

2015

Bronchoscopie en milieu hospitalier : évaluation des expositions aux bioaérosols

Jacques Lavoie
IRSST

Geneviève Marchand
IRSST, genevieve.marchand@irsst.qc.ca

Yves Cloutier
IRSST

Yves Beaudet
IRSST

Stéphane Hallé
ÉTS

See next page for additional authors

Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Lavoie, J., Marchand, G., Cloutier, Y., Beaudet, Y., Hallé, S., Nadeau, S., . . . Duchaine, C. (2015).
Bronchoscopie en milieu hospitalier : évaluation des expositions aux bioaérosols (Rapport n° R-879).
IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

Auteurs

Jacques Lavoie, Geneviève Marchand, Yves Cloutier, Yves Beaudet, Stéphane Hallé, Sylvie Nadeau, Gilbert Pichette, and Caroline Duchaine

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-879



Bronchoscopie en milieu hospitalier Évaluation des expositions aux bioaérosols

Jacques Lavoie
Geneviève Marchand
Yves Cloutier
Yves Beaudet
Stéphane Hallé
Sylvie Nadeau
Gilbert Pichette
Caroline Duchaine



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent pour vous !*

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2015
ISBN : 978-2-89631-813-1 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Mai 2015



Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-879

Bronchoscopie en milieu hospitalier Évaluation des expositions aux bioaérosols

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Jacques Lavoie, Geneviève Marchand, Yves Cloutier, Yves Beaudet
IRSST

Stéphane Hallé, Sylvie Nadeau
ÉTS

Gilbert Pichette
Hôpital du Sacré-Cœur

Caroline Duchaine
CRIUCPQ

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs aimeraient remercier les membres du personnel hospitalier qui ont participé à cette étude, M. Marc Veillette du Centre de recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec (CRIUCPQ), pour ses analyses de biologie moléculaire, ainsi que les techniciennes du laboratoire de microbiologie de l'IRSST. Sont également remerciés les comités scientifiques et d'éthique des deux hôpitaux qui nous ont donné accès à leurs installations, de même que le comité d'éthique de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS).

SOMMAIRE

Lors des examens de bronchoscopie en milieu hospitalier, des aérosols provenant de la bouche et du nez du patient peuvent se retrouver en suspension dans l'air ambiant. Les aérosols produits peuvent contenir des microorganismes pathogènes, tels des mycobactéries, des bactéries, des virus et même des moisissures. Ces microorganismes peuvent également être aérosolisés lors du nettoyage des bronchoscopes effectué après l'examen. Selon la nature de ces microorganismes ou bioaérosols, ils peuvent persister assez longtemps dans l'air et potentiellement causer des infections chez les travailleurs exposés. L'objectif principal de cette recherche est de mesurer les concentrations des particules totales et biologiques lors des examens de bronchoscopie et du retraitement des bronchoscopes et de proposer, le cas échéant, des mesures préventives ou correctrices.

Deux salles de bronchoscopie et une salle de retraitement ont été étudiées. L'une des deux salles de bronchoscopie ne répondait pas aux recommandations de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) et de l'American Institute of Architects (AIA). Un granulomètre aérodynamique à fluorescence UV (UV-APS) TSI 3314 a permis d'établir les concentrations et les structures fines des particules non fluorescentes et fluorescentes présentes, en temps réel, avant, pendant et après les opérations de bronchoscopie. Cet instrument détermine le diamètre aérodynamique des aérosols et peut distinguer en temps réel la fraction d'origine biologique. Les concentrations de référence ont été prises avant le début des examens (bruit de fond du début) et utilisées comme niveau de comparaison pour les concentrations mesurées pendant et à la fin des bronchoscopies. Les résultats obtenus avec l'UV-APS ont été comparés à d'autres méthodes de prélèvements de microorganismes, par impaction dans un liquide avec le barboteur AGI-30 et le Coriolis et sur gélose à l'aide de l'impacteur Andersen. Ces échantillons ont été analysés par des méthodes de culture sur gélose ou par des méthodes de biologie moléculaire dans le cas des échantillons en milieu liquide. Parallèlement aux évaluations des bioaérosols en situation réelle (concentration, identification, temps de suspension ainsi que granulométrie), la simulation numérique des écoulements (CFD) a permis d'isoler et de comprendre différents facteurs pouvant affecter les niveaux de contaminations dans les salles de bronchoscopie.

Les concentrations des particules non fluorescentes et fluorescentes (bioaérosols) sont significativement plus élevées ($p \leq 0,05$) que les concentrations de référence (bruit de fond le matin) lors des examens de bronchoscopie. Pour les facteurs étudiés, les concentrations de bioaérosols se révèlent significativement plus élevées d'abord lors des tâches d'insertion du bronchoscope puis lors de l'examen de bronchoscopie. Certains des bioaérosols pathogènes opportunistes classés dans le groupe de risque 2 (ex. *Streptococcus pneumoniae*) proviendraient du patient et non du personnel soignant. Les concentrations de bioaérosols lors des opérations de nettoyage effectuées dans la salle de retraitement ne sont pas significativement plus élevées que celles de référence. Le temps requis à la fin de la journée pour permettre aux bioaérosols d'atteindre les concentrations de référence du matin est d'une quinzaine de minutes pour les deux salles de bronchoscopies. Nos modèles, établis à partir de la simulation numérique des écoulements (CFD), nous permettent de visionner le comportement des bioaérosols dans les deux salles de bronchoscopie.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LEXIQUE	xi
1. INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 État des connaissances et objectifs de la recherche	2
1.3 Objectifs de recherche.....	5
2. MÉTHODOLOGIE.....	7
2.1 Choix des salles.....	7
2.2 Concentrations et granulométries des particules fluorescentes et non fluorescentes ...	8
2.3 Identification des bioaérosols	9
2.4 Analyses statistiques	9
2.5 Mesure du nombre de changements d'air par heure (CAH)	10
2.6 Modélisation de la ventilation.....	10
3. RÉSULTATS	17
3.1 Particules non fluorescentes et fluorescentes (bioaérosols).....	17
3.1.1 Profils granulométriques lors des mesures de bruit de fond	21
3.1.2 Profils granulométriques lors des examens de bronchoscopie	26
3.1.3 Bioaérosols cultivables	28
3.1.4 Analyses statistiques	31
3.2 Mesure du nombre de CAH	36
3.3 Modélisation	37
3.3.1 Âge de l'air en fonction du débit de soufflage.....	37
3.3.2 Indice cumulatif d'inhalation.....	39
3.3.3 Fraction déposée	41
3.3.4 Trajectoires des petites particules et des noyaux de gouttelettes	43
4. DISCUSSION	47
4.1 Nombre de changements d'air par heure	47
4.2 Particules non fluorescentes, fluorescentes et cultivables	47
4.2.1 Bruits de fond.....	47
4.2.2 Profils granulométriques	49
4.2.3 Identifications bactériennes	50
4.3 Modélisation	52
4.3.1 Conditions de mélange dans les pièces	52

4.3.2	Indice cumulatif d'inhalation du personnel hospitalier	52
4.3.3	Dépôt des bioaérosols	53
4.4	Mesures préventives proposées.....	54
4.5	Portées et limites de cette recherche	55
5.	CONCLUSION.....	57
6.	BIBLIOGRAPHIE	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Débits de soufflage sélectionnés pour les cas simulés.....	14
Tableau 2 : Caractéristiques des maillages retenus pour les simulations.	15
Tableau 3 : Concentrations des particules totales, fluorescentes et non fluorescentes dans les différentes salles mesurées avec l'UV-APS 3314.	18
Tableau 4 : Dernière mesure de la concentration du bruit de fond pour les particules totales et pour les particules avec et sans fluorescence dans les deux salles de bronchoscopie (en nombre/m ³).....	23
Tableau 5 : Calcul des constantes de temps et du temps de retour au bruit de fond du début de la journée pour la salle contrôle et pour la salle étudiée.	23
Tableau 6 : Identification et concentration des bactéries cultivables mesurées dans la salle contrôle	29
Tableau 7 : Identification et concentration des bactéries cultivables mesurées dans la salle étudiée.	30
Tableau 8 : Identification et concentration des bactéries cultivables mesurées dans la salle de retraitement.	31
Tableau 9 : Résultats de l'analyse statistique descriptive des particules pour la salle contrôle. ...	32
Tableau 10 : Résultats de l'analyse statistique descriptive des particules pour la salle étudiée	32
Tableau 11 : Résultats de l'analyse statistique descriptive des particules pour la salle de retraitement.	32
Tableau 12 : Nombre de changements d'air à l'heure (CAH) pour les différentes salles.	36
Tableau 13 : Âge de l'air en fonction du nombre de changements d'air par heure	37
Tableau 14 : Nombre de changements d'air à l'heure (CAH) et temps requis pour éliminer 99 % et 99,9 % des contaminants de l'air (CDC, 2005).	48

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Distances parcourues par les gouttelettes en fonction de leur granulométrie (adapté de Welty, 2009).	3
Figure 2 : Salle de bronchoscopie contrôle.....	12
Figure 3 : Salle de bronchoscopie étudiée.	13
Figure 4 : Salle de retraitement.	14
Figure 5 : Discrétisation spatiale près du personnel et du patient pour la salle étudiée.	16
Figure 6 : Discrétisation spatiale près du personnel et du patient pour la salle contrôle.....	16
Figure 7 : Concentrations des particules avec et sans fluorescence (en nombre/m ³), mesurées comme bruit de fond en début et à la fin de la journée pour les trois salles.	22
Figure 8 : Profils granulométriques moyens des fractions de particules fluorescentes et non fluorescentes présentes en début de journée (bruit de fond), pour les trois salles.	24
Figure 9 : Profils granulométriques moyens des fractions de particules fluorescentes et non fluorescentes présentes en fin de journée (bruit de fond), pour les trois salles.	25
Figure 10 : Profils granulométriques des fractions de particules non fluorescentes et fluorescentes lors de l'introduction du bronchoscope dans les voies respiratoires d'un patient.	26
Figure 11 : Profils granulométriques moyens des fractions de particules fluorescentes et non fluorescentes lors des examens de bronchoscopie et des opérations de nettoyage des bronchoscopes à la salle de retraitement (moyenne journalière sans bruit de fond).	27
Figure 12 : Concentrations de particules des fractions totales et fluorescentes lors de l'introduction du bronchoscope dans la salle contrôle.....	28
Figure 13 : Comparaisons multiples de Tukey-Kramer pour les particules non fluorescentes (deux salles combinées).	33
Figure 14 : Comparaisons multiples de Tukey-Kramer pour les particules fluorescentes (deux salles combinées).	34
Figure 15 : Comparaisons multiples de Tukey-Kramer pour les bactéries cultivables (pour les deux salles combinées).	35
Figure 16 : Coefficient d'échange d'air en fonction de CAH théoriques pour les trois salles.	38
Figure 17 : Concentration de SF ₆ en fonction du temps pour la salle étudiée.	38
Figure 18 : Concentration de SF ₆ en fonction du temps pour la salle contrôle.....	39
Figure 19 : Concentration de SF ₆ en fonction du temps pour la salle de retraitement.....	39
Figure 20 : Indice cumulatif d'inhalation en fonction de CAH pour la salle étudiée.....	40
Figure 21 : Indice cumulatif d'inhalation en fonction de CAH pour la salle contrôle.	41
Figure 22 : Fraction massique dans un plan y-z, 390 secondes après le début de la simulation pour a) salle étudiée et b) salle contrôle.	41
Figure 23 : Fraction déposée après 20 minutes dans la salle étudiée.....	42

Figure 24 : Fraction déposée après 20 minutes dans la salle contrôle.	42
Figure 25 : Comparaison entre la masse déposée après 20 minutes pour a) salle étudiée et b) salle contrôle.	43
Figure 26 : Trajectoires des bioaérosols pour la salle étudiée.	44
Figure 27 : Trajectoires des bioaérosols pour la salle contrôle.	45

LEXIQUE

Aérosol – Particule solide ou liquide en suspension dans un milieu gazeux comme l’air.

Adiabatique – Une transformation est dite adiabatique (du grec *adiabatos*, « qui ne peut être traversé ») si elle est effectuée sans qu’aucun transfert thermique n’intervienne entre le système étudié et le milieu extérieur.

ANOVA – Analyse statistique de variance.

Appareil de protection respiratoire (APR) – Appareil destiné à protéger un individu exposé à un risque d’altération de sa santé par l’inhalation d’un air contaminé par des gaz, vapeurs, aérosols (incluant les bioaérosols), ou par manque d’oxygène.

Approche lagrangienne – L’une des deux techniques qui permet de caractériser un écoulement. Elle consiste à suivre dans le temps les particules fines le long de leurs trajectoires.

Barboteur – Contenant qui contient un liquide dans lequel on fait passer de l’air et qui sert à piéger les aérosols.

Bioaérosols – Particules aéroportées constituées d’organismes vivants, tels des microorganismes, ou provenant d’organismes vivants, par exemple des toxines, des microorganismes morts ou des fragments de microorganismes.

Bronchoscope – Sonde ou appareil servant à visualiser l’appareil bronchique et respiratoire.

Commensal (commensaux) – Différentes espèces de microorganisme qui vivent en association profitable, sans danger pour les autres.

Coloscope – Sonde ou appareil servant à faire l’examen visuel du colon.

Cultivable – Microorganisme qui prolifère sur une gélose.

Diamètre aérodynamique – Diamètre d’une sphère à la densité normalisée de 1 g/cm³ qui a la même vitesse de décantation dans l’air immobile ou fluide que les particules elles-mêmes.

Diamètre aérodynamique médian en nombre (DAM) – Diamètre aérodynamique pour lequel 50 % du nombre total de particules possède un diamètre inférieur.

Diffusion – Transfert de masse associé aux mouvements aléatoires des molécules ou des particules sous l’effet d’une différence de concentration.

Dose infectieuse – Quantité de microorganismes nécessaire pour causer une infection chez son hôte.

Facteur de protection caractéristique – Valeur recommandée qui fournit un indice de la protection offerte par un APR. Plus ce facteur est élevé, plus la protection est élevée.

Gouttelette – Particule liquide.

Granulomètre – Appareil de mesure qui donne les dimensions (granulométries) des aérosols.

Groupe de risque – Classification des microorganismes selon leur caractère pathogène en quatre groupes, du plus faible au plus élevé.

Impaction – Particules collectées suite à un impact sur un milieu collecteur.

Infection – Résultat de la pénétration et du développement dans un être vivant de microorganismes qui peuvent provoquer des lésions en se multipliant et éventuellement en sécrétant des toxines ou en se propageant par voie sanguine.

Mode – La valeur la plus représentée d'une variable dans une population.

Modèle eulérien de glissement – L'une des deux techniques qui permettent de caractériser un écoulement. Il décrit le champ de vitesses associant à chaque point un vecteur vitesse. La photographie avec un temps de pose assez court d'un écoulement muni de particules colorées permet de visualiser des éléments de ce champ de vitesses à un instant donné.

Noyau de gouttelette – Gouttelette produite lors d'une toux ou d'un éternuement qui s'est asséchée.

Opportuniste – Germe habituellement peu agressif, mais qui est susceptible de provoquer de graves complications en affectant des personnes ayant un système immunitaire affaibli.

Particule – Petite partie de matière solide ou liquide.

Particule fluorescente – Particule d'origine biologique qui réagit à une excitation ultra-violettes comprise entre 420 et 575 nm.

Particule non fluorescente – Particule amorphe qui ne réagit pas à l'excitation ultra-violettes.

Pathogène – Capacité à provoquer des infections chez son hôte.

Poussière – Aérosol de particules solides.

Réaction en chaîne par polymérase – Technique extrêmement flexible de copie d'ADN.

Salle de retraitement – Endroit où l'on nettoie les endoscopes (bronchoscopes, coloscopes, etc.) avant leur stérilisation.

Saprophyte – Organismes qui ont besoin de carbone pour se nourrir.

Scalaire passif – Toute grandeur suffisamment définie par un nombre arithmétique exprimant sa mesure en unités appropriées.

Séroconversion – Phase au cours d'une maladie infectieuse où les anticorps apparaissent suffisamment dans le sang pour qu'on puisse les doser.

Simulation numérique des écoulements – Exécution de programmes sur un ordinateur dans le but de simuler un phénomène physique réel comme les écoulements d'air dans une pièce.

Techniques de biologie moléculaire – Ensemble des techniques de manipulation d'acides nucléiques (ADN, ARN) appelée aussi technique de génie génétique.

Thermophorèse – Phénomène observé dans les préparations de particules en mouvement où les différentes catégories de particules présentent des réponses différentes lorsqu'elles sont soumises à un gradient de température.

Trachéostome – Ouverture pratiquée de manière chirurgicale dans la trachée haute sous le larynx pour inspecter les voies respiratoires.

UFC – Unité formant des colonies. Il s'agit de l'unité de mesure pour des microorganismes viables croissant sur des géloses (milieux de culture). Une unité correspond à un microorganisme.

Valeur asymptotique – Valeur qui tend vers zéro.

Viable – Microorganisme vivant.

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

La bronchoscopie est une procédure de visualisation de l'intérieur des conduits respiratoires requise à des fins de diagnostic (p. ex. maladies des poumons comme un cancer ou la tuberculose, déformation congénitale des poumons, tumeur soupçonnée, obstruction, sécrétion, saignement, corps étranger dans les conduits respiratoires, anormalités) ou de thérapie (p. ex. extraction d'un corps étranger et sécrétions excessives des poumons) (Gui, 2008). L'instrument (bronchoscope) est inséré dans les conduits respiratoires le plus souvent par le nez et quelquefois par la bouche du patient ou occasionnellement par un trachéostome (Gui, 2008). Le bronchoscope peut être rigide et est constitué d'un tube métallique ayant un diamètre intérieur de 1 cm maximum sur lequel est fixée une source lumineuse. Ce genre de bronchoscopie cause beaucoup d'inconfort chez le patient. L'examen est donc exécuté sous anesthésie générale. Il s'agit de la procédure recommandée pour enlever des corps étrangers. Il existe également un bronchoscope flexible plus long et plus mince contenant des fibres optiques qui transmettent l'image à un oculaire ou à une caméra vidéo. Il peut être muni d'un équipement d'aspiration. Ce bronchoscope flexible cause moins d'inconfort que le rigide et est donc utilisé sous anesthésie locale. Toutes les bronchoscopies effectuées dans le cadre de ce projet utilisaient ce type de bronchoscope.

Les examens de bronchoscopie en milieu hospitalier sont effectués de façon routinière par du personnel spécialisé. L'ensemble des travailleurs impliqués dans ce type de procédure compte près de 1000 personnes (pneumologues, inhalothérapeutes et préposés).

Lors des examens de bronchoscopie, des aérosols provenant de la bouche et du nez du patient peuvent se retrouver en suspension dans l'air ambiant. Différentes procédures réalisées dans ces salles peuvent entraîner la production d'aérosols potentiellement pathogènes (administration de médicaments aérosolisés, intubation, réanimation cardiorespiratoire, aspiration des sécrétions respiratoires, etc.). Les aérosols ou bioaérosols résultants peuvent contenir et transporter des microorganismes pathogènes, tels des mycobactéries, des bactéries, des virus ou des moisissures. Ces microorganismes peuvent également être aérosolisés lors du nettoyage des endoscopes (bronchoscopes, coloscopes) dans une salle de retraitement après l'examen.

En santé et en sécurité du travail (SST), la ventilation joue un rôle primordial pour assurer la dilution et l'extraction efficace d'aérosols potentiellement pathogènes. Le débit d'air frais et la stratégie de ventilation ont une influence directe sur le risque de propagation des maladies infectieuses (Nardell et coll. 1991; Li et coll. 2007; Sundell et coll. 2011). Le niveau de ventilation minimal recommandé par la norme de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) 170-2008 pour une unité de bronchoscopie est de 12 changements d'air à l'heure dont deux en air frais (ASHRAE, 2008). C'est l'une des normes qu'utilisent le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) et la Société québécoise des infrastructures dans leurs recommandations aux hôpitaux. La salle doit être en pression négative et l'air aspiré du local doit être évacué à l'extérieur (ASHRAE, 2008). La différence de pression entre la salle et son environnement immédiat doit être de 2,5 Pa (ASHRAE, 2007). Afin de fournir un meilleur contrôle sur la différence de pression, l'ASHRAE recommande d'installer une antichambre à l'entrée de la salle (CDC, 2005; ASHRAE, 2007). Des études antérieures ont

démontré que, dans les salles de bronchoscopie, l'admission d'air frais provenant du plafond avec des bouches d'évacuation situées au bas du mur opposé, de 20 à 30 cm du sol, constituait la meilleure façon de maintenir des taux de contamination de l'air acceptables (ASHRAE, 2007). Selon nos discussions avec des personnes du milieu, très peu d'hôpitaux répondent à cette recommandation qui n'est pas une norme.

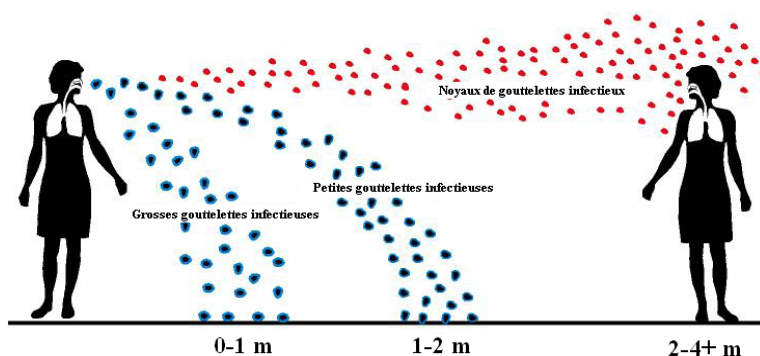
Soulignons qu'un plus grand taux de changements d'air ne donne pas toujours lieu à une diminution de l'exposition à cause de la présence d'obstacles environnants et de bioaérosols expulsés ou émis à grande vitesse comme lors des éternuements (environ 100 m/s) (Lavoie et coll. 2007; Yassi et Bryce, 2004). Même que, selon Nardell et coll. (1991), à cause de la relation logarithmique qu'il y a entre la ventilation et le risque infectieux, des taux élevés de ventilation ont des effets minimes sur les concentrations de bioaérosols infectieux. Ainsi, au Québec, le Comité ministériel sur les mesures de précaution contre le syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) recommandait d'augmenter le niveau de protection respiratoire pour les travailleurs impliqués dans les opérations de bronchoscopie (Comité ministériel sur les mesures de précaution contre le SRAS, 2004). Des recommandations similaires présentées par le Comité sur les infections nosocomiales du Québec (CINQ) dans le contexte des mesures à prendre en cas de pandémie d'Influenza, prônaient le port d'un appareil de protection respiratoire (APR) jetable avec filtres de type N95 (Recommandations du directeur national de santé publique pour la prise en charge de cas de grippe A(H1N1) dans les installations d'hospitalisation et les installations d'hébergement des établissements de santé du Québec, 2009). De plus, ce même comité recommandait, en 2011, dans un avis sur « l'Évaluation du risque et opinion sur le port d'un appareil respiratoire de type N95 dans le retraitement d'un bronchoscope potentiellement exposé au bacille tuberculeux », que des études de caractérisation des aérosols générés lors du retraitement des bronchoscopes soient conduites par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) (Comité sur les infections nosocomiales du Québec (CINQ), 2011). Parallèlement, une requête du 30 juillet 2010 adressée à l'IRSST par le Centre provincial de référence en stérilisation (CPRS) mentionnait l'inconfort et l'impact que pouvait occasionner le port obligatoire d'un APR N95 lors d'une bronchoscopie. Dans cette requête, le Centre demandait conséquemment de statuer sur le port d'un masque en documentant la présence de bioaérosols lors de cette opération et d'examiner d'autres moyens pour les contrôler, particulièrement la ventilation, la protection respiratoire demeurant une solution de dernier recours. Des APR ayant des facteurs de protection caractéristique supérieurs au N95 pourraient être requis selon les concentrations retrouvées si le contrôle à la source ne peut démontrer son efficacité (Comité ministériel sur les mesures de précaution contre le SRAS, 2004).

1.2 État des connaissances et objectifs de la recherche

Les départements de bronchoscopie en milieu hospitalier sont parmi les plus à risque pour la transmission des maladies infectieuses aéroportées (Nardell et coll. 1991; Beggs et coll. 2003; Comité ministériel sur les mesures de précaution contre le SRAS, 2004; Li et coll., 2007; Gui, 2008; Recommandations du directeur national de santé publique pour la prise en charge de cas de grippe A(H1N1) dans les installations d'hospitalisation et les installations d'hébergement des établissements de santé du Québec, 2009). Les recherches dans le milieu hospitalier démontrent une forte association entre la ventilation, les mouvements d'air dans les édifices et la transmission et la propagation d'agents biologiques pathogènes aéroportés causant des maladies infectieuses comme les oreillons, les pneumonies, la tuberculose, l'influenza, la varicelle, la

variole, le SRAS, etc. (Malasky et coll. 1990; Nardell et coll. 1991; Schwartzman et coll. 1996; Gui, 2008; ASHRAE, 2009; CINQ, 2011).

Les bronchoscopies et les intubations endotrachéales stimulent le réflexe de la toux chez les patients (Loudon et Spohn, 1969; Malasky et coll. 1990). Cette toux lors de l'intubation représente possiblement le principal processus de génération d'aérosols au moment des examens de bronchoscopie. Selon Duquid (1945), 95 % des gouttelettes liquides émises se situeraient entre 2 et 100 μm , la majorité se trouvant entre 4 et 8 μm . Selon Malasky et coll. (1990), la toux générerait des gouttelettes de dimension de 5 à 10 μm . Les aérosols liquides s'assèchent rapidement pour donner naissance à des noyaux de gouttelettes qui, selon Yassi et Bryce, se situeraient entre 0,1 et 10 μm dans le cas de la toux et d'un éternuement (Yassi et Bryce, 2004; Lavoie et coll. 2007). Par contre, Duquid (1945) mentionne que les noyaux de gouttelettes se retrouvent plutôt entre 0,25 et 4,2 μm avec une majorité entre 1 et 2 μm . Le phénomène d'assèchement des particules liquides débute immédiatement après leur émission. Ainsi, les temps d'assèchement des gouttelettes de 100 et 50 μm dans de l'air dont le taux d'humidité relative s'élève à 50 % sont respectivement de 1,3 et 0,3 seconde (Lenhart et coll. 2004). Yang et coll. (2007) ont mesuré un mode de noyaux de gouttelettes asséchées ayant entre 1 et 2 μm de diamètre et de 8,35 μm pour les gouttelettes liquides produites lors de la toux. La plupart des virus et des bactéries qui causent des maladies respiratoires chez les humains se retrouvent sur des noyaux de gouttelettes d'environ 5 μm (Yassi et Bryce, 2004; Lavoie et coll., 2007; Malasky et coll. 1990). Ce sont les dimensions des particules qui déterminent si elles peuvent être inhalées et retenues dans les voies respiratoires (Verreault et coll. 2008). Ce sont aussi les dimensions des particules qui font en sorte qu'elles sédimentent à une distance plus ou moins grande de la source. La Figure 1 illustre les distances parcourues par ces gouttelettes en fonction de leur granulométrie.



Dimensions : ($\cong$ entre 60 et 100 μm) ($\cong$ entre 10 et 60 μm) (< 10 μm)

Figure 1 : Distances parcourues par les gouttelettes en fonction de leur granulométrie (adapté de Welty, 2009).

Les noyaux de gouttelettes auraient un diamètre inférieur à environ 10 microns. À cette dimension, ils peuvent voyager sur de grandes distances avant de sédimenter. Selon Lenhart et coll. (2004), la définition d'une distance limite comme étant l'espace dans lequel un travailleur de la santé ne devrait pas pénétrer afin de ne pas s'exposer à des infections respiratoires est incorrecte. Les grosses gouttelettes infectieuses se déposent rapidement et en général ne sont pas

inhalées dans les poumons, car elles sont captées par les cils et le mucus contenus dans le nez et la bouche (Yassi et Bryce, 2004). Elles peuvent toutefois se déposer dans le pharynx si le travailleur de la santé est situé à proximité du patient infectieux (Yassi et Bryce, 2004). L'inhalation d'une seule microgouttelette contenant moins de trois bacilles tuberculeux peut provoquer une infection (Agence de la santé publique du Canada, 2007).

Les interventions susceptibles de provoquer la toux, comme la bronchoscopie, sont associées à une aérosolisation accrue de particules potentiellement infectées (Malasky et coll. 1990; Cinq, 2011). Certaines évidences supportent la survenue de cas de transmission de tuberculose à des travailleurs de la santé lors de la bronchoscopie (Malasky et coll. 1990; Schwartzman et coll. 1996). Une étude a démontré une incidence de séroconversion significativement plus élevée chez les résidents en pneumologie que chez ceux qui travaillent en infectiologie, pour une exposition équivalente (Malasky et coll. 1990). Une autre étude effectuée à Montréal a mis en évidence la relation entre la séroconversion à la tuberculose chez le personnel et un faible nombre de changements d'air ainsi que l'absence de pression négative dans les salles de bronchoscopie (Schwartzman et coll. 1996). Il en est de même pour les inhalothérapeutes dont le travail inclut l'assistance directe aux patients subissant une bronchoscopie (Menzies et coll. 2000).

Une étude canadienne portant sur 17 hôpitaux a démontré que le taux de conversion à la tuberculine chez les travailleurs de la santé exposés à des cas de tuberculose respiratoire était significativement associé à une ventilation inadéquate (moins de deux changements d'air à l'heure) dans les chambres des patients hospitalisés en médecine générale (Risque Relatif (RR) 3,4; Intervalle de Confiance (IC) 2,1-5,8) et à une ventilation inadéquate dans les salles de bronchoscopie (RR 6,1; IC 3,1-12,0) (Menzies et coll. 2000). Le risque d'infection augmente avec la durée du contact et l'intimité avec le patient (Noble, 1981; Malasky et coll. 1990). Il y a donc une relation étroite entre la ventilation et le risque d'infection (Sundell et coll. 2011). L'évaluation expérimentale de l'efficacité d'un système de ventilation n'est pas toujours possible et il est souvent difficile de généraliser les résultats expérimentaux en fonction des débits d'air admis, de l'aménagement de la pièce et de la position des grilles de soufflage et d'extraction.

La simulation numérique des écoulements (CFD) est une technique incontournable pour comprendre les mouvements de l'air et de chaleur dans les espaces fermés (Beggs et coll. 2008). La résolution numérique des équations de conservation de l'écoulement d'air peut contribuer à la compréhension des phénomènes de transport et de diffusion des contaminants gazeux et particulaires dans les hôpitaux. L'influence du débit et de la température de l'air de soufflage ainsi que la stratégie de ventilation peuvent être étudiées sans avoir recours aux mesures expérimentales.

Hathway et coll. (2011) ont mené plusieurs expériences de dispersion de bioaérosols dans une chambre climatique. Leur objectif était de comparer et de valider les résultats obtenus par un modèle basé sur une équation de transport d'un scalaire passif et un modèle lagrangien. Ils concluent que les deux approches sont en mesure de prédire adéquatement la dispersion et le dépôt des bioaérosols dans un espace ventilé. Sun et Ji (2007) ont présenté une étude numérique et expérimentale sur le transport de gouttelettes produites par la toux dans un espace ventilé utilisant une approche lagrangienne où chaque gouttelette est soumise aux forces de gravité et de traînée. Les simulations ont montré que les gouttelettes d'un diamètre initial supérieur à 300 µm sédimentent très rapidement par opposition aux gouttelettes de plus petit diamètre (<10 µm) dont

le comportement aérodynamique s'apparente à celui d'un gaz. La diminution de la concentration des particules de plus grand diamètre est principalement due au mécanisme de sédimentation.

L'élimination par la ventilation et la déposition sur les parois de particules aéroportées dans une chambre isolée a été étudiée par Qian et coll. (2008). Ils ont montré que les particules fines sont extraites plus efficacement lorsque les grilles d'extraction sont situées au plafond par opposition à celles situées à la hauteur du plancher. Ces auteurs recommandent l'utilisation de grilles de soufflage et d'extraction situées au plafond. Cette démonstration va donc à l'encontre de la recommandation de l'ASHRAE pour les salles de bronchoscopie (ASHRAE, 2007) et du Centers for Disease Control and Prevention (CDC) pour le contrôle de la tuberculose (CDC, 2005).

Les travailleurs qui sont en contact avec des patients présumés ou confirmés atteints d'une tuberculose contagieuse devraient porter un appareil de protection respiratoire (APR) N95 ou l'équivalent même si la salle est ventilée adéquatement (Malasky et coll. 1990; Santé Canada, 1996; CDC, 2005). Il est cependant difficile de prédire avec certitude le diagnostic de tuberculose avant d'effectuer la bronchoscopie (Malasky et coll. 1990; Cinq, 2011).

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette recherche est de mesurer les concentrations totales de bioaérosols lors des bronchoscopies et du retraitement des bronchoscopes, et de proposer, le cas échéant, des mesures préventives ou correctrices en regard de la ventilation. Les objectifs spécifiques sont les suivants:

- 1) Établir la granulométrie et les concentrations totales de particules non fluorescentes et fluorescentes (bioaérosols) en temps réel avant, pendant et après les interventions;
- 2) Évaluer la granulométrie et les concentrations de microorganismes (cultivables et par biologie moléculaire) aux fins de validation des lectures en temps réel des bioaérosols totaux;
- 3) Mesurer, grâce à la mécanique des fluides numériques (CFD), l'efficacité des stratégies de ventilation, en fonction du nombre de changements d'air par heure, pour un scénario « typique » d'intervention en bronchoscopie;
- 4) Proposer les mesures préventives collectives et personnelles en matière de gestion du risque professionnel.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Choix des salles

Deux salles de bronchoscopie situées dans deux hôpitaux du Québec et une salle de retraitement ont été étudiées. Le choix a été fait en fonction des paramètres de ventilation. Les salles de bronchoscopies ont été identifiées avec l'aide de la Société québécoise des infrastructures.

La première salle de bronchoscopie évaluée se retrouve à la Figure 2 (voir page 12). Selon ses concepteurs, elle répond aux normes actuelles de ventilation de l'ASHRAE et de l'American Institute of Architects (AIA) utilisées pour la conception des départements de bronchoscopie (AIA, 2006; ASHRAE, 2008). Pour cette raison, elle sera nommée, dans le présent document, « salle contrôle ». Elle est dotée de grilles d'admission et d'extraction d'air situées à chaque extrémité du plafond. Son volume est de 79 m³. Cette salle est conçue pour être en pression négative par rapport à son antichambre. Le nombre de changements d'air théorique par heure devrait être de 12 afin de correspondre à celui recommandé par la norme ANSI/ASHRAE/ASHE 170-2008.

Le volume de l'autre salle évaluée est de 59,8 m³ (voir Figure 3). Cette salle est équipée, au-dessus de la civière, d'un écran ACL qui descend du plafond jusqu'au centre de la pièce. Les équipements nécessaires à l'examen, dont le bronchoscope, sont placés sur un plateau à côté de la civière. Cette salle a deux entrées, l'une servant au passage de la civière sur laquelle repose le patient et l'autre donnant sur une pièce d'entreposage du matériel. La ventilation générale de la salle d'attente et de traitement provient du même système et repose sur le principe de dilution. On référera à cette salle dans le présent document par l'appellation « salle étudiée ».

Durant les journées de prélèvements, 10 bronchoscopies ont été effectuées dans la salle étudiée et 5 dans la salle contrôle. Pour chaque salle, les prélèvements ont été pris durant une journée complète. Les mesures ont été prises consécutivement pour toutes les étapes des opérations de bronchoscopie à partir de l'accueil du patient jusqu'à son départ. Les prélèvements ont tous été réalisés en poste fixe à proximité des opérations de bronchoscopie et en aval du courant d'air par rapport au patient. Lors des bronchoscopies, les instruments de mesure ont été installés à l'intérieur d'un rayon de 1,5 m de la bouche du patient. Cette disposition a été prise à la demande des pneumologues et des inhalothérapeutes afin de ne pas nuire à leur travail. À proximité les uns des autres, tous les appareils de prélèvement étaient à l'intérieur d'une zone d'environ 80 cm, afin de permettre une meilleure comparaison entre les échantillons.

Les prélèvements visant à établir les concentrations de base ou bruit de fond ont été effectués au début de la journée avant le commencement des bronchoscopies et après l'installation du matériel d'échantillonnage. Les expérimentateurs ont par ailleurs invité le personnel hospitalier à ne pas entrer, autant que possible, dans la salle durant les mesures. Les concentrations de bioaérosols obtenues serviront de base de comparaison avec celles obtenues lors des bronchoscopies. D'autres prélèvements, effectués en fin de journée, après les bronchoscopies et dans des conditions similaires, servaient à évaluer le temps requis pour que les concentrations ambiantes de bioaérosols reviennent au même niveau que celles du début de la journée, équivalentes au bruit de fond.

Les prélèvements ont été faits avant, pendant et après les bronchoscopies. L'heure du début des prélèvements a été enregistrée pour tous et un numéro de période et de rang leur a été associé. Un numéro de période est alloué aux fins de comparaison entre les bronchoscopies. La période 0 correspondant pour toutes les bronchoscopies à l'insertion du bronchoscope dans les voies respiratoires, au tout début de l'intubation. En conséquence, les périodes avec des numéros négatifs correspondent aux prélèvements effectués avant l'intubation et incluent, par exemple, la préparation et l'arrivée du patient. Inversement les numéros positifs correspondent à des prélèvements ultérieurs à l'intubation, dont à ceux réalisés durant l'examen jusqu'à la sortie du patient.

En plus d'un membre de l'équipe de recherche, trois personnes en moyenne, soit le médecin, l'infirmière et le patient, sont présentes dans la salle de bronchoscopie. Un va-et-vient continu a été observé dans la salle contrôle et la salle évaluée à tel point qu'on y a noté jusqu'à sept personnes lors d'une bronchoscopie.

La salle de retraitement, qui a été spécialement aménagée pour le nettoyage des bronchoscopes et des coloscopes, se situe dans le même hôpital que la salle étudiée. De géométrie linéaire, on y retrouve quatre lavabos de nettoyage appuyés contre l'un des murs (voir Figure 4). Le nettoyage consiste, premièrement, à essuyer la gaine extérieure du bronchoscope ou du coloscope avec une compresse imbibée de solution enzymatique afin d'éliminer les souillures visibles et à aspirer, par la suite, les canaux des appareils avec une solution enzymatique; l'opération se termine par un rinçage à l'eau tiède. L'aspiration se déroule dans le lavabo rempli d'une solution enzymatique où le bronchoscope ou le coloscope y sont également brossés. Après rinçage, on sécurise les parties fragiles (caméra de l'embout distal) à l'intérieur d'un plateau de transport recouvert d'un champ protecteur; ce dernier est alors acheminé à la centrale de stérilisation. À cause de la présence de deux postes de travail, seuls deux nettoyages peuvent être opérés en parallèle. Cinq préposés sont habilités à effectuer cette tâche. Les prélèvements ont été réalisés durant une journée complète pendant les opérations de nettoyage. Le nombre de nettoyages ne correspond pas à celui des bronchoscopies, car les mesures ont été effectuées une journée différente. Les appareils de prélèvement ont été installés à proximité et à mi-chemin des deux postes de nettoyage dans une configuration isocèle par rapport au lavabo.

2.2 Concentrations et granulométries des particules fluorescentes et non fluorescentes

Les concentrations et les granulométries des aérosols émis lors des examens de bronchoscopie ont été mesurées en temps réel, en poste fixe, à l'aide d'un granulomètre aérodynamique à fluorescence (UV-APS Model 3314, TSI, Minnesota, USA) qui utilise une longueur d'onde d'excitation de 355 nm et mesure la fluorescence ultraviolette entre 420 et 575 nm (TSI Inc., 2010). Cette longueur d'onde est considérée comme propre aux microorganismes. Le UV-APS permet à l'utilisateur de distinguer la fraction biologique associée à la fluorescence et celle qui est non biologique. Il établit également la structure fine ou la granulométrie d'un aérosol, de façon quasi instantanée, pour les particules dont le diamètre aérodynamique se situe entre 0,5 et 15 µm. Cette gamme de diamètres correspond aux diamètres des particules susceptibles d'atteindre les voies respiratoires inférieures. Cet instrument est indispensable à la réalisation d'un tel projet puisqu'une évaluation instantanée ne peut être effectuée avec les méthodes conventionnelles par culture ou par biologie moléculaire. De par ses caractéristiques, cet appareil

permet d'évaluer le temps nécessaire pour que les concentrations d'aérosols émis atteignent leurs niveaux de base et de les corréler avec les différents taux de ventilation. Aux fins de comparaison avec l'analyse des concentrations des aérosols, toutes les données obtenues à l'aide de l'UV-APS couvrent une durée de prélèvement de cinq minutes. Un total de 116 prélèvements de cinq minutes a été effectué soit 58 dans la salle étudiée de bronchoscopie, 30 dans la salle contrôle et 28 dans la salle de retraitement des endoscopes. Selon la littérature scientifique, un nombre supérieur à dix prélèvements est suffisant pour pouvoir démontrer des différences statistiquement significatives (Mulhausen et Damiano, 1998; American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1999; Goyer et coll. 2001; Drolet et coll. 2010).

2.3 Identification des bioaérosols

Les prélèvements de bioaérosols ont été effectués en utilisant trois échantillonneurs en parallèle: le Coriolis (Bertin Technology, France), le barboteur AGI-30 (SKC Inc, PA, USA) et l'impacteur microbien de marque Andersen dans sa version N-6 (Andersen Instruments Inc., GA, USA).

Le Coriolis est un échantillonneur qui effectue les prélèvements à un débit de 300 l/min. Le bruit causé par cet échantillonneur nuisait à la concentration du personnel chargé des examens de bronchoscopie et n'a pas été utilisé lors de la première journée d'intervention dans la salle étudiée. L'échantillonneur a été utilisé à un débit réduit à 150 l/min pour les échantillonnages subséquents, c'est-à-dire dans la salle de retraitement et dans la salle contrôle. À ce débit, le bruit est significativement réduit. Le temps de prélèvement pour cet appareil a été fixé à 10 minutes. Le débit du barboteur AGI-30 étant de 12,5 l/min, un temps de prélèvement de 20 minutes a été prévu. En revanche, pour des examens de moindre durée, le temps de prélèvement a été réduit. Ainsi, pour l'impacteur de marque Andersen dans sa version N-6 utilisant un débit de 28,3 l/min, un temps de prélèvement de cinq minutes a été retenu.

Les prélèvements avec ces trois échantillonneurs ont servi aux analyses pour les dénombrements et les identifications bactériennes par culture, soit par incubation directe des géloses après impaction avec l'Andersen ou après l'étalement sur gélose d'une fraction de l'échantillon liquide. Les identifications bactériennes ont été regroupées pour chaque patient. Les milieux de culture étaient composés du trypticase de soya additionné de 5 % de sang de mouton (Oxoid Inc, Ottawa, Canada). Les analyses par PCR (réaction en chaîne de la polymérase) ont été pratiquées sur les échantillons liquides prélevés à l'aide du Coriolis et du barboteur AGI-30. La PCR est une technique de biologie moléculaire, qui sert à détecter certains microorganismes pathogènes et à quantifier la flore bactérienne totale. Les systèmes d'amplification utilisés permettaient la détection des virus de l'influenza A et B et des bactéries du genre *Mycobacterium* en plus d'évaluer la charge bactérienne totale par l'amplification non sélective du 16S bactérien.

2.4 Analyses statistiques

Des tests de Student (tests *t*) ont été réalisés afin de comparer les moyennes des concentrations des particules fluorescentes et non fluorescentes avec leurs bruits de fond du début de la journée pour chacune des salles. Ensuite, les données ont été analysées à l'aide de tests d'analyses de variance à plusieurs facteurs et de comparaisons multiples (tests paramétriques de Tukey-Kramer). Elles ont été normalisées par une transformation logarithmique lorsque nécessaire afin de respecter les critères d'applicabilité des tests paramétriques utilisés. Le logiciel NCSS 2007 a

servi à réaliser l'ensemble des analyses statistiques. Lorsque pertinents, les résultats ont été exploités dans un modèle mathématique reposant sur des concepts de la mécanique des fluides (CFD) et des hypothèses de mélange de polluants dans l'air ont été traduites en équations mathématiques (AIHA, 2009).

2.5 Mesure du nombre de changements d'air par heure (CAH)

Le nombre de changements d'air par heure a été déterminé à l'aide de la technique des gaz traceurs de l'American Society for Testing and Materials (1993). Une concentration uniforme de gaz traceur, le SF₆, est d'abord établie dans la pièce à l'étude. Les concentrations en SF₆ sont ensuite mesurées en fonction du temps et à différents endroits (fractions volumiques en parties par milliard – ppb). Elles permettent d'estimer l'âge de l'air (age of air) aux différents sites de mesure avec la méthode décroissante et son taux de changement d'air. Les mesures de concentration du SF₆ ont été faites à une hauteur de 1,7 m, tel que recommandé dans la norme ASHRAE-55 (2004), avec un chromatographe portable à capture d'électron Autotrac (Autotrac modèle 101, Lagus Applied Technology Inc., California, USA). La précision de cet appareil est de $\pm 5\%$. Ces mesures ont permis d'obtenir les paramètres de ventilation de base pour la modélisation CFD et d'en valider les résultats.

2.6 Modélisation de la ventilation

La modélisation de la ventilation et du transport des bioaérosols est effectuée à l'aide du logiciel *Fire Dynamics Simulator* (FDS, version 6) basé sur la méthode de simulation des grandes échelles (*Large eddy simulation*) et développé par le National Institute of Standards and Technology (McGrattan et coll. 2013a). Ce logiciel est dans le domaine public et a fait l'objet de nombreuses études de vérification et de validation (McGrattan et coll. 2013b,c). Il est composé de plusieurs sous-modèles dont le plus important, pour la présente étude, est le modèle hydrodynamique à même de résoudre les équations de Navier-Stokes modifiées pour les écoulements à faible vitesse et thermiquement induits. Les dérivées partielles des équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par la méthode prédicteur/correcteur avec un schéma explicite dont la précision est du second ordre dans le temps et dans l'espace. La fermeture des équations est parachevée par la relation des gaz parfaits appliquée à un mélange.

Deux modèles ont servi à la modélisation du comportement aérodynamique des bioaérosols, le premier utilisant l'équation de transport d'un scalaire passif et le second, le modèle eulérien de glissement.

Étant donné la faible fraction massique des noyaux de gouttelettes, l'effet de ces derniers sur l'écoulement peut être négligé. De plus, la vitesse de sédimentation des noyaux de gouttelettes entre 0,1 μm et 10 μm est inférieure à 0,02 m par minute dans un environnement calme (Hinds, 1982). Dans un tel contexte, les noyaux de gouttelettes vont suivre les lignes de courant de l'écoulement créées par la toux et être ensuite transportés dans l'écoulement induit par le système de ventilation de la pièce. Les particules suivront de très près le comportement d'un scalaire passif. Avec ce modèle, les bioaérosols se comportent exactement comme un écoulement d'air. Ce modèle néglige l'inertie des particules, le champ de vitesse de ces dernières n'est pas résolu et il en résulte un champ de fraction massique exprimé en kg de bioaérosol par kg d'air. Cette fraction massique varie dans le temps et dans l'espace. Le modèle « scalaire passif »

implique que la ventilation et la respiration du personnel hospitalier soient les seuls mécanismes responsables de la diminution des concentrations de bioaérosols.

En tenant compte des hypothèses posées plus haut, l'équation de conservation des bioaérosols s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z) + \nabla \cdot (\rho Z \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) \quad (1)$$

où Z et $\mathbf{u}$ représentent respectivement la fraction massique de bioaérosols (kg/kg d'air) et le vecteur vitesse de l'écoulement d'air. La masse volumique de l'air est représentée par ρ et D est le coefficient de diffusion du contaminant.

En pratique, l'hypothèse selon laquelle les bioaérosols se comportent comme un scalaire passif n'est pas toujours valide. En effet, bien que l'inertie des noyaux de gouttelettes soit faible, plusieurs autres mécanismes peuvent être responsables du dépôt de ces noyaux sur les surfaces solides d'une pièce. Kramer et coll. (2006) présentent une revue de la littérature qui montre clairement la persistance de plusieurs agents pathogènes nosocomiaux sur les surfaces. Ces auteurs affirment, en particulier, que le bacille tuberculeux peut survivre entre un jour et quatre mois sur une surface sèche et constituer un mode de transmission non négligeable.

Le second modèle utilisé pour modéliser le transport des bioaérosols est nommé modèle eulérien de glissement (Zhao et coll. 2008). Le modèle de glissement, valable pour des particules de faible inertie, est basé sur la résolution d'une équation de transport d'un scalaire passif qui a été modifiée pour tenir compte de la sédimentation des particules. Comme dans le cas d'un scalaire passif (Éq. 1), le champ de vitesse des particules n'est pas résolu et on obtient un champ de fraction massique pour le bioaérosol.

Le FDS permet aussi l'utilisation d'un modèle eulérien de glissement qui tient compte de la sédimentation des particules et de la déposition turbulente aux parois. La thermophorèse est également un phénomène considéré dans le modèle numérique. Soulignons que ce logiciel ne considère pas l'agglomération des noyaux de gouttelettes et la resuspension des particules une fois que celles-ci sont déposées sur les parois. L'équation de conservation des bioaérosols pour le cas présent dans le modèle de glissement est similaire à l'équation 1 à laquelle on ajoute un terme supplémentaire.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z) + \nabla \cdot (\rho Z [\mathbf{u} + \mathbf{u}_{dep}]) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) \quad (2)$$

La vitesse de déposition aux surfaces solides ($\mathbf{u}_{dep}$) est évaluée par :

$$\mathbf{u}_{dep} = \mathbf{u}_g + \mathbf{u}_{th} + \mathbf{u}_{dt} \quad (3)$$

où $\mathbf{u}_g$ est la vitesse de déposition due à la gravité, $\mathbf{u}_{th}$ et $\mathbf{u}_{dt}$ représentant respectivement la vitesse de déposition thermophérique et turbulente. Chaque mécanisme de déposition est supposé être indépendant. Deux diamètres de noyaux de gouttelettes ont été considérés pour les simulations effectuées à l'aide du modèle de glissement. Ces diamètres ont été fixés à 2 et 5 μm et sont basés sur les travaux de Yin et coll. (2012).

La salle de bronchoscopie « contrôle » simulée dans le FDS est représentée schématiquement à la Figure 2. Deux diffuseurs carrés de $0,6\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ installés au plafond permettent la ventilation de la pièce. La grille de retour également aménagée au plafond a une surface de $0,09\text{ m}^2$. La direction du mouvement de l'air à travers deux diffuseurs (entrée d'air) et une grille de retour (sortie) est indiquée par des flèches blanches. On retrouve, en outre, trois tables, un lit, un écran ACL, des armoires et des espaces de rangement.

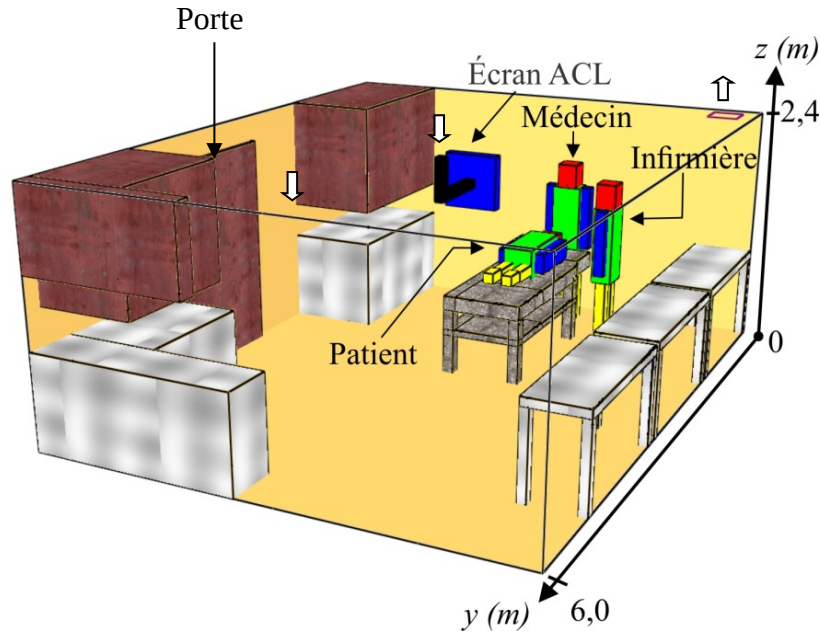


Figure 2 : Salle de bronchoscopie contrôle.

La Figure 3 présente la modélisation de la salle de bronchoscopie étudiée. La ventilation est assurée par un diffuseur double à fentes installés au plafond d'une longueur de $1,2\text{ m}$. Trois grilles de retour munies de ventilateurs et de filtres HEPA (*High Efficiency Particulate Air Filter*) permettent l'évacuation de l'air vers l'extérieur. Habituellement, la pièce est occupée par deux membres du personnel hospitalier (médecin et infirmière) et un patient en position horizontale. Quelques éléments tels un lit, un bureau, une armoire et un écran à cristaux liquides (ACL), complètent l'aménagement de la salle. La direction du mouvement de l'air est indiquée par des flèches blanches.

Les conditions aux frontières imposées dans le code numérique incluent la condition d'adhérence ($u_x = u_y = u_z = 0,0\text{ m/s}$) sur toutes les parois solides des pièces. Les occupants sont modélisés comme étant des sources de chaleur de 110 W pour le patient et 120 W pour le personnel hospitalier en action. Dans les salles de bronchoscopie, aucune source de chaleur n'est considérée en ce qui a trait à l'éclairage, car les interventions se font généralement sans éclairage. Un taux de transfert de chaleur de 40 W est toutefois imposé pour l'écran ACL situé au-dessus du patient, lequel est en fonction pendant toute la durée de l'intervention. La température de l'air aux bouches de soufflage est fixée à $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à la température mesurée à l'aide d'un anémomètre TSI Velocicalc 8347 d'une précision de $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les murs, le plancher et le plafond sont considérés comme adiabatiques. La condition frontière imposée aux bioaérosols varie en fonction du modèle choisi pour les simulations. Il n'y a aucun

transfert de masse aux frontières solides pour les modélisations basées sur la solution numérique de l'équation 1, soit le scalaire passif. Pour les modélisations effectuées avec l'équation 2, à savoir le modèle de glissement, la masse de bioaérosols déposée par unité de temps et unité de surface est fonction de la fraction massique de bioaérosols près des parois et la composante de la vitesse de dépôt dans la direction normale à la surface considérée. Au temps initial ($t = 0$ s), l'air est supposé immobile ($u_x = u_y = u_z = 0,0$ m/s) et la température est fixée à 20 °C dans tout le domaine de calcul. De plus, la fraction massique initiale de bioaérosols ($Z(t = 0$ s)) est nulle dans tout le volume des pièces modélisées.

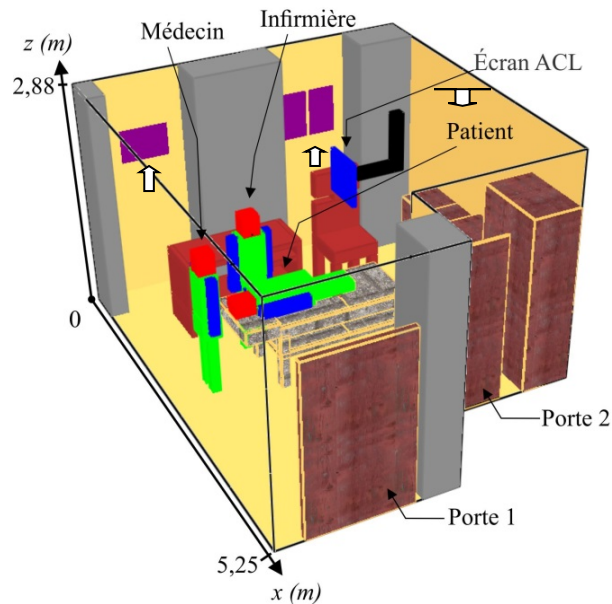


Figure 3 : Salle de bronchoscopie étudiée.

La salle de retraitement est présentée schématiquement à la Figure 4. Cette pièce est habituellement occupée par deux membres du personnel hospitalier qui se tiennent près des éviers 1 et 3. La salle de retraitement est ventilée par un diffuseur carré de $0,55$ m $\times$ $0,55$ m installé au plafond. La grille de retour de $0,3$ m $\times$ $0,3$ m est située au-dessus de l'évier 1.

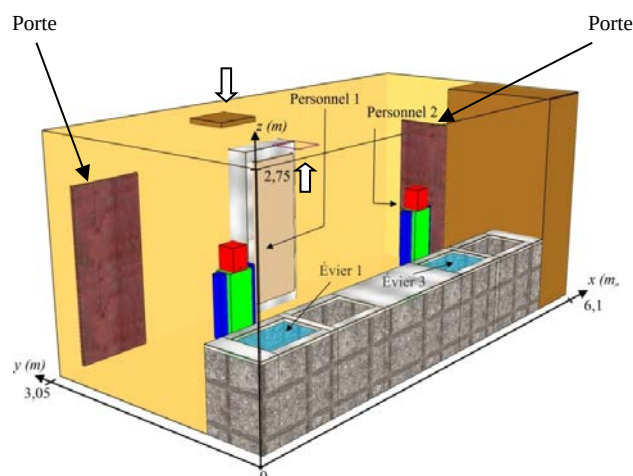


Figure 4 : Salle de retraitement.

La durée des interventions en bronchoscopie dure environ une vingtaine de minutes (intervalle de 10 à 45 minutes). Cette information a permis de fixer le temps total de la simulation à 20 minutes pour ces unités. La durée de la simulation du scénario associé à la salle de retraitement, fixée à 10 minutes, correspond approximativement au temps de nettoyage d'un bronchoscope.

Le Tableau 1 présente les débits de soufflage sélectionnés pour les trois pièces, pour quatre valeurs possibles de changements d'air par heure. La salle de bronchoscopie étudiée est en pression différentielle négative (≈ 5 Pa) par rapport au corridor adjacent. Les mesures ont confirmé que le débit d'extraction dans cette salle était légèrement supérieur au débit de soufflage, la différence provient principalement d'une infiltration d'air sous la porte 2 (Figure 3), sous l'effet de la dépressurisation. En effet, l'infiltration d'air sous cette porte a été mesurée et considérée dans le code numérique alors que l'infiltration d'air sous la porte 1 s'est avérée être négligeable. Les mesures effectuées dans la salle contrôle et dans la salle de retraitement ont montré que ces pièces n'étaient pas maintenues en pression différentielle négative. Par conséquent, aucun débit d'infiltration n'a été considéré.

Tableau 1 : Débits de soufflage sélectionnés pour les cas simulés.

CAH (h^{-1})	8	12	18	24
Salle étudiée (m^3/s)	0,064 (diffuseurs) 0,025 (infiltration)	0,149 (diffuseurs) 0,039 (infiltration)	0,231 (diffuseurs) 0,051 (infiltration)	0,299 (diffuseurs) 0,077 (infiltration)
Salle contrôle (m^3/s)	0,153	0,230	0,344	0,459
Salle de retraitement (m^3/s)	0,114	0,171	0,256	0,341

CAH : Nombre de changements d'air par heure

La respiration du personnel hospitalier est calculée lors des simulations en imposant pour la bouche une vitesse d'écoulement variant entre -0,67 m/s (inspiration) et 0,67 m/s (expiration), ce qui correspond à un débit d'air aspiré de 6 l/min (Qian et coll. 2008). La température de l'air expiré est 37 °C. La source des bioaérosols a été simulée au niveau de la bouche du patient par trois toux se produisant à 60, 120 et 180 secondes respectivement. Pour chaque toux, la vitesse de l'écoulement passait de 0 à 25 m/s en 0,1 s, puis diminuait linéairement jusqu'à 0 m/s dans un intervalle de 0,5 s. Ce profil de vitesse est similaire à celui utilisé par Redrow et coll. (2011). La contamination dans la salle de retraitement a été simulée à la hauteur des éviers 1 et 3 par une source d'émission massique constante de $Z = 1 \times 10^{-4}$ kg/kg avec une vitesse verticale de 5 cm/s.

La discrétisation temporelle et spatiale du domaine de calcul est essentielle à la résolution numérique des équations de conservation régissant l'écoulement d'air et le transport des bioaérosols. Dans le FDS, le domaine de calcul est discrétisé par un système de référence cartésien. Les éléments du maillage sont constitués de parallélépipède de volume ($\delta x \times \delta y \times \delta z$), où δx , δy , δz représentent les distances entre deux nœuds voisins dans les directions x , y et z respectivement. Le pas de temps est fixé de façon à respecter la contrainte de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Avec cette contrainte, une « particule fluide » ne peut parcourir plus d'une cellule à l'intérieur d'un intervalle de temps. L'indépendance de la discrétisation spatiale sur les résultats numériques a été déterminée par l'indice GCI (*Grid Convergence Index*) qui est utilisé pour évaluer l'erreur numérique sur la réponse liée à la qualité du maillage dans un domaine de calcul. Les résultats numériques présentés dans ce rapport ont exigé jusqu'à 100 heures de calculs (par simulation) sur un poste de travail doté d'un processeur Xeon 6 cœurs à 2.9 GHz (Intel, CA, USA). Il est donc important de choisir une densité de mailles « optimale » afin d'obtenir des résultats précis dans un délai raisonnable. Les caractéristiques des maillages retenus pour les simulations dans les trois pièces sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques des maillages retenus pour les simulations.

	Volume d'un élément en m^3 (minimum / maximum)	Nombre de nœuds dans le domaine de calcul
Salle étudiée	$6,2 \times 10^{-6} / 6,4 \times 10^{-5}$	1 407 456
Salle contrôle	$8,0 \times 10^{-6} / 5,4 \times 10^{-5}$	1 725 000
Salle de retraitement	$8,0 \times 10^{-6} / 7,7 \times 10^{-5}$	1 440 000

Les Figures 5 et 6 montrent les maillages utilisés dans le plan horizontal (x-y) pour la salle étudiée et la salle contrôle. On note sur ces figures que la densité de mailles est plus importante autour du personnel hospitalier et du patient, car c'est dans cette région que les gradients de concentration et de vitesse sont les plus importants. Étant donné qu'il n'y a pas de patient dans la salle de retraitement, cette dernière n'a pas été considérée dans la simulation.

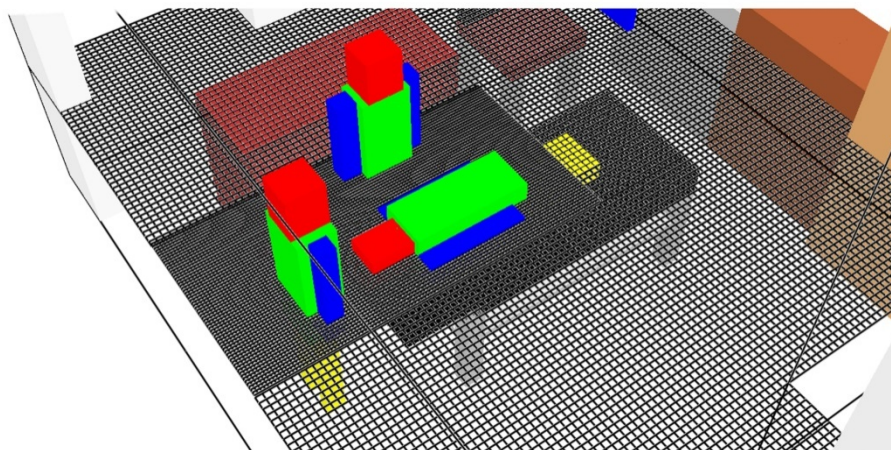


Figure 5 : Discrétisation spatiale près du personnel et du patient pour la salle étudiée.

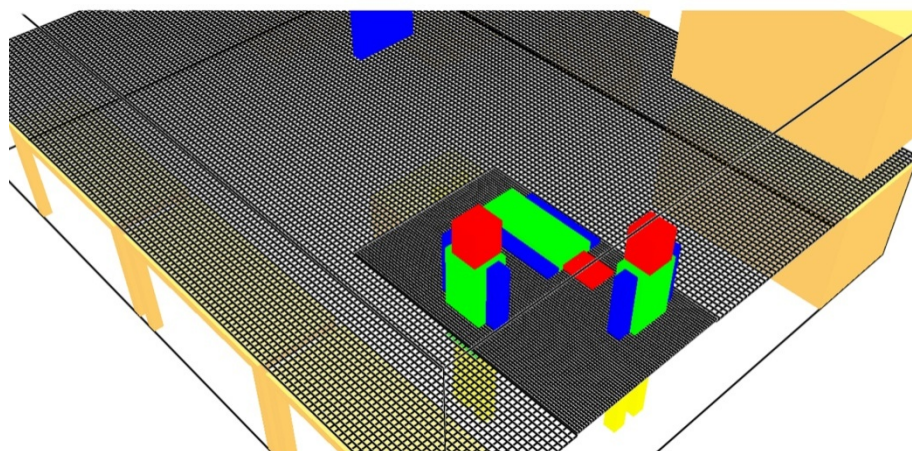


Figure 6 : Discrétisation spatiale près du personnel et du patient pour la salle contrôle.

3. RÉSULTATS

3.1 Particules non fluorescentes et fluorescentes (bioaérosols)

Les concentrations des particules non fluorescentes et fluorescentes (bioaérosols), mesurées avec l'UV-APS TSI 3314 pour les différentes salles, sont présentées au Tableau 3. Les concentrations dites totales sont calculées en effectuant la somme des particules non fluorescentes et fluorescentes. Les concentrations sont présentées pour chaque patient ainsi que pour chaque appareil qui a été nettoyé dans la salle de retraitement. Les résultats pour chaque patient sont donnés par rapport à l'heure, au rang dans la journée ainsi qu'en fonction du moment de l'introduction du bronchoscope. La période zéro représente le moment de l'introduction du bronchoscope dans les voies respiratoires. Le diamètre aérodynamique médian en nombre (DAM) est également fourni pour chaque type de particules et pour chaque période de cinq minutes de lecture successives.

Tableau 3 : Concentrations des particules totales, fluorescentes et non fluorescentes dans les différentes salles mesurées avec l'UV-APS 3314.

Salle	Prélèvements	Heure	Rang	Conc. Totale (#/m ³)	Conc. sans fluorescence (#/m ³)	Conc. avec fluorescence (#/m ³)	DAM ¹ total (µm)	DAM sans fluo (µm)	DAM fluo (µm)	Période ²
CONTRÔLE	Bruit de fond (début)	7h30	1	61399	48399	13000	1.72	1.11	3.11	-7
		7h40	2	25400	20200	5200	1.38	1.01	1.84	-6
		7h45	3	14800	12200	2600	1.37	0.95	1.75	-5
		7h55	4	34399	26999	7400	1.66	1.19	3.96	-4
		8h00	5	136397	107398	28999	1.49	1.04	3.41	-3
		8h05	6	81598	62399	19200	1.62	1.11	3.43	-2
		8h10	7	71399	51199	20200	1.57	1.03	3.81	-1
	Patient 1	9h13	8	2280155	2252555	27599	1.11	0.98	3.79	0
		9h18	9	727586	695986	31599	1.13	0.98	3.93	1
	Patient 2	9h33	10	16220083	16177084	42999	1.13	1.01	3.66	0
		9h38	11	4667506	4639907	27599	1.11	0.99	3.89	1
	Patient 3	9h53	12	12168355	12137356	30999	1.11	0.99	3.51	0
	Patient 4	10h58	13	71399	52799	18600	1.61	1.02	3.16	-1
		11h13	14	14913108	14888109	25000	1.10	0.98	3.51	0
		11h20	15	4227116	4209716	17400	1.08	0.97	2.95	1
		11h25	16	1101178	1085378	15800	1.08	0.97	3.07	2
		11h31	17	363193	348593	14600	1.10	0.96	3.76	3
		11h36	18	137797	126197	11600	1.15	0.94	3.28	4
		11h42	19	86198	65799	20400	1.68	1.07	4.25	5
		11h47	20	121598	85398	36199	2.01	1.19	3.86	6
		11h54	21	58399	37599	20800	2.46	1.17	4.28	7
	Patient 5	13h00	22	46199	30599	15600	1.74	1.10	2.39	-3
		13h41	23	44999	32399	12600	2.03	1.17	3.43	-1
		14h20	24	4921502	4893303	28199	1.06	0.95	3.54	0
		14h25	25	1414772	1398773	16000	1.06	0.95	3.52	1
		14h30	26	405592	388992	16600	1.06	0.93	3.49	2
	Bruit de fond (fin)	14h45	27	208996	174797	34199	1.51	1.08	3.75	3
		14h50	28	68399	58199	10200	1.61	1.10	3.38	4
		14h55	29	30599	23200	7400	1.55	1.08	3.75	5
		15h00	30	25400	18600	6800	1.85	1.10	3.38	6

¹ : DAM = Diamètre aérodynamique médian en nombre;

² : Les périodes sont données par tranche de 5 minutes;

0 correspond au début de l'examen de bronchoscopie ou du nettoyage des bronchoscopes et coloscopes.

Salle	Prélèvements	Heure	Rang	Conc. Totale (#/m ³)	Conc. sans fluorescence (#/m ³)	Conc. avec fluorescence (#/m ³)	DAM ¹ totaux (µm)	DAM sans fluo (µm)	DAM fluo (µm)	Période ²
ÉTUDIÉE	Bruit de fond (début)	7h34	31	455591	429991	25599	0.85	0.77	2.64	-5
		7h41	32	394992	382792	12200	0.82	0.76	2.10	-4
		7h47	33	356593	347593	9000	0.81	0.75	1.81	-3
		7h52	34	345593	337193	8400	0.81	0.75	2.29	-2
	Patient 1	8h00	35	381392	370993	10400	0.82	0.75	3.40	-1
		8h34	36	622588	574789	47799	0.88	0.79	2.62	0
		8h40	37	546589	527989	18600	0.84	0.77	1.83	1
		8h45	38	468791	442191	26599	0.85	0.77	2.86	2
		8h51	39	498590	473391	25199	0.85	0.78	1.98	3
		8h57	40	468791	451591	17200	0.84	0.77	3.52	4
		9h03	41	467391	449791	17600	0.84	0.77	2.81	5
	Patient 2	9h38	42	502990	470791	32199	0.85	0.78	2.26	0
		9h44	43	382192	367593	14600	0.85	0.78	2.02	1
	Patient 3	10h15	44	733385	667187	66199	0.90	0.80	1.62	0
		10h21	45	483390	457791	25599	0.85	0.78	2.55	1
		10h27	46	463991	444191	19800	0.85	0.79	2.39	2
		10h33	47	642988	641788	1200	0.90	0.80	3.19	3
	Patient 4	10h45	48	788184	716785	71399	0.94	0.82	2.75	-3
		10h52	49	578389	539590	38799	0.86	0.78	2.39	-2
		11h02	50	596989	564189	32799	0.86	0.79	2.48	0
		11h08	51	511390	493790	17600	0.84	0.78	1.91	1
		11h18	52	609188	558189	50999	0.89	0.80	2.81	3
	Patient 5	12h18	53	818784	765385	53399	0.90	0.81	3.06	-1
		12h24	54	642787	604988	37799	0.86	0.79	2.63	0
		12h30	55	568589	541790	26799	0.86	0.79	2.10	1
	Patient 6	12h42	56	722385	661787	60599	0.90	0.80	3.00	-4
		12h48	57	709186	647188	61999	0.90	0.80	2.82	-3
		12h53	58	655187	608588	46599	0.86	0.79	2.48	-2
		13h07	59	705387	675187	30199	0.87	0.80	2.23	0
		13h13	60	569789	540789	28999	0.86	0.79	2.91	1
	Patient 7	13h21	61	606788	559789	46999	0.88	0.80	2.58	-3
		13h30	62	664387	616388	47999	0.88	0.80	2.54	-2
		13h36	63	736385	696586	39799	0.90	0.81	2.91	-1
		13h49	64	627588	607789	19800	0.86	0.80	2.59	0
		13h54	65	733986	667387	66599	0.92	0.81	3.03	1
	Patient 8	14h02	66	751785	683787	67999	0.89	0.80	2.35	-7
		14h16	67	685787	641387	44399	0.86	0.79	3.30	-5
		14h22	68	659388	620788	38599	0.86	0.79	2.81	-4
		14h43	69	908581	856382	52199	0.88	0.81	2.96	0

Salle	Prélèvements	Heure	Rang	Conc. Totale (#/m ³)	Conc. sans fluorescence (#/m ³)	Conc. avec fluorescence (#/m ³)	DAM ¹ totaux (µm)	DAM sans fluo (µm)	DAM fluo (µm)	Période ²
ÉTUDIÉE	Patient 9	14h50	70	940982	846584	94398	0.93	0.81	3.00	-7
		14h57	71	796384	729385	66999	0.88	0.80	2.80	-6
		15h02	72	806784	739585	67199	0.90	0.80	2.81	-5
		15h08	73	747985	695586	52399	0.86	0.78	2.02	-4
		15h14	74	754585	728785	25799	0.84	0.77	1.78	-3
		15h20	75	788785	750985	37799	0.85	0.78	2.19	-2
		15h26	76	690386	663986	26399	0.84	0.78	2.51	-1
		15h40	77	637387	612788	24600	0.85	0.79	1.80	0
	Patient 10	15h48	78	657987	605589	52399	0.87	0.79	2.00	-2
		15h58	79	925181	862783	62399	0.93	0.82	2.16	-1
		16h04	80	682586	653587	28999	0.86	0.80	1.83	0
		16h12	81	569589	538990	30599	0.86	0.79	2.00	1
		16h17	82	510190	483590	26599	0.86	0.79	1.71	2
		16h23	83	508990	485390	23600	0.85	0.79	1.79	3
	Bruit de fond (fin)	16h29	84	1607368	1581768	25599	0.79	0.74	2.08	4
		16h34	85	1347373	1331774	15600	0.79	0.74	2.29	5
		16h39	86	653986	639586	14400	0.82	0.76	2.64	6
		16h49	87	523190	511590	11600	0.83	0.77	1.78	7
		16h50	88	507390	496790	10600	0.83	0.77	1.95	8

¹ : DAM = Diamètre aérodynamique médian en nombre;

² : Les périodes sont données par tranche de 5 minutes;

0 correspond au début de l'examen de bronchoscopie ou du nettoyage des bronchoscopes et coloscopes.

Salle	Prélèvements	Heure	Rang	Conc. Totale (#/m ³)	Conc. sans fluorescence (#/m ³)	Conc. avec fluorescence (#/m ³)	DAM ¹ totaux (µm)	DAM sans fluo (µm)	DAM fluo (µm)	Période ²
RETRAITEMENT	Bruit de fond (début)	7h56	1	793784	768184	25599	0.99	0.84	3.05	0
		8h01	2	721586	703186	18400	0.99	0.86	2.84	1
	B ³	8h57	3	887982	853583	34399	1.13	0.95	3.38	0
		9h03	4	728986	696986	31999	1.11	0.95	3.21	1
	C ⁴	9h18	5	942581	917981	24600	1.16	1.00	3.81	0
		9h23	6	5022698	4991499	31199	1.14	1.05	4.07	1
	B	9h44	7	1031380	1002780	28599	1.04	0.91	2.74	0
		9h50	8	1070179	1039779	30399	1.05	0.92	3.52	1
	B	10h03	9	2561147	2542148	19000	0.98	0.91	3.02	0
		10h09	10	1108779	1086179	22600	0.97	0.87	2.72	1
	C	10h18	11	3510530	3474331	36199	0.99	0.92	3.03	0
		10h24	12	1016780	995780	21000	1.03	0.91	3.38	1
	B	11h01	13	570588	556189	14400	1.04	0.90	3.05	0
		11h07	14	572988	558789	14200	1.01	0.87	2.70	1
	B / C	11h40	15	643987	614988	28999	1.03	0.88	3.03	0
		11h48	16	765385	745585	19800	1.03	0.90	3.25	1
	B / C	12h19	17	885582	865583	20000	0.98	0.84	4.02	0
		12h24	18	985980	970381	15600	0.99	0.88	3.74	1
	B	13h52	19	811584	787984	23600	0.98	0.83	3.21	0
		13h58	20	2663746	2635547	28199	1.06	0.96	3.59	1
	B	14h38	21	4279515	4258915	20600	1.00	0.93	3.23	0
		14h45	22	3901722	3880922	20800	0.98	0.91	3.64	1
	B	15h05	23	705186	652987	52199	1.00	0.85	2.07	0
		15h11	24	664787	639987	24800	0.99	0.86	2.46	1
	Bruit de fond (fin)	15h17	25	839783	775384	64399	1.05	0.87	1.89	0
		15h22	26	1128778	1013580	115198	1.19	0.92	2.70	1
		15h28	27	4047719	3981320	66399	1.07	0.98	2.26	2
		15h33	28	2965341	2917142	48199	1.07	0.98	2.43	3

¹ : DAM = Diamètre aérodynamique médian en nombre;

² : Les périodes sont données par tranche de 5 minutes;

0 correspond au début de l'examen de bronchoscopie ou du nettoyage des bronchoscopes et coloscopes;

³ : B = bronchoscope; ⁴ : C = coloscope.

3.1.1 Profils granulométriques lors des mesures de bruit de fond

La Figure 7 présente les concentrations de référence mesurées au début et à la fin de la journée. En début de journée, les concentrations présentées sont celles qui précèdent le début des examens et qui font suite à l'installation des équipements. Les mesures ont été prises dans les salles sans patient, avec les portes closes. Les périodes sur cette figure correspondent à des lectures faites aux cinq minutes et correspondent à celles du Tableau 3.

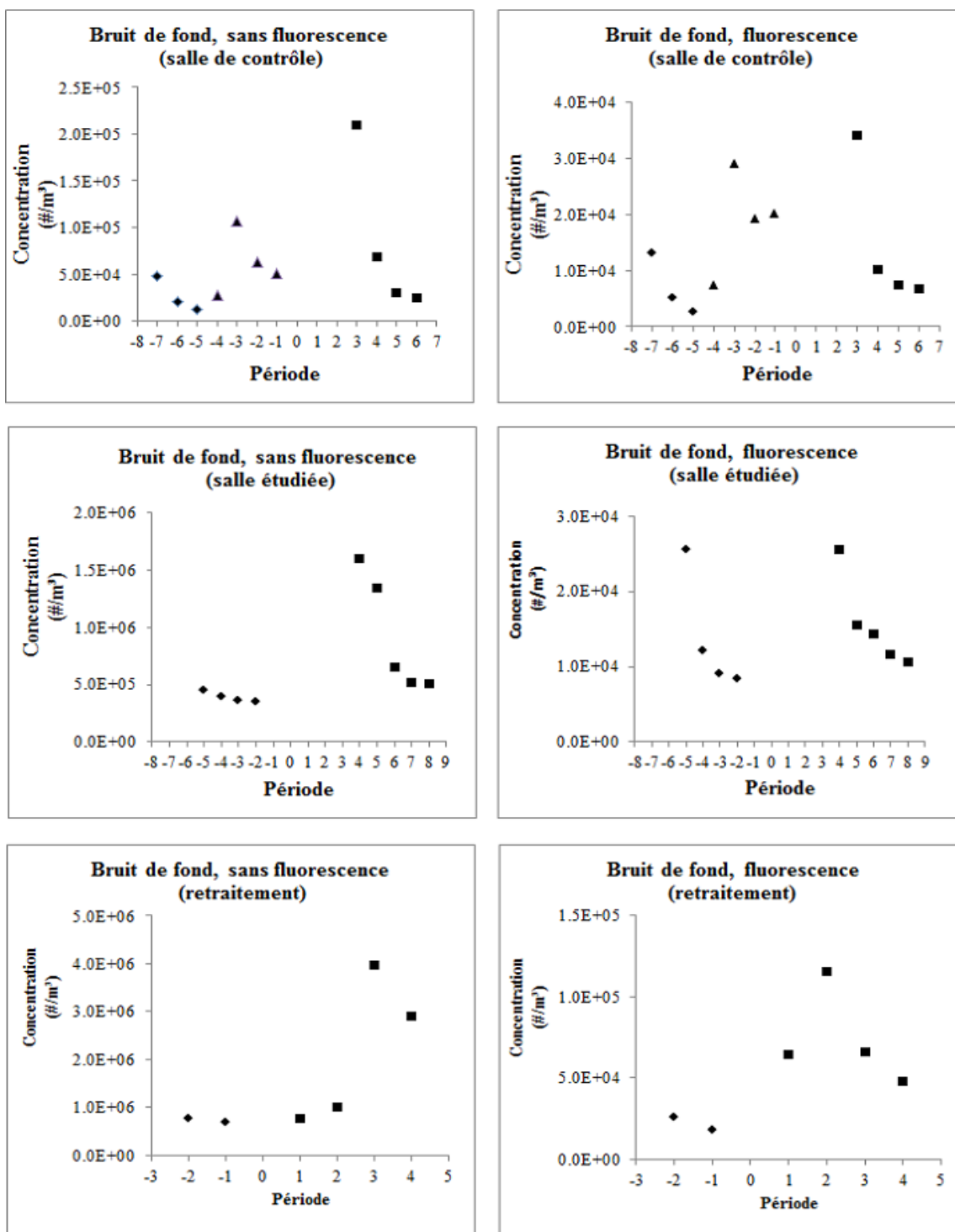


Figure 7 : Concentrations des particules avec et sans fluorescence (en nombre/ m^3), mesurées comme bruit de fond en début et à la fin de la journée pour les trois salles.

Le Tableau 4 illustre la dernière mesure utilisée à titre de bruit de fond en début et en fin de journée (concentrations de référence) pour les salles contrôle et étudiée. Pour la salle contrôle, les mesures obtenues pour les périodes -4, -3, -2, -1 dans le Tableau 3 ont été retirées, car l'entrée du personnel à ce moment dans la salle démontre une remise en suspension des particules et une augmentation des concentrations qui ne doivent pas être considérées à titre de bruit de fond. Le Tableau 5 présente les constantes de temps calculées à partir de la décroissance exponentielle de la première et de la dernière mesure des concentrations du bruit de fond en avant-midi. Il présente aussi les temps estimés pour que les premières valeurs du bruit de fond en après-midi retournent aux dernières valeurs de bruit de fond en début de journée. Les temps de retour au bruit de fond pour l'après-midi sont calculés en supposant la même décroissance exponentielle que celle calculée en avant-midi.

Tableau 4 : Dernière mesure de la concentration du bruit de fond pour les particules totales et pour les particules avec et sans fluorescence dans les deux salles de bronchoscopie (en nombre/m³).

Bruit de fond	Concentration (UV-APS, valeur finale)		
	Salle	Début de la journée	Fin de la journée
Particules totale	Contrôle	14800	25400
	Étudiée	345593	507390
Particules sans fluorescence	Contrôle	12200	18600
	Étudiée	337193	496790
Particules avec fluorescence	Contrôle	2600	6800
	Étudiée	8400	10600

Tableau 5 : Calcul des constantes de temps et du temps de retour au bruit de fond du début de la journée pour la salle contrôle et pour la salle étudiée.

Salle	Particules	Première mesure bruit de fond AM (#/m ³)	Dernière mesure bruit de fond AM (#/m ³)	Temps écoulé (min)	Constante de temps (min)	Première mesure bruit de fond PM (#/m ³)	Temps de retour au bruit de fond (min)
Salle contrôle	Totale	61399	14800	10	7	208996	19
	Sans fluorescence	48399	12200	10	7	174797	19
	Avec fluorescence	13000	2600	10	6	34199	16
Salle étudiée	Totale	455591	345593	15	54	1607368	83
	Sans fluorescence	429991	337193	15	62	1581768	95
	Avec fluorescence	25599	8400	15	13	25599	15

La Figure 8 montre les profils granulométriques moyens pour les fractions fluorescentes et non fluorescentes lors de la mesure du bruit de fond en début de journée (concentrations de référence). Les résultats sont présentés pour la salle contrôle, la salle étudiée ainsi que la salle de retraitement des bronchoscopes.

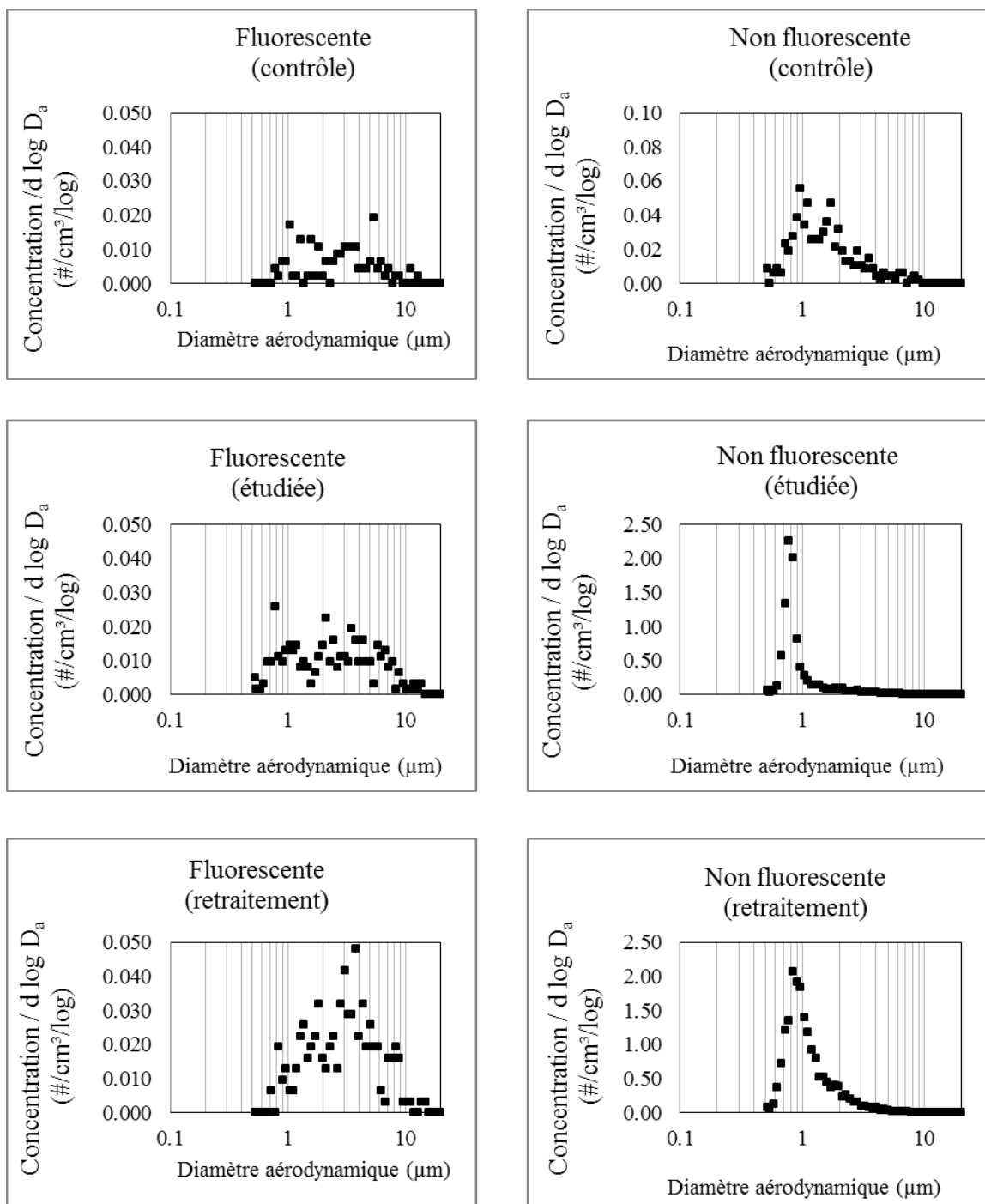


Figure 8 : Profils granulométriques moyens des fractions de particules fluorescentes et non fluorescentes présentes en début de journée (bruit de fond), pour les trois salles.

La Figure 9 présente les profils granulométriques moyens pour les fractions fluorescentes et non fluorescentes lors des mesures de bruit de fond à la fin de journée, c'est-à-dire après les derniers examens ou nettoyages. Les résultats sont présentés pour les trois salles. Ces profils permettent donc de visualiser les diamètres aérodynamiques moyens.

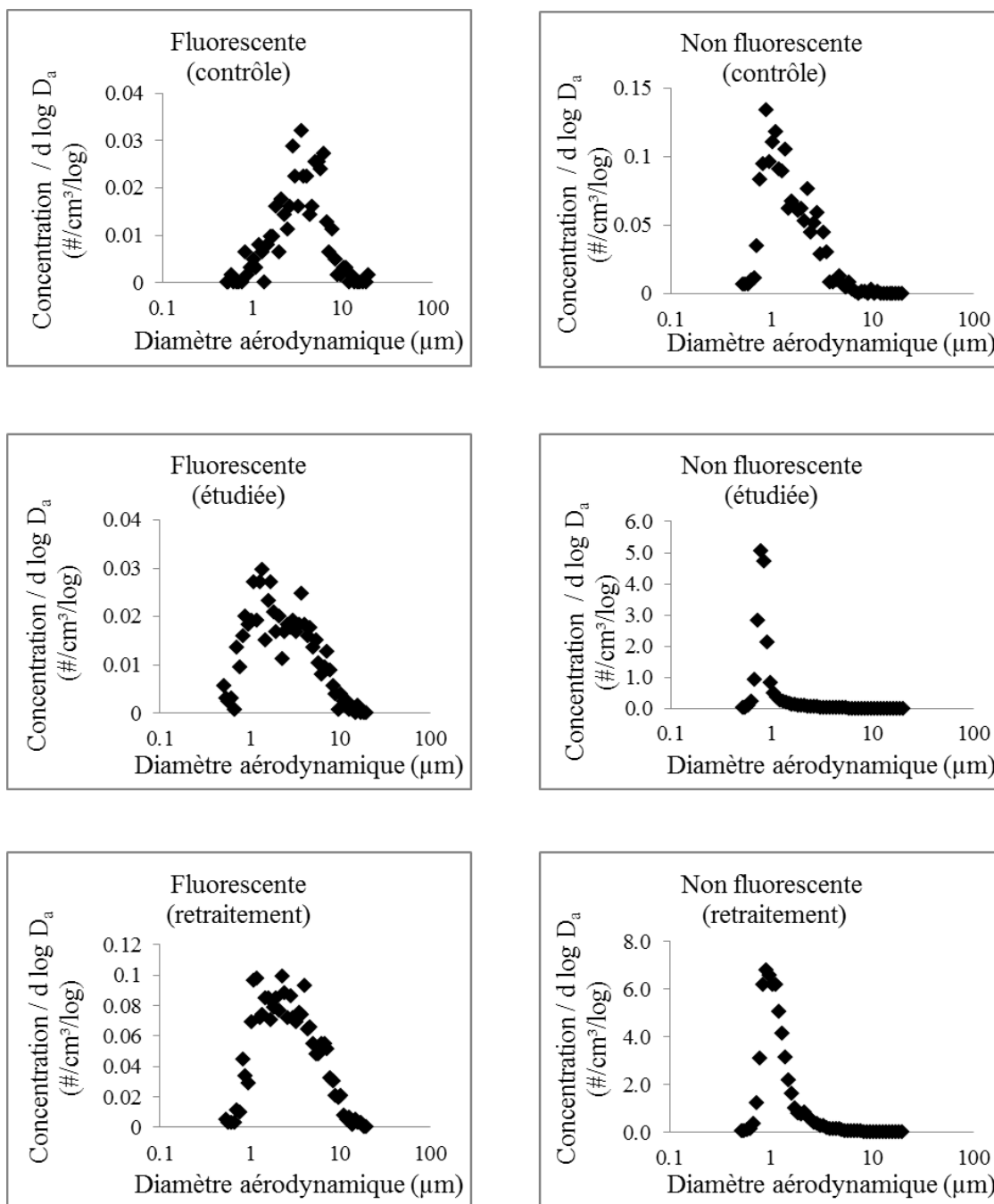


Figure 9 : Profils granulométriques moyens des fractions de particules fluorescentes et non fluorescentes présentes en fin de journée (bruit de fond), pour les trois salles.

3.1.2 Profils granulométriques lors des examens de bronchoscopie

La Figure 10 présente les profils granulométriques des fractions de particules fluorescentes et non fluorescentes lors de l'introduction du bronchoscope dans les voies respiratoires, exemple d'un patient par salle.

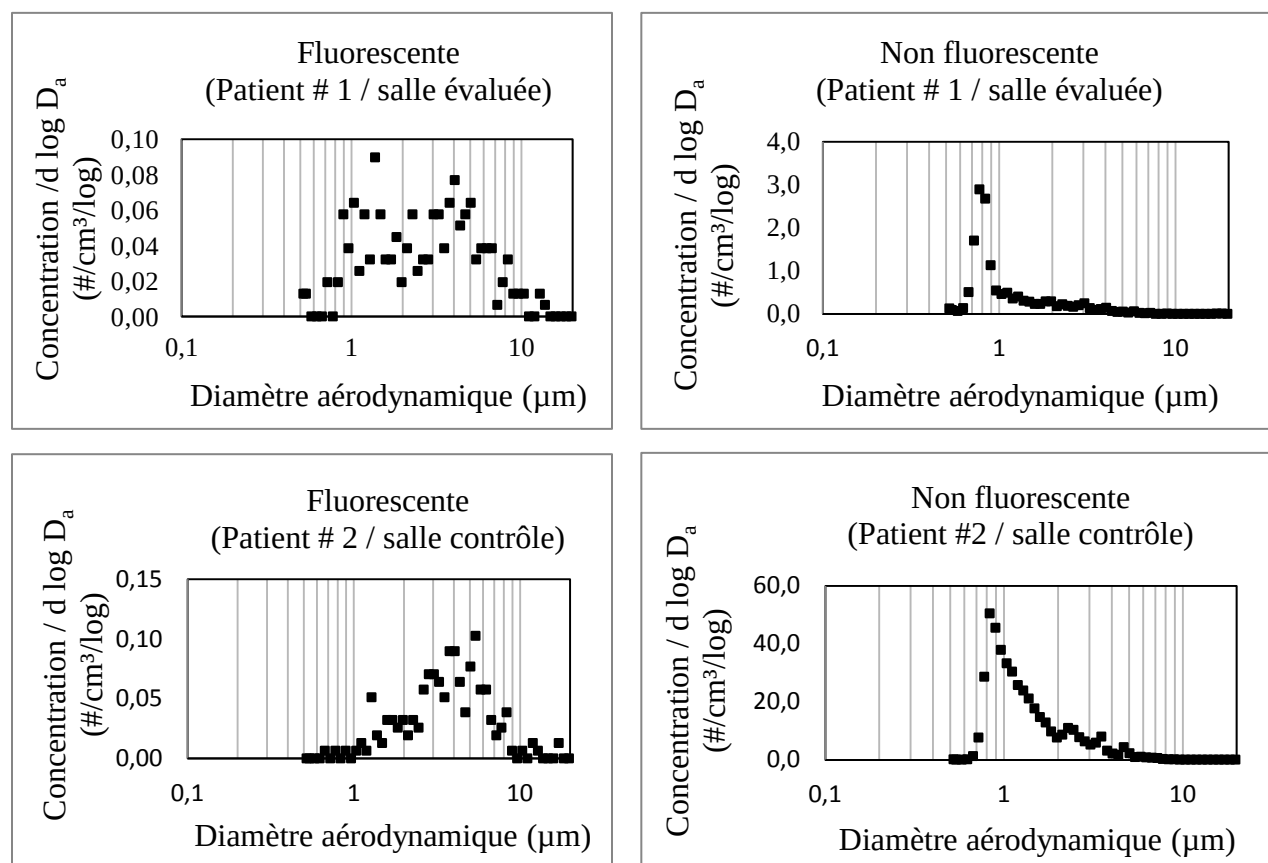


Figure 10 : Profils granulométriques des fractions de particules non fluorescentes et fluorescentes lors de l'introduction du bronchoscope dans les voies respiratoires d'un patient.

La Figure 11 présente les profils des fractions de particules fluorescentes et non fluorescentes obtenus en faisant la moyenne de tous les canaux de mesure pour la journée d'analyse. On peut observer sur ces profils que les diamètres aérodynamiques moyens des particules fluorescentes et non fluorescentes sont différents, les premiers étant plus élevés, de 3 à 5 μm , alors que les derniers se situent autour de 1 μm .

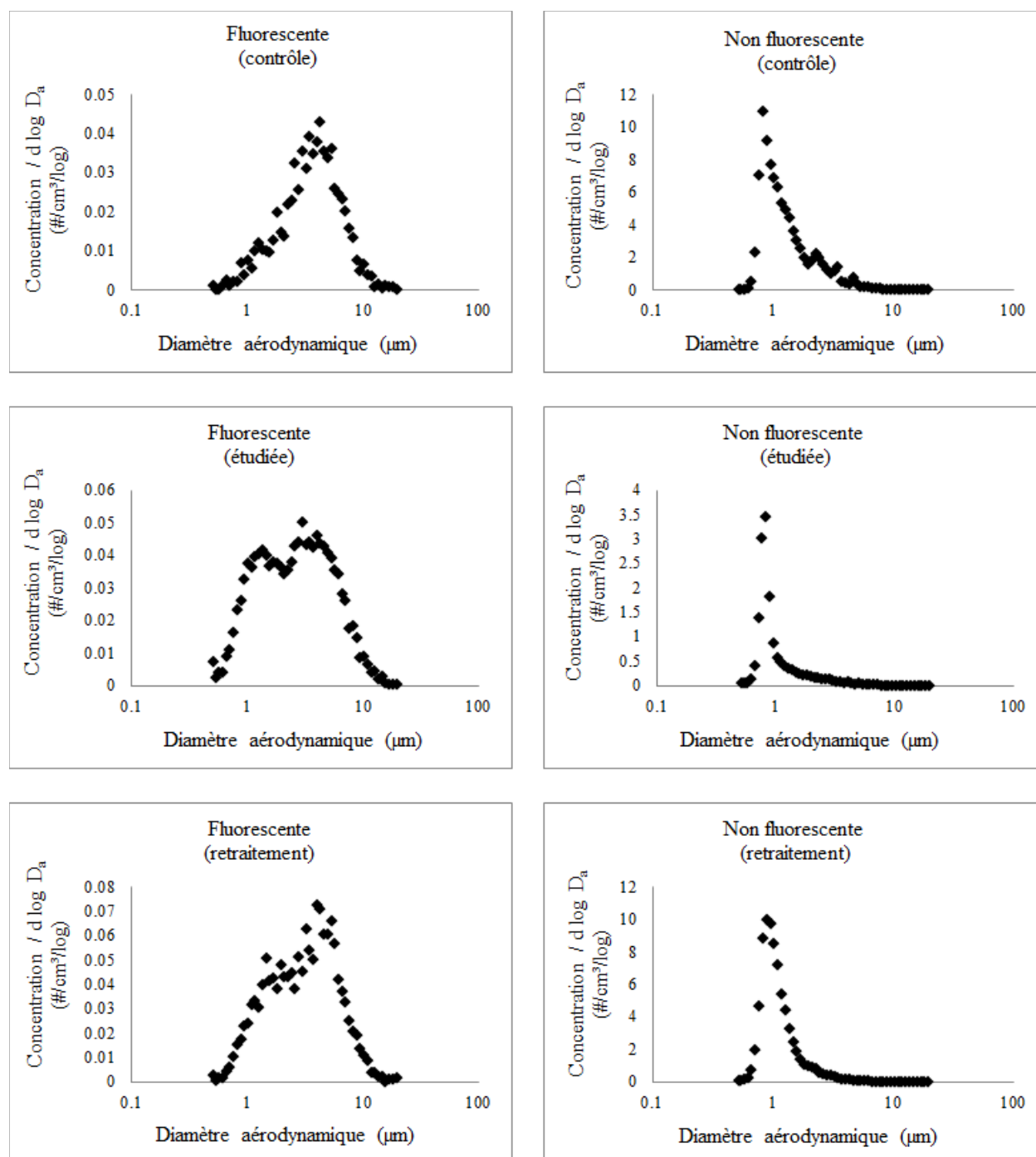


Figure 11 : Profils granulométriques moyens des fractions de particules fluorescentes et non fluorescentes lors des examens de bronchoscopie et des opérations de nettoyage des bronchoscopes à la salle de retraitement (moyenne journalière sans bruit de fond).

La Figure 12 présente, à titre d'exemple seulement, pour la salle contrôle, les concentrations des fractions de particules totales et fluorescentes en fonction de la période d'analyse par rapport au moment de l'introduction du bronchoscope dans les voies respiratoires du patient. La période zéro représente l'introduction du bronchoscope.

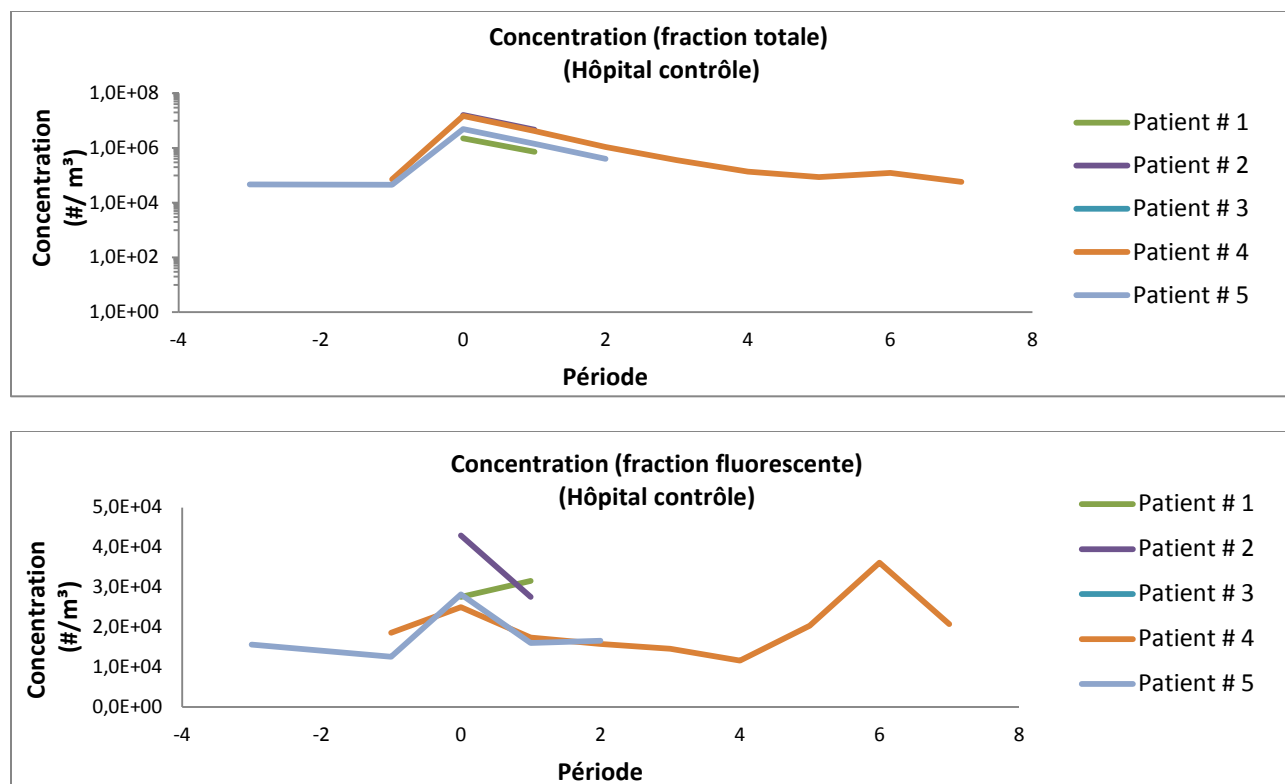


Figure 12 : Concentrations de particules des fractions totales et fluorescentes lors de l'introduction du bronchoscope dans la salle contrôle.

3.1.3 Bioaérosols cultivables

Les résultats de la mesure de la flore bactérienne cultivable sont présentés aux Tableaux 6, 7 et 8 pour les trois salles étudiées. Les identifications ont été réalisées en regroupant l'ensemble des échantillons prélevés pour un patient donné et en isolant les différentes colonies trouvées pour chaque patient. En raison de la très grande diversité des colonies présentes, l'accent a été mis sur les types de colonie les plus fréquemment rencontrés. La quantification de la flore totale par biologie moléculaire (sondes universelles du gène 16S) n'a pu être réalisée en raison d'une contamination des blancs de terrain (témoins) de l'échantillonneur Coriolis. Les analyses de biologie moléculaire pratiquées pour détecter des bactéries du genre *Mycobacterium* et des virus influenza A et B n'ont donné aucun résultat positif.

Tableau 6 : Identification et concentration des bactéries cultivables mesurées dans la salle contrôle.

Patient	Barboteur (UFC/m ³)	Coriolis (UFC/m ³)	Andersen ^a (UFC/m ³)	Identification bactérienne (Andersen)
Bruit de fond début journée	15		50 <7 29 150	<i>Dermaococcus nishinomiyaensis</i> , <i>Micrococcus</i> sp, <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Syaphylococcus xylosus</i> , <i>Corynebacterium</i> sp (GR2), <i>Staphylococcus warneri</i> , <i>Staphylococcus</i> sp, <i>Staphylococcus hominis</i>
1	58	5	64 57	<i>Acinetobacter radioresistens</i> , <i>Brevundimonas</i> sp, <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Corynebacterium</i> sp (GR2), <i>Micrococcus</i> sp, <i>Staphylococcus hominis</i>
2	44	16	129 71	<i>Bacillus circulans</i> , <i>Acinetobacter radioresistens</i> , <i>Corynebacterium</i> sp (GR2), <i>Corynebacterium aurissanis</i> (GR2), <i>Staphylococcus</i> sp, <i>Staphylococcus saprophyticus</i>
3	70	5	64	<i>Micrococcus luteus</i> , <i>Staphylococcus equorum</i> , <i>Micrococcus</i> sp, <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Corynebacterium</i> sp (GR2)
4	11	17	64 36 86 79 50 100 107 84	<i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Micrococcus</i> sp, <i>Bacillus</i> sp, <i>Paenibacillus pabuli</i> , <i>Staphylococcus intermidis</i> , <i>Staphylococcus heamolyticus</i> , <i>Staphylococcus hominis</i>
5	26	9	49 28 84	<i>Corynebacterium</i> sp (GR2), <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Streptococcus</i> sp (GR2), <i>Staphylococcus</i> sp, <i>Staphylococcus epidermidis</i>
Bruit de fond à la fin journée	177	26	114 43 21 <7	<i>Brevibacterium</i> sp, <i>Corynebacterium</i> sp (GR2), <i>Streptococcus</i> sp, <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Brevundimonas diminuta</i> , <i>Staphylococcus cohnii</i> , <i>Micrococcus</i> sp

^a Chaque nombre correspond à la concentration de bactéries mesurées pour un prélèvement de 5 minutes.

Tableau 7 : Identification et concentration des bactéries cultivables mesurées dans la salle étudiée.

Patient	Barboteur (UFC/m ³)	Coriolis (UFC/m ³)	Andersen ^a (UFC/m ³)	Identification bactérienne (Andersen)
Bruit de fond début journée	151	160	64 36 250 143	<i>Bacillus pumilus</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Micrococcus</i> sp, <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Staphylococcus pasteurii</i> , <i>Corynebacteriaceae</i> (GR 2), <i>Staphylococcus</i> sp, <i>Bacillus</i> sp
1	14		336 150 236 100	<i>Actinomycetes</i> (GR2), <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Micrococcus</i> sp, <i>Corynebacterium</i> sp (GR2) <i>Staphylococcus</i> sp, <i>Bacillus</i> sp, <i>Staphylococcus capitis</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Staphylococcus haemolyticus</i>
2	330		200 579 333	<i>Streptococcus pneumoniae</i> (GR2), <i>Streptococcus mitis</i> , <i>Streptococcus</i> sp, <i>Actinomycetes</i> (GR 2) <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Acinetobacter lwoffii</i> , <i>Neisseria</i> sp, <i>Staphylococcus</i> sp, <i>Micrococcus luteus</i>
3	<20		164 86 86 76	<i>Staphylococcus</i> sp, <i>Rothia</i> sp
4	31		193 107 108	<i>Streptococcus</i> sp, <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Rothia</i> sp
5	107		229 107 214	<i>Staphylococcus</i> sp, <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Dermabacter hominis</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Actinomycètes</i> (GR2)
6	50		71 26	<i>Escherichia</i> sp, <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Staphylococcus hominis</i>
7	<41		86 236	<i>Staphylococcus</i> sp, <i>Bacillus</i> sp, <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Micrococcus lylae</i> , <i>Streptococcus</i> sp (GR2), <i>Actinomycètes</i> (GR2)
8	<163		314	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus</i> sp, <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Corynebacterium</i> sp (GR2), <i>Staphylococcus haemolyticus</i> , <i>Staphylococcus capitis</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Micrococcus</i> sp
9	<97		57	<i>Micrococcus</i> sp, <i>Staphylococcus</i> sp, <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Actinomycètes</i> (GR 2)
10	89		36	<i>Corynebacterium pseudodiphtherium</i> (GR2), <i>Staphylococcus capitis</i>
Bruit de fond fin journée	<18 16	122 191 168 108	57 86 171 43 43 64 36 50	<i>Micrococcus luteus</i> , <i>Streptococcus</i> sp, <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Corynebacterium</i> sp (GR2), <i>Micrococcus</i> sp, <i>Staphylococcus capitis</i> , <i>Rhodococcus</i> sp, <i>Bacillus</i> sp, <i>Actinomycètes</i> (GR2), <i>Moraxella</i> sp

^a Chaque nombre correspond à la concentration de bactéries mesurées pour un prélèvement de 5 minutes.

Tableau 8 : Identification et concentration des bactéries cultivables mesurées dans la salle de retraitement.

Patient	Barboteur (UFC/m ³)	Coriolis (UFC/m ³)	Andersen ^a (UFC/m ³)	Identification bactérienne (Andersen)
Bruit de fond début journée		4	154 119	<i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Micrococcus luteus</i>
B ¹		4	105 126	<i>Bacillus clausii</i>
B		<3	63 119	<i>Staphylococcus hominis</i>
B		4	161 167	<i>Psychrobacter phenylpyruviens</i>
B		5	70 83	<i>Microbacterium barkeri</i>
C ²		<4	140 133	<i>Gordonia terrae</i> , <i>Bacillus</i> sp
B		6	98 14	<i>Corynebacterium</i> sp (GR2)
B & C		15	49 126	
B & C		4	193 44	<i>Staphylococcus epidermidis</i>
B		<6	161 91	<i>Pantoea dispersa</i>
B		<4	100 84	
B		17	70 14	<i>Bacillus circulans</i>
Bruit de fond fin journée		25 17		

^a Chaque nombre correspond à la concentration de bactéries mesurées pour un prélèvement de 5 minutes.

3.1.4 Analyses statistiques

Les statistiques descriptives (moyennes, écarts-types et moyennes géométriques) sont présentées aux Tableaux 9 à 11 pour les trois salles étudiées. Des tests de Student (tests *t*) ont été réalisés en comparant les moyennes des concentrations (incluant les moyennes géométriques) mesurées lors des bronchoscopies avec celles mesurées au début et à la fin de la journée (bruits de fond début et fin) pour chacune des salles.

Les concentrations des particules mesurées lors des bronchoscopies et du retraitement des bronchoscopes ont été comparées avec celles mesurées avant les opérations (bruit de fond début de journée). Pour les deux salles d'examen, les concentrations moyennes des particules non fluorescentes et fluorescentes sont significativement plus élevées ($p \leq 0,05$) lorsque comparées au bruit de fond mesuré en début de journée. La concentration moyenne de particules non fluorescentes dans la salle contrôle est 124 fois plus élevée durant les procédures que lors de la mesure du bruit de fond en début de journée tandis que celle des particules fluorescentes est trois

fois plus élevée (Tableau 9). Dans la salle étudiée, la concentration moyenne des particules non fluorescentes est de 1,6 fois supérieure alors que pour les particules fluorescentes elle est trois fois plus élevée que celle du bruit de fond établie au début de la journée (Tableau 10).

Tableau 9 : Résultats de l'analyse statistique descriptive des particules pour la salle contrôle.

	Particules sans fluorescence				Particules avec fluorescence			
	n	Moyenne des concentrations (±E.T.) (#/m³)	Moyenne géométrique des concentrations (#/m³)	DAM (moy.) (µm)	n	Moyenne des concentrations (±E.T.) (#/m³)	Moyenne géométrique des concentrations (#/m³)	DAM (moy.) (µm)
Bruit de fond (début)	3	26 933 (19 016)	22 848	1,06	3	6 933 (5 412)	5 601	3,04
Bronchoscopie	19	3 344 555* (5 219 242)	623 350*	1,02	19	22 640* (8 662)	21 190*	3,54
Bruit de fond (fin)	4	68 700 (72 910)	45 770	1,09	4	14 650 (13 120)	11 510	3,56

DAM : Diamètre aérodynamique médian;

* : Différence statistiquement significative ($p \leq 0,05$)

Tableau 10 : Résultats de l'analyse statistique descriptive des particules pour la salle étudiée.

	Particules sans fluorescence				Particules avec fluorescence			
	n	Moyenne des concentrations (±E.T.) (#/m³)	Moyenne géométrique des concentrations (#/m³)	DAM (moy.) (µm)	n	Moyenne des concentrations (±E.T.) (#/m³)	Moyenne géométrique des concentrations (#/m³)	DAM (moy.) (µm)
Bruit de fond (début)	4	374 390 (41 890)	372 690	0,76	4	13 800 (8 041)	12 400	2,20
Bronchoscopie	49	603 143* (119 344)	591 348*	0,79	49	40 362* (18 759)	36 063*	2,53
Bruit de fond (fin)	5	912 302 (507 872)	807 074	0,76	5	15 560 (5967)	14787	2,16

DAM : Diamètre aérodynamique médian;

* : Différence statistiquement significative ($p \leq 0,05$)

Tableau 11 : Résultats de l'analyse statistique descriptive des particules pour la salle de retraitement.

	Particules sans fluorescence				Particules avec fluorescence			
	n	Moyenne des concentrations (±E.T.) (#/m³)	Moyenne géométrique des concentrations (#/m³)	DAM (moy.) (µm)	n	Moyenne des concentrations (±E.T.) (#/m³)	Moyenne géométrique des concentrations (#/m³)	DAM (moy.) (µm)
Bruit de fond (début)	2	735 685 (45 961)	734 967	0,85	2	22 000 (5 091)	21 703	2,95
Lavage des bronchoscopes/ endoscopes	22	1 580 405 (1 374 327)	1 190 818*	0,91	22	25 600 (8 640)	24 370	3,22
Bruit de fond (fin)	4	2 171 857 (1 540 709)	1 738 161	0,94	4	73 549* (28 937)	69 804	2,32

DAM : Diamètre aérodynamique médian;

* : Différence statistiquement significative ($p \leq 0,05$)

Lors du retraitement, la concentration moyenne des particules non fluorescentes est deux fois plus élevée que lors de la mesure du bruit de fond mesuré au début de la journée (Tableau 11). Aucune différence significative n'a été observée pour les concentrations moyennes de particules fluorescentes lors du retraitement lorsque comparées aux bruits de fond du matin. Même si une différence significative n'a pas été démontrée lors des procédures de retraitement des bronchoscopes, il subsiste tout de même des variations importantes dans la granulométrie des particules lors du nettoyage par rapport au bruit de fond mesuré au début de la journée (réf. Figures 9 et 11). La différence significativement plus élevée retrouvée pour les bruits de fond à la fin de la journée par rapport aux opérations de lavage des bronchoscopes dans ce même local est soit le signe d'un nombre de changements d'air insuffisant dans cette pièce ou le fait de procédures effectuées qui ont remis en suspension les particules fluorescentes déposées.

Les Figures 13 à 15 présentent les résultats des tests de comparaisons multiples de Tukey-Kramer pour les différentes particules (non fluorescentes, fluorescentes et cultivables) pour les deux salles combinées. Les résultats pour les deux salles ont été combinés afin de déterminer si la période de la journée démontrait avoir un impact sur les concentrations et ce, indépendamment de la salle. La période d'attente correspond à la période avant l'introduction du bronchoscope et inclut l'arrivée du patient dans la salle ainsi que l'ensemble de la préparation de celui-ci. Deux lettres différentes indiquent une différence statistiquement significative ($p \leq 0,05$). Par exemple, les résultats des comparaisons multiples de Tukey-Kramer présentés à la Figure 13 démontrent que les concentrations des particules non fluorescentes mesurées lors des manipulations sont significativement plus élevées que celles mesurées lors des périodes d'attente ou lors des mesures de bruit de fond (concentration étiquetée par la lettre 'c' significativement différente des concentrations étiquetées par les lettres 'b' et 'a').

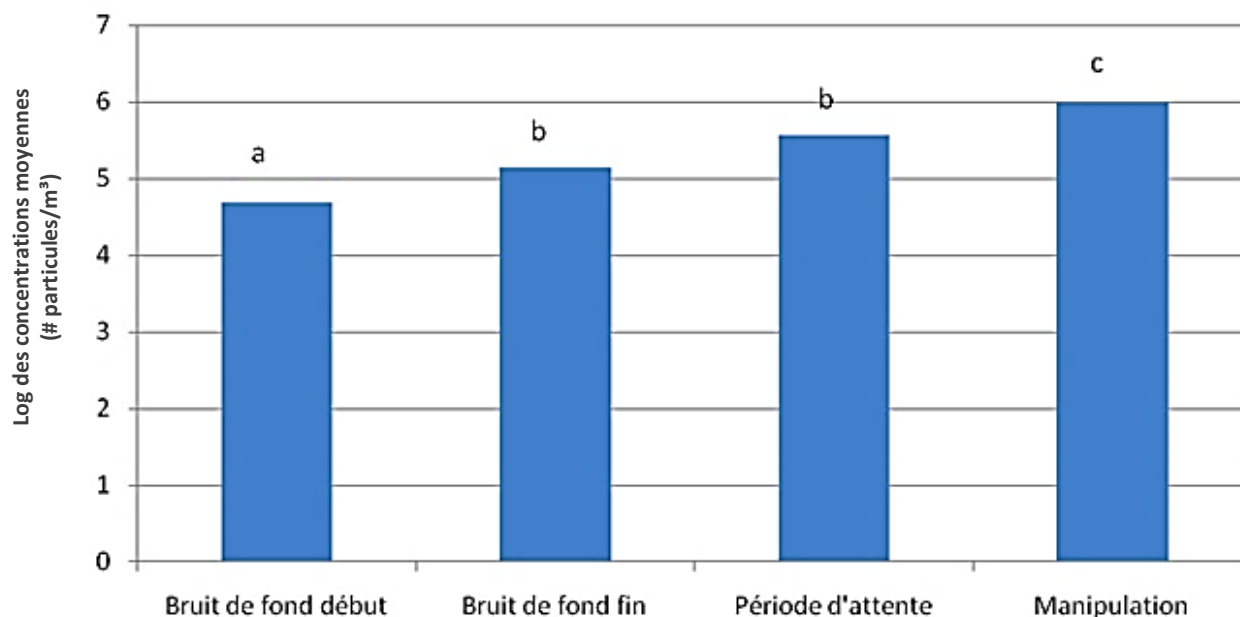


Figure 13 : Comparaisons multiples de Tukey-Kramer pour les particules non fluorescentes (deux salles combinées).

Une augmentation significative des concentrations de particules non fluorescentes est également observable entre le bruit fond du matin et la période d'attente. Il était raisonnable d'anticiper une telle augmentation. Elle peut être occasionnée par la remise en suspension de la poussière reliée au mouvement de la civière, aux déplacements du personnel dans la salle et à la préparation du patient par la nébulisation d'un sédatif dans le nez ou la bouche. Il est toutefois difficile d'expliquer qu'aucune différence significative n'ait été observée entre les concentrations mesurées lors de la période d'attente et celles mesurées comme bruit de fond en fin de journée. Les concentrations observées lors des manipulations, c'est-à-dire de l'examen, se sont avérées être significativement plus élevées que les concentrations mesurées lors des trois autres périodes évaluées. Cette étape de la bronchoscopie domine ainsi le processus de génération des aérosols et pourrait être occasionnée par l'introduction du bronchoscope, les multiples toux et rejets du patient, l'injection d'eau dans les bronches ou de médicaments pendant l'examen.

Dans le cas des particules fluorescentes, on note que les concentrations mesurées lors des périodes d'attente et de manipulation sont significativement plus élevées que celles mesurées lors des périodes des bruits de fond en début et à la fin de la journée (Figure 14). Ces différences significatives entre la période d'attente et les bruits de fond peuvent s'expliquer par la toux, le fait de parler beaucoup, la circulation du personnel et le roulement de la civière qui occasionneraient une resuspension des bioaérosols déposés sur les surfaces horizontales. Quant aux différences significatives observées durant les manipulations, elles peuvent s'expliquer par l'introduction du bronchoscope et les multiples toux et rejets que cela provoque chez les patients.

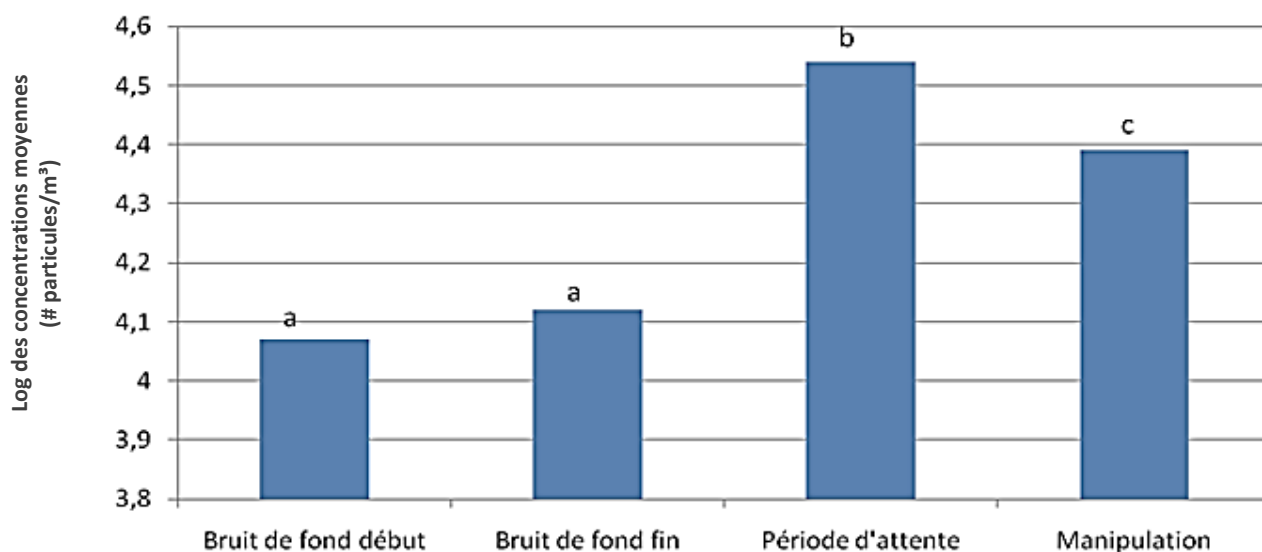


Figure 14 : Comparaisons multiples de Tukey-Kramer pour les particules fluorescentes (deux salles combinées).

Pour les particules cultivables, on note également que les concentrations mesurées lors des périodes d'attente et de manipulation sont significativement plus élevées que celles mesurées lors du bruit de fond en fin de journée (Figure 15). Les différences avec le bruit de fond au début de la journée ne sont pas statistiquement significatives. Ceci démontre bien que peu importe le type

de particules, les tâches dans les salles semblent créer une augmentation des concentrations présentes.

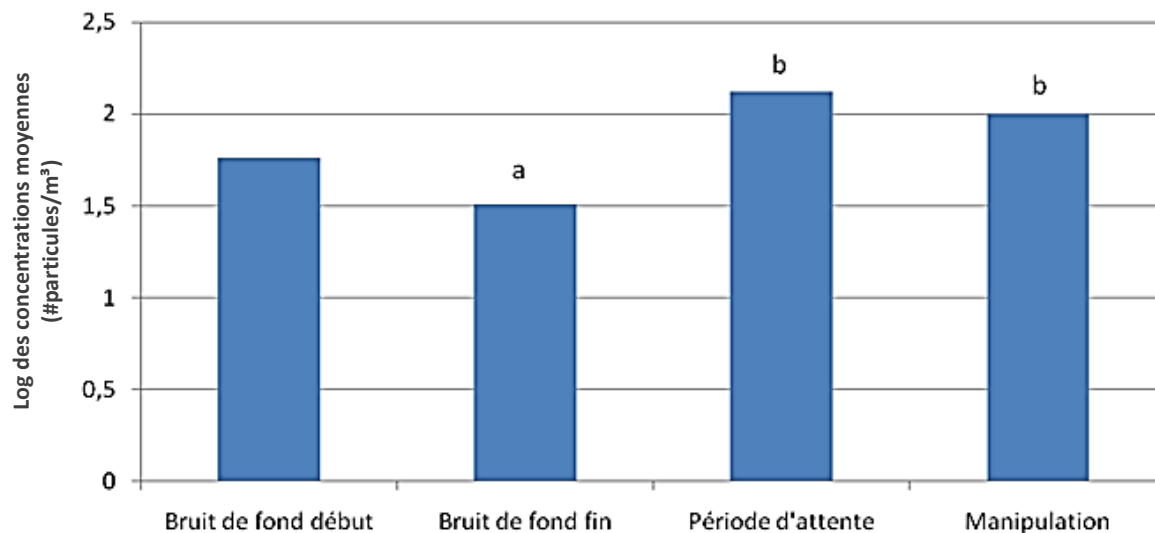


Figure 15 : Comparaisons multiples de Tukey-Kramer pour les bactéries cultivables (pour les deux salles combinées).

Par la suite, puisque la période des manipulations a été identifiée comme étant un facteur d'influence des concentrations, des logANOVA multifactorielles ont été réalisées sur les concentrations de particules non fluorescentes et fluorescentes mesurées avec l'UV-APS (Tableau 3) ainsi que sur les concentrations de particules bactériennes cultivables prélevées avec l'impacteur Andersen (Tableaux 6, 7 et 8). Les facteurs évalués incluaient le nombre de toux du patient, le nombre de personnes présentes dans la salle et les tâches effectuées.

Ces logANOVA multifactorielles, réalisées dans les deux salles d'examen combinées, ont permis d'identifier le facteur « tâche effectuée » comme ayant un impact sur les concentrations, et ce, pour les trois types de particules étudiées ($p = 0,001$ et $F = 10,34$ pour les particules non fluorescentes; $p = 0,001$ et $F = 10,39$ pour les particules fluorescentes; $p = 0,018$ et $F = 3,65$ pour les bactéries cultivables). Le facteur « nombre de personnes » s'est avéré être significatif uniquement pour les particules non fluorescentes ($p = 0,003$ et $F = 5,07$). Tous les autres facteurs ont des impacts non significatifs sur les concentrations des particules étudiées (particules non fluorescentes : $p = 0,36$ et $F = 1,03$ pour le nombre de toux; particules fluorescentes : $p = 0,09$ et $F = 2,26$ pour le nombre de personnes, et $p = 0,72$ et $F = 0,32$ pour le nombre de toux; bactéries cultivables : $p = 0,52$ et $F = 0,76$ pour le nombre de personnes, et $p = 0,72$ et $F = 0,34$ pour le nombre de toux).

À la suite de l'identification de l'impact significatif sur les concentrations de particules démontré pour le facteur « tâche effectuée », une logANOVA a été réalisée afin d'isoler les tâches effectuées (avant, pendant et après l'insertion du bronchoscope) dans chacune des salles. Les concentrations mesurées dans la salle contrôle sont significativement plus élevées pour les particules non fluorescentes ($p = 0,014$ et $F = 6,80$) et fluorescentes (bioaérosols) ($p = 0,009$ et $F = 7,70$) lors de l'introduction du bronchoscope par rapport aux concentrations mesurées avant

et après son introduction. Il existe également des différences significatives entre les différentes tâches accomplies pour les concentrations de particules non fluorescentes ($p = 0,001$ et $F = 44,86$) et fluorescentes ($p = 0,048$ et $F = 2,94$) dans la salle étudiée. Comme pour la salle contrôle, les concentrations mesurées au moment de l'introduction du bronchoscope dans les voies respiratoires sont significativement plus élevées que celles mesurées avant et après son introduction.

La Figure 12, tracée à partir des mesures expérimentales faites dans la salle contrôle, montre aussi que l'introduction du bronchoscope dans les voies respiratoires du patient s'accompagne d'une augmentation de la fraction totale des particules dans l'air. En revanche, cette augmentation ne se distingue pas aussi nettement du côté de la salle étudiée principalement en ce qui a trait aux particules non fluorescentes (ce qui explique pourquoi les résultats ne sont pas présentés ici). L'augmentation concernant les particules fluorescentes est également moins évidente et ceci peut être lié aux difficultés de documenter parfaitement l'heure correspondant à l'introduction du bronchoscope lorsque l'observateur est à distance ou lors des multiples va et vient du personnel, situations observées dans cette salle.

L'introduction du bronchoscope est donc un facteur qui contribue à la présence de particules dans l'air ambiant lors des examens, tel que mis en évidence dans cette étude. Nous verrons dans la discussion de ce rapport que les risques que peuvent présenter ces particules varieront en fonction de la nature de celles-ci.

3.2 Mesure du nombre de CAH

Le Tableau 12 donne les résultats de la mesure du nombre de CAH pour les trois salles. Ces évaluations ont été faites à la fin de la journée, immédiatement après les opérations de bronchoscopie ou à la fin du nettoyage des bronchoscopes et des coloscopes dans la salle de retraitement.

Tableau 12 : Nombre de changements d'air à l'heure (CAH) pour les différentes salles.

Salle contrôle CAH		Salle étudiée CAH		Salle de retraitement CAH	
n*	Moyenne ($\pm$ E.T.)	n	Moyenne ($\pm$ E.T.)	n	Moyenne ($\pm$ E.T.)
6	17,0 ($\pm$ 1,1)	5	24,4 ($\pm$ 0,6)	7	22,5 ($\pm$ 2,3)

*n = nombre de série de mesures

3.3 Modélisation

3.3.1 Âge de l'air en fonction du débit de soufflage

L'âge moyen de l'air permet de déterminer le temps nécessaire (en moyenne) pour renouveler l'air dans la pièce. Un âge moyen de l'air élevé indique l'existence de zones stagnantes ou de recirculation dans lesquelles la concentration des particules et des bioaérosols demeure plus longtemps élevée. Le Tableau 13 présente l'âge moyen de l'air en fonction d'un nombre de changements d'air par heure théorique pour les trois salles.

L'âge moyen de l'air permet l'évaluation d'un coefficient d'échange d'air (ε). Ce coefficient est défini comme étant le rapport entre la constante de temps nominale et l'âge moyen de l'air. La constante de temps nominale se calcule en divisant le volume de la pièce par le débit de soufflage (Tableau 1). Dans le cas où le système de ventilation génère des conditions de mélange idéal, ε est égal à 1. La valeur théorique maximale du coefficient d'échange d'air est 2. Cette valeur est atteinte pour un écoulement piston « idéal ». Les coefficients d'échange d'air, simulées en fonction de quatre valeurs de CAH théoriques pour chacune des salles, sont présentés à la Figure 16. Cette figure permet une caractérisation globale de l'efficacité de la ventilation, peu importe la source polluante. Quelle que soit la pièce modélisée, le débit de ventilation de 24 CAH ne permet pas d'atteindre la valeur asymptotique de l'âge moyen de l'air.

Tableau 13 : Âge de l'air en fonction du nombre de changements d'air par heure.

CAH (h^{-1})	8	12	18	24
$\overline{MAA}$ Salle étudiée	421,3	280,1	191,5	149,1
$\overline{MAA}$ Salle contrôle	394,1	252,4	162,3	121,0
$\overline{MAA}$ Salle de retraitement	388,3	243,7	162,8	121,8

$\overline{MAA}$: Âge moyen de l'air (s)

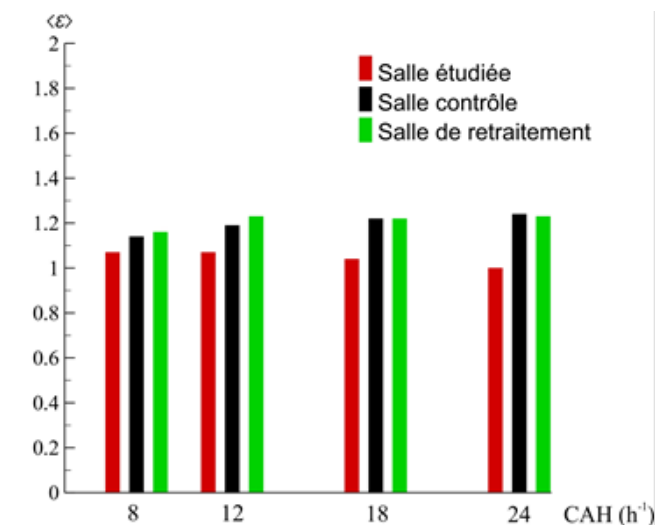


Figure 16 : Coefficient d'échange d'air en fonction de CAH théoriques pour les trois salles.

Des simulations ont été répétées pour les conditions de ventilation réelles en imposant la fraction massique initiale de SF₆ mesurée expérimentalement. Les Figures 17 à 19 comparent les concentrations mesurées en fonction du temps aux concentrations de SF₆ obtenues numériquement. Les fractions massiques obtenues à partir de la simulation ont été converties en fraction volumique (parties par milliard - ppb) afin de permettre la comparaison.

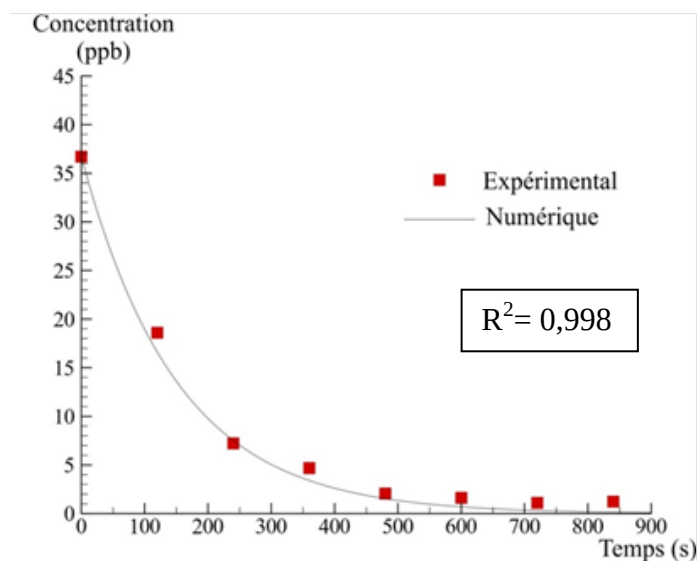


Figure 17 : Concentration de SF₆ en fonction du temps pour la salle étudiée.

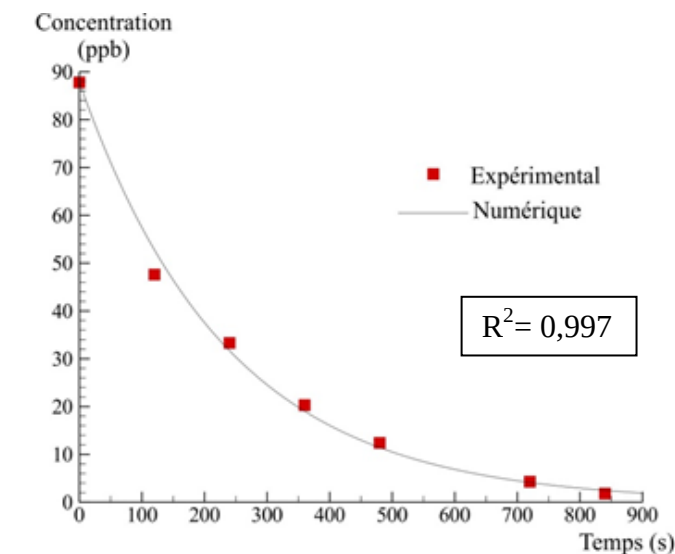


Figure 18 : Concentration de SF6 en fonction du temps pour la salle contrôle.

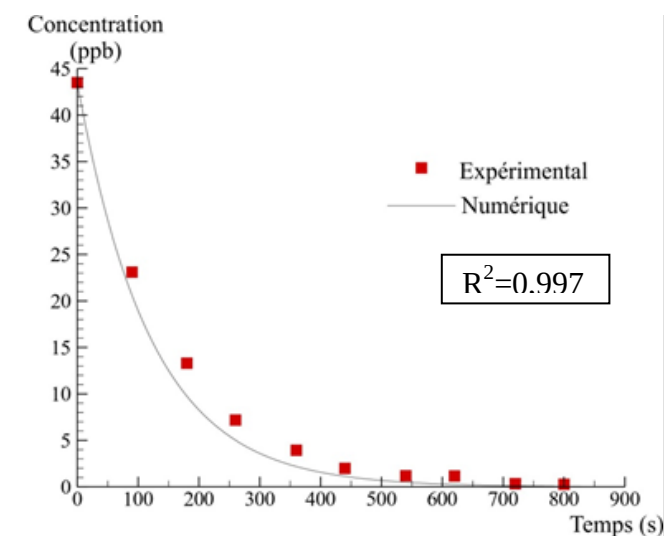


Figure 19 : Concentration de SF6 en fonction du temps pour la salle de retraitement.

3.3.2 Indice cumulatif d'inhalation

L'indice cumulatif d'inhalation (I_{inh}) permet de quantifier la fraction de bioaérosols émise par le patient qui parvient à la zone respiratoire du personnel hospitalier. L'expression mathématique de cet indice est similaire à celle présentée par Lai et coll. (2000).

$$I_{inh} = \frac{\rho_{air} \dot{Q} \times \int_{t=0}^{t=1200} Z_i dt}{m_{t,e}} \quad (4)$$

où Z_i est la fraction massique de bioaérosols à la hauteur de la bouche du médecin ou de celle de l'infirmière, $\dot{Q}$ est le volume d'air respiré en m^3/s et $m_{t,e}$ représente la masse totale de bioaérosols émise par le patient. Soulignons que la masse totale de bioaérosols est inconnue. Par conséquent, cet indice permet de quantifier la fraction de bioaérosols inhalée par le personnel hospitalier si une masse donnée de particules était émise par le patient. L'indice I_{inh} a été déterminé pour les deux salles de bronchoscopie. L'intégration de la fraction massique Z_i a été faite pour un intervalle de temps de 1200 s soit toute la durée de la simulation. Les Figures 20 et 21 présentent la variation de cet indice pour le médecin et l'infirmière, dans les deux salles, pour les quatre débits de soufflage simulés à partir des fractions massiques obtenues au moyen du modèle scalaire passif (Éq. 1) et du modèle avec vitesse de glissement (Éq. 2) pour un diamètre de noyaux de gouttelettes fixé à $5 \mu m$. Pour un diamètre de noyaux de gouttelettes de $2 \mu m$, les résultats se situent approximativement à mi-chemin entre les valeurs présentées aux Figures 20 et 21.

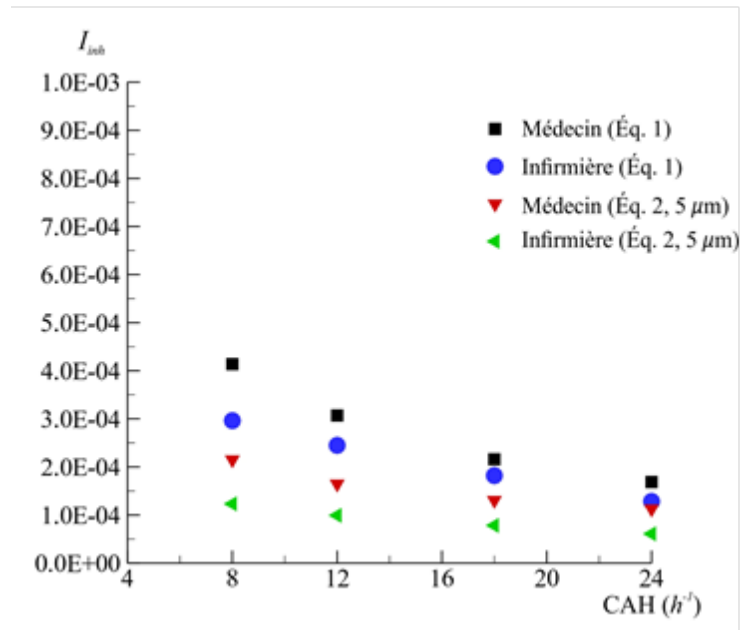


Figure 20 : Indice cumulatif d'inhalation en fonction de CAH pour la salle étudiée.

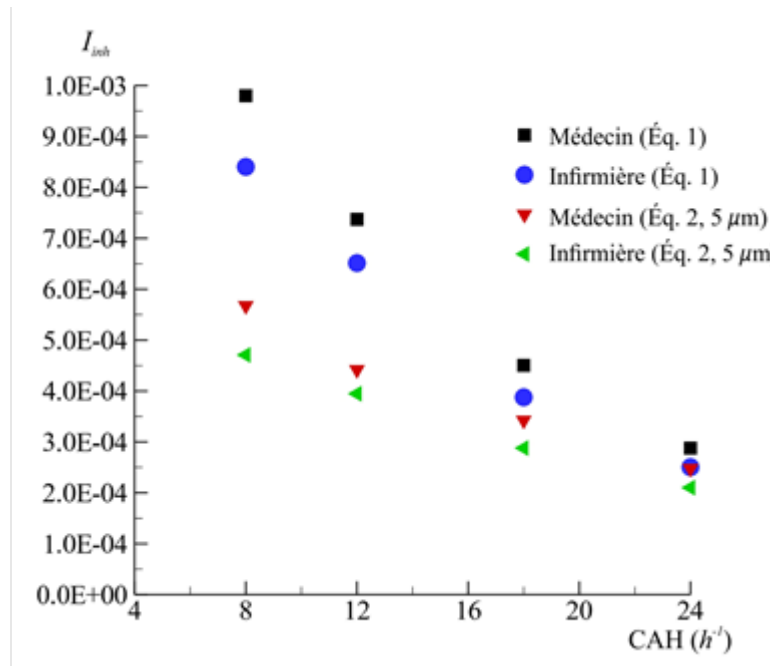


Figure 21 : Indice cumulé d'inhalation en fonction de CAH pour la salle contrôle.

La Figure 22 présente les fractions massiques modélisées pour les deux salles, 6½ minutes après le début de l'intervention.

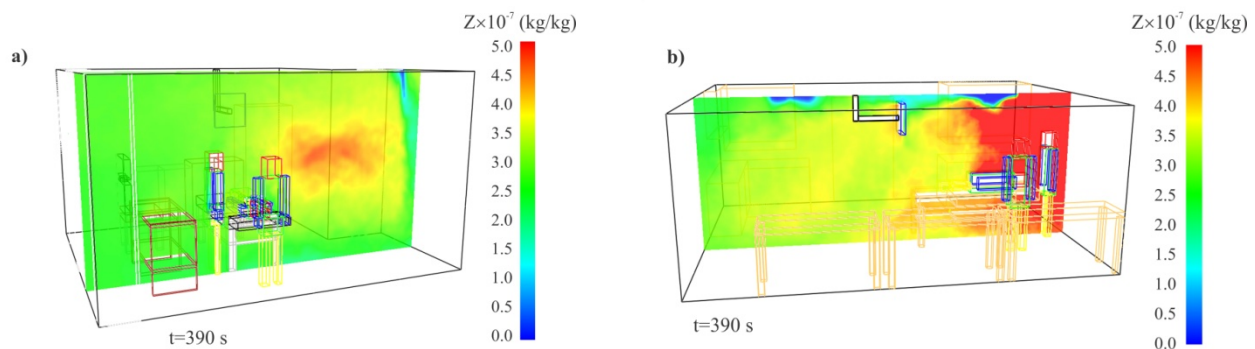


Figure 22 : Fraction massique dans un plan y-z, 390 secondes après le début de la simulation pour a) salle étudiée et b) salle contrôle.

3.3.3 Fraction déposée

Les simulations effectuées avec le modèle de glissement permettent d'estimer la masse totale de bioaérosols déposée sur les surfaces lors du scénario d'intervention. Cette fraction déposée (FD) est le rapport entre la masse déposée et la masse de bioaérosols émise par le patient, exprimée en

pourcentage. Les Figures 23 et 24 présentent la fraction déposée en fonction du nombre de changements d'air pour des diamètres de noyaux de gouttelettes de 2 et 5 μm . Des écarts importants sont présents entre les deux salles de bronchoscopie. Dans la salle étudiée, la FD est faible et relativement peu influencée par le débit de soufflage. Par contre dans la salle contrôle, la FD est élevée, particulièrement pour les noyaux de gouttelettes de 5 μm , et elle dépend du débit de soufflage, diminuant de façon exponentielle avec l'augmentation de celui-ci.

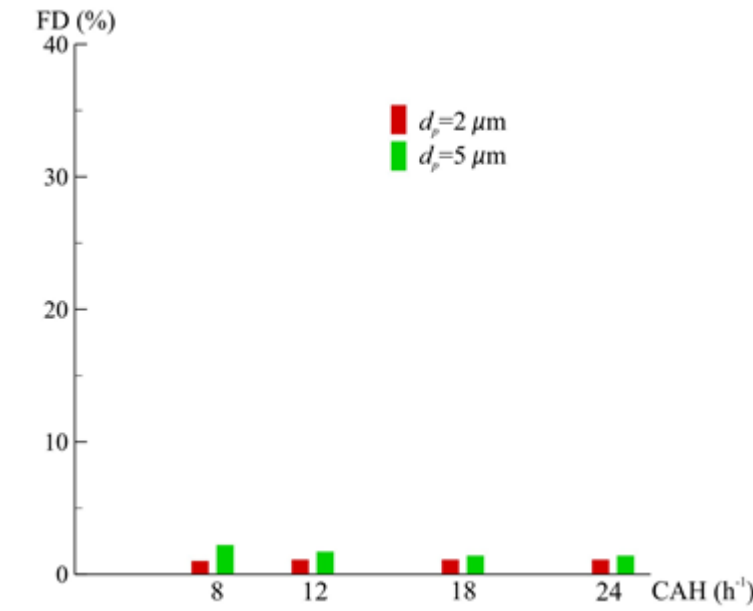


Figure 23 : Fraction déposée après 20 minutes dans la salle étudiée.

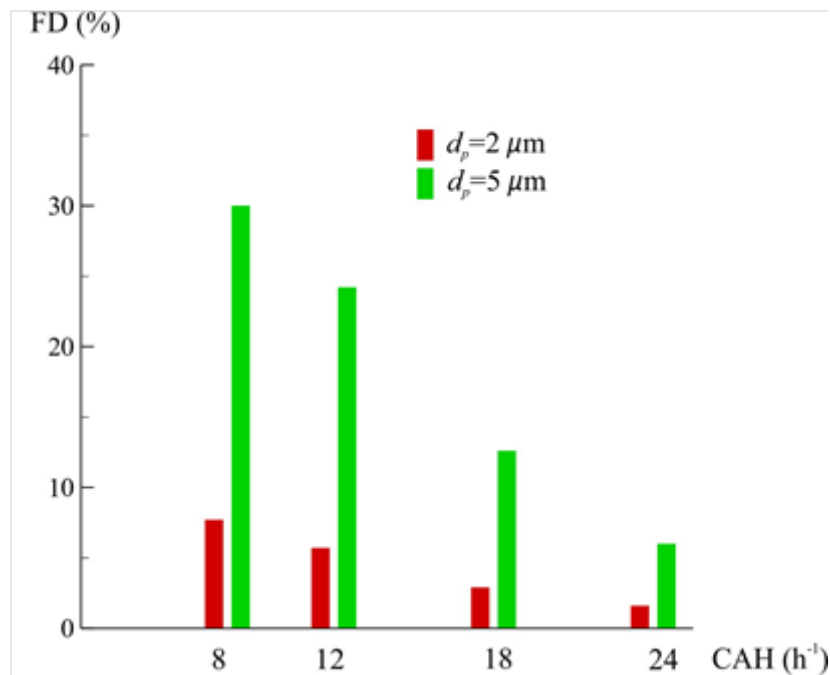


Figure 24 : Fraction déposée après 20 minutes dans la salle contrôle.

Pour les deux salles, le dépôt d'aérosols s'effectue principalement sur les surfaces horizontales des tables et du mobilier, le lit du patient et le plancher. La masse déposée à la fin de la simulation (1200 s) est représentée à la Figure 25 pour les deux salles de bronchoscopie. On remarque sur cette figure que la masse déposée, exprimée en kg/m^2 , est nettement plus importante pour la salle contrôle.

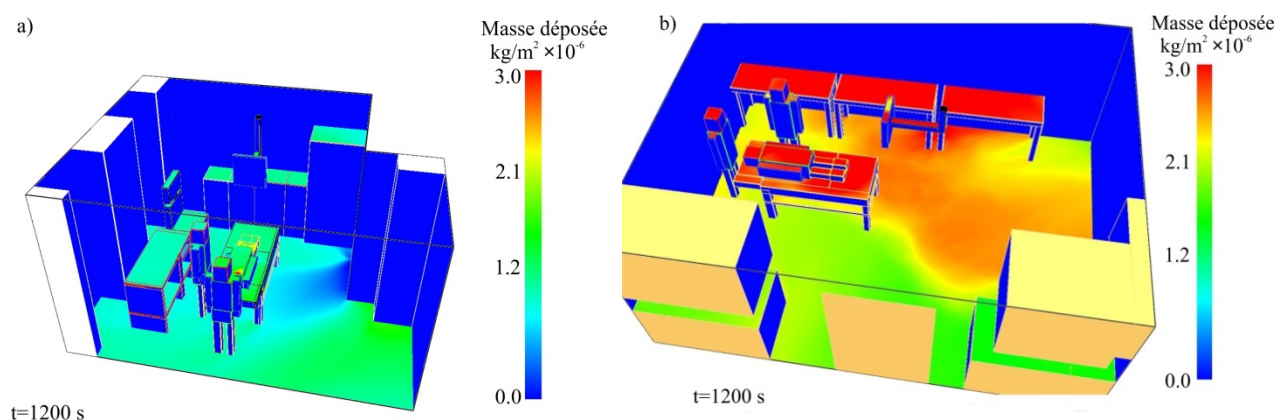


Figure 25 : Comparaison entre la masse déposée après 20 minutes pour a) salle étudiée et b) salle contrôle.

3.3.4 Trajectoires des petites particules et des noyaux de gouttelettes

Il est difficile de représenter l'évolution temporelle des trajectoires suivies par les bioaérosols. Les Figures 26 et 27 indiquent de façon générale ce qu'il advient des bioaérosols libérés lors des toux du patient. Chaque trajectoire est représentée par une ligne dont la couleur indique le temps écoulé depuis leur mise en suspension dans la pièce. Les résultats d'une étude en laboratoire sur la dispersion des particules générées lors d'une toux ont démontré que ces dernières se propageaient rapidement dans toute la pièce et qu'un travailleur situé n'importe où dans la salle était exposé aux aérosols potentiellement infectieux en moins de cinq minutes (Lindsley et coll. 2012). Ce comportement est identique à celui qui se dégage de nos simulations sauf qu'il s'agit, dans notre cas, d'une représentation basée sur des phénomènes réels (Figures 26 et 27).

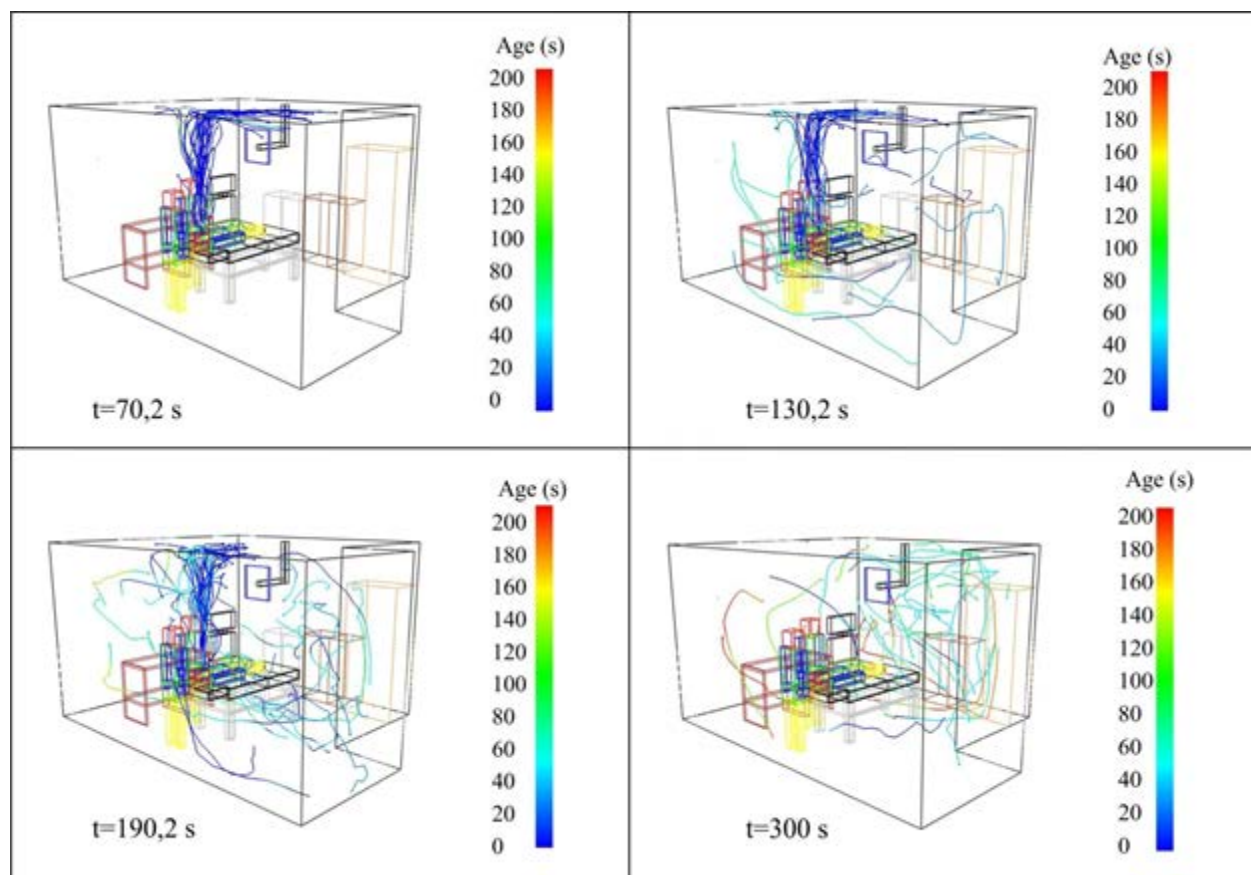


Figure 26 : Trajectoires des bioaérosols pour la salle étudiée.

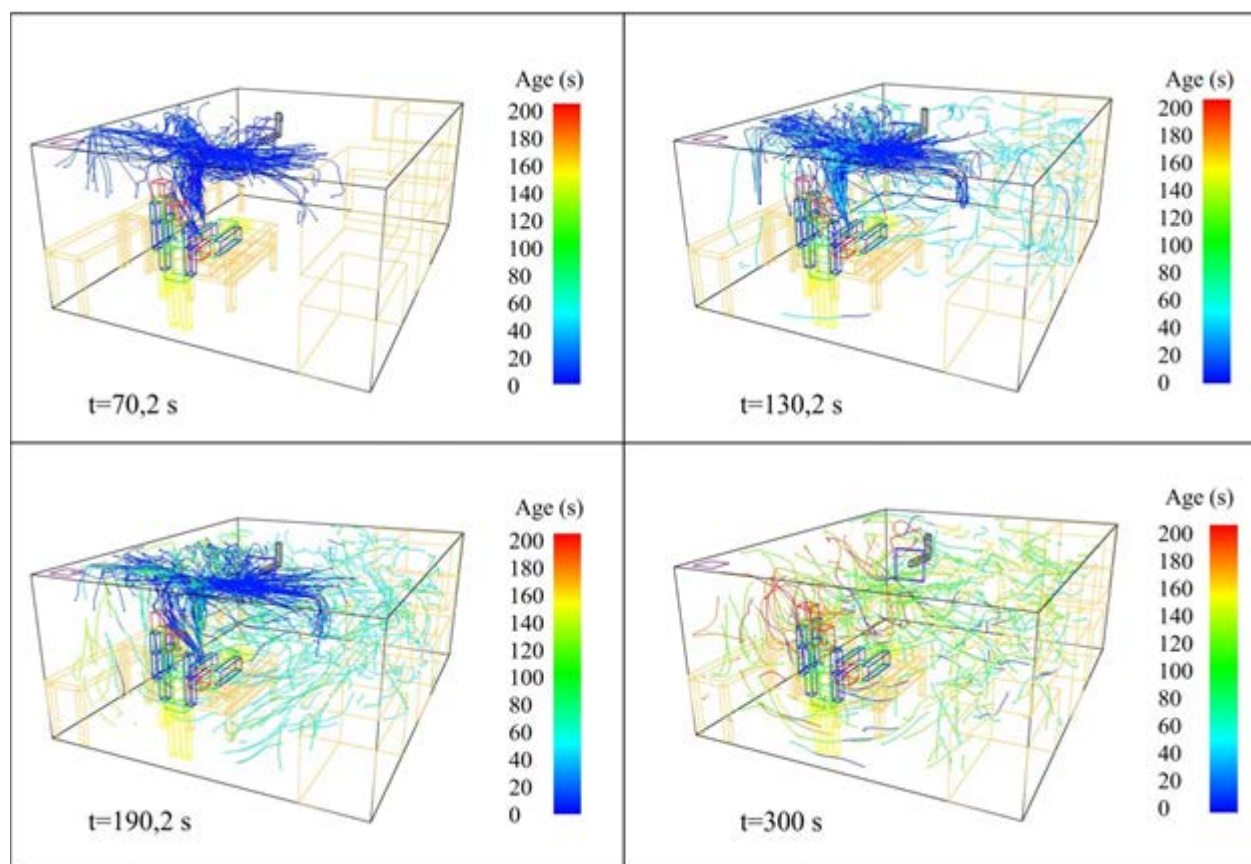


Figure 27 : Trajectoires des bioaérosols pour la salle contrôle.

4. DISCUSSION

4.1 Nombre de changements d'air par heure

Le nombre de changements d'air par heure mesurés dans les trois salles respecte les normes de l'ASHRAE Ventilation of Health Care Facilities (ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2008) de 12 changements d'air à l'heure (CAH) pour une salle de bronchoscopie. Ces normes exigeant également que la salle d'examen soit en pression négative, que tout l'air aspiré soit évacué à l'extérieur et que la dépressurisation entre la salle et les pièces périphériques soit d'au moins 2,5 Pa (0,01 po d'eau) ont été respectées pour la salle étudiée, mais non pour la salle contrôle au moment des prélèvements (ASHRAE, 2007).

En plus de la norme ASHRAE, la salle étudiée et la salle de retraitement respectent la norme du groupe CSA Z317.2-10 Système de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air dans les établissements de santé – Exigences particulières. Cette norme exige un minimum de 20 CAH et une pression négative (CSA, 2010). Par contre, la salle contrôle ne respectait pas les normes précédentes en ce qui a trait à la dépressurisation, car elle était en pression positive lors des mesures. D'après les personnes consultées, cette situation pourrait avoir été causée par des travaux de rénovation dans les locaux attenants.

4.2 Particules non fluorescentes, fluorescentes et cultivables

4.2.1 Bruits de fond

En ce qui a trait au bruit de fond mesuré au début de la journée, les concentrations des particules fluorescentes et non fluorescentes les plus élevées sont obtenues dans la salle de retraitement. En début de journée, les concentrations de particules non fluorescentes sont environ deux fois plus élevées que celles de la salle étudiée et près de soixante fois plus élevées que celles de la salle contrôle. En fin de journée, elles sont environ six fois plus importantes que celles de la salle étudiée et près de cent soixante fois plus élevées que celles de la salle contrôle. Ces concentrations sont toutefois inférieures pour les particules fluorescentes. En effet, en début de journée, elles sont de deux à trois fois plus élevées dans la salle de retraitement que les concentrations mesurées dans les salles d'examen. En fin de journée, elles sont environ cinq fois plus élevées que celles de la salle étudiée et près de sept fois plus élevées que celles de la salle contrôle. Nous ne pouvons toutefois associer les concentrations plus élevées de la salle de retraitement à des problèmes de santé. Elles sont le reflet de la ventilation qui est différente d'une salle à l'autre, ainsi que des opérations qui y sont effectuées. De fait, le nettoyage des bronchoscopes peut produire des concentrations de bactéries non viables (mortes) dans l'air, alors que les bactéries viables présentes dans les salles d'examen proviennent des patients.

Le bruit de fond mesuré dans la salle étudiée est plus élevé que celui mesuré dans la salle contrôle. Les concentrations dans la salle étudiée atteignent 14 fois celles de la salle contrôle pour les particules non fluorescentes, alors que pour les particules fluorescentes elles sont environ deux fois plus élevées.

La diminution des concentrations apparaissant au Tableau 5 nous permet de supposer une décroissance exponentielle de la concentration des bioaérosols totaux dans les différentes salles

et d'évaluer théoriquement leur constante de temps respective. Ainsi, pour la salle contrôle, des constantes de temps de 19 et 16 min ont été calculées pour les particules non fluorescentes et fluorescentes, respectivement. De la même manière, pour la salle étudiée, des constantes de temps de 95 et 15 min ont été calculées pour les particules non fluorescentes et les fluorescentes, respectivement. On observe une décroissance plus rapide pour les particules fluorescentes dans ces 2 salles. Ceci peut s'expliquer par une sédimentation plus rapide de ces particules, liée à leur plus grande taille, alors que les particules non fluorescentes, plus petites, demeureraient plus longtemps dans l'air à cause d'une sédimentation plus lente. Les conditions aérauliques ambiantes peuvent également expliquer ces différences. En fin de journée, après les bronchoscopies, le temps de retour aux concentrations du début de journée peut être évalué à partir des constantes de temps calculées en début de journée (Tableau 5). Ainsi, pour les deux salles de bronchoscopie, une quinzaine de minutes semble nécessaire aux particules fluorescentes pour retrouver leur niveau de base. Ces temps sont d'ailleurs très près de ceux recommandés par le CDC (2005). En effet, pour un taux de ventilation autour de 20 CAH (situé entre le taux de 17 CAH mesuré pour la salle contrôle et de 24 CAH mesuré pour la salle étudiée, selon le Tableau 5), le temps requis pour éliminer 99,9 % des contaminants dans l'air, selon le CDC, est de 14 minutes (Tableau 14).

Un taux de ventilation plus élevé ne conduit pas nécessairement à une décroissance plus rapide des concentrations. Ainsi, le taux de ventilation plus élevé dans la salle étudiée ($24,4 \pm 0,6$ CAH par rapport à $17,0 \pm 1,1$ CAH dans la salle contrôle) n'a pas accéléré le temps de retour au niveau de base pour les particules fluorescentes. D'après les constantes de temps calculées à partir des mesures de bruit de fond prises avant l'arrivée d'un premier patient (Tableau 5), la période permettant une réduction de la concentration de particules fluorescentes est même plus longue pour la salle étudiée (13 min) par rapport à la salle contrôle (6 min). Le même phénomène se reproduit pour les particules non fluorescentes, avec une différence encore plus marquée entre la constante de temps calculée pour la salle étudiée (62 min) par rapport à celle calculée pour la salle contrôle (7 min). Les différences observées ne peuvent donc être attribuées qu'aux conditions ambiantes physiques comme l'aménagement de la salle, la position des entrées et sorties d'air, les trajets empruntés par les écoulements d'air, etc.

Tableau 14 : Nombre de changements d'air à l'heure (CAH) et temps requis pour éliminer 99 % et 99,9 % des contaminants de l'air (CDC, 2005).

CAH	Nombre de minutes requis	
	99 %	99,9 %
2	138	207
4	69	104
6	46	69
12	23	35
15	18	28
20	7	14
50	3	6
400	<1	1

4.2.2 Profils granulométriques

Les profils granulométriques pour les particules fluorescentes et non fluorescentes sont différents. La moyenne des DAM en nombre pour les particules fluorescentes (bioaérosols) se situe entre 2,16 et 3,56 μm et celle pour les particules non fluorescentes se situe entre 0,76 et 1,09 μm (Tableaux 9, 10 et 11). Ces dimensions correspondent également à des aérosols ou noyaux de gouttelettes tels que définis par le milieu médical (Wells et Stone, 1934). Avec de telles dimensions, le temps requis pour que ces particules se déposent d'une hauteur de trois mètres dans l'air libre sans mouvement est de plusieurs heures (Lavoie et coll. 2007). Le diamètre des particules fluorescentes est majoritairement compris entre 1 et 12 μm , limites correspondant aux diamètres aérodynamiques médians rapportés pour les particules biologiques résiduelles après un éternuement ou une toux (Wells et Stone, 1934) (Figures 8 à 11). Dans des endroits ventilés, le temps de dépôt est encore plus long. Ces particules sont donc susceptibles de voyager en suivant les courants d'air et d'être inhalées par le personnel présent (Yassi et Bryce, 2004; Roy et Milton, 2004; Li et coll. 2007; Sun et Ji, 2007; Lavoie et coll. 2007; Qian et coll. 2008; Verreault et coll. 2008; Welty, 2009).

Pour les particules fluorescentes, les profils granulométriques en fin de journée sont différents de ceux observés en début de journée (Figures 8 et 9). Les concentrations, pour chaque tranche granulométrique, sont demeurées légèrement supérieures en fin de journée par rapport à celles du début de journée, pour les deux salles d'examen tandis qu'elles ont doublé pour la salle de retraitement.

Toujours pour les particules fluorescentes, les graphiques de la Figure 11 montrent des profils granulométriques moyens indiquant un maximum et quelquefois deux : le premier maximum se situant à environ 1,5 μm et le second à 4 μm . Ce dernier mode est présent pour les deux salles durant les examens et dans la salle de retraitement durant la journée. Le mode à 1,5 μm n'est présent que dans la salle étudiée et dans la salle de retraitement. Dans la salle étudiée, on peut observer, en fin de journée, une disparition du mode à 4 μm au profit du mode à 1,5 μm (Figure 9). Ce fait indique qu'un processus est en cours, vraisemblablement un phénomène de sédimentation plutôt qu'un phénomène d'assèchement. Malgré que le mode à 1,5 μm se situe dans l'intervalle entre 1 et 2 μm rapporté par Duquid (1945) pour la majorité des noyaux de gouttelettes, il est probable que ce soit le mode autour de 4 μm qui corresponde aux noyaux de gouttelettes puisque ce dernier est présent lors des bronchoscopies dans les deux salles. Il est toutefois difficile de le confirmer sans réaliser d'expériences supplémentaires. Bien que la médiane d'une structure fine ne corresponde pas toujours au mode, on remarque que la moyenne des DAM des particules mesurées dans la salle contrôle (3,6 μm) équivaut approximativement au mode qui est seul présent (4 μm) alors que la moyenne des DAM des particules mesurées dans la salle étudiée (2,7 μm) correspond à la moyenne des deux modes (1,5 et 4 μm), qui sont tous les deux présents et d'égale importance dans cette salle.

Pour les particules non fluorescentes, le profil granulométrique des concentrations mesurées dans la salle de retraitement en début de journée (Figure 8) est légèrement plus étalé que celui de la salle étudiée. Ainsi, deux salles situées dans un même hôpital peuvent présenter des profils différents au regard du bruit de fond ce qui souligne l'importance d'effectuer les mesures de bruit

de fond le plus près possible des endroits où les prélèvements seront effectués en présence de patients. Le graphique du profil granulométrique des particules non fluorescentes de la salle contrôle présente, quant à lui, une allure nettement plus dispersée, avec des concentrations inférieures à celles mesurées dans la salle étudiée ou la salle de retraitement (Figure 8). Ce profil étalé pour les particules non fluorescentes suggère une plus grande quantité de grosses particules, pouvant expliquer une sédimentation plus rapide de même que des constantes de temps plus petites (voir Tableau 5). Ces profils granulométriques différents, obtenus lors des mesures de bruit de fond dans la salle contrôle, peuvent dépendre de plusieurs facteurs notamment la qualité de l'air extérieur, du système de ventilation et de ses filtres, ainsi que le profil et les conditions ambiantes de l'écoulement de l'air. De façon intéressante et surprenante, les concentrations de particules non fluorescentes pour chaque tranche granulométrique augmentent lors des opérations de bronchoscopie effectuées dans la salle contrôle, sans toutefois modifier l'allure du profil (Figures 8, 9 et 11). L'augmentation de la concentration peut être reliée à des processus de génération. Cependant, il serait étonnant que cette génération n'affecte pas la plage des diamètres mesurés, à moins que le bruit de fond mesuré en fin de journée ne constitue qu'un résiduel du procédé subsistant grâce aux conditions aérauliques spécifiques à cette salle. Les processus de génération pouvant être impliqués sont la nébulisation de liquides à usage médical lors de la bronchoscopie ou lors de la préparation des patients, la resuspension de poussières inertes causée par la circulation du personnel ou de la civière et finalement la toux, les conversations et autres mécanismes biologiques à même de générer des gouttelettes sans matériel fluorescent.

4.2.3 Identifications bactériennes

Les concentrations de bactéries cultivables (Tableaux 6 à 8) sont jusqu'à 100 fois plus faibles lorsque comparées aux particules fluorescentes et ce, malgré le fait que les échantillonneurs étaient localisés dans la même zone. Ceci peut être attribuable à de multiples facteurs reliés aux conditions de prélèvements, notamment au fait que seule la flore bactérienne viable ait été évaluée dans cette étude par les échantillonneurs microbiologiques, ou encore au fait que l'appareil UV-APS ne mesure pas exclusivement la fluorescence des produits bactériens, mais bien celle de tous les organismes biologiques. Dans la littérature scientifique, il est mentionné que la plupart des bactéries que l'on respire sont mortes (ACGIH, 1999; Yassi et Bryce, 2004; Lavoie et coll. 2007) et que toutes les bactéries viables ne sont pas nécessairement cultivables. L'analyse des résultats de la présente étude démontrent que les concentrations moyennes de bactéries cultivables de la salle étudiée sont significativement plus élevées que celles mesurées dans la salle contrôle ($p = 0,001$) et de retraitement ($p = 0,048$). Nous soumettons l'hypothèse que les écoulements d'air différents jouent un rôle pouvant expliquer cette différence.

Les identifications bactériennes effectuées sur les échantillons de la flore cultivable prélevés avec les impacteurs Andersen ont permis de caractériser la flore cultivable présente dans l'air ambiant des salles de bronchoscopie et de retraitement. Plusieurs des bactéries isolées provenaient de la flore normale des humains, tant au niveau de la peau que du système respiratoire (Murray et coll. 1995, Bacq-Calberg et coll. 1999). Tous les échantillons contenaient au moins une espèce de staphylocoque, ce qui n'est pas étonnant puisqu'ils sont reconnus comme étant des commensaux fréquents du nez, de la région oro-pharyngée et de la peau (Pechère et coll. 1983; Murray et coll. 1995; Bacq-Calberg et coll. 1999). Les corynébactéries, également saprophytes de ces régions, ont été isolées dans plus de 50 % des prélèvements réalisés. L'identification de microcoques dans plus de 80 % des échantillons peut être attribuable

au fait qu'ils sont des colonisateurs habituels de la peau chez l'homme. L'augmentation de leur concentration dans une pièce lors de la présence d'humains a d'ailleurs été confirmée par une étude réalisée au Musée Correr de Venise par Camuffo et coll. (1999). Ces derniers rapportent une augmentation des concentrations de microcoques dans l'air ambiant d'un musée lorsque le public était présent.

Les bactéries identifiées peuvent donc provenir autant du personnel que des patients. Cependant, puisque le personnel soignant demeure en moyenne à peu près le même dans la salle tout au long de la journée, une partie de la variabilité de la flore bactérienne serait alors attribuable aux patients (différent d'un examen à l'autre). En effet, pour certains patients, les identifications ont démontré la présence de bactéries provenant du groupe de risque 2 selon la classification de Santé Canada (1996). Par exemple, la présence de *Streptococcus pneumoniae*, une bactérie provenant des voies respiratoires, a été confirmée dans l'air de la salle étudiée lors d'un examen. Cette bactérie n'est pas spécifique aux personnes atteintes de pneumonie; de 10 à 50 % des individus peuvent en être porteur sans avoir de pathologie (Pechère et coll. 1983). Puisque les pathologies des patients sont confidentielles, il est impossible d'établir un lien direct entre l'examen de bronchoscopie chez le patient et la présence de *Streptococcus pneumoniae* dans l'air de la pièce. Notons également que cette espèce a été confirmée en présence d'un seul patient; il est donc plus que probable qu'elle provienne de ses voies respiratoires.

Le genre *Streptococcus* a été confirmé dans 30 % des échantillons effectués lors des examens. Bien qu'il n'ait pas été possible de déterminer l'espèce de ses souches, il est probable qu'elles proviennent de la bouche et des voies respiratoires des patients, puisque plusieurs espèces de ce genre sont des colonisateurs humains. La confirmation de la présence de cette bactérie dans l'air lors d'un examen de bronchoscopie vient appuyer les recherches de MacIntyre et coll. (2013). Leur étude sur la protection respiratoire conclut que la bactérie pathogène la plus communément isolée en présence de symptômes chez les travailleurs du milieu de la santé est *Streptococcus pneumoniae*. La co-infection la plus commune dans leur étude était *Streptococcus pneumoniae* et *Haemophilus influenzae* B. Les résultats de la présente étude indiquent que les microorganismes colonisant les voies respiratoires des patients peuvent se retrouver dans l'air ambiant des salles lors des examens de bronchoscopies et être inhalés par les personnes présentes. Cette bactérie représente donc pour le travailleur un danger associé à la colonisation plutôt qu'à l'infection. Selon Klugman (2012), cette colonisation n'est pas sans danger et peut prédire la présence de maladie invasive ou de co-infections bactériennes-virales. D'autres chercheurs affirment que la susceptibilité des conduits respiratoires à une infection virale après des infections bactériennes augmente et vice versa (Madhi et Klugman, 2004; Klugman et coll. 2009; Centers for Disease Control and Prevention, 2009; Wang et coll. 2011; Zhou et coll. 2012). Selon Wang et coll. (2011), les co-infections bactériennes surviennent surtout lors des éclosions d'influenza. *Streptococcus pneumoniae*, *Haemophilus influenzae*, *Staphylococcus* spp. et *Streptococcus* spp. seraient les causes les plus communes de co-infections bactériennes pendant les apparitions d'influenza cliniques (Wang et coll. 2011). Toutefois, dans la présente étude, l'identification des mycobactéries et des virus de l'influenza A et B, en utilisant des techniques de biologie moléculaire, s'est avérée négative.

En résumé, les pathogènes bactériens sont susceptibles de causer des infections et des colonisations pouvant potentiellement affecter les travailleurs à court ou à long terme. MacIntyre et coll. (2013) affirment que les masques chirurgicaux sont inefficaces comme moyen de

protection; les colonisations bactériennes chez les travailleurs de la santé peuvent toutefois être prévenues en portant des APR N95 jetables d'une façon continue. Une étude dans le milieu hospitalier a d'ailleurs démontré que le port d'un APR N95 jetable muni d'une valve est encore plus confortable que le port d'un masque médical ou chirurgical (Shenal et coll. 2012).

4.3 Modélisation

4.3.1 Conditions de mélange dans les pièces

Les résultats des simulations présentés au Tableau 13 montrent que l'âge moyen de l'air est plus élevé pour la salle étudiée que pour la salle contrôle et ce, peu importe le nombre de changements d'air à l'heure. Ce résultat suggère qu'avec un débit de ventilation identique dans les deux salles, la concentration moyenne de SF6 chute plus rapidement dans la salle contrôle comparativement à celle de la salle étudiée. Ce qui est confirmé par les mesures et constantes de temps calculées précédemment. De fait, en excluant les résultats de l'UV-APS pour les périodes correspondant à l'introduction du bronchoscope et la suivante où les concentrations sont nettement plus élevées en moyenne pour la salle contrôle, les autres résultats sont en moyenne inférieurs quand on les compare à ceux de la salle étudiée. Dans les trois salles, l'âge moyen de l'air décroît de façon exponentielle avec l'augmentation du nombre de changements d'air.

Les résultats présentés à la Figure 16 montrent que les conditions de ventilation dans la salle étudiée sont comparables à celles créées par un système reposant sur le principe de dilution. Pour cette salle, le coefficient d'échange d'air est près de l'unité pour les quatre débits de soufflage. Les coefficients d'échange pour les deux autres salles sont supérieurs à un et augmentent légèrement en fonction des CAH. La localisation des grilles d'extraction dans ces deux salles fait en sorte qu'une fraction des bioaérosols se dirige directement de la source d'émission vers la grille d'extraction.

Les résultats numériques des taux de décroissance de SF6 en fonction du temps sont similaires aux taux de décroissance mesurés expérimentalement (Figures 17 à 19). Les coefficients de corrélation de ces figures sont de 0,997 pour la salle contrôle, de 0,998 pour la salle étudiée et de 0,997 pour la salle de retraitement. Ces coefficients sont tous statistiquement significatifs ($p \leq 0,05$). Les débits d'air imposés pour ces simulations ont été déterminés à la suite des mesures de vitesse d'écoulement aux grilles de soufflage et d'extraction (Tableau 1). Ces débits correspondent à 23 changements d'air à l'heure pour la salle de retraitement, ainsi que 24 et 17 changements d'air à l'heure pour la salle étudiée et la salle contrôle, respectivement.

4.3.2 Indice cumulatif d'inhalation du personnel hospitalier

L'indice cumulatif d'inhalation montre que le médecin est plus exposé que l'infirmière. Les écarts sont moins significatifs à 24 CAH, mais à faible débit de ventilation (8 CAH), les écarts sont de l'ordre de 20 % (Figures 20 et 21). La position du médecin fait en sorte qu'il est directement exposé à l'écoulement généré lors d'une toux. La fraction massique de bioaérosols est plus élevée dans la zone de respiration du médecin dans les instants suivant la toux et elle devient identique à celle des infirmières après quatre minutes. Ce gradient de fraction massique dans la région autour du patient diminue dans le temps. À $t = 300$ s, soit une minute après la

dernière toux et jusqu'à la fin de la simulation, les fractions massiques mesurées dans la zone de respiration du médecin et de celle de l'infirmière sont comparables (Figures 26 et 27).

Malgré le fait que l'âge de l'air dans la salle étudiée soit plus élevé, c'est la salle contrôle qui présente les indices d'inhalation les plus élevés pour le médecin et l'infirmière, quelles que soient les conditions simulées. Ces résultats s'expliquent par la configuration particulière du diffuseur de soufflage de la salle contrôle qui est situé au-dessus du patient. En effet, les diffuseurs installés à cet endroit font en sorte que l'air frais est dirigé vers le mur qui fait face au patient (plan à $y = 6$ m). Cette zone, située loin du patient et du personnel, est ventilée en premier. Cette situation est illustrée à la Figure 22b, où l'on peut voir que la concentration de bioaérosols dans la salle contrôle, 390 secondes après le début de la simulation, reste élevée autour du patient. Pour la même durée de simulation, les concentrations dans la salle étudiée sont plus uniformes (Figure 22a), ce qui confirme une dilution adéquate du contaminant. Cependant, même si on constate une zone de recirculation où la fraction massique (Z) est légèrement plus élevée, les valeurs obtenues demeurent inférieures à celles de la salle contrôle. Ces observations coïncident avec les concentrations mesurées expérimentalement à la période zéro, c.-à-d. au moment de l'intubation, et à la période 1, qui présentent, en moyenne, une concentration plus élevée dans la salle contrôle que celle mesurée dans la salle étudiée (Tableau 3).

Étant donné que les configurations physiques entre les 2 salles de bronchoscopies se ressemblent et que le médecin et le personnel travaillent dans des zones équivalentes, on peut supposer que les différences observées entre ces salles sont majoritairement liées aux écoulements d'air créés par la localisation des diffuseurs permettant l'entrée et l'évacuation de l'air. La grille de soufflage située au-dessus du patient dans la salle contrôle projette l'air dans la direction opposée de la pièce ce qui crée une zone moins bien ventilée autour du patient. L'installation d'un autre genre de diffuseur, comme celui par exemple qui projette l'air sur 360 degrés permettrait probablement de réduire la concentration de bioaérosols dans cette région. La position actuelle du patient étant la moins favorable, une autre option envisageable serait de relocaliser l'endroit où se déroulent les interventions de bronchoscopie. Parmi les principes de réduction à la source des expositions aux particules non fluorescentes et fluorescentes (bioaérosols) pour le personnel travaillant dans les salles de bronchoscopie, la localisation des diffuseurs est l'un des aspects les plus importants à prendre en considération lors de la conception de ces salles, en plus du respect du nombre de CAH recommandé.

4.3.3 Dépôt des bioaérosols

Les Figures 23 et 24 montrent que la fraction de bioaérosols déposée sur les surfaces des deux unités de bronchoscopie diffère de façon significative. La vitesse de déposition due à la gravité étant plus élevée pour les particules ayant un diamètre de $5\text{ }\mu\text{m}$, on observe une FD plus importante pour ces particules que pour les particules dont le diamètre est de $2\text{ }\mu\text{m}$. Dans la salle étudiée, la FD se situant entre 1,0 et 2,2 % est relativement peu influencée par le débit de soufflage. Dans la salle contrôle, la fraction de bioaérosols déposée atteint 30 % avec un débit de ventilation de huit changements d'air par heure pour les particules dont le diamètre est de $5\text{ }\mu\text{m}$. Il est à noter que dans cette salle, des remises en suspension ont été observées lors de la circulation du personnel, comme le montrent clairement les mesures qui ont été prises au début de la journée.

Ces écarts entre les deux salles s'expliquent en partie par l'infiltration d'air sous la porte no. 2 de la salle étudiée. On peut observer, à la Figure 25a, que cette infiltration entraîne dans l'écoulement les particules situées près du sol, empêchant leur déposition dans cette région (zone en bleu). Par contre, à l'extérieur de la zone d'influence de l'écoulement due à l'infiltration (zone en vert), la masse déposée par unité de surface est relativement uniforme.

Les trajectoires des noyaux de gouttelettes, à quatre temps différents (Figures 26 et 27), montrent que la toux projette les bioaérosols jusqu'au plafond des salles où leurs trajectoires dépendront des mouvements d'air induits par la ventilation. Dans la salle étudiée (Figure 26), la plupart des bioaérosols se dispersent vers le haut avant d'être mélangés à l'air de façon uniforme. Quant à la salle contrôle, la dispersion initiale est plus limitée (Figure 27) : à $t = 70, 130$ et 190 s, le contaminant reste majoritairement dans la région située au-dessus du patient avant d'être dispersé dans le volume de la pièce ($t = 300$ s). Pour les deux salles, on observe une dispersion générale des bioaérosols dans toute la pièce. Aucune zone n'est épargnée. Cette dispersion générale dans toute la pièce a également été notée par Lindsley et coll. (2012), dans leur étude en laboratoire sur la dispersion des aérosols produits lors de toux ou d'éternuements.

4.4 Mesures préventives proposées

Les moyennes des diamètres aérodynamiques médians des particules fluorescentes (bioaérosols) sont compris entre $2,16$ et $3,56 \mu\text{m}$. À ces tailles, les bioaérosols se déplacent en suivant les courants d'air et sont susceptibles d'être inhalés par les personnes présentes dans les salles. Les pathogènes bactériens du groupe de risque 2 peuvent causer des infections et des colonisations chez le personnel soignant et les affecter à court ou à long terme. Sans compter que, même si nous n'avons pu les identifier, il est possible qu'il se trouve des virus infectieux dans l'air. D'autant plus que l'indice cumulatif d'inhalation montre que, lors de la bronchoscopie, le médecin est plus exposé que l'infirmière (figures 20 et 21).

L'augmentation du nombre de changements d'air au-delà de 24 CAH permettrait peut-être de réduire l'âge de l'air dans les pièces, améliorant ainsi sa qualité. Toutefois, un taux de ventilation plus élevé sans considérer les profils d'écoulement d'air ne conduit pas nécessairement à une décroissance plus rapide des concentrations. La configuration particulière du diffuseur de soufflage de la salle contrôle en est une démonstration. C'est donc à ce niveau que deviennent importantes les notions de conception de la ventilation dans les salles. Selon Nardell et coll. (1991), parce que la relation mathématique entre les taux de ventilation et la quantité de bioaérosols ou les risques infectieux dans l'air est logarithmique, une grande réduction des concentrations est prévisible pour des augmentations des taux de ventilation lorsque ceux-ci sont initialement faibles. Par contre, la réduction devient plus négligeable lorsque les taux de ventilation sont élevés. De plus, ces auteurs affirment que la protection fournie aux occupants d'une pièce par des taux de ventilation au-dessus des niveaux de confort devient en soi limitée, surtout si les expositions des occupants aux risques infectieux sont élevées comme c'est souvent le cas pendant les bronchoscopies et les intubations. La durée de l'exposition et le potentiel infectieux sont donc aussi des paramètres importants à considérer. Lors de l'élaboration d'une démarche préventive, il faut donc se rappeler que peu importe le nombre de CAH dans la salle, l'introduction du bronchoscope est un moment clé de l'examen, car une exposition accrue est prévisible pour le personnel soignant. Enfin, Nardell et coll. (1991) mentionnent que, question de

confort et de protection contre les risques infectieux aéroportés, les taux de ventilation doivent toujours respecter, voire dépasser les valeurs recommandées.

La salle contrôle ne respectait pas les normes relatives à la dépressurisation puisqu'elle était en pression positive. Cette situation a pu être causée par des travaux de rénovation effectués dans les locaux attenants. Il faut donc s'assurer, une fois les travaux terminés, que la salle redevienne en pression négative.

Le temps nécessaire aux particules fluorescentes (bioaérosols) pour retrouver leur niveau de base dans les deux salles de bronchoscopie est d'environ 15 minutes (Tableaux 3 et 5). Ce délai doit être respecté avant de réadmettre un nouveau patient ou de laisser le personnel hospitalier entrer dans la salle.

La fraction déposée des bioaérosols doit être prise en considération dans les mesures de prévention des infections, car il est reconnu que certains microorganismes pathogènes, lorsque déposés, peuvent survivre pendant une période de temps assez longue (Kramer et coll. 2006). La circulation et la présence du personnel dans les deux salles contribuent aussi à la mise en suspension dans l'air de ces microorganismes déposés sur les surfaces.

Une attention particulière doit être portée au nettoyage des surfaces : les simulations réalisées dans ce rapport montrent des dépôts de bioaérosols à la hauteur du plancher, sur le lit du patient et sur les tables, surtout dans la salle contrôle.

Il existe également d'autres approches d'ingénierie pour contenir les risques infectieux dans l'air intérieur des locaux. L'une d'elle est le contrôle à la source. Il s'agit d'isoler physiquement le patient infectieux, par exemple sous une hotte munie de filtres à haute efficacité (HEPA), ou rendre le patient non infectieux par des traitements médicaux (Nardell et coll. 1991). Lorsque possible, ces auteurs mentionnent qu'un diagnostic rapide et des traitements efficaces sur le patient peuvent éviter les procédures générant des bioaérosols infectieux.

En dernier lieu, sous les conditions rencontrées dans la présente étude, il est recommandé de porter des appareils de protection respiratoire jetables comme ceux de type N95 d'une façon continue lors des examens de bronchoscopie. Ce port doit être encadré par un programme de protection respiratoire.

4.5 Portées et limites de cette recherche

L'UV-APS 3314 de TSI nous a permis de détecter les particules non fluorescentes et fluorescentes (bioaérosols) et d'établir leur granulométrie. Toutefois, les prélèvements ont été effectués à une distance d'environ 1,5 mètre de la bouche du patient à cause des dimensions de nos appareils de mesure. Les concentrations auraient sans doute été plus élevées si les mesures avaient été prises à quelques centimètres de la bouche du patient, mais cela aurait gêné le bon déroulement des bronchoscopies.

Cette étude a été réalisée dans seulement deux salles de bronchoscopie et avec un seul type de broncoscope (flexible). Quinze bronchoscopies y ont malgré tout été suivies. La littérature scientifique reconnaît généralement qu'une dizaine de prélèvements sont suffisants pour obtenir

un échantillon représentatif (ACGIH, 1999; Mulhausen et Damiano, 1998). Selon la British Occupational Hygiene Society (BOHS), le nombre de bronchoscopies nécessaires pour être statistiquement représentatif ($p \leq 0,05$), avec une erreur acceptable de 20 %, est de 14 (BOHS, 1982).

La fraction viable des bioaérosols a également été mesurée. Malgré la sous représentativité de ces méthodes qui déterminent seulement les microorganismes vivants en état de croître sur des milieux de culture, elles ont permis l'identification de certains microorganismes du groupe de risque 2 pouvant provenir des conduits respiratoires des patients. L'utilisation des méthodes de détection en biologie moléculaire est très prometteuse, mais elle exige des précautions particulières qui n'ont pu être respectées dans le cadre de cette étude. Notons qu'une non détection ne signifie pas l'absence de microorganismes.

Les modèles et techniques de modélisation numérique également validés à partir des mesures expérimentales du SF6 ont permis de comprendre et de représenter graphiquement les écoulements d'air ainsi que leurs effets sur la déposition des particules. Ces modèles et techniques pourraient servir lors du réaménagement des salles de bronchoscopie, puisqu'une augmentation de la ventilation ne se traduit pas toujours par une diminution des concentrations.

Nous avons constaté que du point de vue infectieux et donc des particules fluorescentes, un temps raisonnable d'attente d'une quinzaine de minutes conditionnerait, pour les deux salles évaluées, un retour au bruit de fond du début de journée. Si des particules fluorescentes du même ordre de grandeur que les particules non fluorescentes venaient néanmoins à être émises dans l'air, on peut supposer qu'un temps d'attente beaucoup plus long, de l'ordre de 1,5 h, serait alors requis comme stratégie de prévention. Des études supplémentaires s'imposent pour analyser les liens possibles entre la taille d'une particule fluorescente et la probabilité qu'en découle qu'elle maintienne viable un ou des organismes vivants et les transporte.

Le nombre de CAH pour les deux salles est relativement élevé (respectivement 17 et 24 CAH pour les salles contrôle et étudiée) et représente une situation presque idéale. Il est donc probable que pour les salles de bronchoscopie ayant des CAH plus faibles, la diversité et les concentrations de microorganismes présents soient plus élevées.

5. CONCLUSION

L'objectif principal de cette recherche était de mesurer et de caractériser les concentrations totales de bioaérosols lors des bronchoscopies et de proposer des mesures préventives en relation avec la ventilation.

Les débits de ventilation mesurés respectaient les normes en vigueur. En revanche, pour ce qui est de la pression, la salle contrôle ne respectait pas les normes, car elle était en pression positive lors de nos mesures.

Les granulométries et les concentrations des trois types de particules ont été déterminées. La moyenne des diamètres aérodynamiques médians des particules fluorescentes (bioaérosols) se situe entre 2,0 et 3,6 μm . Deux modes sont présents : un premier à 1,5 μm et un second à 4 μm . La moyenne des diamètres aérodynamiques médians des particules non fluorescentes est plus petit, soit de 0,9 μm .

Dans les deux salles, les concentrations moyennes des particules non fluorescentes et fluorescentes (bioaérosols) sont significativement plus élevées lors des bronchoscopies lorsque comparées aux bruits de fond du début de la journée. Par ailleurs, aucune différence significative n'est notée pour les particules fluorescentes (bioaérosols) lors du retraitement. Une quinzaine de minutes sont nécessaires pour retrouver les concentrations des particules fluorescentes (bioaérosols) de base du matin. Ce temps peut atteindre 95 minutes pour la salle étudiée en regard d'un plus grand nombre de particules plus petites comme les particules non fluorescentes.

Dans les analyses des facteurs étudiés avec des ANOVA multifactorielles, la tâche (avant, pendant et après l'introduction du bronchoscope) constitue le seul facteur qui entraîne une différence significative pour les trois types de particules. Dans la salle contrôle, les concentrations des particules non fluorescentes et fluorescentes se révèlent significativement plus élevées lors de l'introduction du bronchoscope lorsque comparées aux périodes d'avant et jusqu'à 15 minutes après son insertion. Pour ce qui est du facteur « nombre de personnes dans la salle », il s'est avéré significatif que pour les particules non fluorescentes.

Le nombre de CAH n'est pas le seul facteur qui agit sur les concentrations. Cette observation vient donc appuyer l'hypothèse que les concentrations pourraient être différentes à cause des divers écoulements d'air. Même dans le cas de CAH très élevés, certains microorganismes du groupe de risque 2 (opportunistes) semblent provenir des conduits respiratoires des patients. Malgré que les méthodes de biologie moléculaire n'aient pas permis d'identifier la présence de microorganismes plus pathogènes comme les mycobactéries et les virus de l'influenza A et B, ces derniers peuvent malgré tout être présents dans ce type d'environnement.

La dispersion des bioaérosols en fonction du nombre de changements d'air par heure a été modélisée. Les simulations ont montré que l'âge moyen de l'air décroît de façon exponentielle avec l'augmentation du nombre de changements d'air par heure. Des écarts significatifs ont été observés entre 18 et 24 CAH. Quelle que soit la salle modélisée, le débit de ventilation de 24 CAH ne permet pas d'atteindre la valeur asymptotique de l'âge moyen de l'air.

Les résultats numériques des taux de décroissance de SF6 en fonction du temps sont similaires aux taux de décroissance mesurés expérimentalement et les coefficients de corrélation pour les trois salles sont tous statistiquement significatifs ($p \leq 0,05$). Les résultats des simulations effectuées par les modèles développés correspondent donc aux valeurs mesurées.

Les paramètres globaux tels que l'âge moyen de l'air et le coefficient d'échange d'air montrent que la ventilation générale de la salle contrôle est plus efficace que la ventilation de la salle étudiée. Cependant, l'indice cumulatif d'inhalation a mis en évidence l'importance du positionnement des grilles de soufflage et d'extraction en relation avec la localisation de la source d'émission. Dans les principes de réduction à la source des expositions, la localisation de ces diffuseurs est donc l'un des aspects les plus importants à considérer.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Agence de santé publique du Canada. 2007. Normes canadiennes pour la lutte antituberculeuse. 6^e édition. Ottawa. Canada.
- AIA. 2006. The American Institute of Architects and the Facilities Guidelines Institute. Guidelines for Design and Construction of Hospital and Health Care Facilities. American Institute of Architects Press. Washington, DC. 18 p.
- AIHA. 2009. Mathematical Models for Estimating Occupational Exposure to Chemicals. American Industrial Hygiene Association. Ed. Keil B., Simmons C.E., Anthony T.R. 2^e édition. Fairfax. VA. 106 p.
- ACGIH. 1999. Bioaerosols: Assessment and Control. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Cincinnati. OH. 322 p.
- ASTM. 1993. Standard Test Methods for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. Designation E 741-93. American Society for Testing and Materials. Philadelphia. PA. pp. 1-16.
- ASHRAE. 2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta. GA. 30 p.
- ASHRAE. 2007. Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications. Dans: Chapitre 7: Health Care facilities. ASHRAE Handbook. SI edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta. GA. 16 p.
- ASHRAE. 2008. Ventilation of Health Care Facilities. ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2008. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 17 p.
- ASHRAE. 2009. ASHRAE Position Document on Airborne Infectious Diseases. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 17 p.
- Bacq-Calberg, C.-M., Coyette, J., Hoet, P., Nguyen-Distèche, M. 1999. Microbiologie. 2^e édition. De Boeck Université. Bruxelles. 1014 p. Traduction du livre Microbiology de Prescott, L. M., Harley, J. P., Klein, D. A.
- Beggs, C. B., Kerr, K. G., Noakes, C. J., Hathway, E.A., Sleight, P. A. 2008. The ventilation of multiple-bed hospital wards: Review and analysis. American Journal of Infection Control, 36(4):250-259.
- Beggs, C.B., Noakes, C.J., Sleight, P.A., Fletcher, L.A., Siddiqi, K. 2003. The Transmission of Tuberculosis in Confined Spaces: an Analytical Review of Alternative Epidemiological Models. Int J Tuberc Lung Dis 7(11):1015-26.

- British Occupational Hygiene Society (BOHS). 1993. Sampling strategies for Airborne Contaminants in the workplace. Technical Guide No. 11, H and H Scientific Consultants Ltd, Leeds, UK, 84 p.
- Camuffo, D., Brimblecombe, P., Van Grieken, R., Busse, H-J., Stuardo, G., Valentino, A., Bernardi, A., Blades, N., Shooter, D., De Bock, L., Gysels, K., Wieser, M., and Kim, O. 1999. Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy. *The Science of the Total Environment* 236(1-3):135-52.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). 2005. Guidelines for preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care settings. *MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report* 54 (RR-17):1-142.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). 2009. Bacterial coinfections in lung tissue specimens for fatal cases of 2009 pandemic Influenza A(H1N1)-United States, *MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report* 58:1071-1074.
- Comité ministériel sur les mesures de précaution contre le syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS). 2004. Rapport final. Santé et services sociaux, Québec, 49 p.
- Comité sur les infections nosocomiales du Québec (CINQ). 2011. Évaluation du risque et opinion sur le port d'un appareil de protection respiratoire de type N-95 lors du retraitement d'un bronchoscope potentiellement contaminé par une bacille tuberculeux. Institut national de santé publique du Québec, Québec, 7 p.
- CSA. 2010. Système de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air dans les établissements de santé – Exigences particulières. Norme CSA Z317.2-10.
- CSST. 2009. Pour bien régler et bien aménager un poste de travail informatisé. Rapport DC 200-614. 2 p.
- Drolet, D., Goyer, N., Roberge, B., Lavoué, J., Coulombe, M., Dufresne, A. 2010. Stratégies de diagnostic de l'exposition des travailleurs aux substances chimiques. Études et recherches, rapport R-665, IRSST. Repéré à <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-665.pdf> {Dernière consultation : 6 février 2015}.
- Duquid, J.P. 1945. The size and duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *Journal of Hygiene* 54:471-479.
- Goyer, N., Lavoie, J., Lazure, L., Marchand, G. 2001. Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. Études et recherches, guide technique T-23, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 63 p.
- Gui, Q. 2008. Field analysis of the Efficiency of the Three Most Frequently-Used Mobile Ventilation Systems in Bronchoscopy Suite at Montreal Sacre-Cœur Hospital. Graduate Research Project Report, McGill University, 65 p.

- Hathway, E.A. Noakes, C.J. Sleigh, P.A. Fletcher L.A. 2011. CFD simulation of airborne pathogen transport due to human activities, *Building and Environment* 46:2500-2511.
- Hinds, W.C. 1982. *Aerosol technology*. Wiley-Interscience publication, NY, USA, 424 p.
- Klugman, K., Chien, Y., Madhi, S. 2009. Pneumococcal pneumonia and Influenza: a deadly combination. *Vaccine* 27:C9-C14.
- Klugman, K. 2012. Density of carriage: can it predict pneumonia ? *Int J Infect Dis* 16(S1):31.
- Kramer, A., Schwebke, I., Kampf, G. 2006. How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review. *BMC Infectious Diseases* 6:130-137.
- Lai, A.C.K., Thatcher, T.L., Nazaroff, W. W. 2000. Inhalation Transfert Factors for Air Pollution Health Risk Assessment, *Journal of Air & Waste management Association* 50:1688-1699.
- Lavoie, J., Cloutier, Y., Lara, J., Marchand, G. 2007. Guide sur la protection respiratoire contre les bioaérosols : Recommandations sur le choix et l'utilisation. Études et projets de recherche, guide technique RG-497, IRSST, Québec, 30 p. Repéré à <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/RG-497.pdf> {Dernière consultation : 6 février 2015}.
- Lenhart, S.W., Seitz, T., Trout, D., Bollinger, N. 2004. Issues affecting respirator selection for workers exposed to infectious aerosols: emphasis on healthcare settings. *Applied Biosafety* 9(1):2-36.
- Li, Y., Leung, G.M., Tang, J.W. 2007. Role of ventilation in Airborne transmission of Infectious agents in the Built Environment- A multidisciplinary Systematic Review. *Indoor Air* 7:2-18.
- Lindsley, WG, King, WP, Thewlis, RE, et al., 2012. Dispersion and Exposure to a Cough-Generated Aerosol in a Simulated Medical Examination Room. *J Occup Environ Hyg* 9(12):681–690.
- Loudon, R., Spohn, S. 1969. Cough Frequency and Infectivity in Patients with Pulmonary Tuberculosis. *Am Rev Resp Dis* 99:109-11.
- MacIntyre, C.R., Wang, Q., Seale, H., Yang, P., Shi, W., Gao, Z., Rahman, B., Zhang, Y., Wang, X., Newall, A.T., Heywood, A., Dwyer, D. 2013. A randomized clinical trial of three options for N95 respirators and medical masks in health workers. *Am J Respir Crit Care Med* 187(9):960-6.
- Madhi, S., Klugman, K. 2004. A role for Streptococcus pneumonia in viral associated pneumonia. The vaccine trialist group. *Nat med* 10:811-813.
- Malasky, C., Jordan, T., Potulsky, F., Reichman, L.B. 1990. Occupational Tuberculosis Infections among Pulmonary Physicians in Training. *Am Rev Resp Dis* 142:505-7.

- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. 2013a. Fire Dynamics Simulator User's Guide, FDS Version 6.0, SVN Repository Revision: 16162, 288 p.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. 2013b. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification, FDS Version 6.0, SVN Repository Revision: 16162, 184 p.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. 2013c. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation, FDS Version 6.0, SVN Repository Revision: 16162, 496 p.
- Menzies, R., Fanning, A., Yuan, L. et al. 2000. Hospital Ventilation and Risk of Tuberculous Infection in Canadian Health Care Workers. *Ann Intern Med* 133(10):779-89.
- Mulhausen J.R., Damiano J. A. 1998. Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures, AIHA Press, Stock No. 327-EA-98, Fairfax, VA.
- Murray, P. R., Baron, E. J., Pfaller, M. A., Tenover, F. C., & Tenover, R. H., 1995. Manual of Clinical Microbiology, (éd. Sixth), Washington D.C., USA, ASM Press, 1482 p.
- Nardell, E.A., Keegan, J., Cheney, S.A., Etkind, S.C. 1991. Airborne Infection: Theoretical Limits of Protection achievable by Building Ventilation. *Am Rev Resp Dis* 144:302-6.
- Noble, R.C. 1981. Infectiousness of Pulmonary Tuberculosis after Starting Chemotherapy. 1981. *Am J Infect Control* 9:6-10.
- Pechère, J.C., Acar, J., Armengaud, M., Cherubin, C., Grenier, B., Mollering Jr, R., Sande, M., Zinner, S. et Waldvogel, F. 1983. Reconnaître, comprendre, traiter- Les infections, seconde édition, Ste-Hyacinthe, Québec, Canada, Malone S.A. Press, 819 p.
- Qian, H. Li, Y., Nielsen, P.V., Hyldgaard, C.E. 2008. Dispersion of exhalation pollutants in a two-bed hospital ward with a downward ventilation system. *Building and Environment* 43:344-354.
- Recommandations du directeur national de santé publique pour la prise en charge de cas de grippe A(H1N1) dans les installations d'hospitalisation et les installations d'hébergement des établissements de santé du Québec. 2009. Santé et services sociaux du Québec, 19 p.
- Redrow, J., Mao, S., Celik, I., Posada A., Feng, Z.-G. 2011. Modeling the evaporation and dispersion of airborne sputum droplets expelled from a human cough, *Buildings and Environment* 46:2042-2051.
- Roy, C.J., Milton, D.K. 2004. Airborne Transmission of Communicable Infections. The Elusive Pathway. *N Engl J Med* 350:1731-1739.
- Santé Canada. 1996. Lignes directrices pour la lutte antituberculeuse dans les établissements de soins et autres établissements au Canada. *CCDR* 22(S1):1-55.

- Shenal, B.V., Radonovich, Jr, L.J., Cheng, J., Hodson, M., Bender, B.S. 2012. Discomfort and exertion associated with prolonged wear of respiratory protection in a health care setting. *J Occup Environ Hyg* 9(1):59-64.
- Schwartzman, K., Loo, V., Pasztor, J., Menzies, D. 1996. Tuberculosis Infection among health Care Workers in Montréal. *Am J Respir Crit Care Med* 154:1006-12.
- Sun, W. Ji, J. 2007. Transport of Droplets Expelled by Coughing in Ventilated Rooms. *Indoor and Built Environment* 16(6):493-504.
- Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W.W., Cain, W.S., Fisk, W.J., Grimsrud, D.T., Gyntelberg, F., Li, Y., Persily, A.K., Pickering, A.C., Samet, J.M., Spengler, J.D., Taylor, S.T., Weschler, C.J. 2011. Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air* 21:191-204.
- TSI Inc. 2010. Model 3314 Ultraviolet Aerodynamic Particulate Sizer (UV-APS) Spectrometer. User's Manual, Shoreview, MN 55126, USA.
- Verreault, D., Moineau, S., Duchaine, C. 2008. Methods for Sampling Airborne Viruses. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 72(3):413-444.
- Wang, X.Y., Kilgore, P.E., Lim, K.A., Wang, S.M., Lee, J., Deng, W., Mo, M.Q., Nyambat, B., Ma, J.C., Favorov, M.O., et al. 2011. Influenza and bacterial pathogen coinfections in the 20th century. *Interdiscip Perspect Infect*, Article ID: 146376, 6 p.
- Wells, W.F., Stone, W.R. 1934. On Air-Borne Infection. Study III. Viability of Droplet Nuclei Infection. *Am J Epidemiol* 20(3):619-627.
- Welty, S. 2009. Swine H1NI Influenza A: Transmission of Viruses in Indoor Air: HVAC System Protection Options. Federal Interagency Committee for Indoor Air Quality, US-Environmental Protection Agency.
- Yang, S., Lee, G.W.M. et col. 2007. The Size and Concentration of Droplets Generated by Coughing in Human Subjects. *Journal of Aerosol Medicine* 20(4):484-494.
- Yassi, A., Bryce, E. 2004. Protecting the faces of health care workers: Knowledge gaps and research priorities for effective protection against occupationally-acquired respiratory infectious diseases. The Change Foundation, Ontario Hospital Association and Occupational Health and Safety Agency for Healthcare in BC, 103 p.
- Yin, S., Sze-To, G.N., Chao, C.Y.H. 2012. Retrospective analysis of multi-drug resistant tuberculosis outbreak during a flight using computational fluid dynamics and infection risk assessment, *Building and Environment*, 47:50-57.

- Zhao, B. Yang, C., Yang, X. Liu, S. 2008. Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models. *Building and Environment*, 43(4):388-397.
- Zhou, H., Haber, M., Ray, S., Farley, M., Panozzo, C., Klugman, K. 2012. Invasive pneumococcal pneumonia and respiratory virus coinfections. *Emerg Infect Dis* 18:294-297.