

PHYSIQUE VS BIOLOGIQUE : REPENSER LA MESURE D'EFFICACITÉ DES SOLUTIONS DE REMEDIATION EN AIR INTERIEUR

S. Delaby¹, Y. Taouis^{1*}, S. Ritoux¹, C. Ollivier¹, M. Nicolas¹ M. Verriele² et F. Thevenet²

¹Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 77420 Champs-sur-Marne, France

² IMT Nord Europe, Université de Lille, CERI EE, F-59000 Lille, France

*yacine.taouis@cstb.fr

TITLE

PHYSICAL VS BIOLOGICAL: RETHINKING THE ASSESSMENT OF INDOOR AIR REMEDIATION SOLUTIONS

RESUME

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet PHARAON, dont l'objectif est de développer un protocole transversal permettant de quantifier et de comparer les performances de diverses solutions de remédiation de l'air intérieur. Les résultats présentés concernent la qualification du traitement d'une contamination particulaire, qu'il s'agisse de particules physiques ou microbiologiques. Ils constituent ainsi une première étape du projet visant à proposer, à terme, un protocole harmonisé.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances épuratoires de cinq dispositifs de remédiation de l'air intérieur représentatifs de la diversité du marché. La méthodologie expérimentale repose sur la génération contrôlée d'une bouffée homogène d'un aérosol monodispersé de *Staphylococcus epidermidis* dans une chambre d'essai de 97 m³ (ASTERIA), ainsi que sur le suivi temporel de la concentration de cet aérosol en présence des cinq solutions testées. Les performances sont évaluées à partir de la cinétique de décroissance de la concentration en particules et de leur viabilité. Les résultats montrent la nécessité de recourir à deux indicateurs complémentaires : le débit d'air purifié physique (*CADR_physical*) et le débit d'air épuré biologique (*CADR_biological*).

Les analyses mettent en évidence que les dispositifs intégrant une filtration mécanique (dispositifs n°1 et n°2) réduisent efficacement la concentration particulaire (par exemple, un *CADR_physical* de $160 \pm 4,5$ m³/h pour le dispositif n°1). À l'inverse, l'utilisation d'un spray à base d'huiles essentielles (dispositif n°5) présente essentiellement un effet antimicrobien, avec un *CADR_biological* équivalent de 161 ± 82 m³/h. L'étude montre que cette double approche permet de distinguer les mécanismes d'action propres à chaque technologie et, par conséquent, leur impact effectif sur la qualité de l'air respiré. Elle souligne également l'importante incertitude associée aux mesures biologiques, pointant la nécessité d'améliorations méthodologiques afin de renforcer la robustesse du protocole.

ABSTRACT

This work is part of the PHARAON project, which aims to develop a transversal protocol for quantifying and comparing the performance of indoor air remediation solutions. The results presented focus on the characterization of the treatment of particulate contamination, including both physical particles and microbiological particles. They thus represent an initial step toward establishing a harmonized protocol within the project.

The objective of this study is to assess the air-cleaning performance of five indoor air remediation devices representative of the diversity of the current market. The experimental methodology relies on the controlled generation of a homogeneous burst of a monodispersed aerosol of *Staphylococcus epidermidis* in a 97 m³ test chamber (ASTERIA), followed by the temporal monitoring of aerosol concentration in the presence of the five remediation solutions. Performance is evaluated by measuring the decay kinetics of particle concentration and particle viability. The results highlight the necessity of using two complementary indicators: the physical clean air delivery rate (*CADR_physical*) and the biological clean air delivery rate (*CADR_biological*).

The analyses show that devices employing mechanical filtration (devices #1 and #2) effectively reduce particulate concentration (e.g., a *CADR_physical* of 160 ± 4.5 m³/h for device #1). In contrast, the use of an essential-oil-based spray (device #5) mainly exhibits an antimicrobial effect, with an equivalent *CADR_biological* of 161 ± 82 m³/h. The study demonstrates that this dual-indicator approach allows for distinguishing the mechanisms of action of the different solutions and therefore their actual impact on the quality of inhaled air. It also underscores the substantial uncertainty associated with biological measurements, highlighting the need for methodological improvements to enhance protocol robustness.

MOTS-CLÉS : Epurateurs, Air intérieur, Protocole d'évaluation, Performance et Débit d'air épuré / **KEYWORDS:** Air cleaner, Indoor air, Evaluation protocol, Efficiency and Clean Air delivery

1. INTRODUCTION

La qualité de l'air intérieur est un enjeu de santé publique majeur, suscitant le développement de nombreuses technologies de remédiation. Cependant, l'absence d'un cadre d'évaluation standardisé et unifié rend difficile la comparaison objective de leur efficacité. Le projet PHARAON vise à combler cette lacune en élaborant un protocole expérimental harmonisé, capable d'évaluer et de hiérarchiser diverses solutions de traitement de l'air.

Cette étude s'inscrit dans le lot 2 de ce projet et se concentre sur l'évaluation expérimentale des performances de différentes typologies de solutions de remédiation. La problématique centrale est de déterminer si une méthodologie unique peut s'appliquer à des dispositifs aux modes d'action fondamentalement différents, allant de la filtration mécanique à l'inactivation chimique ou l'ionisation.

L'objectif principal de cette étude est donc de qualifier les performances de cinq solutions de remédiation sélectionnées — deux épurateurs actifs à filtration, un générateur d'ions, une paroi dépolluante passive avec des propriétés de sorption et un spray revendiqué assainissant — face à une pollution contrôlée, à la fois particulaire et microbiologique. L'intérêt scientifique de cette démarche est double. D'une part, elle permet de générer des données performancielles comparatives pour des technologies diversifiées. D'autre part, elle vise à valider et critiquer un protocole dual, capable de dissocier l'efficacité d'épuration physique des particules de l'efficacité d'inactivation des micro-organismes viables. Ces travaux apporteront des données d'entrée indispensables à la construction d'un cadre méthodologique robuste pour une lecture globale et intégrative de l'impact réel des solutions de purification d'air dans les environnements intérieurs.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Banc d'essai et conditions expérimentales

Les essais ont été menés dans la chambre expérimentale ASTERIA du CSTB (Figure 1), un volume confiné de 97 m³ maintenu en surpression pour éviter toute contamination extérieure. Les conditions ont été standardisées pour tous les tests : un taux de renouvellement d'air (TRA) constant de 0,5 volume par heure a été assuré par une centrale de traitement d'air, et deux ventilateurs internes garantissaient l'homogénéisation de l'air durant la phase de contamination.

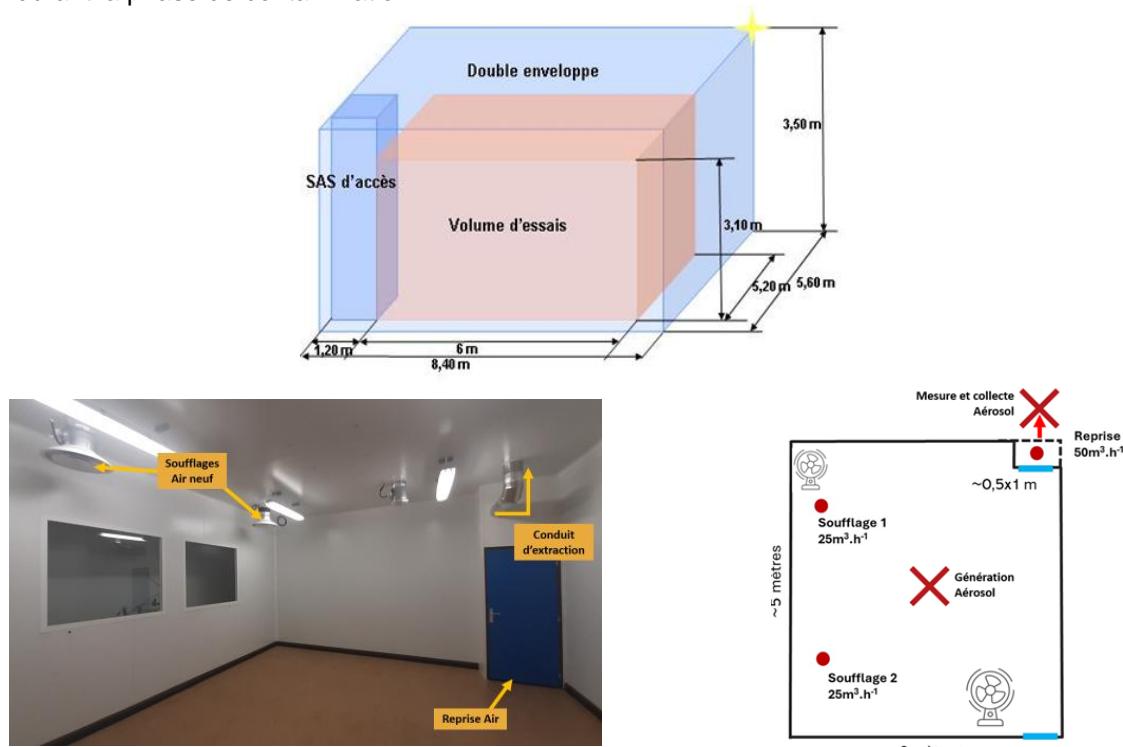


Figure 1: Schémas et photographie de la disposition des soufflages et reprise / extraction d'air à l'intérieur du volume expérimental ASTERIA de 97 m³

2.2. Aérosol d'essai et sa génération

Un aérosol bactérien a été utilisé comme contaminant. La souche *Staphylococcus epidermidis* (CIP 8155T équivalent ATCC 14 990), une bactérie non pathogène représentative de la microflore humaine, a été choisie conformément à la norme NF B44-200 (mai 2016). Une suspension bactérienne concentrée (environ 10^{10} UFC/mL) a été préparée puis aérosolisée à l'aide d'un nébuliseur pneumatique Collison à six jets. Ce dispositif, couplé à un système de séchage, a permis de générer un aérosol sec et monodispersé, majoritairement composé de cellules bactériennes isolées, dont les caractéristiques physiques étaient stables dans le temps.

2.3. Protocole expérimental

Chaque essai comporte trois phases :

- Phase de stabilisation (30 min) : Obtention des conditions de référence et d'un "blanc" particulaire dans la chambre.
- Phase de contamination (environ 5 min) : Génération continue de l'aérosol bactérien jusqu'à atteindre une concentration cible d'environ 1500 particules/cm³.
- Phase de décroissance (120 min) : Arrêt de la génération et suivi de la diminution naturelle ou traitée (en présence d'une des 5 solutions de remédiation) de la concentration de l'aérosol.

2.4. Instrumentation et méthodes d'analyse

La caractérisation de l'aérosol reposait sur une double approche :

Approche physique : La concentration et la distribution granulométrique des particules ont été mesurées en temps réel à l'aide d'un spectromètre à temps de vol (APS - Aerodynamic Particle Sizer), couvrant une plage de 0,5 à 20 µm et un compteur optique Grimm 1.108 permettant de qualifier les particules sur une gamme de taille allant de 0,3 à 20 µm avec une résolution temporelle de 6 secondes.

Approche biologique : La concentration en bactéries viables (exprimée en UFC/m³) a été quantifiée par prélèvements à des temps définis. Un bio-collecteur en milieu liquide (BioSampler SKC®) a été utilisé pour capturer les aérosols. Les échantillons liquides ont ensuite été dilués en série, ensemencés sur milieu de culture gélosé, puis incubés pendant 24 heures avant dénombrement des colonies.

2.5. Dispositifs de rémédiation étudiés

Cinq solutions de remédiation ont été sélectionnées (Tableau 1). On entend pas dispositif actif, une solution de remédiation qui intègre un système de circulation d'air dans sa structure. La mise en contact des contaminant avec l'étage de traitement est assuré par un ventilateur. On entend par dispositif passif, une solution de remédiation dont la mise en contact avec les contaminants repose sur les flux d'air propres à l'environnement dans lequel elle est mise en oeuvre.

Tableau 1 : Caractéristiques des solutions de remédiations testées (données issues des notices techniques)

Désignation des dispositifs étudiés	Procédé	Débit	Polluants cibles revendiqués
Dispositif n°1	Actif : Filtration mécanique (classe EPA12) et adsorption sur charbon actif	140 m ³ /h	Particules et COV
Dispositif n°2	Actif : Filtration mécanique (classe HEPA 13), adsorption sur charbon actif, photocatalyse et ioniseur	186 m ³ /h	Particules (inertes et biologiques) et COV
Dispositif n°3	Passif : génératrice d'ions négatifs	-	Particules (inertes et biologiques)
Dispositif n°4	Passif : Cloison dépolluante intégrant des adsorbants dans sa composition.	-	COV
Dispositif n°5	Passif : Spray aux huiles essentielles	-	Bactéries, virus et moisissures

2.6. Critères de performance: les CADR

L'efficacité de chaque dispositif a été évaluée à l'aide du concept de *Clean Air Delivery Rate (CADR)*, exprimé en m^3/h . Le CADR a été calculé à partir de la différence entre la constante de décroissance exponentielle de l'aérosol observée avec le dispositif lors de sa mise en œuvre dans ASTERIA ($k_{\text{dispositif}}$) et la constante de décroissance naturelle de référence (k_{nat}), c'est-à-dire en l'absence de toute solution de remédiation dans l'enceinte, multipliée par le volume de la chambre (V).

$$\text{CADR} = (k_{\text{dispositif}} - k_{\text{nat}}) * V$$

Les résultats obtenus ont conduit à calculer deux types de CADR : le $\text{CADR}_{\text{physique}}$, basé sur les données de l'APS/COP, quantifiant la capacité du système à éliminer les particules de l'air ; le $\text{CADR}_{\text{biologique}}$, basé sur les données de dénombrement d'UFC, évaluant la capacité à réduire la charge microbienne viable, que ce soit par filtration ou par inactivation.

3. RÉSULTATS

3.1. Caractérisation de l'aérosol de référence

L'aérosol de *S. epidermidis* généré s'est révélé être stable et adapté à l'étude. Sa distribution granulométrique était monodispersée, avec un diamètre géométrique moyen (GMD) de $0,86 \mu\text{m}$ et un écart-type géométrique (GSD) de 1,27, traduisant une gamme de particules majoritairement submicroniques ($0,5\text{-}1,2 \mu\text{m}$).

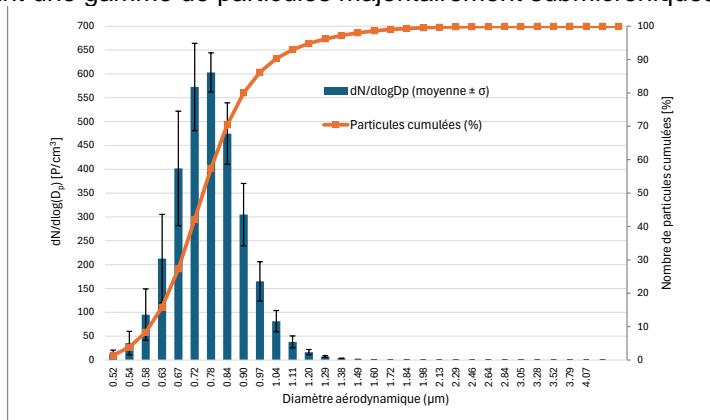


Figure 2: Distribution granulométrique de l'aérosol bactérien prélevé dans le volume expérimental à $t + 5$ min après la fin de la génération de l'aérosol ($n = 5$ essais)

Les cinétiques de décroissance naturelle (sans dispositif) ont servi de ligne de base. La décroissance physique a suivi une loi exponentielle avec une constante $k_{\text{phy-ref}} = 1,29 \text{ h}^{-1}$, correspondant à une demi-vie des particules de 31,8 minutes. La décroissance biologique (viabilité) a été plus rapide, avec une constante $k_{\text{bio-ref}} = 2,22 \text{ h}^{-1}$ et une demi-vie de 18,7 minutes. Cette différence s'explique par la perte de cultivabilité des bactéries soumises au stress de l'aérosolisation (assèchement.), qui s'ajoute aux phénomènes de dépôt et le renouvellement d'air.

3.2. Performances des dispositifs de remédiation

Les dispositifs n°1 et 2, basés sur la filtration mécanique, ont montré une efficacité très similaire et significative sur l'élimination des particules. Ils ont accéléré la décroissance physique d'un facteur 2,3, avec des $\text{CADR}_{\text{physique}}$ de $160 \pm 4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le dispositif n°1 (Figure 3) et $175 \pm 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le dispositif n°2. Leur effet sur la viabilité était plus modéré, avec des $\text{CADR}_{\text{biologique}}$ de $100 \pm 48 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figure 4) et $102 \pm 66 \text{ m}^3/\text{h}$ respectivement. La forte incertitude sur ces dernières valeurs reflète la variabilité inhérente aux mesures microbiologiques.

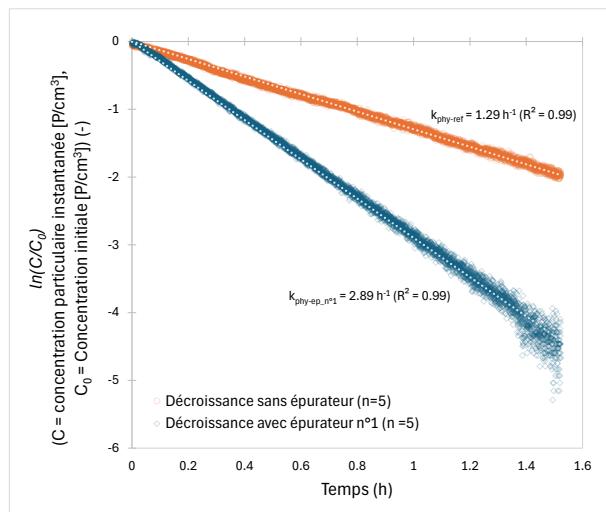


Figure 3: Régression linéaire de $\ln(C(t)/C_0)$ pour la détermination des constantes de décroissance particulaire de référence ($k_{\text{phy-ref}}$) et induite par l'épurateur n°1 ($k_{\text{phys-disp}}$) (APS, n=5)

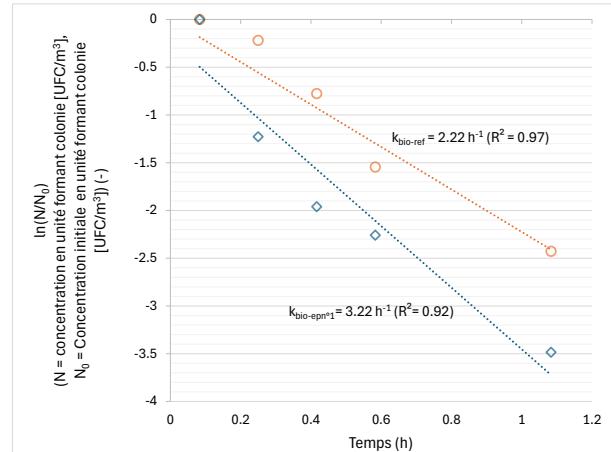


Figure 4: Régression linéaire de $\ln(N(t)/N_0)$ pour la détermination des constantes de décroissance de la viabilité des aérosols bactériens de référence ($k_{\text{bio-ref}}$) et induite par l'épurateur ($k_{\text{bio-epn}^1}$), (n=2)

Le générateur d'ions (dispositif n°3) a présenté un effet modéré sur la décroissance physique, avec un $CADR_{\text{physique}}$ de $110 \pm 5 \text{ m}^3/\text{h}$. En revanche, aucun effet significatif n'a été mesuré sur la décroissance de la viabilité bactérienne, aboutissant à un $CADR_{\text{biologique}}$ considéré comme nul. Ce résultat peut être attribué à une réelle absence d'effet biocide ou à une interférence potentielle des ions sur le processus de collecte et d'analyse.

La paroi passive (dispositif n°4), conçue pour la dégradation des COV, cette solution n'a montré aucun impact mesurable sur la cinétique de décroissance des particules ou de la viabilité bactérienne. Les constantes de décroissance étaient identiques à celles de la référence, conduisant à des $CADR_{\text{physique}}$ et $CADR_{\text{biologique}}$ nuls. Le spray d'huiles essentielles (dispositif n°5) a présenté un profil d'efficacité inverse à celui des filtres. La diffusion des huiles essentielles n'a eu aucune influence sur la cinétique de décroissance physique des particules ($CADR_{\text{physique}}$ nul). Cependant, elle a démontré un effet antimicrobien significatif, accélérant la décroissance de la viabilité bactérienne d'un facteur 1,7. Le $CADR_{\text{biologique}}$ équivalent calculé était de $161 \pm 82 \text{ m}^3/\text{h}$, le plus élevé de tous les dispositifs testés. Il est crucial de noter que cette valeur ne représente pas un débit d'air traité, mais une vitesse d'inactivation équivalente.

4. CONCLUSIONS

Cette étude démontre avec succès la faisabilité et la pertinence d'un protocole d'évaluation dual pour caractériser les performances de technologies de traitement de l'air très diverses. L'approche combinant une analyse physique en temps réel et une analyse biologique quantitative permet de distinguer clairement les différents modes d'action : l'élimination physique des particules (filtration), l'inactivation biologique (action chimique) ou l'absence d'effet sur les bioaérosols.

Les résultats mettent en évidence que les épurateurs à filtration sont efficaces pour réduire la concentration globale de particules, tandis que des solutions comme les sprays aux huiles essentielles peuvent avoir une action ciblée sur la viabilité des micro-organismes sans affecter la charge particulaire. Des dispositifs comme la cloison dépolluante (dispositif n°4), conçus pour des polluants chimiques, n'ont logiquement pas d'impact dans ce contexte.

La principale limite actuelle de la méthode réside dans la mesure de la viabilité biologique. Le processus, qui inclut l'échantillonnage, la culture et le dénombrement manuel, est sujet à une variabilité et une incertitude expérimentale élevées (coefficients de variation atteignant 50 % ou plus). Cette incertitude rend l'estimation du $CADR_{\text{biologique}}$ moins robuste que celle du $CADR_{\text{physique}}$, ce qui complique l'interprétation des effets modérés.

Ce travail est soutenu financièrement par l'ADEME (Dossier n°2262D0059). Le consortium du projet PHARAON regroupe IMT Nord Europe, le CSTB, TIPEE, IMT Atlantique, le CETIAT, le CNRS (IRCELYON), la FIMEA et le Groupe TERA.