	1467	381

Les mesures effectuées montrent globalement que l'étape de pré-traitement génère des bio-aérosols de type bactérien et non des moisissures. Les émissions provenant du dégrillage sont supérieures à celles du dessablage.

Actuellement, dans les zones urbaines et péri-urbaines, ces procédés sont installés de manière quasi-systématique dans des enceintes closes ou au moins capotées. En effet, outre les émissions de bio-aérosols, ces étapes sont également responsables de la libération de molécules malodorantes, entraînant des nuisances olfactives pour les riverains. Ces nuisances étant réglementées par le Code de l'Environnement, un traitement de l'air vicié est appliqué via différentes techniques tels que l'adsorption sur charbon activé. Ces procédés permettent un abattement très important des agents biologiques contenus dans les bio-aérosols.

#### B. Les traitements biologiques :

Selon les investigations menées par Sanchez-Monedero (Sanchez-Monedero *et al* 2008), le traitement biologique des eaux usées représente la principale source d'émission de bio-aérosol pour 50% des STEP étudiées. Au travers d'une analyse des données bibliographiques (INRS, 2004., Altmeyer M., Abadia G., Schmitt S., *et al.*, 1990), il est possible de cibler les technologies formatrices de bio-aérosols. Le résultat de ces études est présenté dans le tableau12.

**Tableau 12: Technologies de traitement biologiques des eaux usées et émission de bio-aérosols**

Culture des germes	Technologie	Apport en oxygène	Émission de bio-aérosols
culture libre en aérobiose	boues activées	agitation par turbine	Forte turbulence des eaux, émission d'un grand nombre d'aérosol. (photos A, Annexe 9).
		agitation par brosses	Importante production d'aérosols projetés sur une zone étendue. La vitesse de rotation des brosses associée au vent sont 2 éléments mis en cause. (photos B, Annexe 9).
		aération par bullage	Assez faible production d'aérosols car peu de turbulences. Pas de projection à distance. Légère contamination par transport par le vent. Généralement, les niveaux de contamination mesurés sont très proches du bruit de fond naturel. (photos C, Annexe 9).
culture fixée ou libre anaérobie	Digesteur	Aucun	Nulle, à l'exception des périodes de nettoyage des cuves.

Suite du Tableau 12 : Technologies de traitement biologiques des eaux usées et émission de bio-aérosols

Culture des germes	Technologie	Apport en oxygène	Émission de bio-aérosols
culture fixée aérobie	lit bactérien	aération par diffusion passive ou active	La principale source d'aérosolisation correspond au mode d'adduction des effluents. Ainsi, lors de l'arrosage des lits, il se forme des gouttelettes par impact sur les supports bactériens ou avec l'eau surnageant à la surface. L'utilisation d'un bras rotatif entraîne souvent un élargissement de la zone contaminée. Cependant les cultures étant fixées, seule une faible proportion de germes peut être aérosolisée en comparaison aux cultures libres

L'étude de Lavoie permet une comparaison des systèmes de traitement biologique en fonction des concentrations en indicateurs mesurées au niveau du procédé (tableau 13).

**Tableau 13 : Apport atmosphérique en germes provenant de procédés de traitement par culture aérobie**

Auteurs	Étape de traitement		Agents biologiques	Concentration médiane en UFC/m <sup>3</sup>	
				Concentration de référence	sur le site
Lavoie 1997	culture libre aérobie	aération brosse	Bactéries à Gram-	15	10000
			<i>Geotrichum</i>	181,5	561
		aération turbine	Bactéries à Gram-	ND	ND
			<i>Geotrichum</i>	147	516
	culture fixée aérobie		Bactéries à Gram-	110	9550
			<i>Geotrichum</i>	2610	261

ND : non déterminées

À partir de ces données, il est possible d'établir plusieurs classements grossiers des systèmes, selon les niveaux de production de bio-aérosols.

**Classement général** (Lavoie 1997 ; Bauer H., Fuerhacker M., Zibuschkaf F., *et al.*, 2002:

Le classement des différents modes de traitement biologiques des eaux usées établi selon leur apport potentiel en bio-aérosols dans l'air est le suivant :

Culture libre en aérobiose > culture fixée en aérobiose > culture fixée ou libre en anaérobiose

**Classement selon les technologies d'aération employées pour les cultures libres en aérobiose** (Lavoie 1997; Sanchez-Monedero M., Aguilar M., Fenoll R., *et al.*, 2008:

Boues activées avec agitation par brosses > boues activées avec agitation par turbine > boues activées avec aération par bullage

Ces classements démontrent que les traitements par boues activées et plus particulièrement ceux utilisant des brosses, représentent les principales sources de production de bio-aérosols.

### C. Traitement tertiaire

Aucun élément de la littérature n'évoque l'émission significative de bio-aérosols au cours de ces étapes.

### D. Le traitement des boues d'épuration

Les concentrations médiane mesurées au cours de l'étude réalisé par Lavoie en 1997 au niveau de différentes stations sont présentées dans le tableau 14.

**Tableau 14 : Concentration en bio-aérosols émis lors du traitement des boues**

Auteurs	Étape de traitement	Agents biologiques	Concentration médiane en UFC/m <sup>3</sup>	
			Concentration de référence	sur le site
Lavoie 1997	traitement des boues	Bactéries à Gram-	30	30
		<i>Geotrichum</i>	324	333

Les concentrations du genre *Geotrichum* et en bactéries à Gram- semblent négligeable par rapport à leur concentration dans l'environnement en l'absence de STEP (concentration de référence).

Tout comme pour les étapes de pré-traitement, l'ensemble des procédés de traitement des boues ont lieu dans des enceintes closes avec traitement de l'air vicié pour les STEP entourées par des habitations.

#### 2.2.2 Étude des principales étapes de traitement en fonction des émissions en endotoxines

Les concentrations moyennes en endotoxines mesurées dans l'air au cours des différentes étapes de traitement des eaux usées sont reportées dans le tableau 15.

**Tableau 15 : Concentration atmosphérique moyenne en endotoxines au cours de différentes étapes de traitements des effluents**

Étape de traitement	Concentration en endotoxines en ng/m <sup>3</sup>	Auteurs
Prétraitement	50	Goyer et al 1998
	184,15	Lee 2006
Traitement biologique	31	Goyer et al 1998
	44,6	Krajewski et al 2004
	99,7	Lee 2006
Traitement des boues	95,3	Krajewski et al 2004
	325,5	Lee 2006
Transport des boues	11	Goyer et al 1998

Les niveaux de contamination les plus élevés sont clairement liés au traitement des boues. Ceci peut s'expliquer par la montée en température des boues lors de leur traitement, qui favorise la dégradation des bactéries à Gram-, et donc la libération d'endotoxines contenues dans leur paroi. Cependant, cette étape étant réalisée dans un

espace limitant la dispersion des endotoxines dans l'air, les concentrations en toxines mesurées ne correspondent pas à celles libérées dans l'environnement.

2.3 Modalités d'exploitation entraînant la formation de bio-aérosols de manière anecdotique :

2.3.1 *Activités de maintenance et de nettoyage :*

Selon les études de Schlosser (Schlosser O. Loret J-F.,2005), certaines activités de maintenance ou de nettoyage intervenant au cours de l'exploitation d'une STEP peuvent être à l'origine de l'émission de bio-aérosols. Les agents biologiques ont alors pour origine le contenu des systèmes entretenus, ou bien les eaux utilisées pour le nettoyage. En effet, il s'agit souvent d'eaux usées traitées employées sous haute pression. Bien que le risque biologique paraisse important, ce dernier est nuancé par le fait que les activités de nettoyage ne sont que très rarement pratiquées. La fréquence des nettoyages est estimée à moins d'une fois par an pour les bassins et environ 5 fois par an pour les locaux en lien avec le stockage et le traitement des boues.

2.3.2 *Les activités liées au dépôt des eaux de vidange et au transport des boues*

Ces activités correspondent à la vidange des camions de collecte des fosses septiques, au pelletage des boues, ou encore aux chargements des camions en boues lors de leur transfert pour traitement ou réutilisation. Les concentrations médianes des indicateurs microbiens provenant des différents procédés ciblés apparaissent dans le tableau 16.

**Tableau 16 : Concentrations des indicateurs au niveau de dépôt des eaux de vidange et transport des boues et dans l'environnement non contaminé**

Auteur	Étape de traitement	Agents biologiques	Concentration médiane en UFC/m <sup>3</sup>	
			Mesure de référence	sur le site
Lavoie 1997	transport des boues	Bactéries à Gram-	20	30
		<i>Geotrichum</i>	235	381
	Vidange des camions des fosses septiques	Bactéries à Gram-	20	70
		<i>Geotrichum</i>	147	444

Les résultats obtenus démontrent que ces activités peuvent être à l'origine de l'émission de bio-aérosols, mais en quantité bien moindre que celles du traitement biologique.

2.3.3 *Cas particulier des mousses biologiques :*

Les mousses biologiques sont constituées de micro-organismes filamenteux associés à des bulles d'air et des particules de boues. Celles-ci apparaissent sous forme d'amas visqueux et épais, mais stables à la surface de certains bassins. Leur apparition serait liée à l'apport d'effluents d'origine industrielle (eaux usées appauvries en azote et phosphore)

qui modifierait les paramètres physico-chimiques des eaux usées. Le fonctionnement des aérateurs ne les détruit pas et elles ont tendance à s'accumuler vers les bords des bassins en l'absence d'agitation. En cas de vent fort, ces mousses peuvent être dispersées de manière compacte ou sous forme d'aérosols. Les formes compactes constituent un milieu favorisant la survie des germes, mais elles ne peuvent pas atteindre des distances importantes. Les formes aérosolisées, au contraire, peuvent parcourir de grandes distances, mais ne favorisent pas la survie des organismes qu'elles contiennent (GIS mousses 1993).

#### Récapitulatif : Principales sources d'émissions retenues

Bien qu'il soit admis que l'ensemble des étapes de traitement des effluents puisse être à l'origine de l'émission de bio-aérosols, certaines d'entre elles ont montré des niveaux de production supérieure aux autres (voir paragraphe 2.2.1).

Les étapes critiques dans la production de bio-aérosols sont liées aux traitements effectués à ciel ouvert nécessitant l'emploi de moyens d'agitations ou d'aspersions provoquant la formation de microgouttelettes. Ainsi, les concentrations les plus élevées en germes indicateurs sont retrouvés au-dessus des ouvrages de traitement par boues activées, en comparaison aux autres étapes de traitement des effluents. **Ainsi, dans le cadre d'un scénario maximisant le risque d'exposition aux bio-aérosols, l'activité retenue est celle du traitement biologique par boues activées avec agitation par brosses.**

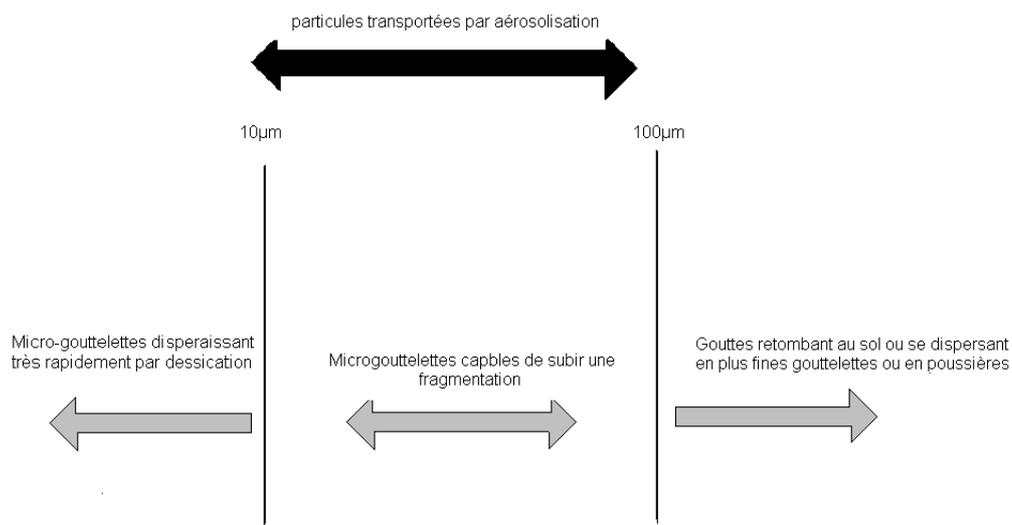
Concernant les émissions en endotoxines, bien que les taux les plus significatifs soient mesurés au niveau du traitement des boues, seuls les apports provenant des ouvrages de traitement par boues activées seront considérés au cours de l'étude.

#### 2.4 Paramètres intervenant dans la dispersion des bio-aérosols :

En pratique, la dispersion des agents biologiques dépend de l'interaction complexe entre plusieurs critères. De manière non exhaustive :

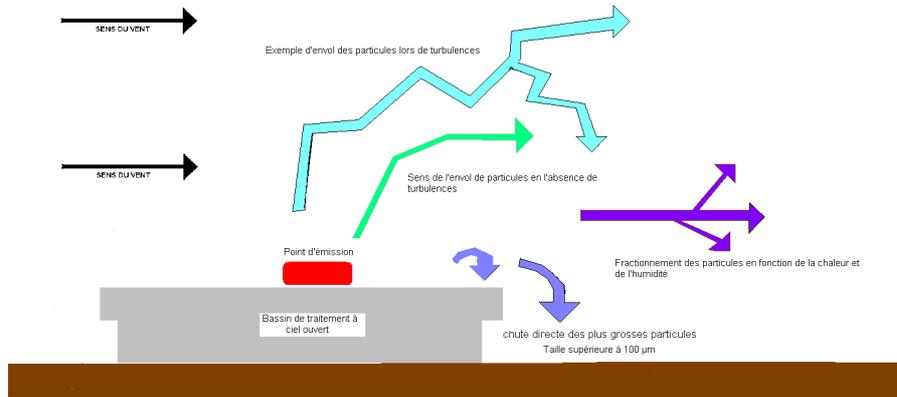
- La taille des bio-aérosols : Généralement, plus les gouttelettes sont grosses, moins elles parcourent de longues distances et plus elles retombent rapidement sous l'effet de la gravité. Pour exemple, selon l'étude de Paul Baron pour le CDC, en atmosphère calme, une particule de 1µm de diamètre possède une demi-vie de 41 heures dans l'air avant d'atteindre une distance de 1 mètre 54 (soit 5 feet), contre une demi-vie de 5,8 secondes pour une particule de 100 µm (BARON, CDC). Ainsi, les projections dont les diamètres avoisinent ou dépassent les 100

$\mu\text{m}$  sont considérées comme des éclaboussures et retombent assez rapidement. En fonction des conditions météorologiques, ces éclaboussures peuvent néanmoins se fragmenter en plus fines gouttelettes. Les particules de diamètre inférieur à  $10\ \mu\text{m}$  persistent quant à elles peu de temps dans l'air et disparaissent souvent de manière quasi immédiate (Cole, NIOSH). Les bio-aérosols représentant un réel intérêt, dans le cadre de ce mémoire, ont donc une taille comprise entre  $10\ \mu\text{m}$  et  $100\ \mu\text{m}$  lors de leur formation (figure 1).



**Figure 1: Échelle de taille des particules présentant un intérêt**

- La densité de la particule : Outre leur taille, les particules liquides contiennent de plus ou moins grandes quantités d'agents biologiques, de poids et de taille différentes. Plus la densité de la particule est grande, plus sa vitesse de dispersion est ralentie
- La vitesse de projection des particules : Celle-ci est dépendante de la source d'émission. Dans le sens du vent, les particules projetées avec une vitesse importante ont plus de chance d'être dispersées sur une longue distance.
- La vitesse du vent et la formation de turbulence : L'apparition de turbulences est liée en partie avec la rugosité de surface. Celle-ci favorise la dispersion, mais entraîne plusieurs modifications dans la trajectoire des particules (figure 2). En l'absence de turbulences, la distance parcourue par les particules tend à augmenter avec la vitesse du vent (Cole, NIOSH).



**Figure 2 : Schéma conceptuel de la dispersion des bio-aérosols en fonction de leur taille et des phénomènes de turbulence**

- L'humidité et la température : Ces paramètres interviennent aussi bien au niveau du dessèchement des microgouttelettes aéroportées, que dans les phénomènes de remise en suspension. Par exemple, des températures élevées avec de faible taux humidité, peuvent être à l'origine de la fragmentation d'aérosols de taille supérieure à 100 µm. Certaines études ont ainsi démontré qu'un taux d'humidité élevé favorisait à la fois, la survie des germes contenus dans les bio-aérosols et leur dispersion (Goff G., Spendlove J., Adams A., *et al.*, 1973).
- La stabilité de l'atmosphère : La stabilité est définie par le gradient vertical des températures, la présence ou non de nuage, de vent ou de pluie. Les variations de saisons peuvent donc avoir un impact sur les émissions des bio-aérosols. **En l'absence de données concluantes, seules les concentrations mesurées au printemps sont prises en compte.**
- Le phénomène de conversion du gaz en poussière : Il s'agit d'un phénomène encore mal connu, entraînant la transformation des bio-aérosols en poussières capables d'atteindre des distances plus importantes.
- La topologie du terrain et la configuration du système émetteur : La présence de barrières physiques ou végétales limite la dispersion des aérosols et peut créer des turbulences.

Au regard de l'ensemble de ces paramètres il paraît difficile d'établir un schéma de comportement type pour les bio-aérosols.

## Partie 2 : Caractérisation de l'exposition

### 1. Population exposée :

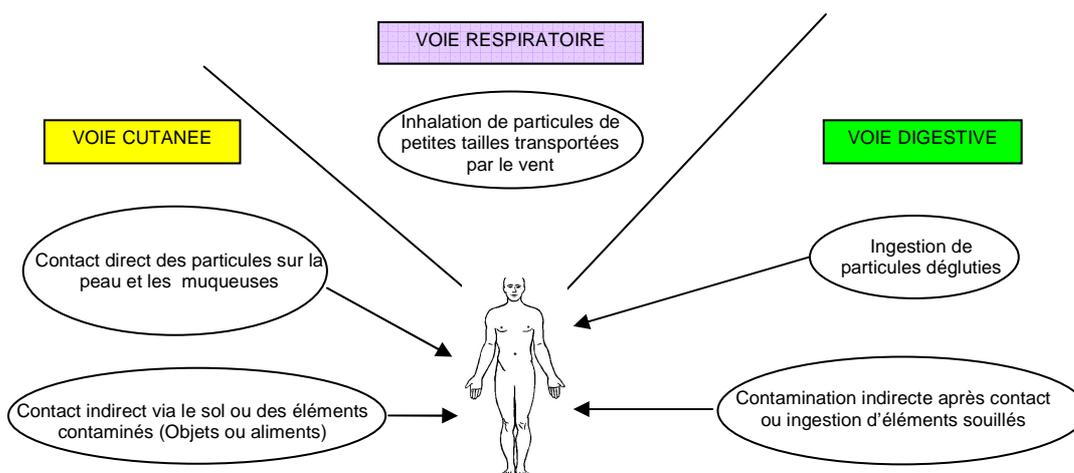
Généralement, les STEP sont construites dans des zones isolées, se retrouvant par la suite en proximité d'habitation lors de l'extension des zones urbaines. Actuellement, les Plans Locaux d'Urbanismes (PLU) sont établis de sorte qu'aucun hôpital ou établissement recevant du public ne se trouve à proximité direct des STEP.

Les populations prises en considération, sont des riverains vivant dans des logements individuels ou collectifs autour des STEP. Les logements peuvent être aussi bien localisés dans des zones résidentielles de type lotissement, que dans des zones rurales moins peuplées. Parmi ces habitants, certains peuvent être considérés comme sensibles. Il s'agit principalement d'enfants, de personnes âgées (plus de 65 ans) et de personnes atteintes de maladies affectant leur système immunitaire de manière directe ou indirecte.

Enfin, il est important de souligner le cas particulier des aires d'accueil des gens du voyage. En effet, il s'agit d'espaces fréquemment localisés à proximité de STEP, parfois sans respect de distance minimale d'éloignement préconisée par l'article 17 de l'arrêté du 21 juin 1996.

### 2. Voies d'exposition :

Les populations vivant à proximité des STEP peuvent être exposées aux bio-aérosols par contact direct, ou de manière indirecte via le contact avec un élément contaminé. Ainsi, 3 voies d'expositions se distinguent (figure 3).



**Figure 3: Schéma conceptuel des diverses voies d'exposition des riverains de STEP aux bio-aérosols**

L'inhalation : Il s'agit de la principale voie de contamination pour les bio-aérosols.

Le contact cutané : Malgré la possibilité de dépôt des particules sur la peau ou les muqueuses, les risques de contamination par voie cutanéomuqueuse paraissent peu probables. En effet, sauf exception du genre *Leptospire*, une peau non lésée ne permet pas le passage transcutané des germes (Altmeyer N., Abadia G., Schmitt S., 1990). De plus, il est peu probable qu'une microgouttelette contenant des germes puisse entrer en contact avec une plaie de grande taille, qui plus est, laissée à l'air libre. Enfin, l'apparition d'affections cutanées liées au contact avec un sol ou un objet souillé n'est pas un phénomène référencé dans la littérature. Les risques liés à cette voie de contamination ne sont donc pas étudiés dans le cadre de ce mémoire.

L'ingestion : Elle est envisagée via plusieurs aspects. Tout d'abord l'ingestion de bio-aérosols après inhalation et déglutition. Dans ce cas précis, aucune étude ne permet de connaître la proportion de germes déglutis par rapport à celle éliminée par les mouchages et les expectorations. Une contamination par ingestion d'eau ou de végétaux non lavés, souillés via l'air ou le sol, est également envisageable mais dépend fortement des concentrations en germes émis et de leur capacité de survie dans l'environnement. Enfin, la contamination des enfants avec comportement PICA est possible par l'ingestion de terre souillée. Ce comportement reste cependant marginal. Outre les risques de déglutition des agents biologiques après inhalation, l'exposition par voie digestive ne sera pas développée au cours de ce mémoire.

### 3. Niveaux d'exposition :

#### 3.1 Évaluation des niveaux d'exposition :

##### 3.1.1 *Les méthodes de mesure*

En Europe, il n'existe pas de norme clairement établie en rapport à la mesure des bio-aérosols dans les milieux extérieurs ; seule existe une norme européenne pour la mesure des micro-organismes dans l'atmosphère des lieux de travail (norme AFNOR EN 13098-2000). Ainsi, dans la pratique, il est possible d'utiliser 3 appareillages pour les mesures microbiologiques de l'air, leur utilisation dépend des agents recherchés et de la précision de la recherche (Jensen P., Schafer M., 1998 ; INERIS, 2004 ; IRSST, 2005. IRRST 2007) :

- Les préleveurs à impaction qui contiennent différentes plaques ou « étages » permettant de séparer les particules en fonction de leur taille. Il est donc possible de déterminer les proportions en particules inhalables ou non.

- Les préleveurs à filtre qui permettent de recueillir sur un milieu de culture un échantillon représentatif de l'aérosol en suspension.
- Les préleveurs à piégeage liquide : l'air est aspiré et les agents biologiques collectés dans un milieu de culture liquide.

L'utilisation de la métrologie suppose au préalable d'établir une stratégie d'échantillonnage adaptée aux milieux d'exposition et à ce que l'on souhaite mettre en évidence à partir de pré-études qui permettront de définir les caractéristiques de la variabilité spatio-temporelle (Bonnard, 2001). À partir de l'étude de différentes données bibliographiques il est possible de relever plusieurs préconisations quant aux démarches d'échantillonnages :

- Afin d'obtenir de résultats représentatifs des émissions en bio-aérosols pour chaque procédé ciblé, il est conseillé d'effectuer des mesures comparatives au niveau du procédé (moins de 1 mètre) et en amont du site. Selon les observations de Lavoie (1997) et de Shlosser O. et Loret J-F (2005), les mesures de références doivent être réalisées au moins 300 mètres en amont, dans le sens contraire des vents provenant de la STEP. Enfin, des mesures sur plusieurs distances doivent être réalisées afin d'évaluer la superficie de la zone impactée par ces émissions.
- Les indicateurs biologiques mesurés peuvent être globaux, afin d'évaluer les niveaux de contamination perçus par les habitants (bactéries à Gram négatif ou positif, moisissures et endotoxines), ou plus spécifiques d'espèces pathogènes ou indicatrices de contamination fécale. La présence d'activités industrielles émettrices de bio-aérosols doit donc être vérifiée par avance.

En fonction de la nature et de la concentration des agents collectés, les méthodes d'identification et de quantification qui suivent diffèrent. Par exemple, il est possible d'utiliser des techniques de culture classique, de biologie moléculaire ou encore d'immunologie pour les germes et les formes de résistance. Pour les endotoxines, il existe une méthode de dosage référencée, dénommée : « Lysat d'amœbocyte de la limule » (LAL) (Thorn J., Beijer L., Jonsson T., *et al.*, 2002). Pour les mycotoxines, aucune méthode d'analyse n'est référencée et il n'existe aucune corrélation avec la concentration en moisissures dans l'air.

Il faut noter que certains micro-organismes tels que les virus ne sont généralement pas recherchés en routine de part leur difficulté d'échantillonnage et des coûts des moyens techniques devant être employés. De plus, bon nombre de germes contenus dans les bio-aérosols des STEP n'ont pas encore été identifiés.

Enfin, il est important de souligner que ces méthodes demeurent stressantes pour les germes et qu'il peut survenir une mort des cellules avant leur dénombrement. De même, il existe des incertitudes et des variabilités propres à toutes techniques de mesures. Ces deux éléments conduisant généralement à une sous estimation du nombre de germe dans l'environnement.

En conclusion : Les résultats des mesures environnementales sont très variables selon les méthodes d'échantillonnages, les conditions environnementales et topographiques ou encore des méthodes de détection utilisées. Les interprétations faites doivent donc tenir compte de tous ces éléments d'incertitudes. De plus, certains germes ne sont pas mesurés en routine. Par conséquent dans la majorité des cas, la métrologie peut apporter des indications générales sur les niveaux de bio-contaminations de l'air, mais ces mesures ne peuvent en aucun cas être adaptables à toutes les STEP.

### *3.1.2 La modélisation:*

Pour estimer la dispersion aérienne des agents biologiques, certains auteurs utilisent des modèles gaussiens ou bi-gaussiens. Ces derniers sont souvent ajustés sur des conditions météorologiques définies et prennent en compte, pour les particules viables, des paramètres liés à la survie et au dépôt microbien. Selon ces mêmes auteurs, ces types de modèle sont valables pour l'estimation de concentration à plus de 100 mètres de la source (Bonnard R., 2001). Pour autant, des incertitudes demeurent concernant la détermination du volume et des vitesses d'émission, où de la prise en compte de facteurs biologiques liés au comportement des agents dans l'air. Le plus souvent, ces modèles sont réalisés dans le cadre de la dispersion de bio-aérosols humides provenant d'une source diffuse et non surfacique comme c'est le cas dans les STEP.

En 1982, le CEMAGREF a établi un modèle de calcul de dispersion permettant d'évaluer les niveaux d'exposition aux bio-aérosols sur différentes distances (Leftah N., 1999) (annexe 10). Ce modèle pourrait représenter un outil efficace dans l'évaluation des expositions lors de la réalisation d'études d'impact. Cependant la nécessité de radio-marquer l'organisme cible pour établir la constante de mortalité bactérienne demeure un inconvénient majeur de cette méthode.

Dans le cadre de ce mémoire, des essais de modélisation ont été réalisés via le logiciel ADMS 4 afin d'évaluer les niveaux d'exposition de riverains sur différentes distances.

Il s'agit d'un modèle mathématique gaussien, qui permet de simuler des rejets atmosphériques (sous forme de gaz ou de particules) à l'échelle locale, à partir d'une source unique ou multiple. Selon les distributeurs du logiciel (Numtech), en conditions

dites « idéales », le modèle permet d'obtenir des résultats pertinents jusqu'à des distances de l'ordre de 100 km.

L'étude réalisée repose sur l'hypothèse que la seule source d'émission à considérer est les bassins de boues activées. Parmi les paramètres devant être renseignés se trouvent :

- le taux d'émissions de bactéries provenant des bassins de boues activées : Le taux choisi provient des études de modélisation réalisée par Kenline et Scarpino pour les bactéries totales (Kenline P., Scarpino P., 1972).
- Le débit des émissions des bio-aérosols : En l'absence de mesures et d'informations disponibles dans la littérature les débits testés sont ceux des moteurs des aérateurs par brosses contenus dans les bassins de boues activés.
- La surface des bassins : Plusieurs tailles de surface correspondantes à celles couramment utilisées dans les STEP de 10.000 EH ont été appliquées.
- Les conditions météorologiques, la typologie du terrain et sa rugosité : Ces paramètres ont été empruntés à une précédente étude réalisée pour une déchetterie. Le terrain considéré est plat et les données météorologiques analysées sur 3 ans.
- Les sites dont les concentrations en bio-contaminants ont été mesurées se situent à 15, 50, 100 et 150 mètres de la source de pollution.

Il n'est pas été possible d'indiquer les concentrations des germes indicateurs dans les effluents ou même au niveau de la source d'émission.

La fiche détaillée des paramètres choisis est présentée en annexe 11.

Les résultats obtenus ont été comparés avec les données collectées via des publications scientifiques. Aucun des scénarios proposés n'a permis de retrouver des résultats concordants. Ceci s'explique par le fait que les hypothèses testées pour le débit ou le volume des émissions en bio-aérosols depuis les bassins de la STEP soient éloignées de la réalité ou totalement erronés.

En conclusion : la modélisation pourrait être un outil efficace d'évaluation des niveaux d'exposition de part la rapidité et la simplicité d'emploi, mais cette dernière doit impérativement être appuyée par des données météorologiques permettant de renseigner certains paramètres de calcul du logiciel. En l'absence de ces données, les résultats obtenus deviennent aberrants par rapport aux données retrouvées dans la littérature.

Néanmoins, chaque étude d'impact ou la modélisation est entreprise doit faire l'objet d'une étude métrologique spécifique, puisque les mesures environnementales ne peuvent être applicables à tous les sites étudiés. Au vu du nombre de dossier d'impact réalisé, cette contrainte devient extrêmement pénalisante dans le choix de cette méthode. Cependant, une fois les premières mesures établies, la modélisation souffre de manière moindre d'incertitudes que les méthodes de mesures et d'identification classique des agents biologiques. De plus, les niveaux d'expositions peuvent être déterminés sur plusieurs distances, notamment chez les riverains, ce à quoi, il est difficile d'accès lorsque des habitations sont déjà en place.

### 3.2 Les données d'exposition connues :

Les niveaux de contamination à proximité des STEP étant fonction de paramètres aussi bien technologiques, qu'environnementaux, il est certain que les études menées, citées dans le paragraphe 2.2 de la partie 1, pourraient présenter des résultats variés, et ce, d'autant plus que les méthodes de mesures utilisées diffèrent. Pour autant, l'ensemble des données collectées tendent à montrer des résultats cohérents. Dans le cas présent, ces données s'intéressent aux mesures de concentrations des indicateurs biologiques précédemment sélectionnés, pour lesquelles il existe des informations à la fois en amont des STEP et sur différentes distances autour des bassins de boues activées. En effet, les mesures effectuées n'ont été réalisées qu'à partir d'un point fixe (ici, les bassins de boues) et non autour de la STEP dans sa globalité. Contrairement aux autres étapes de traitement, pour les boues activées utilisant des brosses, il existe des mesures de concentrations pour l'ensemble des indicateurs biologiques sélectionnés dans la partie 1, à l'exception du genre *Pseudomonas*.

En l'absence de données concédées par les auteurs concernant la durée et le volume des mesures, les résultats obtenus sont considérés comme des valeurs moyennes d'exposition de jour ou de nuit.

Les concentrations médianes mesurées en journée autour des bassins de boues activées pour différents auteurs, les différents indicateurs biologiques précédemment sélectionnés, sur différentes distances sont rassemblées dans le tableau 17. Les concentrations en micro-organismes sont exprimées en UFC/m<sup>3</sup> et celles en endotoxine en ng/m<sup>3</sup>. Ces valeurs sont ensuite comparées aux concentrations résiduelles mesurées pendant la nuit par Fannin en 1985 (tableau 18).

**Tableau 17 : Concentrations en agents biologiques contenues dans les bio-aérosols**

Auteurs	Agents biologiques	Localisation du point de mesure en mètres							
		Mesures de références	0	15-25	30-50	50-80	100	150-250	≥250
Majeti <i>et al</i> 1980; Fannin <i>et al</i> 1985; Lavoie 1997; Goyer <i>et al</i> 1998;; Prazmo <i>et al</i> 2003 ; Schlosser <i>et al</i> 2005; Lee 2006	Bactéries à Gram-	15	10000	NR	NR	NR	63	37	0
	Coliformes totaux	0,22	833	12,4	12,2	6,9	6,81	0,86	0,4
	Coliformes fécaux	0,105	217,5	0,7	NR	NR	NR	0,18	0,29
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	NR	43	0,4	0,4	NR	NR	NR	NR
	Streptocoques fécaux	0,05	44	NR	4,2	NR	0,29	0,15	0,48
	<i>Geotrichum</i>	181,5	561	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Endotoxines	0,55	44,6	NR	NR	NR	NR	NR	0,85

NR : concentrations non retrouvées dans la littérature

**Tableau 18 : Concentrations en germes sur différentes distances mesurées le jour et la nuit**

Auteurs	Germes	Localisation du point de mesure en mètres							
		Mesures de références		100		150-250		≥ 250	
		jour	Nuit	jour	nuit	jour	Nuit	jour	Nuit
Majeti <i>et al</i> 1980; Fannin <i>et al</i> 1985; Lavoie 1997; Goyer <i>et al</i> 1998; Bauer <i>et al</i> 2002; Schlosser <i>et al</i> 2005	Bactéries à Gram-	15	297	63	1028	37	113	0	0
	Coliformes totaux	0,22	0,09	6,81	5,17	6,81	0,57	0,4	0,34
	Coliformes fécaux	0,105	0,01	NR	2,09	0,18	0,64	0,29	0,15
	Streptocoques fécaux	0,05	0,83	0,29	2,07	0,15	1,21	0,48	0,86

NR : concentrations non retrouvées dans la littérature

Les données rassemblées dans les tableaux 17 et 18 révèlent une augmentation significative des taux de contamination biologique dans l'air environnant des TEP lors du fonctionnement des bassins de boues activées, en comparaison avec les mesures effectuées en amont de la STEP.

À l'exception des coliformes totaux, l'accroissement en germe paraît plus important la nuit (Annexe 12). Cette exception proviendrait de la diversité des sources bibliographiques. L'augmentation des niveaux de contamination, s'expliquerait quant à elle, par l'accroissement du taux de survie des germes en l'absence de rayons solaire, d'une meilleure stabilité atmosphérique, ou encore de la concomitance de ces deux événements. Les paramètres météorologiques ont donc un impact important sur la survie des germes dans l'atmosphère et donc, sur les niveaux de contaminations à distance des STEP.

Malgré l'importance des apports en bio-contaminants, l'analyse des données résumées dans les tableaux 17 à 18 et visibles dans l'annexe 12, montre une diminution non linéaire, mais rapide des niveaux de contaminants dans l'air avec la distance de jour comme de nuit à l'exception des moisissures, dont les concentrations restent stables sur 100 mètres.

Selon les études de Kenline (Kenline P., Scarpino P.,1972), cette décroissance s'expliquerait par différents phénomènes que sont :

- la perte de viabilité des germes aéroportés (ou die-off), par dessiccation une fois que ces derniers ont quittés la brume d'humidité entourant les bassins,
- leur adsorption sur des surfaces interceptant le vent porteur,
- leur dilution dans l'air par diffusion,
- leur déposition sur différentes surfaces.

Ainsi, pour les bactéries à Gram négatif, il apparait un abattement de 99,37% au bout de 100 mètres d'envol. Cet abattement va jusqu'à atteindre les 99,63% entre 150 et 250 mètres. Il en va de même pour les autres germes d'origines fécales (coliformes et les streptocoques) et l'agent pathogène *Klebsiella pneumoniae*, ou un abattement minimum de 90% s'opère dès les 30 premiers mètres autour des bassins. Les concentrations mesurées pour les différents indicateurs vont alors diminuer jusqu'à atteindre des dénombrements qui sont inférieurs à 1 UFC/m<sup>3</sup>, et donc, très négligeable, ou qui sont proche du bruit de fond ambiant.

A contrario, les moisissures, représentées par le genre *Geotrichum*, présentent des niveaux de concentrations sensiblement identiques à 100 mètres des bassins. Sur la distance, les fractions en moisissure aérosolisées sont plus constantes que celles des bactéries. Une des explications possibles est l'importante résistance des spores et des mycéliums fongiques au phénomène de dessiccation, ainsi qu'au stress produit lors de l'échantillonnage.

Enfin, comme attendu, les concentrations mesurées entre les différents groupes de bactéries à Gram- concordent. En effet, les coliformes fécaux qui regroupent moins d'espèce que les coliformes totaux sont bien présents en concentrations inférieures, et il en est de même entre les coliformes totaux et les bactéries à Gram-.

### 3.3 Les données d'exposition extrapolées :

Dans le cadre d'un scénario maximisant les risques de contamination, il est fréquent de s'intéresser aux pointes de pollution auxquelles pourraient être exposée la population. Généralement, ces pics d'exposition sont liés à des conditions météorologiques favorables pour la dispersion des bio-aérosols dans l'air (faibles températures et absence de vent), ou à une augmentation de l'activité du site. Bien que leur fréquence soit méconnue, la présence de pics implique une notion de court terme. En l'absence d'information sur le

sujet, l'hypothèse émise consiste à utiliser les concentrations moyennes d'exposition sur une journée, auxquelles est ajouté un facteur de sécurité. Dans le cas présent, deux facteurs de sécurité de 1 log et 2 log ont été pris pour hypothèse (soit, respectivement un facteur 10 et un facteur 100). Ces facteurs ont été appliqués sur les émissions autour des bassins de boues activées de jour comme de nuit, pour les indicateurs choisis précédemment (tableau 19). En l'absence d'information concernant la durée, la fréquence et l'importance des pics, utiliser ces données comme scénario majorant paraît excessif.

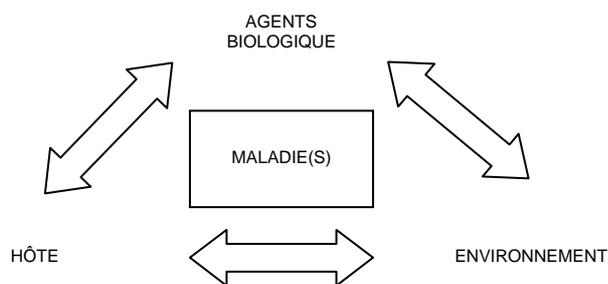
**Tableau 19 : Concentrations au cours de pics de pollution autour des bassins de boues activées**

Facteur de sécurité	Germes	Localisation du point de mesure en mètres									
		Mesures de références		0		100		150-250		≥ 250	
		jour	Nuit	Jour	jour	nuit	jour	Nuit	jour	nuit	
1 log	Bactéries à Gram-	15	297	10 <sup>5</sup>	6,3.10 <sup>2</sup>	1,3.10 <sup>4</sup>	3,7.10 <sup>2</sup>	1,1.10 <sup>3</sup>	0	0	
	Coliformes totaux	0,22	0,09	8,3.10 <sup>3</sup>	68,1	51,7	8,6	5,7	4	3,4	
	Coliformes fécaux	0,105	0,01	2,2.10 <sup>3</sup>	NR	20,9	1,8	6,4	2,9	1,5	
	Streptocoques fécaux	0,05	0,83	440	2,9	12,4	1,5	3,8	4,8	0,3	
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	NR	NR	430	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
	<i>Geotrichum</i>	181,5	NR	5,6.10 <sup>3</sup>	5,6.10 <sup>3</sup>	NR	NR	NR	NR	NR	
	Endotoxines	0,55	NR	446	NR	NR	NR	NR	8,5	NR	
2log	Bactéries à Gram-	15	297	10 <sup>6</sup>	6,3.10 <sup>3</sup>	1,3.10 <sup>5</sup>	3,7.10 <sup>3</sup>	1,1.10 <sup>4</sup>	0	0	
	Coliformes totaux	0,22	0,09	8,3.10 <sup>4</sup>	681	517	86	57	40	34	
	Coliformes fécaux	0,105	0,01	2,2.10 <sup>4</sup>	NR	NR	18	64	29	15	
	Streptocoques fécaux	0,05	0,83	4,4.10 <sup>3</sup>	29	124	15	38	48	3	
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	NR	NR	430	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
	<i>Geotrichum</i>	181,5	NR	5,6.10 <sup>4</sup>	5,6.10 <sup>4</sup>	NR	NR	NR	NR	NR	
	Endotoxines	0,55	NR	4,4.10 <sup>3</sup>	NR	NR	NR	NR	85	NR	

NR : concentrations non retrouvées dans la littérature

#### 4. Durée d'exposition :

Les émissions de bio-aérosols étant continues sur 24 heures, l'exposition des riverains est considérée comme chronique. Cependant, il faut nuancer la fréquence d'exposition par leur budget espace temps. En effet, pour qu'une contamination soit possible, il faut que l'hôte soit en contact avec les agents biologiques et que cette rencontre se produise dans un environnement favorisant à la fois le contact et la conservation du caractère dangereux de l'agent (figure 4).



**Figure 4: Schéma de contamination**

Les riverains sont donc principalement exposés lorsqu'ils sont chez eux, dans des conditions météorologiques les plaçant sous les vents de la STEP, dans leur jardin par exemple, ou lorsque les portes et fenêtres des habitations sont ouvertes et donnent sur la station. Les concentrations des bio-contaminants provenant de la STEP peuvent être plus ou moins importantes dans l'air intérieur après aération des habitats, avec des variations dans le temps selon la durée de survie des germes. La durée d'exposition est quant à elle fonction de la saison, de la région et du comportement des riverains. Ainsi, au printemps ou en été, les habitants pratiquant diverses activités en extérieur ou non abritées à proximité de la STEP et laissant leurs portes et fenêtres ouvertes jour et nuit, maximisent le risque d'être en contact avec les bio-aérosols.

Scénario d'exposition :

Dans le cadre d'un scénario majorant, on considérera une exposition chronique des riverains, sous le vent de la STEP, de jour comme de nuit, vis-à-vis des différents indicateurs biologiques sélectionnés dans l'encadré : « sélection des indicateurs biologiques ».

La voie d'exposition retenue est **l'inhalation**. Les risques de contamination par voie cutanée ou digestive ne seront pas explorés à l'exception de **l'ingestion par déglutition**.

Sachant que la majorité des résultats est obtenue à partir d'une source d'émission fixe et non aux alentours de la STEP dans sa globalité, le scénario majorant considéré est basé sur l'hypothèse que la principale source de contamination retenue, les bassins de traitement par boues activées, se trouve en limite de STEP, au plus proche des zones d'habitables.

Afin d'évaluer les niveaux de contamination en condition majorante, l'effet d'abattement des germes pouvant être provoqué par différentes barrières physiques tels que des murs végétalisés ou les maisons, ne sont pas pris en considération dans le scénario présent.

## **Partie 3 : Évaluation du risque sanitaire potentiel**

Pour les contaminations d'origine microbienne, il existe un manque de données sur les doses minimales infectieuses permettant le calcul d'indicateurs de risque (exemple des quotients de danger). Cependant, il est possible d'évaluer si les expositions rencontrées, via la principale source de contamination (boues activées avec brosse), sont significatives d'un point de vue sanitaire grâce à une **analyse quantitative et qualitative**. La comparaison des études épidémiologiques entre les expositions provenant des STEP et d'autres activités industrielles est également évoquée.

Les contaminations liées à l'inhalation d'endotoxines pourront quant à elles faire l'objet d'une évaluation quantitative des risques sanitaires via **le calcul d'un quotient de danger**.

### **1. Évaluation des risques liés aux contaminations d'origine microbienne**

#### 1.1 Analyse des données qualitatives et quantitatives provenant de la littérature

##### *1.1.1 Analyse des niveaux de contamination lors d'une exposition de jour :*

Au regard des mesures effectuées de jour (tableau 17, partie 2, paragraphe 3.2), plusieurs constatations peuvent être faites :

- Pour les bactéries à Gram-, leur concentration dans l'environnement à proximité des STEP atteint celle de son bruit de fond (mesure de référence) à partir d'une distance supérieure ou égale à 250 mètres,
- Les concentrations résiduelles des coliformes et des streptocoques fécaux demeurent quant à elles supérieures au bruit de fond pour des distances dépassant les 250 mètres autour de la source d'émission.
- Pour la moisissure *Geotrichum*, la concentration à 100 mètres demeure supérieure à celle de sa mesure de référence.

Malgré le fait que les concentrations soient supérieures au bruit de fond, certaines ne dépassent pas les 1 UFC/m<sup>3</sup> pour chaque indicateur. Pour un scénario majorant dans lequel les riverains inhaleraient effectivement chaque type de germe émit, les risques de développer des pathologies paraissent négligeables à de tels niveaux d'exposition, au regard des concentrations ubiquitaires dans l'air.

En considérant que des concentrations inférieures au bruit de fond ou proche de zéro ne peuvent pas être responsables de l'émergence de pathologies chez des sujets sains ou fragilisés, il est possible d'évaluer sur différentes distances s'il existe un risque microbiologique.

- **Au niveau de la source d'émission :**

Il apparaît clairement que les concentrations mesurées pour les différents indicateurs dépassent largement les mesures de référence. **Un risque de contamination paraît fortement plausible.**

Les mesures étant réalisées au niveau des bassins de traitement, ces expositions touchent majoritairement les travailleurs de STEP. Il est donc possible d'évaluer les effets de cette contamination via les études épidémiologiques réalisées pour cette population. Il s'agit d'études transversales opérées via des questionnaires ou des études comparatives de type exposé-non exposé. La plupart des études mettent en avant une augmentation de la prévalence de symptômes gastro-intestinaux et d'atteintes du système nerveux et respiratoire lorsque de forte concentration en agents biologiques sont mesurés dans l'air. Les pathologies respiratoires ainsi recensées peuvent être bénignes et ne pas affecter la vie quotidienne ou liées à des maladies chroniques sévères nécessitant des soins spéciaux. Il existe cependant des interrogations quant au mode de contamination des travailleurs, à savoir s'il s'agit bien d'aérosols ou de contact direct avec les eaux usées.

- **Entre 15 et 25 mètres :**

Les risques de contamination par les coliformes fécaux disparaissent.

- **À 100 mètres de la source :**

Les concentrations des coliformes totaux sont largement supérieures aux mesures de références. Sachant que la plupart des espèces qui composent ce groupe font partie de la flore commensale de l'être humain, le risque sanitaire directement relié à leur présence paraît faible et ce, d'autant plus que la voie de contamination considérée pour les bio-aérosols est l'inhalation et non l'ingestion. Cependant, une vigilance doit être de mise pour l'espèce *Klebsiella pneumoniae* qui est un pathogène strict par voie respiratoire et l'espèce *Enterobacter aerogenes* qui est responsable de pathologies respiratoires chez les personnes immunodéprimées. **La détermination des doses minimales infectieuses permettrait de connaître s'il existe un risque infectieux à ces niveaux d'exposition.**

Pour les bactéries à Gram-, bien que leur concentration soit supérieure à celle des mesures de référence, selon les recommandations de l'ACGIH, d'un point de vue sanitaire les concentrations mesurées ne représentent pas un environnement malsain pour les personnes fragilisées. En effet, les concentrations en bactéries à Gram-mesurées doivent être supérieures à 100 UFC/m<sup>3</sup> pour que l'environnement soit considéré comme malsain, or, à partir de 100 mètres, les concentrations de ce germe sont inférieures à cette valeur guide. **Ainsi, nous considérons qu'à partir de 100**

**mètres de la source de pollution, les contaminations en bactéries à Gram- ne représentent pas d'impact pour la santé des riverains quelque soit l'état de leur système immunitaire.**

Pour le genre *Geotrichum*, les concentrations mesurées dans l'air sont 3 fois supérieures au bruit de fond (tableau 17). Selon l'IRSST, chez les travailleurs de tel taux de contamination conduisent à la mise en place de mesures correctives. Par conséquent, des mesures de protection doivent également être mises en place pour les riverains.

Enfin, les risques de contamination par les streptocoques fécaux et donc pour les germes résistants à la dessiccation disparaissent également à cette distance.

- **Entre 150 et 250 mètres :**

Les risques de contamination par les coliformes fécaux disparaissent.

**L'ensemble des indicateurs présentent des concentrations proches de zéro. Les risques de contaminations microbiologiques deviennent négligeables vis-à-vis des indicateurs sélectionnés. À ces distances, l'impact des bio-aérosols sur la santé des riverains semble dérisoire.**

- **Pour des distances supérieures à 250 mètres :**

**Les mesures de concentrations en bio-contaminants confirment l'abattement significatif du taux de contamination de l'air entre 150 et 250 mètres.**

**Conclusion concernant les risques de contamination de jour:**

Dans le cas présent, bien que l'on considère que la source de contamination se situe au plus près des habitations, il paraît logique que les expositions situées au niveau des bassins de boues activées ne concernent que les travailleurs.

À défaut de données concernant les doses minimales infectieuses, et au vu des recommandations faites vis-à-vis des contaminations en moisissures, des interrogations demeurent sur les risques de manifestation infectieuse parmi la population pour des distances inférieures à 100 mètres des bassins de traitement.

D'après les résultats obtenus, il paraît raisonnable de conclure à l'absence de risque probant pour les populations sur des distances variant entre 150 à 250 mètres autour des bassins de traitement par boues activées avec aération par brosses.

### 1.1.2 Exposition au bio-contaminants de l'air de nuit :

Les niveaux d'expositions de nuit étant supérieurs à ceux observés de jour (tableau 18), les distances impactées par la bio-contamination peuvent différer :

- **Jusqu'à 100 mètres de la source d'émissions :**

L'ensemble des germes présentent une concentration supérieure à leur bruit de fond et au seuil de zéro. **La question des risques de contamination des riverains doit se poser pour cette distance.**

- **Entre 150 et 250 mètres :**

Les concentrations en coliformes deviennent négligeables. En comparaison aux mesures observées de jour, de nuit, ces germes sont dispersés de 50 à 150 mètres plus loin.

Les concentrations en streptocoques fécaux sont très proches du seuil de 1 UFC/m<sup>3</sup>, ce qui semble dérisoire. Les streptocoques fécaux étant le reflet des germes résistants à la dessiccation, on peut supposer que ces germes persisteront dans l'environnement jusqu'à 150-250 mètres de la source. Il est à noter que cette distance est supérieure de 50 à 150 mètres à celle mesurée de jour.

**Pour les bactéries à Gram-, leurs concentrations sont significatives d'un environnement malsain jusqu'à 250 mètres de la source de pollution.** Il n'existerait donc vraisemblablement aucun risque d'apparition de maladie pour les personnes en bonne santé. A contrario, pour les personnes fragilisées, un environnement malsain peut être à l'origine du déclenchement de maladies, mais celles-ci n'apparaissent pas de façon non systématique.

- **À partir de 250 mètres :**

L'ensemble des indicateurs présentent une concentration proche de zéro. **Leur impact sur la santé des riverains devient alors négligeable.**

### Conclusion concernant les risques de contamination de nuit :

Les mesures nocturnes démontrent bien une augmentation de la distance impactée par les agents microbiologiques par rapport à celles réalisées de jour. Ainsi, une évaluation des impacts sanitaires uniquement réalisée sur des mesures de jour, tendrait à sous estimer les risques encourus. Cette constatation doit cependant être corroborée par le budget espace temps des riverains, à savoir si ces derniers ont des habitudes de vie qui les exposent aux bio-aérosols pendant la nuit (fenêtres ouvertes pendant la nuit durant l'été par exemple).

La prise en compte des risques de contamination pour une exposition de nuit démontre l'absence de danger potentiel à partir d'une distance supérieure à 250 mètres autour de la principale source d'émission de bio-aérosols.

#### *1.1.3 .Analyse des niveaux de contamination de l'air à partir des valeurs extrapolées pour les pics de contaminations :*

Après application des facteurs de sécurité de 1 log et 2 log, aucune concentration en germes n'équivaut à zéro ou demeure inférieure à sa mesure de référence.

Ainsi, pour les bactéries à Gram-, leurs concentrations dans l'environnement sont significatives d'un environnement malsain jusqu'à des distances de 250 mètres autour des bassins de boues activées et ce, pour les deux facteurs de sécurité. De même, pour les autres indicateurs microbiens, des concentrations en germes largement supérieures à 1 ou au bruit de fond s'étalent sur des distances supérieures à 250 mètres.

Dans le cas des pics de pollution, il serait pertinent de déterminer si les concentrations rencontrées sont suffisantes pour provoquer la survenue de pathologies, tout en considérant l'état immunitaire de l'hôte et le degré de dégradation subi par les germes pendant leur trajet. Cette dégradation peut en effet modifier l'effet pathogène attendu. Dans le cas présent, il serait donc intéressant de déterminer la fréquence et les conditions de survenue de ces pics de pollution. L'approche utilisée pourrait être basée sur des **mesures répétées** en un même point, ce qui permettrait d'évaluer leur fréquence et leur importance et de les mettre en relation avec les conditions météorologiques ou l'activité du site.

## 1.2 Comparaison entre les niveaux d'expositions liées aux STEP et celles provenant d'autres activités industrielles

La comparaison des mesures effectuées de jour pour différentes activités émettrices de bio-aérosols de nature comparable est donnée dans le tableau 20.

**Tableau 20 : Concentrations moyennes en UFC/m<sup>3</sup> pour différents bio-aérosols au niveau des principales sources de bio-contamination sur différents sites industriels**

Milieux	Bactéries totales	Bactéries Gram-	Actinomycètes thermophiles	Moisissures
Extérieur	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>3</sup>
Centre de compostage	10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>
Centre d'épuration des eaux usées	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>3</sup>
Porcherie	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3-4</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>4</sup>
Tri de déchets domestiques	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>4</sup>

D'après les études épidémiologiques effectuées chez les riverains de centre de tri, il n'y aurait pas d'impact sanitaire sur les riverains proches (Delery L., 2003). Les rares études réalisées chez les riverains de porcherie présentent quant à elles des résultats mitigés. En effet, ces dernières indiquent la présence de fortes concentrations de germes pathogènes d'origines fécales dans l'air, mais très peu parviennent à mettre en évidence la survenue de manifestations infectieuses chez les riverains proches.

Pour les activités émettant des concentrations supérieures en bio-aérosols, et notamment dans les centres de compostage de déchets. Les données concernant les riverains y sont également peu nombreuses ; pour autant les rares études existantes indiquent des niveaux de contamination équivalents à ceux du bruit de fond à 200 mètres autour du site. Néanmoins, ces mêmes études montrent des effets sanitaires chez des personnes hypersensibles à ces mêmes distances, voir au delà. (Delery L., 2003 ; Réseau de coopération de Recherche sur les déchets, 2003)

Enfin dans le cas des stations d'épuration, la majorité des études montrent l'absence de corrélation entre les indices d'exposition et la fréquence des maladies constatées parmi la population (Devaux I., 1999). On soulignera également l'étude de Camann en 1980,(évoquée dans la thèse d'Isabelle Devaux) réalisée auprès d'élèves dont l'école est située en limite de STEP et qui n'a pas mis en évidence d'effets indésirables dus aux aérosols de STEP. Il s'agit d'une étude avant-après exposition qui utilise comme indicateur l'absentéisme des élèves. Par conséquent, si l'on considère en sus les études faites dans les usines de compostage des déchets, sachant que les concentrations en bio-aérosols mesurées dans les STEP sont moindres, peu d'effets sanitaires seraient à craindre chez les riverains de STEP. Cependant, il ne faut pas oublier que des pathologies liées aux bio-aérosols sont effectivement référencées chez les travailleurs au niveau du site et que, de plus selon les études de Fannin *et al* (1980) il existe une augmentation de l'incidence des pathologies respiratoires et gastro-entériques lorsque les habitations se rapprochent de la STEP entre 2400 et 600 mètres. Ces variabilités entre les résultats des études épidémiologiques appellent donc à la prudence quant aux conclusions hâtives sur l'inutilité d'une distance d'éloignement.

### Discussion sur les risques de contamination d'origine microbienne :

Les mesures environnementales démontrent la présence de différents germes avec des concentrations pouvant être importante pour certains indicateurs bactériens autour des bassins de traitement par boues activées. La présence significative de certains indicateurs tels que les bactéries à Gram- apparaît sur une distance maximale de 250 mètres le jour et de plus de 250 mètres de nuit.

Outre ces distances, d'autres éléments doivent être pris en considération lors de l'estimation du risque, notamment :

- Il n'existe pas de liens confirmés entre un nombre de germe aéroporté et l'apparition d'un effet critique. Ainsi, une augmentation de la concentration en micro-organismes dans l'air par rapport au bruit de fond, ne signifie pas pour autant qu'il y ait une augmentation du risque pour la santé des personnes vivant dans une zone donnée.
- Les concentrations mesurées pour certains germes sont très faibles (entre 0 et 10 UCF/m<sup>3</sup> au maximum). De plus, l'ensemble des germes inhalés n'atteignent pas systématiquement les poumons, une partie étant arrêtée au niveau du rhinopharynx.
- Les premières habitations représentent une barrière physique importante, responsable d'abattelements extrêmement conséquents de la bio-contamination en fonction des modes de dispersion des bio-aérosols autour des résidences. **Les distances impactées pourraient donc être réduites.**
- L'absence de plaintes des riverains concernant des nuisances autres que celles liées aux bruits et aux odeurs (communications téléphoniques avec Mr Marc Faujour (ARS 35) et Mr Yannick Marché (DDTM de Rennes)).
- Un ensoleillement important peut accentuer l'abaissement des concentrations en germes, tout comme une atmosphère humide peut participer à prolonger la survie et la distance de dispersion des bio-aérosols. Ainsi la distance d'envol des bio-aérosols diffère suivant les conditions atmosphériques. **Les mesures analysées ayant eu lieu au printemps, il est possible que les émissions soient sous ou sur-estimées par rapport à d'autres saisons**
- Les mesures de bio-contaminants sont entachées par des fluctuations liées aux incertitudes des méthodes de mesures qui tendent à sous estimer les concentrations en germes de l'environnement. Il reste cependant impossible d'estimer l'importance des sous estimations ; de même, qu'il est difficile de connaître la fraction en germes pathogènes et d'apprécier l'état physiologique des germes, à savoir si ces derniers sont toujours capables de provoquer une infection.
- Il existe un manque flagrant d'information concernant les virus, dont certains sont pourtant pathogènes par inhalation et dont la survie dans l'air est très importante.

### Discussion sur les risques de contamination d'origine microbienne (suite) :

Concernant les risques de contamination par déglutition, les concentrations mesurées dès 15 mètres autour de la source d'émission sont insuffisantes pour être à l'origine d'infection digestive. En effet, même dans le cas improbable où l'ensemble des germes inhalé est dégluti, leur concentration reste inférieure au seuil de  $10^4$  UFC établi par l'OMS pour une infection par voie digestive.

Enfin, dans le cas particulier des pics de pollution, en l'absence d'informations exactes concernant leur fréquence et leur importance, il serait pertinent d'étudier ces phénomènes de manières plus précises. D'autant que les résultats obtenus à partir des hypothèses d'incrémenter les concentrations moyennes d'exposition de 1 à 2 log, montrent que, selon les recommandations de l'ACGIH, l'environnement serait malsain sur des distances supérieures à 250 mètres. Par conséquent il pourrait exister des problèmes sanitaires parmi les habitants les plus fragiles dans l'environnement proche des STEP.

**Globalement, il semble difficile de proposer avec précision une distance d'éloignement des habitations qui soit pertinente d'un point de vue sanitaire.**

## 2. Évaluation des risques liés à l'inhalation d'endotoxines

Pour les endotoxines, des VTR aiguës et chroniques ont été établies par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur. Celles-ci se basent sur des observations en population humaine, notamment chez les sujets asthmatiques pour qui, 20 µg d'endotoxines pures inhalées lors d'un test de provocation bronchique suffisent à provoquer un bronchospasme. Cette dose provocatrice correspond pour des sujets ventilant en moyenne 10 l/min pendant 8 heures à une VTR aiguë de 4,1 µg/m<sup>3</sup>. Cette même dose correspond à une VTR chronique de 92 ng/m<sup>3</sup> pour une exposition de 15 jours chez un individu ventilant en moyenne 10 l/min (Luc Mosqueron *et al* 2002)

À partir de ces VTR, il est possible de calculer un quotient de danger (QD) selon la formule :

$$QD = \frac{\text{Concentration du composé en ng / m}^3}{\text{VTR en ng / m}^3}$$

Lorsque le QD est inférieur à 1, cela exclut a priori la survenue de l'effet critique. Un QD supérieur à 1 n'exclut pas l'arrivée d'un effet critique, mais il ne l'a prédit pas de manière déterministe non plus.

Dans le cadre du scénario envisagé, l'exposition aux bio-aérosols est considérée comme chronique. La seule VTR chronique répertoriée pour les endotoxines est celle de l'OQAI.

$$VTR_{\text{chronique}} = 92 \text{ ng/m}^3$$

Les calculs de QD sont effectués au point d'émission (0 mètre) et à plus de 250 mètres de la source.

$$QD \text{ à proximité de la source d'émission} = \frac{44,6 \text{ ng / m}^3}{92 \text{ ng / m}^3} = 0,48$$

$$QD \text{ distance supérieure à 250m} = \frac{0,85 \text{ ng / m}^3}{92 \text{ ng / m}^3} = 9,2 \cdot 10^{-3}$$

Les OQ calculés sont tous les deux inférieurs à 1. Ainsi, en partant de l'hypothèse que les concentrations en endotoxines décroissent de manière continue à partir du point d'émission, il n'apparaît aucun risque pour la santé des riverains vis-à-vis des endotoxines.

Selon les études de Rylander, une concentration équivalente à 44,6 ng/m<sup>3</sup> peut néanmoins provoquer une augmentation de l'activité bronchique chez les personnes exposées. Toujours selon ce chercheur, aucun effet n'est répertorié pour des concentrations égales à 0,85 ng/m<sup>3</sup>.

Dans le cas présent, les concentrations mesurées à proximité des bassins de boues activées, sont insuffisantes pour provoquer un syndrome d'ODTS selon le seuil de concentration établi par l'ICOH (soit 200 ng/m<sup>3</sup>).

En cas de pic d'exposition, il est possible d'utiliser la VTR aiguë proposée par l'OQAI afin d'évaluer les risques encourus par les riverains.

$$VTR_{\text{aigue}} = 4100 \text{ ng/m}^3$$

A. Hypothèse d'exposition majorant les émissions moyennes de 1 log :

Tout comme pour les émissions moyennes, les calculs de QD sont effectués pour des expositions au niveau de la source d'émission (0 mètre) et à plus de 250 mètres de la source (sous le vent de la STEP).

$$QD \text{ à proximité de la source d'émission} = \frac{446 \text{ ng / m}^3}{4100 \text{ ng / m}^3} = 0,1$$

$$QD \text{ distance supérieure à } 250\text{m} = \frac{8,5 \text{ ng / m}^3}{4100 \text{ ng / m}^3} = 2.10^{-3}$$

L'ensemble des coefficients de dangers calculés sont inférieurs à 1. La survenue d'un effet critique est donc exclue pour les riverains lors de pic d'émissions équivalant à 1 log des niveaux d'expositions moyens.

B. Hypothèse d'exposition majorant les émissions moyennes de 2 log

$$QD \text{ à proximité de la source d'émission} = \frac{4460 \text{ ng / m}^3}{4100 \text{ ng / m}^3} = 1,08$$

$$QD \text{ distance supérieure à } 250\text{m} = \frac{85 \text{ ng / m}^3}{4100 \text{ ng / m}^3} = 2.10^{-2}$$

À proximité de la source d'émission, le quotient de danger apparaît légèrement supérieur à 1. Aussi, il est difficile d'affirmer qu'un effet critique puisse se produire.

#### Conclusion sur les risques liés aux endotoxines :

Lorsque la principale source d'émission étudiée sont les bassins de traitement par boues activées, il n'apparaît aucun risque de développer des pathologies liées à l'inhalation d'endotoxines. Sachant que la concentration en endotoxines est diluée dans l'air et qu'il n'apparaît aucun effet critique au point d'émission, quelque soit les distances d'habitations des riverains, il n'existerait pas de risque sanitaire. Cette constatation est aussi bien valable lors de mesures moyennes d'exposition que lors de pics de pollution.

Ces résultats semblent cohérents avec la réalité, puisque la principale origine des endotoxines dans les STEP est l'étape de traitement des boues. Au cours de cette étape intervient une dégradation des bactéries à Gram- et donc la libération d'endotoxine lors de la montée en température des boues. Or, cette montée en température est faible à nulle dans les bassins de traitement par boues activées. La faible proportion d'endotoxines proviendrait de la dégradation des germes dans les bassins ou lors du trajet aéroporté.

Actuellement, les étapes de traitement des boues sont réalisées de manière quasi-systématique dans des enceintes closes avec traitement de l'air vicié, par conséquent, les risques liés aux endotoxines semblent maîtrisés.

### Pour aller plus loin : Analyse des expositions provenant de l'ensemble du site

Sachant que l'ensemble des procédés de traitement des eaux usées sont à l'origine d'émissions de bio-aérosols, des questions peuvent se poser quant à l'accumulation des apports atmosphériques du point de vue quantitatif.

Pour tenter de répondre à cette question, l'hypothèse émise considère que les taux d'abattement mesurés dans l'air au niveau des bassins de boues activées sont identiques quelque soit le procédé impliqué. En effet, l'abattement des bio-contaminants dans l'air dépendrait moins du procédé d'émission que des conditions atmosphériques. Ces pourcentages sont appliqués aux concentrations moyennes mesurées au niveau des différentes étapes de traitement des effluents, pour le seul indicateur pour lequel il existe des données pour chaque procédé : les bactéries à Gram- (tableau 21). Soit, 99,37% à 100 mètres et 99,63% entre 150 et 250 mètres.

**Tableau 21: Concentration médiane en bactéries à Gram- sur plusieurs distances depuis plusieurs étapes de traitement des eaux usées**

Auteurs	Étape de traitement	Concentration médiane sur le site en UFC/m <sup>3</sup>			
		Amont du site	0	100	150-250
Majeti <i>et al</i> 1980; Fannin <i>et al</i> 1985; Lavoie 1997; Goyer <i>et al</i> 1998; Bauer <i>et al</i> 2002; Prazmo <i>et al</i> 2003 ; Schlosser <i>et al</i> 2005; Lee 2006	boues activées traitement par brosse	15	10000	63	37
Jacques Lavoie 1997	boues activées traitement par turbine	ND	ND	ND	ND
	Culture fixée aérobie	110	9550	60,2	35,46
	Dégrillage	70	220	1,39	0,81
	Dessableur	70	120	0,76	0,44
	traitement des boues	30	30	0,19	0,11
	transport des boues	20	30	0,19	0,11
	Vidange des camions des fosses septiques	20	70	0,44	0,26

Les apports provenant des différentes étapes de traitement sont très négligeable par rapport à la bio-pollution engendrée par les bassins de traitement par boues activées. Par conséquent même si une bio-accumulation des germes se produit dans l'air, celle-ci ne deviendrait pas telle que des effets critiques apparaîtraient là ou il n'y en a pas.

Les risques de contamination des riverains par d'autres étapes que celle du traitement biologique semblent dérisoires.

## **Partie 4 : Nécessité des mesures préventives**

L'étude réalisée repose sur un grand nombre d'hypothèses et d'incertitudes reposant à la fois sur le choix du scénario d'exposition et les valeurs retrouvées dans la littérature. Ces principales sources d'incertitudes sont liées :

### **Aux méthodes servant à la mesure des agents biologiques :**

De manière générale, selon les méthodes et le plan d'échantillonnage mis en place, la quantification des agents biologiques est entachée d'incertitudes non chiffrables notamment liées aux erreurs de mesure et à la variabilité temporelle et/ou spatiale des concentrations dans le milieu d'exposition, ce qui rend difficilement compte de l'exposition moyenne des personnes exposées.

Pour autant, au vue de l'homogénéité et de la cohérence entre les résultats obtenus par différents auteurs, l'utilisation de données provenant de la littérature permet d'apporter des informations concrètes sur les niveaux de contamination en bio-aérosols, dans l'environnement des STEP.

Outre les mesures de terrain, la modélisation est l'une des solutions envisagées afin de d'évaluer les niveaux de bio-contamination auxquels sont exposés les riverains. Pourtant, suite aux difficultés rencontrées lors des tests sur le logiciel ADMS 4, et aux résultats incohérents entre la modélisation et les données de la littérature, cette solution paraît difficilement entreprenable en routine. De meilleures performances auraient pu être obtenues si des mesures de terrain avaient pu être réalisées au préalable afin de « caler » le modèle. Encore une fois, en routine, cette condition semble contraignante dans la réalisation régulière d'études d'impact.

### **Au scénario d'exposition :**

Ce dernier est basé sur des hypothèses pénalisantes qui ne sont pas représentatives des conditions normales d'expositions. Le risque peut donc être surestimé par rapport à la réalité. Pour exemple :

- Chaque agent biologique contenu dans les bio-aérosols à été considéré comme vivant et potentiellement pathogène.
- Une exposition sur 24 heures (jour et nuit) a été considérée. Chez les enfants scolarisés et les travailleurs la durée d'exposition est largement sur estimée. Cette remarque est également valable pour les personnes demeurant à leur domicile,

puisque en l'absence d'ouverture des fenêtres, ces habitants n'ont que de faibles chances d'être en contact avec des bio-contaminants provenant de la STEP. De plus, en fonction du sens du vent et des conditions météorologiques les risques de contamination peuvent changer.

À des éléments de variabilités peu ou mal connus (Leturque C., 2008):

- Les différents constituants des bio-aérosols et leurs effets sur la santé ne sont probablement pas tous connus.
- Il existe une grande variabilité des réponses intra et inter-individuelles, avec une sensibilité particulière pour des sujets à risques. Il s'agit de l'une des principales raisons pour lesquelles l'élaboration de relation dose-réponse est limitée.
- Les symptômes mis en évidence sont non spécifiques et certains cas restent asymptomatiques. Une sous déclaration des cas peut donc intervenir lors d'enquête épidémiologique.
- La composition et la concentration des espèces constituant la flore microbienne des bio-aérosols varient en fonction de celles des eaux usées. Ainsi, en fonction des saisons, de l'état sanitaire des populations ou encore du cycle de vies des espèces, les agents biologiques potentiellement aérosolisés ne seront pas identiques.
- Les agents cultivables totaux sont des mélanges complexes d'agents biologiques, or dans la majorité des cas, les effets étudiés ou observés concernent une espèce spécifique. Les effets de synergie liés à une exposition multiple sont inconnus.
- La prise en compte de transmissions secondaire dans une communauté paraît difficile à estimer.

Malgré le grand nombre d'incertitude, les STEP sont clairement responsables d'apports en bio-aérosols dans l'environnement. Apports qui sont d'autant plus importants au cours de pics de pollution. De plus, parmi les agents biologiques aérosolisés, certains peuvent être responsables de maladies infectieuses ou immuno-allergiques aussi bien chez des sujets sains que fragilisés.

Pour toutes les raisons citées, des mesures préventives doivent être mises en œuvre par principe de précaution. Ainsi les mesures d'éloignement recommandées des habitations des STEP, ou au moins de la principale source d'émission, paraissent pertinentes. Cependant, proposer une distance globale de 250 mètres pour laquelle les risques de contamination sur 24 heures seraient nuls semble surévaluée au vu des éléments

évoqués dans les paragraphes : « discussion sur les risques de contamination d'origine microbienne » et « conclusion sur les risques liés aux endotoxines ». Actuellement, en l'absence de données plus concrètes, ou des observations faites par retour d'expérience depuis la recommandation d'une distance d'éloignement de 100 mètres autour des STEP en 1996, bien que cette distance n'ait pas de signification d'un point de vue sanitaire, celle-ci paraît suffisante pour limiter l'émergence marquée d'effets critiques parmi les riverains. Cette distance peut donc continuer d'être utilisée comme mesure de prévention **en fonction des choix technologiques de traitement des eaux.**

En effet, outre cette mesure, d'autres dispositifs, tout aussi efficaces et moins contraignants du point de vue urbanistique, peuvent être employés. Certaines de ces mesures découlent d'évolutions technologiques permettant de limiter l'aérosolisation et la dispersion d'agents biologiques. Ainsi, plusieurs procédés peuvent être utilisés parmi lesquels :

- Le confinement total des bassins de traitement. Les STEP de Nice et de Cannes utilisent cette méthode essentiellement pour des questions d'esthétisme et de nuisances olfactives et auditives. Dans la ville de Clohars Carnoet (29), le choix du confinement total a été pris puisque la STEP est construite au suivi de lotissement avec une distance d'écart entre la STEP et les habitations inférieure à 100 mètres
- L'ajout d'accessoires limitant la dispersion des bio-aérosols, tels que des systèmes de protection comme des jupes pour les systèmes en culture libre. Ceux-ci sont installés au dessus des turbines ou des brosses d'aération des bassins de traitement (13 : photos A et B). Autour des STEP des barrières végétalisées ont également fait leur preuve dans l'abattement du nombre d'aérosol (Spendlove J., Anderson R., Sedita S., *et al.* 1973. Enfin, de plus en plus, les collectivités adoptent des systèmes d'aération par bullage à partir desquels la production de bio-aérosols est quasi-nulle.
- L'installation de dispositifs pour canaliser les débordements d'eaux usées pouvant être à l'origine de la formation d'aérosols.

Parallèlement à cela, les nouvelles constructions de STEP, adoptent des agencements qui tendent à limiter les nuisances olfactives et à défavoriser la dispersion de bio-aérosols. Ces arrangements comprennent, l'aménagement des étapes de pré-traitement et de traitement des boues dans des enceintes closes avec traitement de l'air vicié sur charbon actif, l'installation des phases de chargement et de déchargement des boues dans des enceintes capotées où via des tuyaux reliés à des silos limitant la dispersion des germes dans l'air.

Ces différentes mesures assurent une protection vis-à-vis de la dispersion des bio-aérosols et donc des risques de contamination des populations. Sous réserve de confirmation via des mesures sur le terrain, l'application de ces systèmes contribuerait à l'acceptabilité d'installation voisine de moins de 100 mètres des STEP dans les dossiers d'impact.

Le choix de ces mesures préventives est fonction du budget alloué à la construction de la STEP, de la typologie du terrain (par exemple les systèmes par bullage d'air nécessitent de creuser des bassins plus profonds), et de la localisation de la STEP. Dans des zones peu habitées ou peu touristiques, l'investissement consenti est moindre que dans des villes de plus grandes densités.

Enfin au vu de l'ensemble des mesures prévues, il paraît injustifié d'imposer aux riverains de STEP des campagnes de surveillance ou des recommandations particulières sur leur façon de vivre.



## Conclusion

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la pertinence des recommandations d'éloignements des riverains autour des STEP vis-à-vis des risques de contamination par des bio-aérosols. À cet effet, il semble nécessaire de déterminer si ces populations sont exposées à des agents dangereux, à quel niveau et jusqu'à quelle distance. La démarche utilisée est celle d'une évaluation des risques sanitaires. Celle-ci est basée sur une analyse quantitative et qualitative, des agents biologiques présents dans l'air autour des STEP, au niveau des riverains à partir des données présentes dans la littérature.

Après une analyse des dangers, il ressort que la principale voie de contamination des bio-aérosols est la voie respiratoire. En effet, la très faible taille de certains des agents biologiques qui y sont regroupés leur permettent d'être inhalés et d'atteindre le poumon profond.

Parmi les agents biologiques identifiés dans l'air autour des STEP, certains peuvent représenter un risque infectieux, toxique ou allergique pour les riverains. En cas d'études d'impact poussées, les principaux indicateurs à rechercher seraient donc : les bactéries à Gram-, les coliformes totaux et plus particulièrement l'espèce *Klebsiella pneumoniae*, les streptocoques fécaux, les moisissures et enfin, les endotoxines. Sachant que certains virus tels que les Adénovirus et des agents allergisants (mycotoxines ou fragments cellulaires) dangereux pour l'Homme par inhalation peuvent être aérosolisés, il serait intéressant d'évaluer leur présence aux alentours du site.

Après étude des différentes sources d'émissions des bio-aérosols, il apparaît clairement que les typologies de STEP comprenant des bassins de traitement par boues activées avec aération par brosses sont les plus à mêmes d'entraîner un risque de bio-contamination des riverains. Par exemple les émissions en bactéries à Gram- y sont 100 fois supérieures à celles des étapes de pré-traitement et jusqu'à 1000 fois supérieures à celles du traitement des boues.

Malgré une analyse des résultats qui se heurte à l'importance des incertitudes, notamment dues à la métrologie, l'analyse qualitative et quantitative des émissions en bio-aérosols permet d'évaluer leur présence dans l'air, autour des bassins de traitement et sur quelle distance. En journée, la distance à partir de laquelle les niveaux de bio-contamination rejoignent ceux du bruit de fond oscille entre 150 et 250 mètres autour des bassins de traitement. De nuit, cette distance s'accroît pour dépasser les 250 mètres grâce aux conditions atmosphériques favorisant la survie des germes et leur dispersion. En dessous de ces distances, il existe de trop grandes incertitudes concernant les

relations dose-réponse pour pouvoir se prononcer quant aux risques de contamination auxquels sont exposés les riverains

En cas de pics de pollution les risques de contamination et donc d'apparition d'affection chez les riverains et plus particulièrement chez ceux fragilisés sont accrus. Il serait donc intéressant d'évaluer l'importance quantitative, la durée et la fréquence de ces derniers via la réalisation de mesures répétées sur un même point.

Enfin, de manière générale, la présence de germes et d'agents allergisants ou immunotoxiques libérés dans l'air depuis le site et la mise en évidence de pathologies chez les travailleurs, semblent prouver la pertinence des recommandations d'éloignement des riverains autour des STEP. Toutefois, à cause des variabilités dans la typologie des stations, des conditions environnementales et topographiques, il est difficile d'établir une distance précise d'éloignement des habitations qui soit constamment valide d'un point de vue sanitaire.

Au final, face aux difficultés rencontrées pour déterminer une distance précise correspond à un risque acceptable et non sur-évalué, plusieurs mesures préventives peuvent être envisagées. Parmi ces dernières, l'application de la distance « enveloppe » de 100 mètres, mise en place depuis 1996, demeure une bonne solution pour les STEP utilisant un traitement biologique avec aération par brosses, non équipés de système de protection. Pour les autres STEP, les récentes évolutions technologiques (système de protection, aérateur fine bulle) permettent de limiter fortement la formation et la dispersion de bio-aérosols. Par conséquent, la recommandation d'éloignement des habitations de 100 mètres devient trop stricte.

---

# Bibliographies

---

## Articles de périodiques:

Altmeyer N., Abadia G., Schmitt S., *et al.* 1990, « Risques microbiologiques et travail dans les stations d'épuration des eaux usées », *DTM documents pour le médecin du travail : Fiche médico-technique*, n°34, pp.373-385.

BAUER H., FUERHACKER M., ZIBUSCHKA F., *et al.*, 2002, « Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants », *Water Research* [en ligne], 36, pp. 3965-3970. [visité le 01.06.2011], disponible sur Internet : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12405405>

BOUTIN P., MOLINE J., TORRE M., *et al.*, 1984, « Contamination atmosphérique et respiratoire par les aérosols d'eaux résiduaires », *Revue des Maladies Respiratoires*, n°1, pp.125-131.

BRANDI G., SISTI M., AMAGLIANI G., 2002, « Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems », *Journal of applied Microbiology* [en ligne], 88, pp. 845-852. [visité le 09.05.2011], disponible sur Internet : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10792545>

CARDUCCI A., TOZZI E., RUBULOTTA E., *et al.*, 2000, « Assessing airborne biological hazard from urban wastewater treatment », *Water Research*, Vol 34, N°4, pp.1173-1178.

DOUWES J., THORNE P., PEARCE N., *et al.* 2002. «Bioaerosol Health Effects and Exposure Assessment: Progress and Prospects », *British Occupational Hygiene Society*, vol.47, n°3, pp. 187-200.

FANNIN K., VANA S., JAKUBOWSKI W., 1985, « Effect of an activated sludge wastewater treatment plant on ambient air densities of aerosols containing bacteria and virus », *Applied and Environmental Microbiology* [en ligne], vol. 49, n°5, pp. 1191-1196. [visité le 20.05.2011], disponible sur Internet : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC238528/>

GOFF D., SPENDLOVE J., ADAMS A., *et al.*, 1973, «Emission of Microbial Aerosols From Sewage Treatment Plants That Use Trickling Filters». *Effects of environmental conditions*, vol.88, N°7 : 640-652.

INRS, 2004, « Points des connaissances : ED 5026- Le traitement des eaux usées », *Travail et Sécurité* [en ligne], 4 p. [visité le 08/06/2011], disponible sur Internet : [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01\\_pc\\_view/1C527E0572B3825EC1256F560054BBA1/\\$File/ed5026.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_pc_view/1C527E0572B3825EC1256F560054BBA1/$File/ed5026.pdf)

KENLINE P., SCARPINO P., 1972, « Bacterial air pollution from sewage treatment plant », *American Industrial Hygiene Association Journal*, pp. 346-352.

PRAZMO Z., KRYSINSKA-TRACZYK E., SKORSKA C., *et al.*, 2003, « Exposure to Bioaerosols in a municipal sewage treatment plant », *Ann. Agric. Environ. Med.* [en ligne], 10, pp. 241-248. [visité le 19.05.2011], disponible sur Internet : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14677919>

RANDALL C., LEDBETTER J., 1966, « Bactériel air pollution from activated sludge units », *American Industrial Hygiene Association Journal*, pp. 506-519.

Rylander R., 1999, « Health effects among workers in sewage treatment plants », *Occupational and Environmental Medicine*, 56, pp. 354-357.

SANCHEZ-MONEDERO M., AGUILAR M., FENOLL R., *et al.*, 2008, « Effect of the aeration system on the levels of airborne microorganisms generated at wastewater treatment plants », *Water research* [en ligne], 42, 3739-3744 [visité le 20.05.2011], disponible sur Internet : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18662822>

SCHLOSSER O., LORET J.F., 2005, « Le risque des Bio-aérosols dans l'environnement des stations d'épuration », *TSM*, n°7-8, pp. 43-49.

SPENDLOVE J., ANDERSON R., SEDITA S. *et al.*, 1973, « Effectiveness of aerosol suppression by vegetative barriers », in Health effects Research laboratory, *Wastewater aerosols and disease*, Cincinnati OHIO : PAHREN H., JAKUBOWSKI W., pp. 136-159.

THORN J., BEIJER L., JONSSON T., *et al.*, 2002, « Measurement strategies for the determination of airborne bacterial endotoxin in sewage treatment plants », *Ann. Occup. Hyg.*, vol 46, n°6, pp. 549-554.

### **Ouvrages ou monographies:**

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1999, *Bioaerosols Assessment and Control*, Cincinnati, OHIO : American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 322 p.

AFSSET /, Edition scientifique-Eau et agents biologiques, 2009, *Virus Influenza pandémique A(H1N1) 2009 : Évaluation du risque sanitaire pour les travailleurs de l'assainissement des eaux usées*, Maison Alfort : AFSSET, Saisine n° « 2009/06 », 55 pages.

BEAUPOIL A., LE BORGNE C., MOUSSA ATTO A., 2010, *Risques sanitaires liés à la réutilisation d'eaux usées traitées pour l'aéro-aspersion des espaces verts*, Rennes : EHESP, 61 p.

BONNARD R., 2001, *Les risques biologique et la méthode d'évaluation des risques*, Verneuil-en -Halatte : INERIS, 70 p.

BROWN N., 1997, *Health hazards manual: Wastewater treatment plant and sewer workers*, New York States : Manual and User Guides, IRL Collection, 42p.

DELERY L., 2003. *Données disponibles pour l'évaluation des risques liés aux bio-aérosols émis par les installations de stockage des déchets ménagers et assimilés* Verneuil-en -Halatte : INERIS, 30 p.

GIS Mousses, 1993, *Guide de lutte contre les mousses biologiques stables dans les stations d'épuration à boues activées*, Document Technique FNDAE hors série, 71 p.

GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L., et al., 2001, *Les bio-aérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention*, Québec : Guide Technique T-23, IRRST, 58 p.

Téléchargement gratuit : [http://www.irsst.qc.ca/fr/publicationirsst\\_810.html](http://www.irsst.qc.ca/fr/publicationirsst_810.html)

INERIS, 2004, *Rapport d'étude : Exposition par inhalation aux aérosols, Principes et Méthodes de mesures*, INERIS, 36 p.

IRRST, 2005, Guide technique : *Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail*, 8 ème édition revue et mise à jour, Québec : IRSST, Étude et Recherche, 191 p.

JENSEN P., SCHAFFER M., 1998, *Sampling and characterization of bioaerosols*, Cincinnati OHIO : NIOSH Manuel of Analytical Methods, 16 p.

LANNUZEL A., 2009, *Risques sanitaires potentiels liés aux postes d'entretien des réseaux d'assainissement*, Rennes : EHESP, 50 p.

LAVOIE J., 1997, *Contaminants biologiques dans les centres de traitement des eaux usées*, Guide Technique R-163, IRRST, 13 p.

Téléchargement gratuit : [http://www.irsst.qc.ca/fr/publicationirsst\\_810.html](http://www.irsst.qc.ca/fr/publicationirsst_810.html)

LEFTAH N.,1999, *Faisabilité du volet sanitaire des études d'impact,-Cas des dossiers de station d'épuration : intérêts et limites de la démarche d'évaluation des risques*, Rennes : EHESP, 48 p.

LETURQUE C.,2008, *Agents biologiques et installations classées : quels risques pour la santé des riverains*. Rennes : EHESP 53 p.

MAJETI V., CLARK C., 1980, *Potential health effects from viable emissions and toxins associated with wastewater treatment plants and land application sites*, Cincinnati : US EPA, 75 p.

MOSQUERON L, NEDELLEC V, 2002, *Hiérarchisation sanitaire des paramètres de mesure dans les bâtiments par l'Observatoire de la Qualité de l'Air*, Paris : OQAI, 88 p.

Réseau de coopération de Recherche sur les déchets, 2003, *Etat des connaissances sur les micro-organismes dans les filières déchets*, RSD, 115 p.

### **Chapitre d'ouvrage:**

JOHNSON D., CAMANN D., KIMBALL K., *et al.*, 1973, «Health effects from wastewater aerosols at a new activated sludge plant : John Egan plant, Schaumburg, Illinois», in Health effects Research laboratory, *Wastewater aerosols and disease*, Cincinnati OHIO : PAHREN H., JAKUBOWSKI W., pp. 136-159.

### **Thèse :**

DEVAUX I., 1999, *Intérêts et limites de la mise en place d'un suivi sanitaire dans le cadre de la réutilisation agricole des eaux usées traitées de l'agglomération Clermontoise*, Thèse pour obtenir le grade de docteur en science de la vie et de la santé : Université Joseph Fourier Grenoble 1, 350 p.

### **Lois, décrets et circulaires :**

CODE DU TRAVAIL. Décret n° 94-352 du 4 mai 1994 relatif à la protection des travailleurs contre les risques d'exposition à des agents biologiques [en ligne]. Journal Officiel 6 mai 1994 [visité le 04/05/2011], disponible sur Internet :

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000713145&dateTexte=>

CODE DU TRAVAIL. R.4421-3 du Code du Travail relatif à la prévention des risques biologiques[en ligne]. Journal Officiel du 30 juillet 1994 [visité le 04/05/2011], disponible sur Internet :

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006072050&idArticle=LEGIARTI000018490790&dateTexte=&categorieLien=cid>

### **Sites internet :**

BARON pour le CDC. Generation and Behaviour of Airborne Particles (Aerosols). [visité le 01.06.2011], disponible sur Internet :  
[http://www.cdc.gov/niosh/topics/aerosols/pdfs/aerosol\\_101.pdf](http://www.cdc.gov/niosh/topics/aerosols/pdfs/aerosol_101.pdf)

BOUVET E., 50<sup>ème</sup> *Journée Claude Bernard*, 23 Novembre 2007, Lyon, disponible sur Internet :[http://www.srlf.org/Data/upload/file/Grippe%20A/\(18\)%20-%20Transmission%20a%C3%A9rienne%20\(E%20Bouvet%20nov%202007\).pdf](http://www.srlf.org/Data/upload/file/Grippe%20A/(18)%20-%20Transmission%20a%C3%A9rienne%20(E%20Bouvet%20nov%202007).pdf)

COLE, NIOSH. Aerobiology of infectious agents. [visité le 11.05.2011], disponible sur Internet :

[http://www.cdc.gov/niosh/npptl/resources/pressrel/announcements/113004wkshp/pdfs/Presentation%202002\\_Eugene%20Cole.pdf](http://www.cdc.gov/niosh/npptl/resources/pressrel/announcements/113004wkshp/pdfs/Presentation%202002_Eugene%20Cole.pdf)



---

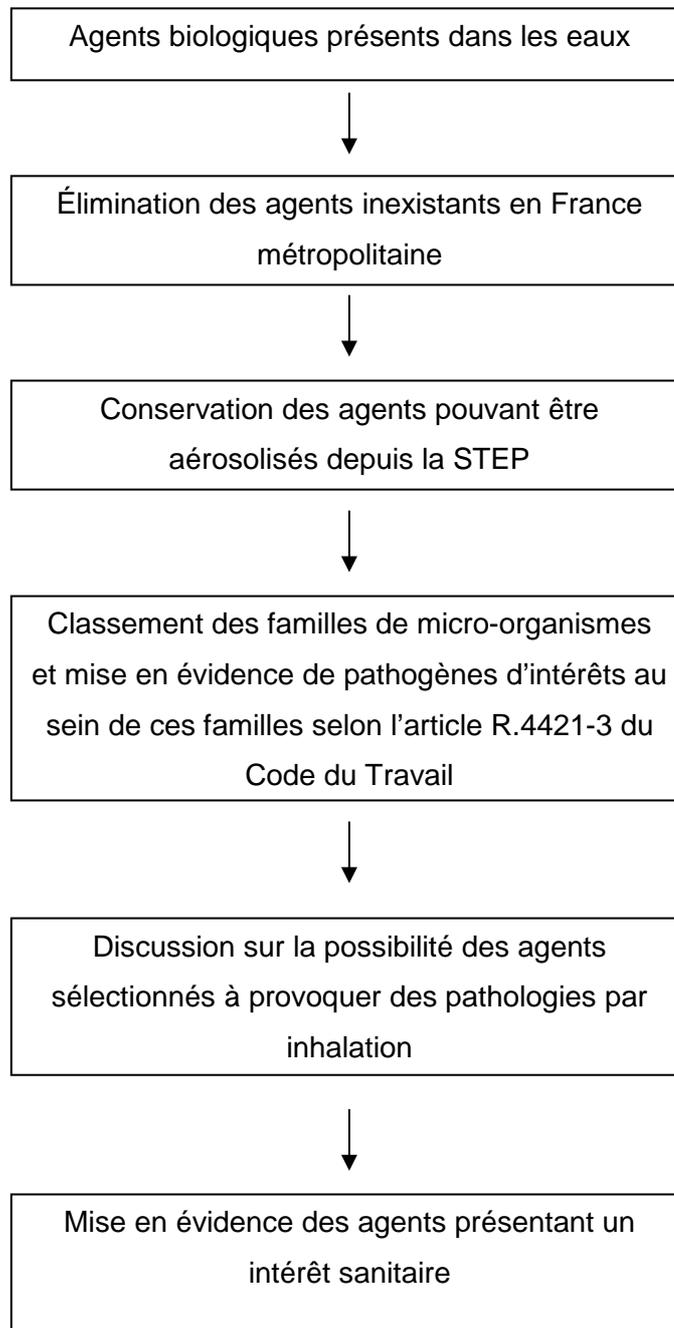
## Liste des annexes

---

<b>Annexe 1</b> : Schéma récapitulatif de la démarche d'identification des agents biologiques ayant un intérêt sanitaire : .....	I
<b>Annexe 2</b> : Bactéries potentiellement présentes dans les eaux usées et capacité à subir une aérosolisation : .....	II
<b>Annexe 3</b> : Virus potentiellement présents dans les eaux usées et capacité à subir une aérosolisation : .....	III
<b>Annexe 4</b> : Moisissures potentiellement présentes dans les eaux usées et capacité à subir une aérosolisation : .....	IV
<b>Annexe 5</b> : Parasites potentiellement présentes dans les eaux usées et capacité à subir une aérosolisation : .....	V
<b>Annexe 6</b> : Classement des agents pathogènes établi dans l'article R.4421-3 du Code du Travail : .....	VI
<b>Annexe 7</b> : Classement des bactéries sélectionnées selon l'article R.4421-3 du Code du Travail : .....	VII
<b>Annexe 8</b> : Classement des virus et des champignons sélectionnés selon l'article R.4421-3 du Code du Travail : .....	VIII
<b>Annexe 9</b> : Photos de systèmes d'apport d'oxygène dans les bassins de traitement par boues activées : .....	IX
<b>Annexe 10</b> : Modèle de dispersion atmosphérique pour les aérosols proposé par le CEMAGREF : .....	X
<b>Annexe 11</b> : Différents paramètres testés lors des essais de modélisation sur ADMS4 : .....	XI
<b>Annexe 12</b> : Variations des niveaux des émissions pour différents germes en fonction de la distance, de jour et de nuit : .....	XII
<b>Annexe 13</b> : Systèmes de capotage installés au dessus des procédés d'aération par brosses ou par turbine des bassins de boues activées.....	XIII



**Annexe 1 : Schéma récapitulatif de la démarche d'identification des agents biologiques ayant un intérêt sanitaire :**



**Annexe 2 : Bactéries potentiellement présentes dans les eaux usées et capacité à subir une aérosolisation :**

Bactéries potentiellement présentes dans les eaux usées		localisation	Possibilité de transfert par aérosolisation	
Coloration de GRAM	Espèces notables répertoriées dans la littérature			
GRAM négatif	<i>Aeromonas hydrophila</i>	localisation mondiale	Faible probabilité de contamination par cette voie. Le passage par la voie orale est favorisée	
	<i>Acinetobacter</i>		<i>A. junii</i>	Contamination possible par inhalation de gouttelettes.
			<i>A. woffii</i>	
	<i>Alcaligenes faecalis</i>			
	<i>Brevundimonas vesicularis</i>			
	<i>Campylobacter spp</i>			
	<i>Comamonas acidovorans</i>			
	<i>Enterobacter spp</i>			
	<i>Escherichia coli</i>			
	<i>Flavimonas oryzihabitans</i>			
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>			
	<i>Legionella pneumophila</i>			
	<i>Ochrobactrum anthropi</i>			
	<i>Pseudomonas</i>		<i>aeruginosa</i>	
			<i>fluorescens</i>	
			<i>putida</i>	
			<i>alcaligenes</i>	
	<i>Ralstonia pickettii</i>			
	<i>Salmonella spp</i>			
<i>Shigella spp</i>				
<i>Sphingobacterium spiritivorum</i>				
<i>Yersinia enterocolitica</i>				
Autres Entérobactéries (Citrobacter, Serratia, Hafnia, Proteus, Erwinia, Etc..)				
endotoxines : fragments de parois des bactéries à Gram négatif				
Gram positif	<i>Actinomyces israeli</i>	localisation mondiale	contamination possible par inhalation de gouttelettes	
	<i>Bacillus anthracis</i>	rare et localisé dans les pays industrialisés	contamination possible par inhalation de gouttelettes mais non considéré car très rarement présent en France.	
	<i>Clostridium</i>	<i>C. perfringens</i>	localisation mondiale	Contamination possible par inhalation de gouttelettes contenant des formes végétatives ou des spores.
		<i>C. botulinum</i>		
		<i>C. tetani</i>		
	<i>Listeria monocytogenes</i>	Absence de données		
	<i>Micrococcus spp</i>	Contamination possible par inhalation de gouttelettes.		
	<i>Streptococcus pneumoniae</i>			
<i>Staphylococcus aureus</i>				
<i>Vibrio cholerae</i>	rare et localisé dans les pays industrialisés	Contamination possible par inhalation de gouttelettes mais non considéré car très rarement présent en France.		
AUTRES	<i>Leptospira interrogans</i>	localisation mondiale	Contamination possible par inhalation de gouttelettes selon l'Institut National de Médecine Agricole (INMA).	
	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>		Contamination possible par inhalation de gouttelettes.	

**Annexe 3 : Virus potentiellement présents dans les eaux usées et capacité à subir une aérosolisation :**

Virus potentiellement présents dans les eaux usées			localisation géographique	Possibilité de transmissions par aérosolisation
Présence de l'enveloppe	Genre	espèce		
Non enveloppé	<i>Enterovirus</i>	<i>Poliovirus</i>	Éradiqué de l'ensemble du continent Américain, de la région du Pacifique occidental et de l'Europe selon l'OMS	transmission possible mais non considérée car l'agent est absent en France métropolitaine
		<i>Virus coxsackie A</i>	localisation mondiale	possibilité d'infection par inhalation d'aérosols contaminés
		<i>Virus coxsackie B</i>		très faible probabilité de contamination par cette voie. Le passage par la voie orale est favorisés
		<i>Echovirus</i>		
	<i>Hépatovirus</i>	Virus de l'hépatite A	localisation mondiale	contamination possible par des gouttelettes infectées mais dépendante de l'état d'infectiosité du virus
	<i>Mastadénovirus</i>	<i>Adénovirus Humain</i>		
	<i>Norovirus</i>	Genogroupe I		
		Genogroupe II		
	<i>Parvovirus</i>	<i>Parvovirus Humain</i>		
<i>Rotavirus</i>	<i>Rotavirus Humain</i>			
Enveloppé	<i>Coronavirus</i>	<i>Coronavirus Humain</i>	localisation mondiale	possibilité d'infection par inhalation d'aérosols contaminés
	<i>Influenzavirus</i>	Virus grippal		selon un rapport de l'AFSSET datant de 2009 portant sur l'évaluation des risques sanitaires pour les travailleurs de l'assainissement des eaux usées vis-à-vis des H1NI, le risque de contamination par inhalation serait négligeable par rapport à la voie de contamination principale qui est interhumaine

**Annexe 4 : Moisissures potentiellement présentes dans les eaux usées et capacité à subir une aérosolisation :**

Chapignons potentiellement présents dans les eaux usées		localisation géographique	Production de mycotoxines	Possibilité de transmissions par aérosolisation
Espèces notables repertoriées dans la littérature				
Moisissures	<i>Aspergillus spp</i>	localisation mondiale	aflatoxines, citrinine, cytochalasines, fumitremorgènes, gliotoxines, ochratoxine, sterigmatocystine	Inhalation de spores et de mycotoxines
	<i>Cladosporium spp</i>		acide épicladosporique, cladosporine	
	<i>Epidermophyton spp</i>		Non connue	Transmission par contact direct avec des lésions du cuir chevelu de personnes ou d'animaux infectés ou par contact avec des vecteurs passifs (vêtements, peignes, etc.,,) contaminés via des squames.
	<i>Trichophyton spp</i>		Non connue	
	<i>Fusarium spp</i>		fumonisines, trichotécènes : T-2, vomotoxine et zearalenone	Inhalation de spores et de mycotoxines
	<i>Geotrichum spp</i>		Non connue	Inhalation de spores
	<i>Penicillium spp</i>		citrinine, patuline, griseofulvines, ochratoxines, verrucosidine	Inhalation de spores et de mycotoxines
	<i>Trichoderma spp</i>		satratoxine	
Levures	<i>Candida albicans</i>	localisation mondiale	Non connue	Propagation par contact cutanéomuqueux ou avec les selles de malades ou de porteurs sains mais non par voie respiratoire
	<i>Cryptococcus neoformans</i>		Non connue	Inhalation de spores

**Annexe 5 : Parasites potentiellement présentes dans les eaux usées et capacité à subir une aérosolisation :**

Parasites potentiellement présents dans les eaux usées			localisation géographique	Possibilité de transmissions par aérosolisation
Sous-règne	Genre	espèce		
Protozoaires	<i>Balantidium</i>	<i>coli</i>	Mondiale mais plutôt dans les régions où les conditions sanitaires sont défavorables	Au vu de la taille et du poids des formes végétatives et enkystées, il est peu probable que ces dernières puissent être aérosolisées. Le risque de contamination des parasites par voie respiratoire est donc quasi nul dans ce contexte.
	<i>Cryptosporidium</i>	<i>neoformans</i>	Répendu dans le monde	
	<i>Entamoeba</i>	<i>histolytica</i>	Répendu dans le monde mais surtout dans les pays tropicaux	
	<i>Giardia</i>	<i>lamblia</i>	Mondiale mais plutôt dans les régions où les conditions sanitaires sont défavorables	
	<i>Toxoplasma</i>	<i>gondii</i>	Répendu dans le monde mais surtout dans les pays tropicaux	
Métazoaires	<i>Ascaris</i>	<i>lumbricoïdes</i>	Répendu dans le monde mais surtout dans les pays tropicaux	
	<i>Ancylostoma</i>	<i>duodenale</i>		
	<i>Anguillula</i>	<i>intestinalis</i>		
	<i>Echinococcus</i>	<i>spp</i>	Région tempérée où l'on élève des moutons	
	<i>Fasciola</i>	<i>hepatica</i>	Répendu dans le monde	
	<i>Trichuris</i>	<i>trichuria</i>		
	<i>Schistosoma</i>	<i>mansoni</i>	Plutôt répendu dans des pays tropicaux	
	<i>Toxocara</i>	<i>cani</i>	Répendu dans le monde	
		<i>cati</i>		
<i>Taenia</i>	<i>saginata</i>			
	<i>solium</i>			

**Annexe 6 : Classement des agents pathogènes établi dans l'article R.4421-3 du Code du Travail :**

<b>Groupes</b>	<b>Définition</b>
Groupe 1	Comprend les agents biologiques non susceptibles de provoquer une maladie chez l'Homme
Groupe 2	Comprend les agents biologiques pouvant provoquer une maladie chez l'Homme et constituer un danger pour les travailleurs ; leur propagation dans la collectivité est peu probable ; il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficace
Groupe 3	Comprend les agents biologiques pouvant provoquer une maladie grave chez l'Homme et constituer un danger sérieux pour les travailleurs ; leur propagation dans la collectivité est possible, mais il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficace
Groupe 4	Comprend les agents biologiques qui provoquent des maladies graves chez l'Homme et constituent un danger sérieux pour les travailleurs ; le risque de propagation dans la collectivité est élevé ; il n'existe généralement ni prophylaxie ni traitement efficace

**Annexe 7 : Classement des bactéries sélectionnées selon l'article R.4421-3 du Code du Travail :**

Bactéries potentiellement présentes dans les eaux usées		Classification selon l'article R.4421-3	
Coloration de GRAM	Espèces notables repertoriées dans la littérature		
GRAM négatif	<i>Acinetobacter</i>	<i>A. junii</i>	absence de groupe
		<i>A. woffii</i>	absence de groupe
	<i>Alcaligenes faecalis</i>		absence de groupe
	<i>Brevundimonas vesicularis</i>		absence de groupe
	<i>Campylobacter spp</i>		Groupe 2
	<i>Comamonas acidovorans</i>		absence de groupe
	<i>Enterobacter spp</i>		Groupe 2
	<i>Escherichia coli</i>		Groupe 2
	<i>Escherichia coli cytotoxiques</i>		Groupe 3
	<i>Flavimonas oryzihabitans</i>		absence de groupe
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>		Groupe 2
	<i>Legionella pneumophila</i>		Groupe 2
	<i>Pseudomonas</i>	<i>Aeruginosa</i>	Groupe 2
		<i>fluorescens</i>	Groupe 2
		<i>putida</i>	Groupe 2
		<i>alcaligenes</i>	Groupe 2
	<i>Ralstonia pickettii</i>		absence de groupe
	<i>Salmonella spp</i>		Groupe 2
	<i>Shigella spp</i>		Groupe 2
	<i>Shigella dysenteriae</i>		Groupe 3
<i>Streptococcus pneumoniae</i>		Groupe 2	
Autres Entérobactéries(Citrobacter, Serratia, Hafnia, Proteus, Erwinia, Etc..)		absence de groupe	
endotoxines : fragments de parois des bactéries à Gram négatif		Pas de classification	
Gram positif	<i>Actinomyces israeli</i>		Groupe 2
	<i>Clostridium</i>	<i>C. perfringens</i>	Groupe 2
		<i>C. botulinum</i>	Groupe 2
		<i>C. tetani</i>	Groupe 2
	<i>Micrococcus spp</i>		absence de groupe
	<i>Streptococcus pneumoniae</i>		Groupe 2
<i>Staphylococcus aureus</i>		Groupe 2	
AUTRES	<i>Leptospira interrogans</i>		Groupe 2
	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>		Groupe 3

**Annexe 8 : Classement des virus et des champignons sélectionnés selon l'article R.4421-3 du Code du Travail :**

Virus potentiellement présentes dans les eaux usées			Classification selon l'article R.4421-3
Présence de l'enveloppe	Genre	espèce	
Non enveloppé	<i>Enterovirus</i>	<i>Virus coxsackie A</i>	Groupe 2
		<i>Virus coxsackie B</i>	Groupe 2
		<i>Echovirus</i>	Groupe 2
	<i>Hépatovirus</i>	Virus de l'hépatite A	Groupe 2
	<i>Mastadénovirus</i>	<i>Adénovirus</i> Humain	Groupe 2
	<i>Norovirus</i>	Genogroupe I	Groupe 2
		Genogroupe II	Groupe 2
	<i>Parvovirus</i>	<i>Parvovirus</i> Humain	Groupe 2
<i>Rotavirus</i>	<i>Rotavirus</i> Humain	Groupe 2	
Enveloppé	<i>Coronavirus</i>	<i>Coronavirus</i> Humain	Groupe 2

Champignons potentiellement présentes dans les eaux usées		Classification selon l'article R.4421-3
Espèces notables répertoriées dans la littérature		
Moisissures	<i>Aspergillus spp</i>	2 A
	<i>Cladosporium</i>	absence de groupe
	<i>Fusarium spp</i>	absence de groupe
	<i>Geotrichum spp</i>	absence de groupe
	<i>Penicillium spp</i>	absence de groupe
	<i>Trichoderma spp</i>	absence de groupe
Levures	<i>Cryptococcus neoformans</i>	2 A

**Annexe 9 : Photos de systèmes d'apport d'oxygène dans les bassins de traitement par boues activées :**



Photo A: Aérateur avec turbine



Photo B: Aérateur avec brosses



Photo C : Aérateur avec bullage

## Annexe 10 : Modèle de dispersion atmosphérique pour les aérosols proposé par le CEMAGREF :

Description du modèle de dispersion défini par Pasquill :

$$A(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-0,5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left[ e^{-0,5\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0,5\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

A (x,y,z) : nombre de particules au point (x,y,z)

x : distance à la source dans la direction du vent en mètre

y : distance à la source dans la direction orthogonale à celle vent en mètre

z : nombre de particules émises

h : hauteur de la source par rapport au sol en mètre

u : vitesse du vent en m/s

$\sigma_y$  et  $\sigma_z$  : dispersion sur y (respectivement sur z), en fonction de x et de la stabilité atmosphérique

La concentration en bio-aérosols est maximale sous le vent de l'émetteur (soit selon l'axe x).

L'estimation de l'exposition d'un sujet au sol revient à faire y=0 et x=0 dans le modèle original. En simplifiant on obtient :

$$A(d) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u}$$

Où d désigne la distance à la source sous le vent de celle-ci.

Une modification de l'équation est introduite pour tenir compte de la mortalité des micro-organismes :

$$X(d) = A(d) \cdot \exp^{-\lambda t}$$

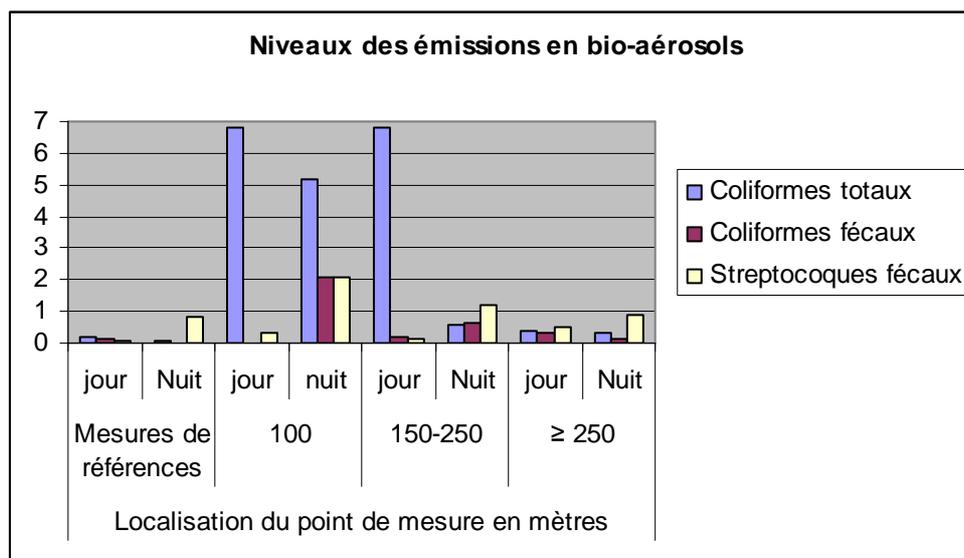
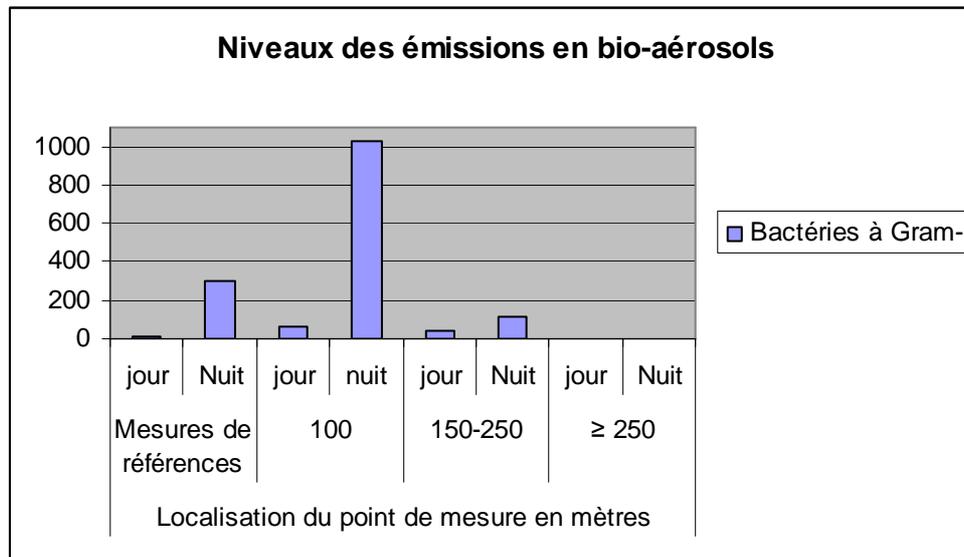
t : temps en secondes, pouvant être approximé par x/u avec u : vitesse moyennes du vent

$\lambda$  : constante de mortalité bactérienne en seconde déterminée expérimentalement (*E.coli* marqué au tritium).

**Annexe 11 : Différents paramètres testés lors des essais de modélisation sur ADMS4 :**

	Essais réalisés		
	ESSAI 1	ESSAI 2	ESSAI 3
Données géographique	Coordonnées en Lambert II étendu de la ville Milhac (24)		
Données météorologiques	Données météorologique de la ville de Milhac sur 3 ans		
Rugosité du terrain	0,5 mètres équivalent à : Parcs et Banlieues dégagées		
Type de source	surfacique		
Hauteur de la source	1,5 mètre au dessus du sol		
Superficie du bassin en m <sup>2</sup>	81	81	1867
Volume des émissions en m <sup>3</sup> /sec	0,25	0,58	0,38
Nature du polluant	Particulaire		
Taux d'émissions des bactéries	440 UFC/m <sup>2</sup> /sec		
Température des émissions	température ambiante		
Temps d'incrémentation	1 heure (par défaut)		
Distances des zones cibles autour de la source d'émission	15 , 50 , 100 et 150 mètres		

**Annexe 12 : Variations des niveaux des émissions pour différents germes en fonction de la distance, de jour et de nuit :**



**Annexe 13 : Systèmes de capotage installés au dessus des procédés d'aération par brosses ou par turbine des bassins de boues activées**



Photo A : Système de protection via une dalle en béton



Photo B : Système de couverture à l'aide d'une jupe souple en tôle d'acier

---

## **Abstract**

---

### **Contamination Risk of local residents by bio-aerosols from Wastewater Treatment Plants : relevance of a minimum setback distance from urban areas**

### **Risques de contamination des riverains par des Bio-aérosols provenant de stations d'épuration : pertinence d'une distance d'éloignement minimum des zones d'urbanisation**

The construction of wastewater treatment plants (WWTP), of more than 10.000 EH is subjected to an impact study by consultants engineers. Through this study, the question of contamination of local residents by bio-aerosols. However no detailed study on the risk of contamination by these agents via inhalation exists. Lacking of data obliges to promote a setback distance of 100 meters around WWTP. This study deals with the relevance of such recommendation from a public health point of view.

A set of environmental and epidemiological studies is used as reference for health risks assessment of residents exposed to bio-aerosols. From this study, infectious or allergenic agents with health interest are identified. Similarly, the review of WWTP processes enable to sort out processes according to the concentration bio-aerosols emitted. It appears that activated sludge with aeration brushes is the greatest source of contamination.

Despite the uncertainties raised in the paper, the study of bibliographic data for day and night exposures shows an air contamination over several meters of WWTP using brushes ventilation. This contamination becomes more important at night and when pollution peaks occurs. Although it's difficult to interpret the residents' level of exposition in the lack of dose-reponse relationship, for the precautionary principle, it seems appropriate to establish a setback distance of 100 meters around the type of WWTP. For new WWTP technological developments incorporated in their building limit the formation or spreading of bio-aerosols so, the application of such a recommendation is not justified.

Following this study, a list of biological indicators is proposed in case of comprehensive impact studies as well as a set of preventive measures according to the types of WWTP.

## Ingénieur du Génie Sanitaire Promotion 2011

### **Risques de contamination des riverains par des Bio-aérosols provenant de stations d'épuration : pertinence d'une distance d'éloignement minimum des zones d'urbanisation**

#### **Résumé :**

La construction de stations d'épuration (STEP) de plus de 10.000 EH, fait l'objet d'une étude d'impact par les bureaux d'études. À travers ces études, se pose la question des risques de contamination des riverains par les bio-aérosols. Cependant, il n'existe aucune étude précise sur leur risque de contamination par ces agents via inhalation. En l'absence de données, des mesures préventives d'éloignement des habitations de 100 mètres autour des STEP sont recommandées. Ce mémoire s'interroge donc sur la pertinence d'une telle recommandation d'un point de vu sanitaire.

Un corpus d'études environnementales et épidémiologique est utilisé comme base pour l'étude des risques sanitaires des riverains vis-à-vis des bio-aérosols. A partir de celle-ci, les agents infectieux ou allergisant présentant un intérêt sanitaire sont identifiés. De même, l' des différentes typologies de STEP permet de classer les procédés selon les concentrations en bio-aérosols émis. Il apparaît que les traitements par boues activées avec aération par brosses représentent la source de contamination la plus importante.

Malgré les incertitudes soulevées au cours de ce mémoire, l'analyse de données bibliographiques pour des expositions de jour et de nuit montre une contamination de l'air sur plusieurs mètres autour des STEP utilisant des brosses d'aération. Cette contamination devient plus importante la nuit et lors de pics de pollution. Bien qu'il soit difficile d'interpréter les niveaux d'expositions des riverains en l'absence de relation dose-réponse, par principe de précaution, il semble pertinent d'établir une distance d'éloignement de 100 mètres autour de ces types de STEP. Pour les nouvelles STEP qui intègrent dans leur construction des évolutions technologiques permettant de limiter la formation ou la dispersion des bio-aérosols, l'application d'une telle recommandation n'est plus justifiée.

À l'issue de cette étude, une liste d'indicateurs biologiques est proposée en cas d'études d'impact poussées, ainsi qu'un ensemble de mesures préventives selon les typologies des STEP.

**Mots clés :** *Mots clés* : station d'épuration, riverains, bio-aérosols, distance d'éloignement, risques infectieux et immuno-allergique, impact sanitaire, exposition, évaluation des risques sanitaires

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