

3 juillet 2020

Dirk Mürbe<sup>1</sup>, Mario Fleischer<sup>1</sup>, Julia Lange<sup>2</sup>, Hansjörg Rotheudt<sup>2</sup>, Martin Kriegel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Charité Universitätsmedizin Berlin, Klinik für Audiologie und Phoniatrie

<sup>2</sup> Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut

Traduction : Nicolas Stroesser  
Directeur du Conservatoire à  
rayonnement régional de  
Metz Métropole

## Résumé

*Dans cette étude, sont présentées les mesures de concentration en particules que contiennent les aérosols émis pendant le chant par des chanteurs et chanteuses professionnels, au moyen d'un compteur de particules, en les comparant aux données recueillies lors de la respiration au repos et pour la voix parlée. Dans la cohorte étudiée, composée de huit personnes (4 hommes et 4 femmes), le nombre de particules émises pendant le chant se situaient entre 753,4 et 6093,14 P/s.*

*Le facteur d'augmentation entre le chant et la voie parlée se situe entre 3,98 et 99,54 P/s. Les études doivent permettre une estimation plus précise de la propagation possible du SRAS-CoV-2 lors du chant pour, notamment, améliorer les conditions de gestion du risque pour le chant choral.*

## Introduction

L'inhalation de particules liquides en suspension contenant le virus demeure la voie principale de transmission du SRAS-CoV-2 (Asadi et al., 2020a ; Morawska and Cao, 2020). En fonction de la taille des particules, on peut distinguer les gouttelettes, qui sont d'un diamètre supérieur à 5 µm et les particules d'aérosol dont le diamètre est inférieur à 5 µm (Couch et al., 1966 ; Tellier, 2006 ; Judson and Munster, 2019) et dont le comportement diffère sur le plan de la gravitation. Des gouttelettes de l'ordre de 100 µm tombent rapidement au sol et peuvent être propagées jusqu'à une distance de 1,50 mètre (Kähler and Hain, 2020 ; Wei and Li, 2015). Pour les aérosols, l'évaporation des gouttelettes contenant l'agent pathogène les rend plus légères, de telle sorte qu'en flottant dans l'air pendant de plus longues périodes, ces particules se répandent dans les pièces fermées par le flux et la diffusion de l'air ambiant (Stadnytskyi et al., 2020).

Sur cette d'une transmission possible par voie aérienne du virus, il faut prendre en considération un certain nombre de facteurs, tels que l'air ambiant, la température et l'humidité, lesquels interviennent dans la diffusion des aérosols dans l'espace (Morawska, 2006).

Les aérosols sont tout autant produits par la parole que par le chant, car les voies respiratoires possèdent cette double fonction d'échange respiratoire, à la fois lors de la production de sons vocaux et lors du langage parlé. Les mécanismes générateurs d'aérosols conduisant à la formation de particules se situent au niveau des alvéoles pulmonaires (Johnson and Morawska, 2009) et des effets d'écoulement sont visibles au niveau des cordes vocales et de l'appareil phonatoire (Johnson et al., 2011).

---

<sup>1</sup> <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/11490>

Il est établi que la production d'aérosols est plus importante lorsque l'on parle que lorsque l'on respire, de même que le nombre de particules émises est directement lié à l'intensité de la voie (*Hartmann et al., 2020 ; Asadi et al., 2020b*).

Pour le chant, on suppose que la production d'aérosols pourrait être particulièrement élevée, du fait de mécanismes physiologiques spécifiques et d'une émission vocale prolongée dans le temps. Cette hypothèse est étayée par des rapports faisant état de taux d'infection élevés lors de certaines répétitions de chœurs, dans des salles fermées (*Hamner et al., 2020*).

Des mesures conduites précédemment décrivent, notamment, des phénomènes relevant de la mécanique des fluides au niveau de la bouche lors du chant comme, par exemple, l'augmentation du nombre de gouttelettes émises (*Annrud et al., 2020 ; Kähler and Hain, 2020*). On peut en déduire des règles de distance pour se protéger contre les infections à gouttelettes. Cependant, une évaluation du risque basée sur la distribution des aérosols dans des pièces plus grandes n'est pas possible.

Le but des études actuelles vise à déterminer, dans un premier temps, le nombre et la répartition par taille des particules — même petites — qui sont émises lors du chant, au niveau de la bouche, par les chanteurs professionnels. Ces informations à la source peuvent servir de base à une modélisation de la distribution des aérosols dans les grandes salles pour respecter les limites des conditions d'exploitation lors des concerts et productions d'opéra. Ainsi, les données ici présentées visent à contribuer à améliorer les stratégies de gestion du risque dans les domaines de la culture et de l'éducation et à soutenir la spécification des mesures d'hygiène et des systèmes de ventilation afin de renouer avec le spectacle vivant.

## Résultats

Comme indiqué dans la partie méthodologie, la méthode de mesure du nombre de particules ici utilisée détecte différentes tailles de particules de  $> 0,3 \mu\text{m}$  à  $> 10 \mu\text{m}$ . Le diagramme de probabilité logarithmique (figure 1) montre que 99% des particules ont un diamètre  $\leq 5 \mu\text{m}$  (80% des particules ont un diamètre  $\leq 1 \mu\text{m}$ ). Sur la base de cette observation, les résultats qui suivent sont donnés pour les particules dont la taille va de  $0,3 \mu\text{m}$  -  $5 \mu\text{m}$ , conformément au principe selon lequel ces particules entrent dans la catégorie des aérosols. Les résultats concernant la respiration et la parole chez les sujets de la présente étude ont déjà été analysés et publiés dans le cadre d'une plus grosse cohorte. Cependant et afin de permettre une comparaison directe avec les données relatives au chant, les données de ce sous-groupe qui suivent ont été réanalysées.

Les études ont montré des différences substantielles dans les taux d'émission en fonction des différentes situations de mesure. La figure 2 montre les médianes de l'intensité d'émission de particules en fonction du niveau de pression acoustique (db), selon différentes situations : respiration par la bouche, voie parlée et chant. Cela vient confirmer l'hypothèse d'un taux d'émission d'aérosols nettement plus élevé lors du chant que dans durant respiration par la bouche ou par la parole.

Alors que les valeurs médianes pour la respiration par la bouche se situent entre 4,71 P/s (S1, S7 et S8) et 84,76 P/s (S2), celles pour le chant se situent entre 753,4 P/s (S5) et 6093,14 P/s (S2).

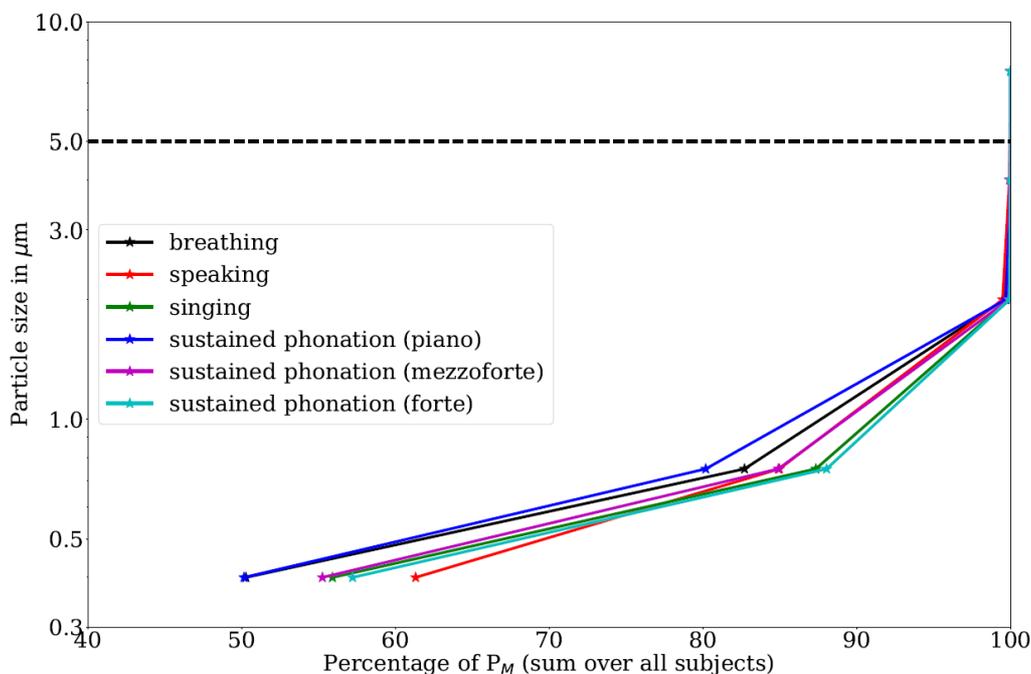
Le facteur d'augmentation du taux d'émission comparatif entre le chant et la parole était compris entre 3,98 (S1) et 99,54 (S2), alors qu'entre le chant et la respiration, ce facteur d'augmentation était compris entre 15,25 (S6) et 330 (S1).

Les mesures ont montré que les tessitures aiguës des sopranos (femmes) et des ténors (hommes) ont des niveaux de pression acoustique plus élevés que les tessitures graves des altos et des basses. Alors que le niveau de pression acoustique maximum était toujours positivement corrélé avec le taux d'émission de particules pour les hommes dans l'exemple sélectionné, il n'y avait pas de corrélation claire pour les voix des femmes sur le plan de la tessiture.

La figure 3 donnent les résultats de mesures effectuées sur la vocalisation de la voyelle « a » à différentes intensités. Pour sept des huit personnes testées, on observe une augmentation du taux d'émission de

particules en fonction de l'intensité de la voix. On peut ainsi constater un facteur d'augmentation allant jusqu'à 114,33 (S3) entre un son *piano* et un son *forte*.

Là encore, des différences entre les sexes sont constatées avec des taux d'émission de particules plus élevés pour les femmes (2024,77 P/s (S1) à 8075,53 P/s (S3)) par rapport aux hommes (376,7 P/s pour S5 à 2848,8 P/s pour S7) en fonction de l'augmentation de la puissance vocale. Pour l'ensemble des personnes testées, l'augmentation attendue de l'intensité vocale du *piano* au *forte* se traduit dans les valeurs mesurées des niveaux de pression acoustique (db).



**Figure 1 :** Graphique de probabilité logarithmique de distribution de fréquences de la taille des particules détectées.

A cet égard, la figure 4 illustre la relation entre le taux d'émission et le niveau de pression acoustique maximal. La tendance est que l'augmentation du niveau de pression acoustique s'accompagne d'une augmentation du taux d'émission de particules et que, sur ce plan, on note un comportement identique entre les hommes et les femmes. En ce qui concerne la phonation des voyelles tenues, on peut affirmer que les taux d'émission de particules peuvent varier de plus d'un facteur 2.

## Discussion

En raison du risque accru de transmission du SRAS-CoV-2 par le chant et au regard de l'accumulation d'infections observées lors de répétitions, l'étude des émissions de particules et l'évaluation des aérosols dans les salles constituent un élément central dans l'évaluation du risque que présente la pratique du chant choral dans des espaces clos.

La méthode de mesure utilisée (compteur laser de particules) offre une très grande précision quant au nombre absolu de particules et à leur taille, car les sources d'interférence ont été réduites au minimum. En outre, l'adéquation du dispositif expérimental périphérique a pu être validée dans le cadre des mesures d'essai.

La vélocimétrie par images de particules (PIV) est un autre moyen pour l'étude de la distribution de la taille des gouttelettes pendant la respiration, la parole et le chant. Elle repose sur des photos en haute résolution de particules éclairées, par exemple, par une lumière laser. Les études utilisant la PIV montrent également que le fait de parler à un volume élevé produit plus de particules que le fait de parler à un faible volume (Anfinrud et al, 2020). Cependant, en raison de plusieurs interférences dans les flux, il n'est possible de faire

que des observations qualitatives. La taille et le nombre de particules ne peuvent être qu'estimés car la pièce contient une concentration de particules préexistantes et certaines gouttelettes ne peuvent être captées que de manière floue. Dans une étude de *Chen-Yu et al. (2000)*, des particules de tailles 1, 10 et 100  $\mu\text{m}$  ont pu être mesurées avec la PIV, et une grande précision a été observée avec des particule à partir d'une taille de 6  $\mu\text{m}$ . Des études récentes montrent que la PIV peut être utilisée pour étudier des particules de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  (*Kähler et Hain, 2020*). Cependant, le compteur de particules laser offre une plus grande précision dans la détermination du nombre et de la taille des particules dont le diamètre est compris entre 0,3  $\mu\text{m}$  et 20  $\mu\text{m}$ . Comme la taille des aérosols émis spécifiquement en parlant et en chantant est majoritairement supérieure à 1  $\mu\text{m}$ , on ne peut pas en déduire qu'ils plongent rapidement vers le sol. La taille moyenne des particules émises pendant le chant a été estimée par calcul par *Loudon et Roberts (1967, 1968)* à environ 68  $\mu\text{m}$ . Cette même étude a, en outre, établi que la taille moyenne des particules émises par la voix parlée est de 81  $\mu\text{m}$ . L'écart entre ces valeurs mesurées et celles présentées dans cet article est probablement dû au fait que les méthodes de mesure de haute précision n'étaient pas disponibles à l'époque. *Asadi et al. (2019)*, entre autres, ont pu montrer que la taille des particules émises lors de la parole et de la respiration est nettement inférieure à 10  $\mu\text{m}$  (voir aussi *Papineni and Rosenthal (1997)*).

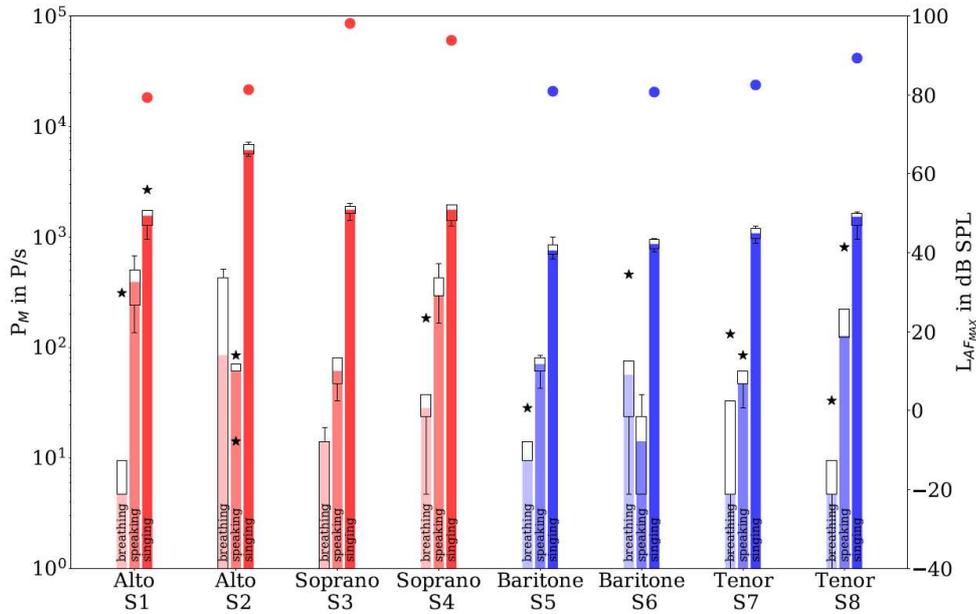
La présente étude confirme que les taux d'émission d'aérosols sont plus élevés dans le chant qu'avec la parole et la respiration. Nos mesures confirment une étude sur la voie parlée réalisée par *Asadi et al (2019)* et montrent que l'augmentation de la quantité d'aérosols est proportionnelle à l'intensité sonore pendant le chant, en particulier lors des notes tenues. L'étude d'*Asadi et al.(2019)* a montré une fourchette de progression allant de 1 à 100 P/s émise en en parlant, ce qui est semblable à nos mesures (14,13 à 390,83). Des valeurs similaires de 330 P/s ont été mesurées pour des particules dont la taille est comprise entre 0,8 et 5,5  $\mu\text{m}$  (*Morawska et al. (2009)*) lors de sons tenus sur des voyelles, tandis que des gouttelettes de plus grande taille pouvant atteindre 500  $\mu\text{m}$  peuvent se produire, en particulier avec les consonnes occlusives non voisées (*Anfinrud et al., 2020*). On constate aussi une similitude pour le taux d'émission de particules de la voix parlée avec *Asadi et al (2019)*.

Cela étant, les conditions de mesure (voyelles tenues) ne reflète pas la situation réelle dans le chant choral, où les consonnes et les voyelles alternent dans un passage chanté et sont interrompues par des pauses. C'est pourquoi, dans la présente étude, un fragment de 50 secondes du Lied "*Abschied vom Walde*" de Felix Mendelssohn Bartholdy a été choisi et dans lequel les différentes voix ont été chantées, chacune dans leur registre correspondant (soprano, alto, ténor, baryton). Cette extrait a été comparé aux deux situations de référence, à savoir la respiration par la bouche au repos et la lecture d'un texte standardisé. Ici aussi, on constate une augmentation du nombre de particules émises pendant le chant par rapport à la parole.

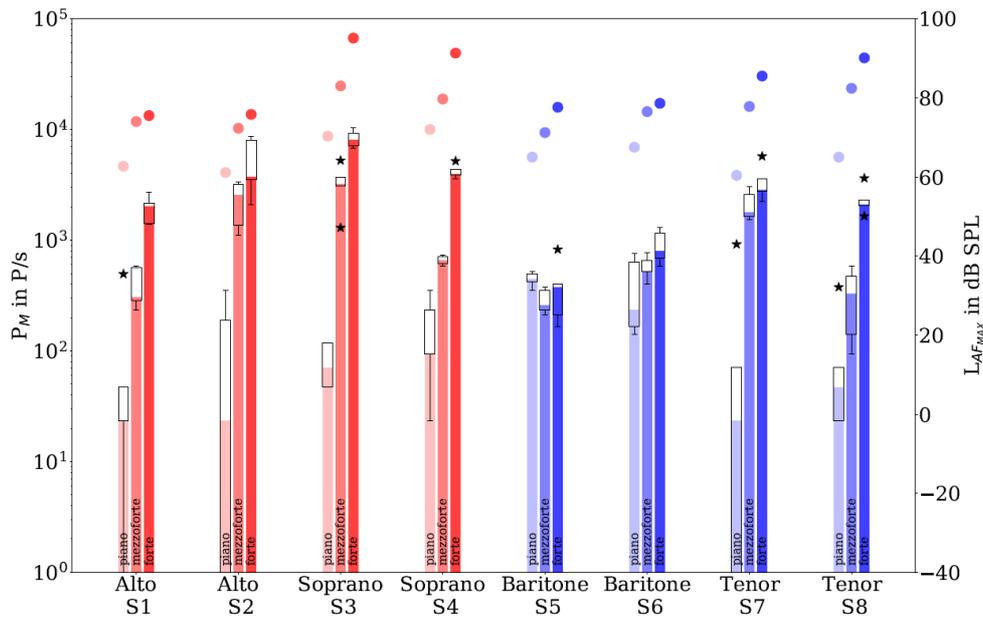
Cela est dû à l'augmentation du taux de phonation (vocalisation par unité de temps) et à l'augmentation du niveau de pression acoustique, mais aussi au fait que les sons ainsi émis entraînent une augmentation de l'émission d'aérosols (*Asadi et al., 2020 a,b*). Cependant, les données présentées montrent une nette hétérogénéité au sein de la cohorte. Ainsi, l'intensité de la source des particules déterminées pendant le chant fluctue de près d'un ordre de grandeur. De même, l'augmentation des particules entre le chant et la parole varie de près de deux ordres de grandeur, de sorte que certains sujets pourraient être considérés comme des super-émetteurs (*Asadi et al., 2019*).

Cependant, l'intensité de cette production de particules ne fournit aucune information sur une concentration possible en SRAS-CoV-2. La probabilité qu'une particule d'un 1 micron contienne un virus n'est que de 0,01 % (*Stadnytskyi et al., 2020*). En considérant une charge moyenne d'ARN viral comprise entre  $7 \times 10^6$  et  $2,35 \times 10^9$  par  $\text{mm}^3$  (*Wölfel et al., 2020*), on peut donc estimer qu'un temps de parole d'une minute à forte intensité produit au moins 1000 noyaux de gouttelettes contenant du virus et pouvant rester dans l'air pendant une plus longue période.

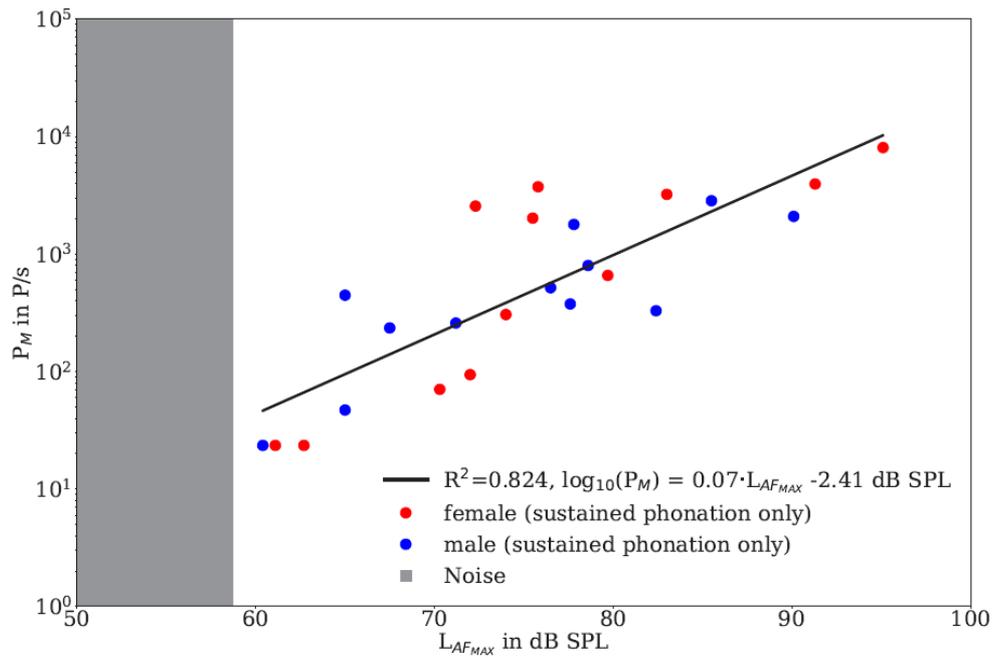
Toutefois, ce chiffre ne peut pas être utilisé actuellement pour évaluer l'infectiosité ou la probabilité d'infection (*Bar-On et al., 2020*).



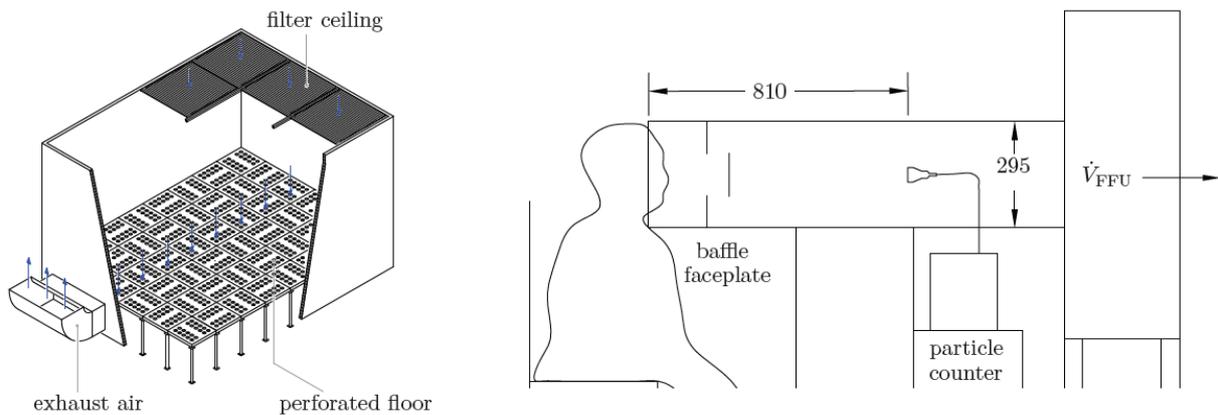
**Figure 2 :** Graphique en boîtes à moustaches de l'intensité des particules détectées (les barres représentent les médianes) en fonction des tessitures et genres pour les 3 situations de mesures : respiration par la bouche, voix parlée, voix chantée. Seules les particules  $\leq 5 \mu\text{m}$  ont été prises en considération. Pour la voix chantée, les cercles concernent le volume sonore maximal.



**Figure 3 :** Graphique en boîtes à moustaches de l'intensité des particules détectées (les barres représentent les médianes) en fonction des tessitures et genres et sur une note tenue (voyelle « a »). Seules les particules  $\leq 5 \mu\text{m}$  ont été prises en considération. Pour la voix chantée, les cercles concernent le volume sonore maximal.



**Figure 4** : Relation entre l'intensité d'émission de particules et le niveau d'intensité sonore maximum sur une note tenue (voyelle « a ») pour les trois niveau d'intensité (piano, mezzo-forte et forte) en en fonction du genre. Seules les particules  $\leq 5 \mu\text{m}$  ont été prises en compte. Le champ gris représente le niveau sonore du bruit de fond résultant exclusivement des conditions ambiantes (principalement le compteur de particules).



**Figure 5**. A gauche : schéma de la chambre pure avec flux d'aération verticale. A droite, dispositif de l'étude avec une personne en tenue spéciale (pureté) pour le décompte du nombre de particule émise lors de la respiration.

