

# DEVELOPPEMENT D'UNE FENETRE PARIETO-DYNAMIQUE FILTRANTE

E. Geffre<sup>1,2</sup>, B. Golly<sup>1</sup>, P. Blondeau<sup>2</sup>, M. Ondarts<sup>1</sup>, P. Guitton<sup>3</sup>, R. Greffet<sup>4</sup> et E. Gonze<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>LOCIE, UMR5271, Université Savoie Mont-Blanc, F-73376 Le Bourget du Lac

<sup>2</sup>LaSIE, UMR7356, La Rochelle Université, F-17042 La Rochelle

<sup>3</sup>TEQOYA SAS, 7 route de Prehac, F-33730 Villandraut

<sup>4</sup>RIDORET, 70 rue de Québec, F-17000 La Rochelle

\*Courriel de l'orateur : evelyne.gonze@univ-savoie.fr

## TITLE - Development of an airflow filtering window

### RESUME

L'objectif de ce travail est d'ajouter aux excellentes performances thermiques, acoustiques et de confort d'une fenêtre pariéto-dynamique la capacité à collecter les particules grâce à un procédé d'électrofiltration. Le procédé d'ionisation, son emplacement dans la fenêtre et la polarité de la décharge ont été étudiés. Les résultats montrent que l'ajout d'un module d'électrofiltration, constitué d'un étage d'ionisation comprenant 11 aiguilles ionisantes et d'un étage de collecte, positionnés entre les vitrages permet de réduire de plus de 80% la concentration en particules dans l'air de ventilation dans la gamme 20 nm à 10 µm.

### ABSTRACT

The objective of this work is to add to the excellent thermal, acoustic and comfort performances of an airflow window the ability to collect particles through an electrostatic precipitator. The ionisation process, its location and discharge polarity were studied. The results show that the addition of an electrofiltration process, consisting of an ionisation stage comprising 11 ionising needles and a collection stage, positioned between the glass panes, allows a reduction of more than 80% in the particles concentration in the ventilation air in the range 20 nm to 10 µm.

**MOTS-CLES** : Qualité de l'air intérieur, Filtration de l'air, Electrofiltre, Fenêtre pariéto-dynamique, Ventilation

**KEYWORDS** : Indoor Air Quality, Air filtration, Electrostatic precipitator, Airflow window, Ventilation

## 1. INTRODUCTION

La fenêtre pariéto-dynamique EnR (Ridoret) est un composant d'enveloppe passif pouvant équiper les bâtiments disposant d'une VMC simple flux ou d'une ventilation naturelle assistée (Greffet et al. 2016, Michaux et al. 2019). L'air neuf provenant de l'extérieur circule entre les trois vitrages avant de pénétrer dans le bâtiment ce qui permet, l'hiver, de limiter les déperditions thermiques et de récupérer une partie de l'énergie solaire absorbée par les verres. A l'inverse, l'été, l'inversion du flux thermique et l'absence de rayonnement solaire direct permettent de rafraîchir l'air neuf.

L'objectif de notre étude est d'évaluer les performances d'un module d'électrofiltration positionné entre les vitrages de la fenêtre EnR afin de réduire significativement la concentration en particules de l'air de ventilation et ainsi l'exposition des occupants. L'objectif est d'atteindre les valeurs guides de concentrations à long-terme fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé, à savoir 15 µg/m<sup>3</sup> et 5 µg/m<sup>3</sup> respectivement pour les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2.5</sub>, pour un surcoût énergétique minimale. Les verrous résident dans la géométrie de l'espace disponible pour insérer ce module, la perte de charge maximale acceptable et l'obligation d'avoir un impact négligeable sur les concentrations intérieures en ozone.

## 2. BANC D'ESSAIS ET PROTOCOLES OPERATOIRES

Le banc d'essais est constitué d'une veine gazeuse dans laquelle est positionnée la fenêtre EnR (Ridoret) (Figure 1a). La vitesse, la température et l'humidité de l'air sont mesurées en continu à l'aide d'un anémomètre à fil chaud (C310, KIMO) et d'un hygromètre capacitif (TH300, KIMO). Le ventilateur placé en amont de la veine permet d'imposer un débit d'air de 20 m<sup>3</sup>/h, débit classiquement observé dans la fenêtre EnR *in situ*.

Le procédé d'électrofiltration comprend deux étages successifs : la charge et la collecte des particules. La charge est réalisée soit par un ioniseur de type fils-plaques soit par des aiguilles ionisantes.

- Le module fils-plaques est intégré dans la chicane de la fenêtre sur la veine d'air descendante d'une largeur de 21 mm (Figure 1c). Il est constitué de deux rangées d'électrodes émissives (fils de tungstène de 0,1 mm de diamètre) et de trois contre-électrodes planes en acier inoxydable de 20 mm de hauteur. La tension appliquée aux fils est positive et égale à +4 kV.
- Les aiguilles, développées par l'entreprise TEQOYA, se composent d'une aiguille de décharge située dans un cône diélectrique et d'une surface de masse apparente en contact avec le flux d'air.

Les aiguilles peuvent être intégrées en entrée de fenêtre (8 aiguilles) ou dans la chicane (11 aiguilles) (Figure 1d). La tension appliquée peut être positive ou négative (+7 ou -7 kV). La collecte des particules est réalisée par un collecteur de type plaques-plaques placé dans la chicane de la fenêtre sur la veine d'air montante d'une largeur de 28 mm. Il est constitué de cinq plaques développant une surface totale de 0,116 m<sup>2</sup>, dont deux sont à la tension de +5 kV et les trois autres reliées à la masse.

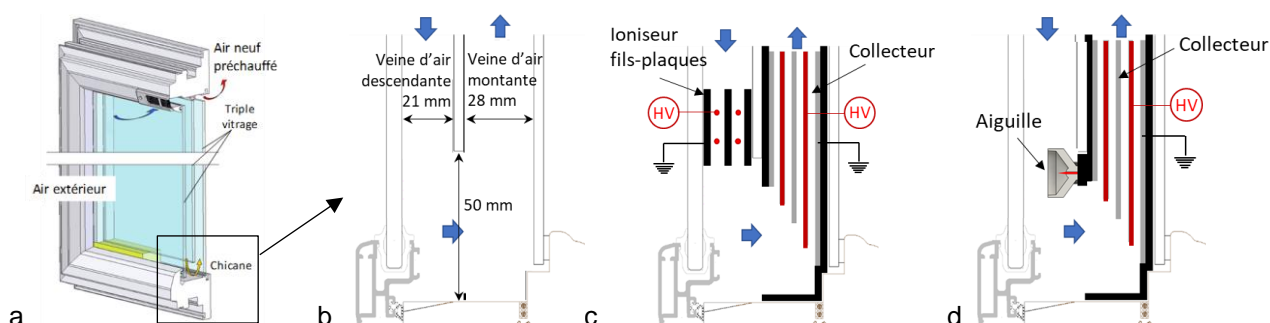


Figure 1. Schéma de la fenêtre EnR (a) ; coupe transversale de la chicane de la fenêtre (b) ; intégration de l'ioniseur fils-plaques dans la chicane (c) ; intégration des aiguilles ionisantes dans la chicane (d).

Un aérosol de KCl est généré par voie liquide à l'aide du générateur de particules ATM220 (TOPAS). Le diamètre géométrique de l'aérosol est de 60 nm et son écart-type géométrique de 2,0. Les concentrations sont mesurées par un compteur optique (modèle 1.108, GRIMM) dans la gamme 0,3 à 10 µm et un Nanoscan (modèle 3910, TSI) dans la gamme 10 à 300 nm. Un neutraliseur à rayon X (modèle 3088, TSI) permet de neutraliser les particules avant leur comptage par le Nanoscan. Les mesures sont effectuées en aval de la fenêtre quand les tensions de l'ioniseur et du collecteur sont nulles puis quand les tensions sont appliquées. A partir d'au moins cinq cycles d'une heure, l'efficacité fractionnelle en nombre ( $\eta_{dp}$ ) sur la gamme 10 nm à 10 µm et l'efficacité en masse sur les PM<sub>1</sub> ( $\eta_{PM1}$ ) sont calculées.

La charge des particules est mesurée grâce à l'électromètre Charme (PALAS).

La concentration en ozone est mesurée en continu en aval de la fenêtre par absorption UV (O342e, Environnement SA) de sorte à calculer l'augmentation de la concentration au passage de la fenêtre ( $\Delta O_3$ ).

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les critères pris en compte pour choisir le procédé d'ionisation, sa position et la polarité de la décharge sont l'efficacité de collecte des particules dans la gamme 10 nm à 10 µm, la production d'ozone, ainsi que le maintien de l'efficacité dans le temps.

#### 3.1. Efficacité fractionnelle

L'étude a consisté à mesurer l'efficacité fractionnelle pour les deux configurations (aiguilles et fils-plaques), les deux positions (entrée et/ou chicane), en tension positive ou négative et avec un débit d'air de 20 m<sup>3</sup>/h. Le Tableau 1 reporte les conditions des cinq essais réalisés ainsi que l'efficacité massique sur les PM<sub>1</sub>.

Les courbes d'efficacité fractionnelle, présentées sur la Figure 2, ont un profil classique, à savoir :

- Le minimum d'efficacité entre 0,1 et 1 µm correspond aux particules les plus pénétrantes. Il s'explique par les mécanismes de charge : la charge par diffusion est prépondérante pour les particules inférieures à 0,1 µm et la charge par champ pour les particules supérieures à 1 µm. Ceci entraîne une plus faible mobilité électrique des particules entre 0,1 et 1 µm et donc un minimum d'efficacité. Celui-ci est particulièrement visible lors de l'intégration des aiguilles dans la chicane. Dans ce cas, l'efficacité pour les particules de 0,3 µm est de 83,4%.
- La baisse de l'efficacité fractionnelle pour les particules inférieures à quelques dizaines de nanomètres correspond au régime de charge partielle. Dans ce régime, on suppose que les particules acquièrent une charge moyenne inférieure à la charge élémentaire suite à leur faible probabilité de collision avec les ions (Huang et Chen 2002, Chen et al. 2020). Alors que cette baisse d'efficacité est peu visible lorsque l'ionisation est réalisée à l'aide de l'ioniseur fils-plaques, elle est significative avec les aiguilles. Pour les particules de 15 nm, l'efficacité fractionnelle est de 95,0% pour le fils-plaques et comprise entre 72,3 et 80,3% pour les aiguilles.

La comparaison de l'ioniseur fils-plaques et des aiguilles positionnés dans la chicane démontre une meilleure efficacité du premier malgré la plus faible tension appliquée : +4 kV pour le fils-plaques (essai 1), +7 kV pour

les aiguilles (essai 2). Ce résultat, déjà observé dans d'autres configurations (Chen et al. 2020), s'explique par l'intensité de la décharge supérieure dans le cas du fils-plaques qui génère donc une concentration en ions positifs environ 20 à 40 fois supérieure. En effet, l'intensité de la décharge est de 350  $\mu\text{A}$  et pour le fils-plaques et d'environ 1  $\mu\text{A}$  pour les aiguilles.

La différence peut également provenir de la répartition de la décharge couronne dans l'espace. En effet, la géométrie du fils-plaques permet de générer des ions dans toute la largeur de la fenêtre et conduit donc à une répartition homogène des ions alors que la décharge générée par les 11 aiguilles est beaucoup plus localisée. Dans le cas des aiguilles en chicane, une fraction des particules peut ainsi « court-circuiter » le flux d'ions émis et ne pas avoir le temps d'être chargées avant d'entrer dans le collecteur.

Concernant la position des aiguilles, l'efficacité est plus élevée lorsque les aiguilles sont placées en entrée de fenêtre (essai 3) que dans la chicane (essai 2), malgré un nombre plus faible d'aiguilles. Cela est particulièrement visible pour les particules inférieures à 1  $\mu\text{m}$ . Ceci pourrait s'expliquer par l'éloignement entre les étages de charge et de collecte qui permet d'augmenter le temps de charge des particules par diffusion. En effet, les ions générés par les aiguilles en entrée de fenêtre ne dérivent pas tous vers l'électrode de masse ; des ions sont donc entraînés au-delà de la zone d'ionisation et le processus de charger par diffusion peut alors se poursuivre dans la veine d'air descendante. Eloigner l'étage d'ionisation de l'étage de collecte permet ainsi de se rapprocher des performances du fils-plaques en augmentant le temps de charge par diffusion.

L'essai 4 qui a consisté à utiliser les deux étages d'aiguilles simultanément, en entrée et en chicane, ne montre pas d'augmentation de l'efficacité de collecte par rapport à l'utilisation des aiguilles en entrée (essai 3).

L'influence de la polarité de la décharge a été étudiée avec les aiguilles positionnées en chicane, en polarité positive (essai 2) et négative (essai 5). Aucune différence significative n'est observée sur l'efficacité de collecte. Ceci est en accord avec la faible différence de charge moyenne des particules mesurées en sortie de l'étage d'ionisation. Pour une concentration identique en particules, l'augmentation de la charge moyenne des particules au passage de l'ionisation est, respectivement, de +107 fA et -89 fA en tension positive et négative.

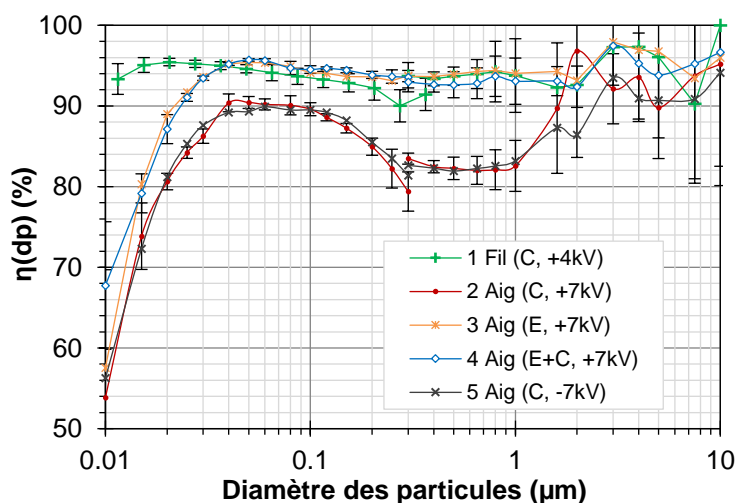


Figure 2. Efficacité fractionnelle en nombre (Fil : fils-plaques ; Aig : aiguilles ; E : entrée ; C : chicane)

### 3.2. Emission d'ozone

L'émission de l'ozone est fonction du procédé d'ionisation et de la polarité de la décharge. Suite à la forte intensité de la décharge, l'ioniseur fils-plaques génère une concentration en ozone de 278 ppb à la sortie de la fenêtre, valeur incompatible avec l'application visée. La fenêtre EnR devra donc être équipée d'aiguilles.

Tableau 1. Emission d'ozone et efficacité sur les PM1

Essai		Position	Tension (kV)	$\Delta\text{CO}_3$ (ppb)	$\eta_{\text{PM1}}$ (%)
1	Fils-plaques	Chicane	+4	278	93,4 ± 0,6
2	Aiguilles	Chicane	+7	<1	83,4 ± 2,5
3	Aiguilles	Entrée	+7	4,8	93,7 ± 1,4
4	Aiguilles	Entrée + chicane	+7	5,4	93,0 ± 1,5
5	Aiguilles	Chicane	-7	5,8	83,1 ± 2,5

Concernant la polarité de la décharge, la concentration en ozone en sortie de fenêtre est inférieure à 1 ppb (limite de détection de l'analyseur) en polarité positive (essai 2) et égale à 5,8 ppb en polarité négative (essai 5). Cette différence significative est due à l'effet de la polarité sur la vitesse des réactions d'excitation qui produisent les molécules de diazote et de dioxygène à l'état excité par collision électronique. Chen et Davidson (2003) ont montré qu'en tension négative, cette vitesse est environ 5,6 fois plus élevée qu'en tension positive du fait de la présence d'un plus grand nombre d'électrons énergétiques. Or ce sont ces espèces qui sont principalement responsables de la production d'ozone par réaction avec le dioxygène.

Il est à noter que lorsque les aiguilles sont positionnées en entrée de fenêtre (essais 3 et 4), les mesures révèlent une concentration supérieure à celles observées avec les aiguilles positionnées en chicane, à savoir >4,8 ppb. Ceci n'est pas dû aux aiguilles elles-mêmes mais au fait qu'elles soient dans un espace fortement confiné qui peut entraîner l'apparition d'effets de pointe déstabilisant le plasma. Ce phénomène doit pouvoir être évité grâce à un travail d'optimisation sur la fenêtre pour éloigner les pointes de la structure de la fenêtre.

### 3.3. Maintien de la performance dans le temps

La mesure du flux d'ozone oriente le choix de la polarité vers l'application d'une tension positive. Cependant, alors que les aiguilles ne subissent aucune détérioration en tension négative (polarité habituellement utilisée avec ces aiguilles), nous avons observé une dégradation des pointes en polarité positive. Il s'agit d'une corrosion localisée sur l'extrémité des aiguilles en contact avec le plasma (Figure 3). L'utilisation de la polarité positive nécessite donc l'étude du matériau de l'aiguille afin d'éviter sa corrosion.

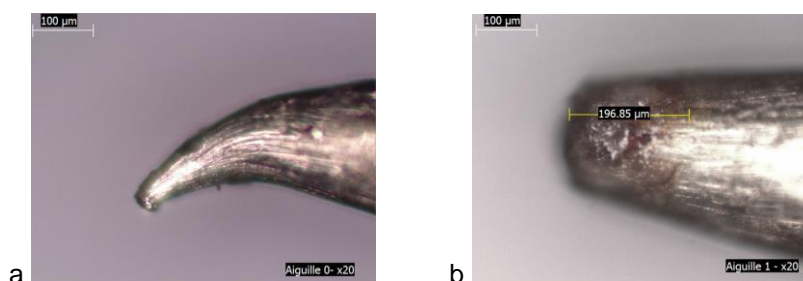


Figure 3. Photographie d'une aiguille avant (a) et après 111 heures de fonctionnement (b) en polarité positive

## 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail expérimental a démontré la faisabilité et l'intérêt d'intégrer un module d'électrofiltration dans une fenêtre pariéto-dynamique. Actuellement, l'intégration de 11 aiguilles dans la chicane, alimentées en tension positive (+7 kV) permet de réduire de plus de 80% la concentration en particules dans l'air entrant, pour un débit de ventilation de 20 m<sup>3</sup>/h. Dans ces conditions, l'augmentation de la concentration en ozone au passage de la fenêtre est inférieure à 1 ppb, limite de détection de l'analyseur.

Différentes voies d'amélioration sont actuellement à l'étude :

- L'optimisation de l'intégration des aiguilles en entrée de fenêtre doit permettre d'atteindre des concentrations en ozone acceptables tout en augmentant l'efficacité de collecte des particules ;
- L'étude de l'influence du matériau constitutif des aiguilles ionisantes doit conduire à une réduction du processus de corrosion observé en polarité positive et responsable du vieillissement des aiguilles.

Par ailleurs, des études complémentaires sont en cours pour évaluer l'efficacité de cette fenêtre filtrante à l'échelle d'une pièce.

## 5. REFERENCES ET REMERCIEMENTS

Ce travail est financé par l'Agence Nationale de la Recherche au travers du projet WINFIL sélectionné dans le cadre de l'appel à projets générique 2019.

- Chen, J. & Davidson, J.H. (2003). Ozone production in the negative DC corona: The dependence of discharge polarity, *Plasma Chem. Plasma Process.* 23, 501–518. <https://doi.org/10.1023/A:1023235032455>
- Chen, L., Gonze, E., Ondarts, M., Outin, J. & Gonther, Y. (2020). Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments. *Sep. Purif. Technol.* 247, 116964. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116964>
- Greffet, R., (2016). Études expérimentale et numérique des performances énergétiques d'une fenêtre pariéto-dynamique La Rochelle Université.
- Huang S.H. & Chen C.C. (2002). Ultrafine Aerosol Penetration through Electrostatic Precipitators, *Environ. Sci. Technol.* 36, 4625–4632. <https://doi.org/10.1021/es011157>
- Michaux, G., Greffet, R., Salagnac & P., Ridoret, J.-B. (2019). Modelling of an airflow window and numerical investigation of its thermal performances by comparison to conventional double and triple-glazed windows. *Appl. Energy* 242, 27–45. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.029>