

AtmoSud

Inspirer un air meilleur



Évaluation de l'efficacité d'un épurateur d'air intérieur en condition réelle d'utilisation

Bâtiment d'enseignement
secondaire - Lycée Diderot
Marseille

Juillet 2022

RÉSUMÉ :

ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ D'UN ÉPURATEUR D'AIR INTÉRIEUR EN CONDITION RÉELLE D'UTILISATION

Bâtiment d'enseignement secondaire – Lycée Diderot Marseille

Dans le contexte de pandémie liée à la COVID 19, les solutions d'épuration de l'air intérieur ont été envisagées comme moyen complémentaire à un bon renouvellement d'air pour minimiser l'accumulation de la charge virale du coronavirus dans l'air des bâtiments. La question posée ici est celle de l'efficacité d'unités mobiles d'épuration dans des conditions réelles d'utilisation à l'intérieur des bâtiments : leur effet, est-il significatif à l'échelle d'une pièce sur les particules fines pouvant transporter le virus et les COV ? Permettent-ils également l'épuration des particules ultrafines, généralement issues de l'extérieur en l'absence de combustion interne au bâtiment ?

► Une première étude dans un bâtiment de bureaux

AtmoSud a préalablement réalisé une première étude dans une salle de réunion qui a montré une efficacité de filtration du nombre de particules de 250 nm à 2 µm de 70 à 90 % en fonction des vitesses choisies¹.

► Une nouvelle étude dans un bâtiment d'enseignements secondaire

Chaque bâtiment comporte ses spécificités en termes de renouvellement d'air, de volume d'air, d'activités et de sources internes et externes de polluants. Il est donc essentiel d'expérimenter des bâtiments avec des activités différentes. AtmoSud s'est orienté vers un bâtiment d'enseignement secondaire : le lycée Diderot à Marseille. Dans ce cadre, deux salles de classe et un réfectoire ont été échantillonnés.

► Une contribution des élèves et des professeurs

Les élèves du lycée ont fait l'objet d'une formation aux enjeux de l'air intérieur et ont été impliqués, avec leur professeur, dans le protocole expérimental mis en place. Il s'agissait notamment de la mise en marche des épurateurs installés dans les classes et du suivi des mesures réalisées. Afin d'étayer leur démarche scientifique, ils ont également interprété certaines mesures de particules fines par microcapteurs pour évaluer l'efficacité de l'épurateur.

► Une épuration efficace et homogène des particules fines dans les salles de classe de l'ordre de 70 %

La mise en route de l'épurateur cPure occasionne une baisse des niveaux de particules fines significative et homogène dans les salles de classe : jusqu'à de 70 % lorsque les portes et fenêtres sont fermées.

► Une efficacité significative sur les particules ultrafines, de l'ordre de 70 % dans les salles de classe

Les mesures de particules ultrafines au sein des classes montrent une efficacité similaire à celle des particules fines, de l'ordre de 70%. L'ouverture des ouvrants baisse l'efficacité d'abattement des particules, en lien vraisemblable avec l'apport de particules depuis l'extérieur de la pièce expérimentée.

► Pas d'efficacité démontrée sur les COV

L'épuration des COV par la pré-filtration moléculaire sur charbon actif de l'épurateur dans les salles de classe n'est pas mise en évidence avec la vitesse d'épuration « travail » dans cette expérience.

¹Evaluation de l'efficacité d'un épurateur d'air intérieur en condition réelle d'utilisation - Bâtiment de bureaux - Décembre 2021 : https://www.atmosud.org/sites/sud/files/medias/documents/2022-03/211210_rapport_cpure.pdf

► L'utilisation de l'épurateur n'a pas d'impact sur le renouvellement d'air

L'épurateur d'air utilisé n'est pas un système de renouvellement d'air et il ne filtre pas particulièrement le CO₂. Il n'a donc pas d'impact sur ses concentrations dans les salles de classe, qui ne sont influencées que par la présence des occupants, l'ouverture des fenêtres et le système de ventilation mécanique contrôlée.

► Une épuration moindre des particules dans le réfectoire

Dans le réfectoire, malgré un nombre d'épurateurs proportionnel au plus grand volume de la pièce (6 unités), la mise en route des épurateurs occasionne une baisse des niveaux de particules fines et ultrafines plus modérée que dans les salles de classe : de 10 à 35 % en fonction des tailles de particules. Ceci s'explique par la présence d'espaces attenants complémentaires augmentant le volume d'air à traiter, l'ouverture régulière des fenêtres qui n'a pas pu être contrôlée pendant les nombreuses phases de mesure, voire l'apport de particules fines et ultrafines des activités de la cuisine attenante.

► L'éviction des sources, le renouvellement d'air et l'épuration des particules fines et ultrafines

L'expérience *in vivo* montre l'importance d'agir sur les sources internes et externes au bâtiment afin de réduire l'exposition des occupants. L'aération et la ventilation, qui apportent un triple bénéfice (baisse de la charge virale, dilution des polluants intérieurs, meilleure vigilance des élèves) restent la seconde priorité pour garantir un renouvellement d'air suffisant.

Les systèmes de filtration performants, comme celui testé ici, apportent une solution complémentaire pour réduire les particules fines mais aussi les ultrafines, ces dernières étant principalement d'origine extérieure dans ce type de bâtiments. Ce point est à mettre en perspective avec l'environnement pollué de certains établissements pour lesquels l'apport d'air extérieur par la ventilation ou l'ouverture des fenêtres constituent une pollution supplémentaire qui devrait être mieux prise en compte. A titre d'exemple en Provence Alpes-Côte d'Azur près de 150 établissements sont localisés dans des secteurs qui ne respectent pas les normes limites.

A terme, des systèmes de gestion intelligente des aspects aération/filtration ou intégrés gérant la filtration de l'air entrant, semblent des perspectives nécessaires en vue d'une meilleure gestion de la qualité de l'air des établissements implantés en zone polluée. Comme nous l'avons vu dans cette expérimentation, la gestion et la préservation de l'air d'une salle de classe nécessite des actions complémentaires, qui peuvent en apparence s'opposer. La gestion intégrée aération/filtration est sans doute le défi des années à venir notamment pour les établissements dont l'environnement est dégradé.

Contact

Chargé d'action territoriale : Sébastien Mathiot sebastien.mathiot@atmosud.org

Pilote de projet : Mathieu Izard mathieu.izard@atmosud.org

Date de parution

21/07/2022

Références

AFI-000122 / 02 / MI-ER-DR

REMERCIEMENTS

AtmoSud remercie le lycée Diderot de Marseille (équipe encadrante et élèves), la Fédération L'Air et Moi, ainsi que la société Eurévia pour la mise en place de cette expérimentation.

PARTENAIRES

Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur, Lycée Diderot Marseille, Fédération L'Air et Moi, Eurévia

AUTEURS DU DOCUMENT

Mathieu Iazard

Edwige Révélat

Dominique Robin

SOMMAIRE

1. Contexte et objectif	6
2. Épuration de l'air intérieur	8
2.1 Les recommandations de l'ANSES	8
2.2 Les recommandations du Haut Conseil de Santé Publique dans le contexte de la covid-19	8
3. Protocole	10
3.1 Objectif	10
3.2 Matériels de mesure utilisés	11
3.3 Pièces échantillonnées	12
3.4 Scénarii d'occupation et de mise en marche des épurateurs	15
3.5 Modalités de calcul de l'efficacité d'épuration	15
4. Résultats	16
4.1 Salle A318	16
4.2 Salle A326	22
4.3 Réfectoire	28
5. CONCLUSION	31
GLOSSAIRE	47

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	Fiche technique du granulomètre Grimm MINI-WRAS.....	33
ANNEXE 2	Fiche technique des microcapteurs multipolluants Nexelec Atmo.....	34
ANNEXE 3	Campagne d'intercomparaison des microcapteurs Nexelec Atmo	35
ANNEXE 4	Fiche technique du Module Air.....	37
ANNEXE 5	Comparaison des concentrations en particules à l'intérieur de la salle A318 aux concentrations extérieures de la station Marseille Longchamps	38
ANNEXE 6	Contexte de pollution de l'air ambiant du Lycée Diderot en comparaison de la station de fond urbain de Marseille	40
ANNEXE 7	Calcul de la normalisation par le minimum et le maximum de la distribution statistique des particules	42
ANNEXE 8	Comparaison des concentrations en particules à l'intérieur de la salle A326 aux concentrations extérieures de la station Marseille Longchamps	43
ANNEXE 9	Comparaison des concentrations en particules à l'intérieur du réfectoire aux concentrations extérieures de la station Marseille Longchamps	45
ANNEXE 10	Distribution statistique des particules dans le réfectoire	46

1. Contexte et objectif

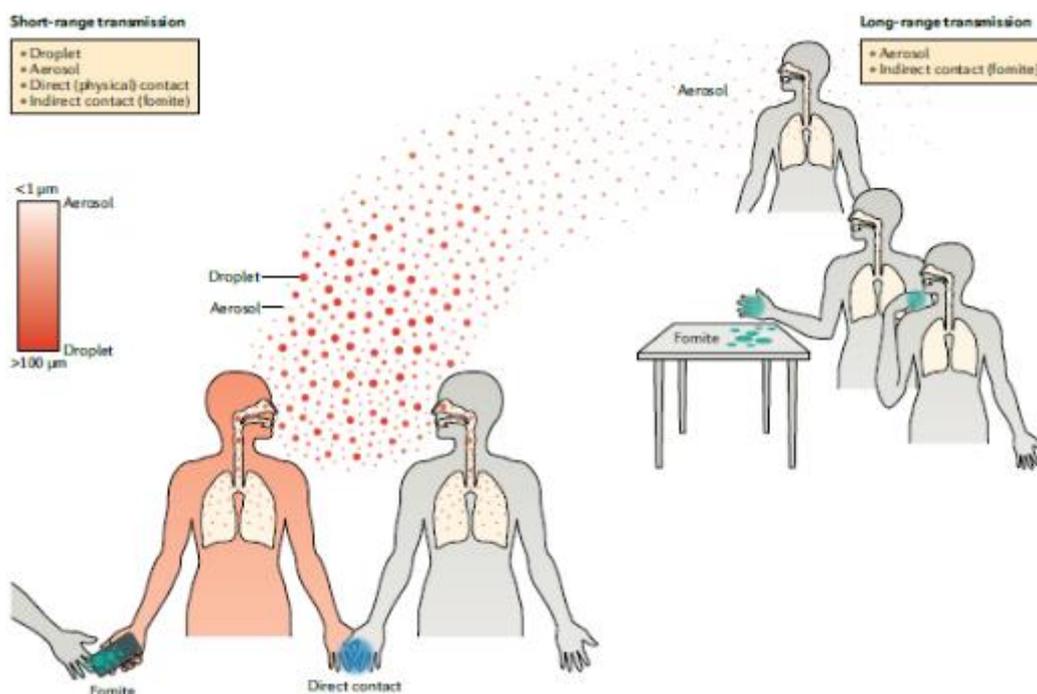
L'objectif de cette expérimentation est double : évaluer l'efficacité d'épuration d'un système répondant aux exigences des salles blanches, dans l'objectif de limiter la propagation de maladies infectieuses, mais aussi et surtout de réduire l'exposition aux particules fines et ultrafines, voire aux composés organiques volatils (COV).

► Limiter la propagation des maladies infectieuses

Dans le contexte de pandémie liée à la COVID 19, les solutions d'épuration de l'air intérieur sont envisagées comme moyen complémentaire à un bon renouvellement d'air pour minimiser l'accumulation de la charge virale du coronavirus dans l'air des bâtiments.

En effet, comme le mentionne l'ANSES dans sa note d'appui scientifique et technique n°2021-SA-0018 de juillet 2021, « Les arguments pris dans leur ensemble sont clairement en faveur d'une **transmission possible** de la COVID-19 par des **aérosols** chargés de particules infectieuses. ». Le schéma ci-dessous, issu du même document, permet de représenter les différentes voies de transmission des virus respiratoires.

Figure 1 : Voies de transmission courte distance et longue distance des virus respiratoires (Leung 2021)



Source : Note d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la viabilité dans l'air et la dose infectante du virus SARS-COV-2²

Ainsi, l'intérêt de la filtration et de l'épuration de l'air intérieur est mis en évidence pour permettre la réduction de la transmission à « longue portée » du virus par les aérosols chargés de particules infectieuses.

► Limiter l'exposition des occupants aux particules fines et ultrafines

La pollution de l'air est désormais considérée comme la première cause environnementale de mort prématurée dans le monde. Des résultats récents d'études de cohortes ont confirmé l'existence d'un risque de décès associé à l'exposition chronique aux particules fines PM2.5 (particules dont le diamètre est inférieur à 2.5 µm) dans la population européenne et française. Plus de 48 000 décès par an pourraient être attribués aux PM2.5.

² <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2021SA0018.pdf>

Les recherches sanitaires mettent en avant la nocivité des particules encore plus petites, les particules ultrafines (inférieures à 100 nm). Ainsi, l'ANSES a émis un avis expliquant que les particules ultrafines sont encore plus nocives que les particules de tailles supérieures car elles pénètrent plus profondément dans l'organisme.

La présence de particules fines à l'intérieur des bâtiments peut être liée aux activités intérieures (sources de combustions, ménage, travaux...), aux matériaux, à la remise en suspension (pour les particules les plus grosses) mais aussi à l'apport depuis l'extérieur.

Pour les particules ultrafines, en l'absence de sources de combustion internes, leur origine est essentiellement d'origine extérieure. À cela, peuvent s'ajouter des activités intérieures diverses génératrices de particules (travaux, process de fabrication...).

Nous passons 80 % de notre temps à l'intérieur des espaces clos, qui représentent par conséquent les principaux environnements d'exposition aux polluants de l'air et donc aux particules fines et ultrafines.

Il est donc essentiel de réduire l'exposition aux polluants particulaires dans les ambiances intérieures. Les solutions d'épuration et de traitement de l'air peuvent s'avérer un outil intéressant, en complément de la réduction des sources internes/externes et de la ventilation, pour réduire les niveaux de particules fines et ultrafines si leur efficacité en condition réelle d'utilisation est démontrée.

► La question posée

Certaines technologies d'épuration de l'air sont à prendre avec précaution en raison de leur capacité potentielle à émettre des sous-produits de réaction. Ce n'est pas le cas des technologies de filtration particulaire et moléculaire évaluées dans l'expérience, dont l'efficacité en condition de laboratoire est démontrée, notamment sur les particules fines. AtmoSud s'est donc orienté vers un épurateur de ce type, qui propose une filtration à haut débit et qui répond aux exigences de performances imposées dans les salles blanches.

L'efficacité d'un tel dispositif dans des conditions réelles d'utilisation est-elle significative à l'échelle d'une pièce ? Son efficacité sur les particules fines pouvant transporter le virus est-elle bien réelle ? Qu'en est-il de l'efficacité de filtration des particules ultrafines ?

Ce sont les questions auxquelles AtmoSud essaie de répondre à travers cette expérimentation d'évaluation de l'efficacité de l'épurateur cPure dans un bâtiment d'enseignement secondaire : le lycée Diderot à Marseille.

2. Épuration de l'air intérieur

Les principes de gestion de la qualité de l'air intérieur consistent prioritairement à limiter les sources d'émissions de polluants intérieurs (matériaux, aménagements, activités...) et renouveler l'air intérieur (ventilation, ouverture régulière des fenêtres...).

De manière complémentaire, l'épuration peut s'avérer utile en filtrant l'air entrant du système de ventilation pour limiter l'entrée des polluants extérieurs dans les zones où l'air ambiant est dégradé, ou en filtrant l'air intérieur avec des unités mobiles d'épuration pour réduire les polluants accumulés à l'intérieur.

Les épurateurs sont destinés à traiter certains types de polluants mais ils ne peuvent pas traiter l'air dans son ensemble. Ils ne peuvent donc pas de substituer au renouvellement d'air mais peuvent constituer un moyen complémentaire pour limiter l'accumulation de polluants d'origine intérieure ou extérieure, si leur efficacité s'avère suffisante en condition réelle d'utilisation.

2.1 Les recommandations de l'ANSES

L'ANSES a publié en 2017 un rapport d'expertise sur les différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes³ destinées au piégeage ou à la destruction de nombreux contaminants chimiques et microbiologiques de l'air intérieur.

Au regard des résultats de son expertise, l'ANSES souligne que, d'une façon générale, les données scientifiques collectées et analysées **ne permettent pas de démontrer l'efficacité et l'innocuité** en conditions réelles d'utilisation des dispositifs d'épuration de l'air intérieur fonctionnant sur les principes de destruction des polluants par **catalyse** ou **photocatalyse**, du **plasma**, de **l'ozonation** ou de **l'ionisation**, en raison notamment de leur potentielles émissions de polluants secondaires.

Si un traitement de l'air s'avère nécessaire, à ce jour **seule la filtration mécanique est perçue comme étant « sans danger »**. Il est important de souligner que si ces dispositifs ne sont pas entretenus, ils peuvent tout de même être à l'origine d'une détérioration de la qualité de l'air.

Les essais d'évaluation des performances doivent être conduits dans les conditions les plus proches possibles de conditions d'utilisation du produit, dans différents environnements ciblés. L'ANSES recommande donc la conduite d'études sur l'impact de l'utilisation d'épurateurs d'air sur la qualité de l'air intérieur en conditions réelles.

À la date de rédaction du présent document, il n'existe pas encore de protocole publié d'évaluation de l'efficacité d'épurateurs en conditions réelles d'utilisation mais il existe des groupes de travail français qui avancent sur le sujet, avec comme objectif principal la performance sur les particules fines et les COV. À ce jour, peu d'études publiées traitent des performances sur le taux de filtration de particules ultrafines, notamment en condition réelle d'utilisation de ces systèmes.

2.2 Les recommandations du Haut Conseil de Santé Publique dans le contexte de la covid-19

Le Haut Conseil de Santé Publique a émis un avis relatif à l'utilisation de purificateurs d'air en lien avec la diffusion du SARS-CoV-2 dans les espaces clos⁴. Le HCSP recommande de mettre en place une stratégie environnementale de maîtrise de la qualité de l'air par l'aération/ventilation dans chaque établissement recevant du public pour réduire le risque de transmission du SARS-CoV-2.

En cas de ventilation fonctionnelle et suffisante et d'aération possible dans un local, l'utilisation d'unités mobiles de purification d'air n'est pas nécessaire. En cas de ventilation (VMC) insuffisante (ou non existante) ou d'aération impossible ou insuffisante dans un local, il est recommandé de réaliser les actions chronologiques suivantes : revoir

³ Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes - Rapport d'expertise collective - Septembre 2017

⁴ Avis relatif au recours à des unités mobiles de purification de l'air dans le cadre de la maîtrise de la diffusion du SARS-CoV-2 dans les espaces clos : <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1014>

l'organisation et la jauge d'accueil ; si cela est impossible, envisager l'utilisation d'unités mobiles de purification d'air après une étude technique préalable démontrant son impact positif potentiel.

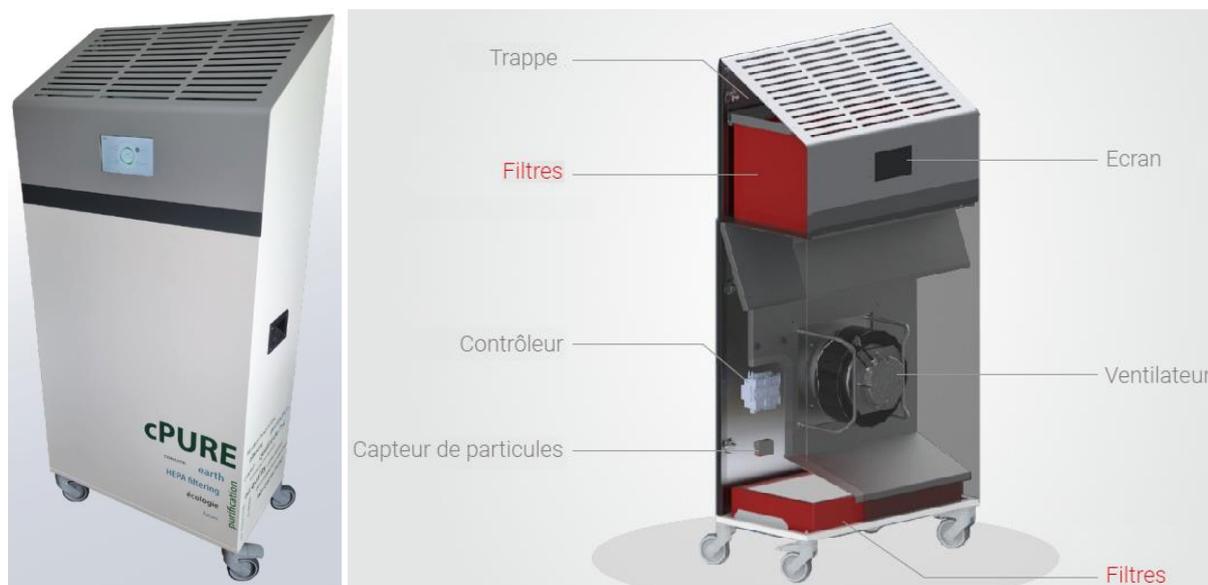
Dans l'actualisation des recommandations relatives aux unités mobiles de filtration de l'air intérieur⁵ d'août 2021, le HCSP précise les éléments techniques à prendre en compte pour l'implantation d'unités mobiles de filtration :

- Le filtre HEPA utilisé sera à minima de la classe dite H13. La composition du filtre (fibre de verre, polymère fluoré, autres matériaux) est laissée à l'appréciation du fabricant et de son fournisseur, le filtre devant être impérativement de la classe H13 ou de classe supérieure.
- Le débit d'air filtré chaque heure à travers le filtre HEPA sera au minimum de 5 fois le volume de la pièce (c'est-à-dire minimum 5 ACH : Air Change per Hour / taux de renouvellement de l'air par heure). Idéalement l'installation pourrait travailler entre 5 et 8 ACH. Au-delà le gain en performance est marginal et certains problèmes peuvent dans certains cas apparaître. On peut citer par exemple le niveau sonore et dans certains cas une déstratification de l'air dans la pièce traitée.
- Le débit d'air filtré prévu pourra provenir d'une ou de plusieurs unités mobiles de filtration d'air. L'implantation, le positionnement dans la salle, la puissance des appareils seront déterminés par une personne compétente : fabricant, assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO), utilisateur.

Certaines technologies d'épuration de l'air peuvent émettre des sous-produits de réaction, ce qui n'est pas le cas des technologies de filtration particulaire et moléculaire dont l'efficacité en condition de laboratoire est démontrée, notamment sur les particules fines.

Le système d'épuration expérimenté dans le cadre de cette étude est un **épurateur d'air** par piégeage à **haut débit**, fabriqué en France : Eurévia cPure. Son principe de fonctionnement est basé sur une **filtration de type particulaire H13** et une pré-filtration moléculaire (filtre à charbon actif). Il a été développé pour **atteindre des niveaux de classification ISO 14698 lui permettant de répondre aux performances imposées dans les salles blanches.**

Figure 2 : Épurateur d'air Eurévia cPure



La pré-filtration moléculaire permet de retenir certains composés gazeux, notamment les composés organiques volatils.

La filtration particulaire H13 permet de filtrer les particules fines et ultrafines avec une efficacité en conditions de laboratoire de 99.95 % sur les particules supérieures à 300 nm (norme EN 1822). Cette classe de filtres laisse passer moins de 50 particules de 100 nm par litre d'air.

La vitesse maximale (10, « mode décontamination ») correspond à un haut débit de filtration de 2 000 m³/h et implique des niveaux de bruits importants qui peuvent être gênants en condition d'occupation des locaux.

⁵ Actualisation des recommandations relatives aux unités mobiles de filtration de l'air intérieur : <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=1091>

Deux vitesses d'utilisation intermédiaires sont possibles pour réduire la gêne liée au bruit de fonctionnement :

- Vitesse 3 (« mode silence ») : 800 m³/h
- Vitesse 4 (« mode travail ») : 1 200 m³/h

Nb : Afin de rester efficace les filtres de l'épurateur doivent être remplacés régulièrement.

Afin de respecter les recommandations du Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) concernant les débits de filtrations de 5 volumes/heure (5CH), un épurateur d'air en fonctionnement à la vitesse 4 peut traiter un volume d'air maximum de 240 m³. Au-delà de ce volume, cela nécessite l'ajout d'autres épurateurs.

Il est à rappeler dans le contexte de pandémie à la covid-19 que les systèmes d'épuration d'air ne devraient pas se substituer au renouvellement d'air, qui doit rester la stratégie principale de lutte contre le virus SARS-CoV-2 dans les ambiances intérieures en complément des gestes barrières.

En attendant la publication d'un protocole national, AtmoSud met en place selon les recommandations de l'ANSES et du HCSP, une évaluation de l'efficacité d'épuration d'une unité mobile de filtration en conditions réelles d'utilisation, en prenant en compte un polluant complémentaire à ce qu'il est étudié à l'échelle nationale, les particules ultrafines.

Le type d'épurateur d'air retenu dans cette expérimentation pourrait s'avérer être un moyen technique complémentaire de réduction de certains polluants intérieurs, notamment en cas de ventilation ou d'aération insuffisante dans un local, pour limiter la transmission de maladies infectieuses et l'impact de polluants d'origine extérieure comme les particules fines et ultrafines. La gestion de l'air intérieur et extérieur est particulièrement posée dans les situations où la qualité de l'air est dégradée dans l'environnement du bâtiment. À l'échelle régionale, près de 150 établissements recevant du public (crèches, écoles...) se situent dans des secteurs où les normes limites européennes ne sont pas respectées.

3. Protocole

3.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation consiste à réaliser **des mesures dynamiques de qualité de l'air intérieur** (particules fines et ultrafines, COV, CO₂...) au cours du temps lors de différents scénarii d'utilisation de la pièce et de l'épurateur d'air cPure, qui sont fonction de :

- La présence d'occupants,
- La mise en marche du système d'épuration,
- L'ouverture des fenêtres donnant sur l'extérieur.

Le protocole appliqué dans le cadre de cette étude est basé sur la mesure des particules fines et ultrafines, des COV et du CO₂ présents dans l'air intérieur. Concernant l'impact potentiel sur la transmission des maladies infectieuses, la charge virale du virus SARS-COV-2 n'est pas mesurée, ce sont les concentrations en particules fines pouvant transporter le virus qui sont utilisées comme indicateur.

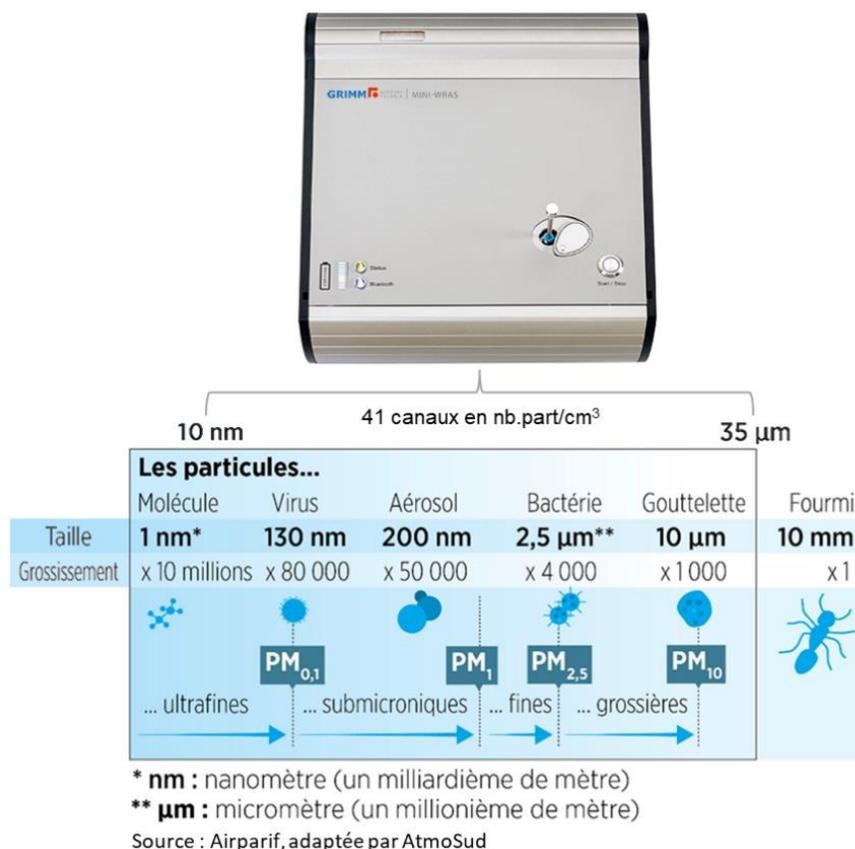
3.2 Matériels de mesure utilisés

3.2.1 Particules fines et ultrafines en nombre

Le matériel utilisé par AtmoSud est un **granulomètre** (Mini WRAS) permettant la mesure de la distribution statistique des particules en nombre sur 41 gammes de 10 nm à 35 µm ainsi que l'estimation des concentrations massiques en PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁.

Ainsi, il permet de distinguer les particules ultrafines (< 100 nm), des particules submicroniques (< 1 µm), fines (< 2.5 µm) et grossières (< 10 µm) en nombre de particules.

Figure 3 : Taille et correspondances des particules mesurées par le granulomètre Mini-Wras



La fiche technique du granulomètre Grimm MINI-WRAS est présentée en ANNEXE 1.

3.2.2 Autres paramètres

► Uniquement dans les salles de classe

AtmoSud a mis en place des **capteurs multipolluants** (Nexelec Atmo) **dispatchés en 5 endroits** de la pièce afin de réaliser un monitoring permettant **d'évaluer l'homogénéité de l'efficacité d'épuration** en fonction de la distance aux épurateurs. Ils permettent la mesure des paramètres suivants :

- PM10, PM2.5, PM1
- Composés organiques volatils totaux
- Formaldéhyde
- Dioxyde de carbone (CO₂)
- Bruit

- Conditions hygrothermiques (température, humidité relative)

Ces capteurs dont la fiche technique figure en ANNEXE 2 ont été caractérisés dans le cadre du challenge microcapteur Airlab 2021⁶.

Une campagne d'intercomparaison des 5 capteurs Nexelec Atmo a été réalisée pendant 12 jours pour identifier les différences de concentration des différents paramètres de mesure entre les capteurs. Les corrélations entre les capteurs sont élevées pour les particules fines et les COV (R^2 entre 0.71 et 0.84), à l'exception du capteur E42F pour les COV, et très élevée pour le CO₂ (R^2 entre 0.96 et 0.98). Le détail des résultats d'intercomparaison est présenté en ANNEXE 3.

De manière complémentaire, un **Module Air** (appareil de mesure et d'affichage de la qualité de l'air intérieur) a été mis en place afin d'être à la vue de tous lors des périodes d'épuration. Sa fiche technique est présentée en ANNEXE 4. Ce dispositif n'a pas été paramétré pour enregistrer des données pendant l'étude, l'objectif étant uniquement de **fournir une information aux occupants en temps réel sur l'évolution des concentrations en particules fines** en fonction des périodes d'épuration et sur la nécessité d'ouvrir les fenêtres en cas de confinement élevé.

Figure 4 : Microcapteur Nexelec Atmo à gauche, microcapteur pédagogique Module Air à droite



3.3 Pièces échantillonnées

Trois salles sont échantillonnées dans le cadre de cette expérimentation : **deux salles de classe et le réfectoire**, toutes les trois étant équipées d'un système de ventilation double flux dont les débits de renouvellement d'air et les performances de filtration de l'air entrant ne nous ont pas été communiqués.

► Salle de classe A318

La salle de classe A318 représente une surface de 155 m² et un volume de 420 m³. Les bouches d'extraction et d'insufflation du système de VMC étaient en fonctionnement. La porte d'entrée donne sur un couloir intérieur, alors que l'unique fenêtre donne sur l'extérieur.

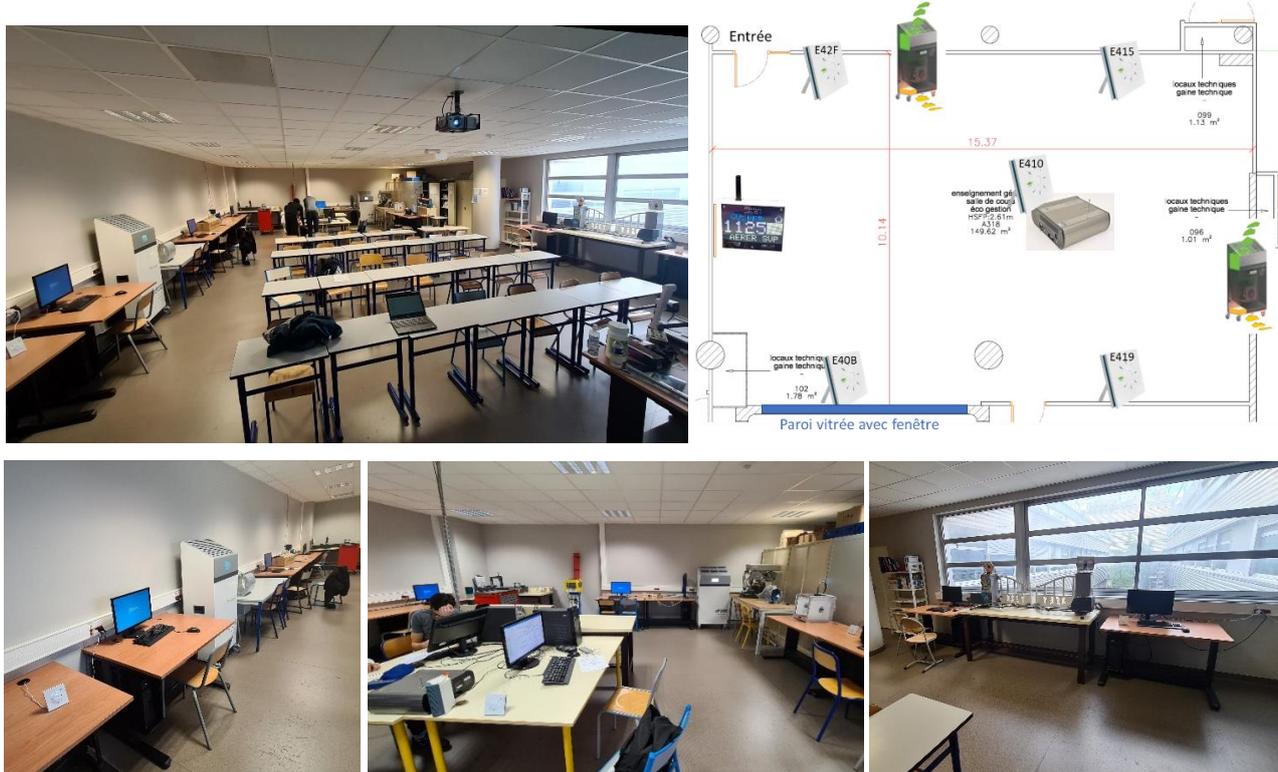
Le volume de la pièce nécessite la présence de deux épurateurs d'air, l'un positionné dans la zone avant de la salle de classe à l'opposé de la fenêtre, l'autre en fond de salle.

Le granulomètre et le microcapteur multipolluants E410 sont installés en position centrale sur une table à l'arrière la zone des bureaux des élèves. Les autres microcapteurs multipolluants sont installés aux quatre coins de la salle sans être à proximité immédiate des épurateurs d'air.

Enfin, un Module Air pédagogique est installé sur le bureau à proximité du tableau vers lequel les élèves sont orientés lorsqu'ils suivent un cours.

⁶ Challenger et comparer différents microcapteurs afin d'éclairer, en toute indépendance, les utilisateurs entre l'adéquation du produit et les usages possibles : <https://airparif.shinyapps.io/ChallengeResultsFR/>

Figure 5 : Positionnement des épurateurs et appareils de mesure d'air intérieur dans la salle A318



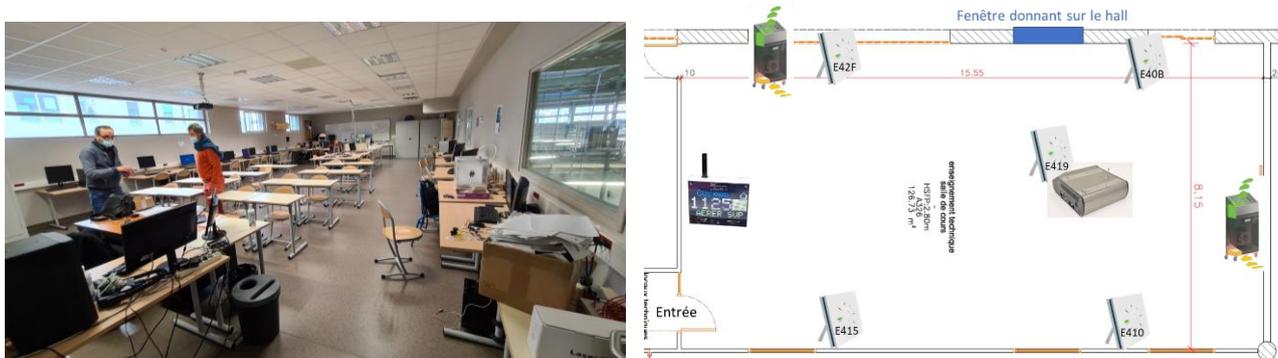
► **Salle de classe A326**

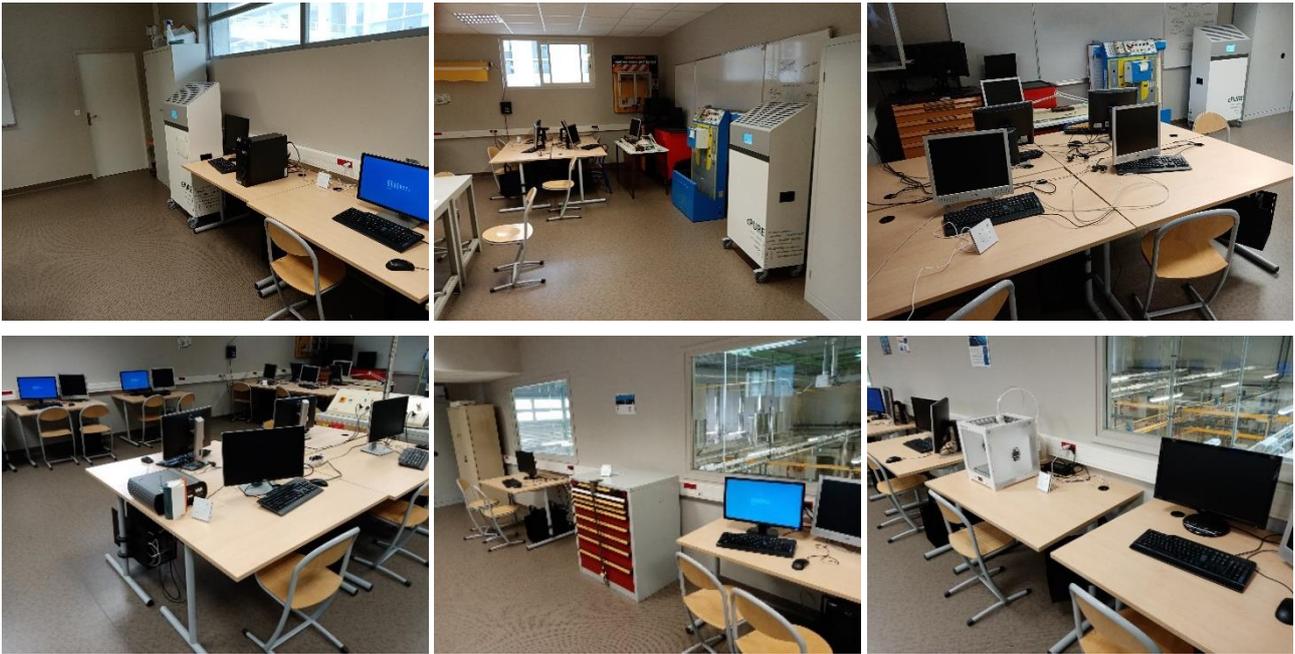
La salle de classe A326 est plus longue et moins large, elle représente également une surface de 155 m² et un volume de 420 m³. Les bouches d'extraction et d'insufflation du système de VMC étaient en fonctionnement.

Le volume nécessite également la présence de deux épurateurs d'air, l'un dans la zone avant de la salle de classe à l'opposé de l'entrée, l'autre en fond de salle. Le granulomètre et le microcapteur multipolluants E419 sont installés en position centrale sur une table à l'arrière la zone des bureaux des élèves. Les quatre autres microcapteurs sont installés aux quatre coins de la salle sans être à proximité immédiate des épurateurs d'air.

Enfin, un Module Air pédagogique est installé sur le bureau à proximité du tableau vers lequel les élèves sont orientés lorsqu'ils suivent un cours.

Figure 6 : Positionnement des épurateurs et appareils de mesure d'air intérieur dans la salle A326

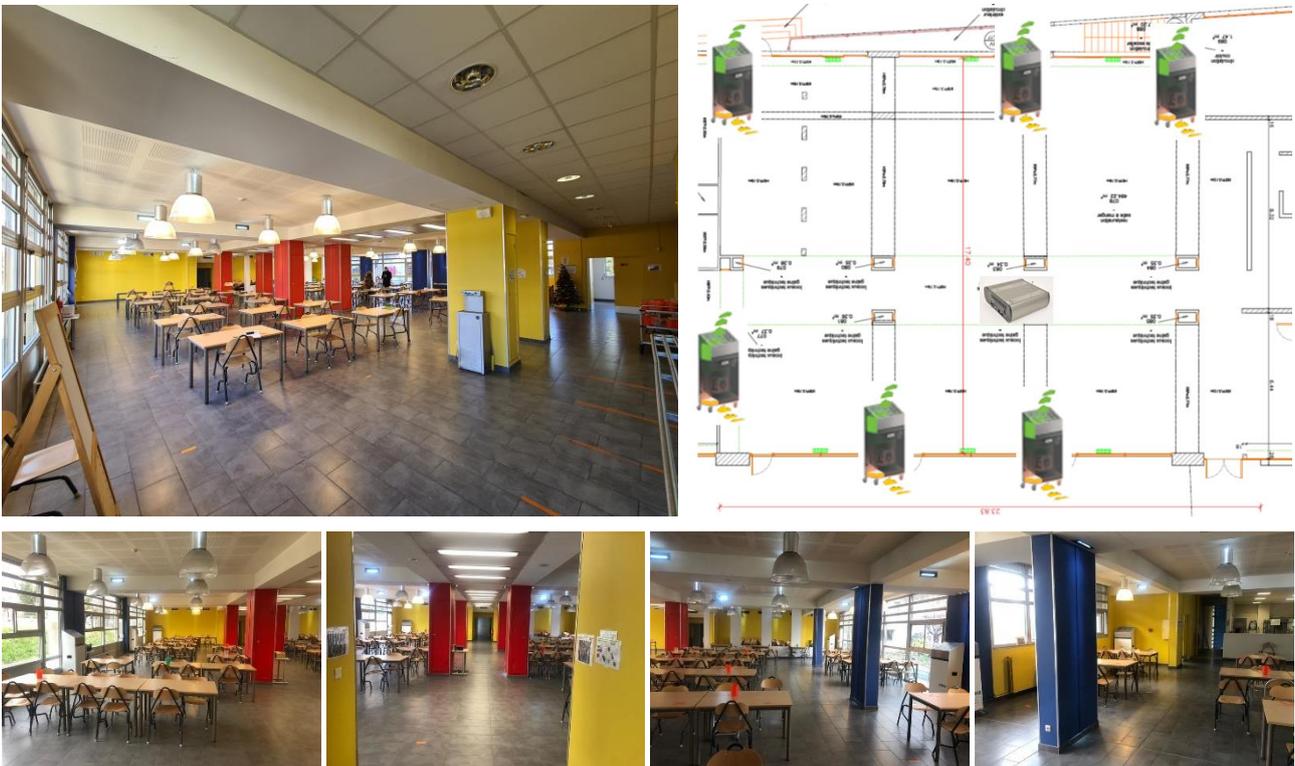




► Réfectoire

Le réfectoire représente une surface de 400 m² pour un volume de plus de 1 200 m³. La cuisine est semi-ouverte sur la salle du réfectoire qui communique également avec la salle attenante du réfectoire des enseignants et sur un couloir. Les fenêtres donnent toutes sur des espaces extérieurs. Six épurateurs sont répartis aux emplacements munis de prises électriques qui ne gênent pas le passage.

Figure 7 : Positionnement des épurateurs et appareils de mesure d'air intérieur dans le réfectoire



3.4 Scénarii d'occupation et de mise en marche des épurateurs

► Salles de classe

Dans les salles de classe, les épurateurs sont mis en marche sur les créneaux de présence de 2 à 3 heures des élèves de 1^{ère} ou de terminales STI, à raison d'une fois par jour, selon un planning préétabli et les modalités suivantes : au bout d'une heure de cours sans pause, les deux épurateurs sont simultanément mis en marche manuellement par les élèves en mode « travail » (vitesse 4 de 1 200 m³/h) jusqu'à la fin du cours.

L'objectif étant de caractériser les conditions réelles d'utilisation sans changer les habitudes d'utilisation, nous n'avons pas imposé de conditions particulières d'ouverture des ouvrants. Néanmoins, nous avons demandé que les conditions d'ouverture des fenêtres et de portes restent les mêmes pendant toute la durée d'un créneau d'expérimentation.

Il a été demandé aux occupants de noter scrupuleusement l'ensemble des informations d'ouverture des portes et fenêtres et des périodes de fonctionnement de l'épurateur, en suivant les plannings préétablis ci-après :

Tableau 1 : Planning de présence des élèves et de mise en marche des épurateurs dans les salles de classe

Salle A318						Salle A326					
A318	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	A326	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
8h-9h	1st12d 13 élèves	1SI 15 élèves		1st12d 27 élèves	tst12d 9 élèves	1SI 15 élèves	tst12d 10 élèves				tst12d 10 élèves
9h-10h	1st12d 13 élèves	1SI 15 élèves	1SI2d 13 élèves	2009 25 élèves	tst12d 9 élèves	1SI 15 élèves	tst12d 10 élèves	1st12d 14 élèves			tst12d 10 élèves
pause						pause					
10h-11h	1st12d 13 élèves	TSI 5 élèves	1SI2d 13 élèves		tst12d 9 élèves	10h-11h	tst12d 10 élèves	tst12d 10 élèves	Tric-TSI 5 élèves		tst12d 10 élèves
11h-12h	1st12d 13 élèves	TSI 5 élèves	1SI2d 13 élèves	1SI2d 27 élèves		11h-12h	tst12d 10 élèves	tst12d 10 élèves	Tric-TSI 5 élèves		
pause midi						pause midi					
13h30-14h30		1SI2d 14 élèves	Tric-2D04 15 élèves	tst12d 10 élèves		13h30-14h30	1st12d 9 élèves	1st12d 13 élèves	2D08 12 élèves	tst12d 9 élèves	
14h30-15h30	2D03 15 élèves	1SI2d 14 élèves	Tric-2D04 15 élèves	tst12d 10 élèves		14h30-15h30	1st12d 9 élèves	1st12d 13 élèves	2D08 13 élèves	tst12d 9 élèves	
pause						pause					
15h30-16h30	2D03 14 élèves	1SI2d 14 élèves		tst12d 10 élèves	Tric-2D04 30 élèves	15h30-16h30		1st12d 13 élèves	1st12d 14 élèves	tst12d 9 élèves	
16h30-17h30				2D09 28 élèves	1semaine/2	16h30-17h30					
Période d'1h avant filtration						Période d'1h avant filtration					
Période de filtration						Période de filtration					

► Réfectoire

Dans le réfectoire, les épurateurs sont mis en marche automatiquement (par programmation) un jour sur deux pendant la période d'ouverture aux élèves, de 11h à 13h. Il n'a pas été possible de demander à tracer les périodes et le nombre de fenêtres ouvertes.

Tableau 2 : Planning de programmation de mise en marche des épurateurs dans le réfectoire

Lundi 21/03	Mardi 22/03	Mercredi 23/03	Jeudi 24/03	Vendredi 25/03
Filtration de 11h à 13h	Arrêt	Filtration de 11h à 13h	Arrêt	Filtration de 11h à 13h
Lundi 28/03	Mardi 29/03	Mercredi 30/03	Jeudi 31/03	Vendredi 01/04
Arrêt	Filtration de 11h à 13h	Arrêt	Filtration de 11h à 13h	Arrêt

3.5 Modalités de calcul de l'efficacité d'épuration

► Salles de classe

Quel que soit le polluant, l'efficacité d'épuration est calculée en comparant les concentrations de la première heure de présence des élèves sans filtration à l'heure de présence qui suit, après mise en marche de l'épurateur en mode « travail ». Il en est déduit un pourcentage d'abattement des polluants.

► Réfectoire

Dans le réfectoire, l'efficacité de filtration est calculée en comparant les concentrations des journées avec et sans filtration sur les périodes d'ouverture aux élèves, de 11h à 14h. De manière complémentaire, les concentrations des trois heures de présence des occupants sont comparées aux trois heures qui précèdent pour les jours avec et sans filtration de l'air.

4. Résultats

4.1 Salle A318

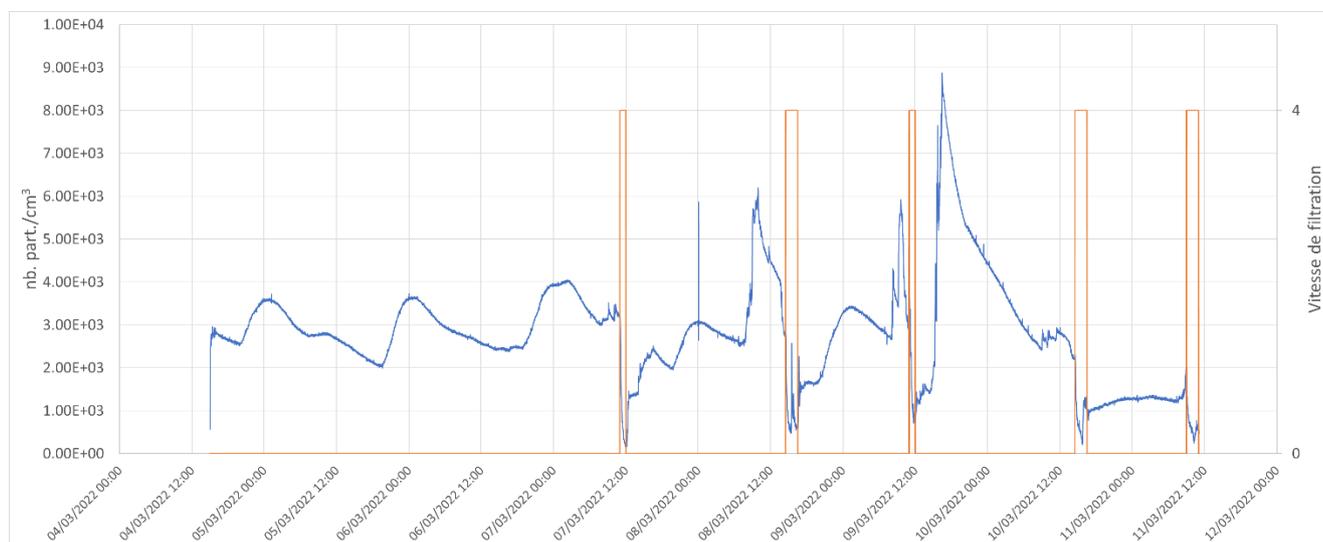
4.1.1 Les particules en nombre

► Nombre total de particules de 10 nm à 35 µm

Les périodes de mise en marche de la filtration des épurateurs ont été scrupuleusement respectées.

Le suivi du nombre total de particules en fonction de la mise en marche des systèmes d'épuration permet de mettre en évidence la **décroissance systématique du nombre de particules lors des phases d'épuration**. Compte tenu de la gamme de mesure allant des particules ultrafines aux particules grossières, il convient de souligner que cette approche en nombre total de particules traduit d'abord celle des particules ultrafines.

Figure 8 : Suivi du nombre de particules en fonction de la mise en marche des épurateurs d'air dans la salle A318



En ANNEXE 5, les concentrations intérieures en nombre de particules de 10 nm à 2.5 µm sont comparées aux concentrations extérieures de 7 nm à 2.5 µm de la station de fond urbain de Marseille/Longchamp. **Les concentrations moyennes extérieures sur la période sont près de 5 fois supérieures à celles de l'intérieur de la salle A318.** La gamme plus large de tailles de particules (qui prend en compte les particules entre 7 et 10 nm) peut participer en partie à cette différence de niveaux entre l'intérieur et l'extérieur. Sur la base des cartes annuelles de modélisation de 2019, la façade principale du lycée Diderot est située dans un contexte de pollution extérieure similaire en PM10, PM2.5 et NO₂ à la station de référence de Marseille/Longchamp (cf. ANNEXE 6).

Sur la période de mesure, dans la salle A318, l'évolution des concentrations extérieures au cours du temps ne semble que peu influencer l'évolution des niveaux à l'intérieur. Seules les périodes d'ouverture de la fenêtre facilitant l'entrée

des particules depuis l'extérieur (comme le mardi 8 mars au matin) ou les conséquences de potentielles activités intérieures semblent les augmenter significativement.

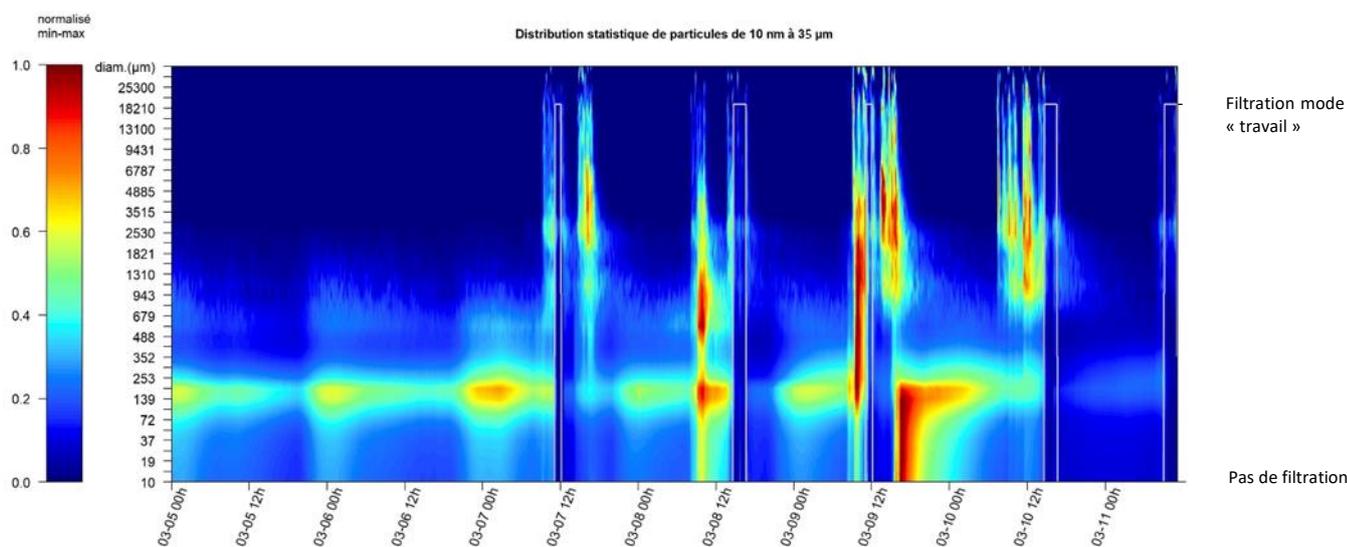
Nb : Les concentrations en nombre de particules de 10 nm à 1 µm sont en moyenne de 2 800 part/cm³ dans cette salle de classe. À titre de comparaison, les concentrations médianes dans les bureaux français⁷ sont de 6 900 part/cm³. À l'échelle internationale, une méta-analyse⁸ indique des concentrations moyennes dans les bureaux de 3 700 part/cm³.

Les concentrations moyennes extérieures de la station de fond urbain de Marseille sont 5 fois supérieures à celles de l'intérieur de la salle A318. Les périodes recensées d'ouverture des fenêtres occasionnent une augmentation du nombre total de particules, paramètre principalement influencé par les particules ultrafines. La mise en marche des épurateurs permet une baisse significative du nombre total de particules de 10 nm à 35 µm.

► Distribution statistique des particules de 10 nm à 35 µm sur 41 canaux

La présentation des résultats de la distribution statistique normalisée (min-max) des particules de 10 nm à 35 µm au cours du temps en fonction des périodes d'épuration permet de mettre en évidence que **l'épuration est efficace sur toutes les gammes de particules**, des plus grossières aux ultrafines. En effet, à chaque période d'épuration, les niveaux observés en nombre de particules correspondent quasi-systématiquement aux minimums observés sur la semaine pour chaque gamme de taille de particules (couleur bleu nuit). Le détail du calcul de la normalisation par le minimum et le maximum de chaque classe est détaillé en ANNEXE 7.

Figure 9 : Suivi de la distribution statistique des particules en fonction de la mise en marche des épurateurs d'air dans la salle A318



La présentation de la distribution statistique des particules en nombre de particules/cm³ présenté en ANNEXE 7 montre que les particules majoritaires correspondent à la gamme de 72 à 100 nm. Le faible nombre global de particules grossières (supérieures à 2.5 µm) et leur capacité de sédimentation au sol rend les résultats du calcul de l'efficacité de filtration de ces tailles de particules relativement inconstants. Nous nous concentrerons donc sur la gamme de particules de 10 nm à 2.5 µm pour les calculs d'abattement.

L'efficacité de filtration des épurateurs semble avoir un impact sur toutes les particules fines et ultrafines (de 10 nm à 2.5 µm) et dans une moindre mesure sur les particules plus grossières dont le nombre est significativement réduit.

⁷ Campagne nationale bureaux de l'OQAI : www.oqai.fr/fr/campagnes/la-campagne-nationale-bureaux

⁸ Morawaska et al. (Env Int 2017)

► Taux d'abattement des gammes de particules de 10 nm à 2.5 µm

Le tableau ci-après présente les décroissances des concentrations moyennes horaires des différentes classes de particules de 10 nm à 2 µm, entre la dernière heure avant mise en route de l'épurateur (vitesse 0) et la première heure de filtration (mode « travail »).

Tableau 3 : Efficacité d'épuration des gammes de particules de 10 nm à 2 µm dans la salle A318

Gammes de particules (nm)	total counts	10-14	14-19	19-27	27-37	37-52	52-72	72-100	100-139	139-193	193-253	253-298	298-352	352-414	414-488	488-576	576-679	679-800	800-943	943-1112	1112-1310	1310-1545	1545-1821	1821-2146	2146-2530	Ouv. fenêtre	Ouv. porte
Lundi 07/03	-71%	-68%	-69%	-70%	-70%	-71%	-71%	-71%	-71%	-70%	-70%	-71%	-71%	-71%	-70%	-69%	-67%	-66%	-63%	-67%	-61%	-63%	-59%	-61%	non	non	
Mardi 08/03	-70%	-68%	-70%	-71%	-72%	-71%	-71%	-69%	-69%	-67%	-63%	-62%	-62%	-64%	-64%	-65%	-62%	-56%	-51%	-45%	-50%	-47%	-39%	-47%	oui	non	
Mercredi 09/03	-52%	-44%	-48%	-50%	-51%	-52%	-52%	-51%	-51%	-51%	-54%	-56%	-57%	-58%	-58%	-56%	-55%	-52%	-48%	-51%	-52%	-51%	-54%	-53%	oui	non	
Jeudi 10/03	-61%	-54%	-56%	-58%	-60%	-60%	-60%	-61%	-62%	-61%	-61%	-63%	-63%	-64%	-65%	-64%	-63%	-62%	-61%	-59%	-58%	-60%	-60%	-57%	-45%	non	oui
Vendredi 10/03	-44%	-37%	-39%	-40%	-41%	-41%	-43%	-43%	-44%	-45%	-46%	-52%	-50%	-48%	-46%	-44%	-44%	-38%	-42%	-31%	-34%	-10%	-13%	-32%	12%	non	oui
Code couleur	100%	-100%																									

Il est observé d'importantes décroissances du nombre de particules dans la pièce, de l'ordre de 60 à 70 % sur toutes les gammes de particules de 10 nm à 2,5 µm quand les portes et fenêtres sont fermées (lundi 7 mars).

Dès qu'une porte ou une fenêtre reste ouverte pendant le temps de l'expérimentation d'épuration, l'efficacité d'épuration baisse, mais reste tout de même significative pour la plupart des gammes de particules (autour de 50 %).

L'efficacité de filtration est relativement homogène entre les différentes tailles de particules (notamment entre les particules fines et ultrafines). Ceci signifie que l'épurateur permet dans cette salle une efficacité tout aussi importante sur les particules ultrafines que sur les particules fines. Il est toutefois observé une décroissance de l'efficacité au-delà de 800 nm, pour lesquelles le nombre réduit de particules et les effets de sédimentation au sol biaisent les résultats du calcul d'abattement.

Nb : Il est à noter que le mode « travail », à 1 200 m³/h ne correspond pas à la vitesse maximale qui est de 2 000 m³/h en mode « décontamination ». Pour ce dernier, les taux d'efficacité devraient être plus importants comme cela a été démontré dans notre première étude comparant l'efficacité des différents modes dans une salle de réunion⁹ (efficacité pouvant aller jusqu'à 90 %). Ce mode « décontamination » peut être utilisé aux inter-cours afin de réduire d'avantage les niveaux de particules fines et ultrafines mais pas pendant les cours, puisque cela occasionne un bruit de fonctionnement trop important pour une salle d'enseignement (ce qui n'est pas le cas du mode « travail »).

La mise en route des épurateurs en mode « travail » (1 200 m³/h) occasionne une épuration significative (de l'ordre de 70 %) des particules fines et ultrafines au centre de la salle. Cela signifie qu'en dehors des nécessaires périodes d'ouverture des fenêtres, l'utilisation d'épurateurs de ce type avec les mêmes caractéristiques d'efficacité, peuvent s'avérer des outils intéressants pour limiter l'exposition aux particules fines et ultrafines en air intérieur et un outil complémentaire au renouvellement d'air dans la lutte contre la transmission des maladies infectieuses.

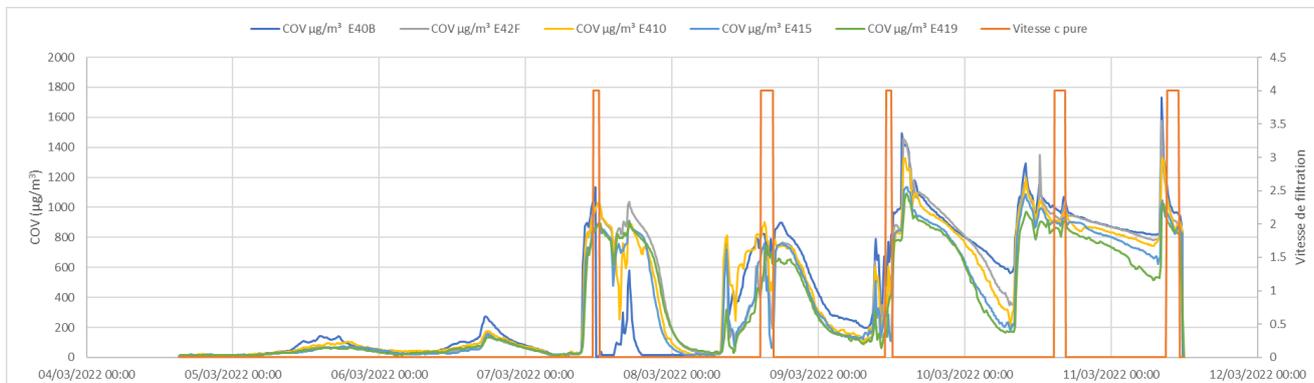
⁹ Evaluation de l'efficacité d'un épurateur d'air intérieur en condition réelle d'utilisation - Bâtiment de bureaux : <https://www.atmosud.org/publications/evaluation-de-lefficacite-dun-epurateur-dair-interieur-en-condition-reelle>

4.1.2 Paramètres de mesure des microcapteurs (PM10, PM2.5, PM1, COV, CO₂)

► COV

Le suivi des concentrations en COV des 5 microcapteurs répartis dans la salle de classe est le suivant :

Figure 10 : Suivi des concentrations en COV de la salle A318



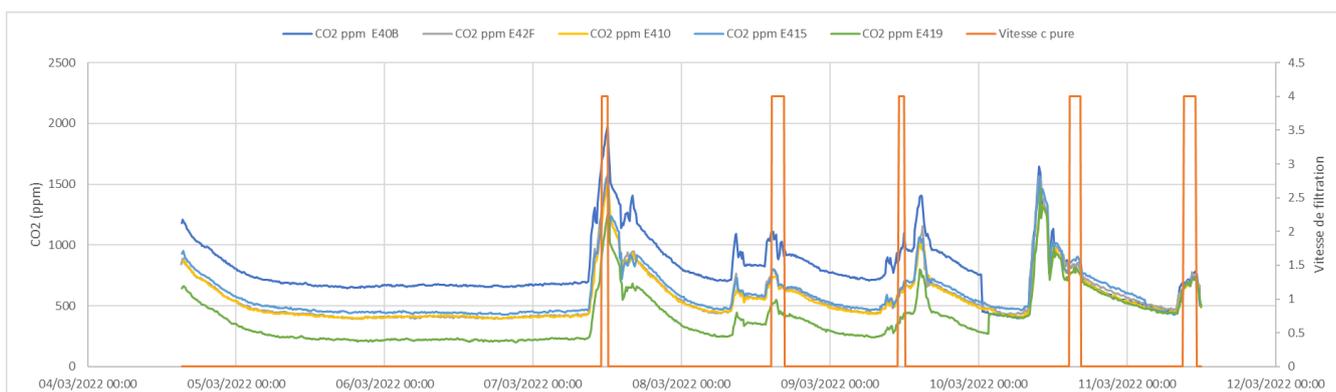
Les niveaux atteints en COV sont habituels pour des ambiances intérieures occupées. À chaque début de journée (entre 8h et 9h), les concentrations en COV augmentent. Malgré le fait que les épureurs cPure soient équipés de filtres à charbon actifs pouvant capturer certains COV, il n'est pas observé d'impact significatif des périodes d'épuration sur les niveaux de COV intérieurs.

La mise en route des épureurs dans la salle A318 ne semble pas avoir d'impact significatif sur les concentrations en COV.

► CO₂

Le suivi des concentrations en CO₂ des 5 microcapteurs répartis dans la salle de classe est le suivant :

Figure 11 : Suivi des concentrations en CO₂ de la salle A318



L'épuration d'air cPure n'est pas équipée de système permettant de piéger spécifiquement le CO₂. Les résultats de mesure des concentrations en CO₂ ne sont pas influencés par les périodes de mise en route de l'épuration. Seules les périodes de présence dans les locaux et le nombre d'occupants sans la pièce augmentent les concentrations, et les périodes d'ouverture des fenêtres les baissent. Cela confirme bien que l'utilisation de tels épureurs ne permet pas de réduire les niveaux de CO₂ et le confinement associé.

Pour information, les niveaux observés en CO₂ sur les périodes d'occupation dépassent la valeur repère du Haut Conseil de Santé Publique de 800 ppm et dépassent également ponctuellement la valeur d'action rapide de 1 500 ppm.

Le fonctionnement du système de ventilation double flux de cette salle de classe ne semble pas fournir un renouvellement d'air suffisant pour limiter l'accumulation du CO₂ expiré par les occupants, des COV intérieurs mais également pour limiter les phénomènes de transmission des maladies infectieuses.

Nb : Il est observé des différences de concentrations de fond (hors période de présence) entre les différents capteurs. Au bout de 6 jours, les capteurs s'auto-étalonnent. Ainsi, à partir du 10 mars les niveaux observés deviennent homogènes entre eux.

Le système de ventilation de la salle A318 ne permet pas un renouvellement d'air suffisant au regard des concentrations atteintes en CO₂.

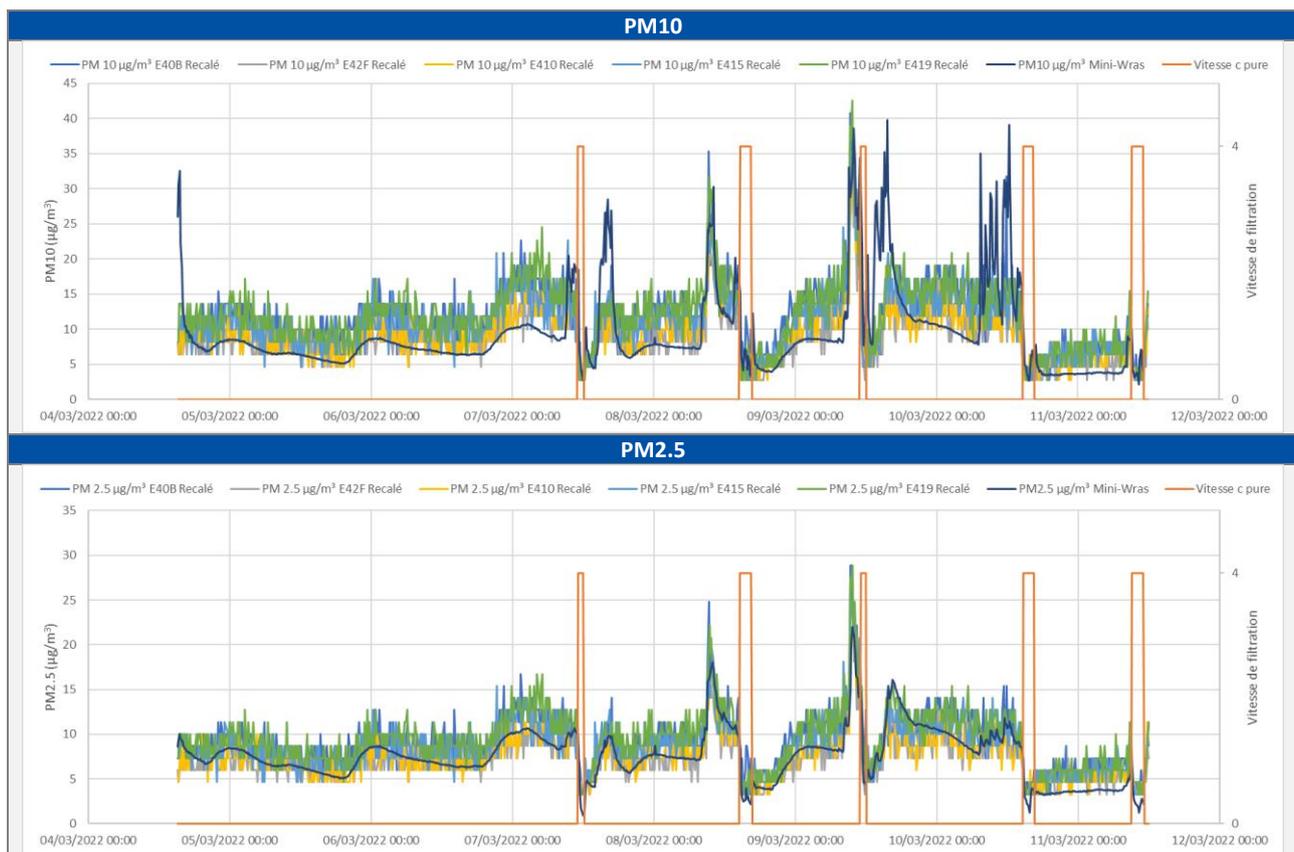
Les épurateurs d'air ne sont pas des systèmes de renouvellement d'air, ils ne permettent pas de diminuer le confinement et les concentrations associées en CO₂ en période d'occupation.

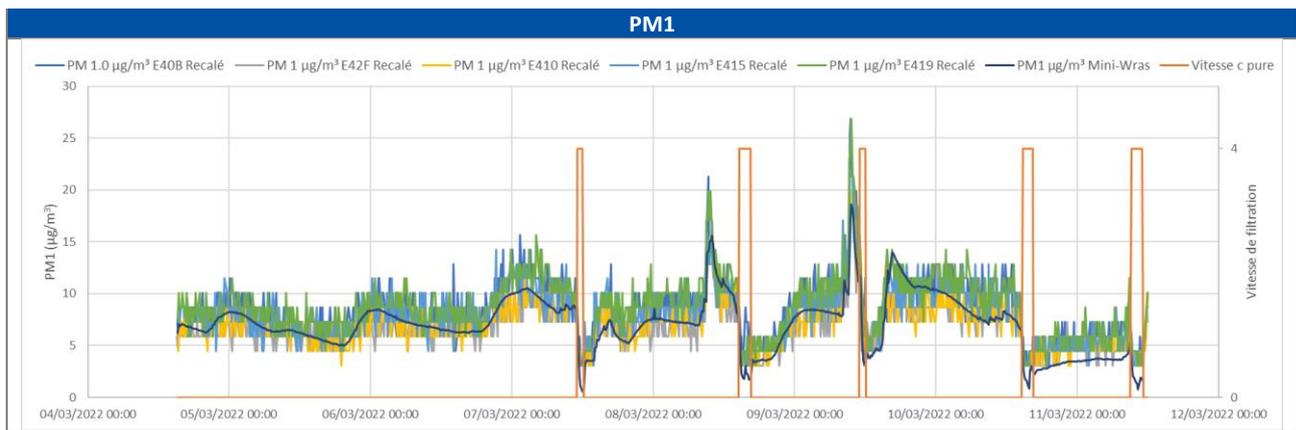
► PM10, PM2.5 et PM1 en masse

Les concentrations en particules fines PM10, PM2.5 et PM1 des microcapteurs ont été recalées selon la droite de régression linéaire entre les concentrations massiques du granulomètre et du microcapteur E410 situé au même point de mesure intérieur.

Le suivi des concentrations massiques en particules fines PM10, PM2.5 et PM1 recalées des 5 microcapteurs répartis dans la salle de classe et du granulomètre est le suivant :

Figure 12 : Suivi des concentrations en PM10, PM2.5 et PM1 de la salle A318





Les niveaux de particules fines sont globalement similaires d'un microcapteur à l'autre. L'évolution des concentrations au cours du temps est similaire entre les données du granulomètre et des microcapteurs.

Lors des phases d'épuration, il est bien observé une décroissance des concentrations en PM10, PM2.5 et PM1 quel que soit le capteur.

Les concentrations moyennes du lundi au vendredi en PM10, PM2.5 et PM1 sont respectivement de 11, 8 et 7 µg/m³. Les concentrations observées en PM2.5 sont inférieures à médiane des concentrations intérieures dans les écoles françaises¹⁰ de 18 µg/m³.

Les concentrations en PM10, PM2.5 et PM1 intérieures sont comparées aux concentrations des mêmes fractions de la station de fond urbain de Marseille/Longchamp en ANNEXE 5. Quelle que soit la fraction, les concentrations moyennes extérieures sur l'ensemble de la période en ce site sont 2,5 fois supérieures aux concentrations intérieures mesurées par le granulomètre.

La décroissance des concentrations en particules fines est bien observée quel que soit le positionnement des capteurs dans la salle.

► Efficacité de filtration

Les taux d'abattement des concentrations des particules fines, des COV et du CO₂ sont les suivants :

Tableau 4 : Efficacité d'épuration des PM10, PM2.5, PM1, COV et CO₂ dans la salle A318

MINI-WRAS	PM 1.0	PM 2.5	PM 10		
Lundi	-70%	-68%	-62%		
Mardi	-66%	-62%	-56%		
Mercredi	-54%	-52%	-46%		
Jeudi	-62%	-60%	-63%		
Vendredi	-47%	-43%	-43%		
E410	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-60%	-61%	-70%	17%	40%
Mardi	-64%	-63%	-71%	6%	13%
Mercredi	-53%	-54%	-59%	63%	16%
Jeudi	-59%	-58%	-70%	-1%	-3%
Vendredi	-42%	-44%	-53%	-16%	22%
E415	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-58%	-60%	-72%	12%	38%
Mardi	-56%	-56%	-60%	18%	15%
Mercredi	-61%	-62%	-66%	-8%	19%
Jeudi	-59%	-54%	-65%	0%	8%
Vendredi	-53%	-53%	-66%	-7%	28%
E419	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-64%	-64%	-74%	16%	56%
Mardi	-60%	-60%	-69%	48%	16%
Mercredi	-45%	-47%	-55%	203%	28%
Jeudi	-56%	-58%	-69%	0%	7%
Vendredi	-37%	-36%	-48%	-5%	25%

¹⁰ Campagne Nationale Ecole de l'OQAI : www.oqai.fr/fr/campagnes/campagne-nationale-ecoles-n01

E42F	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-58%	-57%	-70%	14%	34%
Mardi	-50%	-52%	-64%	19%	8%
Mercredi	-60%	-62%	-69%	67%	18%
Jeudi	-55%	-56%	-68%	-3%	-4%
Vendredi	-41%	-40%	-53%	-21%	15%
E40B	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-49%	-46%	-53%	-50%	33%
Mardi	-38%	-43%	-48%	4%	1%
Mercredi	-38%	-44%	-45%	43%	16%
Jeudi	-47%	-52%	-62%	-2%	-3%
Vendredi	-44%	-42%	-48%	-25%	12%

Code couleur -100% >=100%

L'efficacité d'épuration des particules sur les données du granulomètre en masse est similaire à celle obtenue sur les particules en nombre : respectivement de 70, 68 et 62 % pour les PM1, PM2.5 et PM10 en condition de porte et fenêtre fermées.

L'efficacité d'épuration de particules calculées à partir des données du microcapteur E410 situé au même point de mesure intérieur est comparable à celle du granulomètre, à la différence près que les tendances sont inversées entre les fractions, avec une meilleure efficacité pour les PM10.

L'information principale que procurent les mesures de particules fines des microcapteurs est que **l'efficacité d'épuration est relativement homogène aux différents points de mesure** (de l'ordre de 60 % sur les PM2.5 en conditions porte et fenêtre fermées). Seul le capteur le plus éloigné des épurateurs et situé à proximité de l'unique fenêtre (E40B) montre des taux d'efficacité moins importants mais qui restent significatifs (de l'ordre de 45 % porte et fenêtre fermées). En conditions de fenêtre ou porte ouverte, l'efficacité de filtration des particules fines diminue sur la quasi-totalité des microcapteurs.

Les calculs d'efficacité de filtration des COV confirment bien qu'il n'est pas observé d'influence significative de la mise en marche des épurateurs sur les concentrations de ces derniers. Il en est de même pour les concentrations en CO₂ qui sont même plus importantes pendant les périodes filtration puisque les élèves sont déjà présents depuis 1h et restent dans la salle, les concentrations continuent donc d'augmenter.

L'efficacité de filtration des particules fines est relativement homogène aux cinq points de mesures réparties dans la salle de classe. Il n'est pas observé d'impact positif de la filtration sur les concentrations en COV et CO₂.

La mise en marche des épurateurs dans la salle A318 occasionne une baisse de 50 à 70 % des particules fines en fonction de la localisation du point de mesure, lorsque la porte et la fenêtre sont fermées. L'ouverture de l'une d'entre elles diminue l'efficacité de filtration en raison de l'apport de particules depuis d'extérieur. L'efficacité de filtration des particules est spatialement homogène entre les points de mesure au centre et aux quatre coins de la salle.

La filtration ne semble pas avoir d'influence sur les concentrations en COV de la pièce. L'épuration n'étant pas un système de renouvellement d'air, il n'a pas d'impact sur les concentrations intérieures en CO₂.

4.2 Salle A326

► Nombre total de particules de 10 nm à 35 µm

Le suivi du nombre total de particules en fonction de la mise en marche des systèmes d'épuration dans cette salle de classe **permet également de mettre en évidence la décroissance systématique du nombre de particules lors des phases d'épuration**.

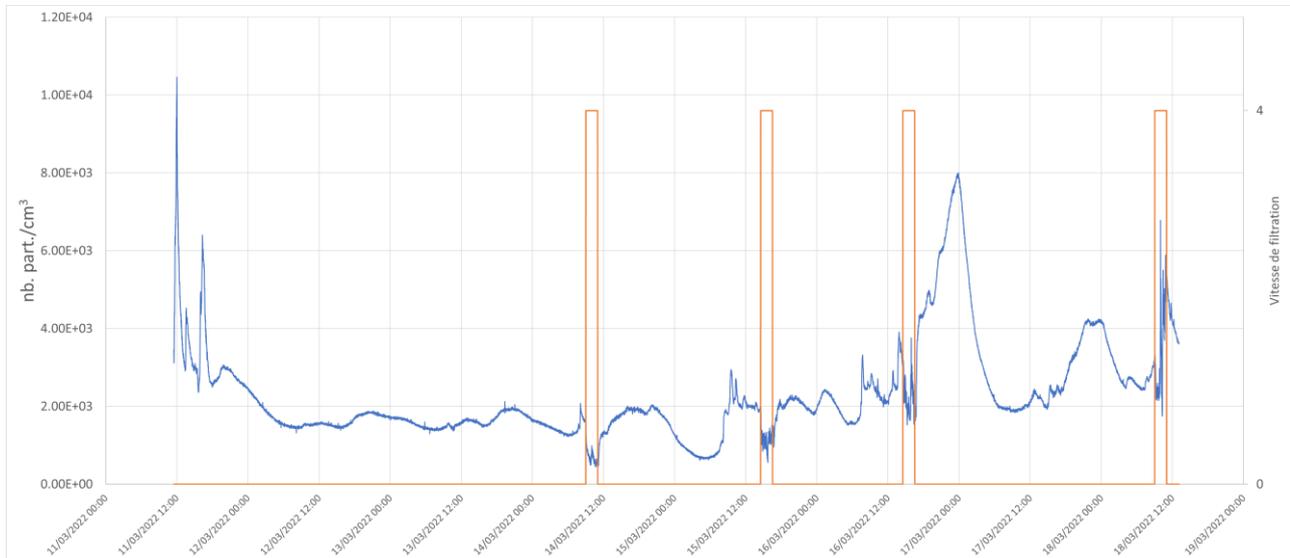
L'analyse des données a permis d'identifier 2 deux anomalies dans les périodes de mise en marche de la filtration des épurateurs :

- Le lundi 14 mars : la filtration devait être activée à 11h sur le créneau de présence des terminales STI2D de 10h à 12h mais aucune réduction des concentrations n'a été observée. La filtration a en revanche été mise

en marche lors du créneau précédent à 9h lors du cours des premières « SI » de 8h à 10h, au cours duquel une réduction significative du nombre de particules a été observée.

- Le jeudi 18 mars : Aucune réduction des concentrations en particules n'a été observée sur le créneau établi. Cela s'est avéré normal puisqu'il s'agissait d'une journée de grève.

Figure 13 : Suivi du nombre de particules en fonction de la mise en marche des épurateurs d'air dans la salle A326



La comparaison des concentrations intérieures en nombre de particules de 10 nm à 2.5 µm de cette salle est comparée aux concentrations extérieures de 7 nm à 2.5 µm la station de fond urbain de Marseille/Longchamp en ANNEXE 8. Les concentrations moyennes extérieures à Marseille Longchamp sur la période sont plus de 4 fois supérieures à celles l'intérieur de la salle A318.

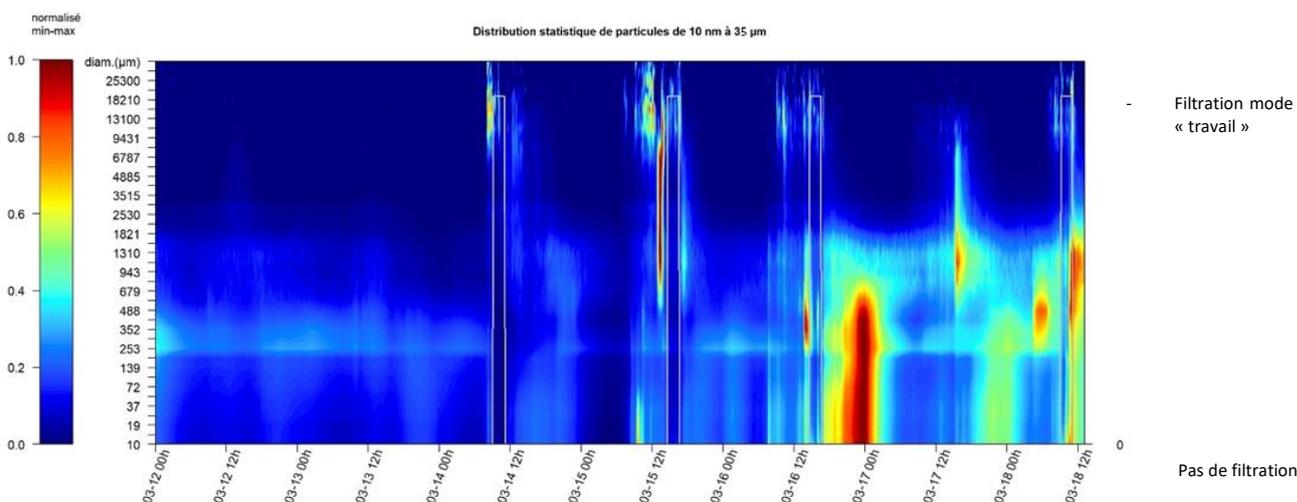
Sur la période de mesure dans la salle A326, l'évolution des concentrations extérieures au cours du temps semble avoir d'avantage influencé les niveaux intérieurs que lors des mesures dans la salle A318. En effet, le pic le plus important en intérieur est synchrone avec le pic le plus important à l'extérieur, le 17 mars en fin de soirée. Ceci semble indiquer que dans cette salle de classe, l'augmentation des niveaux de particules fines et ultrafines peut impacter de manière significative les concentrations intérieures mêmes lorsque les portes et fenêtres sont fermées. Cet apport plus important de particules de l'extérieur peut être influencé par un éventuel renouvellement d'air plus important et donc un moindre confinement.

La mise en marche des épurateurs permet une baisse significative du nombre total de particules de 10 nm à 35 µm. Les concentrations moyennes extérieures de la station de fond urbain de Marseille sont 4 fois supérieures à celles de l'intérieur de la salle A326.

► Distribution statistique des particules de 10 nm à 35 µm sur 41 canaux

La présentation des résultats de la distribution statistique normalisée des particules au cours du temps en fonction des périodes d'épuration permet également de mettre en évidence dans cette salle de classe que **l'épuration est efficace sur toutes les gammes de particules**, des plus grossières aux ultrafines. En effet, à chaque période d'épuration, les niveaux observés en nombre de particules correspondent quasi-systématiquement aux minimums observés sur la semaine pour chaque gamme de taille de particules (couleur bleu nuit). Néanmoins, l'efficacité de filtration semble réduite par rapport à celle de la salle A318.

Figure 14 : Suivi de la distribution statistique des particules dans la salle A326



L'efficacité de filtration des épurateurs semble avoir un impact sur toutes les particules fines et ultrafines (de 10 nm à 2.5 µm) et dans une moindre mesure sur les particules plus grossières dont le nombre est beaucoup moins important. Cette efficacité semble néanmoins réduite par rapport à la salle A318.

► **Taux d'abattement des gammes de particules de 10 nm à 2.5 µm**

Le tableau ci-après présente les décroissances des concentrations moyennes horaires des différentes classes de particules de 10 nm à 2,5 µm, entre la dernière heure avant mise en route de l'épurateur (vitesse 0) et la première heure de filtration (mode « travail »).

Tableau 5 : Efficacité d'épuration des gammes de particules de 10 nm à 2,5 µm dans la salle A326

Gammes de particules (nm)	total counts	10-14	14-19	19-27	27-37	37-52	52-72	72-100	100-139	139-193	193-253	253-298	298-352	352-414	414-488	488-576	576-679	679-800	800-943	943-1112	1112-1310	1310-1545	1545-1821	1821-2146	2146-2530	Ouv. fenêtre	Ouv. porte
Lundi 14/03	-55%	-52%	-53%	-55%	-56%	-56%	-54%	-54%	-54%	-53%	-57%	-57%	-55%	-55%	-55%	-55%	-55%	-49%	-49%	-54%	-51%	-52%	-46%	-47%	oui	non	
Mardi 15/03	-39%	-30%	-33%	-36%	-37%	-38%	-38%	-37%	-39%	-40%	-42%	-42%	-43%	-45%	-47%	-49%	-53%	-51%	-52%	-57%	-59%	-57%	-59%	-62%	-68%	oui	oui
Mercredi 16/03	-31%	-17%	-25%	-31%	-34%	-35%	-33%	-30%	-29%	-28%	-27%	-30%	-35%	-39%	-42%	-40%	-37%	-35%	-35%	-32%	-27%	-29%	-28%	-24%	-28%	oui	oui
Vendredi 18/03	-8%	18%	10%	3%	-4%	-7%	-9%	-7%	-9%	-11%	-7%	-21%	-22%	-22%	-21%	-21%	-22%	-22%	-18%	-15%	-15%	-8%	-6%	-2%	-1%	oui	oui
Code couleur	100%	-100%																									

Dans cette classe, lors de toutes les périodes d'expérimentation, la fenêtre donnant sur l'espace intérieur du grand hall du bâtiment est restée ouverte. Dans cette situation occasionnant des mouvements d'air entre l'intérieur de la salle de classe et le hall, il est observé des décroissances du nombre de particules similaires à celles de la salle A318 lorsque la fenêtre était ouverte (lundi 14 mars) : de l'ordre de 50 à 60 % sur toutes les gammes de particules de 10 nm à 2,5 µm.

À partir du mardi, pour l'ensemble des jours d'expérimentation, la porte est restée ouverte en plus de la fenêtre, ce qui a occasionné une réduction de l'efficacité de la filtration. Les taux d'abattement des particules observés sont plus faibles que dans la salle A318 puisqu'elle n'a jamais été en configuration portes et fenêtres ouvertes en même temps lors d'une expérimentation. Ces conditions occasionnent des courants d'air qui traversent la salle de manière transversale.

Le vendredi 18 mars a montré une efficacité moins importante, en lien avec une augmentation du nombre de particules totales à la fin de l'heure de filtration, ce qui pourrait être dû à une activité intérieure non renseignée.

Nb : Le fait de mesurer une moindre efficacité de la filtration en conditions de portes et/ou fenêtre fermées ne signifie pas que l'épurateur filtre moins bien, mais uniquement que dans ces conditions d'échanges intérieur/extérieur, le nombre de particules diminue moins, en raison de l'apport de particules depuis l'extérieur. Cela revient à filtrer un volume d'air beaucoup plus grand voir quasi-infini.

Lorsque seule la fenêtre est ouverte, l'efficacité de filtration est relativement homogène entre les différentes tailles de particules (notamment entre les particules fines et les PUF). En revanche, l'ouverture simultanée de la porte et de la fenêtre, rend moins homogène l'efficacité de filtration de la salle (en plus de la baisse globale d'efficacité). Ceci peut être dû aux mouvements d'air transversaux occasionnés par ces ouvertures qui renouvellent l'air de manière hétérogène dans la salle de classe.

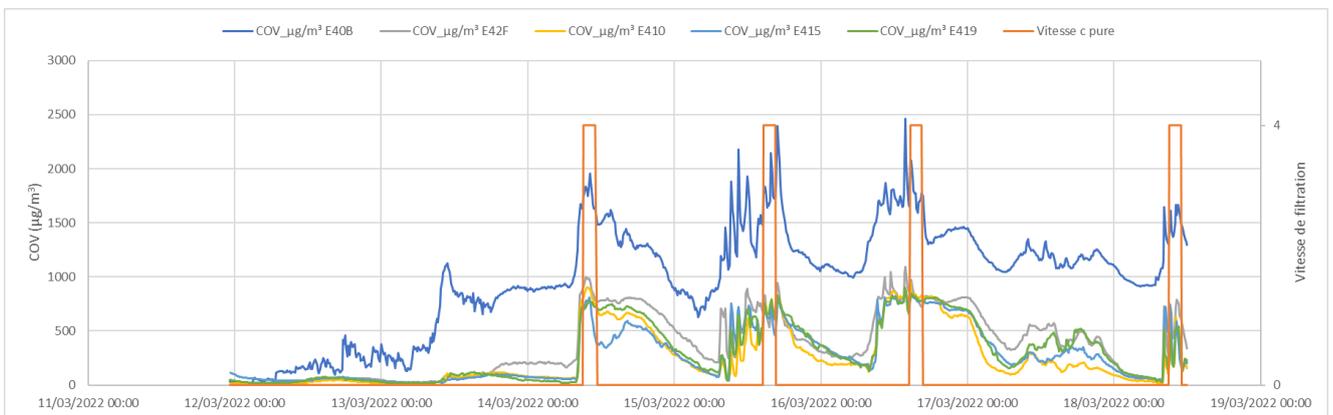
La mise en route des épurateurs en mode « travail » occasionne une épuration significative (de l'ordre de 50 à 60 %) des particules fines et ultrafines au centre de la salle alors qu'une fenêtre est ouverte. L'ouverture de la porte en complément de la fenêtre fait baisser l'efficacité mesurée de la filtration. Cela signifie que même avec des ouvrants ouverts, l'utilisation d'épurateurs avec les mêmes caractéristiques d'efficacité permettent de limiter l'exposition des occupants aux particules fines et ultrafines en air intérieur.

4.2.2 Paramètres de mesure des microcapteurs (PM10, PM2.5, PM1, COV, CO₂)

► COV

Le suivi des concentrations en COV des 5 microcapteurs répartis dans la salle de classe est le suivant :

Figure 15 : Suivi des concentrations en COV de la salle A326



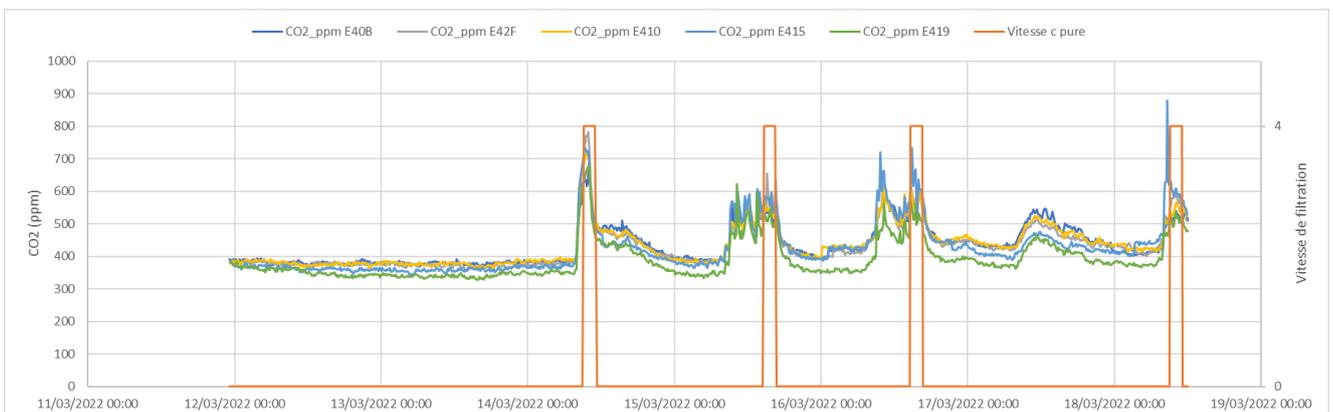
Le capteur E40B situé à proximité de la fenêtre montre des niveaux en COV supérieurs aux autres mais sa dynamique au cours du temps est similaire à partir du lundi. Les niveaux des autres capteurs sont du même ordre que ceux de la salle A318. À chaque début de journée (entre 8h et 9h), les concentrations en COV augmentent. Malgré le fait que les épurateurs cPure soient équipés de filtres à charbon actifs pouvant capturer certains COV, il n'est pas observé d'impact positif des périodes d'épuration sur les niveaux de COV intérieurs.

La mise en route des épurateurs dans la salle A326 ne semble pas avoir d'impact positif significatif sur les concentrations en COV.

► CO₂

Le suivi des concentrations en CO₂ des 5 microcapteurs répartis dans la salle de classe est le suivant :

Figure 16 : Suivi des concentrations en CO₂ de la salle A326



Comme dans la salle A318, les résultats de mesure des concentrations en CO₂ ne sont pas influencés par les périodes de mise en route de l'épurateur. Seules les périodes de présence dans les locaux, le nombre d'occupants dans la pièce et les périodes d'ouverture influence les concentrations en CO₂. L'utilisation de tels épurateurs ne permet pas de réduire les niveaux de CO₂ et le confinement associé.

Pour information, les niveaux observés en CO₂ dans cette salle de classe sont inférieurs à ceux de la salle A318, les concentrations ne dépassent que très ponctuellement la valeur repère du Haut Conseil de Santé Publique de 800 ppm. Sachant que l'occupation des 2 salles de classe sont similaires en termes de nombre d'étudiants, **il semble que le renouvellement d'air soit meilleur dans la salle A326** puisque les concentrations atteintes en CO₂ sont globalement inférieures même avec les ouvrants ouverts. Ce renouvellement d'air plus important dans cette salle de classe peut expliquer la plus grande influence de l'évolution des concentrations extérieures sur celle des concentrations intérieures.

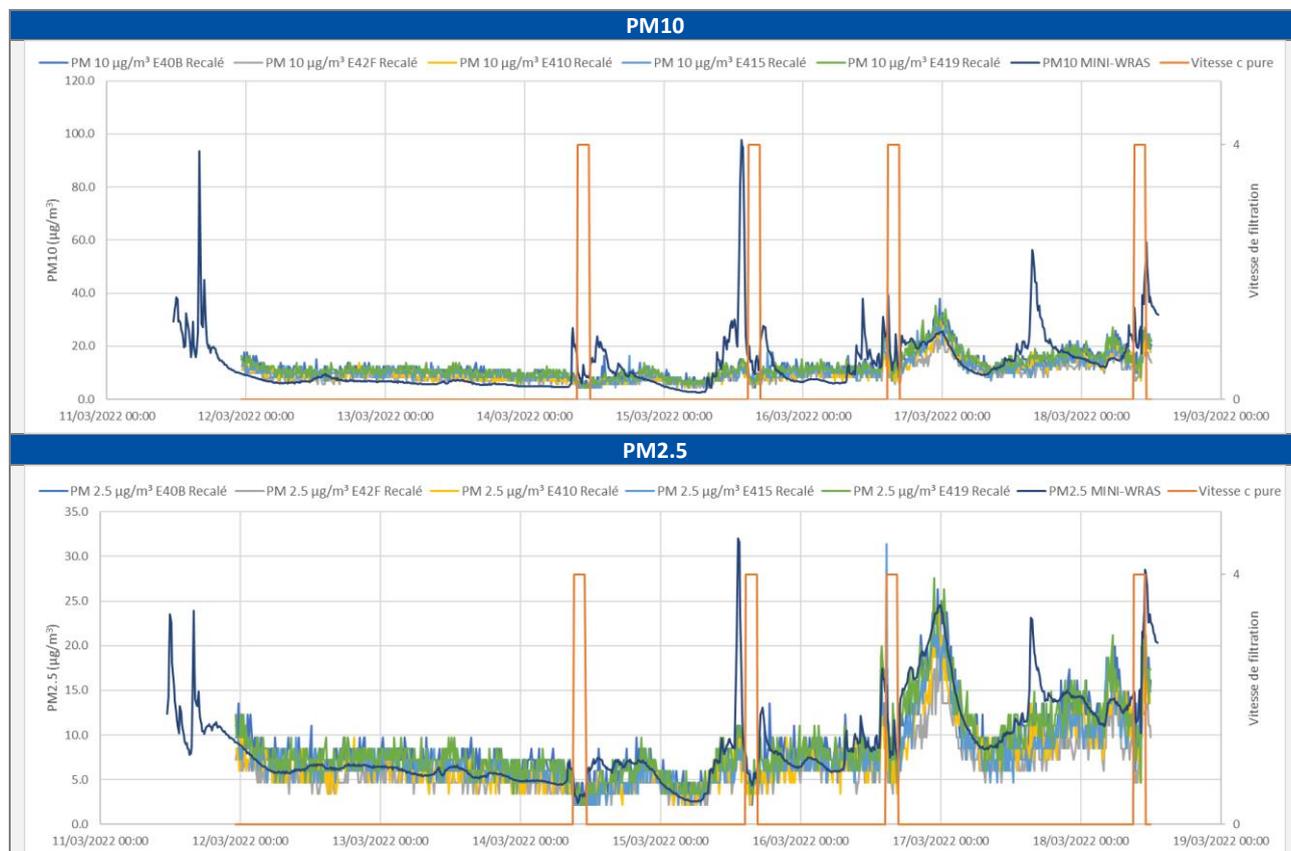
Les épurateurs d'air ne sont pas des systèmes de renouvellement d'air, ils ne permettent donc pas de diminuer le confinement et les concentrations associées en CO₂ en période d'occupation. Le renouvellement d'air de la salle A326 semble plus important que celui de la salle A318.

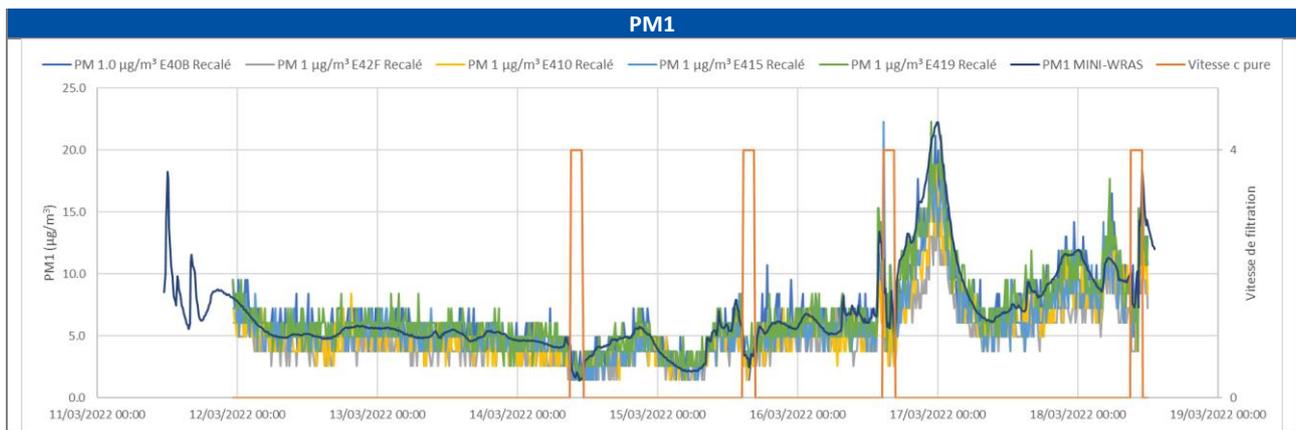
► PM10, PM2.5 et PM1 en masse

Les concentrations en particules fines PM10, PM2.5 et PM1 des microcapteurs ont été recalées selon la droite de régression linéaire entre les concentrations massiques du granulomètre et du microcapteur E419 situé au même point de mesure intérieur.

Le suivi des concentrations recalées des fractions PM10, PM2.5 et PM1 des 5 microcapteurs répartis dans la salle de classe et du granulomètre est le suivant :

Figure 17 : Suivi des concentrations en PM10, PM2.5 et PM1 de la salle A326





Comme dans la salle A318, les niveaux de particules fines sont globalement similaires d'un microcapteur à l'autre et suivent la dynamique des concentrations du granulomètre. Lors des phases d'épuration, il est bien observé une décroissance des concentrations en PM10, PM2.5 et PM1 quel que soit le capteur.

Les concentrations en PM10, PM2.5 et PM1 intérieures sont comparées aux concentrations des mêmes fractions de la station de fond urbain de Marseille Longchamp (cf. ANNEXE 8). Les concentrations moyennes extérieures sur l'ensemble de la période en ce site sont 1,5 à 2 fois supérieures aux concentrations intérieures du granulomètre.

La décroissance des concentrations en particules fines est bien observée quel que soit le positionnement des capteurs dans la salle. L'efficacité d'épuration des particules est donc relativement homogène dans la salle A326.

► Efficacité de filtration

Les taux d'abattement des concentrations des particules fines, des COV et du CO₂ sont les suivants :

Tableau 6 : Efficacité d'épuration des PM10, PM2.5, PM1, COV et CO₂ dans la salle A326

MINI-WRAS	PM 1.0	PM 2.5	PM 10		
Lundi	-54%	-52%	-60%		
Mardi	-44%	-56%	-67%		
Mercredi	-32%	-31%	-24%		
Vendredi	-14%	-8%	-2%		
E40B	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-34%	-36%	-27%	16%	16%
Mardi	-41%	-38%	-35%	15%	2%
Mercredi	-37%	-36%	-33%	-1%	8%
Vendredi	-20%	-17%	-15%	3%	4%
E42F	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-45%	-43%	-31%	29%	27%
Mardi	-51%	-54%	-40%	-7%	6%
Mercredi	-55%	-56%	-49%	-7%	5%
Vendredi	-35%	-36%	-32%	30%	12%
E410	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-40%	-41%	-34%	47%	12%
Mardi	-20%	-27%	-22%	44%	0%
Mercredi	-38%	-39%	-33%	5%	4%
Vendredi	-30%	-25%	-22%	72%	5%
E415	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-33%	-28%	-23%	35%	13%
Mardi	-20%	-15%	-15%	28%	2%
Mercredi	0%	0%	-1%	1%	16%
Vendredi	-20%	-21%	-19%	-33%	-9%
E419	PM 1.0	PM 2.5	PM 10	COV	CO ₂
Lundi	-32%	-29%	-25%	52%	21%
Mardi	-44%	-50%	-41%	47%	4%
Mercredi	-40%	-40%	-37%	5%	15%
Vendredi	-22%	-23%	-20%	20%	8%
Code couleur	-100%	>=100%			

L'efficacité d'épuration sur les particules du granulomètre en masse est similaire à celle obtenue sur les particules en nombre : de l'ordre de 50 à 60 % avec la fenêtre donnant sur le grand espace du hall du bâtiment.

L'efficacité d'épuration des particules calculées à partir des données du microcapteur E419, situé au même point de mesure intérieur, est du même ordre que celle du granulomètre pour le mardi et le mercredi mais inférieure le lundi et supérieure le vendredi.

Le calcul de l'efficacité de filtration des particules fines par les microcapteurs confirme dans l'ensemble de la pièce la tendance montrée avec le granulomètre, à savoir que dans cette salle, lors de cette période avec toujours au moins un ouvrant ouvert, les taux d'efficacité sont moins importants que dans la salle A318 porte et fenêtre fermée.

Néanmoins, **l'efficacité de filtration reste relativement homogène et significative**. Seules les données du capteur E415 situé sur un bureau à proximité de l'entrée a montré une efficacité nulle lors du créneau d'expérimentation du mercredi. Lors du début de la période de filtration correspondante, un pic ponctuellement important de concentration en particules fines a été observé et donc comptabilisé dans la moyenne ce qui est venu compenser mathématiquement l'impact positif de l'épuration.

Les mesures de CO₂ indiquent que le renouvellement d'air de la salle A326 est plus important que celui de la salle A318, ce qui entraîne un apport plus important d'air extérieur chargé de particules et minimise l'efficacité de filtration.

Enfin, comme dans la salle A318, les calculs d'efficacité de filtration sur les COV confirment bien qu'il n'est pas observé d'influence positive de la mise en marche des épurateurs sur les concentrations en COV et CO₂.

Malgré une moindre efficacité de filtration des particules fines dans cette salle de classe en raison de l'ouverture constante d'un ou de plusieurs ouvrants, l'efficacité reste significative et relativement homogène aux cinq points de mesures réparties dans la salle de classe. Il n'est pas observé d'impact positif de la filtration sur les concentrations en COV et CO₂.

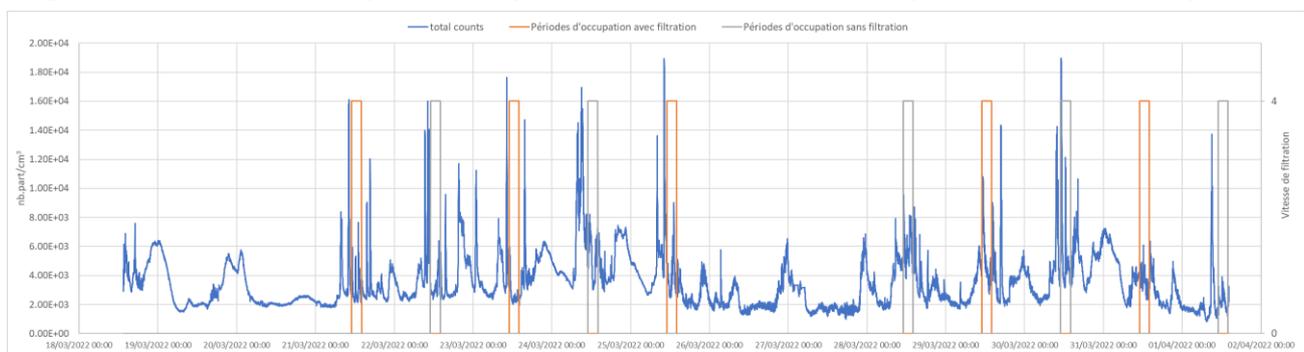
La mise en marche des épurateurs dans la salle A326 occasionne une baisse de 50 à 60 % des particules fines et ultrafines lorsqu'un seul ouvrant est ouvert. L'ouverture d'un deuxième ouvrant (porte) diminue l'efficacité de filtration en raison de l'apport de particules depuis d'extérieur de la pièce. L'efficacité de filtration des particules reste significative et spatialement homogène entre les points de mesure au centre et aux quatre coins de la salle. Il n'est pas mesuré d'influence de la filtration sur les concentrations en COV et CO₂ de la pièce.

4.3 Réfectoire

► Nombre total de particules de 10 nm à 35 µm

L'évolution du nombre total de particules en fonction de la mise en marche des systèmes dans le réfectoire est la suivante :

Figure 18 : Suivi du nombre de particules en fonction de la mise en marche des épurateurs d'air dans le réfectoire



Dans le réfectoire, la décroissance du nombre total de particules lors des périodes d'occupation avec filtration en comparaison des périodes sans filtration n'est pas évidente à première vue.

Les concentrations intérieures en nombre de particules de 10 nm à 2.5 µm sont comparées aux concentrations extérieures de 7 nm à 2.5 µm la station de fond urbain de Marseille/Longchamp en ANNEXE 9. Les concentrations moyennes extérieures sur la période sont près de 3.5 fois supérieures qu'à l'intérieur du réfectoire.

La distribution statistique des particules présentée en ANNEXE 10 ne permet pas non plus de mettre en évidence l'efficacité d'épuration de la filtration dans cette pièce.

Les périodes d'épuration ne semblent avoir qu'un impact limité sur les concentrations intérieures en particules fines et ultrafines dans cette pièce.

► **Taux d'abattement des gammes de particules de 10 nm à 2.5 µm entre les périodes d'occupation avec et sans filtration**

La comparaison des concentrations moyennes des périodes d'occupation (11h à 14h) entre les jours avec et sans filtration est présentée dans le tableau ci-après :

Tableau 7 : Différences du nombre de particules de 10 nm à 2,5 µm entre les périodes d'occupation avec et sans filtration dans le réfectoire

Gammes de particules (nm)	Total 10nm-2.5µm	10-14	14-19	19-27	27-37	37-52	52-72	72-100	100-139	139-193	193-253	253-298	298-352	352-414	414-488	488-576	576-679	679-800	800-943	943-1112	1112-1310	1310-1545	1545-1821	1821-2146	2146-2530
Moyenne des concentrations en particules des périodes de filtration de 11h à 14h (nb.part/cm³)	3714	14	49	112	248	463	622	745	667	479	159	82	36	19	10	3.4	1.7	0.7	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.14
Moyenne des concentrations en particules des périodes sans filtration de 11h à 14h (nb.part/cm³)	4452	15	55	125	279	527	723	882	820	611	207	106	48	27	15	5.1	2.6	1.0	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.18
Abattement des particules entre les périodes de 11h à 14h sans et avec	-17%	-9%	-10%	-10%	-11%	-12%	-14%	-15%	-19%	-22%	-23%	-23%	-25%	-28%	-33%	-34%	-33%	-29%	-25%	-23%	-23%	-24%	-26%	-25%	-23%
Code couleur	100%	-100%																							

La comparaison des niveaux moyens de particules lors des périodes de présence des occupants du réfectoire (de 11h à 14h) montre une **réduction moyenne de 12 % pour les particules ultrafines (< 100 nm) et de 25 % pour les particules de 100 nm à 2,5 µm**. Malgré la mise en place de 6 épurateurs dans cette salle de 1200 m³ (soit 200 m³ par épurateur), l'efficacité de filtration semble significativement moins importante que celle des salles de classes avec 2 épurateurs pour 420 m³ (soit 210 m³ par épurateur).

À la différence des salles de classes, il n'était pas possible de tracer précisément les périodes d'ouverture des fenêtres du réfectoire. Néanmoins, durant la période de cette expérimentation, il s'avère que les fenêtres ont été régulièrement ouvertes en lien avec des températures clémentes sur cette période. De plus, la salle du réfectoire est semi-ouverte sur la cuisine et les portes donnant sur la salle de restauration des enseignants et sur un couloir en fond de salle restent systématiquement ouvertes. Ainsi, l'apport fréquent de particules issues de l'extérieur et les volumes d'air complémentaires de l'espace cuisine, de la salle de restauration des enseignants et du couloir peuvent expliquer le manque d'efficacité des épurateurs dans cet environnement.

Les jours de filtration ont présenté une réduction des concentrations de particules fines et ultrafines de 10 à 35 %, en fonction des tailles de particules, sur les périodes d'occupation de 11h à 14h, par rapport aux mêmes périodes des jours sans filtration.

► **Taux d'abattement des gammes de particules de 10 nm à 2.5 µm entre les périodes de filtration et les 3 heures qui précèdent**

Les différences de concentrations en particules entre les périodes d'occupation (de 11 à 14h) et les périodes de 3h qui précèdent (de 9h à 11h) ont été comparées entre les jours avec et sans filtration dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Différences du nombre de particules de 10 nm à 2,5 µm entre périodes d'occupation (11h- 14h) avec ou sans filtration par rapport aux 3 heures qui précèdent (9h-11h) dans le réfectoire

Gammes de particules (nm)	Total 10nm-2.5µm	10-14	14-19	19-27	27-37	37-52	52-72	72-100	100-139	139-193	193-253	253-298	298-352	352-414	414-488	488-576	576-679	679-800	800-943	943-1112	1112-1310	1310-1545	1545-1821	1821-2146	2146-2530
Lundi 21/03 avec filtration (11h-14h)	-25%	-4%	-8%	-11%	-13%	-17%	-22%	-25%	-28%	-29%	-30%	-32%	-38%	-43%	-49%	-47%	-38%	-18%	11%	54%	88%	129%	213%	238%	127%
Mardi 22/03 sans filtration (11h-14h)	-44%	-35%	-35%	-35%	-37%	-38%	-41%	-45%	-48%	-48%	-48%	-42%	-47%	-51%	-52%	-38%	-16%	17%	56%	110%	142%	182%	206%	182%	137%
Mercredi 23/03 avec filtration (11h-14h)	-47%	-42%	-41%	-41%	-41%	-43%	-44%	-47%	-50%	-51%	-51%	-47%	-51%	-55%	-62%	-57%	-47%	-22%	15%	62%	102%	144%	183%	180%	122%
Jeudi 24/03 sans filtration (11h-14h)	-41%	-37%	-37%	-37%	-38%	-40%	-41%	-42%	-43%	-43%	-42%	-32%	-35%	-41%	-50%	-54%	-55%	-44%	-17%	38%	90%	159%	240%	241%	193%
Vendredi 25/03 avec filtration (11h-14h)	-41%	-32%	-33%	-34%	-35%	-36%	-38%	-39%	-43%	-47%	-48%	-40%	-47%	-56%	-66%	-68%	-68%	-63%	-53%	-44%	-37%	-31%	-28%	-30%	-25%
Lundi 28/03 sans filtration (11h-14h)	16%	38%	35%	33%	31%	29%	26%	21%	11%	1%	-8%	-7%	-2%	1%	2%	1%	5%	8%	15%	42%	68%	114%	165%	130%	49%
Mardi 29/03 avec filtration (11h-14h)	23%	56%	55%	54%	50%	47%	39%	30%	14%	-2%	-12%	-6%	2%	15%	20%	19%	20%	25%	36%	44%	56%	76%	98%	98%	66%
Mercredi 30/03 sans filtration (11h-14h)	2%	9%	8%	7%	7%	5%	3%	-1%	-2%	0%	2%	13%	25%	41%	61%	73%	71%	61%	53%	38%	30%	27%	14%	8%	31%
Jeudi 31/03 avec filtration (11h-14h)	-1%	5%	4%	3%	1%	0%	-2%	-1%	-4%	-5%	-6%	13%	21%	28%	34%	27%	21%	16%	16%	24%	27%	44%	52%	34%	2%
Vendredi 01/04 sans filtration (11h-14h)	-31%	-39%	-38%	-37%	-37%	-36%	-36%	-34%	-29%	-18%	-5%	23%	9%	-3%	-9%	-6%	3%	1%	-8%	-21%	-30%	-35%	-36%	-23%	-4%
Moyenne d'abattement des périodes de 11h à 14h avec filtration	-18%	-30%	-31%	-32%	-33%	-35%	-37%	-40%	-43%	-43%	-44%	-39%	-43%	-49%	-56%	-53%	-45%	-26%	2%	44%	77%	116%	163%	162%	111%
Moyenne d'abattement des périodes de 11h à 14h sans filtration	-20%	-13%	-13%	-14%	-15%	-16%	-18%	-20%	-22%	-22%	-20%	-9%	-10%	-11%	-10%	-5%	1%	9%	20%	42%	60%	89%	118%	107%	81%
Code couleur	100%	-100%																							

Le calcul de l'efficacité de la période de 3 heures d'occupation (11h à 14h) par rapport aux 3 heures qui précèdent présente des résultats hétérogènes en fonction des jours qui ne semblent que peu influencés par les périodes de filtration. Les particules inférieures à 800 nm ont tendance à être globalement inférieures pendant les périodes d'occupation. Ceci pourrait être expliqué par les émissions intérieures des activités de cuisine, connues pour produire des particules fines et ultrafines, qui augmentent les concentrations avant la période d'occupation sur les périodes de 9h à 11h.

À l'inverse, les concentrations en particules supérieures à 800 nm présentent des concentrations supérieures pendant la période d'occupation, vraisemblablement en lien avec la remise en suspension des particules plus grossières qui sédimentent au sol pendant les périodes d'inoccupation.

Lors des périodes de filtration, il est observé une baisse plus importante des particules inférieures à 800 nm par rapport aux périodes sans filtration en occupation, qui est compensée par une augmentation des niveaux des particules supérieures à 800 nm.

Les émissions de particules fines et ultrafines liées aux activités de cuisine qui précèdent l'occupation du réfectoire occasionnent une baisse des particules inférieures à 800 nm lors des périodes d'occupation (qui sont en général aérées) que ce soit pour les jours avec ou sans filtration. Cette baisse est plus importante lors des jours de filtration.

Dans le réfectoire, malgré un nombre d'épurateurs proportionnel au volume, la mise en route des épurateurs occasionne une baisse des niveaux de particules fines et ultrafines plus modérée que dans les salles de classe : de 10 à 35 % en fonction des tailles de particules. Ceci peut être expliqué par la présence de l'espace cuisine semi-ouvert sur le réfectoire, d'une autre pièce de réfectoire et d'un couloir dont les portes sont systématiquement ouvertes et de l'ouverture fréquente des fenêtres lors de la période de mesure.

5. CONCLUSION

Dans le contexte de pandémie liée à la COVID 19, les solutions d'épuration de l'air intérieur ont été envisagées comme moyen complémentaire à un bon renouvellement d'air pour minimiser l'accumulation de la charge virale du coronavirus dans l'air des bâtiments. La question posée ici est celle de l'efficacité d'unités mobiles d'épuration dans des conditions réelles d'utilisation à l'intérieur des bâtiments : Leur effet, est-il significatif à l'échelle d'une pièce sur les particules fines pouvant transporter le virus et les COV ? Permettent-ils également l'épuration des particules ultrafines, généralement issues de l'extérieur en l'absence de combustion interne au bâtiment ?

► Une épuration efficace et homogène des particules fines dans les salles de classe de l'ordre de 70 %

La mise en route de l'épurateur cPure occasionne une baisse des niveaux de particules fines significative et homogène dans les salles de classe : jusqu'à de 70 % lorsque les portes et fenêtres sont fermées.

► Une efficacité significative sur les particules ultrafines, de l'ordre de 70 % dans les salles de classe

Les mesures de particules ultrafines au sein des classes montrent une efficacité similaire à celle des particules fines, de l'ordre de 70%. L'ouverture des ouvrants baisse l'efficacité d'abattement des particules, en lien vraisemblable avec l'apport de particules depuis l'extérieur de la pièce expérimentée.

► Pas d'efficacité démontrée sur les COV, aucun impact sur le renouvellement d'air

L'épuration des COV par la pré-filtration moléculaire sur charbon actif de l'épurateur dans les salles de classe n'est pas mise en évidence avec la vitesse d'épuration « travail » dans cette expérience. L'épurateur d'air utilisé n'est pas un système de renouvellement d'air et il ne filtre pas particulièrement le CO₂, il n'a donc pas d'impact sur ses concentrations dans les salles de classe, qui ne sont influencées que par la présence des occupants, l'ouverture des fenêtres et le système de ventilation mécanique contrôlée.

► Une épuration moindre des particules dans le réfectoire

Dans le réfectoire, malgré un nombre d'épurateurs proportionnel au plus grand volume de la pièce (6 unités), la mise en route des épurateurs occasionne une baisse des niveaux de particules fines et ultrafines plus modérée que dans les salles de classe : de 10 à 35 % en fonction des tailles de particules. Ceci s'explique par la présence d'espaces attenants complémentaires augmentant le volume d'air à traiter, l'ouverture régulière des fenêtres qui n'a pas pu être contrôlée pendant les nombreuses phases de mesure, voire l'apport de particules fines et ultrafines des activités de la cuisine attenante.

► L'éviction des sources, le renouvellement d'air et l'épuration des particules fines et ultrafines

L'expérience *in vivo* montre l'importance d'agir sur les sources internes et externes au bâtiment afin de réduire l'exposition des occupants. L'aération et la ventilation, qui apportent un triple bénéfice (baisse de la charge virale, dilution des polluants intérieurs, meilleure vigilance des élèves) restent la seconde priorité pour garantir un renouvellement d'air suffisant.

Les systèmes de filtration performants, comme celui testé ici, apportent une solution complémentaire pour réduire les particules fines mais aussi les ultrafines, ces dernières étant principalement d'origine extérieure dans ce type de bâtiments. Ce point est à mettre en perspective avec l'environnement pollué de certains établissements pour lesquels l'apport d'air extérieur par la ventilation ou l'ouverture des fenêtres constituent une pollution supplémentaire qui devrait être mieux prise en compte. A titre d'exemple en Provence Alpes-Côte d'Azur près de 150 établissements sont localisés dans des secteurs qui ne respectent pas les normes limites.

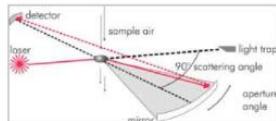
A terme, des systèmes de gestion intelligente des aspects aération/filtration ou intégrés gérant la filtration de l'air entrant, semblent des perspectives nécessaires en vue d'une meilleure gestion de la qualité de l'air des établissements implantés en zone polluée. Comme nous l'avons vu dans cette expérimentation, la gestion et la préservation de l'air d'une salle de classe nécessite des actions complémentaires, qui peuvent en apparence s'opposer. La gestion intégrée aération/filtration est sans doute le défi des années à venir notamment pour les établissements dont l'environnement est dégradé.

ANNEXES

ANNEXE 1 Fiche technique du granulomètre Grimm MINI-WRAS

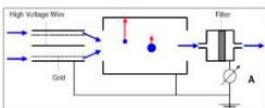
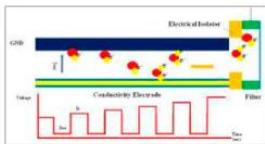
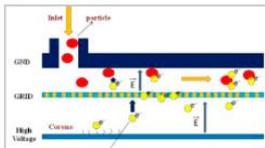
Optical Measuring Cell (OPC)

GRIMM's more than 30 years of experience in manufacturing of aerosol spectrometers are reflected in the patented scattered light measurement cell of the OPC and its electronic signal output for every particle size. This know-how combined with high-quality material ensure precision and high data quality.



Electrical Mobility Spectrometer

The gas ions produced by the corona are accelerated towards a grid. The grid-voltage allows a small amount of ions to pass the grid. The ions move towards the surrounding concentric Ground-Electrode, where some of them diffuse onto particles and charge them. The charged aerosols enter a section, consisting of a round-shaped outer wall which is at electrical potential (GND) and a concentric conductivity electrode which operates at different voltages: The higher the voltage the more particles are removed, depending on their electrical mobility.



Only particles with an electrical mobility less than a certain limit value will pass the electrode and are measured with a faraday cup electrometer. The faraday cup electrometer detects the charges carried by the aerosol particles. The raw signals represent different currents depending on the voltage of the conductivity electrode.

For fine dust analysis in highest precision ranging from 10 nm to 35 µm, this top of the line device is unique and has no equal! The areas of use range from fine dust monitoring in industrial and manufacturing facilities to workplace measurements. With the advanced data communication interfaces, the **Mini-WRAS** offers its users utmost flexibility and mobility.

Specification Mini-WRAS 1.371



Measurement Data

Size channels:	41 channels, wide range from 10 nm to 35 µm 10 channels from electrical sensor, 31 channels from aerosol spectrometer: 10/ 14/ 19/ 27/ 37/ 52/ 72/ 100/ 139/ 193/ 253/ 298/ 352/ 414/ 488/ 576/ 679/ 800/ 943/ 1112/ 1310/ 1545/ 1821/ 2146/ 2530/ 2982/ 3515/ 4144/ 4885/ 5758/ 6787/ 8001/ 9431/ 11120/ 13100/ 15450/ 18210/ 21460/ 25300/ 29820/ 35150 [nm]
Count range:	1 to 3,000,000 particles/liter (aerosol spectrometer) 3,000 – 1,000,000,000 particles/cm ³ (electrical sensor)
Particle mass:	From 0.0001 mg/m ³ to 100 mg/m ³
Occupational classification (IAQ's):	Inhalable, thoracic and alveolic in accordance to EN 481 continuously and simultaneously
Environmental data:	PM10 and PM2.5, and PM1, PM0.5, PM0.1, continuously and simultaneously

Instrument Data

Reproducibility:	± 3 % over the total measuring range
Sample flow:	1.2 l/min ± 5 % automatically regulated
Rinsing flow:	0.3 l/min, self-controlled, automatically optical cleaning on start-up and in stand-by mode
Laser wavelength:	660 nm (aerosol spectrometer)
Self-test:	Automatically after each start-up
Measurement intervals:	1 minute (10 x 6 s)
Storage intervals:	1 minute
Data storage:	USB flash memory
Communication:	Fully remotely controlled via Bluetooth (and RS-232)
Data output:	ASCII format and Excel (via software)
Power supply:	Li-Ion battery 14.4 V/4.8 Ah for continuous operation up to 8 hours; with internal charger
Power adapter:	18 VDC, maximum current 2.5 A
Dimensions:	34 x 31 x 12 cm (13.4 x 12.2 x 4.7 inches)
Weight and color:	8.2 kg (18.1 lb), grey housing
Operating conditions:	+4 to +40 °Celsius (39 to 104 °F), RH < 95 % (non-condensing), non-corrosive or explosive gases
Storage and transport:	-20 to +50 °Celsius (-4 to 122 °F), RH < 95 % (non-condensing)
Pressure range:	Absolute: 1013 hPa +/- 120 hPa, equates up to ca. 1,000 m ASL
Field service:	Integrated sample pipe and corona cleaning

Software

Version 1.378, based on LabView® for Windows XP upwards (see next page)

ANNEXE 2 Fiche technique des microcapteurs multipolluants Nexelec Atmo

ATMO

Qualité d'Air Intérieur | Suivi Énergétique | Gestion des Espaces de Travail
Formaldéhyde, Particules Fines, Dioxyde de Carbone (CO₂), Composés Organiques Volatils (COV), Température, Humidité, Pression Atmosphérique, Luminosité, Bruit, Présence



Atmo surveille en continu la qualité d'air afin d'alerter visuellement les occupants lorsqu'il est temps d'aérer pour renouveler l'air intérieur.

Avec ses capteurs de mesures multi-paramètres, Atmo est spécifiquement conçu pour analyser l'environnement de travail de vos équipes.

Atmo intègre les algorithmes de qualité d'air et de confort iZiAIR et iZiFeel pour étudier plus facilement chaque environnement intérieur et identifier rapidement les améliorations possibles.

Grâce à son module de communication sans fil, les données sont accessibles à distance, simplement depuis un smartphone ou un écran d'ordinateur*.

LES + PRODUIT

- Capteur de Formaldéhyde à mesure continue
- Capteur de Particules Fines PM1, PM2.5 et PM10 compact et design
- Capteur de CO₂ NDIR avec performances validées par un laboratoire COFRAC indépendant
- Voyant LED pour visualiser le niveau de CO₂ et la qualité d'air
- Ensemble complet de capteurs pour une analyse globale de l'environnement intérieur
- Dispositif de fixation antivol
- Installation simple et rapide
- Aucune maintenance requise

APPLICATIONS

- Surveillance de la Qualité d'Air Intérieur dans les bâtiments tertiaires et résidentiels
- Supervision des espaces de travail (bureaux, salles de réunions)

* Des frais d'abonnement optionnels peuvent s'appliquer

nexelec www.nexelec.fr

D740A-FR Designed in France

ATMO

FONCTIONS

- Mesure de la Qualité d'Air Intérieur
 - o Formaldéhyde (HCHO / CH₂O)
 - o Particules fines (PM1, PM2.5 et PM10)
 - o Dioxyde de carbone (CO₂)
 - o Composés Organiques Volatils (COV) totaux incluant le benzène et le tétrachloroéthylène
- Mesure des paramètres d'ambiance
 - o Température
 - o Humidité relative
 - o Pression atmosphérique
 - o Luminosité
 - o Présence / Mouvement (PIR)
 - o Bruit (niveaux sonores)
- Bouton central
 - o Appui court : action programmable
 - o Appui long : mesure et transmission instantanée
- Configuration et diagnostic produit en local (NFC) ou à distance (downlink)
- Indice de confort iZiFeel
- Indice de Qualité d'Air Intérieur iZiAIR

Affichage du niveau de CO₂ ou de la Qualité d'Air par témoin lumineux (configurable / désactivable)

- Très bon
- Moyen
- Attention

CARACTÉRISTIQUES

Formaldéhyde (HCHO / CH₂O)
Résolution : 1 ppb
Précision : ±20 ppb ou ±20% de la valeur mesurée
Gamme de mesure : 0 – 1000 ppb

Particules Fines (PM1 / PM2.5 / PM10)
Résolution : 0.1 µg/m³
Précision : ±15 µg/m³ ou ±10% de la valeur mesurée
Gamme de mesure : 0 – 2000 µg/m³

Dioxyde de Carbone (CO₂)
Technologie : Infrarouge Non-Dispersif (NDIR) double canal
Résolution : 1 ppm
Précision : ±(30 ppm + 3% de la valeur mesurée)
Gamme de mesure : 0 – 10000 ppm

Composés Organiques Volatils totaux (COV)
Résolution : 1 µg/m³
Précision : ±25%
Gamme de mesure : 0 – 10000 µg/m³

Température
Résolution : 0.1°C
Précision : ±0.3°C
Gamme de mesure : -30°C / +70°C

Humidité
Résolution : 0.5% R.H.
Précision : ±2% R.H.
Gamme de mesure : 0 – 100% R.H.

Pression atmosphérique
Résolution : 1 hPa
Précision : ±2.5 hPa
Gamme de mesure : 300 – 1100 hPa

Luminosité
Résolution : 5 lux
Précision : ±5 lux
Gamme de mesure : 0 – 1000 lux

Niveau sonore
Résolution : 1 dB
Gamme de mesure : 35 – 120 dB

Présence
Technologie : Infrarouge passif (PIR)
Angle : 90° (Vertical et Horizontal)
Distance de détection : 7m

Fréquence de transmission des mesures
Toutes les 10 minutes (configurable)

Témoin Appairage réseau / Fonctionnement / CO₂ / Qualité d'Air
1x LED RGB

Alimentation électrique
Secteur par USB type-C (5Voc – 1A)

Dimensions : 105 x 105 x 30 mm

Poids : 120g

nexelec www.nexelec.fr

Designed in France

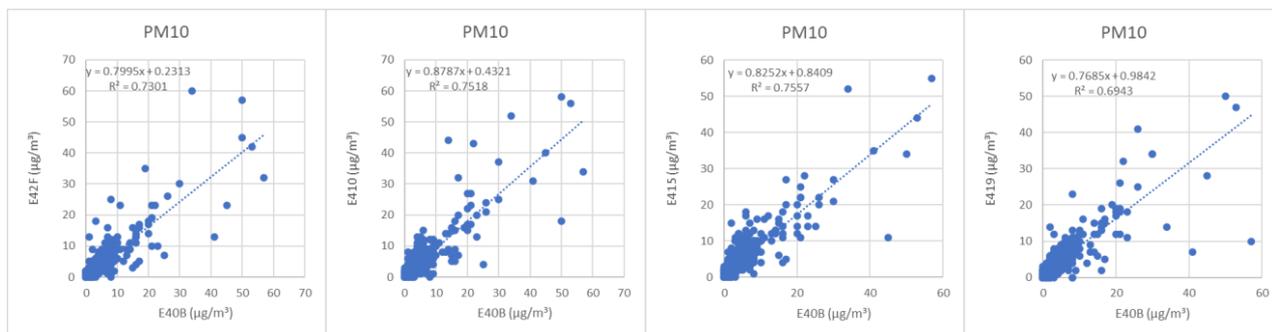
ANNEXE 3 Campagne d'intercomparaison des microcapteurs Nexelec Atmo

La campagne d'intercomparaison des 5 capteurs Nexelec Atmo a été réalisée à l'intérieur des bureaux d'AtmoSud pendant 12 jours pour identifier les différences de concentrations des différents paramètres de mesure entre les capteurs. Les corrélations entre les capteurs sont élevées pour les particules fines et les COV (à l'exception d'un capteur pour les COV) et très élevées pour le CO₂.

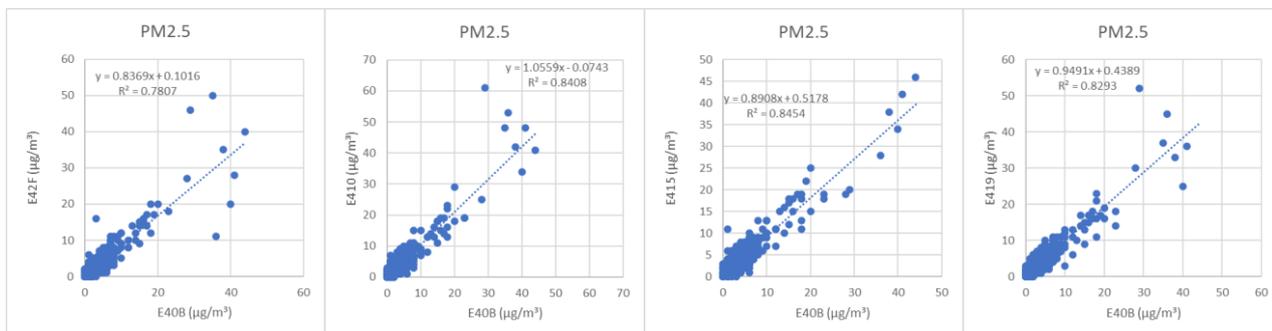
Les coefficients de détermination R² en fonction des paramètres de mesure sont les suivants :

- PM10 : entre 0.69 et 0.76
- PM2.5 : entre 0.75 et 0.84
- PM1 : entre 0.71 et 0.78
- COV : entre 0.78 et 0.8 sauf pour le capteur E42F qui a fourni des données significativement différentes des trois autres (R² de l'ordre de 0.2 par rapport aux autres capteurs)
- CO₂ : entre 0.96 et 0.98

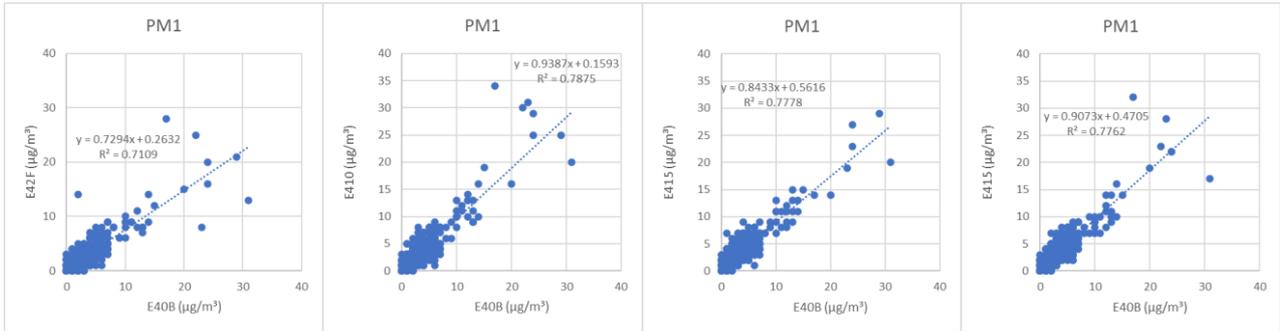
► PM10



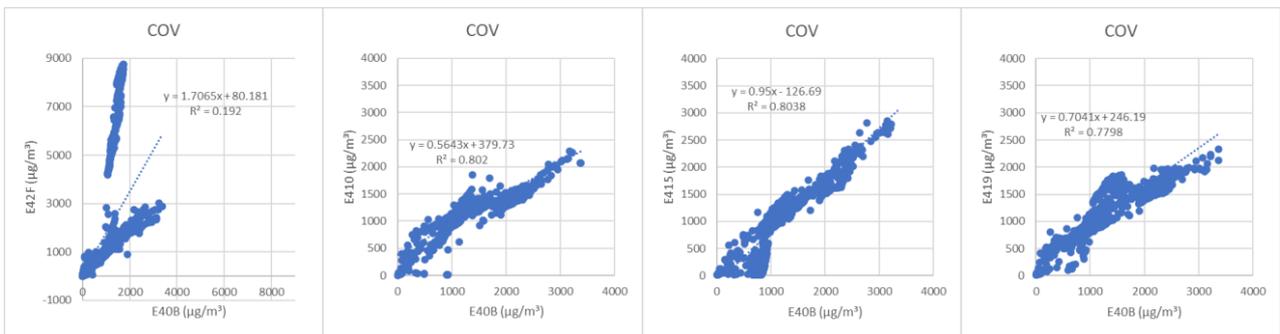
► PM2.5



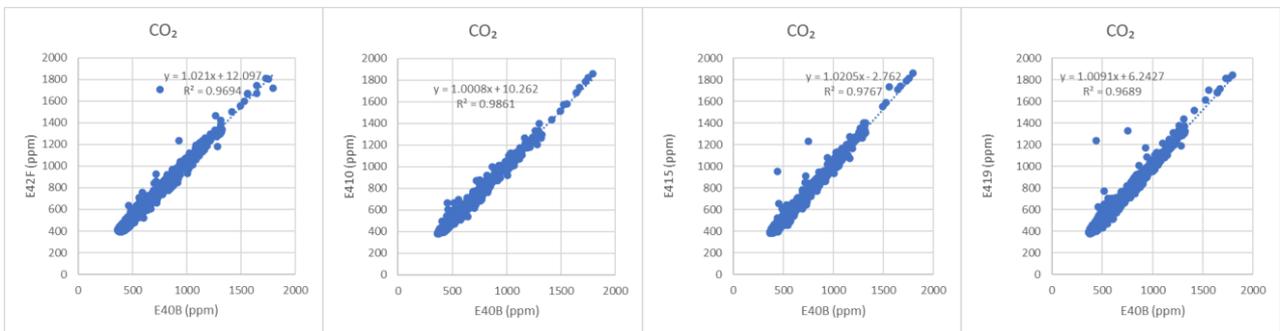
► PM1



► COV



► CO₂



ANNEXE 4 Fiche technique du Module Air

Module Air

Fiche Technique

Module Air

Dispositif open source et pédagogique de mesure de la qualité de l'air. Le capteur Module Air mesure les particules fines (PM10 et PM 2.5) et le dioxyde de carbone (CO₂). Un écran LED grande taille affiche les mesures ainsi que des recommandations. Le capteur peut enregistrer les données à distance par WIFI (ou réseau LORA en option) ou ne servir qu'à l'affichage.



Sonde Particules Fines

Sonde **SDS011**: compteur optique (principe de diffusion laser) qui mesure les PM10 et les PM2.5 Unité de mesure: µg/m³. Précision de mesure: 0.3 µg/m³. Gamme de mesure 0.0 - 999 µg/m³.

En option: sonde NextPM de la société Tera (mesure des PM1).

Sonde CO₂

Sonde **MH-z16**: détecteur NDIR (principe de spectrométrie d'absorption infrarouge non dispersif) qui mesure le taux de dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'air.

Unité de mesure: ppm (partie par million). Précision de mesure: +/- 100 ppm +6%. Gamme de mesure 0.0 - 5000 ppm. Calibration automatique, calibration manuelle possible à l'extérieur par appui sur un bouton spécifique.

Ecran

Informations affichées sur un large écran de 20x10 cm constitué de 2048 LED de couleurs.

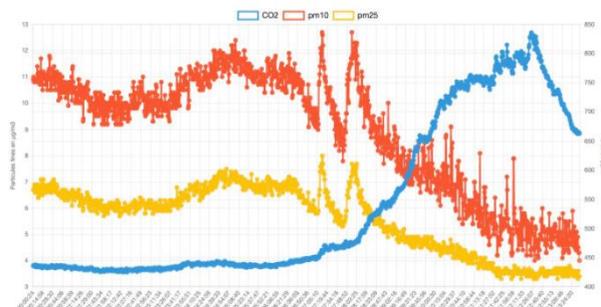
Boîtier

Boîtier constitué de panneaux de bois (MDF) peints et de plaques de plexiglas permettant l'affichage des données par transparence et la visualisation de tous les constituants internes. Dimensions: 20x12x5,5cm.

Divers

- Micro-contrôleur Arduino MEGA et WEMOS D1 mini Wifi
- Alimentation secteur 5v/3a par câble usb
- Fabriqué en France à Marseille au QG des Eco-Acteurs
- Poids: 700g

Particules fines et CO2 mesurés le lundi 20 décembre 2021



Données

Les données du Module Air sont enregistrées à distance sur les serveurs de AirCarto et d'AtmoSud: Outils de visualisation et de téléchargement des données associés.

Seuils et message associé

Pour le CO₂:

<800 ppm
entre 800 ppm et 1700 ppm
>1700 ppm

BIEN
AERER SVP
AERER VITE

Pour les PM10

<15 µg/m³
entre 15 µg/m³ et 30 µg/m³
entre 30 µg/m³ et 75 µg/m³
>75 µg/m³

Pour les PM2.5

<10 µg/m³
entre 10 µg/m³ et 20 µg/m³
entre 20 µg/m³ et 50 µg/m³
>50 µg/m³

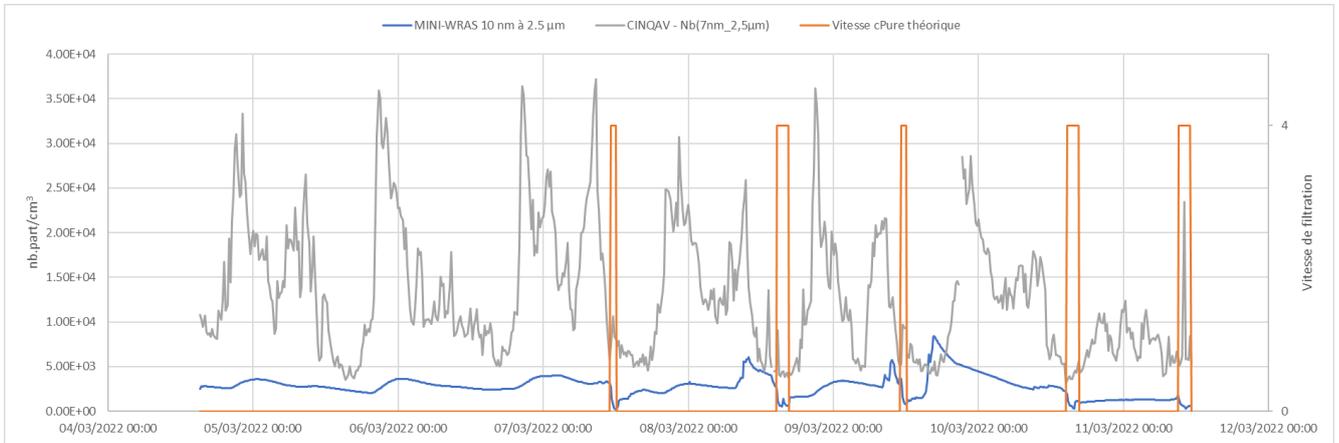
BON
MOYEN
DEGRADE
MAUVAIS

AirCarto

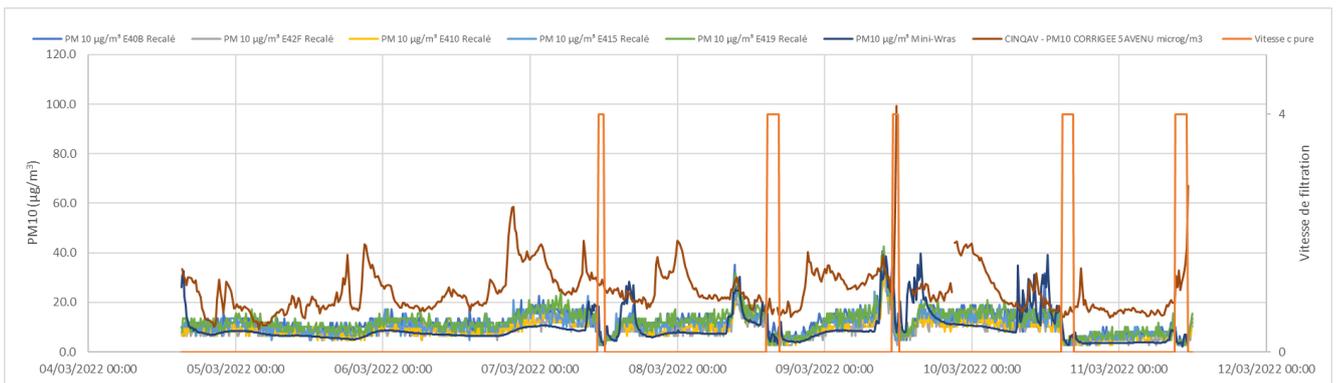
AtmoSud
Inspirer un air meilleur

ANNEXE 5 Comparaison des concentrations en particules à l'intérieur de la salle A318 aux concentrations extérieures de la station Marseille /Longchamp

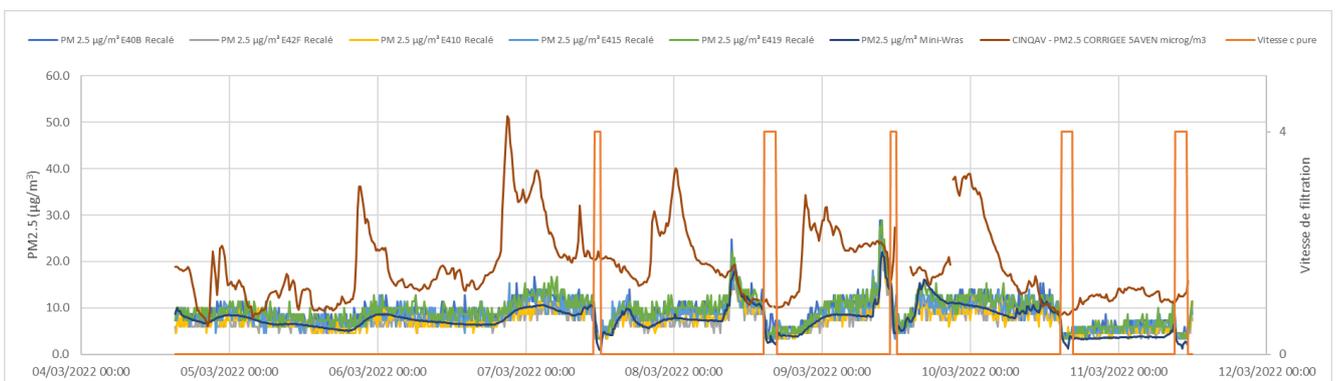
► Nombre de particules de 7 nm à 2.5 µm



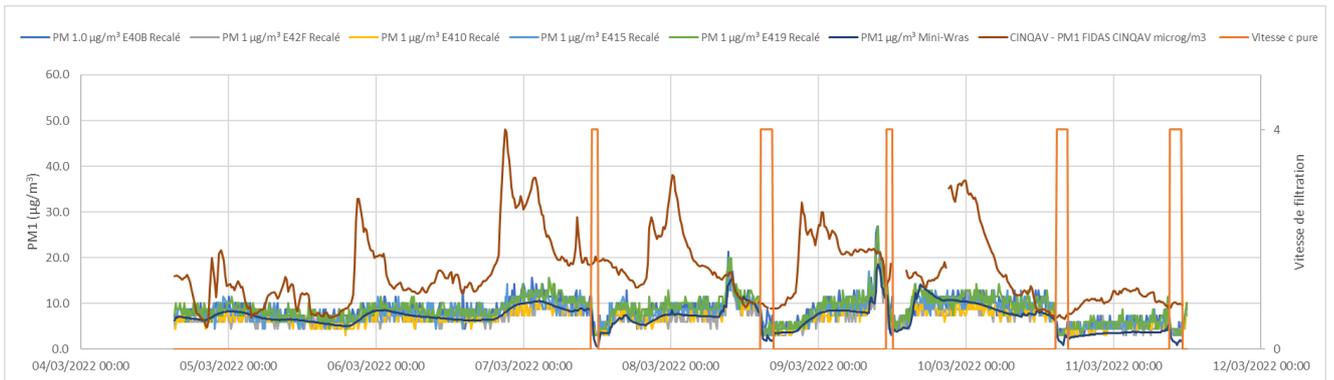
► PM10



► PM2.5



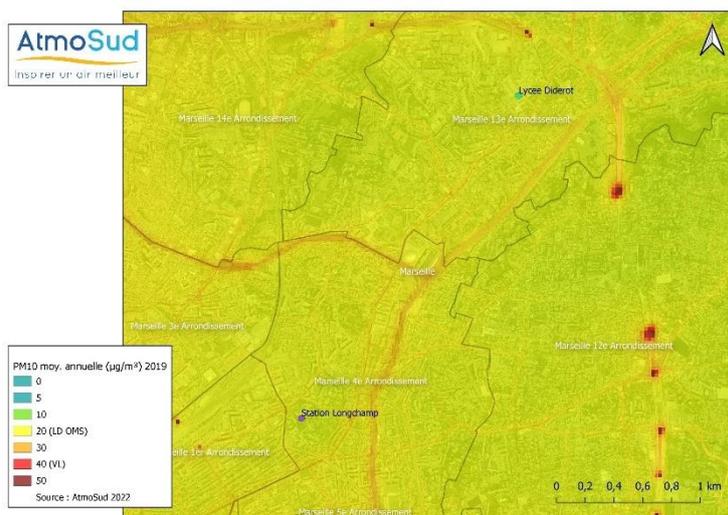
► PM1



ANNEXE 6 Contexte de pollution de l'air ambiant du Lycée Diderot en comparaison de la station de fond urbain de Marseille

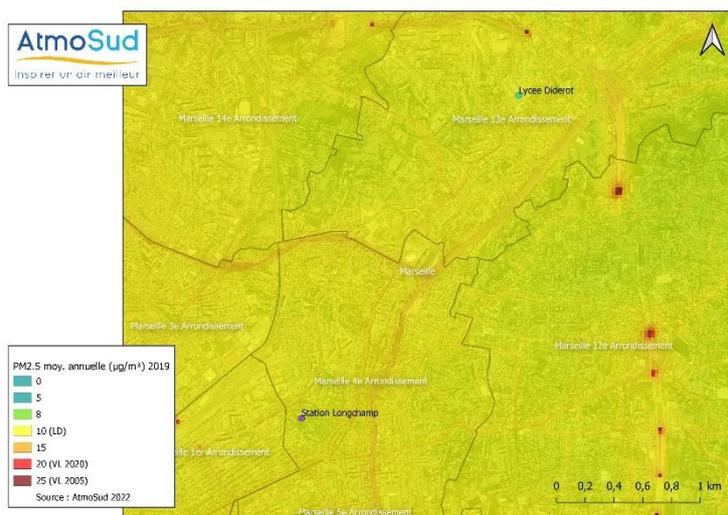
La façade principale du lycée Diderot (la plus proche du Boulevard Laveran) est située dans une zone où la pollution de l'air ambiant est similaire à celle de la station de fond urbain de Marseille/Longchamp.

► Carte de pollution annuelle en PM10



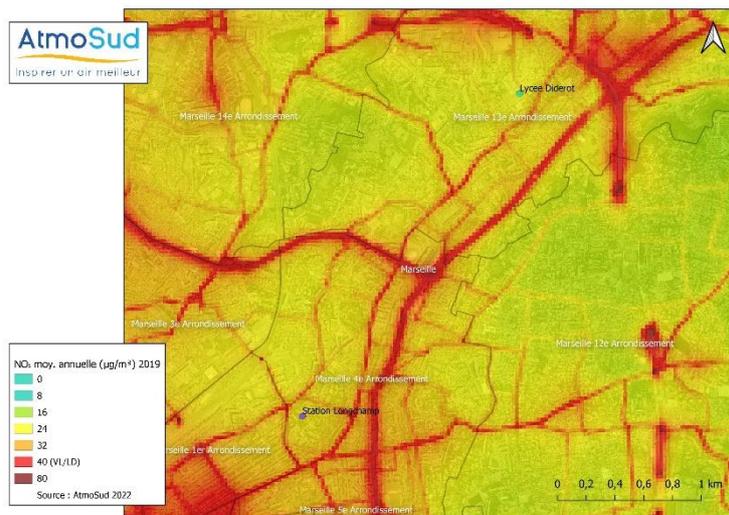
Les concentrations annuelles 2019 estimées en air ambiant en PM10 au lycée Diderot et à la station de fond urbain de Marseille/Longchamp sont respectivement de 18,7 et 18,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

► Carte de pollution annuelle en PM2.5



Les concentrations annuelles 2019 estimées en air ambiant en PM2.5 au lycée Diderot et à la station de fond urbain de Marseille/Longchamp sont respectivement de 9,9 et 9,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

► Carte de pollution annuelle en NO₂



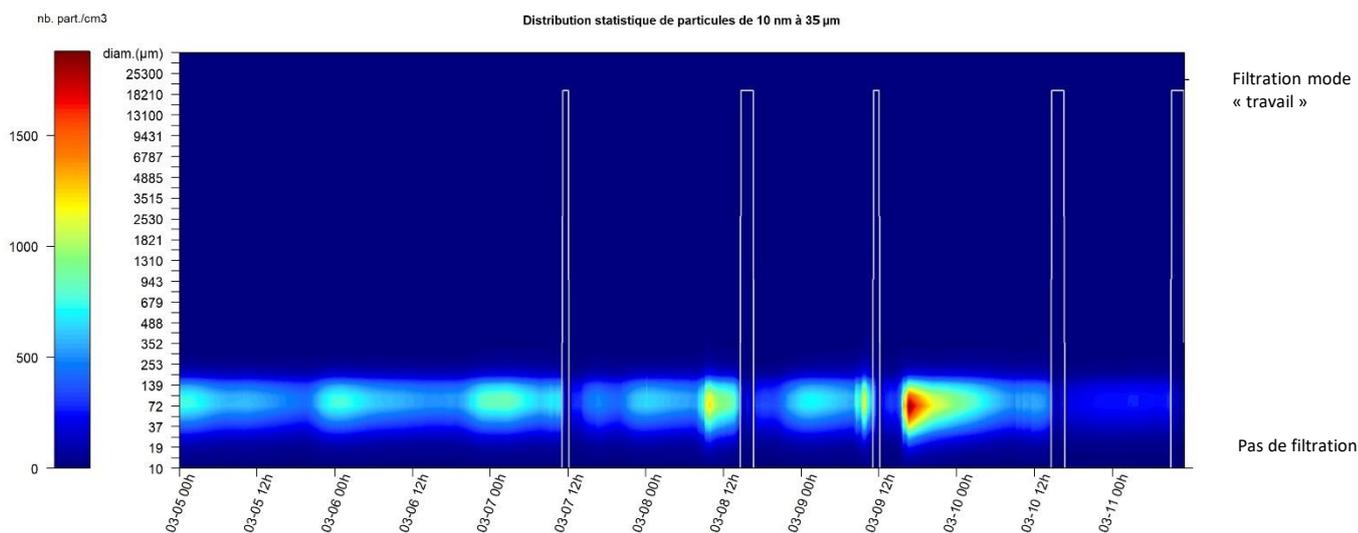
Les concentrations annuelles 2019 estimées en air ambiant en NO₂ au lycée Diderot et à la station de fond urbain de Marseille/Longchamp sont respectivement de 24,2 et 25,8 µg/m³.

ANNEXE 7 Calcul de la normalisation par le minimum et le maximum de la distribution statistique des particules

► Exemple sur les données de la salle A318

La présentation de la distribution statistique des particules de 10 nm à 35 µm en nombre de particules par cm³ met en évidence que les gammes de particules majoritaires sont celles situées aux alentours de 72 nm.

Suivi de la distribution statistique des particules en fonction des périodes de filtration d'air dans la salle A318



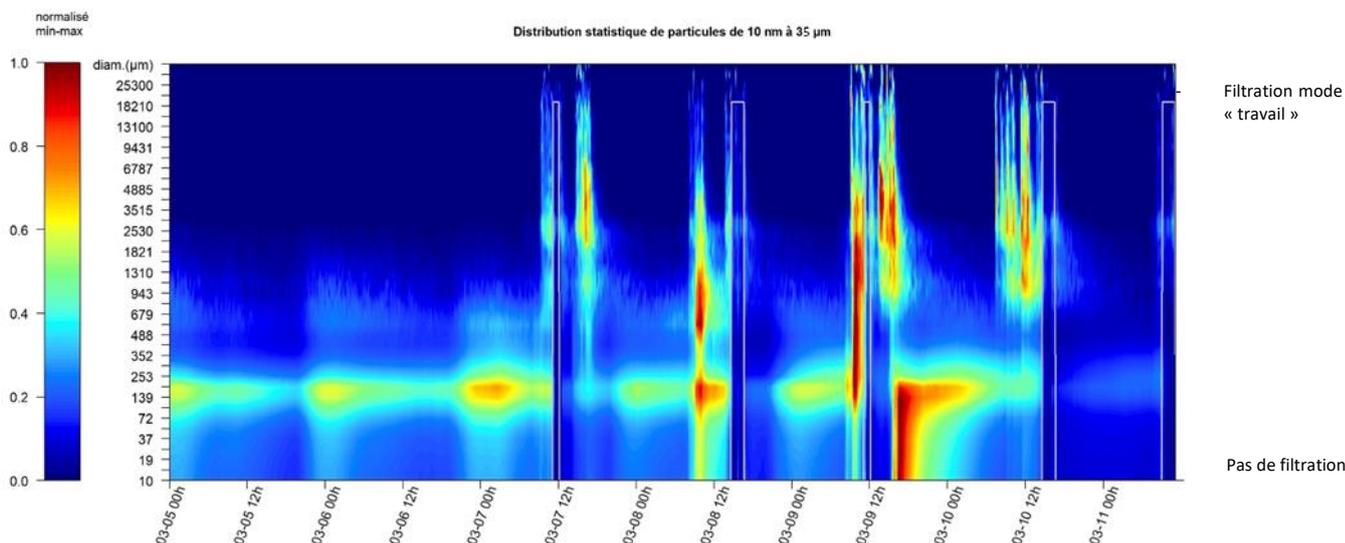
Ce type de représentation permet de ne visualiser l'impact des étapes de filtration que des particules majoritaires.

Pour pouvoir mettre en évidence l'impact sur l'ensemble des gammes de particules, il est nécessaire de normaliser les concentrations de chaque gamme de taille de particule par le maximum et le minimum (Min-Max), selon la formule suivante :

$$x_{norm} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

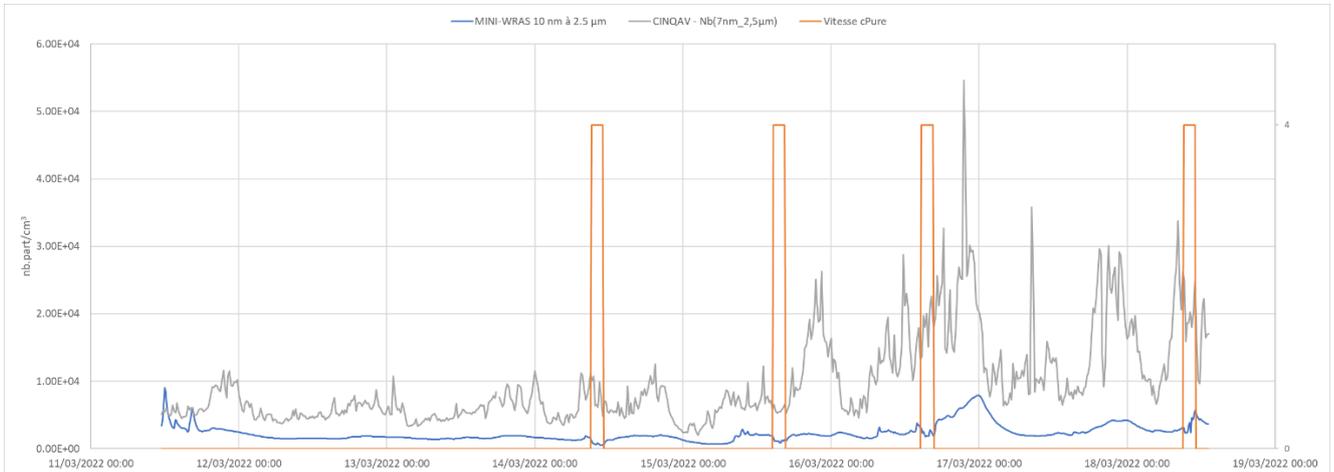
Ainsi, chaque gamme de taille de particule présente des données comprises entre 0 et 1, 0 correspondant au minimum observé sur l'ensemble de la période de mesure et 1 correspondant au maximum.

Suivi de la distribution statistique normalisé (min-max) des particules en fonction des périodes de filtration d'air dans la salle A318

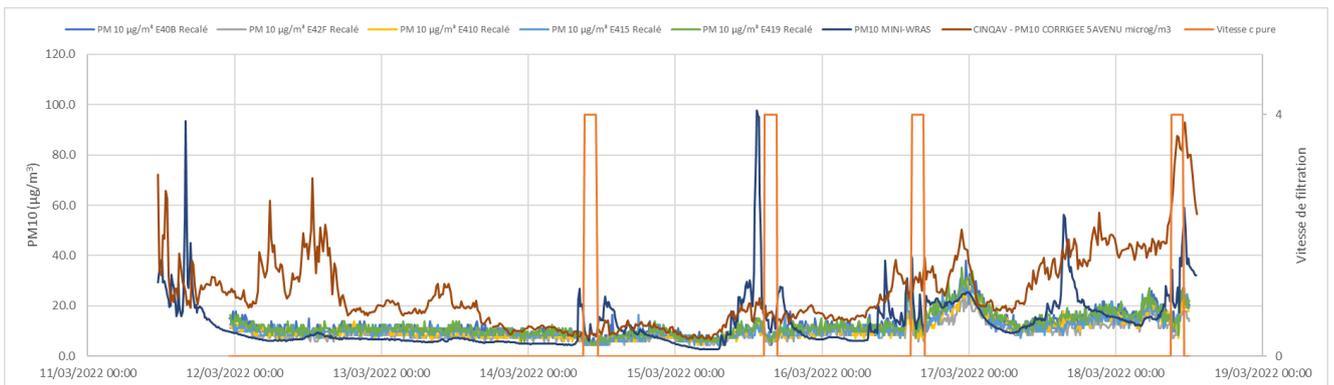


ANNEXE 8 Comparaison des concentrations en particules à l'intérieur de la salle A326 aux concentrations extérieures de la station Marseille/Longchamp

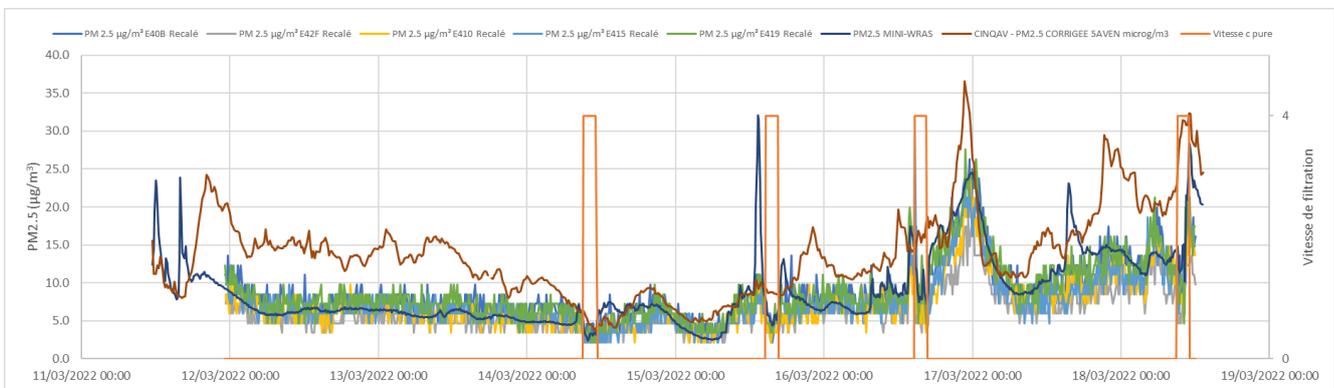
► Nombre de particules de 7 nm à 2.5 µm



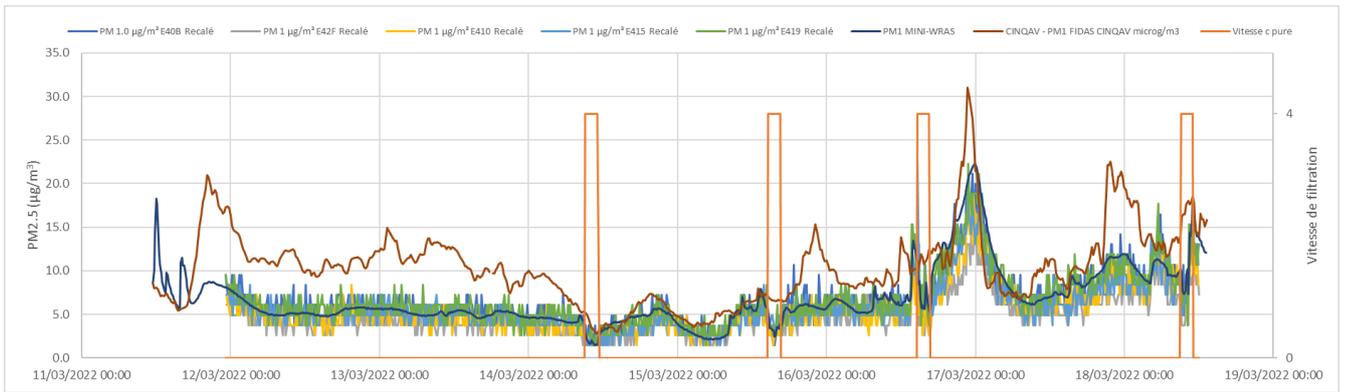
► PM10



► PM2.5

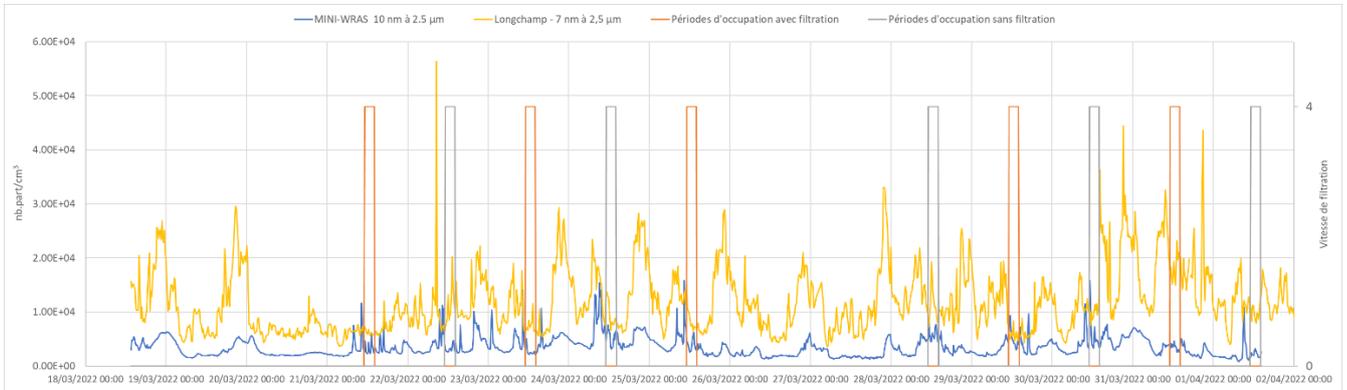


► PM1



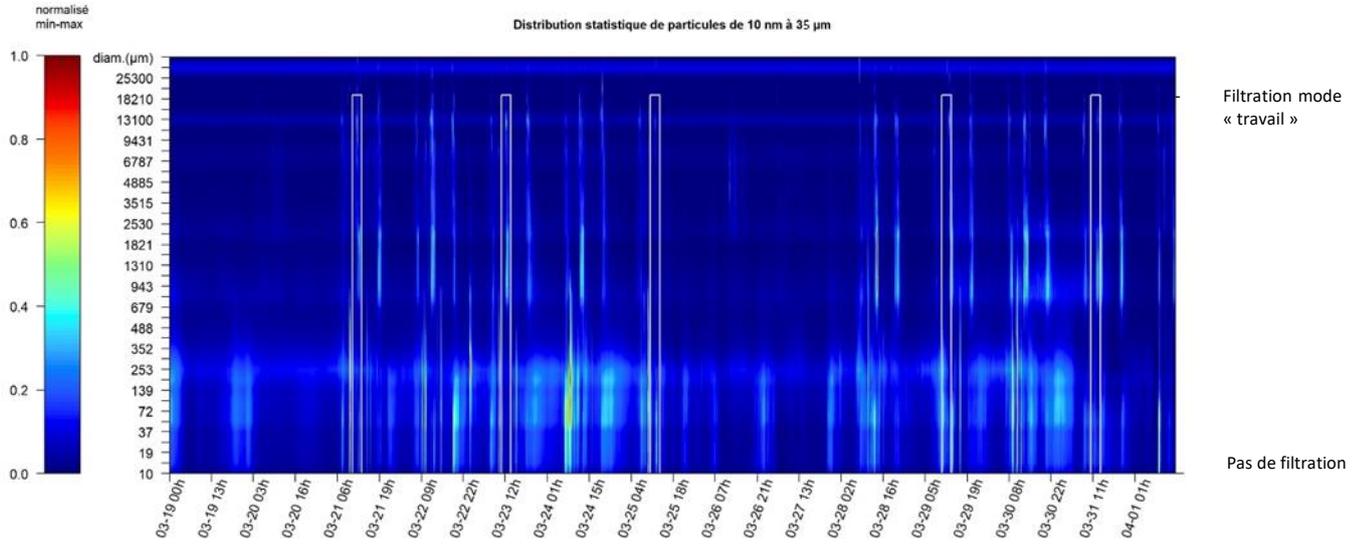
ANNEXE 9 Comparaison des concentrations en particules à l'intérieur du réfectoire aux concentrations extérieures de la station Marseille/Longchamp

► Nombre de particules de 7 nm à 2.5 µm



ANNEXE 10 Distribution statistique des particules dans le réfectoire

► Distribution statistique des particules de 10 nm à 35 µm sur 41 canaux dans le réfectoire



GLOSSAIRE

Définitions

Lignes directrices OMS : Seuils de concentration définis par l'OMS et basés sur un examen des données scientifiques accumulées. Elles visent à offrir des indications sur la façon de réduire les effets de la pollution de l'air sur la santé. Elles constituent des cibles à atteindre qui confère une protection suffisante en termes de santé publique.

Maximum journalier de la moyenne sur huit heures : Il est sélectionné après examen des moyennes glissantes sur huit heures, calculées à partir des données horaires et actualisées toutes les heures. Chaque moyenne ainsi calculée sur huit heures est attribuée au jour où elle s'achève ; autrement dit, la première période considérée pour le calcul sur un jour donné sera la période comprise entre 17 h la veille et 1 h le jour même ; la dernière période considérée pour un jour donné sera la période comprise entre 16 h et minuit le même jour.

Pollution de fond et niveaux moyens : La pollution de fond correspond à des niveaux de polluants dans l'air durant des périodes de temps relativement longues. Elle s'exprime généralement par des concentrations moyennées sur une année (pour l'ozone, on parle de niveaux moyens exprimés généralement par des moyennes calculées sur huit heures). Il s'agit de niveaux de pollution auxquels la population est exposée le plus longtemps et auxquels il est attribué l'impact sanitaire le plus important.

Pollution de pointe : La pollution de pointe correspond à des niveaux de polluants dans l'air durant des périodes de temps courtes. Elle s'exprime généralement par des concentrations moyennées sur la journée ou l'heure.

Procédures préfectorales : Mesures et actions de recommandations et de réduction des émissions par niveau réglementaire et par grand secteur d'activité.

Seuil d'alerte à la population : Niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou la dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

Seuil d'information-recommandations à la population : Niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine des groupes particulièrement sensibles de la population, rendant nécessaires des informations immédiates et adéquates.

Objectif de qualité : Un niveau de concentration à atteindre à long terme, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement.

Valeur cible : Un niveau de concentration fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans la mesure du possible sur une période donnée.

Valeur limite : Un niveau de concentration fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser une fois atteint.

Couche limite : Couche atmosphérique en contact direct avec la surface terrestre, dans laquelle se produisent des modifications d'un point de vue dynamique et thermique. Son épaisseur varie d'une centaine de mètres à quelques kilomètres selon les caractéristiques du sol (rugosité, relief...), la saison (humidité, flux de chaleur, température).

Particules d'origine secondaires : Les particules secondaires résultent de la conversion en particules, des gaz présents dans l'atmosphère. Cette conversion, soit directement gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau, est appelée nucléation. La nucléation est le mécanisme de base de la formation des nouvelles particules dans l'atmosphère. Les principaux précurseurs impliqués dans la formation des particules secondaires sont le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x et nitrates), les composés organiques volatils (COV) et l'ammoniac (NH₃). Les particules secondaires sont essentiellement des particules fines (<2.5 µm).

AOT 40 : Égal à la somme des différences entre les concentrations horaires d'ozone supérieures à 80 µg/m³ (mesurés quotidiennement entre 8 h et 20 h, heure d'Europe Centrale) et la valeur 80 µg/m³ pour la période du 1^{er} mai au 31 juillet de l'année N. La valeur cible de protection de la végétation est calculée à partir de la moyenne sur 5 ans de l'AOT40. Elle s'applique en dehors des zones urbanisées, sur les Parcs Nationaux, sur les Parcs Naturels Régionaux, sur les réserves Naturelles Nationales et sur les zones arrêtées de Protection de Biotope.

Percentile 99,8 (P 99,8) : Valeur respectée par 99,8 % des données de la série statistique considérée (ou

dépassée par 0,2 % des données). Durant l'année, le percentile 99,8 représente dix-huit heures.

Sigles

AASQA : Association Agréés de Surveillance de la Qualité de l'Air

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

ANTS : Association Nationale des Techniques Sanitaires

ARS : Agence Régionale de Santé

CSA : Carte Stratégique Air

CERC : Cellule Économique Régionale du BTP PACA

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale

EQAIR : Réseau Expert Qualité de l'Air intérieur en région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

IARC : International Agency for Research on Cancer

ISA : Indice Synthétique Air

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ORP PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR : Observatoire des résidus de Pesticides en région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

PCAET : Plan climat air énergie territorial

PDU : Plan de Déplacements Urbains

PLU : Plan local d'Urbanisme

PPA : Plan de Protection de l'Atmosphère

PRSA : Plan Régional de Surveillance de la qualité de l'Air

SCoT : Schéma de Cohérence Territoriale

ZAS : Zone Administrative de Surveillance

Unité de mesures

mg/m³ : milligramme par mètre cube d'air
(1 mg = 10⁻³ g = 0,001 g)

µg/m³ : microgramme par mètre cube d'air
(1 µg = 10⁻⁶ g = 0,000001 g)

ng/m³ : nanogramme par mètre cube d'air
(1 ng = 10⁻⁹ g = 0,000000001 g)

TU : Temps Universel

Polluants

As : Arsenic

B(a)P : Benzo(a)Pyrène

BTEX : Benzène - Toluène - Éthylbenzène - Xylènes

C₆H₆ : Benzène

Cd : Cadmium

CO : Monoxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatils

COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

ML : Métaux lourds (Ni, Cd, Pb, As)

Ni : Nickel

NO / NO₂ : Monoxyde d'azote / Dioxyde d'azote

NO_x : Oxydes d'azote

O₃ : Ozone

Pb : Plomb

PM non volatile : Fraction des particules en suspension présente dans l'air ambiant qui ne s'évapore pas à 50°C.

PM volatile : Fraction des particules en suspension qui s'évaporent entre 30°C et 50°C. Cette fraction des particules est mesurée depuis 2007.

PM 10 : Particules d'un diamètre < 10 µm

PM 2.5 : Particules d'un diamètre < 2,5 µm

SO₂ : Dioxyde de soufre

Classification des sites de mesure

Cette classification a fait l'objet d'une mise à jour au niveau national en 2015. Les stations de mesures sont désormais classées selon 2 paramètres : leur environnement d'implantation et l'influence des sources d'émission.

Environnement d'implantation

- **Implantation urbaine** : Elle correspond à un emplacement dans une zone urbaine bâtie en continu, c'est-à-dire une zone urbaine dans laquelle les fronts de rue sont complètement (ou très majoritairement) constitués de constructions d'au minimum deux étages
- **Implantation périurbaine** : Elle correspond à un emplacement dans une zone urbaine majoritairement bâtie, constituée d'un tissu continu de constructions isolées de toutes tailles, avec une densité de construction moindre
- **Implantation rurale** : Elle est principalement destinée aux stations participant à la surveillance de l'exposition de la population et des écosystèmes à la pollution atmosphérique de fond, notamment photochimique.

Influence des sources

- **Influence industrielle** : Le point de prélèvement est situé à proximité d'une source (ou d'une zone) industrielle. Les émissions de cette source ont une influence significative sur les concentrations.
- **Influence trafic** : Le point de prélèvement est situé à proximité d'un axe routier majeur. Les émissions du trafic ont une influence significative sur les concentrations.
- **Influence de fond** : Le point de prélèvement n'est soumis à aucun des deux types d'influence décrits ci-après. L'implantation est telle que les niveaux de pollution sont représentatifs de l'exposition moyenne de la population (ou de la végétation et des écosystèmes) en général au sein de la zone surveillée. Généralement, la station est représentative d'une vaste zone d'au moins plusieurs km².

AtmoSud, votre expert de l'air en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur



Un large champ d'intervention : air/climat/énergie/santé

La loi sur l'air reconnaît le droit à chaque citoyen de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé. Dans ce cadre, AtmoSud évalue l'exposition des populations à la pollution atmosphérique et identifie les zones où il faut agir. Pour s'adapter aux nouveaux enjeux et à la demande des acteurs, son champ d'intervention s'étend à l'ensemble des thématiques de l'atmosphère : polluants, gaz à effet de serre, nuisances, pesticides, pollens... Par ses moyens techniques et d'expertise, AtmoSud est au service des décideurs et des citoyens.

Des missions d'intérêt général

La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30/12/1996 confie la surveillance de la qualité de l'air à des associations agréées :

- Connaître l'exposition de la population aux polluants atmosphériques et contribuer aux connaissances sur le changement climatique
- Sensibiliser la population à la qualité de l'air et aux comportements qui permettent de la préserver
- Accompagner les acteurs des territoires pour améliorer la qualité de l'air dans une approche intégrée air/climat/énergie/santé
- Prévoir la qualité de l'air au quotidien et sur le long terme
- Prévenir la population des épisodes de pollution
- Contribuer à l'amélioration des connaissances

Recevez nos bulletins

Abonnez-vous à l'actualité de la qualité de l'air : <https://www.atmosud.org/abonnements>

Conditions de diffusion

AtmoSud met à disposition les informations issues de ses différentes études et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ces travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement accessibles sur notre site Internet.

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'AtmoSud. Toute utilisation de données ou de documents (texte, tableau, graphe, carte...) doit obligatoirement faire référence à AtmoSud. Ce dernier n'est en aucun cas responsable des interprétations et publications diverses issues de ces travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.



Siège social : 146, rue Paradis « Le Noilly Paradis » - 13294 Marseille cedex 06
Établissement de Martigues : route de la Vierge 13500 Martigues
Établissement de Nice : 37 bis, avenue Henri Matisse - 06200 Nice
Tél. 04 91 32 38 00 - Télécopie 04 91 32 38 29 - contact.air@atmosud.org



Suivez-nous sur

