



SOLUTIONS
POUR
**NOTRE
AIR**

**Expérimentations
«Innovons pour l'air
de nos stations»
Synthèse et avis
d'Airlab**

Février 2022

EXPERIMENTATIONS « INNOVONS POUR L’AIR DE NOS STATIONS » SYNTHESE ET AVIS D’AIRLAB

Février 2022

(Version modifiée le 31/03/2022)

Avec le soutien de



Et la participation de



« Le bon geste environnemental : N'imprimez ce document que si nécessaire et pensez au recto-verso ! »

SOMMAIRE

SOMMAIRE	5
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	8
1.1 LAUREATS DE L'EXPERIMENTATION	9
1.2 MISSION D'EVALUATION D'AIRLAB	9
1.2.1. PROTOCOLE D'EVALUATION DES MESURES DANS L'AIR	9
1.2.2. PROTOCOLE D'EVALUATION DES MESURES SUR BANC	11
1.2.3. AVIS D'AIRLAB SUR LES CONCLUSIONS	12
2. RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS.....	13
2.1 EXPERIMENTATION AIR LIQUIDE / SNCF GARES & CONNEXIONS (TECHNOLOGIE IONISATION POSITIVE).....	13
2.1.1 DISPOSITIF D'EPURATION TESTE	13
2.1.2. DISPOSITIF D'EVALUATION MIS EN PLACE PAR SNCF GARES & CONNEXIONS	14
2.1.3. RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES PAR AIR LIQUIDE / SNCF GARES & CONNEXIONS	16
2.1.4. AVIS D'AIRLAB RELATIF A LA QUALITE DE L'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION AIR LIQUIDE / SNCF GARES & CONNEXIONS	17
2.2 EXPERIMENTATION SUEZ / RATP (TECHNOLOGIE IONISATION POSITIVE).....	18
2.2.1 DISPOSITIF D'EPURATION TESTE	18
2.2.2. DISPOSITIF D'EVALUATION MIS EN ŒUVRE PAR SUEZ / RATP	18
2.2.3. RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES PAR SUEZ / RATP	20
2.2.4. AVIS D'AIRLAB RELATIF A LA QUALITE DE L'EVALUATION SUR L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION DE SUEZ/RATP	21
2.3 EXPERIMENTATION STARKLAB / SNCF GARES & CONNEXIONS (TECHNOLOGIE FILTRATION A EAU)	23
2.3.1 DISPOSITIF D'EPURATION TESTE	23
2.3.2. DISPOSITIF D'EVALUATION.....	24
2.3.3. RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES	25
2.3.4. AVIS D'AIRLAB SUR LA QUALITE DE L'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION STARKLAB / SNCF GARES & CONNEXIONS	27
2.4 EXPERIMENTATION TRAPAPART / SNCF RESEAU	28
2.4.1. DISPOSITIF D'EVALUATION MENEÉ PAR TRAPAPART / SNCF RESEAU	29
2.4.2. RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES PAR TRAPAPART / SNCF RESEAU	30
2.4.3. AVIS D'AIRLAB RELATIF A LA QUALITE DE L'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION PAR TRAPAPART / SNCF RESEAU	31
2.5 EXPERIMENTATION TALLANO/ SNCF TRANSILIEN	32
2.5.1 DISPOSITIF DE COLLECTE TESTE	32
2.5.2. DISPOSITIF D'EVALUATION MIS EN PLACE PAR SNCF TRANSILIEN.....	33
2.5.3 RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES PAR SNCF TRANSILIEN	33
2.5.4. AVIS D'AIRLAB RELATIF A LA QUALITE DE L'EVALUATION SUR L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION TALLANO/ SNCF TRANSILIEN	34
3. CONCLUSION	35

ANNEXE 1 : PRESENTATION D'AIRLAB.....	36
ANNEXE 2 : DETAILS TECHNIQUES DES MESURES	37
ANNEXE 3 : LISTE DES DOCUMENTS ANALYSES.....	39

Airparif est l'Observatoire indépendant de la qualité de l'air (association loi 1901) en Île-de-France. Conformément à la Loi sur l'Air et l'utilisation rationnelle de l'Energie, Airparif rassemble les différents acteurs impliqués dans les enjeux atmosphériques et susceptibles d'agir pour son amélioration. Les quatre collèges qui la composent (Etat, collectivités, acteurs économiques, milieu associatif et personnalités qualifiées) assurent son interaction avec les attentes de la société et lui garantissent indépendance et transparence dans ses orientations et ses activités.

Ses activités sont déclinées suivant 4 axes :

- **Surveiller** par une combinaison technologique (modélisation, stations, émissions) permettant de renseigner 7 millions de points toutes les heures en Ile-de-France ;
- **Comprendre** la pollution atmosphérique et ses impacts en lien avec le climat, l'énergie et l'exposition des personnes ; prévoir la qualité de l'air au jour le jour, les épisodes de pollution et les évolutions futures ;
- **Accompagner** les décideurs dans l'amélioration de la qualité de l'air sur leur territoire, favoriser la concertation, informer les autorités, les médias et le public ;
- **Favoriser l'innovation** notamment via AIRLAB, l'accélérateur de solutions innovantes pour la qualité de l'air. Lancé par Airparif et ses partenaires, AIRLAB rassemble une communauté (grandes entreprises, PME, start-up, instituts de recherche, collectivités, citoyens) qui s'engage pour améliorer la qualité de l'air

Airparif est agréée par le Ministère de l'Environnement. **Pour garantir la qualité et la fiabilité de ses résultats, ses activités sont certifiées ISO 9001 par l'AFAQ et accréditées ISO/CEI 17025 Section Laboratoires par l'AFNOR.**

AIRLAB, le laboratoire d'innovation d'Airparif et ses partenaires, promeut un modèle d'innovation ouverte et coordonne un écosystème facilitant les rencontres et les collaborations entre des acteurs d'horizons variés. AIRLAB vise à débloquer l'ensemble des points décisifs d'une innovation pour la qualité de l'air. En particulier : mobiliser des financements ; apporter des territoires d'expérimentation afin d'organiser les tests opérationnels ; organiser et faciliter l'accès aux données ; mettre en place **des processus d'évaluation des projets**, informer et faire adopter les solutions par le plus grand nombre (cf. annexe 1).

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le cadre de la mise en œuvre de son plan « Changeons d'air en Île-de-France », la Région Ile-de-France a lancé un appel à projets en juin 2018 appelé « Innovons pour l'air de nos stations », consistant à expérimenter des solutions de dépollution innovantes pour améliorer la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines de la région francilienne.

Les transports constituent une zone de surexposition de la population à la pollution de l'air. Ainsi, l'habitacle des voitures correspond à l'un des lieux les plus exposés pour les Franciliens. Les espaces intérieurs des transports en communs ferroviaires ou ferrés présentent également des niveaux de particules qui peuvent être élevés selon leur configuration. Si la nature des particules diffère notablement de celles issues du trafic routier, **l'amélioration de la situation des enceintes ferroviaires souterraines franciliennes représente un enjeu important, compte tenu de la fréquentation importante des transports en commun et de leur rôle majeur comme alternative aux modes individuels globalement plus polluants.** C'est pourquoi, la Région Île-de-France a décidé de soutenir des projets pilotes visant à expérimenter des équipements permettant d'améliorer de manière ambitieuse la qualité de l'air dans les espaces souterrains des transports en commun, où les teneurs en particules sont élevées pour différentes raisons : systèmes de freinage, usure des rails, frottement des caténaires, remise en suspension des particules déposées au sol au passage des trains et des voyageurs.

Les opérateurs franciliens (RATP et SNCF) agissent depuis plusieurs années afin de mesurer et de réduire les niveaux de polluants dans les enceintes souterraines dans lesquelles ils opèrent. Différentes solutions ont été testées et mises en œuvre, notamment la ventilation plus importante des gares, des matériels roulants moins émissifs (renforcement du freinage électrique). L'appel à projets visait à tester des solutions nouvelles, pilotes et reproductibles, afin d'améliorer, plus rapidement et plus efficacement encore, la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.

Les lauréats de l'appel à projet de la Région ont eu l'opportunité de tester leur solution dans une enceinte ferroviaire souterraine ou sur banc d'essais, et de bénéficier de l'accompagnement de la mise en œuvre de leurs solutions par la RATP et SNCF. Les évaluations de leur impact sur la qualité de l'air ont été menées par ces deux opérateurs, leurs experts avec, pour certaines, un appui direct d'Airparif.

AIRLAB, le laboratoire d'innovation ouverte d'Airparif a suivi les évaluations et donné un avis sur la validité des conclusions sur l'impact sur la qualité de l'air intérieur des dispositifs testés.

Le présent document présente l'avis d'AIRLAB sur la qualité de l'évaluation de l'impact des solutions testées sur la qualité de l'air pour chaque expérimentation. Cet avis est précédé d'une description du principe de traitement de la solution testée, du dispositif d'évaluation mis en place et des résultats affichés par l'opérateur et le lauréat. **Cet avis ne représente en aucun cas une certification des solutions ayant fait l'objet de ces expérimentations.**

1.1 LAUREATS DE L'EXPERIMENTATION

A l'issue de l'appel à projets, **5 candidats ont été retenus** sur 17 candidatures :

Les dispositifs des trois lauréats suivants ont été expérimentés directement en gare :

- **AIR LIQUIDE** : projet Purific'Air, utilisant la technologie de l'ionisation positive. Concrètement, les particules sont chargées positivement par des ions générés par une électrode, puis collectées sur une plaque.
- **SUEZ** : projet Ip'Air, avec également la technologie de l'ionisation positive. Les ions générés par une électrode viennent charger positivement les particules de l'air, qui s'agrègent ensuite contre une plaque collectrice.
- **STARKLAB** : mise en œuvre de la méthode Terraos, consistant en un traitement de l'air par filtration humide (de l'eau glycolée est utilisée pour emprisonner les poussières fines et les gaz),

Deux autres dispositifs, encore en phase de développement, seront également expérimentés.

- **TRAPAPART (ex SICAT)** : mise en œuvre d'une solution de piégeage passif des particules sur un média filtrant. La solution se présente sous la forme de longs panneaux, testés à différents endroits de la gare : quai, tunnels, couloir. La turbulence de l'air est utilisée comme « flux d'air d'entrées ». Les particules piégées s'accumulent sur un filtre, lavé périodiquement.
- **TALLANO** : mise en œuvre de la solution TAMIC®, qui consiste à capter les particules de freinage à la source par aspiration par des turbines électriques fixées sur les trains.

1.2 MISSION D'EVALUATION D'AIRLAB

La mission d'AirLab a consisté à garantir la qualité des évaluations de l'impact sur la qualité de l'air des dispositifs testés et non à évaluer l'efficacité des systèmes d'épuration expérimentés.

Dans cet appel à projets et pour le compte d'AIRLAB, les experts d'Airparif ont apporté leur soutien technique dans le cadre de l'évaluation de l'impact des solutions retenues sur la qualité de l'air dans les gares, menée par les opérateurs et les 3 premiers lauréats (AIR LIQUIDE, SUEZ et STARKLAB) :

- Elaboration d'un protocole de mesure à mettre en place pour suivre les niveaux de particules dans les gares recevant les systèmes de dépollution,
- Vérification de la validité des données mesurées et de leur interprétation,
- Avis sur les conclusions de chaque expérimentation.

Les experts de la SNCF ont suivi les expérimentations TRAPAPART et TALLANO.

1.2.1. PROTOCOLE D'EVALUATION DES MESURES DANS L'AIR

PROTOCOLE D'EVALUATION DES MESURES DANS L'AIR

En l'absence de protocole d'évaluation de référence pour des dispositifs de dépollution, qui plus est en espace ferroviaire souterrain, une réflexion a été menée dès le début de l'appel à projets entre Airparif/AIRLAB, RATP et SNCF, afin de choisir le type de mesures à réaliser (matériels de mesure, pas de temps, appareils de mesures, etc.), en prenant en compte les solutions de dépollution retenues, les gares d'expérimentation, etc.

Les principales dispositions de ce protocole sont précisées ci-après.

L'enjeu de qualité de l'air à l'intérieur des espaces ferroviaires souterrains étant lié à la présence de particules, caractérisées par une importante fraction grossière (part des PM₁₀-PM_{2.5} dans les PM₁₀) et une teneur élevée en métaux (principalement le fer), les particules PM₁₀ et fines PM_{2.5} sont à mesurer. Des **mesures de concentrations en masse de particules (PM₁₀ et PM_{2.5})**, réalisées avec un TEOM, appareil reconnu fournissant des mesures équivalentes à celles de la méthode de référence (voir annexe 1) dans les environnements souterrains, comme préconisé dans le guide¹ de Recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines gare. Ce type de mesure permet de suivre la variabilité horaire des niveaux sur le quai.

Des **mesures de concentration en nombre (par comptage) sont également préconisées**, afin d'évaluer l'impact des solutions sur la répartition granulométrique des particules dans l'air et de prendre en compte les particules les plus petites dont le poids est négligeable.

Les mesures de comptage pourront être réalisées avec un FIDAS et potentiellement avec des appareils de mesures plus légers calibrés à partir de mesures régulières dans l'enceinte ferroviaire souterraine.

Il est nécessaire de connaître l'état de la pollution dans la gare concernée avant mise en place des tests comme référence. Aussi, il est préconisé d'installer les systèmes de dépollution dans des gares ayant déjà fait l'objet d'études de qualité de l'air ou sinon de **prévoir un état zéro** (mesures spécifiques). Pour être représentatives, les mesures doivent être réalisées pendant toute la durée de l'expérimentation, ainsi qu'avant et après l'installation du système de dépollution (15 jours minimum). Une période de mesure de 3 mois par solution de dépollution est préconisée.

Il faudra s'assurer que la **période de mesure est représentative**, c'est-à-dire que d'autres potentiels facteurs d'influence des teneurs en particules dans la gare soient maîtrisés au mieux. Si des périodes de mesure ne sont pas représentatives (ex : problème affectant la circulation habituelle des trains, comme les grèves, travaux, etc.), elles ne seront pas prises en compte dans les résultats.

Suite aux premières expérimentations, il s'est avéré que la variabilité des niveaux sur le quai est trop importante pour permettre de faire des états de référence sur des périodes éloignées de la période de tests, des périodes successives avec et sans systèmes de dépollution sont en fait à privilégier avec des durées équivalentes répétées plusieurs fois.

Les **mesures doivent être représentatives de la gare**, par conséquent il est préconisé de réaliser un point de mesure en milieu de quai et idéalement d'installer 2 appareils de mesure, un sur chaque quai (dans le cas de 2 quais et de voies centrales ; à étudier spécifiquement dans le cas d'une autre configuration de gare), ceci afin de vérifier l'efficacité du système de dépollution sur l'ensemble du quai.

Les points de mesure doivent éviter la proximité avec des sorties ou des bouches d'aération et prendre en compte le(s) lieu(x) d'implantation du système de dépollution (des mesures en proximité immédiate de celui-ci sont à éviter).

VALIDATION DES DONNEES, INTERPRETATION DES RESULTATS ET RAPPORT

Les données de mesure doivent être validées avant d'être analysées.

Il a été préconisé que les traitements de données à réaliser par les opérateurs soient discutés en amont avec les experts d'Airparif pour les mesures dans l'air. Il en a été de même pour le contenu du rapport.

L'interprétation des données nécessite de connaître des informations pratiques précises sur la mise en œuvre du système de dépollution (date d'installation, période de fonctionnement, etc.), afin de pouvoir interpréter les résultats. Pour les mesures sur un quai, les éléments de fonctionnement de la gare (trafic des trains, fréquentation des voyageurs, ventilation, ...) sont également nécessaires.

¹ Référence du guide INERIS : DRC-19-152419-O4847A

POINTS DE VIGILANCE SUR LES INTERPRETATIONS DES MESURES DANS L'AIR

Le principal facteur d'influence des niveaux de particules sur les quais est le nombre de trains en circulation. Le type de matériel est également un facteur influençant les niveaux de polluants atmosphériques. La fréquentation des quais impacte aussi les niveaux de pollution relevés sur les quais. L'intensité de la ventilation, lorsqu'elle est mécanique est également un paramètre d'influence. L'évolution de ces paramètres sur les périodes de tests et leur comparaison aux situations prises en référence est donc à prendre en compte dans les interprétations.

Des stations de mesure permanentes dans certaines stations de métro ou gares de RER montrent de plus qu'il existe une variabilité saisonnière des niveaux, d'une ampleur variable suivant la configuration de la station (système de ventilation, profondeur, ...). Les résultats de l'expérimentation doivent être analysés en prenant en compte cette variabilité.

A noter que les expérimentations ne sont globalement déroulées entre 2019 et 2021, certaines étant encore en cours en 2022. Elles ont par conséquent été impactées, à degrés divers, par la pandémie de la Covid 19 : les confinements, couvre-feux et autres restrictions de déplacement ont eu un important impact sur le nombre de trains en circulation et la fréquentation des gares. Une impossibilité d'accès aux gares d'expérimentation pour certaines maintenances a également été signalée lors du premier confinement. Ce point de vigilance a été pris en compte dans les interprétations.

1.2.2. PROTOCOLE D'EVALUATION DES MESURES SUR BANC

La mesure de performance de captage et de freinage du système TAMIC® monté sur un frein à disque a été effectuée selon un protocole défini et exécuté par l'Ingénierie du Matériel SNCF (Centre d'Ingénierie du Matériel et Agence d'Essai Ferroviaire).

Le banc « Machine Frein #3 » de l'AEF était à cette date et encore aujourd'hui l'un des très rares bancs d'essais au monde permettant une analyse précise des émissions particulières de freinage en plus de la caractérisation des performances de freinage.

La mesure de la concentration en particules a été réalisée au moyen d'un impacteur basse pression à détection électrique (ELPI+ : Electrical Low Pressure Impactor) permettant d'effectuer des mesures de particules de 6 nanomètres à 10 micromètres.

Le protocole de freinage appliqué correspond au standard UIC utilisé pour la qualification des équipements de freinage, couvrant les différentes situations (du ralentissement au freinage d'urgence) et conditions environnementales (conditions sèches et conditions humides).

En l'absence de protocole normalisé pour la caractérisation des performances de captage, la mesure a été réalisée à partir d'une spécification d'essais issue de l'expertise de l'Ingénierie du Matériel de SNCF développée depuis plusieurs années sur la mesure des émissions de particules issues du freinage mécanique ferroviaire. Plusieurs types de parcours des Z2N sur la ligne C ont été reproduits au banc d'essai : des parcours complets avec identification des zones en tunnel et parcours simplifiés répétés pour assurer la répétabilité des mesures.



Figure 1: Banc d'essais de freinage avec dispositif de mesure des particules émises – SNCF AEF (Vitry sur Seine).

1.2.3. AVIS D'AIRLAB SUR LES CONCLUSIONS

Les données de mesure ont été interprétées par les opérateurs RATP ou SNCF.

Dans le cadre d'AIRLAB, Airparif s'est assurée de la validité des conclusions portées par les opérateurs pour trois expérimentations avec des mesures de l'impact sur l'air de la gare, compte-tenu des incertitudes des mesures et de la variabilité des niveaux sur les quais hors expérimentation. Les rapports réalisés par SNCF Gares & Connexions et la RATP ont été expertisés par Airparif pour le compte d'AIRLAB (liste disponible à l'annexe 2). L'avis donné par AIRLAB sur les évaluations dans ce présent rapport est le résultat de cette expertise.

Les experts de la SNCF ont fait de même pour expertiser les travaux et les conclusions des deux autres expérimentations.

2. RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS

Ce paragraphe présente, pour chaque expérimentation, les détails de l'expérimentation réalisée, les résultats et conclusions apportés par l'opérateur, les points forts et de vigilance identifiés par AIRLAB ainsi que son avis sur la qualité de l'évaluation de l'impact de l'expérimentation.

2.1 EXPERIMENTATION AIR LIQUIDE / SNCF GARES & CONNEXIONS (technologie ionisation positive)

2.1.1 DISPOSITIF D'EPURATION TESTE

Le système mis en place est une Précipitation Electrostatique Positive (ESP+). L'air est aspiré sous l'effet d'un ventilateur. Cet air entre dans un compartiment où se trouvent deux plaques parallèles : une cathode et une anode. Une haute différence de tension entre l'anode et la cathode produit un champ électrostatique qui va charger l'air en ions positifs. Ces ions vont entourer les particules, qui vont être attirées vers les plaques collectrices non chargées et d'y agréger. L'air est ensuite rejeté en gare (voir Figure 2).

Les modules de dépollution ont été installés de mai à septembre 2019 (expérimentation du 23/05/2019 au 09/09/2019). Au total, 6 prototypes différents ont été installés et testés sur le quai. Les prototypes se distinguaient par des systèmes de récupération des poussières différents : par aspirateur, par bac à eau, par vibrations et par eau pulvérisée. De plus d'autres critères ont été suivis (efficacité propre, consommation électrique, facilité d'installation et d'opération, robustesse, prix, relation fournisseur et provenance géographique) et analysés pour le choix final. La capacité cumulée d'épuration des 6 modules de dépollution est de 52 000 m³/h.

Les 6 modules de traitement de l'air ont été installés sur le quai (cf. Figure 4).

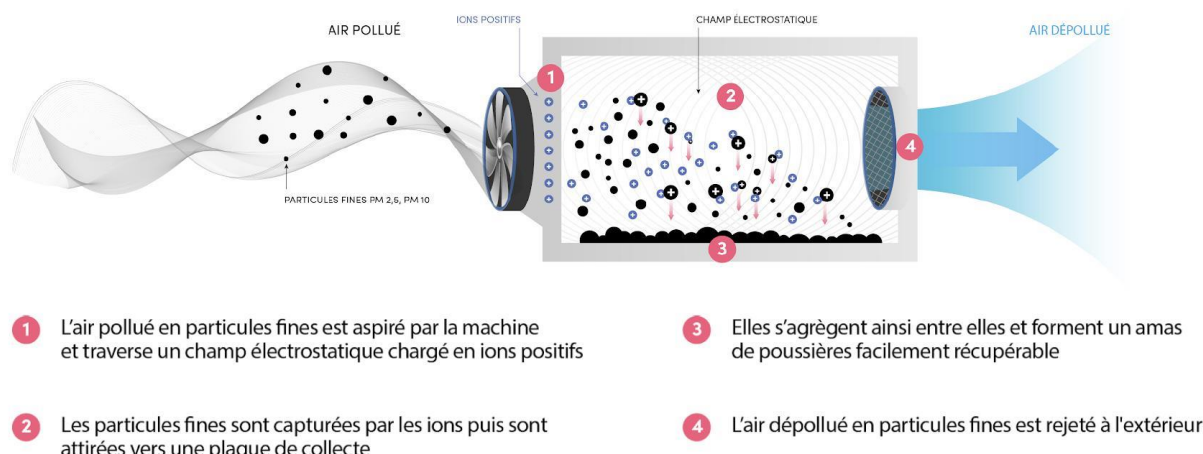


Figure 2- Schéma de principe de fonctionnement du système de dépollution ESP+, développé par AIR LIQUIDE.

L'expérimentation AIR LIQUIDE a été réalisée dans les enceintes de SNCF Gares & Connexions, à la gare Avenue Foch sur le RER C. Cette gare a été choisie pour ses concentrations en particules parmi les plus élevées des enceintes ferroviaires souterraines de la SNCF et parce qu'elle dispose d'une surveillance de la qualité de l'air en continu par analyseurs automatiques, mais également car le quai central est large et la fréquentation faible, d'où des facilités pour mettre en place les expérimentations.

La ligne RER C est équipée de rames circulant sur roues en fer. La station Avenue Foch est souterraine, elle est située au niveau -1 et présente un quai central. Des tunnels sont présents de chaque côté de la gare. L'accès aux quais se fait par les deux extrémités de la gare. La ventilation est naturelle.



Figure 3– Systèmes de dépollution installés en gare d'Avenue Foch, RER et exemples de différents systèmes de récupération de particules mis en œuvre par AIR LIQUIDE.

2.1.2. DISPOSITIF D'ÉVALUATION MIS EN PLACE PAR SNCF GARES & CONNEXIONS

La gare retenue dispose d'une surveillance en continu des concentrations de particules PM_{10} et $PM_{2.5}$ depuis avril 2018 à l'aide de TEOM située au centre du quai central. Cette surveillance continue a été utilisée dans le cadre de l'expérimentation.

Les systèmes de dépollution ont été installés autour de la baie de mesure.

En complément de la surveillance permanente, des mesures de comptage de particules de diamètres compris entre 0.18 et 18 μm ont également été réalisées à l'aide d'un FIDAS. Cet appareil permet des mesures de particules par comptage de particules par tranche granulométrique (64). Trois FIDAS ont suivi pendant toute la durée de l'expérimentation le nombre de particules en 3 points du quai : au milieu du quai en même emplacement que les mesures en continu, et aux 2 extrémités du quai. Les mesures ont été réalisées du 22/05/2019 au 24/09/2019. La période du 22/05/2019 au 27/05/2019 et celle du 09/09/2019 au 24/09/2019 correspond à la période sans épurateur en fonctionnement. Les analyses ont porté sur les particules de taille inférieure à 9 μm , car les particules de plus grosse taille sont négligeables en nombre (cf. annexe 3).

En complément, des mesures plus légères de comptage, par GRIMM, ont été mises en place en plusieurs points de la gare : au milieu du quai en même emplacement que les autres mesures (en continu et par FIDAS), les autres étant répartis sur toute la longueur du quai. Le GRIMM permet un comptage des particules entre 0.265 et 34 μm , par classe granulométrique (31 classes). Seules les mesures de deux GRIMM ont pu être exploitées : sur la période du 22/05 au 16/09 (pour l'un des GRIMM) et au 24/09/2019 (second GRIMM). La période du 22 au 27/05/19 et celle du 09 au 16 ou 24/09/2019 correspond à la période sans épurateur en fonctionnement.

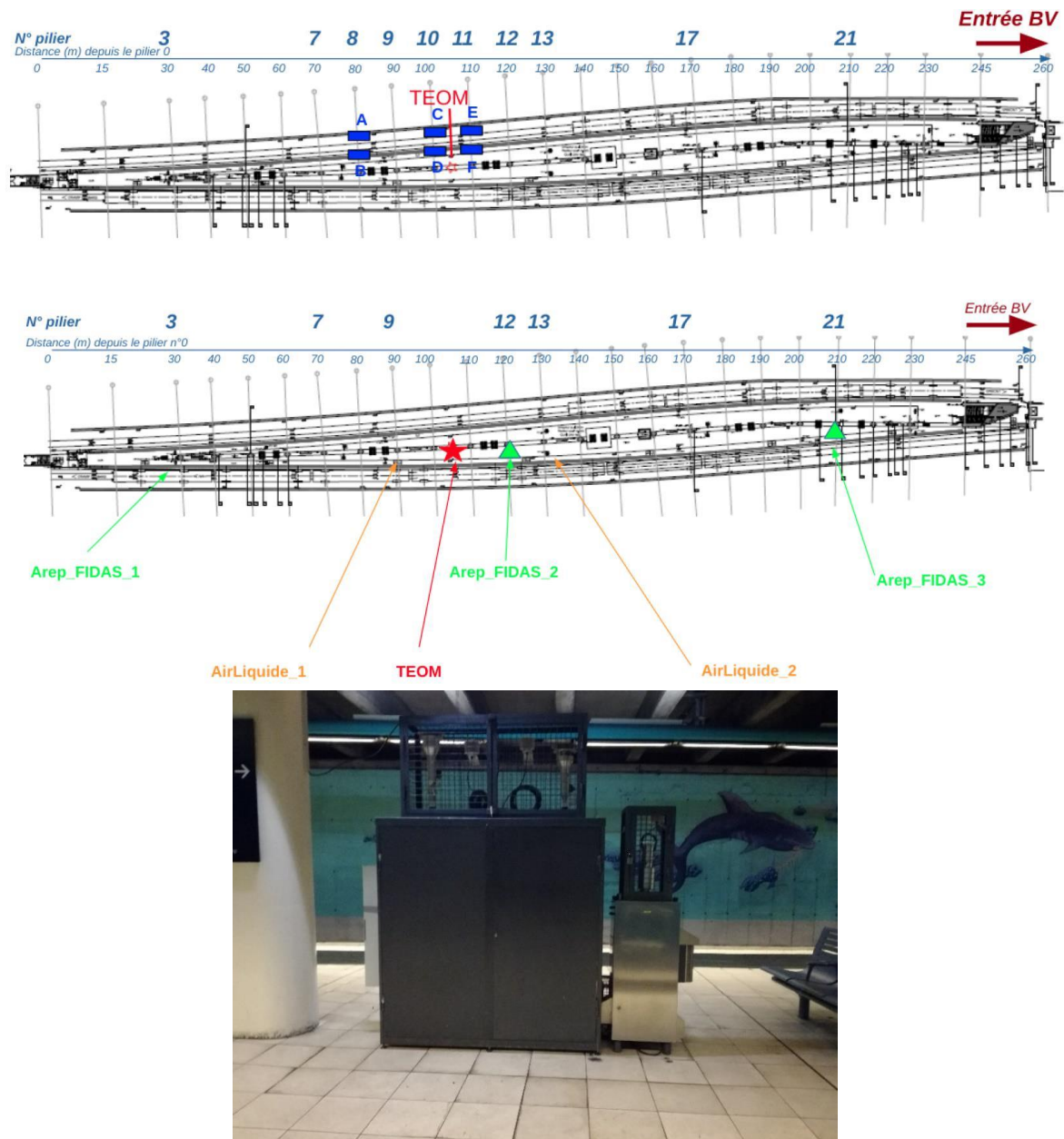


Figure 4 – Localisation des systèmes de dépollution et des mesures de la qualité de l'air mis en place dans le cadre de l'expérience AIR LIQUIDE à la gare Transilien Avenue Foch RER C, photo de la station de mesure.

L'estimation de la réduction de particules dans l'air de la gare a été réalisée à partir de la comparaison des niveaux de pollution en gare mesurés avec le TEOM à des périodes avec et sans modules de dépollution en fonctionnement (période variable selon les modules). La concentration en gare sans système de dépollution en fonctionnement retenue a été la moyenne des concentrations relevées par le TEOM de mai à septembre 2018 pour avoir des conditions de fonctionnement (nombre de trains en circulation) et météorologiques les plus proches possibles de la période avec modules de dépollution en fonctionnement (27/05/2019 – 09/09/2019 pour les relevés TEOM).

L'exploitation des autres mesures (par GRIMM ou de comptage par FIDAS) a été réalisée sur des périodes différentes, car le début des mesures n'a été effectif qu'en 2019. La période sans système en fonctionnement retenue est du 22/05/2019 au 27/05/2019 et du 09/09/2019 au 16/09/2019 ou 24/09/2019. La période avec système de dépollution en fonctionnement est la même que pour les autres appareils (du 27/05/2019 au 09/09/2019).

2.1.3. RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES PAR AIR LIQUIDE / SNCF GARES & CONNEXIONS

SNCF Gares & Connexions évoque un **bilan prometteur de la technologie mise en œuvre**, avec une performance de la précipitation électrostatique par ionisation positive tant au niveau fonctionnel qu'au niveau de la capture des particules.

Les principales conclusions de l'expérimentation présentées par SNCF Gares & Connexions et AIR LIQUIDE et sont les suivantes :

- L'efficacité des modules a pu être établie sous la forme d'un adjectif (bon, moyen ou non satisfaisant). Ainsi 3 systèmes ont obtenu un **qualificatif de « non satisfaisant »** concernant le piégeage et la récupération des particules. Il s'agit des purificateurs avec récupération des particules sur plaques collectrices, nettoyées ensuite à l'eau. Un système a obtenu le **qualificatif de « moyen »** pour des raisons de sécurité (un dispositif avec aspiration des particules récupérées sur les plaques collectrices). Enfin deux systèmes ont obtenu le **qualificatif de « bon »** en termes de collecte de particules : un système qui aspire les particules récupérées sur les plaques collectrices, l'autre qui utilise les vibrations des cassettes des filtres électrostatiques pour faire tomber les particules récoltées avant de les aspirer.
- Un calcul de l'efficacité apparente des 3 systèmes de la catégorie « bon » et « moyen » a été effectué à partir de la masse de particules récupérées par les épurateurs, ainsi que l'efficacité théorique des épurateurs, du volume d'air traité et de la concentration théorique de particules en gare. L'efficacité apparente a ainsi été estimée à 15% pour 3 systèmes de dépollution.
- L'évolution des concentrations en particules, avec et sans épurateur, montre une forte variabilité temporelle des mesures, aussi les résultats sont présentés de façon macroscopique.
- **L'efficacité a également été estimée à partir des mesures en continu** : réduction des particules PM₁₀ et des PM_{2.5} est mise en avant, respectivement de l'ordre de 15% et 30%. Cette estimation est obtenue en comparant les résultats de mesures de l'année précédente (mai à septembre 2018, sans épurateur) avec les résultats de mesures relevées lors de l'expérimentation.
- Concernant le nombre de particules, les mesures par FIDAS et par GRIMM montrent une réduction du nombre de particules plus importante durant les jours ouvrés que durant les samedis/dimanches. Aussi le système de dépollution semble plus efficace lorsqu'il y a plus de particules dans l'air.

SNCF Gares & Connexions et AIR LIQUIDE mettent également en évidence une difficulté à interpréter les résultats de mesure, car de nombreux facteurs d'influence ont été identifiés (nombre de trains, type de matériel roulant, fréquentation de la gare, concentrations de l'air extérieur, ...). Une meilleure maîtrise de tous ces paramètres d'influence permettrait une meilleure appréciation de la qualité de l'air dans une gare et aussi permettrait de quantifier l'effet des épurateurs sur l'évolution des teneurs en particules en gare. Un intérêt de réaliser des mesures en entrée et sortie des épurateurs est souligné, pour mesurer une efficacité réelle de capture des particules et ainsi affiner les résultats.

En conclusion, les mesures montrent une efficacité intéressante, notamment sur les particules PM_{2.5} (efficacité plus importante que sur les PM₁₀). L'expérimentation a permis de valider la pertinence de la technologie d'ionisation positive en milieu ferroviaire souterrain, avec la capacité à capter et retirer des particules dans l'air.

L'évaluation de la facilité d'installation et de maintenance des systèmes a également été réalisée, comme un suivi du niveau sonore. Cela fournit des informations précieuses pour un éventuel pilote d'une utilisation opérationnelle.

2.1.4. AVIS D'AIRLAB RELATIF A LA QUALITE DE L'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION AIR LIQUIDE / SNCF GARES & CONNEXIONS

L'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air de l'expérimentation a été menée avec un dispositif de mesure de la qualité de l'air conforme aux préconisations du protocole de surveillance. Des mesures variées ont été réalisées dans la gare pendant toute la durée de l'expérimentation avec un analyseur de référence pour mesurer les concentrations en masse de PM₁₀ et PM_{2.5}, des mesures du nombre de particules à 3 emplacements de la gare par FIDAS et des mesures indicatives de nombre de particules avec des GRIMM à différents emplacements sur le quai. Une inter-comparaison des appareils de mesures GRIMM a bien été réalisée, avant le début des mesures.

L'analyse des résultats est très poussée, avec des échanges réguliers avec les experts d'Airparif lors de la phase d'exploitation des données, ce qui a permis de bien comprendre les choix et éventuelles hypothèses retenues. Elle a été formalisée dans un rapport très complet. Les facteurs d'influence (température, pression, humidité, travaux de nuit, nombre de trains, etc.) impactant les concentrations en gare ont été pris en compte pour déterminer un niveau de pollution de la gare « sans système de dépollution en fonctionnement », sur la base des mesures de la qualité de l'air en continu disponibles sur le quai concerné.

Aussi, l'estimation de l'efficacité des systèmes de dépollution mis en place peut être évaluée, même si les incertitudes restent importantes, certaines variabilités des niveaux sans système de dépollution restant encore inexpliquées.

AIRLAB partage les conclusions d'AIR LIQUIDE et SNCF Gares & Connexions.

AIRLAB valide la conclusion de l'expérimentation sur le caractère prometteur de la solution et confirme que les concentrations en particules mesurées sur les quais montrent une baisse lorsque les modules de dépollution à ionisation positive mis en œuvre par Air Liquide sont en fonctionnement, avec une efficacité plus grande sur les PM_{2.5} que sur les PM₁₀.

AIRLAB souligne la qualité des travaux d'interprétation menés. Une expérimentation plus longue permettrait de conforter ces premiers résultats.

De nouvelles évaluations seront également nécessaires si les dispositifs évoluent pour être adaptés à une utilisation opérationnelle (respect de niveaux de bruit et diminution de l'encombrement, ...).

2.2 EXPERIMENTATION SUEZ / RATP (Technologie ionisation positive)

2.2.1 DISPOSITIF D'EPURATION TESTE

Le système mis en place est une filtration électrostatique par ionisation positive (cf. Figure 5). Des électrodes soumises à une forte tension génèrent une ionisation de l'air, qui libère alors des ions positifs. Ces derniers chargent aussitôt les particules métalliques de l'air de la station aspirées par le système. Les particules sont alors attirées par une plaque collectrice et capturées sous forme d'agrégats grossiers, ce qui élimine le risque de réentraînement en sortie de purificateur. Chaque module a une capacité théorique de traitement de l'air d'environ 7 500 m³/h, soit un total de 15 000 m³/h pour l'ensemble de l'expérimentation.

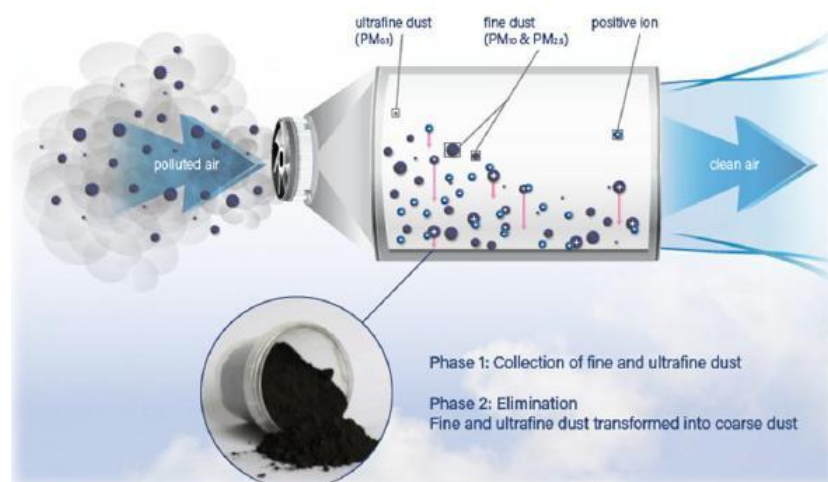


Figure 5– Schéma de principe de fonctionnement du système de dépollution IP' AIR, développé par SUEZ.

L'expérimentation SUEZ a été réalisée dans les enceintes de la RATP, à la station Alexandre Dumas (ligne 2 du métro).

La ligne 2 est équipée de rames circulant sur roues en fer. La station A. Dumas est souterraine, elle est située au niveau -1 et présente une voie centrale. Des tunnels sont présentés de part et d'autre de la station de métro. L'accès aux quais se fait par une des extrémités de la gare, la même pour chaque quai (extrémité en direction de Porte Dauphine). La ventilation se situe dans le tunnel inter-gare.

Deux modules de traitement de l'air ont été installés sur un quai (en milieu de quai direction Nation).

2.2.2. DISPOSITIF D'EVALUATION MIS EN ŒUVRE PAR SUEZ / RATP

Une surveillance en continu des particules PM₁₀ et PM_{2.5} a été mise en place du 28/05/2019 au 31/12/2020. Les mesures ont été réalisées avant, pendant et après la mise en service des modules de dépollution. Des TEOM (type 1400) ont été utilisés. La station de mesure est placée entre les deux baies de dépollution (cf. Figure 6).

Des mesures des particules de diamètres compris entre 0.18 et 18 µm ont également été réalisées par Airparif à l'aide d'un FIDAS. Cet appareil permet des mesures de particules par comptage de particules par tranche granulométrique. Deux périodes de mesures ont été réalisées : une première

campagne, du 28/05/19 au 16/06/2019, sans module de dépollution. Une seconde campagne a été mise en place du 14/11 au 04/12/2019, les systèmes de pollution ayant été en fonctionnement (cf. annexe 3).

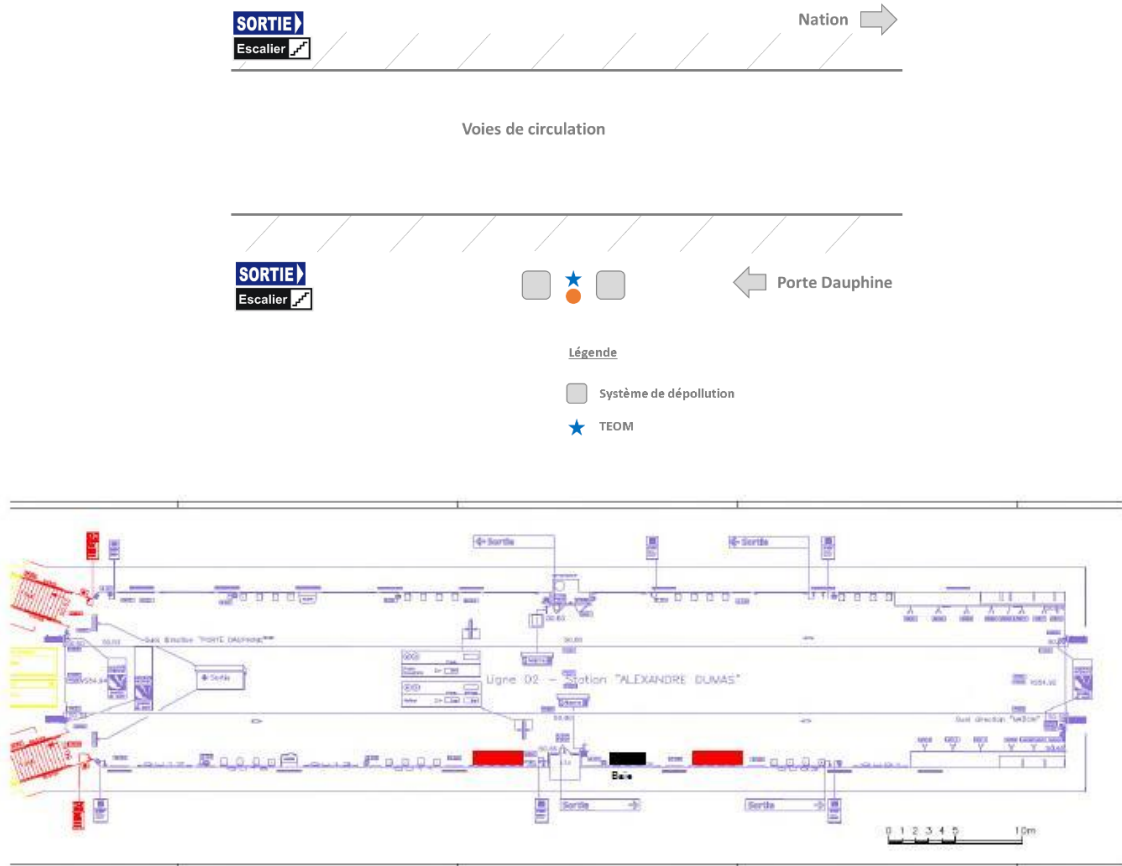


Figure 6 – Localisation des systèmes de dépollution et de la station de mesure mis en place dans le cadre de l'expérimentation SUEZ à la station de métro RATP Alexandre DUMAS, ligné 2.

L'estimation de la réduction de particules dans l'air de la station a été estimée à deux reprises, une en 2019 et l'autre en 2020, à partir de la comparaison des niveaux de pollution en gare mesurés avec le TEOM à des périodes avec et sans modules de dépollution en fonctionnement. Une première estimation a consisté à comparer les niveaux en particules PM_{10} et $PM_{2.5}$ sans module de dépollution (28/05/2019 - 19/06/2019) avec une période avec module en fonctionnement (01/09/2019 - 04/12/2019). La même comparaison a été réalisée en 2020 (avec les modules en fonctionnement du 2 au 22/11/2020 et avec les modules éteints du 30/11 au 20/12/2020). Pour les mesures avec le FIDAS (première période de l'expérimentation), les résultats des campagnes avec et sans dispositif de dépollution ont été comparés.

Un comptage du nombre de particules (taille entre 265 nm et 34 μm) en amont et aval d'un module de dépollution, a de plus été en œuvre par ENS/SUEZ et la RATP pendant une journée (16/07/2020) (cf. Figure 7).



Figure 7 – Système mis en place le 16/06/2020 pour réaliser des mesures en amont/aval d'un module de dépollution par ENS, dans le cadre de l'expérimentation SUEZ à la station de métro RATP Alexandre DUMAS, ligné 2.

Enfin, des mesures complémentaires indicatives en particules PM_{10} ont été réalisées par photomètres mobiles (Dust-Track DRX) en de nombreux points de la station (mesures à 1.5 m du sol) par ENS/SUEZ. L'objectif était de compléter les mesures de qualité de l'air réalisées en un seul point (station de mesure), dans l'objectif de réaliser une cartographie des concentrations sur le quai. Les mesures ont été moyennées sur 5 minutes. Trois campagnes de mesure ont été réalisées : le lundi 25/11/2019 (entre 14h et 16h30, 58 mesures avec 5 appareils), le mercredi 27/11/2019 (entre 8h et 10h, 22 mesures avec 2 appareils) et jeudi 28/11/2019 (entre 8h et 10h30, 36 mesures avec 3 appareils).

2.2.3. RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES PAR SUEZ / RATP

La RATP évoque un **bilan prometteur de la technologie** mise en œuvre pendant l'expérimentation. Les principales conclusions présentées par RATP et SUEZ sont les suivantes :

- La réduction des concentrations de PM_{10} et de $PM_{2.5}$ en masse avec les modules de dépollution en fonctionnement est évaluée à 30% pour les PM_{10} et 24% pour les $PM_{2.5}$.
- La période expérimentation longue (> 18 mois) a permis de mettre en évidence une **performance du système de dépollution similaire en début et fin d'expérimentation**.
- Sur le nombre de particules, différents résultats ont été observés :
 - o les mesures par FIDAS ne permettent pas de conclure sur l'efficacité des systèmes de dépollution avec les données recueillies, les périodes avec et sans dispositif de dépollution ayant été très espacées, la variabilité saisonnière a pu jouer un rôle important sur le nombre et la taille des particules sur les quais.
 - o les mesures en entrée/sortie du module de dépollution mises en œuvre sur une journée ont permis d'estimer que le système était opérationnel pour les PM_{10} , $PM_{2.5}$ et PM_1 : **les modules éliminent bien les particules**. Une réduction du nombre de particules entre 265 nm et 34 μm a été estimée (comprise entre 9 et 50 % selon les différents intervalles de taille entre 265 nm et 34 μm en proximité immédiate de module).
- L'efficacité des modules à l'échelle de la station estimée via des mesures indicatives par Dust-Track, en comparant les concentrations en un point du quai avec des mesures en simultané en entrée du module de dépollution. **Une compilation de toutes les mesures a permis d'établir un gradient de concentrations en PM_{10} et que le rayon d'action de dépollution était de 10 m autour des modules de dépollution. L'efficacité dans ce rayon varie de 40 % à 14 % pour les PM_{10} .**

La RATP précise que des améliorations devront être faites sur l'encombrement, le débit de traitement, le niveau acoustique des modules et enfin les opérations de maintenance, pour que cette solution puisse être installée en opérationnel.

2.2.4. AVIS D'AIRLAB RELATIF A LA QUALITE DE L'EVALUATION SUR L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION DE SUEZ/RATP

L'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air de l'expérimentation a été menée avec un dispositif de mesure conforme aux préconisations fournies dans le protocole d'évaluation avec des mesures de concentrations de particules en masse avec un analyseur de référence et des mesures de nombre de particules par comptages pour évaluer l'impact sur les plus fines d'entre-elles.

Les premiers essais ont été réalisés avec une période de mesure avant la mise en service des modules de dépollution pour une comparaison avec les mesures avec le système de dépollution en fonctionnement. Compte-tenu des variabilités saisonnières et de la durée des expérimentations, il a été conclu en cours d'expérimentation par les experts d'Airparif que ce point du protocole pouvait être amélioré avec des tests avec des périodes régulières de tests marche / arrêt des modules de dépollution pour estimer leur efficacité, ce qui a été mis en œuvre en fin d'expérimentation.

L'expérimentation a été menée sur une longue période au total (> 18 mois) avec des mesures en continu de concentration en masse. Les modifications en termes de circulation de trains et de fréquentation (voyageurs) dues à la situation sanitaire (confinements, couvre-feux, baisse de fréquentation), non prévisibles, ont malheureusement réduit la période de données représentatives (qui reste toutefois importante) et augmenté les paramètres d'influence.

AIRLAB souligne l'effort réalisé par la réalisation d'une campagne poussée d'estimation de l'efficacité en entrée / sortie du système de dépollution en conditions réelles. Cet exercice apporte des informations complémentaires à des essais de la technologie en laboratoire et illustre la capacité du système à piéger des particules.

L'exploitation des résultats des mesures en continu a permis d'estimer à deux reprises la baisse des concentrations en masse et en comptage, à des périodes représentatives en termes de nombre de trains en circulation et de fréquentation. **La performance du système de dépollution est similaire en début et fin d'expérimentation.**

Enfin, concernant les mesures indicatives avec des appareils portatifs (Dust-track) menées, une vérification de la comparabilité des résultats des appareils de mesures Dust-Track a bien été réalisée avant, pendant et à la fin de chaque campagne de mesure en les mettant en un même endroit. Cependant, les mesures ont été réalisées sur des durées très limitées et pas en simultané, sans précision sur leur représentativité notamment au regard des passages de trains. Aucune mesure sans dispositif de dépollution pour évaluer la variabilité des niveaux sur les quais n'a été mise à disposition d'Airparif. **Ainsi les éléments à disposition ne permettent pas à Airparif de partager la conclusion sur la distance d'impact des systèmes de dépollution**, les résultats étant très variables d'une période de mesure à l'autre.

Des mesures pour évaluer les distances d'impacts des systèmes de dépollution plus approfondies pourraient compléter les enseignements lors de prochaines évaluations.

AIRLAB valide la conclusion sur le caractère prometteur de la solution et confirme que les concentrations en particules mesurées sur les quais avec et sans modules de dépollution montrent une baisse lorsque les modules de dépollution à ionisation positive mis en œuvre par Suez sont en fonctionnement.

AIRLAB souligne la mise en œuvre de différents types de mesures en complément du protocole proposé.

De nouvelles évaluations seront nécessaires si les dispositifs évoluent pour être adaptés à une utilisation opérationnelle (respect de niveaux de bruit et diminution de l'encombrement, amélioration du dispositif de maintenance, ...).

2.3 EXPERIMENTATION STARKLAB / SNCF GARES & CONNEXIONS (technologie filtration à eau)

2.3.1 DISPOSITIF D'EPURATION TESTE

Le système mis en place est une filtration de l'air par voie humide (technologie TERRAO de STARKLAB). L'air pollué de la gare est capté par dépression. Le passage de l'air dans l'eau crée un bouillonnement, induisant un transfert de la pollution (molécules et gaz) vers l'eau. Du chlorure de calcium est ajouté à l'eau, favorisant la captation des molécules organiques et supprimant le risque de développement de bactéries et de virus (cf. Figure 8).



Figure 8– Schéma de principe de fonctionnement du système de dépollution TERRAO+, développé par STARKLAB.

L'expérimentation STARKLAB a été réalisée dans les enceintes de la SNCF Gares & Connexions, à la gare Avenue Foch sur le RER C. Cette gare a été choisie pour ses concentrations en particules parmi les plus élevées des enceintes ferroviaires souterraines de la SNCF et parce qu'elle dispose d'une surveillance de la qualité de l'air en continu par analyseurs automatiques, mais également car le quai central est large et la fréquentation faible, d'où des facilités pour mettre en place les expérimentations.

La ligne RER C est équipée de rames circulant sur roues en fer. La station Avenue Foch est souterraine, elle est située au niveau -1 et présente un quai central. Elle est encadrée par des tunnels. L'accès aux quais se fait par les deux extrémités de la gare. La ventilation est naturelle.

Les 6 modules de filtration de l'air par voie humide ont été installés sur le quai (cf. Figure 4), du 20/01/2020 au 05/08/2020. L'expérimentation a été perturbée par la crise sanitaire de mars à mai 2020 (notamment le premier confinement de mars 2020), puis les travaux CASTOR (juillet / août 2020) (cf. Figure 9).

La capacité cumulée d'épuration des 6 modules de dépollution est de 15 000 m³/h.

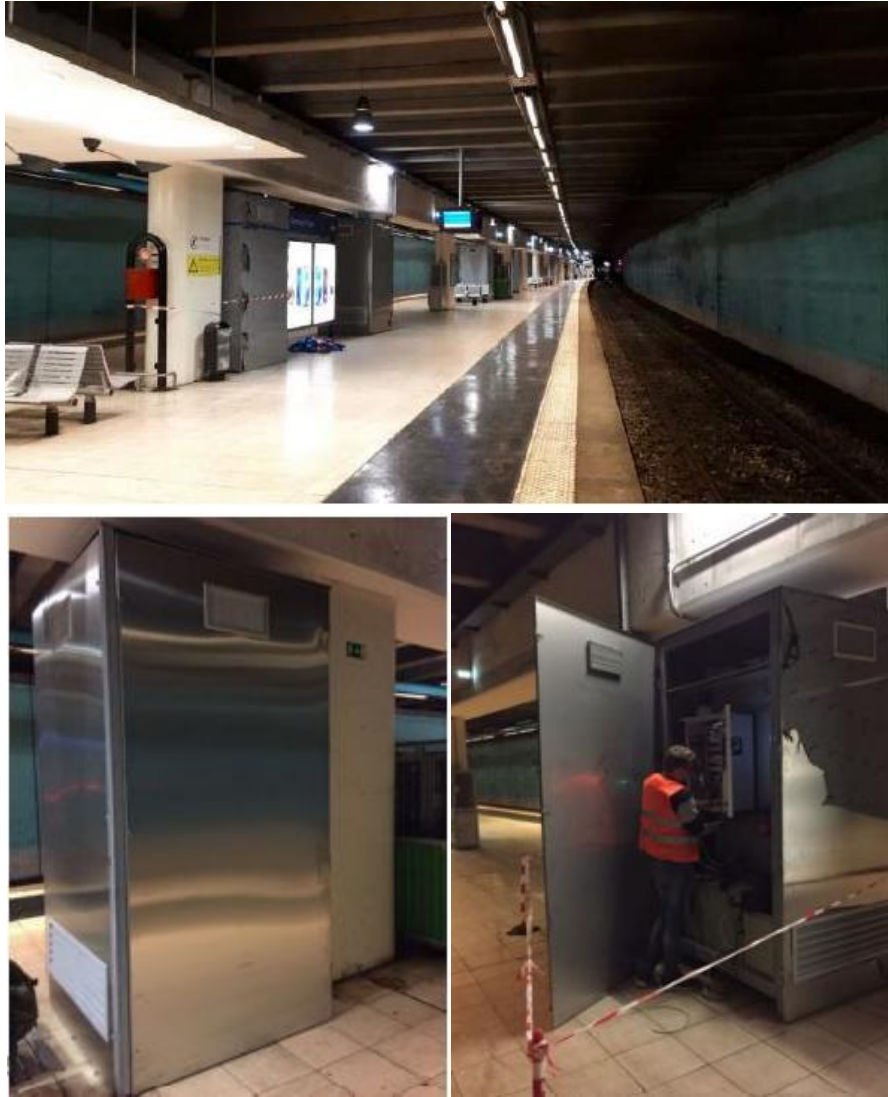


Figure 9– Systèmes de dépollution installés en gare d'Avenue Foch, RER et exemples de différents systèmes de récupération de particules mis en œuvre par STARKLAB.

2.3.2. DISPOSITIF D'ÉVALUATION

La gare retenue dispose d'une surveillance en continu des concentrations de particules PM_{10} et $PM_{2.5}$ depuis avril 2018 à l'aide de TEOM située au centre du quai central. Cette surveillance continue a été utilisée dans le cadre de l'expérimentation. La même gare que pour l'expérimentation de la technologie à ionisation positive a été retenue pour ne pas refaire l'instrumentation.

Les baies de dépollution ont été installées autour de la baie de mesure (cf. Figure 10).

En complément de la surveillance permanente, des mesures de comptage de particules de diamètres compris entre 0.18 et $18 \mu m$ ont également été réalisées à l'aide d'un FIDAS. Cet appareil permet des mesures de particules par comptage de particules par tranche granulométrique (64). Trois FIDAS ont suivi pendant toute la durée de l'expérimentation le nombre de particules en 3 points du quai : au milieu du quai en même emplacement que les mesures en continu, et aux 2 extrémités du quai. Les mesures ont été réalisées en continu pendant l'expérimentation (cf. annexe 3).

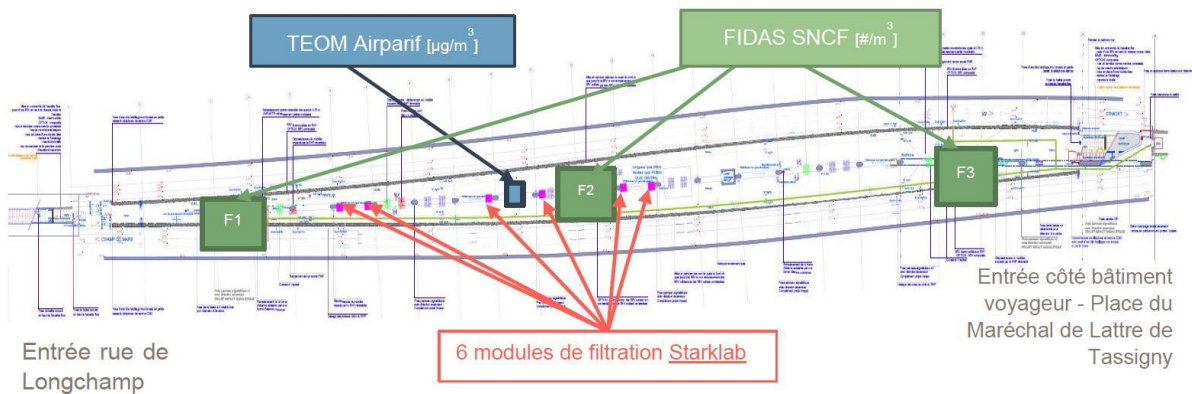


Figure 10 – Localisation des systèmes de dépollution et des mesures de la qualité de l'air mis en place dans le cadre de l'expérimentation STARKLAB à la gare Transilien Avenue Foch RER C.

L'estimation de la réduction de particules dans l'air de la gare a été calculée à partir de la comparaison des niveaux de pollution en gare mesurés avec le TEOM à des périodes avec et sans modules de dépollution en fonctionnement. Les concentrations en gare sans système de dépollution en fonctionnement retenues sont celles de janvier à mars 2019 pour avoir des conditions de fonctionnement (nombre de trains en circulation) et météorologiques les plus proches possibles de la période avec modules de dépollution en fonctionnement (janvier à mars 2020, puis juin 2020). La période de septembre à novembre 2019 a également été retenue comme référence, car il s'agit de la dernière période de fonctionnement classique du RER C, avant les grèves des mois de décembre 2019 et janvier 2020.

2.3.3. RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES

Les principales conclusions de l'expérimentation présentées par SNCF Gares & Connexions et Starklab sont les suivantes :

- L'analyse des concentrations en particules mesurées en continu, avec et sans système de dépollution montre une **efficacité pérenne du système**, ceci quelle que soit la période de référence choisie. L'efficacité estimée est de l'ordre de 25%, aussi bien pour les particules PM₁₀ que les PM_{2.5}. Un **plateau en termes de concentrations** est atteint au cours de l'expérimentation.
- Une analyse temporelle des données au cours de l'expérimentation (variation des relevés horaires par semaine d'expérimentation, du 20/01/2020 au 15/03/2020) montre une variabilité des relevés horaires qui diminue de semaine en semaine, avec des moyennes hebdomadaires qui diminuent également. Les profils journaliers, établis par semaine, montrent également une diminution continue, aussi bien pour les particules PM₁₀ que les PM_{2.5}. **L'efficacité apparente est ainsi qualifiée de constante** pour les particules au cours de l'expérimentation.
- Concernant le nombre de particules mesurées par FIDAS plusieurs résultats sont présentés :
 - o Une analyse temporelle du nombre hebdomadaire de particules au cours de l'expérimentation (variation du nombre de particules par semaine d'expérimentation, du 20/01/2020 au 15/03/2020) montre une diminution continue du nombre total de particules pendant 6 semaines, avant d'atteindre un plateau. Le nombre total de particules, estimé à 600 particules/cm³ en début d'expérimentation, s'établit à 200 particules/cm³ au bout de 6 semaines d'expérimentation, soit une baisse estimée à 60%.
 - o Les profils journaliers du nombre total de particules, établis par semaine pour l'ensemble de l'expérimentation, montrent également une diminution continue au cours de l'expérimentation.
 - o Une présentation de la granulométrie des particules met en avant 3 classes de tailles de particules : une 1^{ère} classe de particules de diamètre compris entre 0.2 et 0.3 µm, une 2^{ème} classe autour de particules de diamètre 0.5 µm, et enfin une 3^{ème} classe de

particules de diamètre 1 à 10 µm. La 1^{ère} classe correspondrait plus aux particules présentes dans l'air extérieur. Les 2^{ème} et 3^{èmes} classes semblent être des particules ferroviaires.

- Comme pour les relevés en particules issus des TEOM, l'évolution hebdomadaire du nombre de particules selon les 3 classes établies montre une variabilité qui diminue au cours des 8 semaines de l'expérimentation.
- Une efficacité par classe de tailles de particule est estimée, comme pour les relevés des TEOM, par différence entre la période de référence (septembre à décembre 2019) et celle de l'expérimentation (janvier à mars 2020). **L'efficacité maximale est observée pour les plus grosses particules (diamètre > 2µm).**

En conclusion, les mesures montrent une efficacité du système de dépollution par voie humide, avec une baisse observée des concentrations en particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), ainsi qu'une diminution du nombre de particules dans l'air (baisse estimée de 60% du nombre de particules).

L'expérimentation a permis de valider la pertinence de la technologie de dépollution par voie humide en milieu ferroviaire souterrain, avec la capacité à capter et éliminer des particules dans l'air. L'expérimentation a également permis d'évaluer la facilité d'installation et de maintenance des équipements.

2.3.4. AVIS D'AIRLAB SUR LA QUALITE DE L'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION STARKLAB / SNCF GARES & CONNEXIONS

L'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air de l'expérimentation STARKLAB a été menée avec un dispositif de mesure de la qualité de l'air conforme aux préconisations du protocole de surveillance. Des mesures par analyseurs de référence ont été réalisées dans la gare pendant toute la durée de l'expérimentation afin de suivre les concentrations en masse de PM₁₀ et PM_{2.5}. Des mesures du nombre de particules à 3 emplacements de la gare par FIDAS ont également été réalisées pendant toute l'expérimentation. Les valeurs de référence (en masse et en nombre) en dehors de la période de l'expérimentation ont également été utilisées pour l'estimer l'efficacité du système. Des échanges réguliers entre la SNCF et les experts d'Airparif, lors de la phase d'expérimentation et d'exploitation des données, a permis de bien comprendre les choix et éventuelles hypothèses retenues.

Cette expérimentation a dû s'adapter à l'actualité, notamment en décalant le début des essais (grève perturbant la circulation des trains en décembre 2019) et une suspension des essais à cause du confinement de mars 2020. Ainsi la durée d'expérimentation a été réduite.

L'estimation quantifiée de l'efficacité des systèmes de dépollution mis en place ne peut être garantie, compte-tenu des incertitudes importantes liées à l'impact des facteurs d'influence sur les niveaux mesurés.

Les résultats de comptage ne permettent pas d'évaluer précisément ce qui vient de l'air extérieur et ce qui provient des activités ferroviaires souterraines. Aussi les experts d'Airparif considèrent que cette partie des conclusions sur l'origine des particules par taille ne peut être validée et nécessite d'autres investigations. **Cela n'a pas de conséquence directe sur l'évaluation de l'efficacité du dispositif de traitement.**

AIRLAB valide la conclusion sur le caractère prometteur de la solution et confirme la capacité du dispositif de traitement TERRAO à limiter les concentrations en particules mesurées sur les quais avec les modules de dépollution en fonctionnement.

Si le dispositif testé évolue notablement dans ses caractéristiques techniques pour répondre à des exigences d'intégrations opérationnelles dans les enceintes ferroviaires souterraines, de nouvelles évaluations de l'efficacité de dépollution seront nécessaires.

2.4 EXPERIMENTATION TRAPAPART / SNCF RESEAU

La solution mise en place par SICAT / TRAPAPART est un dispositif de piégeage passif des particules. Les turbulences d'air présentes en milieu souterrain sont le « moteur » du dispositif. Les particules, alors en mouvement, s'accumulent progressivement dans le média filtrant.

Les prototypes se présentent sous la forme de paniers plats amovibles contenant le média filtrant. Le design des prototypes entre les différentes phases d'expérimentation a pu être optimisé de même que les médias filtrants. Les dispositifs sont fixés au niveau des parois des murs de la station et l'air peut entrer et sortir du filtre via des ouvertures latérales de part et d'autre de ce dernier permettant ainsi à l'air chargé en particules de pénétrer dans le dispositif quel que soit le sens du flux (cf. Figure 11).

En fin d'exposition, le média encrassé est prélevé et régénéré par un lavage à l'eau pour décrocher les particules et recycler le média.

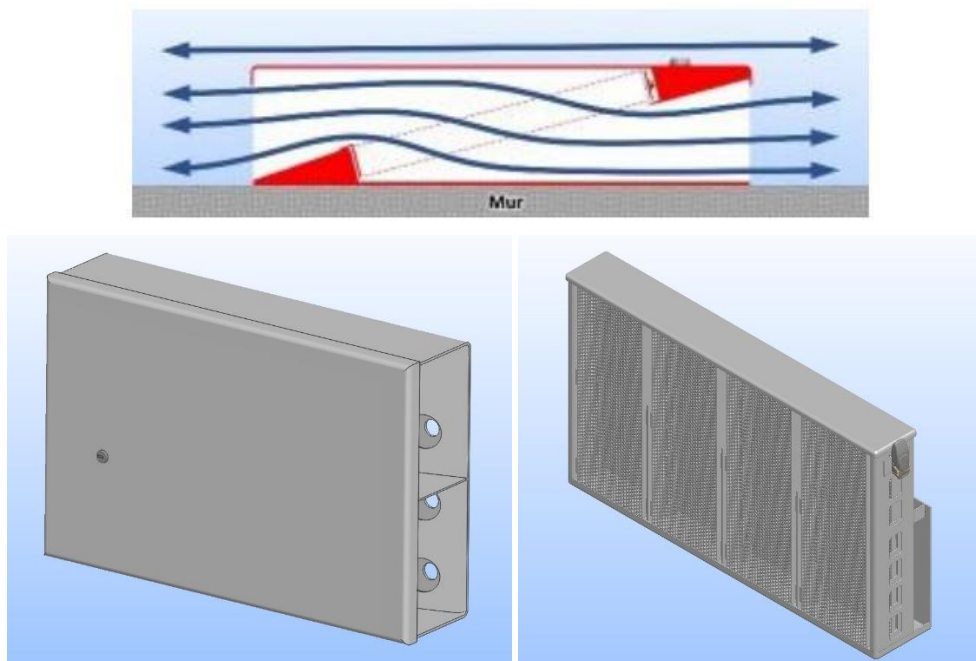


Figure 11 – Système de récupération de particules mis en place par TRAPAPART.

Le système de dépollution de SICAT / TRAPAPPART a été installé à la gare de Boulainvilliers sur le RER C (Paris XVIème). Les quais de la gare sont en souterrain, en courbe, et encadrés par des tunnels. Ils sont situés au niveau -1 avec 2 quais. La ligne RER C est équipée de rames circulant sur roues en fer. L'accès aux quais se fait par une des extrémités de la gare (côté vers gare Henri Martin), la même pour chaque quai. La ventilation est naturelle dans cette gare.

Trois modules ont été installés : sous le quai, dans un couloir de la gare à hauteur d'homme et sur les parois des tunnels (cf. Figure 12).

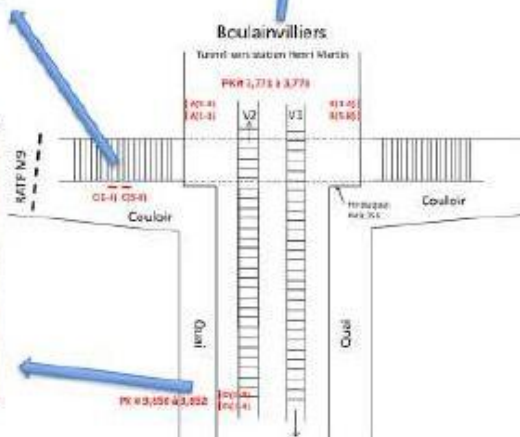


Figure 12 – Photos des systèmes de dépollution de SICAT / TRAPAPART installés en gare de Boulainvilliers.

2.4.1. DISPOSITIF D'ÉVALUATION MENEÉ PAR TRAPAPART / SNCF RESEAU

Le système étant étant encore en phase de recherche comparativement à d'autres solutions testées, des tests ont concernés essentiellement l'optimisation du captage des particules. L'évaluation de cette solution a été réalisée par des mesures de pesée de particules récoltées réalisées par TrapApert et non par des mesures directes en gare.

Les tests ont été réalisés en gare de Boulainvilliers en deux phases (2^{ème} semestre 2019 et 2^{ème} semestre 2020).

Lors des tests, plusieurs paramètres sont suivis afin d'estimer l'efficacité du système :

- La quantité de particules captée par litre de média et par jour (g/l/jour) (pesée des particules récoltées par filtration des eaux de lavage). Une estimation de l'efficacité en PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁ est réalisée suite à l'analyse de la répartition granulométrique des particules dans les eaux de lavage.

- La durée de fonctionnement sans perte d'efficacité (jours) évaluée à partir de durées d'exposition allant de 2 à 8 semaines
- La possibilité de recyclages multiples du média.

Une phase de test a été menée du 20/08/2019 au 10/12/2019. Lors de la configuration testée, la quantité de particules captée n'a pas été probante, à cause d'une mise en contact insuffisante de l'air pollué avec le média, les flux d'air étaient trop parallèles aux voies.

Le besoin d'adapter la configuration des supports pour optimiser le passage de l'air a été établi et travaillé durant le premier semestre 2020. Des améliorations sur le média filtrant ont également été apportées, permettant une limitation de la perte de charge, une réduction du coût, une simplification des conditions de régénération et une meilleure efficacité de piégeage.

Par ailleurs, des micro-capteurs, permettant le suivi des concentrations de particules en entrée/sortie d'une cassette, et des appareils de mesure de la vitesse d'air ont été ajoutés au dispositif (sondes Pitot).

La deuxième phase de test a été réalisée du 14/09/2020 au 07/12/2020. Les mesures de vitesse d'air, trop bruitées, ne permettent pas de réaliser un bilan de matière entrée / sortie sur les médias filtrants, mais ils ont permis de mettre en évidence une vitesse d'air plus importante au niveau des tunnels et au niveau des quais lors du passage des rames.

Les résultats des micro-capteurs n'ont pas donné de résultats assez satisfaisants pour estimer une efficacité du système sur les concentrations de particules. Aussi seule une estimation théorique du système a été calculée, à partir d'un bilan de matière global à l'échelle des pièges (quantité théorique de masse de particules dans l'air (g/l/jour) estimée à partir d'un débit d'air théorique de particules au travers d'un piège et d'une concentration moyenne de particules PM₁₀ et PM_{2.5} (données issues d'une campagne de mesure de la qualité de l'air en gare par AEF) et des résultats de pesées.

2.4.2. RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES PAR TRAPAPART / SNCF RESEAU

Les tests réalisés montrent une efficacité de captage des particules, notamment dans la zone tunnel. **L'analyse des particules captées montre des particules de différentes granulométries, dont des particules fines (PM_{2.5} et PM₁).**

Les tests sur 8 semaines valident un fonctionnement stabilisé sur a minima cette durée.

Enfin, **la régénéralité pour les médias exposés en tunnel a été validée sur 3 cycles sans perte d'efficacité** (un cycle correspond à une phase de captage des particules, une d'extraction des particules du média et une de régénéralion du média).

En conclusion, le principe de fonctionnement du système (récupération de particules) en tunnel, sous le quai et dans les couloirs est validé. Le système fonctionne le mieux en tunnel car les dispositifs sont plus près des sources d'émission au freinage. **La technologie semble prometteuse, et elle est déployable dans tous les environnements (quai, couloirs, tunnels).**

La poursuite des expérimentations a été confiée à SNCF Gares et Connexions.

2.4.3. AVIS D'AIRLAB RELATIF A LA QUALITE DE L'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION PAR TRAPAPART / SNCF RESEAU

L'évaluation de cette solution a été théorique, utilisant des pesées. Aucune mesure directe de qualité de l'air en gare n'a été possible à ce stade. Toutefois, des particules de différentes tailles sont bien récupérées via le média filtrant.

L'expérimentation menée a permis de faire progresser le dispositif de piégeage de TrapApart, encore au stade de mise au point, notamment en faisant évoluer à la fois la forme des pièges pour capter les particules et le média.

L'expérimentation a permis de confirmer la capacité du système à piéger des particules de manière passive en utilisant le flux d'air des trains.

L'analyse des particules captées avec des particules de différentes granulométries, dont des particules fines confirme l'intérêt de poursuivre les recherches, d'autant que ce système est passif, sans consommation énergétique.

2.5 EXPERIMENTATION TALLANO/ SNCF TRANSILIEN

L'évaluation de cette solution a été spécifique car il s'agit d'un système de captation à la source, au niveau du point d'émission, des particules de frein spécifique

L'abrasion due au freinage mécanique (disques + garnitures de frein ou roues + semelles de frein) est l'une des principales sources d'émission particulaire des transports ferroviaires. Elle est composée de particules se situant principalement entre 1 et 10 microns en masse, et entre 0,01 à 0,1 microns en nombre. Il s'agit essentiellement de particules métalliques.

La solution Tallano est prévue pour capter les particules par aspiration avant qu'elles ne se disséminent dans l'air ambiant. En conséquence aucune mesure directe de qualité de l'air n'a été effectuée en gare, la performance du système s'analysant sur banc d'essai. Les résultats sont suivis par SNCF Transilien avec l'appui de l'Ingénierie du Matériel (SNCF CIM et AEF).

2.5.1 DISPOSITIF DE COLLECTE TESTE

Le système de dépollution traité est un dispositif de captation à la source des particules fines émises lors d'une phase de freinage. La solution retenue dans le cadre des expérimentations est le TAMIC® de la société TALLANO Technologie (cf. Figure 13).

L'émission des particules lors du freinage est une contrainte physique inhérente à toute action de friction et donc de freinage : les particules permettent l'adaptation de la vitesse entre une partie fixe (la semelle ou la garniture) et une partie en mouvement (la roue ou le disque). Elles composent un troisième corps qui permet de rendre le freinage efficace. Après quelques tours, les particules sont éjectées et se retrouvent en suspension dans l'air générant une dégradation de la qualité de l'air.

Afin d'éviter cette dissémination dans l'air libre, le dispositif testé capte ces particules à la source par aspiration. L'aspiration est effectuée par une turbine, les particules étant retenues dans un filtre conçu spécialement à cet effet.

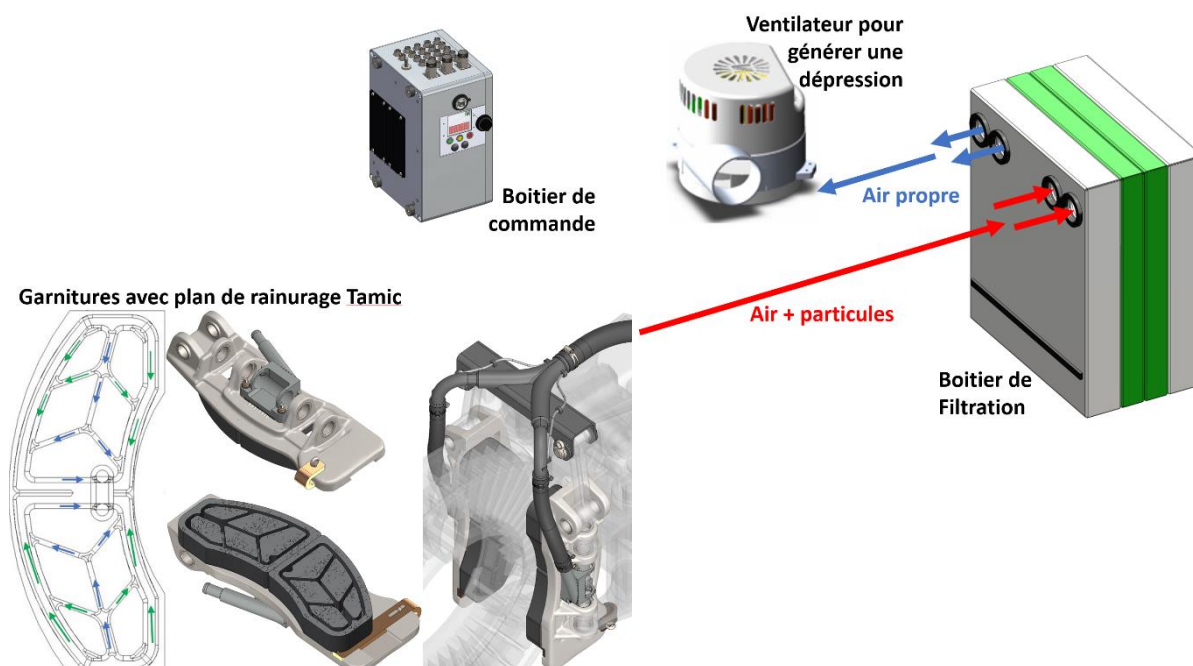


Figure 13 – Principe de fonctionnement d'un système TAMIC®.

2.5.2. DISPOSITIF D'ÉVALUATION MIS EN PLACE PAR SNCF TRANSILIEN

Le système TAMIC® développé et testé est celui adapté au freinage à disque d'une rame de RER de la série Z2N (Z20500), matériel circulant sur la ligne C en Ile de France, ligne comprenant des circulations en tunnel.

La société Tallano Technologie avait en responsabilité l'étude, le développement, la réalisation et la mise au point du système TAMIC® : mise au point du plan de rainurage des garnitures par simulations numériques et essai de mise au point au banc de freinage ; conception et fabrication du boîtier d'aspiration et de filtration.

L'Ingénierie du Matériel de SNCF, représentée par le Centre d'Ingénierie du Matériel et l'Agence d'Essai Ferroviaire, avait en responsabilité la définition du programme d'essais au banc et la réalisation des essais et mesures des performances de freinage et de captage des particules. L'évaluation a été effectuée de juillet 2019 à octobre 2019 selon le protocole précisé §1.2.2.

L'objectif fixé pour cet essai était d'atteindre une réduction minimum d'émission de 70% en nombre et en masse.

2.5.3 RESULTATS ET CONCLUSIONS PRESENTES PAR SNCF TRANSILIEN

Les tests sur bancs permettent d'obtenir une réduction au niveau des objectifs fixés : Les résultats obtenus s'expriment en pourcentage de diminution en PM10 par rapport à la quantité émise avec le système de référence. Pour le programme RER C, avec le système actif pour tous les freinages du parcours RER C, les résultats s'élèvent à une réduction de 71%.

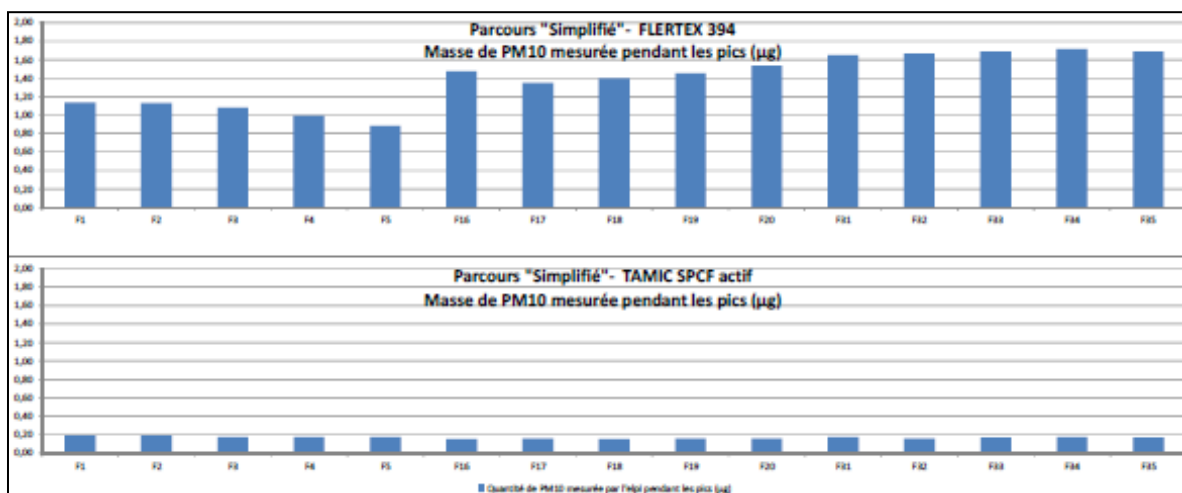


Figure 14 : Exemple de mesures réalisées au banc d'essais de freinage – SNCF AEF (Vitry sur Seine).

Compte tenu des performances obtenues sur banc par le TAMIC® dans le cadre de l'appel à projet, il a été ensuite décidé conjointement par SNCF et Tallano Technologie de poursuivre les travaux en complément de l'appel à projet. Cela s'est traduit, en 2019/2020 par l'étude d'intégration du dispositif sur une rame de la ligne C, de type Z2N, pour des essais sur véhicule en service commercial. La constitution du dossier de sécurité pour obtenir l'autorisation de circulation en commercial avec un système de freinage modifié a été réalisée.

De décembre 2020 à décembre 2022, il est procédé à des essais sur 2 essieux d'une voiture du RER C équipés du dispositif TAMIC®. Le but de ces essais en service commercial est de confronter l'équipement aux sollicitations rencontrées usuellement sur un matériel ferroviaire, comme les vibrations, les conditions météorologiques, ... Une inspection est réalisée toutes les 5 semaines environ au technicentre SNCF des Ardoines. Ces contrôles permettent à Tallano Technologie de réaliser des ajustements (géométrie des garnitures de frein à disques et de la fixation des tuyaux d'aspiration des poussières par exemple après 1 00 000 kms parcourus). Une fiabilisation de

l'électronique de commande et une amélioration de la qualité de fabrication des filtres a également été réalisée à ce stade (fin 2021). Les contrôles permettent à SNCF d'engranger des éléments sur la maintenabilité et les coûts associés.

2.5.4. AVIS D'AIRLAB RELATIF A LA QUALITE DE L'EVALUATION SUR L'IMPACT DE L'EXPERIMENTATION TALLANO/ SNCF TRANSILIEN

L'évaluation de cette solution a porté directement sur la réduction de l'émission des systèmes de freinage.

Les experts de la SNCF ont constaté que les résultats de l'expérimentation sont conformes aux objectifs initialement fixés.

AIRLAB confirme que les résultats sont conformes aux attentes. La technologie TAMIC® est suffisamment prometteuse pour que SNCF procède dès à présent à des essais en service commercial.

3. CONCLUSION

Les 5 lauréats de l'appel à projet de la Région ont eu l'opportunité de tester leur dispositif de traitement dans une enceinte ferroviaire souterraine ou sur banc, et de bénéficier de l'accompagnement de la mise en œuvre de leurs solutions par la RATP et SNCF. Les évaluations de leur impact sur la qualité de l'air ont été menées par ces deux opérateurs, leurs experts et avec, pour certaines, un appui direct des experts d'Airparif.

AIRLAB, le laboratoire d'innovation ouverte d'Airparif et ses partenaires, a suivi les évaluations et donné un avis sur la validité des conclusions concernant l'impact sur la qualité de l'air intérieur des dispositifs testés.

Les résultats des expérimentations terminées sont prometteurs. Les dispositifs testés ont montré leur capacité à piéger des particules.

Les premières expérimentations des dispositifs de dépollution de l'air nécessitent d'être poursuivies pour tester des dispositifs opérationnels adaptés aux exigences des enceintes ferroviaires souterraines (notamment dispositifs de faible encombrement et peu bruyants, ...) et s'assurer que ces dispositifs conservent les qualités de piégeage des particules des dispositifs pilotes testés. Le dispositif de piégeage passif nécessite également d'être évalué en phase pilote pour évaluer l'impact sur l'air de la gare.

La capacité des techniques testées à dépolluer une gare complète, seuls ou en combinaison, est également à évaluer.

Le protocole d'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air sera complété au vu des résultats des premières expérimentations pour s'affranchir le plus possible des effets des facteurs d'influence (nombre de trains, matériel roulant, ventilation, fréquentation de la gare, qualité de l'air extérieur, conditions météorologiques, ...). Des mesures de particules ultrafines permettraient également de compléter l'évaluation de l'impact des dispositifs de dépollution sur la qualité de l'air sur les quais.

La poursuite des tests du dispositif de la société Tallano est déjà en cours avec des évaluations en service commercial en cours jusqu'à fin 2022.

Annexe 1 : PRESENTATION D'AIRLAB

AIRLAB promeut un **modèle d'innovation ouverte** et coordonne un **écosystème facilitant les rencontres** et les collaborations entre des acteurs d'horizons variés.

Il vise à débloquer l'ensemble des points décisifs d'une innovation pour la qualité de l'air. En particulier : évaluer des projets ; mobiliser des financements ; apporter des territoires d'expérimentation afin d'organiser les tests opérationnels ; organiser et faciliter l'accès aux données ; mettre en place des processus d'évaluation des projets, informer et faire adopter les solutions par le plus grand nombre.

AIRLAB aborde l'ensemble des thématiques liées à la qualité de l'air : mesure précise des émissions ; mesures des niveaux de pollution ; diminution des émissions selon les sources (transports, agriculture, industrie et bâtiments) mais aussi dépollution des sites et des édifices et lien avec le changement climatique.

Pour ce faire, AIRLAB mobilise une grande diversité de champs scientifiques : de la chimie, de l'informatique et de l'ingénierie jusqu'aux sciences du comportement et au design.

Grace à ses partenaires et à l'expérience d'Airparif, AIRLAB réunit **un ensemble de compétences et d'atouts sans équivalent**, dont les principaux sont présentés ci-dessous :

- Guichet pour les initiatives innovantes ;
- Labellisation de projets innovants ;
- Montage de projets partenariaux ;
- Terrains d'expérimentation ;
- Recherche de financements ;
- Evaluation des performances des innovations ;
- Mesure de l'efficacité des politiques publiques en faveur de l'amélioration de la qualité de l'air.

AIRLAB fonctionne comme un écosystème et réunit autour d'Airparif des partenaires qui s'engagent sur un objectif commun, à savoir améliorer la qualité de l'air en Île-de-France, avec des acteurs institutionnels (collectivités territoriales, agences, instituts...), de grandes entreprises, la recherche académique, des PME, des start-ups et des représentants de la société civile.

Les membres du comité de pilotage sont présentés ci-dessous. Certains de ces partenaires ont contribué tout particulièrement au lancement d'AIRLAB, ce sont les partenaires fondateurs.

Partenaires Fondateurs :



Autres membres du comité de pilotage :



La communauté compte à ce jour (01/01/2022) près de 120 membres, dont 85% de PME et TPE.

Annexe 2 : DETAILS TECHNIQUES DES MESURES

Moyens techniques mis en œuvre : ANALYSEURS AUTOMATIQUES

Des sites automatiques, renseignant les concentrations de pollution au pas de temps horaire, ont été mis en place, ceci en cohérence avec la nécessité de disposer de données temporelles fines de pollution pour l'interprétation des résultats.

Une station de mesure se présente sous forme d'une station classique de mesure de la qualité de l'air, équipée d'analyseurs automatiques installés au sein d'une armoire. Une station d'acquisition permet un échange régulier d'informations depuis le siège de l'exploitant.

Le fonctionnement d'une telle station est identique à celui de l'ensemble des stations permanentes du réseau fixe d'Airparif ou de SQUALES (réseau RATP) et implique des contraintes techniques lourdes : accès et connexion aux lignes électriques et si possible téléphoniques, ainsi que la maintenance régulière des analyseurs.



Les concentrations en particules fines (PM_{10})² et très fines ($PM_{2.5}$) sont mesurées par analyseurs automatiques.

A Avenue Foch, deux analyseurs de particules modèle **TEOM FDMS 1405F** de chez TEI mesurent les particules $PM_{2.5}$ et PM_{10} (mesures Airparif). Ce type d'analyseur utilise une microbalance à élément conique oscillant (TEOM 30°C) couplé à un système de mesure dynamique à filtre (FDMS) pour fournir des mesures avec une excellente précision à court terme en tenant compte des fractions de particules volatiles et non volatiles. L'un des deux analyseurs est équipé d'une tête de prélèvement PM_{10} US EPA et l'autre d'une tête de prélèvement PM_{10} US EPA couplée à un Sharp Cut Cyclone (SCC) $PM_{2.5}$.

A la station de métro A. Dumas, il s'agit de TEOM 1400.

Le **FIDAS 200** est un granulomètre optique délivrant des mesures de granulométrie en nombre de particules en suspension. La mesure est basée sur la détection de la lumière diffusée par les aérosols, pour déterminer leur taille et leur nombre par classe de taille. L'échantillon d'air ambiant est aspiré

² Mesures des PM_{10} et $PM_{2.5}$ selon la norme NF EN 12341 par FDMS (mesure par micro-balance, prise en compte de la fraction volatil des particules). A la station Magenta (mesures par AEF), mesure des PM_{10} et des $PM_{2.5}$ par micro-balance à l'aide des analyseurs automatiques de type RP1400 (R&P) appelés aussi TEOM, en prenant en compte la norme NF EN 12341.

au niveau d'une tête de prélèvement sans diamètre de coupure, c'est-à-dire laissant passer les particules totales en suspension ; il passe ensuite dans une ligne de prélèvement chauffée, technique qui permet de s'affranchir des problèmes liés à l'humidité.

Le FIDAS 200 mesure des concentrations en **nombre pour les particules comprises entre 0.18 et 18 µm** (soit 180 - 18 000 nm) de diamètre, selon 64 classes de taille. Il fournit donc des données de granulométrie en nombre, c'est-à-dire un nombre de particule par unité de volume (nb part/cm³) pour chacune des 64 classes de taille. Le FIDAS convertit le diamètre optique mesuré en diamètre aérodynamique.

VALIDATION DES MESURES

Des opérations de vérifications, de maintenance et d'étalonnage sont réalisées régulièrement, permettant de s'assurer que les données recueillies sont d'une précision, d'une exactitude, d'une intégralité, d'une comparabilité et d'une représentativité satisfaisante.

Le processus de validation par du personnel qualifié comporte deux étapes systématiques :

- une validation technique, réalisée quotidiennement,
- une validation environnementale, réalisée de manière hebdomadaire.

Une invalidation peut être due à un problème technique de l'analyseur, à un événement extérieur (coupure électrique par exemple) rendant la donnée non représentative, etc.

L'exploitation des données est réalisée sur des relevés validés. Une donnée est considérée comme valide si au moins 75% de ses éléments constitutifs le sont. Par exemple, une moyenne horaire est calculable si au moins 75 % (\geq) de données 15 minutes sont valides, consécutives ou non sur l'heure.

Annexe 3 : LISTE DES DOCUMENTS

ANALYSES

Aucun des documents mis à disposition d'Airparif pour ces travaux n'est public, les technologies testées présentant notamment des spécificités faisant l'objet de secrets industriels. Ils ont été confiés à Airparif sous couvert de confidentialité.

Livrables mis à disposition d'Airparif par la RATP :

- Support REGION 18 11 21.pdf
- Rapport PR-DE2000279-QAPM-V1.pdf
- DE1900819.pdf
- Compte rendu expérimental.pdf
- Aufero Measurements A.Dumas (FINAL REPORT) 200828 - Suez 53.P0009-06 (1)
- 20200803_Rapport_EFS_RATP_SUEZ.pdf
- Rapport Suez 035R_21 mesures Dusttrack 2019 projet Ip'Air.pdf
- Compléments-RATP-02.02.2022.pdf
- Trafic Entrant direct Alexandre Dumas L2 - 2019-2020.xlsx

Livrables mis à disposition d'Airparif par SNCF Gares & Connexions:

- SNCF QAI en EFS - bilan AAP 18112021.pdf
- Rapport Final Projet SNCF Av Foch_Air Liquide_RégionIDF_Mai 2020.pdf
- SICAT-ChP-03-21 Rapport sur expérimentations de pièges à particules en gare de Boulainvilliers CP CCC.pdf
- ARP_AVF_Analyse_QAI_NTE-Starklab_Terra0_002.pdf



SOLUTIONS
POUR
NOTRE
AIR