

Aéroport de Bâle-Mulhouse et qualité de l'air - Partie III:

Immission par particules ultrafines :

Analyse et détermination du danger potentiel pour les résidents

Résumé

Les particules ultrafines ou UFP sont générées en grand nombre par la combustion du kérosène dans les réacteurs d'avions à réaction modernes. Ces nanoparticules qui pénètrent dans le corps humain et les cellules vivantes présentent un danger pour la santé.

Contrairement à de nombreux autres aéroports, aucune évaluation de la situation UFP n'a été réalisée à l'aéroport de Bâle-Mulhouse.

Nous avons donc profité d'appareils portables, modernes, pour élucider ce danger potentiel encore indéterminé généré par l'aéroport, au-delà du bruit, des polluants classiques et du CO₂. Nous avons ainsi trouvé les UFP émis par les avions à réaction, et avons pu les distinguer de la suie industrielle ou des émissions de voitures diesel.

On peut constater de très fortes concentrations d'UFPs au périmètre de l'aéroport. Nos mesures visent à alerter l'aéroport et les autorités responsables d'introduire une surveillance UFP dans l'évaluation de la pollution de l'aéroport.

Cependant, nous ne prétendons pas avoir évalué de manière quantitative et reproductible la charge de particules ultrafines générée par l'aéroport, mais cependant nous pouvons établir, avec l'utilisation de moyens simples, que des données peuvent être fournies pour identifier la probabilité d'un problème de santé pour les personnes vivant à proximité de l'aéroport.

Introduction

Les particules ultrafines générées par des processus de combustion comme dans les moteurs diesel ou dans les réacteurs de jets sont reconnus comme un danger spécifique pour la santé (1-17).

Contrairement aux particules classiquement mesurées en PM₁₀ ou PM_{2,5}, les UFP sont si petits qu'ils ne sont pas bloqués dans les voies respiratoires ou les poumons : elles traversent facilement les alvéoles pulmonaires et pénètrent dans la circulation sanguine, suivi d'un dépôt dans la périphérie du corps.

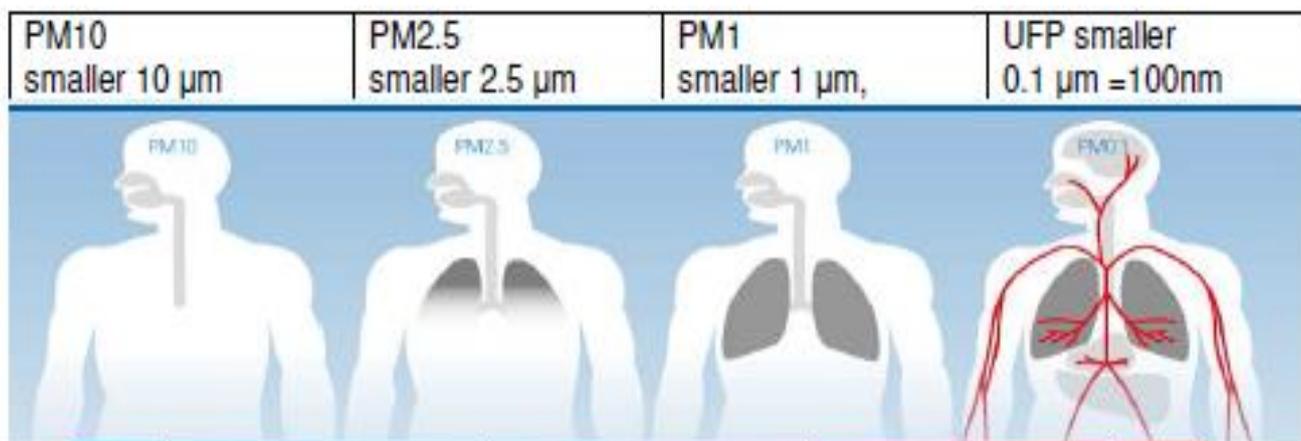


Fig.1: Profondeur de pénétration des particules (<https://www.afprofilters.com/particulate-matter-air-filters/>)

En raison de la toxicité de la nature chimique des UFP issus de la combustion du kérosène, ces particules représentent un danger spécifique pour la santé.

Leur petite taille provoque une difficulté supplémentaire de quantification. Alors que les particules PM10 ou PM2.5 sont suffisamment grosses pour être retenues sur des filtres conventionnels et mesurées par leur poids, les particules ultrafines sont plus petites que 100 nm et trop légères pour être déterminées avec précision par leur masse.

À titre de comparaison, le diamètre des UFP est plus de 500 fois plus petit qu'un cheveu humain. Ainsi, la charge d'UFP est évaluée par leur concentration en particules par unité de volume.

Le taux de comptage des appareils de mesure est influencé par la limite de détection de taille inférieure, généralement autour de 5 à 30 nm. De plus, la température, l'humidité et la lumière du soleil ont un impact majeur sur les polluants, et influencent à la fois la formation des particules ainsi que leur détectabilité.

Ces difficultés techniques doivent être prises en compte si les données provenant de différentes sources sont comparées (18).

Les problèmes de santé causés par les UFP émis par les voitures, diesel plus particulièrement, sont maintenant reconnus par les autorités, et commencent à influencer au moins la législation. Ainsi, les nouvelles règles pour les voitures européennes demandent pour la première fois une limite pour ces petites particules, ce qui représente un défi pour leur mesure, les tailles considérées étant de 28 à 100 nm.

Selon la réglementation Euro 6 par exemple, les moteurs de voitures particulières, diesel ou essence, ne peuvent pas émettre plus de 6×10^{11} UFP de ce type par km, ce qui, pour les voitures diesel, se compare à environ $1,6 \times 10^{12}$ UFP par litre de carburant (réglementation de l'UE 692/2008 et 459/2012).

Ces valeurs d'émission semblent extrêmement élevées. À titre de comparaison, l'air ambiant « normal » abrite quelques milliers d'UFP par cm³ et l'air ultrapur en haute altitude environ 1000 UFP par cm³.

La question reste de savoir combien de ces particules émises sont véhiculées dans l'air que nous respirons à proximité des aéroports, et quel niveau de danger pour la santé résulte de cette contamination.

Les problèmes techniques liés à la détermination précise des UFP, ainsi que les pressions politiques du lobby du trafic aérien, a empêché les autorités, jusqu'à présent, d'émettre une valeur de seuil d'UFP pour les moteurs à réaction d'avions.

Néanmoins, les dangers pour la santé causés par les UFP sont bien décrits : La commission de l'OMS AIRC (Agence internationale de recherche sur le cancer) juge que les UFP conjointement avec les PM2,5 sont cancérigènes. L'OMS souligne même qu'il n'y a pas de limite inférieure à la concentration d'UFP pour que les risques pour la santé en soient exclus avec certitude (19).

Une autre particularité des UFP émis par les avions à réaction civils est leur taille, encore plus petite par rapport aux UFP de voiture diesel. De plus, les jets les émettent en nombre beaucoup plus élevé. Il est bien connu et documenté (20) que les moteurs à réaction modernes émettent des particules particulièrement petites avec un diamètre moyen de seulement 13 nm.

La taille dépend cependant quelque peu des niveaux de poussée respectifs. La différence de taille entre les UFP de jets et ceux dérivés de la suie industrielle, des fours ou des voitures est telle qu'elle permet une séparation aisée de chaque source d'UFP respective.

Des concentrations significatives d'UFP peuvent être mesurées jusqu'à 20 km des aéroports, tandis qu'elles tombent déjà à un niveau de trace à une distance d'environ 100 m d'une autoroute.

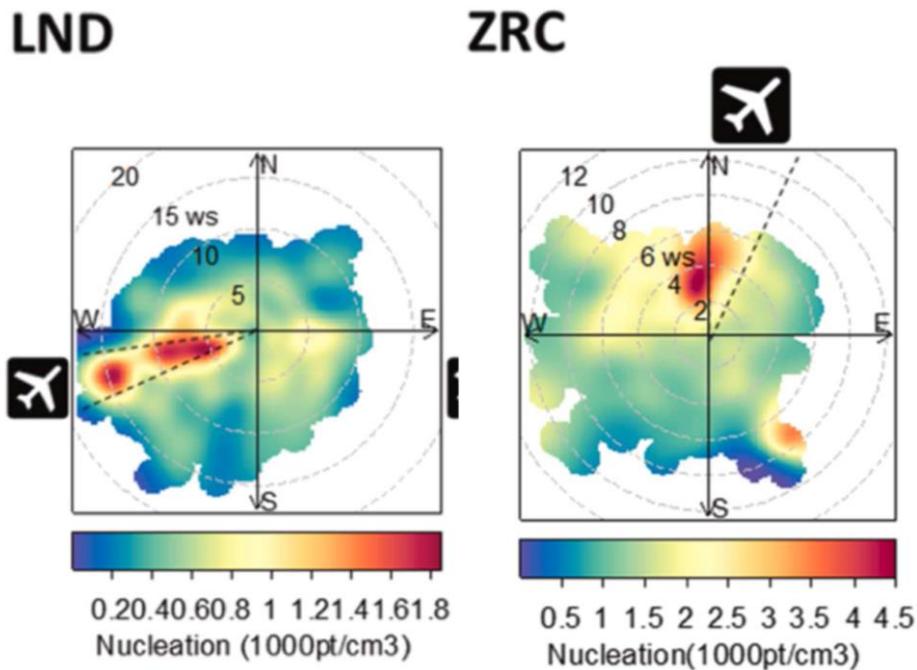


Fig. 2: Etendue kilométrique [de Rivas 202021 fig 6; voir le texte]

Les graphiques polaires montrent les contributions à la génération de particules ultrafines en fonction de la vitesse et de la direction du vent dans les villes de Zurich (ZRC) et Londres (LND).

Ce que la publication appelle «nucléation» désigne la génération secondaire de particules ultrafines (conversion du gaz en particules). Ces processus peuvent être initiés par exemple via l'acide sulfurique dérivé de l'oxydation du soufre du carburant, qui est toujours présent dans le kérosène. Bien que les particules générées par nucléation soient inférieures à 20 nm, pour Londres, les tailles de particules enregistrées étaient de 17 à 604 nm et pour Zürich 10-487nm.

Les diagrammes montrent le nombre de particules aux stations respectives qui se trouvent à «Kaserne» au centre de Zurich à proximité de la gare principale (à 10 km de l'aéroport de Zürich Kloten) et «North Kensington», qui est située à la Sion Manning School de St Charles Square (à 18 km L'aéroport d'Heathrow de Londres).

Pour les deux villes, la contamination la plus élevée est mesurée si le vent souffle de la direction des aéroports. Il faut préciser que les concentrations élevées de particules ultrafines ne peuvent être enregistrées qu'au moment de la mesure dans les stations si le vent souffle de la direction des aéroports respectifs, indépendamment du trafic local et d'autres sources.

Pour Londres des vents de vitesses de 2-3 jusqu'à 15 m/s, et pour Zurich uniquement des vitesses de vent de 2 à 6 m/s transportent les particules ultrafines au centre de la ville, sachant que des vitesses de vent plus élevées conduisent à une dilution des particules.

Pour de nombreuses villes, les données sur la contamination UFP et la contribution présumée des aéroports a fait l'objet d'une enquête (22-25).

Ainsi, une publication très récente (21) a mesuré la distribution des tailles UFP et modélisé leur taux de génération pour les différentes tailles de particules dans les villes européennes : On a trouvé une étonnante et claire corrélation entre la direction du vent et l'emplacement des aéroports, (voir fig. 2 montrant les exemples de Zurich et Londres).

La découverte remarquable était que même pour des points de mesure très distants, la signature de la pollution de l'aéroport est détectée. L'aéroport d'Heathrow, par ex. était à environ 20 km du lieu de mesure des particules (Kensington). La mesure de Zurich était à la gare (la «Kaserne») située dans le centre-ville à environ 10 km au sud de l'aéroport.

Même si l'aéroport de Zurich a publié ses propres mesures (26), personne n'a considéré l'urgence de ces mesures à Bâle. En effet, tant qu'il n'y a pas de limite légale, l'administration de l'aéroport ne voit pas la nécessité d'effectuer des mesures d'immission UFP. Nous avons donc fait cet effort et utilisé des compteurs d'UFP portables commerciaux pour fournir un premier aperçu de la charge potentielle UFP générée par le trafic de l'Aéroport de Bâle-Mulhouse. Nous montrons ainsi que dans le périmètre de l'aéroport la concentration d'UFPs va jusqu'à plus de 3 millions d'UFP par cm³. Ainsi autour de l'aéroport, la concentration d'UFP peut être 100 fois plus élevée que dans l'air ambiant normal.

Nous sommes conscients que la période d'observation limitée de quelques heures seulement ne permet pas une évaluation de la charge dans les villes voisines, mais nos premières mesures montrent que cette pollution très particulière provenant de l'aéroport de Mulhouse nécessite beaucoup plus d'attention et devrait être inclus dans les campagnes de mesure exigées par les autorités pour d'autres polluants.

Méthodes

Deux appareils de mesure portables ont été utilisés: P-Track (TSI) et DISCmini (Testo). Tous deux sont capables de déterminer le nombre et la taille des particules ultrafines. Le P-Trak fonctionne comme un compteur de particules de condensation (CPC) tandis que le DISCmini est un électromètre chargeant les particules pour en mesurer la quantité. Le P-Trak est capable de détecter des tailles de particules entre 20 et 1000 nm et la plage de DISCmini couvre des tailles de 10 à 700 nm. Afin de réduire les limites individuelles de précision des appareils, nous avons utilisé ces deux appareils en parallèle pour déterminer la taille des particules et leur nombre. Les tubes d'entrée des appareils étaient fixés à la lunette arrière gauche d'une voiture civile normale et connectés à l'alimentation électrique 12 V. L'emplacement réel a été enregistré à l'aide d'un appareil GPS portable et l'heure d'enregistrement des nombres et tailles des particules a été synchronisée avec l'heure et la position GPS.

Les paramètres de sortie fournis par les appareils étaient:

- a) nombre total de particules
- b) taille moyenne des particules
- c) la quantité relative de particules entre 10 et 20 nm dans un échantillon, pour indiquer la présence de la taille de particules correspondant aux moteurs d'avions à réaction typiques.
- d) la «surface de dépôt pulmonaire (LDSA)». Ce dernier paramètre est un indicateur de la zone alvéolaire potentiellement affectée par l'absorption des aérosols de nanoparticules ultrafines. Il n'y a pas de limite la plus basse où les effets toxiques peuvent être exclus.

Les valeurs de référence dans les villes vont de 10 à 150 μm^2 par cm³ de volume d'air.

Avec cette configuration, nous avons mesuré de 18h40 à 20h le vendredi 27 avril et à partir de 11h45 jusqu'à 15h30 le samedi 28 avril 2018 à différents endroits à proximité de l'aéroport. Tous les sites se trouvaient dans la zone sans restriction et pouvaient être atteints en voiture. L'objectif était de montrer quelles fractions de taille et concentrations d'UFP se trouvent dans l'air ambiant à proximité de l'aéroport.

Résultats

Nous avons d'abord conduit depuis l'Allemagne, du pont Palmrain jusqu'à l'aéroport, et mesuré la pollution le long de la route de liaison très fréquentée à ce moment-là, (voir figure 3).

A proximité immédiate de l'A35 uniquement, une augmentation du nombre de particules était évidente, limitée à 50.000 pt / cm³ avec une taille de particules ne descendant pas en dessous de 30 nm. Mais ensuite, en arrivant près des aéroports aux bâtiments de Catering, la taille la distribution est passée à des valeurs nettement inférieures.

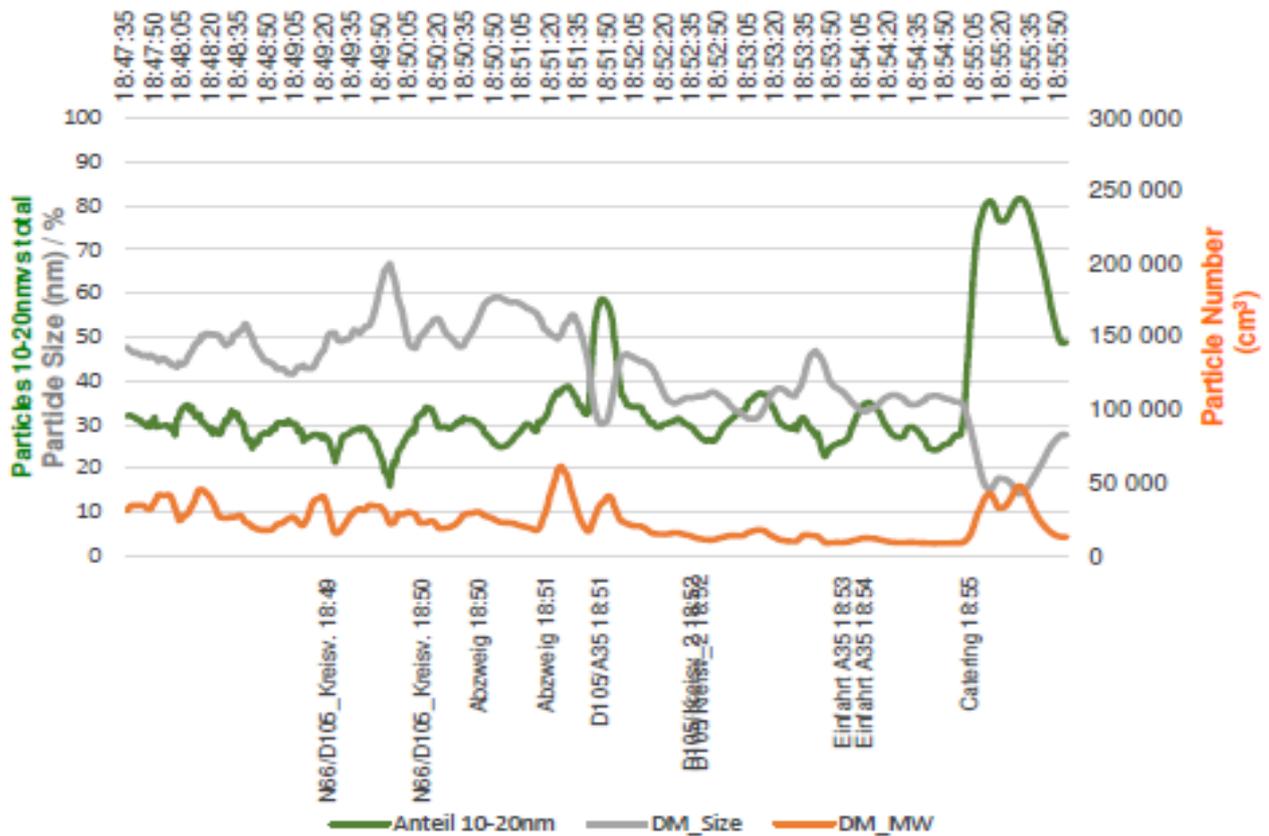


Fig. 3 : données enregistrées entre Weil am Rhein sur le pont Palmrain et D105 via St Louis, à l'extrémité sud de l'aéroport.



Fig. 4a: Tour track to reach the catering building arriving from Germany on D105

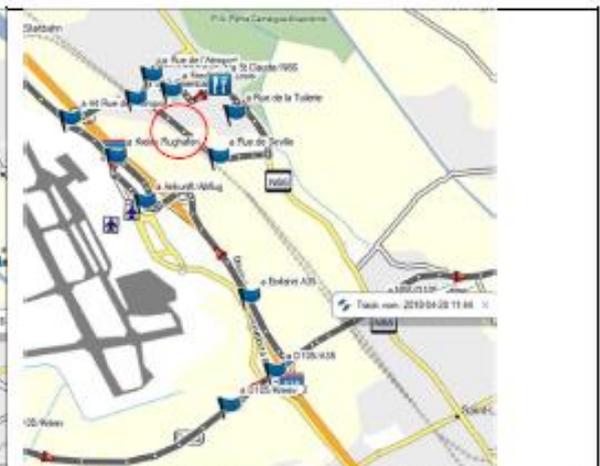


Fig. 4b: Track for figure 6. Indicated is the zone of high concentration in Saint-Louis-la-Chaussée

Notre première position de mesure stationnaire, (voir la carte de la figure 4a), a eu lieu dans le bâtiment de catering, près des accès. La température de l'air était de 23 ° C et le point de rosée d'environ 3 ° C. Peu de temps après notre arrivée, un avion situé près de nous a été tracté et a démarré ses moteurs.

Le vent de nord-ouest, de 6 km/h avec des rafales allant jusqu'à 15 km/h, était fortement parfumé de kérosène. Cette impression sensorielle était bien corrélée aux données collectées. Et chaque fois que le nombre de particules est sorti de son niveau de « bruit de fond » d'environ 10 000 pt/cm³, la taille des particules dominantes représentait la fraction de taille 10-20 nm, (voir figure 5). Si nous considérons 10 000 UFP par cm³ comme normal pour l'air en milieu urbain, il est patent que les émissions des aéronefs peuvent générer une charge d'UFP plus de 100 fois supérieure aux endroits sous le vent.

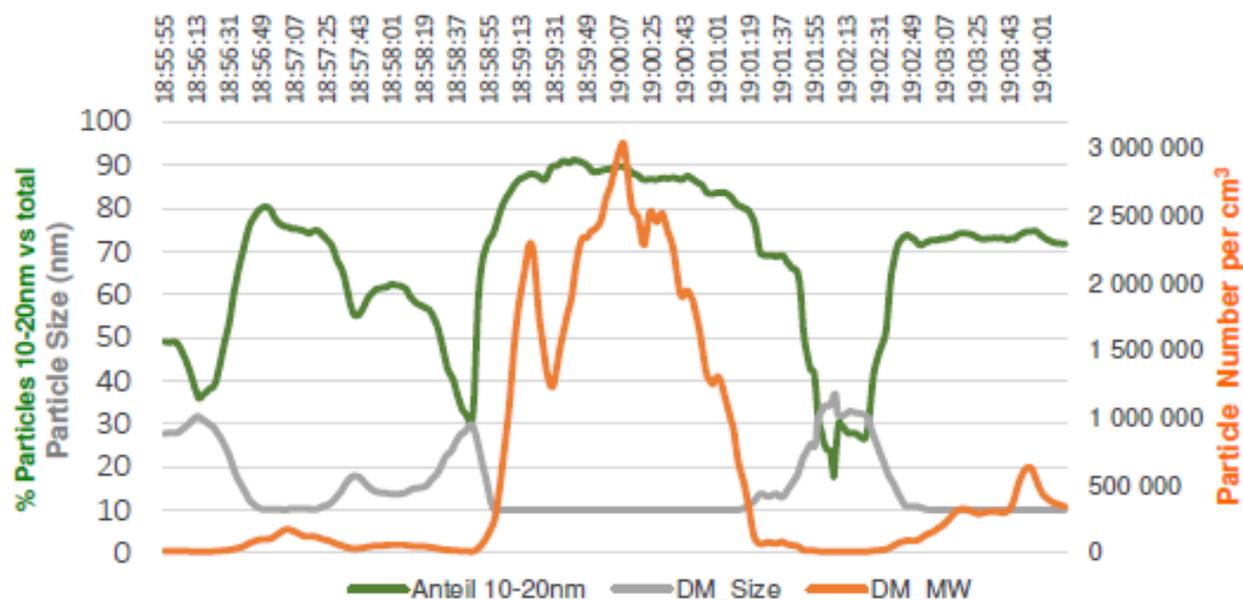


Fig. 5 : signature UFP d'un avion au départ, qui vient de démarrer ses moteurs à réaction pendant le tractage. La distance à l'avion pendant la période de mesure était de l'ordre de 150 m. La quantité relative de petites particules (ligne verte) augmentent jusqu'à 90% et le nombre d'UFP culmine à 3 millions de pt/cm³. Initialement la taille moyenne (ligne grise) des particules dans l'air est d'environ 30 nm, mais elle diminue à la détection de plus basse limite, de 10 nm, dès que l'air de combustion est présent. La ligne droite indique que de nombreuses particules émis par les turbines à réaction sont bien plus petites que 10 nm.

Le lendemain 28 avril, le vent soufflait moins fort, avec juste des rafales jusqu'à 6 km/h et la direction avait changé plusieurs fois vers midi. La température de l'air était d'environ 16 ° C et le point de rosée 7 ° C. Nous avons fait le tour de l'aéroport en voiture en prenant des mesures en continu et avons recueilli des données à partir d'autres endroits du côté est et ouest.

Dans la figure 6 encore, la différence très caractéristique de la pollution routière et des gaz d'échappement des jets est démontrée. À 12:02:42, venant de l'aérogare, nous avons traversé le pont sur l'autoroute A35 en direction Saint-Louis-la-Chaussée. Près de l'autoroute, une nette augmentation des particules de taille supérieure a été observé, qui est rapidement tombée aux valeurs de fond après le pont A35. Nous avons ensuite conduit le long de la voie ferrée, au sud. Au périmètre du quartier résidentiel, juste avant la sortie à la rue de Séville, nous avons rencontré pendant environ 20 s une zone de forte concentration très localisée de pollution avec la distribution typique de petites particules d'échappement de jets. À une vitesse de 30 km/h, cela correspond à une largeur d'environ 200 m.

Considérant que ce point était à 1 km du terminal ou à 1,2 km de la piste, la concentration de 300 000 particules par cm³ était étonnamment élevé et a montré qu'une pollution UFP substantielle avait atteint les zones résidentielles.

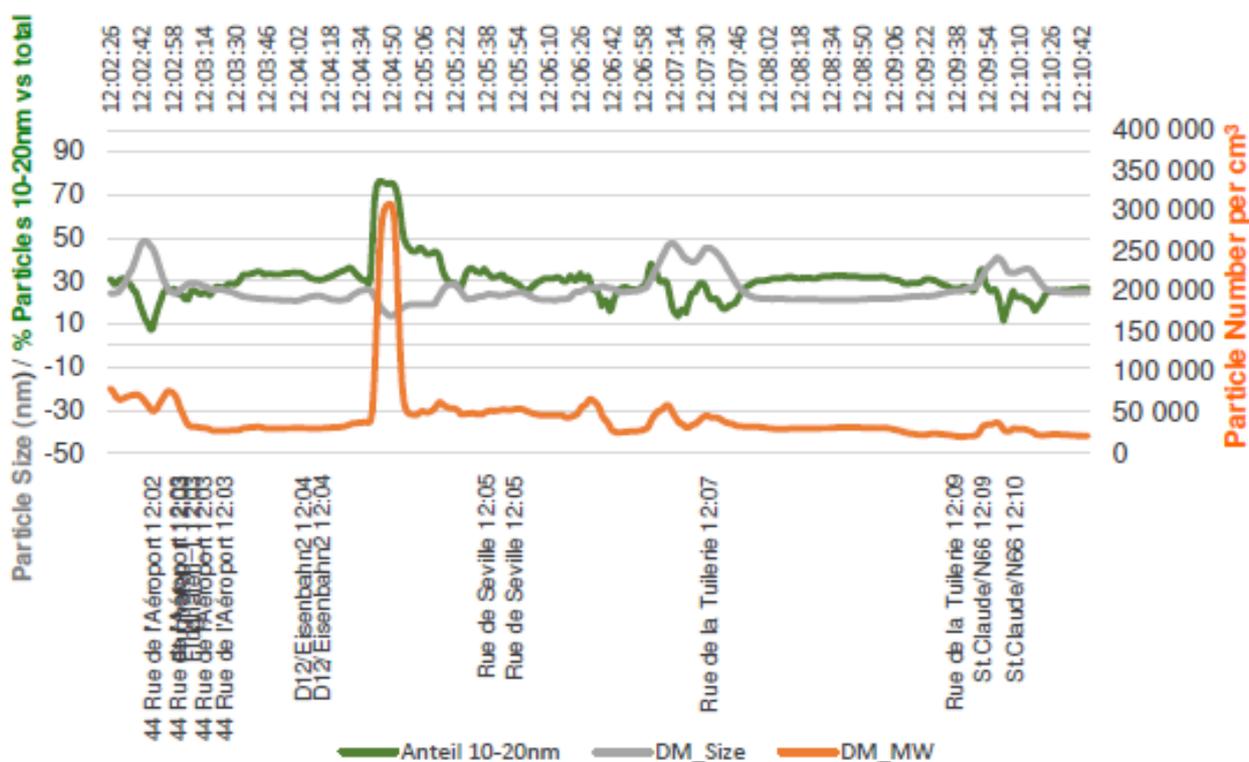


Fig. 6 Poursuite de l'enregistrement en voiture le 28 avril à midi, (voir carte sur la figure 4b).

Description du trajet : en arrivant de l'aérogare, traverser l'autoroute A35 direction Saint-Louis-la-Chaussée, puis en suivant les voies ferrées au sud, bifurquer dans la rue de Séville avant de revenir par la petite route résidentielle vers le nord.

Discussion

Notre objectif était de fournir des preuves de la pertinence de la charge des UFP émises par les Aéroport de Mulhouse et de sensibiliser aux dangers des particules ultrafines (27). En conséquence, nous demandons de l'aéroport, des autorités responsables de la surveillance aérienne et des politiciens une évaluation approfondie de la contamination UFP, qui se propage dans les zones résidentielles dans un périmètre d'au moins 20 km autour de l'aéroport.

L'impact sur la santé des UFP dérivés de la combustion est documenté dans de nombreux articles scientifiques. En comparaison avec les plus grosses particules en suspension mesurées, comme les PM10 ou PM2,5, les UFP sont jusqu'à des millions de fois plus petites.

Ces particules ultrafines pénètrent ainsi toutes les barrières du corps humain, dans les poumons et les cellules de telle sorte que 90% des UFP inhalés restent finalement dans le corps.

Dû à leur composition chimique et à leur réactivité, les UFP sont une source du stress oxydant (28) et inflammatoire (29) de la cellule. Un exemple dramatique a été récemment publié dans une étude réalisée à Mexico, suggérant que les PFU peuvent provoquer la maladie d'Alzheimer prématurément (3).

Une autre particularité de la petite masse des UFP est leur distribution sans entrave par le vent, leur interaction avec d'autres polluants dans l'air ainsi qu'avec la lumière du soleil. Il a été démontré que les UFP peuvent être détectés à partir de leur source jusqu'à 20 km.

Considérant que depuis l'aéroport de Bâle-Mulhouse seul un petit nombre de vols longue distance, très polluants, décollent, la zone critique sera réduite, mais devrait avoir encore un rayon d'environ 10 km. Cela signifie qu'une contamination par les particules ultrafines par l'aéroport doit être considérée comme pertinente au moins de Berentzwiller à l'Ouest, jusqu'à Sierentz et Kembs au Nord, Rümtingen, Riehen et Grenzach à l'Est, et Therwil au Sud. Cela couvre entièrement la région de Bâle et Weil am Rhein, y compris la partie ouest de Lörrach.

Bien que nous n'ayons pas tenté de générer des données moyennées dans le temps pour un emplacement spécifique, nos résultats montrent :

- Il y a une immission UFP considérable générée par l'activité aéroportuaire en zone résidentielle.
- Les UFP des réacteurs ont une distribution de taille différente et peuvent donc être nettement distingués des autres sources telles que le trafic routier.

À proximité d'un aéronef à l'arrêt avec des moteurs en marche prêts pour le roulage, nous avons pu détecter une concentration de 3 milliards d'UFP dérivés des jets, par litre d'air respirable. C'est environ 1000 fois supérieur à la normale (niveaux de fond) et 1.000.000 fois plus élevé que dans l'air pur (régions alpines). Nous avons aussi montré qu'à une distance substantielle de l'aéroport, nous étions encore en mesure d'identifier et de distinguer les émissions des jets de ceux provenant d'autres sources. La corrélation entre l'activité de vol et la charge UFP générée est certainement compliquée par les conditions de vent. Nos exemples montrent cependant qu'avec une combinaison de déplacement et mesures stationnaires, la charge pesant sur la population locale peut être déterminée de manière qualitative.

En conclusion, nous affirmons que l'aéroport de Bâle Mulhouse émet des quantités considérables d'UFP qui peuvent être détectés en appliquant des méthodes relativement simples. Contrairement aux autres aéroports, Bâle-Mulhouse ne semble pas proactif dans l'évaluation et minimise la charge UFP qu'elle génère. Alors que d'autres aéroports européens annoncent fièrement leurs réalisations environnementales et autres améliorations observées, par ex. à Zürich Kloten 30, l'aéroport de Bâle ne veut même pas donner clairement des délais pour les étapes en retard de ce qui concerne la réduction de la pollution, tels que:

- Donner à la compagnie aérienne des incitations fortes pour ne pas venir plus longtemps à l'aéroport de Bâle avec des avions cargo anciens, jusqu'à 30 ans d'âge, et très polluants.
- Optimiser le trafic sur les aires et minimiser le délai de décollage en introduisant non seulement un faible niveau, mais le processus complet de prise de décision en collaboration aéroportuaire (A-CDM)
- Fourniture d'une alimentation électrique de 400 Hz pour toutes les portes afin de limiter l'utilisation des APU alimentés au kérosène et éliminer progressivement l'utilisation du GPU.
- Fourniture d'air refroidi (PCA) pour toutes les portes d'où partent les vols longue distance.
- Arrêter d'envoyer plusieurs avions juste avant minuit sur la voie de circulation encombrée, de manière à avoir une heure de départ à la porte bien avant le début de la fermeture de nuit.

Le dernier point est possible en raison de la réglementation française, qui utilise pour le temps limite l'heure de départ de la porte, peu bruyante, et non l'heure de décollage utilisée par la plupart des autres aéroports européens.

Pour donner un exemple éclairant, nous nous référons au tableau 1 qui illustre le décalage horaire de 5 avions entre le départ de leurs portes et leur décollage, en attente avec les moteurs en marche en moyenne 14 min sur le tarmac. Le temps total sur le tarmac était donc de 70 min avec une estimation consommation de carburant de 2 tonnes de kérosène. Calcul fait avec 3×10^{14} UFP/kg de kérosène, 6×10^{17} UFP Sont générés.

Departure time from gate	Takeoff time on runway 15	Aircraft Type
23:48	00:02	B752
23:55	00:07	A319
23:57	00:09	A320
23:57	00:12	?
23:58	00:15	A332

Tableau 1: Exemple de gaspillage de carburant à l'aéroport de Bâle-Mulhouse à minuit le 27 juillet 2019

Ce volume uniformément réparti remplirait un volume d'air de $50 \times 400 \times 1000 \text{m}^3$ avec 30.000 UFP/cm^3 .

Revenant à nos données, nous exhortons donc l'aéroport à repenser la situation et à inclure une évaluation des UFP et de leur réduction dans sa stratégie environnementale.

Nous n'attendons pas seulement des déclarations d'intention mais des actions difficiles avec des délais contraignants.

Sources et Littérature :

- Bai, L.; Weichenthal, S.; Kwong, J. C., Burnett, R.T., Hatzopoulou, M., Jerrett, M., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Van Ryswyk, K., Lu, H. (2018). Associations of Long-Term Exposure to Ultrafine Particles and Nitrogen Dioxide With Increased Incidence of Congestive Heart Failure and Acute Myocardial Infarction. *Am. J. Epidemiology*, 188, 151- 159
- Barrett, S.R.H., Britter, R. E., Waitz, I. A. (2010). Global Mortality Attributable to Aircraft Cruise Emissions. *Environmental Science & Technology*, 44(19), 7736–7742
- Calderón-Garcidueñas L., Torres-Jardón R., Kulesza R.J., Mansour Y., González- González L.O., González-Maciél A., Reynoso-Robles R., Mukherjee P.S. (2020). Alzheimer disease starts in childhood in polluted Metropolitan Mexico City. A major health crisis in progress. *Environmental Research*, 183, 109137
- Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K., Balakrishnan K, et al. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study. *The Lancet*, 389, 1907-1918
- Corlin, L., Ball, S., Woodin, M., Patton, A., Lane, K., Durant, J., Brugge, D. (2018). Relationship of Time-Activity-Adjusted Particle Number Concentration with Blood Pressure. *International J. Environmental Research and Public Health*, 15, 1-20
- Donaldson, K., Tran, L., Jimenez, L., Duffin, R., Newby, D. E., Mills, N., et al. (2005). Particle and Fibre Toxicology. *Particle and Fibre Toxicology*, 2, 1–14
- Goldberg, M.S., Labrèche, F., Weichenthal, S., Lavigne, E., Valois, M-F., Hatzopoulou, M. et al. (2017). The association between the incidence of postmenopausal breast cancer and concentrations at street-level of nitrogen dioxide and ultrafine particles. *Environmental Research*, 158, 7-15

8. Hoek, G., Boogaard, H., Knol, A., De Hartog, J., Slottje, P., Ayres, J.G., Borm, P., et al. (2010). Concentration response functions for ultrafine particles and all cause mortality and hospital admissions: Results of a European expert panel elicitation. *Environmental Sci. & Technology*, 44, 476-482
9. Kapadia, Z. Z., Spracklen, D. V., Arnold, S. R., Borman, D. J., Mann, G. W., Pringle, K. J., et al. (2016). Impacts of aviation fuel sulfur content on climate and human health. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(16), 10521–10541
10. Krauskopf, J., Caiment, F., van Veldhoven, K., Chadeau-Hyam, M., Sinharay, R., et al. (2018). The human circulating miRNome reflects multiple organ disease risks in association with short-term exposure to traffic-related air pollution. *Environment International*, 113, 26- 34
11. Lavigne E, Lima I, Hatzopoulou M, Van Ryswyk, K., Mary Lou Decou, M-L., Luo, W., et al. (2019). Spatial variations in ambient ultrafine particle concentrations and risk of congenital heart defects. *Environment International*, 130, 1-7
12. Miller, M. R., Raftis, J. B., Langrish, J. P., McLean, S. G., Samutrtai, P., Connell, S. P., et al. (2017). Inhaled Nanoparticles Accumulate at Sites of Vascular Disease. *ACS Nano*, 11, 4542–4552
13. Ostro, B.; Hu, J.; Goldberg, D.; Reynolds, P.; Hertz, A.; Bernstein, L.; Kleeman, M.J. (2015). Associations of mortality with long-term exposures to fine and ultrafine particles, species and sources: Results from the California Teachers Study Cohort. *Environmental Health Perspectives*, 123, 549-556.
13. Peters, A., Hampel, R., Cyrys, J., Breitner, S., Gerschkat, U., Kraus, U., et al. (2015). Elevated particle number concentrations induce immediate changes in heart rate variability: A panel study in individuals with impaired glucose metabolism or diabetes. *Particle and Fibre Toxicology*, 12, 1-11
15. Seaton, A.; Godden, D.; MacNee, W.; Donaldson, K. (1995). Particulate air pollution and acute health effects. *The Lancet*, 345, 176-178.
16. Weichenthal, S., Bai, L., Hatzopoulou, M., Van Ryswyk, K., Kwong, J. C., Jerrett, M., et al. (2017). Long-term exposure to ambient ultrafine particles and respiratory disease incidence in Toronto, Canada: a cohort study. *Environmental Health*, 16, 1-11.
17. Weichenthal, S., Lavigne, E., Valois, M.-F., Hatzopoulou, M., Van Ryswyk, K., et al. (2017). Spatial variations in ambient ultrafine particle concentrations and the risk of incident prostate cancer: A case-control study. *Environmental Research*, 156, 374-380.
18. Chow JC, Watson JG. Review of Measurement Methods and Compositions for Ultrafine Particles. *Aerosol Air Qual Res.* 207AD;7(2):121-173.
19. WHO Regional Office for Europe. (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project, 1–309. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report.pdf
20. Brem, B.T., Durdina, L., Setyan, A., Kuo, Y.-Y., Bahk, Y.K., Buha, J., et al.. (2016). Particulate Matter and Gas Phase Emission Measurement of Aircraft Engine Exhaust Final Report (04/2012 – 11/2015). EMPA-Report, 1–133

https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/de/dokumente/Politik/Umwelt/PM%20Measurement%20of%20Aircraft%20Engines_Swiss%20Research%20Public%20Results_2012-2015.pdf.download.pdf

21. Rivas, I., Beddows, D. C. S., Amato, F., Green, D. C., Järvi, L., Hueglin, C., et al. (2020). Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities. *Environment International*, 135, 1-19
22. Hudda, N., Simon, M. C., Zamore, W., Durant, J. L. (2018). Aviation-Related Impacts on Ultrafine Particle Number Concentrations Outside and Inside Residences near an Airport. *Environmental Science & Technology*, 52, 1765–1772
23. Keuken, M. P., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing, J. S., Hoek, G. (2015). Total and sizeresolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmospheric Environment*, 104, 132-142
24. Stacey, B., Roy M.Harrison, RM.,Pope, F. (2020). Evaluation of ultrafine particle concentrations and size distributions at London Heathrow Airport. *Atmospheric Environment*, 222, 117148
25. Weichenthal, S., Van Ryswyk, K., Goldstein, A., Shekarrizfard, M., Hatzopoulou, M. (2016). Characterizing the spatial distribution of ambient ultrafine particles in Toronto, Canada: A land use regression model. *Environmental Pollution*, 208, 241-248
26. Fleuti, E. (2017). Ultrafine Particle Measurements At Zürich Airport, Zürich Airport Publication, 1–14;
https://www.zurich-airport.com/~media/flughafenzh/dokumente/das_unternehmen/laerm_politik_und_umwelt/2017-03_zurich-airport_ufp_study.pdf
27. AQEG (2018). Ultrafine Particles (UFP) in the UK, UK Department for Environment, Food and Rural Affairs, London, PB14510; <http://eprints.whiterose.ac.uk/156631/>
28. Jonsdottir HR, Delaval M, Leni Z, et al. Non-volatile particle emissions from aircraft turbine engines at ground-idle induce oxidative stress in bronchial cells. *Communications Biology*. February 2019:1-11
29. Hertel, S., Viehmann, A., Moebus, S., Mann, K., Bröcker-Preuss, M., Möhlenkamp, S., et al. (2010). Influence of short-term exposure to ultrafine and fine particles on systemic inflammation. *European Journal of Epidemiology*, 25(8), 581–592
30. Fleuti, E. (2015). Environmental Benefits of A-CDM at Zurich Airport, Zürich Airport Publication, 1-4;
https://www.zurich-airport.com/~media/flughafenzh/dokumente/das_unternehmen/laerm_politik_und_umwelt/2015-10_acdm_env-benefits_zrh.pdf