

# **ANALYSE DU FLUX D’AIR DU PURIFICATEUR D’AIR CITY M DE CAMFIL**

D<sup>R</sup> KEVIN NOLAN

*École d’ingénierie mécanique et des  
matériaux, University College Dublin*

Résumé. Ce travail concerne une évaluation des performances du purificateur d’air City M de Camfil sur deux points différents. Le premier concerne la cinématique de l’écoulement associée au dispositif et le second la capacité de filtration des aérosols. La cinématique de l’écoulement est étudiée à l’aide d’une nouvelle approche de la vélocimétrie par image de particules qui utilise une vidéo à ultra-haute résolution pour extraire les flux de sortie sur 2 m de longueur. Cela permet d’interroger la dynamique du dispositif à l’échelle de la pièce. Les mesures de filtration des aérosols utilisent le comptage des particules et la quantification par diffusion laser pour déterminer l’efficacité de filtration du dispositif. Alors que la cinématique du flux suggère que le City M peut potentiellement filtrer sur un cycle de 90 secondes, les mesures d’aérosols montrent que l’appareil élimine de façon efficace les aérosols en moins de 200 secondes.

## 1. Introduction

Tout au long de la pandémie de Covid, la propagation du virus par voie aérienne via les gouttelettes respiratoires et l'aérosol a fait l'objet d'un débat permanent. L'Organisation mondiale de la santé a mis du temps à faire évoluer ses recommandations sur la question, malgré les éléments de preuves croissants [1, 2, 3]. Des recherches ont démontré que le virus peut persister jusqu'à 16 heures dans des particules de 2 à 3  $\mu m$  lorsqu'il est maintenu dans un tambour rotatif pour éviter le dépôt sur la surface [4]. Le temps de séjour moyen d'un aérosol varie en fonction du diamètre des gouttelettes, les particules de 10  $\mu m$  de diamètre restant dans l'air pendant 0,7 heure [5] dans un environnement contrôlé. Cependant, l'air intérieur n'est pas stationnaire et est soumis à des courants d'air dus aux systèmes de CVC et aux panaches thermiques générés par la présence d'êtres humains [6]. L'aérosol respiratoire, quant à lui, peut rester dans l'air pendant des heures [7]. Assurer une ventilation intérieure efficace pour limiter la transmission des agents pathogènes est donc dans l'intérêt de la santé publique, sans compter les avantages économiques.

Les systèmes de CVC sont de plus en plus présents dans les bâtiments modernes, mais de nombreux environnements intérieurs ne sont pas ventilés. Dans bon nombre d'écoles, les fenêtres des salles de classe sont ouvertes toute l'année [8], mais l'efficacité de cette pratique n'est que partiellement démontrée. La clé d'une ventilation intérieure efficace est la compréhension de la dynamique des flux à l'échelle de la pièce [9] et de la façon dont les schémas de circulation de l'air jouent un rôle dans la transmission, comme cela a été largement documenté dans les épidémies connues [10]. Les mesures globales, telles que le renouvellement de l'air une fois par heure, ne donnent pas une image exhaustive voire une compréhension de la façon dont l'air, et tout aérosol qu'il contient, est transporté dans un espace donné. Il est important de comprendre comment la contamination croisée, le recyclage de l'air et les volumes morts contribuent à l'exposition aux agents pathogènes dans des espaces par ailleurs bien ventilés. Cela nécessite un degré d'analyse plus important que celui généralement effectué lors de l'installation d'un système de CVC, qui prend en compte le microclimat intérieur et les déplacements des utilisateurs de l'espace concerné.

La mise à niveau des systèmes de CVC existants est souvent d'un coût prohibitif et, comme le montrent des travaux antérieurs, elle n'empêche pas la transmission d'une personne à l'autre dans le flux de circulation [10]. Les purificateurs d'air portables constituent alors un dispositif intéressant pour remédier à ces problèmes. Ces dispositifs sont petits ( $< 0,1 m^3$  de volume), silencieux et à faible coût. Ils peuvent offrir une filtration d'air personnalisée, compléter les installations de CVC existantes et être déployés facilement.

Ce rapport évalue les performances du purificateur d'air City M de Camfil - Illustration 1 - dans le contexte de la dynamique des flux à l'échelle de la pièce. Le City M intègre des filtres HEPA (EN1822) et des filtres à charbon actif et dispose de cinq vitesses de ventilation ainsi que d'une sortie d'air à sa base. Des mesures du champ d'écoulement seront effectuées pour déterminer l'efficacité de l'appareil à réduire la quantité d'aérosols dans un environnement d'essai et aussi pour illustrer la façon dont le champ d'écoulement local est modifié pendant le fonctionnement, montrant où l'aérosol est transporté.

## 2. Méthodes

**2.1. La méthode de vélocimétrie par image de particules.** Cette étude recourra de manière limitée à la technique de vélocimétrie par images de particules (PIV) adaptée à la mesure à l'échelle de la pièce. La PIV est une technique d'imagerie stroboscopique via laquelle un volume de fluide, tel que l'écoulement dans une soufflerie, estensemencé de particules traceuses [11] qui suivent fidèlement l'écoulement et qui sont ensuite suivies à l'aide de méthodes de corrélation croisée en 2D pour produire une grille de vecteurs de vitesse qui représentent la cinématique de l'écoulement. Les données qui en résultent sont utiles pour un large éventail d'applications, notamment la validation des simulations numériques, la quantification des performances d'écoulement des prototypes, l'identification des structures d'écoulement et la compréhension des comportements d'écoulement pour la recherche fondamentale en mécanique des fluides. Dans le contexte de la présente étude, les mesures de la PIV peuvent révéler les régions de recirculation et de stagnation dans un espace et montrer comment un purificateur d'air peut affecter la dynamique du flux à l'échelle de la pièce. Comme les particules utilisées dans cette étude

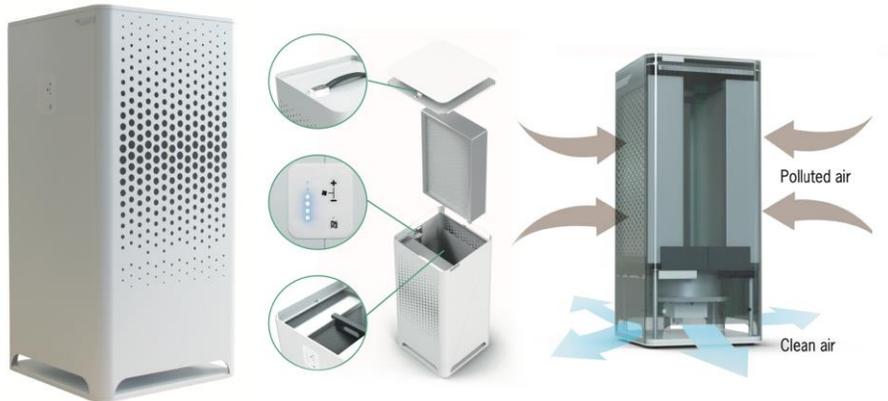


Illustration 1. Le purificateur d'air City M de Camfil. 340 × 720 × 345 mm (L×H×P)

sont des aérosols représentatifs de ceux que l'on trouve en raison de la respiration humaine ; ils ne suivront pas nécessairement fidèlement l'écoulement et finiront par tomber au sol. Cela peut également être enregistré comme un résultat.

La PIV est généralement déployée pour de petits champs de vision (« 1 m<sup>2</sup>) à l'aide d'équipements dédiés tels que des lasers pulsés et des caméras qui fonctionnent en double obturation (*frame straddling*). L'illustration 2 présente une installation typique d'une PIV en laboratoire comprenant un double laser pulsé Nd-YAG, un ordinateur d'acquisition de données et une carte d'acquisition d'images, une caméra qui fonctionne en double obturation et une horloge de synchronisation. En fonctionnement, le système capture une série de paires d'images de la tranche de l'écoulement éclairée par le laser et des particules qui y sont en suspension. Les paires d'images sont ensuite traitées avec des algorithmes de PIV pour extraire le champ d'écoulement 2D. Le double laser permet de déclencher deux impulsions laser (> 100 mJ par impulsion de 8 ns) indépendamment l'une de l'autre et la caméra à double obturation garantit que chaque impulsion laser est acquise par des images séparées, même avec des différences de temps très courtes entre les impulsions.

La clé de la technique de PIV est la réalisation d'un échantillonnage spatial et temporel suffisant. Un système de PIV typique a un rapport cyclique de 15 Hz ; bien que des systèmes à résolution temporelle soient possibles, le laser à double impulsion et la caméra qui fonctionne à double obturation assurent une résolution temporelle suffisante pour suivre les particules entre les paires d'images. Pour obtenir une résolution spatiale adéquate, il faut que les particules du champ de vision puissent être suivies sur une courte distance de sorte que leur mouvement soit suffisamment linéaire. Les caméras de PIV ont généralement une résolution de pixels de 2 à 4 MP, ce qui, combiné à la capacité du capteur d'imagerie à détecter la lumière diffusée par les particules, limite le champ de vision de la technique.

Pour construire un champ d'écoulement, les paires d'images sont divisées en une grille (souvent avec un chevauchement de 50 % entre les carrés de la grille). La taille de la grille peut varier de 16 x 16 à 128 x 128 pixels, généralement en puissances de 2 puisque la FFT est utilisée pour la corrélation croisée 2D. La corrélation croisée 2D compare chaque paire de carrés de la grille correspondante et la carte de corrélation résultante est utilisée pour déterminer le déplacement moyen dans chaque carré de la grille. La carte de corrélation est ajustée avec une fonction de surface 2D afin de déterminer l'emplacement du pic sous-pixel, ce qui permet d'augmenter la précision au-delà de la résolution en pixels de la caméra. L'illustration 3 en donne un exemple.

Des variations plus sophistiquées de cette méthode sont possibles et la méthode de déformation est utilisée ici [12]. On tente ainsi de mieux capturer le tenseur de gradient de vitesse de l'écoulement en déformant itérativement l'un des carrés de la grille jusqu'à ce que le vecteur de déplacement résultant de la corrélation croisée soit nul.

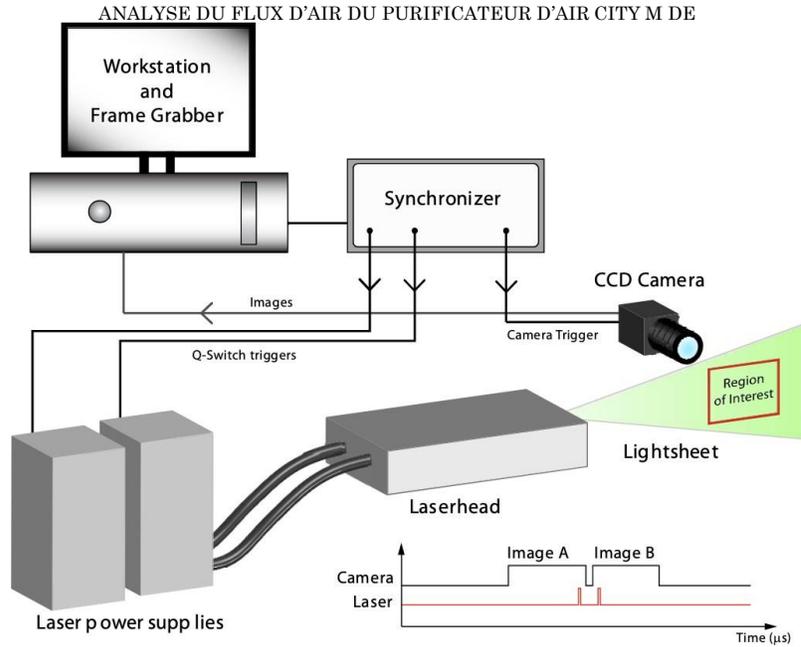


Illustration 2. Schéma d'une installation typique d'une PIV en laboratoire

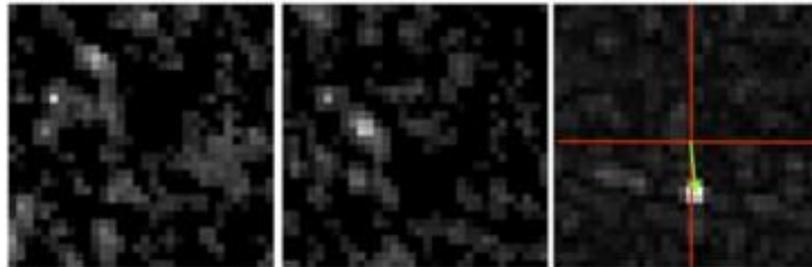


Illustration 3. Images montrant le principe de base de la méthode PIV, de gauche à droite, 32 x32 carrés de la grille d'une paire d'images et la carte de corrélation résultante. La distance entre le centre et le sommet représente le déplacement moyen des particules dans les carrés de la grille, comme le montre le vecteur en vert.

La déformation finale est alors utilisée comme le déplacement réel du carré de la grille. L'application du *timing* précis donné par le synchronisateur permet de convertir le déplacement en données de vitesse. Le résultat de ce traitement est une grille 2D de vecteurs de flux pour chaque paire d'images. Ils peuvent être post-traités pour éliminer les vecteurs parasites ou combler les trous. Dans certains cas, les cartes de corrélation peuvent être stockées et les pics secondaires identifiés comme le vrai vecteur, sinon un filtre médian est

utilisé. Les séries de champs vectoriels de vitesse qui en résultent peuvent être analysées et les statistiques d'écoulement, telles que la vitesse moyenne quadratique, la vorticité et la divergence, calculées.

Une autre méthode qui convient aux flux réguliers est le traitement d'ensemble. Ici, les cartes de corrélation sont additionnées à chaque emplacement spatial dans une série de paires d'images. Comme le flux est constant, le véritable pic sera renforcé par rapport au bruit de fond sur les paires d'images successives. L'ajustement de la surface 2D est ensuite appliqué à la carte de corrélation finale, ce qui donne un seul champ de vecteurs de vitesse pour la séquence d'images, qui peut présenter moins de bruit que la simple moyenne d'une série de vecteurs de vitesse.

**2.2. Mesures PIV grand format.** Dans le contexte actuel où les vitesses d'écoulement sont faibles, et en l'absence d'une installation de PIV dédiée, les mesures d'écoulement seront réalisées pour la dynamique à l'échelle de la pièce en utilisant une approche à faible coût. Un laser à onde continue (2 W, 532 nm) dilaté en une feuille de lumière via une lentille Powell de 45° est utilisé pour éclairer une tranche 2D de l'environnement d'essai. Une caméra ultra haute résolution (Canon EOS R5) capable d'enregistrer des vidéos non compressées à 8 K (8 192 x 4 320 pixels – 35 MP) à 30 images par seconde.

L'aérosol a été généré à l'aide d'un générateur de fumée (Concept Air Trace MK2) et d'un nébuliseur Aerogen® Solo. Le premier utilise une solution aqueuse de propylène-glycol et de glycérol tandis que le second utilise une solution saline. La taille des particules pour le générateur de fumée est indiquée dans la figure 4, tandis que le nébuliseur produit des gouttelettes presque mono-dispersées de 5 µm.

Size Band			Percentage	Percentage
Lower	Mid	Upper	Counts	Mass
(µm)			(%)	(%)
0.09	0.10	0.11	19.12	3.16
0.11	0.13	0.15	39.82	14.45
0.15	0.18	0.20	23.42	20.74
0.20	0.23	0.25	10.52	19.80
0.25	0.28	0.30	4.86	16.71
0.30	0.35	0.40	1.58	11.22
0.40	0.45	0.50	0.45	6.81
0.50	0.58	0.65	0.23	7.11
0.65	0.73	0.80	0.00	0.00
0.80	0.90	1.00	0.00	0.00
1.00	1.13	1.25	0.00	0.00
1.25	1.38	1.50	0.00	0.00
1.50	1.75	2.00	0.00	0.00
2.00	2.25	2.50	0.00	0.00
2.50	2.75	3.00	0.00	0.00
Total Counts (Data):			1738	%Mass <0.5 µm 92.89
Total Counts (Background):			855	%Mass <0.7 µm 100.00
Total Counts (Data - Background):			884	%Mass <1.0 µm 100.00

Illustration 4. Distribution de particules à partir du générateur de fumée Concept Air Trace MK2 Certificat d'étalonnage. Diamètre médian du comptage (µm) : 0,14 Diamètre médian de la masse(µm) : 0,23 Écart-type géométrique : 1,50

Cette approche est efficace car les vitesses d'écoulement associées aux flux de ventilation sont faibles et les champs d'écoulement résultants sont indicatifs du schéma d'écoulement et les quantités dérivées ne sont pas nécessaires. Une plus grande robustesse de mesure peut être obtenue en faisant la moyenne d'ensemble des données de corrélation sur de courtes périodes (100 images), ce qui réduit l'impact du bruit de fond des images non uniformes

à l'échelle de la pièce. Comme il ne s'agit pas d'une caméra qui fonctionne à double obturation, les images séquentielles constitueront les paires d'images :  $A \rightarrow B$ ,  $B \rightarrow C$ ,... ce qui est équivalent au fonctionnement d'un système à résolution temporelle.

**2.3. Collecte de données.** Deux régimes de mesure ont été effectués. Le premier a été réalisé dans un espace approprié, le site de Camfil à Dublin, 5. Ici, la cinématique de l'écoulement due à la présence du City M a été évaluée par la méthode de PIV comme décrit ci-dessus en utilisant la bibliothèque PIVlab pour Matlab [13, 14]. Le champ d'écoulement étendu d'un seul et de deux appareils City M a été évalué. Le City M a été réglé sur sa vitesse maximale pour tous les tests présentés ici. Les données vidéo sont également disponibles et fournissent des informations lorsque le traitement de la PIV n'a pas abouti.



Illustration 5. Photographie montrant le montage utilisé pour les mesures sur le site de Camfil. Observez la feuille laser déployée en vert, le générateur d'aérosol au premier plan et la grande quantité d'aérosol utilisée pour ensemencher l'écoulement. Le City M est observé sous la source laser.

La deuxième série de mesures a été effectuée à l'hôpital Mater qui a permis d'étudier les performances d'élimination des aérosols du City M dans une pièce plus petite. Il s'agit d'enregistrer le degré de diffusion de la lumière de l'aérosol pendant plusieurs minutes par rapport à une condition non traitée. La pièce utilisée mesurait  $4 \times 2,5 \times 2,26$  m et est représentative d'une chambre d'isolement typique d'un hôpital ou d'un petit bureau. Un schéma de la configuration est présenté en Illustration 6. Le centre du champ de vision de la caméra a été positionné au milieu de la pièce, orthogonalement à la feuille laser décalée de 1 m, ce qui donne une diagonale de vision de  $0,5$  m avec une lentille de 85 mm à  $f/4$ . Les images (résolution de 45 MP) ont été enregistrées automatiquement à intervalles de 10 secondes sur une période de 15 minutes. Les données d'image résultantes ont été moyennées sur l'ensemble de l'image et une série temporelle a été produite. Un comptage des particules a également été enregistré (Capteur Air Image) à l'unisson des données d'image. Ce capteur a été placé sur la table à côté du City M.

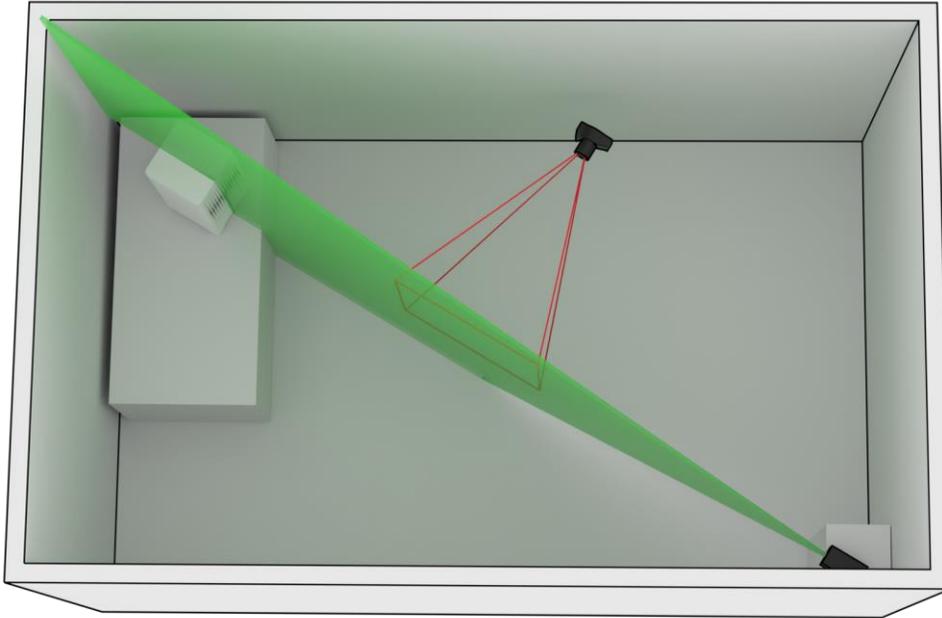


Illustration 6. Schéma montrant la disposition optique pour les tests d'aérosols dans une pièce de 4 x 2,5 x 2,26 m. Observez la position du City M en haut à gauche, la source laser en bas à droite et le champ conique de la caméra indiqué en rouge.

### 3. Résultats et discussion

**3.1. Mesures PIV d'un seul City M.** Un seul appareil de City M a été testé dans une grande pièce (10 x 10 m). En plaçant l'appareil au milieu de la pièce, on élimine les effets d'obstacle des murs qui peuvent se produire. L'appareil était placé sur un bureau qui délimitait le jet de sortie d'un côté. Toutes les mesures ont été effectuées au réglage opérationnel maximal de l'appareil.

Des mesures initiales ont été effectuées à l'entrée de l'appareil City M pour déterminer la vitesse d'écoulement à proximité de l'appareil.

Le nébuliseur Aerogen® a été placé à 1 m du City M à une hauteur de 0,72 m au-dessus de la base de l'appareil. Un aérosol composé d'une solution saline de  $5 \mu\text{m}$  a été dirigé vers l'appareil. Cela indique la direction privilégiée du flux et la zone sur laquelle l'air est reçu par le système. Les Illustrations 7 et 8 montrent deux vues des mêmes données. L'Illustration 7 montre les vecteurs de vitesse (en blanc) calculés à l'aide d'un ensemble PIV moyenné (200 images vidéo) superposés à une seule image vidéo représentative. Il est plus utile de représenter ces données sous la forme d'une carte en couleur, comme le montre l'Illustration 8, où la couleur indique la magnitude de la vitesse du flux interpolée entre les vecteurs de vitesse. Les données relatives à la magnitude de la vitesse sont cartographiées entre 0 et 0,35 m/s, du bleu au vert et au rouge. Cette figure montre également les lignes de courant qui indiquent la trajectoire du flux et sont tangentes aux vecteurs de vitesse. Ces figures montrent clairement que la vitesse d'écoulement augmente avec la proximité du City M, comme prévu en raison de la réduction de la pression à l'entrée. La région où la vitesse est la plus élevée correspond aux plus grandes perforations de la face avant de l'appareil. Il est également à noter que le flux est tiré vers le bas, ce qui indique que l'appareil aspire l'air du plus grand volume environnant se trouvant au-dessus de lui plutôt qu'il ne recycle le flux d'air filtré immédiatement le flux sortant par le bas.



Illustration 7. Mesure PIV pour le flux d'entrée d'air dans le City M avec un générateur d'aérosols placé à 1 m à droite. Le champ de vitesse est superposé à une seule image vidéo. Observez également la barre d'échelle de 1 m.

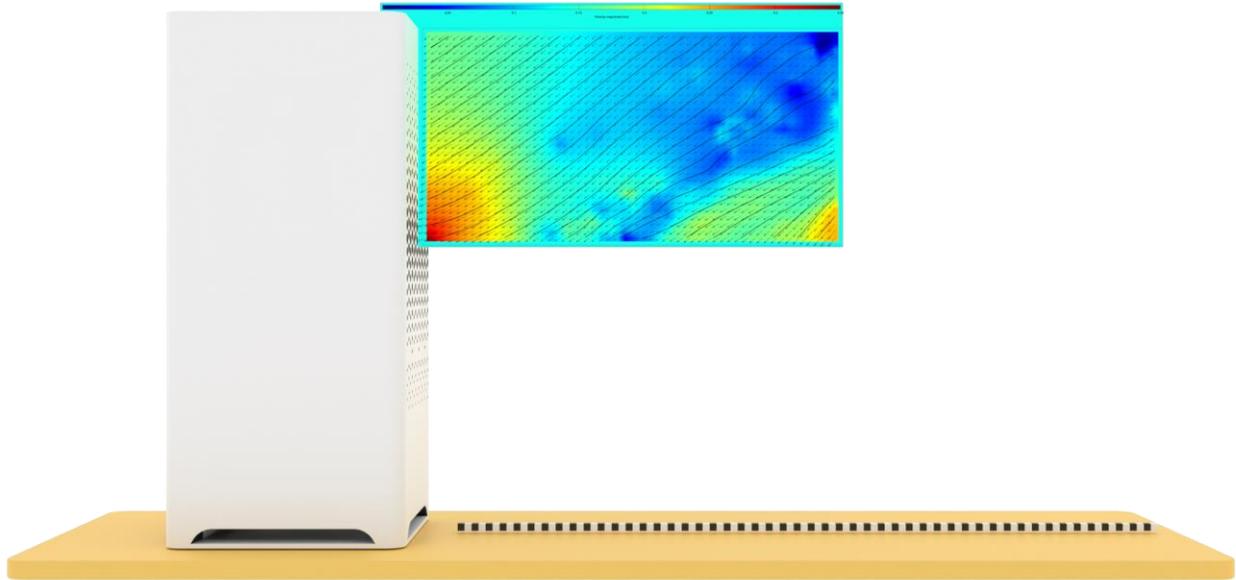


Illustration 8. Ce sont les données présentées dans l'illustration 7 mais représentées selon un mappage coloré de vitesse du flux d'air sur une gamme de magnitude de vitesses de 0 à 0,35 m/s.

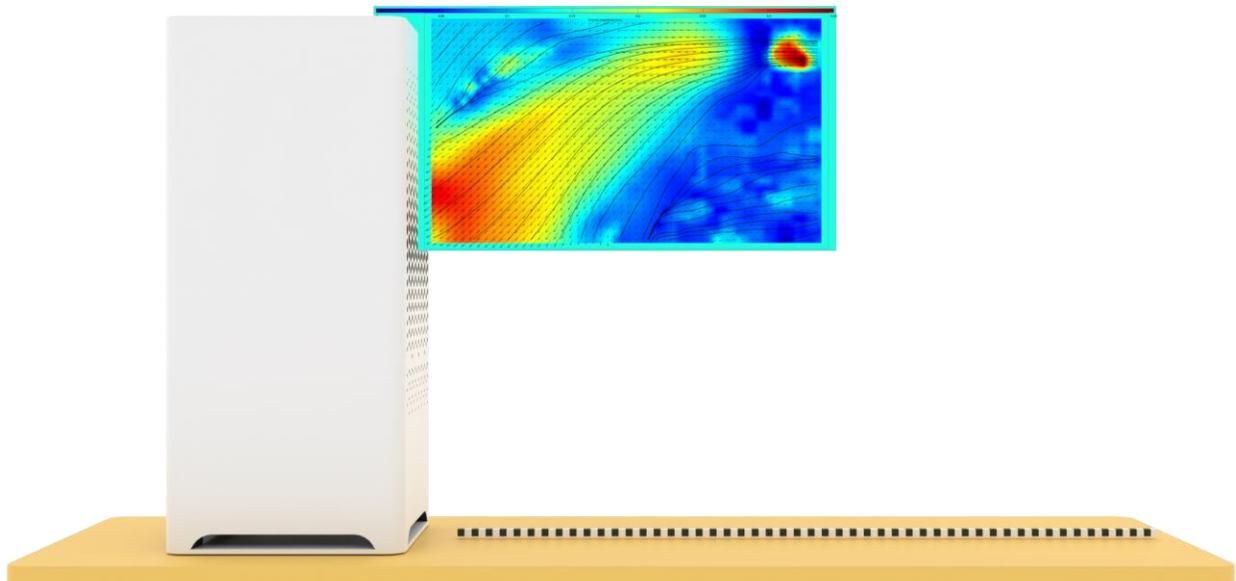


Illustration 9. Flux d'entrée d'air pour un aérosol de  $5 \mu m$  généré à 0,5 m de l'aspiration du City M. La cartographie des couleurs est la même que celle de l'illustration 8.

Ce test a ensuite été répété avec la distance horizontale au nébuliseur réduite à  $0,5\text{ m}$ , comme le montre l'illustration 9. Des résultats similaires ont été obtenus (observez le « point chaud » dû au flux d'aérosol sortant du nébuliseur) qui ont montré le même flux accéléré vers le bas en direction des plus grandes perforations de la face avant. Ces tests montrent clairement que le flux d'aspiration du City M est capable d'entraîner efficacement le flux d'aérosols jusqu'à  $1\text{ m}$  de distance. Cela valide l'idée d'une purification de l'air personnalisée supplémentaire [15] pour des situations telles que rencontrées en cabinet dentaire où la proximité est inévitable [16]. Cependant, pour les situations impliquant des espaces plus grands et une occupation plus importante, comme les salles de classe [17], il est nécessaire de comprendre l'effet plus large.

Le jet d'air ensortie a ensuite été caractérisé. En raison de la position du ventilateur (Illustration 1) et de la plus petite surface de sortie par rapport à la grande zone d'entrée d'air, on s'attend à ce que la vitesse soit plus grande ici. Dans ce cas, la fréquence d'images de la caméra à une résolution de  $8\text{ K}$  n'était pas suffisante pour capter le mouvement cohérent des particules dans l'air en mouvement rapide près de la sortie du City M, mais ce mouvement a été mesuré à environ  $0,5\text{ m/s}$  à l'aide d'un anémomètre à main. Le générateur de fumée a été placé à proximité de la sortie et un accessoire de diffusion de l'aérosol en « râteau » a été utilisé pour générer un large flux de particules traceuses. On observe que la fumée se déplace le long de la surface de la table de manière turbulente, comme le montre l'illustration 10. Les lignes de courant sont également représentées sur l'illustration 10, étant donné que les particules peuvent être suivies une fois que l'écoulement a suffisamment ralenti, car il perd de l'énergie cinétique en raison de la génération de turbulences et de la viscosité. À une distance de  $1,1\text{ m}$  du City M, on observe que les lignes de courant se décollent et forment un vortex. La vitesse du jet sous le vortex est mesurée à  $0,15\text{ m/s}$ . Ce comportement est typique des écoulements à réaction, car l'écoulement à grande vitesse est cisailé contre l'écoulement environnant, essentiellement stagnant, ce qui entraîne un étalement latéral du jet et un déstagement tourbillonnaire le long de sa périphérie. En l'absence de la surface de la table, on s'attendrait à une paire de vortex (correspondant à la feuille laser traversant un anneau de vortex). Aucun aérosol n'a été observé à l'entrée du City M pendant ces essais, car nous n'avons pas laissé l'aérosol circuler pendant une période plus longue. Si l'on considère les caractéristiques observées du flux d'entrée et du flux sortant, il est évident qu'il n'y a aucune interférence entre l'air filtré et l'air non filtré. Le flux d'entrée d'air est tiré vers le bas du haut de l'appareil tandis que le flux d'air sortant est expulsé à une vitesse plus élevée.

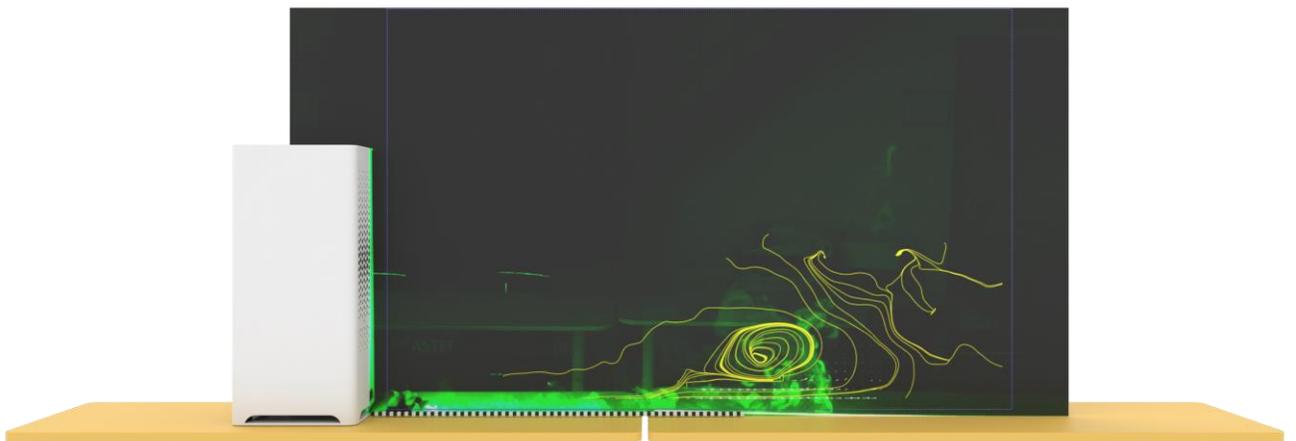


Illustration 10. Écoulement du jet d'échappement présentant une perte de vortex à  $1,1\text{ m}$  du City M.

Il est clair, cependant, que le City M crée des flux d'air à contre-courant. On pourrait donc s'attendre à ce qu'une région de recirculation de l'écoulement se produise en raison de l'incompressibilité et de la conservation de la masse, l'air propre filtré se déplaçant vers l'extérieur et l'air non filtré étant attiré vers l'intérieur, agissant comme une source et un puits. Pour tester cela, le diffuseur en râteau du générateur de fumée a été placé à 2 m en aval du jet de sortie et nous avons laissé l'aérosol se disperser pendant un certain temps. L'illustration 11 montre une image de la séquence vidéo avec la carte de couleurs PIV et les lignes de courant superposées. La position du générateur de fumée à l'extrême droite en bas de l'image est visible. Les valeurs de la carte de couleurs sont les mêmes que celles de l'illustration 8, correspondant à une gamme de 0 – 0,35 m/s. Les lignes de courant indiquent clairement une grande région de recirculation qui s'étend sur 2 m avec une accélération de l'écoulement à l'approche de l'entrée du City M, comme le montrent les illustrations 8 et 9

Il est à noter que la configuration du City M fait que l'air non filtré retourne à l'appareil en se déplaçant vers le haut et au-dessus de toute personne assise dans sa zone d'effet. Cela indique l'importance de comprendre l'emplacement du déploiement lorsqu'on considère l'effet de tels systèmes sur la dynamique de l'écoulement à l'échelle de la pièce.

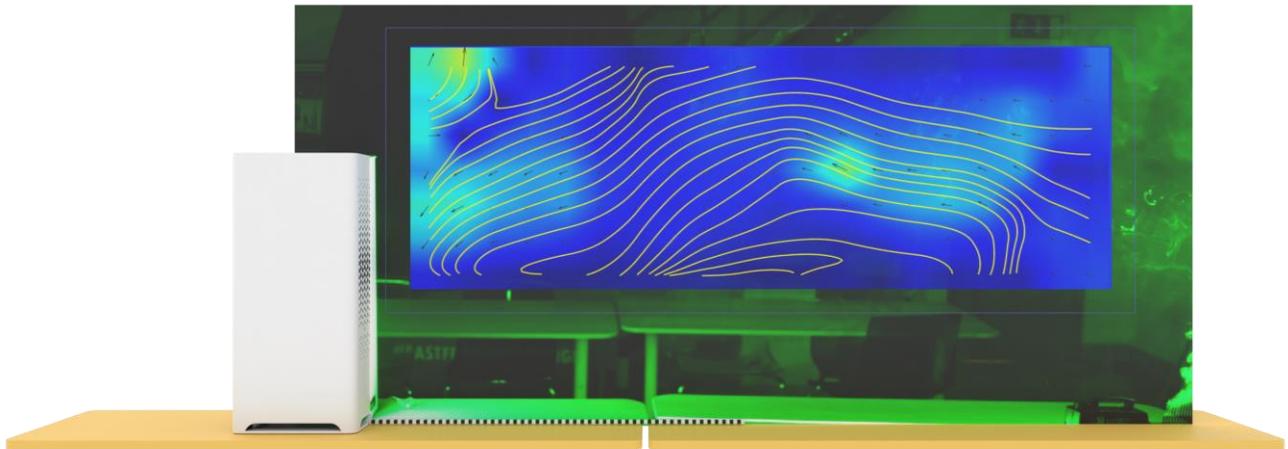


Illustration 11. Des régions de recirculation à grande échelle s'étendant sur 2 m vers l'extérieur du City M.

Des essais ont également été réalisés avec une paire d'appareils City M placés à différentes distances de séparation. Il s'est avéré difficile d'extraire des données de la PIV de ces derniers en raison du temps d'essai limité, des mesures supplémentaires peuvent être nécessaires. Néanmoins, un exemple a été traité avec succès, comme le montre l'illustration 12 qui représente deux appareils City M placés à 1,5 m de distance. La carte des flux de l'illustration 12 montre un fort vortex devant l'appareil le plus à gauche. Dans cet enregistrement, le flux a un biais vers le côté gauche et le test n'a pas été répété avec le générateur de fumée repositionné en raison de la difficulté à éclairer correctement l'espace proche de l'appareil de droite. Il est raisonnable d'en déduire qu'un vortex contrarotatif similaire est présent du côté droit ; des tests supplémentaires permettront de le vérifier. Dans ce scénario, les jets d'écoulement de chaque appareil entrent en collision au point central et sont dirigés vers le haut et l'extérieur. Cela fait tourner le flux et il est ramené vers le flux d'entrée par la faible perte de charge.

Une telle configuration n'est pas particulièrement pratique dans la plupart des scénarios, car les appareils sont trop proches les uns des autres pour être confortables pour quiconque occupe l'espace. Compte tenu de l'étendue de la zone de recirculation de l'appareil unique observée à la figure 11, il semble que ce comportement contrarotatif puisse être

soutenu sur un rayon allant jusqu'à 2 m autour de l'appareil fournissant une filtration de haute qualité pour une pièce de 4 x 4 m si elle est placée au centre.

En supposant que la vitesse moyenne le long d'une ligne d'écoulement de recirculation sur l'illustration 11 est de 0,05 m/s et que le chemin d'écoulement de recirculation peut être approximé comme une ellipse avec des axes majeurs et mineurs de 2 m et 0,72 m respectivement, le chemin d'écoulement a une longueur de 4,5 m. Par conséquent, il est possible pour un seul City M de filtrer l'air le long de ce trajet toutes les 90 secondes.

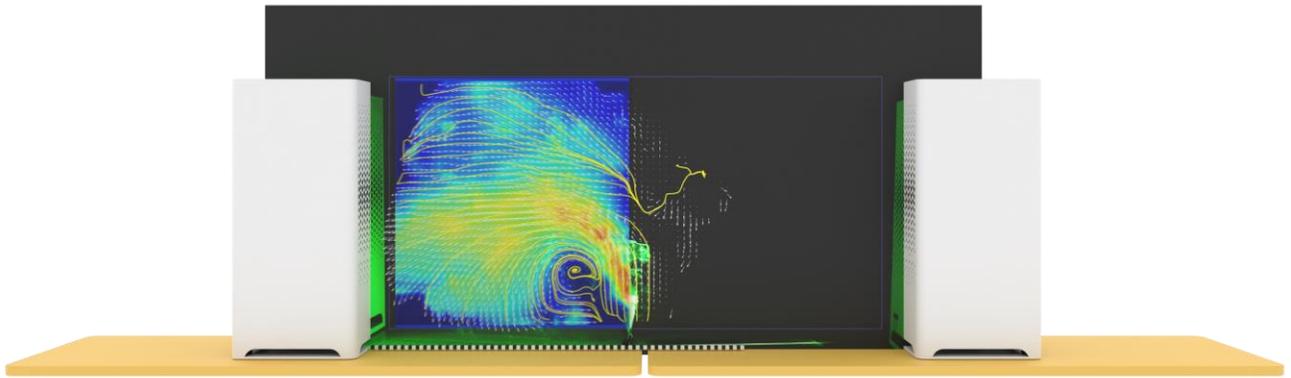


Illustration 12. Zones de recirculation entre deux appareils City M placés à 1,5 m de distance. Observez que la fumée a été entraînée dans la zone de recirculation gauche pour cet essai. La cartographie des couleurs est la même que celle de l'illustration 8.

**3.2. Performance en matière de réduction des aérosols.** La deuxième série de mesures concerne la vitesse à laquelle le City M peut réduire la teneur en aérosols de l'air ambiant. Cela a été mesuré de deux façons, simultanément. La première méthode utilise un capteur Air Image de Camfil qui peut quantifier les particules PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub> et enregistrer les données à distance. La deuxième méthode utilise la diffusion selon la théorie de Lorenz-Mie de la lumière laser à partir de l'aérosol généré par le générateur de fumée pour quantifier la réduction de l'intensité de l'image dans le temps. Le générateur de fumée a été utilisé pour remplir l'espace de test (Illustration 6) pendant 30 secondes avant chaque test. Notez qu'il s'agit d'une très grande quantité d'aérosol et qu'elle n'est pas typique d'un environnement intérieur où une base continue de génération d'aérosol serait observée en raison de l'occupation. Par conséquent, la quantité d'aérosol présente diminuera rapidement dans tous les cas considérés, mais c'est le taux de décroissance relatif qui est intéressant dans la présente étude car il indique la capacité du purificateur d'air à éliminer les particules de l'environnement. Couplé avec les données de recirculation ci-dessus, une meilleure compréhension des performances aérodynamiques et de filtration est possible.

Les Illustrations 13 et 14 montrent les données du compteur de particules pour deux scénarios différents. La première compare l'état non traité (City M éteint, série de données noires) à l'état traité (City M à la puissance maximale, série de données bleues). Le nombre de particules diminue rapidement pour le cas traité avec un nombre négligeable de particules sur une période de 160 secondes. Par rapport au cas non traité, il faut > 400 secondes pour obtenir une réduction similaire.

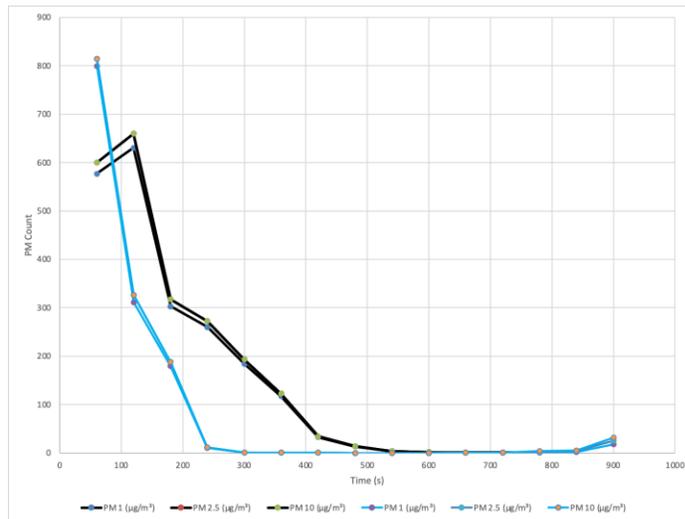


Illustration 13. Comptage des particules provenant du capteur Air Image de Camfil dans l'espace de test décrit dans l'illustration 6. Les séries de données noires indiquent l'aérosol non traité et les séries de données bleues l'aérosol traité par le City M à son réglage de puissance maximale.

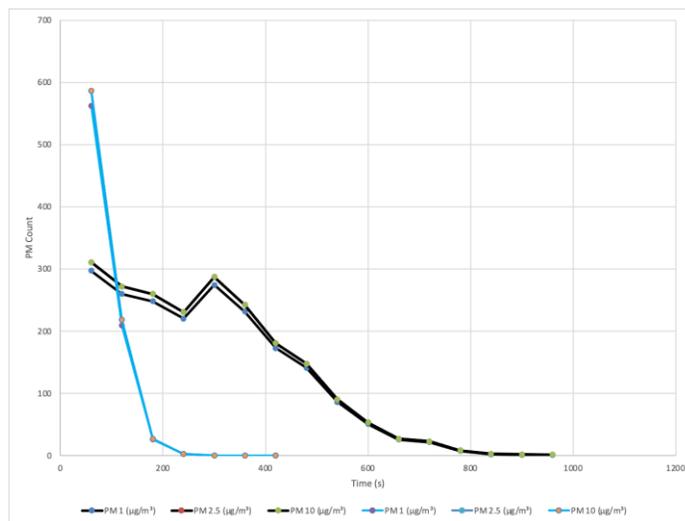


Illustration 14. Données de comptage des particules comme dans l'illustration 13, avec une flottabilité supplémentaire due au placement d'un chauffage au centre de la salle de test.

Dans le second scénario, un petit radiateur à accumulation a été placé dans la pièce en dessous du champ de vision de la caméra. Le générateur de fumée a été placé dans le panache thermique de radiateur, ce qui donne à l'aérosol généré une flottabilité supplémentaire. Le temps de dissipation de l'aérosol non traité est ainsi passé à 800 secondes, tandis que l'aérosol traité a été réduit à des niveaux négligeables en 200 secondes.

Ces observations sont également observées dans les données de diffusion laser (Illustration 15). Les variations dans les données non traitées (en noir) montrent comment des effets tels que la flottabilité entraînent des périodes de 600 à 800 secondes avant que l'aérosol ne se dissipe. Pour les cas traités où le City M fonctionne à son réglage maximal, l'aérosol est éliminé en 200 secondes de manière cohérente.

Les données du compteur de particules et celles de la diffusion laser sont bien corrélées, démontrant le lien entre la mesure ponctuelle du premier et la mesure du volume du second. Sur la base de ces données et de la dynamique du flux de recirculation présentée ci-dessus, il est évident que le City M est un purificateur d'air efficace. Il faut faire attention, lors du déploiement d'un tel dispositif, à éviter toute contamination croisée entre les individus en raison du schéma de recirculation de l'air. Le placement vertical de l'appareil est essentiel pour y parvenir.

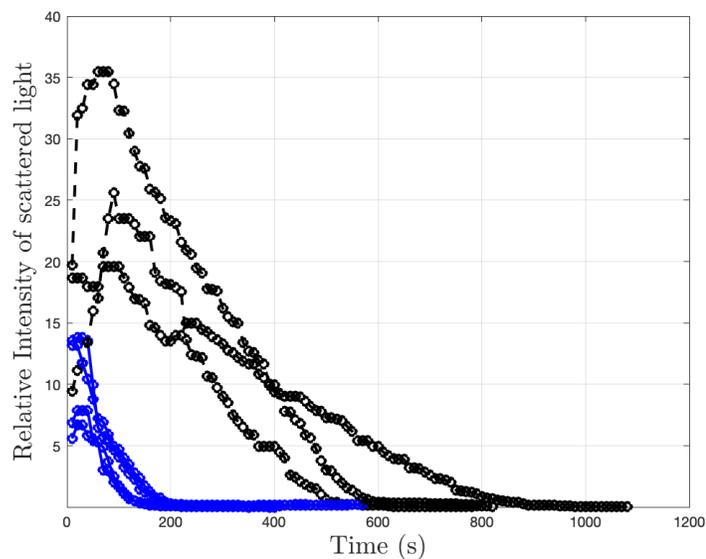


Illustration 15. PM<sub>3</sub>

#### 4. Conclusions

Cette étude a pris en compte deux séries de mesures. La première concerne la cinématique du flux - comment le flux d'air se déplace vers et depuis l'appareil. La seconde série de mesures concerne la capacité de l'appareil à réduire rapidement la quantité d'aérosol présente.

Les mesures établissent que le flux d'air sortant de l'appareil est maintenu séparé du flux d'entrée d'air sur au moins 1 m radialement. Une zone de recirculation d'air s'étendant jusqu'à 2 m est observée, indiquant que le dispositif a un effet sur une large zone. En raison des événements de sortie d'air sur les quatre côtés et de la dynamique des flux d'entrée d'air à faible pression, on s'attend à ce que l'appareil fournisse une filtration d'air très efficace dans toutes les directions. On estime que le circuit d'écoulement est complet en 90 secondes seulement. Étant donné que l'air revient vers l'appareil au-dessus du jet d'air filtré (espacement vertical d'environ 1 m), il convient de faire attention lors de la mise en place, car cela peut entraîner une contamination croisée par de l'air chargé d'aérosols. En plaçant des paires d'appareils City M l'un en face de l'autre, on obtient un schéma d'écoulement à double flux. Cette disposition

peut être utile pour traiter des volumes plus importants. Elle augmente également la vitesse ascendante de l'air au milieu, mais il est recommandé de tester davantage cette disposition.

Les tests sur les aérosols ont montré que le City M filtre de grandes quantités d'aérosols de façon efficace et cohérente, comparé à l'absence de traitement. Le City M a réduit les particules et on observe au laser des niveaux négligeables en moins de 200 secondes. La quantité d'aérosols a ainsi été diminuée par 3 ou 4.

## 5. Remerciements

L'auteur tient à remercier Camfil pour avoir offert l'utilisation de leur équipement et de leurs installations pour ces tests, ainsi que l'hôpital universitaire Mater Misericordiae pour la mise à disposition d'un espace de laboratoire. L'auteur n'a reçu aucune incitation financière pour ce travail et Camfil n'a pas influencé les conclusions du présent document.

## Références

- [1] Renyi Zhang, Yixin Li, Annie L. Zhang, Yuan Wang and Mario J. Molina. Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of covid-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(26):14857–14863, 2020.
- [2] Trisha Greenhalgh, Jose L. Jimenez, Kimberly A. Prather, Zeynep Tufekci, David Fisman, and Robert Schooley. Ten scientific reasons in support of airborne transmission of sars-cov-2. *The lancet*, 397(10285):1603–1605, 2021.
- [3] Chris Baraniuk. Covid-19: What do we know about airborne transmission of sars-cov-2? *BMJ*, 373, 2021.
- [4] A. C. Fears, W. B. Klimstra, P. Duprex, A. Hartman, S. C. Weaver, K. C. Plante, D. Mirchandani, J. A. Plante, P. V. Aguilar, D. Fern'andez, A. Nalca, A. Totura, D. Dyer, B. Kearney, M. Lackemeyer, J. K. Bohannon, R. Johnson, R. F. Garry, D. S. Reed, and C. J. Roy. Comparative dynamic aerosol efficiencies of three emergent coronaviruses and the unusual persistence of sars-cov-2 in aerosol suspensions. *medRxiv: the preprint server for health sciences*, page 2020.04.13.20063784, 04 2020.
- [5] Anand Srinivasan, Jayant Krishan, Sreekanth Bathula and Yelia S. Mayya. Modeling the viral load dependence of residence times of virus-laden droplets from covid-19-infected subjects in indoor environments. *Indoor Air*, n/a(n/a), 2021.
- [6] Amayu W. Gena, Conrad Voelker and Gary S. Settles. Qualitative and quantitative schlieren optical measurement of the human thermal plume. *Indoor air*, 30(4):757–766, 2020.
- [7] Lydia Bourouiba. Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19. *JAMA*, 323(18):1837–1838, 05 2020.
- [8] Deepti Gurdasani, Nisreen A. Alwan, Trisha Greenhalgh, Zoë Hyde, Luke Johnson, Martin McKee, Susan Michie, Kimberly A. Prather, Sarah D. Rasmussen, Stephen Reicher, et al. School reopening without robust covid-19 mitigation risks accelerating the pandemic. *The Lancet*, 397(10280):1177–1178, 2021.
- [9] Rajesh K. Bhagat, M. S. Davies Wykes, Stuart B. Dalziel and P. F. Linden. Effects of ventilation on the indoor spread of covid-19. *Journal of Fluid Mechanics*, 903:F1, 2020.
- [10] Jianyun Lu, Jieni Gu, Kuibiao Li, Conghui Xu, Wenzhe Su, Zhisheng Lai, Deqian Zhou, Chao Yu, Bin Xu and Zhicong Yang. Covid-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, guangzhou, china, 2020. *Emerging infectious diseases*, 26(7):1628–1631, 07 2020.
- [11] A. Melling. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Measurement science and technology*, 8(12):1406, 1997.

- [12] Fulvio Scarano. Iterative image deformation methods in piv. *Measurement science and technology*, 13(1):R1, 2001.
- [13] William Thielicke and Eize Stamhuis. Pivlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab. *Journal of open research software*, 2(1), 2014.
- [14] William Thielicke and René Sonntag. Particle image velocimetry for matlab: Accuracy and enhanced algorithms in pivlab. *Journal of Open Research Software*, 9(1), 2021.
- [15] Bin Zhao, Yumeng Liu and Chen Chen. Air purifiers: A supplementary measure to remove airborne sars-cov-2. *Building and environment*, 177:106918–106918, 06 2020.
- [16] Bin Zhao, Na An and Chen Chen. Using an air purifier as a supplementary protective measure in dental clinics during the coronavirus disease 2019 (covid-19) pandemic. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 42(4):493–493, 2021.
- [17] Sebastian Burgmann and Uwe Janoske. Transmission and reduction of aerosols in classrooms using air purifier systems. *Physics of Fluids*, 33(3):033321, 2021.