

Nantes-Atlantique

Evaluation des concentrations
en particules ultrafines dans les
environs de l'aéroport de
Nantes-Atlantique

Campagne Novembre 2020 – Juin 2021

Rapport intermédiaire – Juillet 2021

air | pays de
la Loire
www.airpl.org



sommaire

| | |
|---|-----------|
| synthèse..... | 2 |
| introduction..... | 4 |
| présentation des particules ultrafines | 5 |
| dispositifs de mesures | 10 |
| Sites de mesures | 10 |
| Méthodes de mesures..... | 12 |
| Mesures et invalidations..... | 13 |
| Expression des résultats | 14 |
| résultats..... | 15 |
| Les vents à Nantes-Atlantique | 15 |
| Caractérisation des particules ultrafines : au niveau de la Chauvinière | 17 |
| Caractérisation des particules ultrafines : au niveau de la Ranjonnière | 23 |
| Influence de l'aéroport sur les niveaux de particules ultrafines à la ferme de la Ranjonnière.... | 28 |
| Roses de pollution des différentes classes de particules ultrafines | 34 |
| Etude détaillée des élévations des concentrations en PUF enregistrées à la Ranjonnière | 36 |
| conclusions | 37 |
| perspectives | 37 |
| annexes..... | 38 |
| Annexe 1 : Air Pays de la Loire..... | 39 |
| Annexe 2 : définition d'un boxplot..... | 41 |
| Annexe 3 : Trafic routier à la Chauvinière..... | 42 |
| bibliographie..... | 44 |

contributions

Coordination de l'étude François Ducroz - Rédaction : Eneour Le Guiban, Exploitation statistique : Eneour Le Guiban, Mise en page : Bérangère Poussin, Exploitation du matériel de mesure : Arnaud Calvar, Arnaud Tricoire, Validation : François Ducroz, Céline Puente-Lelievre, David Bréhon

conditions de diffusion

Air Pays de la Loire ne peut en aucune façon être tenu responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses ou de toute œuvre utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels Air Pays de la Loire n'aura pas donné d'accord préalable.

remerciements

Nous souhaitons remercier les maires de Bouguenais et de Saint-Aignan-Grandlieu, de nous avoir permis d'installer les cabines accueillant les analyseurs de particules ultrafines sur leurs communes. Nous remercions également Mickael Reynaud, Alexia Baudic et Grégory Abbou d'Airparif pour leur aide sur l'interprétation des mesures à travers les scripts R qu'ils nous ont fourni. Enfin, nous remercions Thierry Delort de la Direction Générale de l'Aviation Civile pour nous avoir envoyé les mouvements d'avions durant la campagne.

synthèse

contexte : un enjeu de protection des populations

A la suite de la concertation préalable au réaménagement de l'aéroport de Nantes-Atlantique (2019), l'Etat s'est engagé à réaliser une étude approfondie de l'impact du projet de réaménagement sur l'environnement et notamment sur la présence de particules ultrafines (PUF) en zones habitées proches de l'aéroport. Dans ce cadre, la Direction Générale de l'Aviation Civile a demandé à Air Pays de la Loire un suivi sur deux ans de ces polluants. Ce rapport présente les résultats de la première étape de l'étude comprenant les 6 premiers mois de mesures.

objectifs :

L'objectif de l'étude est double :

- Evaluer les concentrations de particules ultrafines :
 - En zone urbaine non-influencée par l'aéroport
 - En zone habitée proche de l'aéroport
- Etudier l'influence du trafic aérien sur les niveaux de concentrations en particules ultrafines

dispositifs : deux analyseurs de type SMPS

Deux analyseurs sont utilisés dans l'étude. L'un est placé dans le quartier de la Chauvinière à Nantes, afin de mesurer les concentrations en particules ultrafines en zone urbaine non-influencée par l'aéroport.

Le second analyseur est disposé en zone habitée proche de l'aéroport, à la ferme de la Ranjonnière sur la commune de Bouguenais, à 500 m au nord de la piste.

résultats : en zone urbaine

Les profils journaliers des concentrations quartier de la Chauvinière font apparaître deux pics de concentrations :

- Un premier pic le matin caractérisé par des particules entre 5 nm et 50 nm et provoqué par les émissions liées au trafic routier.
- Un second pic le soir caractérisé par des particules plus grosses, entre 20 et 200 nm, provoqué par superposition des émissions du trafic routier et du chauffage.

résultats : proche de l'aéroport

Les mesures enregistrées au niveau de la ferme de la Ranjonnière ont montré :

- Des niveaux de pollution de fond plus faibles qu'en zone urbaine
- Les niveaux élevés de concentrations à proximité de l'aéroport sont essentiellement caractérisés par des élévations de concentrations de particules inférieures à 20 nm, d'une durée de 5 à 10 min. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées par vents de Sud-Ouest, lorsque le site de mesure est sous les vents de la piste.
- Des tendances similaires ont été relevées entre les profils journaliers moyens des concentrations et les profils journaliers des mouvements d'avions.

- Des surconcentrations moyennes de l'ordre de 65 000 P/cm³ par rapport à la concentration de fond ont été mesurées lors des pics de concentrations pour des vents provenant de la piste de l'aéroport.
- Un délai moyen de 3min30 entre la survenue de pics de concentrations et le décollage ou l'atterrissage d'un avion a été constaté.

conclusions et perspectives : un impact probable du trafic aérien sur les niveaux de PUF

L'ensemble des résultats permettent de mettre en évidence un impact du trafic aérien de l'aéroport de Nantes-Atlantique sur les niveaux de concentrations en particules ultrafines, notamment les plus fines (comprises entre 5 nm et 20 nm) enregistrées à 500 mètres de la piste, à la ferme de la Ranjonnière.

La poursuite de l'étude va permettre d'étayer ce résultat, notamment sur un site plus éloigné de la piste, localisé au Sud-Ouest de celle-ci, et d'évaluer l'impact de la reprise du trafic aérien sur les niveaux de concentrations mesurées en zone habitée, à proximité de l'aéroport de Nantes-Atlantique.

introduction

Les particules ultrafines (PUF) sont des particules dont le diamètre est inférieur à 100 nm. Elles peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques, principalement dues aux procédés de combustion, et sont généralement composées de carbone suie sur lesquelles vont venir se condenser des vapeurs provenant de rejets des moteurs.

D'après un avis de l'Anses datant de juillet 2019, ces particules, du fait de leurs petites tailles, sont susceptibles d'entrer profondément dans le corps et d'avoir un impact plus important sur la santé que les particules de diamètre plus élevé comme les PM2.5 et PM10. Elles ne représentent que 2% à 3% de la masse totale des PM alors qu'elles contribuent jusqu'à 90% de leur nombre. Les mesures de concentrations en nombre, plus représentatives des particules ultrafines, seront donc préférées aux concentrations massiques. La pollution en particules ultrafines étant une pollution émergente, il n'existe pas encore de réglementation à son sujet. Les études concernant les particules ultrafines sur et autour des aéroports montrent que le trafic aérien peut en être une source significative qu'il convient d'étudier davantage [ACNUSA, 2017].

La concertation préalable au réaménagement de l'aéroport de Nantes-Atlantique du 27 mai au 31 juillet 2019 a fait émerger l'enjeu de la protection des populations. Suite à cette concertation, l'Etat s'est engagé à réaliser une étude approfondie de l'impact du projet sur l'environnement et a demandé à Air Pays de la Loire un suivi des particules ultrafines sur deux ans.

L'aéroport de Nantes-Atlantique, situé au sud-ouest de la ville de Nantes, sur les communes de Bouguenais et de Saint-Aignan-Grandlieu, a connu une diminution de 61.4% de son trafic en 2020 par rapport à l'année précédente. C'est donc dans un contexte de faible exploitation de l'aéroport que la campagne de suivi des particules ultrafines a commencé, avec en moyenne 39 vols par jour.

Ce rapport présente les résultats préliminaires de la campagne de suivi des PUF, financé par la DGAC, dont le but est d'une part d'étudier l'influence du trafic aérien sur les niveaux de concentrations et d'autre part, d'évaluer les niveaux de concentrations de particules ultrafines en zone urbaine non-influencée par l'aéroport et en zone habitée, proche de celui-ci.

présentation des particules ultrafines

Classification des particules ultrafines

Les particules sont classées en différents modes selon leurs tailles. Le mode correspond à la taille de particule la plus représentée en nombre. Il en existe quatre pour lesquelles les sources, compositions chimiques et mécanismes de formation diffèrent : le mode de nucléation qui comprend les particules inférieures à 30 nm. Le mode d'Aitken comprend les particules entre 30 et 100 nm, le mode d'accumulation pour des particules entre 100 nm et 1000 nm et enfin le mode grossier pour les particules dont le diamètre est supérieur à 1 µm. Les particules ultrafines sont donc classées dans les deux premiers modes.

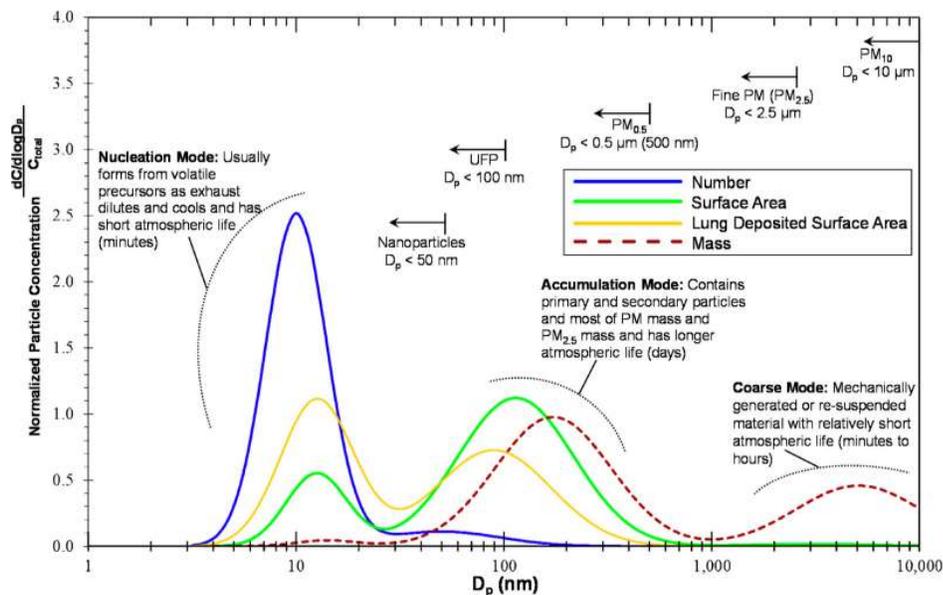


Figure 1 : Différents modes des particules [Baldauf et al, 2016]

-Les particules du mode de nucléation (1 à 30 nm) sont généralement formées par nucléation, c'est-à-dire par conversion de gaz en particules suite au refroidissement des émissions de combustion. Elles sont généralement composées de sulfates, nitrates, métaux et de composants organiques carbonés [Seinfeld et al, 2006].

Les collisions avec de plus grosses particules du mode d'accumulation sont responsables de leur relativement courte durée de vie, demi-vie de l'ordre d'une heure [Austin et al, 2021], c'est le phénomène de coagulation de ces particules. Les autres mécanismes d'élimination sont les dépôts secs et humides (lessivage), ou le grossissement par condensation.

-Les particules du mode d'Aitken (30 nm à 100 nm) proviennent majoritairement du grossissement des particules du mode de nucléation, de la coagulation de ces dernières ou encore en tant que polluant primaire suite à la combustion de matières fossiles. Elles sont principalement composées de suies ou de cendres servant de noyau de condensation à des matières volatiles.

-Le mode d'accumulation (100 nm à 1000 nm) est composé d'agglomérats de matières carbonées provenant de la combustion d'hydrocarbures ou de la coagulation de particules des autres modes. Elles se forment dans la chambre de combustion ou peu après, par la condensation de matières organiques carbonées. Elles ont une longue durée de vie, de l'ordre de plusieurs jours à plusieurs semaines et peuvent de ce fait se déplacer sur de longues distances. Elles sont cependant

facilement éliminées par lessivage. De par leurs tailles, elles interagissent avec la lumière visible et sont donc en partie responsables de la pollution visuelle.

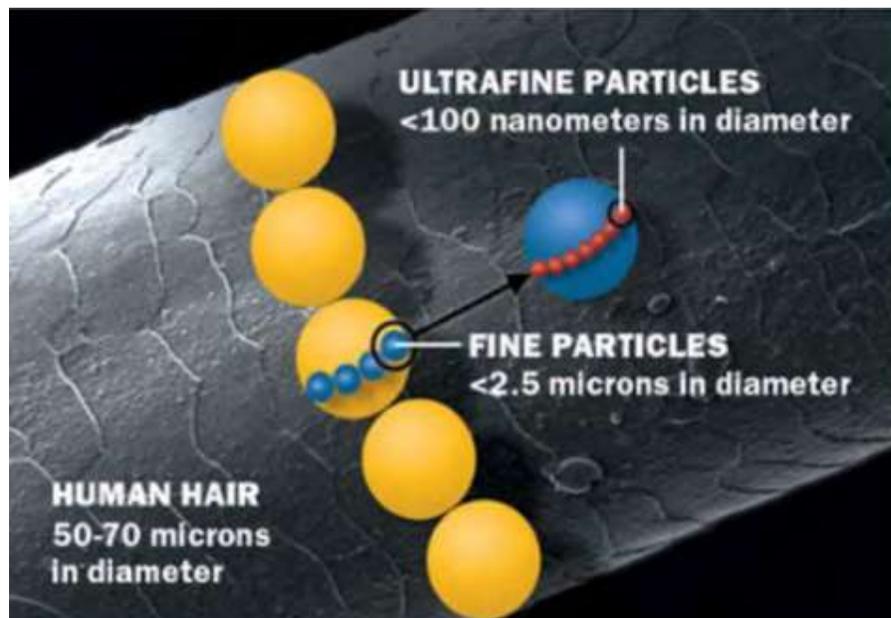


Figure 2 : Taille d'une particule ultrafine comparé à un cheveu

Comme l'indique le tableau ci-contre, l'étude [Wichmann *et al.*, 2000] met en avant la prédominance du nombre de particules ultrafines par rapport au nombre de particules fines, de l'ordre de 88% du nombre total des particules fines et ultrafines. À l'inverse, les particules fines prédominent largement en masse, malgré leur faible nombre relatif à celui des PUF. Ainsi, la masse des particules fines est de l'ordre de 97% de la masse totale des particules fines et ultrafines, contre 3% pour les particules ultrafines.

| Size (μm) | Contribution ^a | |
|---|---------------------------|------|
| | Number | Mass |
| Ultrafine particles | | |
| NC _{0.01-0.03} | 88% | 3% |
| NC _{0.03-0.05} | | |
| NC _{0.05-0.1} | | |
| Fine particles | | |
| MC _{0.1-0.5} | 12% | 97% |
| MC _{0.5-1.0} | | |
| MC _{1.0-2.5} | | |
| Total ultrafine and fine particles 0.01-2.5 | 100% | 100% |
| Coarse particles | | |
| PM _{10-2.5} | — | 20% |
| TSP-PM ₁₀ | — | 30% |

^a Based on the data from Erfurt 1995 to 1998: contribution of ultrafine and fine particles to number and mass in the size range of 0.01-2.5 μm and contribution of coarse particles to mass of total aerosol size distribution.

Tableau 1 : Contribution en nombre et en masses de différents types de particules

Granulométrie des différentes sources d'émissions de particules ultrafines

La mise en place en 2011 de la norme Euro 5 pour les diesels neufs et depuis 2015 la norme Euro 6 pour les essences neuves, impose une limite d'émissions en nombre de particules. L'installation de filtres à particules rend la plage d'émissions du trafic routier assez large et très variables selon les véhicules. On retrouve tout de même des modes de distribution de particules émises par les voitures dans les modes de nucléation et d'Aitken [Rivas *et al.*, 2020].

Le trafic aérien est une source significative d'émission de particules ultrafines par la combustion de kérozène [ACNUSA 2017]. La taille des particules émises par les moteurs à réaction est inférieure à celles émises par les moteurs thermiques des voitures. Selon des études déjà existantes [Stacey *et al.*, 2020 ; ACNUSA 2017, Liati *et al.*, 2014 ; Stafoggia *et al.*, 2016 ; Keuken *et al.*, 2015], les émissions du trafic aérien seraient caractérisées par des émissions dans le mode de nucléation, compris entre 10 et 20 nm.

L'étude de Liati *et al.* de 2014 a mesuré par microscope à transmissions électronique (TEM) les diamètres des PUF pour différents régimes moteurs d'avions. Elle mentionne trois régimes moteurs (7% : phase de roulage, 100% : décollage et un régime intermédiaire à 65%). Selon l'étude, le régime 65% se veut représentatif du régime de croisière. Il en résulte des modes à 24, 20 et 13 nm pour des régimes moteurs de 100%, 65% et 7% respectivement [Liati *et al.*, 2014]. L'étude ne mesure pas directement les particules mais les constituants primaires des agglomérats de particules (entourés, figure 3). 60%, 75% et 90% des particules mesurées sont comprises entre 10 et 25 nm pour des régimes de 100%, 65% et 7% respectivement. D'après cette étude, les particules sont d'autant plus petites que le régime moteur est bas.

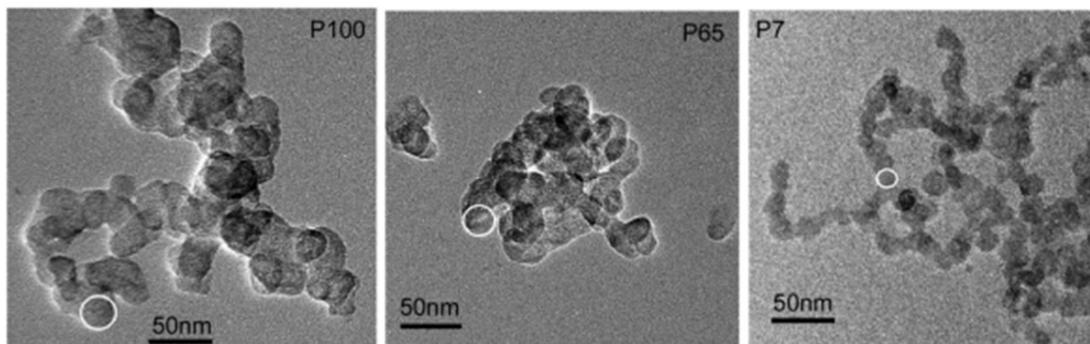


Figure 3 : agglomérats de particules ultrafines pour les trois régimes moteurs. Les particules primaires considérés dans l'étude sont entourés [Liati *et al.*, 2014].

Concentrations en particules ultrafines dans différents milieux

Les concentrations en nombre des particules ultrafines dépendent du lieu où elles sont mesurées. En altitude, dans la couche limite marine et en troposphère libre, les concentrations varient entre 300 et 2 000 P/cm³ alors que dans la couche limite continentale, les mesures vont de 1 000 à 10 000 P/cm³ [Spracklen *et al.*, 2010].

En environnement urbain en revanche, les concentrations ont une très grande variabilité tant spatiale que temporelle et varient de 10³ P/cm³ à 10⁷ P/cm³ dans des cas spécifiques où les particules s'accumulent comme les rues canyons et les tunnels par exemple [Kumar *et al.*, 2010]. Aux abords d'une route par exemple, on a mesuré une diminution de 50% des concentrations à 150 m de celle-ci pour atteindre une concentration de fond à 500 m [Austin *et al.*, 2021]. D'autres études mesurant les concentrations en particules ultrafines en environnement urbain, aux abords de routes ont constaté une décroissance exponentielle de la concentration avec l'augmentation de la distance [Sioutas *et al.*, 2005 ; Karner *et al.*, 2010].

Les émissions provenaient, en 2010, en majorité du trafic routier (60%), des autres transports (19%) et de la combustion domestique (13%) [Paasonen *et al.*, 2013].

Une grande variabilité spatiale et temporelle des concentrations en particules ultrafines a également été décrit à proximité des aéroports. Les concentrations horaires moyennes au sein de l'aéroport de Zurich atteignaient, sur la même période, les 139 000 P/cm³ contre 16 000 P/cm³ à 1 km de distance entre les deux stations de mesures. Et pour une même station, les mesures en moyennes horaires allaient de 1 400 P/cm³ à 786 000 P/cm³, pour une moyenne de 104 000 P/cm³, suggérant une grande variabilité temporelle également [Fleuti *et al.*, 2017].

Une autre étude a comparé l'exposition de différents métiers travaillant au sein d'un aéroport de Copenhague (tableau 1) et a constaté des différences significatives d'expositions. Les bagagistes, plus souvent sur les pistes, sont les plus exposés avec des concentrations jusqu'à 7 fois plus élevées que des employés travaillant à l'intérieur de l'enceinte de l'aérodrome. Les bagagistes étaient exposés à des concentrations de 37 000 P/cm³ en moyenne contre 5 000 P/cm³ en moyenne aux abords de l'aéroport [Moller *et al.*, 2014].

Table 2. Exposure to ultrafine particles among five occupational group's at Copenhagen Airport, October 2012.

| Variable | Statistics | Baggage handlers | Catering drivers | Cleaning staff | Airside security | Landside security |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|-------------------|
| UFP 10 ³ /cm ³ | GM (CI 95%) crude ^a | 38 (25–56) | 18 (12–25) | 11 (8–15) | 11 (7–15) | 4 (2–8) |
| UFP 10 ³ /cm ³ | GM (CI 95%) adjusted ^b | 37 (25–55) | 20 (14–29) | 12 (9–17) | 12 (8–18) | 5 (2–11) |

^aAdjusted for variation within individuals.

^bAdjusted for variation within individuals, time and date.

GM, Geometric mean.

UFP, ultrafine particles.

doi:10.1371/journal.pone.0106671.t002

Tableau 2 : Exposition de différents groupes au sein de l'aéroport de Copenhague [Moller *et al.*, 2014]

Influence du vent sur les concentrations mesurées à proximité des zones aéroportuaires

Toutes les études s'accordent à dire que les conditions météorologiques jouent un rôle majeur dans le transport et la dispersion des nuages de pollution. En effet, des vents de faibles vitesses vont avoir tendance à transporter la pollution alors que des vents plus forts vont avoir tendance à la disperser, faisant ainsi baisser les concentrations mesurées [Fleuti *et al.*, 2017 ; Choi *et al.*, 2013]. Les directions des vents sont tout aussi importantes. On le constate sur les roses de pollution (figure 4), avec des mesures de PUF particulièrement élevées uniquement lorsque les vents proviennent de l'aéroport le plus proche, dont les directions par rapport au capteur sont représentées par les icônes d'avions.

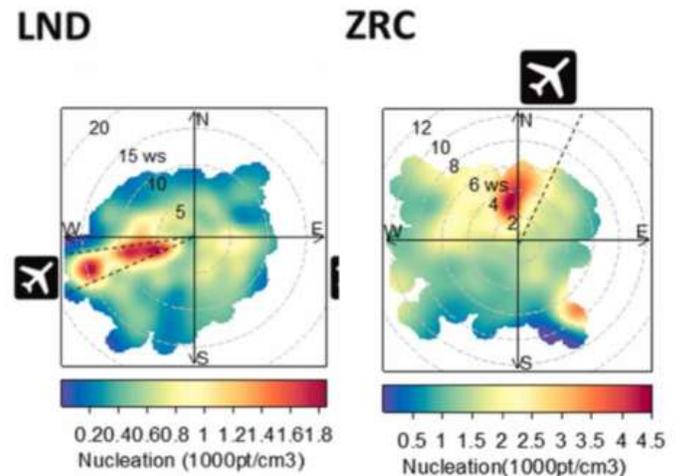


Figure 4 : Polar plots, respectivement à 18 km de l'aéroport d'Heathrow (Londres) et 10 km de l'aéroport de Zurich [Rivas *et al.*, 2020]

De plus en plus d'études mettent en avant l'exposition des populations vivant à proximité de sites aéroportuaires. En effet, plusieurs études ont pu constater une augmentation de la pollution de fond en particules ultrafines à de grandes distances de l'aéroport le plus proche, lorsque les vents provenaient de l'aéroport. Une augmentation de deux fois la pollution de fond a été mesurée à 16 km de l'aéroport de Los Angeles et de quatre à cinq fois la pollution de fond entre 8 et 10 km de celui-ci, à chaque fois pour des vents provenant de l'aéroport [Hudda *et al.*, 2014]. Au Pays-Bas, il a été mesuré à 7 km de l'aéroport de Schiphol (Amsterdam), des concentrations trois fois plus élevées que la pollution de fond et une augmentation de 20% à 40 km [Keuken *et al.*, 2015].

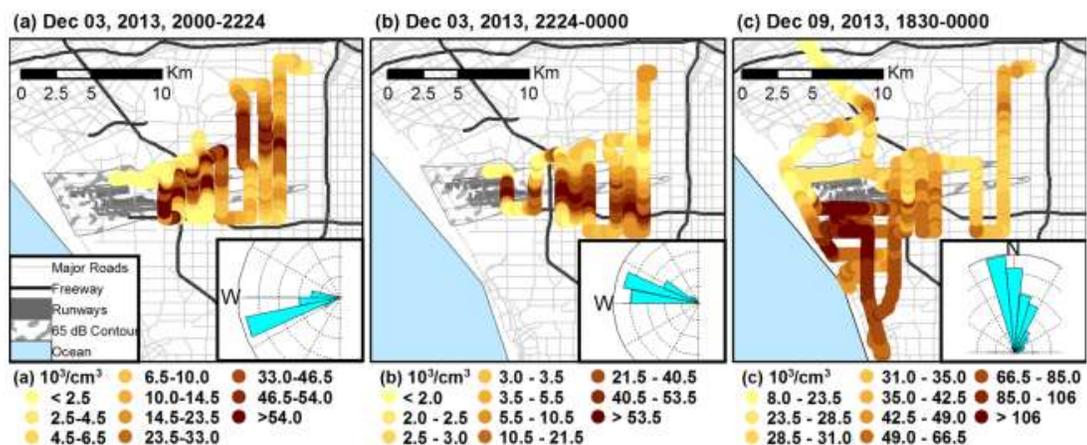


Figure 5 : Concentrations en PUF élevées à plusieurs kilomètres de l'aéroport de Los Angeles [Hudda *et al.*, 2014]

La figure 5 montre d'une part que de fortes concentrations en particules ultrafines ont été mesurées à une dizaine de kilomètres de l'aéroport de Los Angeles et d'autre part, que les concentrations mesurées dépendent de la provenance des vents. En effet, pour des vents d'ouest (5.a) le panache s'étend à l'est de l'aéroport et pour des vents de nord (5.c), le panache s'étend au sud de l'aéroport.

Par ailleurs, il est possible de mesurer l'impact individuel des avions passant au-dessus d'une station de mesure lorsque les conditions météorologiques sont favorables, de par la brève et brusque augmentation des concentrations mesurées [Stacey *et al.*, 2018].

dispositifs de mesures

Sites de mesures

Le premier analyseur de particules se trouve zone urbaine, à 10 km de l'aéroport, et à environ 1,5 km du périphérique nord, dans le quartier de la Chauvinière à Nantes. Cet emplacement a été choisi afin de pouvoir caractériser les concentrations typiques des particules ultrafines que l'on va pouvoir retrouver dans l'agglomération nantaise en milieu urbain non-influencée par l'aéroport. Cet analyseur changera d'emplacement au bout d'un an de mesures afin d'être placé en zone de proximité trafic. Le déplacement est conditionné par la disponibilité d'un site de trafic dans l'agglomération Nantaise.

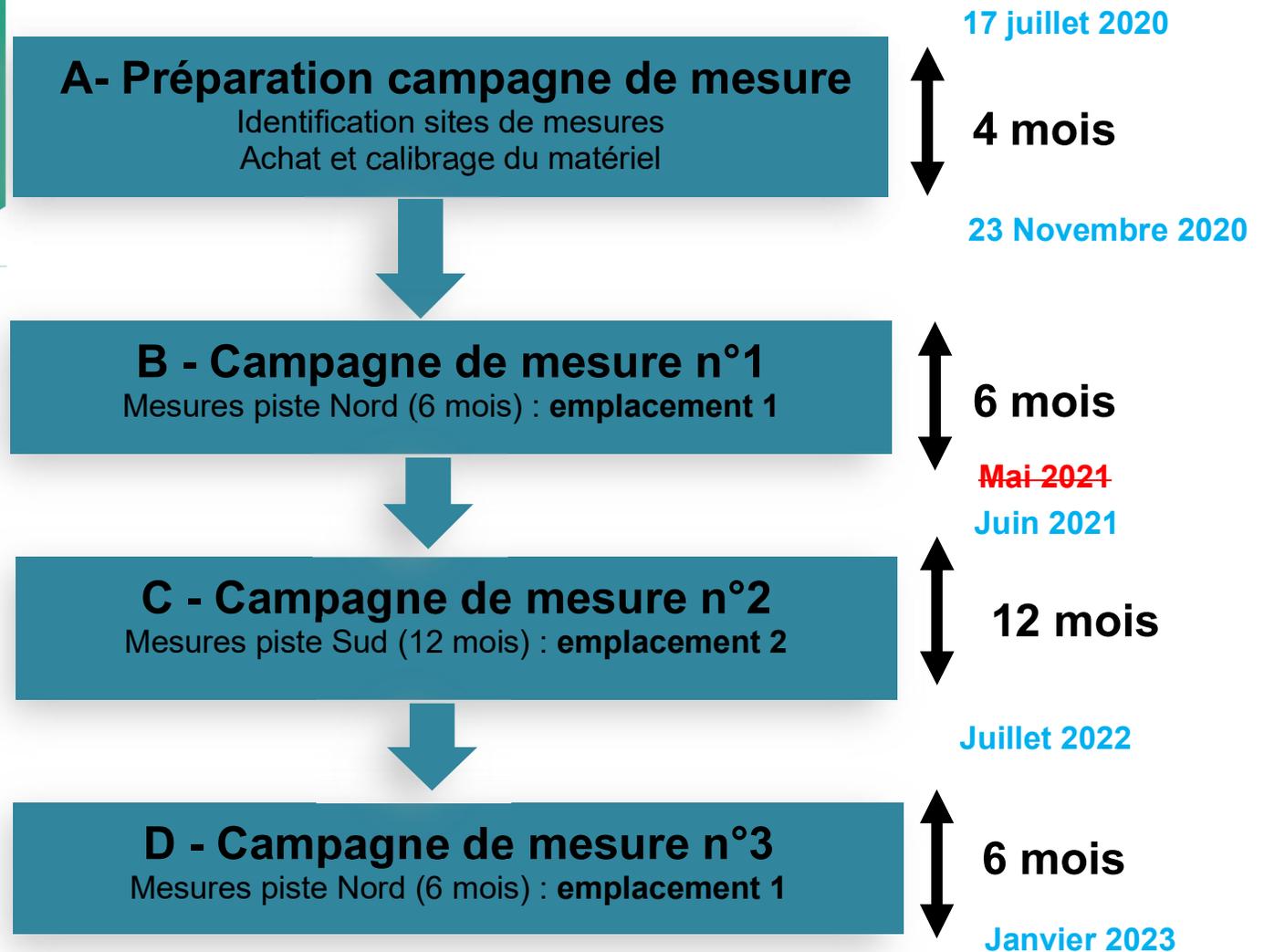
Le second analyseur changera d'emplacement à 6 mois puis à 18 mois du début de la campagne, et sera positionné alternativement au nord puis au sud de la piste. Le premier emplacement se trouve en zone périurbaine, à la ferme de la Ranjonnière, sur la commune de Bouguenais, à 500 m de la piste, à mi-chemin entre l'extrémité nord de la piste et le périphérique sud. L'emplacement permet d'étudier simultanément l'influence supposée de l'aéroport et celui du périphérique. Le second emplacement se trouve près du cimetière de la commune de Saint-Aignan-Grandlieu, en zone résidentielle, à 2 km de l'extrémité sud de la piste. Les deux emplacements sont positionnés au nord et au sud de la piste 03/21 et sensiblement proches de son axe.

Le premier changement de la ferme de la Ranjonnière à Saint-Aignan-de-GrandLieu a eu lieu le 22/06/2021.



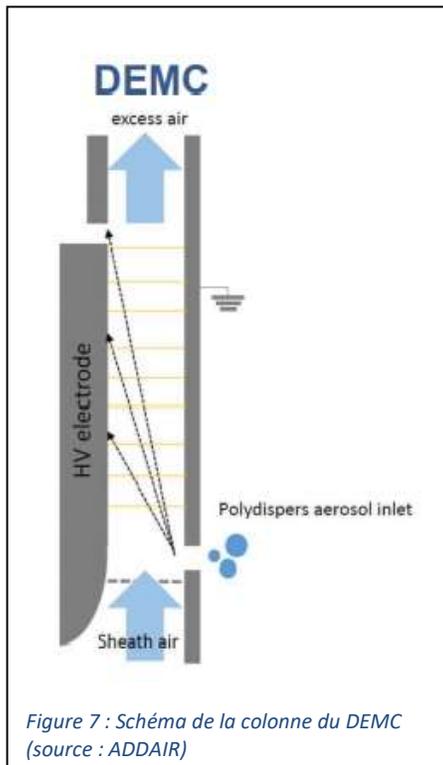
Figure 6 : Emplacements des différents sites de mesure des particules ultrafines (source : Google maps)

L'analyseur de la Ranjonnère a été interrompu pour des raisons techniques à trois reprises durant cette première période d'étude : du 07/01/2021 au 12/01/2021 ; du 25/02/2021 au 17/03/2021 et enfin du 13/04/2021 au 16/04/2021. Compte tenu de ces périodes d'interruption, il a été convenu de prolonger la période de mesures prévue initialement jusqu'au 31 mai, au 22 juin. La figure suivante résume les différentes étapes de la campagne.



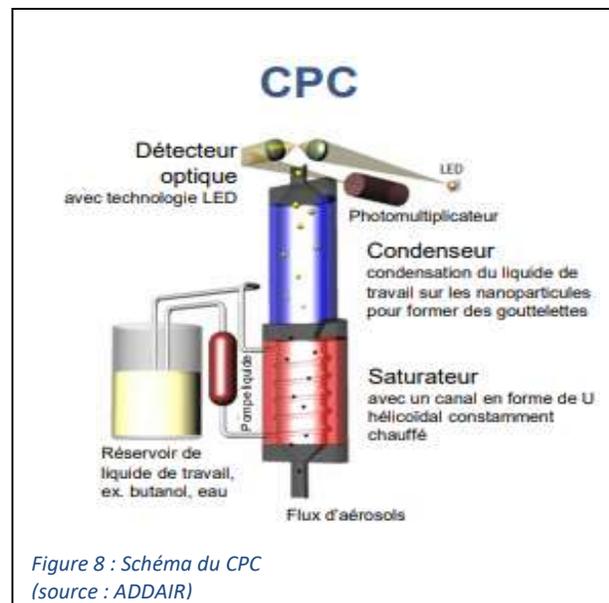
Méthodes de mesures

La caractérisation des particules ultrafines se fait par comptage, généralement à l'aide d'un SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) qui est composé d'un DEMC (Differential Electrical Mobility Classifier) qui sélectionne les particules suivant leurs tailles granulométriques via leurs mobilités électriques, et d'un CPC (Condensation Particle Counter) qui a pour but de les faire grossir afin de pouvoir les compter.



Il est nécessaire de charger électriquement les particules dans un neutraliseur. Pour ce faire, un rayonnement ionisant est envoyé sur les molécules d'air, générant des ions positifs et négatifs qui vont venir se coaguler avec les particules ultrafines. On observe à l'issue du neutraliseur, la création d'un équilibre stationnaire entre les différentes fractions de charges, dont la distribution est connue. Les particules, une fois passées dans le neutraliseur, et donc chargées électriquement, sont envoyées dans la colonne du DEMC. Un champ électrique variable va venir sélectionner les particules selon leur mobilité électrique, et donc leurs tailles. Une fois sélectionnées, les particules monodispersées sont envoyées au CPC pour comptage.

Le CPC permet de compter optiquement les particules préalablement sélectionnées dans le DEMC. Il est cependant nécessaire de les faire grossir afin de pouvoir les compter. Pour ce faire, la méthode consiste à faire passer le flux de particules ultrafines dans une chambre sursaturée en vapeurs d'alcool. L'alcool, après refroidissement, va venir se condenser sur les particules ultrafines ce qui aura pour conséquence de les faire grossir. Ainsi, la mesure brute est en particules par secondes et la concentration en nombre, en particules/cm³ (P/cm³), est déduite par inversion, en tenant compte des pertes par diffusion et de la dilution des PUF par leur passage dans la colonne du DEMC.



Mesures et invalidations

Le SMPS fournit une concentration en nombre de particules ultrafines par cm^3 (P/cm^3 dans la suite du rapport). Il y a 140 canaux, pour des mesures entre 3 nm et 430 nm afin de pouvoir mesurer les émissions du trafic aérien dont les particules émises ont des diamètres inférieurs à 30 nm. Il effectue un cycle de mesures toutes les 5 minutes. Il a été choisi de ne pas considérer les mesures entre 3 nm et 5 nm par manque de précision dans cette gamme (source : ADDAIR, fournisseur du matériel). Il est important de noter que les deux SMPS utilisés dans cette étude ont la même métrologie et sont paramétrés de façon identique. De ce fait, une comparaison stricte des résultats obtenus en environnement urbain et proche de la piste est possible. Les mesures SMPS étant limitées à une granulométrie de 430 nm, la comparaison avec une mesure par comptage simple (CPC) est à mener avec précaution. Les résultats fournis par le SMPS peuvent être alors sous-estimés par rapport aux résultats d'un CPC simple.

Cette distinction des concentrations selon les tailles de particules est importante car les profils granulométriques diffèrent selon les sources de particules ultrafines. Ainsi, sept classes ont été formées comme suit afin de simplifier l'interprétation des résultats :

- Classe 1 : $D < 20 \text{ nm}$
- Classe 2 : $20 \text{ nm} < D < 30 \text{ nm}$
- Classe 3 : $30 \text{ nm} < D < 50 \text{ nm}$
- Classe 4 : $50 \text{ nm} < D < 70 \text{ nm}$
- Classe 5 : $70 \text{ nm} < D < 100 \text{ nm}$
- Classe 6 : $100 \text{ nm} < D < 200 \text{ nm}$
- Classe 7 : $D > 200 \text{ nm}$

Selon les études déjà existantes, les émissions du trafic aérien seraient caractérisées par des émissions principalement dans les classes 1 voire 2 [Stacey *et al.*, 2020 ; Stafoggia *et al.*, 2016 ; Keuken *et al.*, 2015]. Les émissions du trafic automobile le seraient plutôt par des émissions dans les classes 1 à 4 [Rivas *et al.*, 2020 ; Zhu *et al.*, 2002], tandis que les émissions du chauffage urbain le seraient par les classes 3 à 6.

On retrouvera un mode (le diamètre pour lequel la concentration est la plus élevée, ou autrement dit, le pic de la distribution granulométrique) autour de 15 nm pour les avions.

Un travail d'invalidations a dû être mené sur les données de mesures des SMPS. En effet, deux types de problèmes ont été constatés après échanges avec le fournisseur et le constructeur. Un problème logiciel et un autre matériel, tous deux responsables de la seconde période d'arrêt prolongée des mesures, pour cause de renvoi du matériel au constructeur. On retrouvait des pics de concentrations aberrants à plusieurs millions voire plusieurs dizaines de millions de particules/ cm^3 sur un unique canal. Après échanges avec le fournisseur, l'interprétation des résultats a donc été menée une fois ces mesures invalidées.

Il en résulte une proportion de mesures valides de 84% à la Ranjonnière sur l'ensemble de la période d'études. Les périodes d'arrêt des mesures étant considérées comme « mesures invalides », elles représentent une grande majorité des invalidations. La proportion de mesures valides est de près de 98% à la Chauvinière.

Expression des résultats

Les concentrations sont exprimées en particules par cm^3 (P/cm^3).

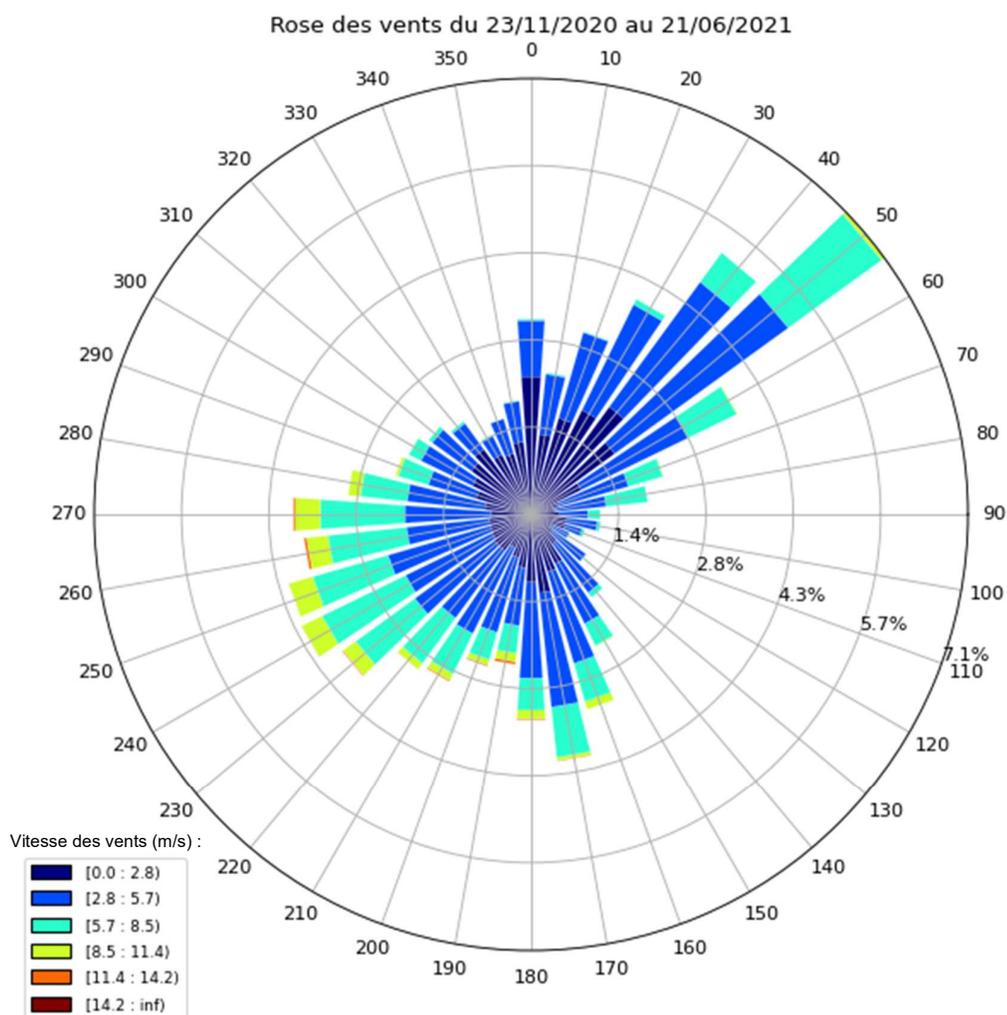
De façon globale, les heures sont exprimées en heures TU par analogie aux prescriptions nationales définies pour les polluants réglementés. Néanmoins, pour une comparaison stricte entre les mouvements d'avions basées sur les heures légales (heure UTC+1 ou heure UTC+2), nous avons, dans le chapitre consacré à l'influence des mouvements aériens, séparé la période d'étude en « période heures d'hiver » et « période heures d'été » afin de palier à ce problème. Une comparaison stricte entre les mouvements des avions et les concentrations peut donc être réalisée. De ce fait les mouvements d'avions à heures légales fixes ne seront pas dispersés sur deux créneaux horaires distincts.

résultats

Les résultats présentés dans ce chapitre se concentrent sur la période du 23/11/2020 au 21/06/2021, avec le second SMPS présent uniquement à l'emplacement 1, au nord de la piste, à la ferme de la Ranjonnaire. L'ensemble des évolutions temporelles et profils présenté dans ce chapitre est exprimé en heures TU.

les vents à Nantes-Atlantique

Les vents sont mesurés à la station Météo-France installée sur la plateforme aéroportuaire Nantes-Atlantique. Elles sont moyennées en quarts-heures. La rose des vents suivante présente la fréquence relative des vents (en %) en fonction de la direction, sur l'ensemble de la période d'étude.



Durant la période d'étude, et d'une façon générale, les vents à Nantes se caractérisent par deux directions de vents privilégiées : Nord-Est et Sud-Ouest. Les vents de Nord-Est s'établissent environ 20% du temps ; les vents de Sud environ 10% du temps et de Sud-Ouest environ 15% du temps. Les vitesses sont en grande majorité comprises entre $2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $8.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour une moyenne de $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La piste de l'aéroport de Nantes-Atlantique est orientée à 027/207°N géographique¹. Par conséquent, les vents propices à la mesure des émissions de la plateforme aéroportuaire, lorsque le SMPS est installé au niveau de la ferme de la Ranjonnière, sont des vents compris entre 190°N et 230°N environ. Cela représente 15% des vents.

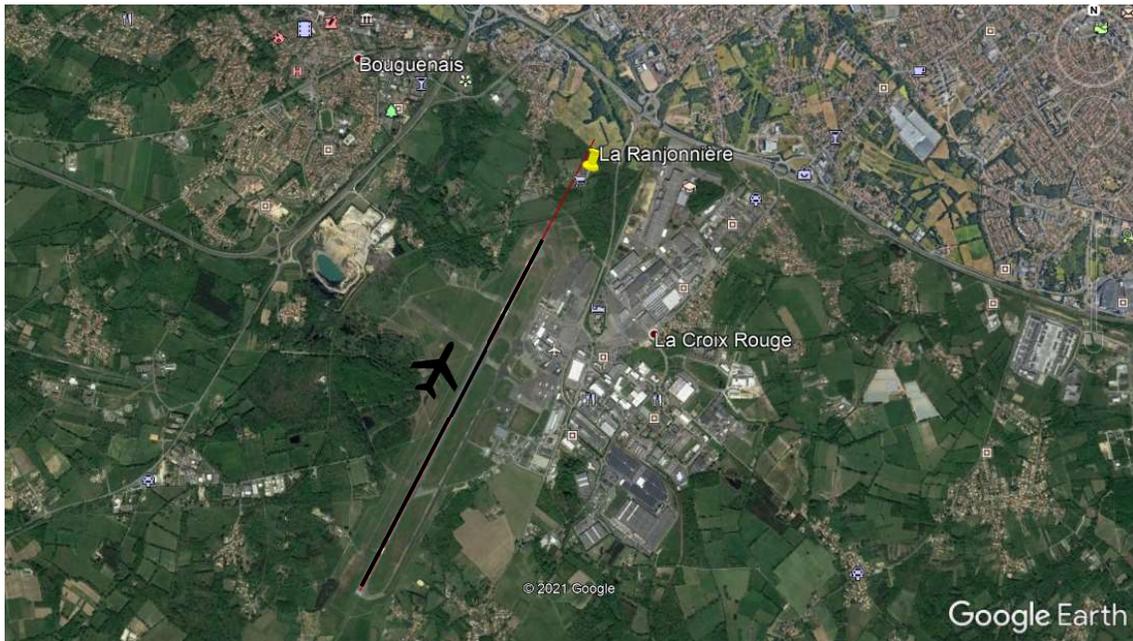


Figure 10 : Position du SMPS de La Ranjonnière avec la piste tracée en noir et l'axe de celles-ci en rouge

¹ Orientation 028/208°N magnétique avec déclinaison 008°W

caractérisation des particules ultrafines : au niveau de la Chauvinière

Concentrations et modes

L'évolution temporelle des concentrations à la Chauvinière est présentée dans la figure suivante.

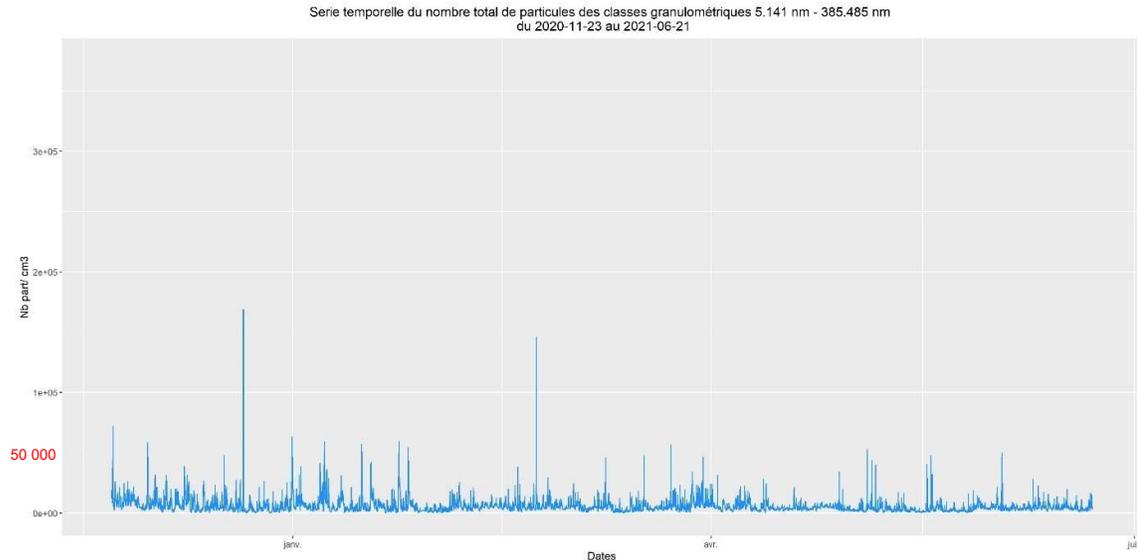


Figure 11 : Evolution temporelle des concentrations totales sur l'ensemble de la première période d'étude

La figure 11 présente l'évolution temporelle des concentrations avec une mesure toutes les 5 minutes. Les concentrations à la Chauvinière ne dépassent que très rarement les 50 000 P/cm³. On y observe tout de même deux pics particulièrement élevés à 170 000 P/cm³ et 145 000 P/cm³ respectivement le 21/12/2020 et le 22/02/2021.

Le graphique suivant (boxplot ou boîte à moustaches, définition en *annexe 2*) présente sur un même graphique différents éléments statistiques.

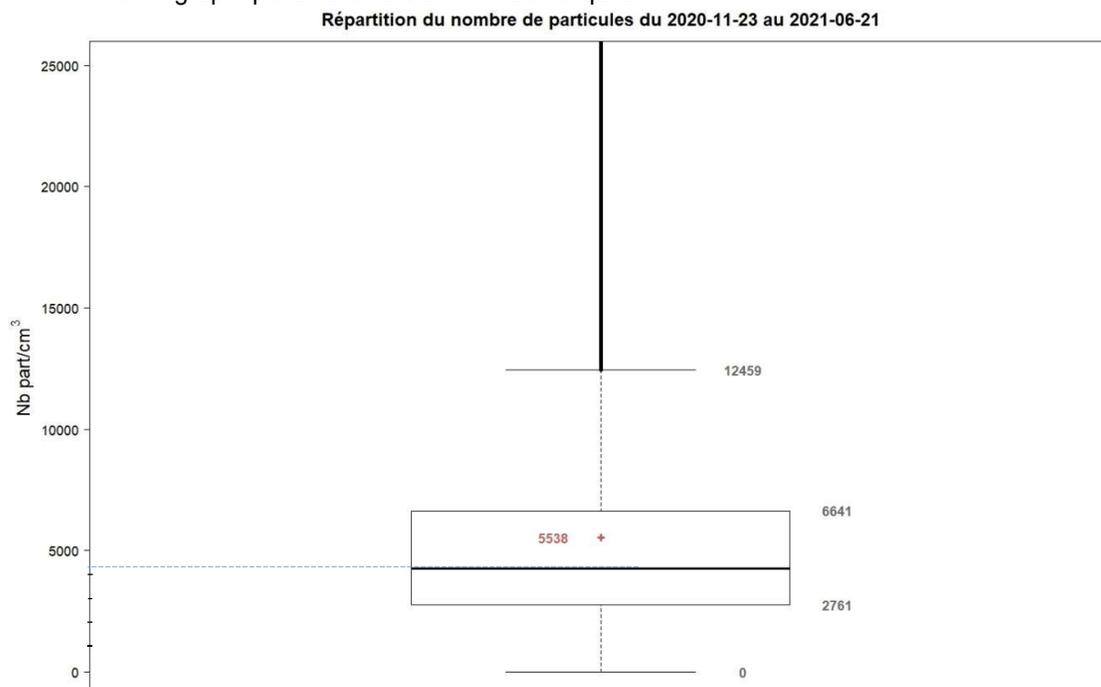


Figure 12 : Boxplot des concentrations sur l'ensemble de la période, échelle des ordonnées limitée à 25 000 P/cm³

La moyenne des concentrations était de 5 538 P/cm³ sur l'ensemble de la période et la médiane était proche de 4 300 P/cm³. L'étendue interquartile P₃-P₁ Chauvinière = 3 880 P/cm³. C'est une étendue qui caractérise la dispersion des mesures et dans laquelle on retrouve 50% de celles-ci.

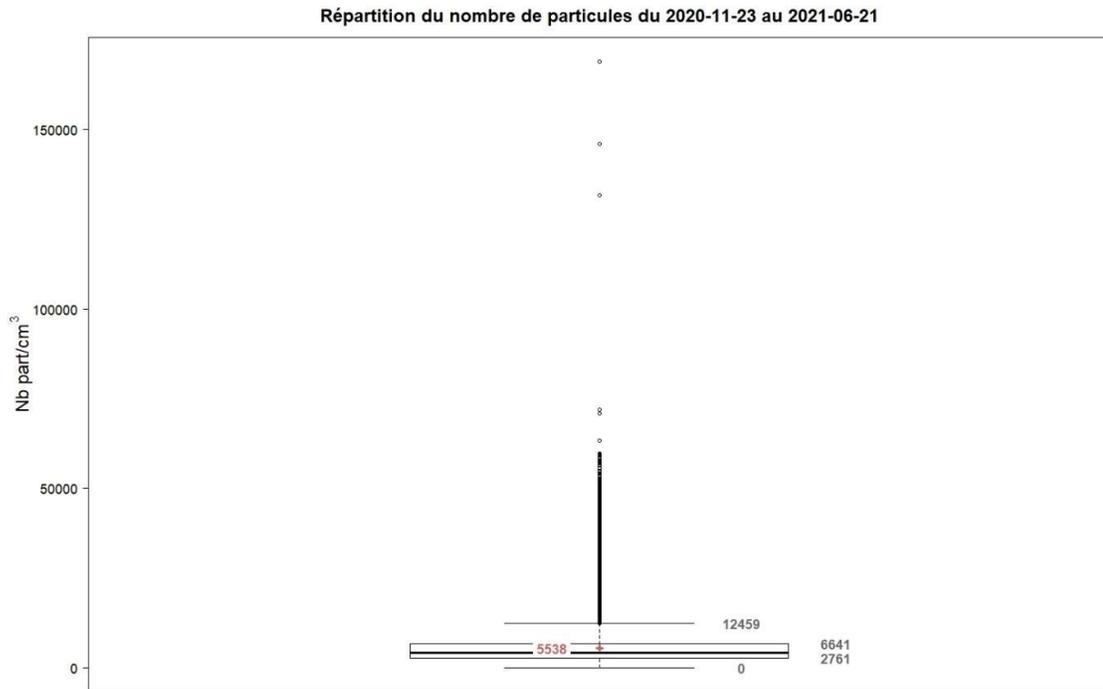


Figure 13 : Boxplot des concentrations sans limite d'échelle

Ce second boxplot (figure 13) permet de voir les valeurs extrêmes, dues à des activités parasites à proximité du site de la Chauvinière. La présence d'oxydes d'azote, et notamment de monoxydes d'azote simultanément aux PUF suggère des émissions très ponctuelles liées à un ou des véhicules situés à proximité immédiate de la station de mesure.

Distribution granulométrique moyenne du nombre de particules
du 2020-11-23 au 2021-06-21

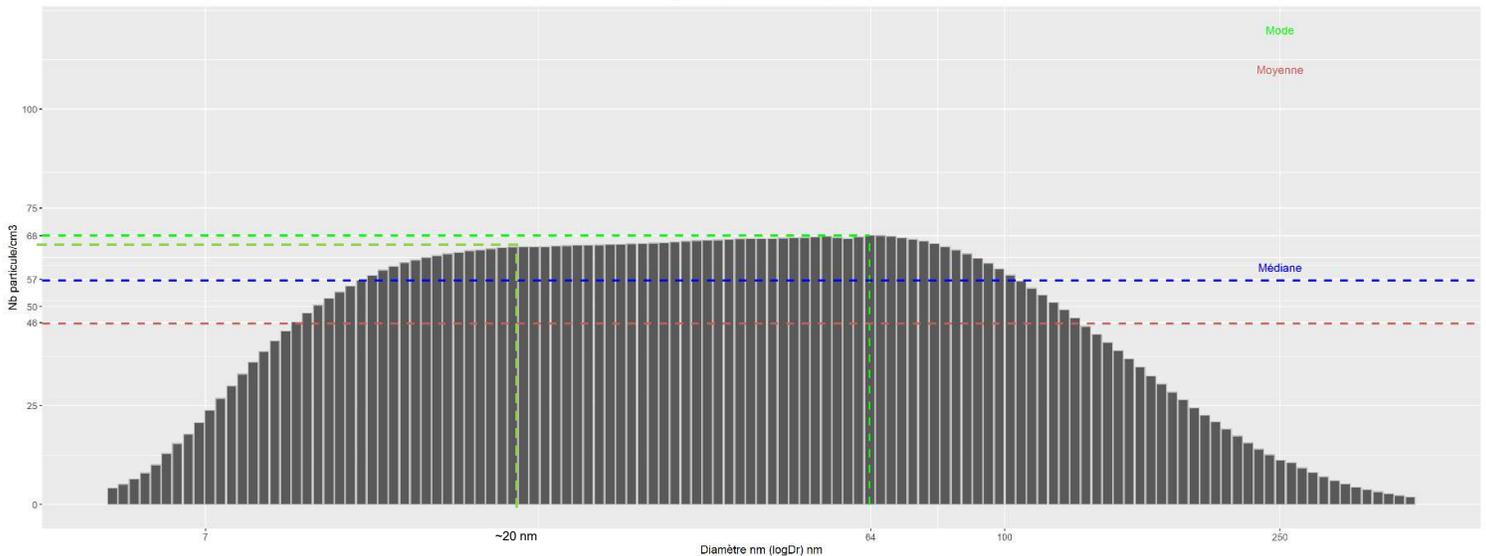


Figure 14 : Distribution granulométrique moyenne à la Chauvinière

La distribution granulométrique (figure 14) permet d'observer deux modes assez peu visibles, un mode principal à 64 nm et un mode secondaire dans les plus fines particules, autour de 20 nm.

Les particules ultrafines de la Chauvinière sont caractérisées par des concentrations assez constantes, avec assez peu de pics, et une distribution bimodale suggérant différentes sources.

Comparaison des différentes classes

Nous avons tracé le boxplot de chaque classe afin de les comparer les unes aux autres.

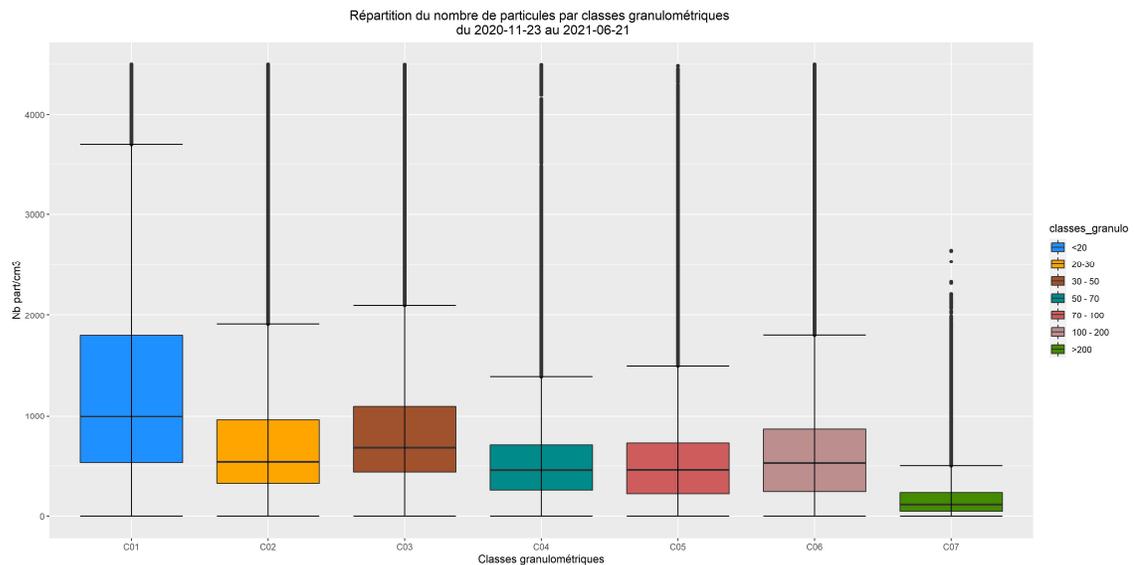


Figure 15 : Boxplots des concentrations décomposées selon les différentes classes

On observe, pour la première classe, une médiane de 1 000 P/cm³ et une étendue interquartile (P₃-P₁) d'environ 1250 P/cm³ bien supérieures aux autres classes, qui ont des médianes assez proches, autour de 500 P/cm³ pour les classes 2, 4, 5 et 6. La classe 3 possède une médiane légèrement plus élevée que les classes de 2 à 7, à 700 P/cm³. Les étendues interquartiles des classes 2 à 6 sont inférieures à la première classe et sont assez similaires, entre 500 et 700 P/cm³. La dernière classe est particulièrement plus faible que les autres.

La figure 15 permet donc de conclure que les concentrations sont plus élevées et plus dispersées pour les particules inférieures à 20 nm que pour les autres classes. Les concentrations sont légèrement plus élevées pour la 3^{ème} classe que de 2 à 6. Enfin, elles sont très faibles et peu dispersées pour les particules supérieures à 200 nm. La première classe est donc majoritaire en zone urbaine.

La figure suivante présente le profil journalier moyen des concentrations. Ce sont les moyennes des concentrations mesurées pour chaque heure (TU) de la journée lors de la période d'étude. Cela permet de voir l'évolution des concentrations au sein d'une journée type.

Les contributions de chaque classe ont été intégrées au profil.

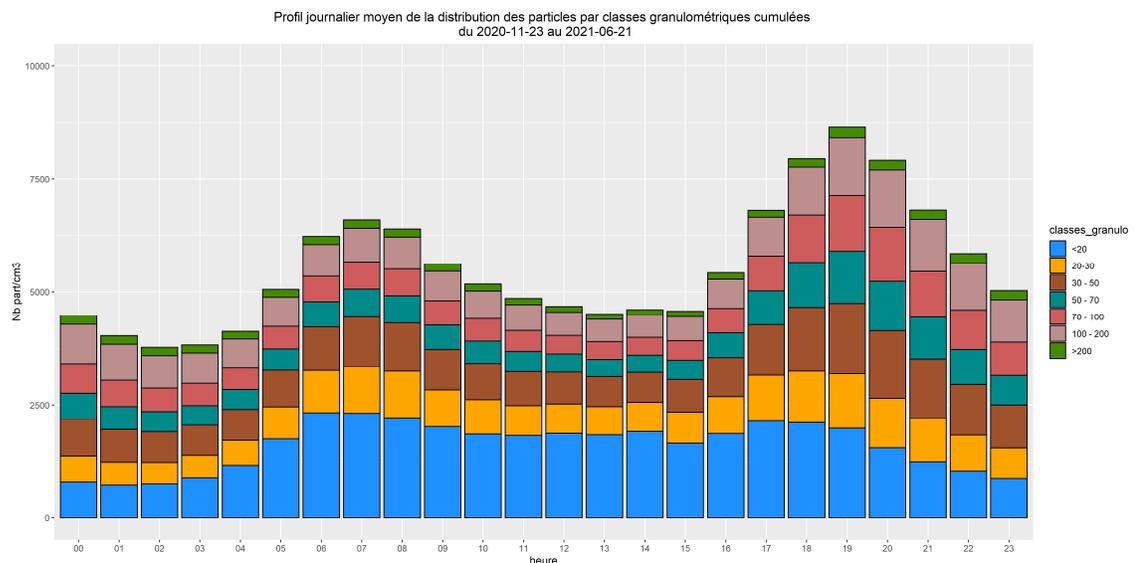
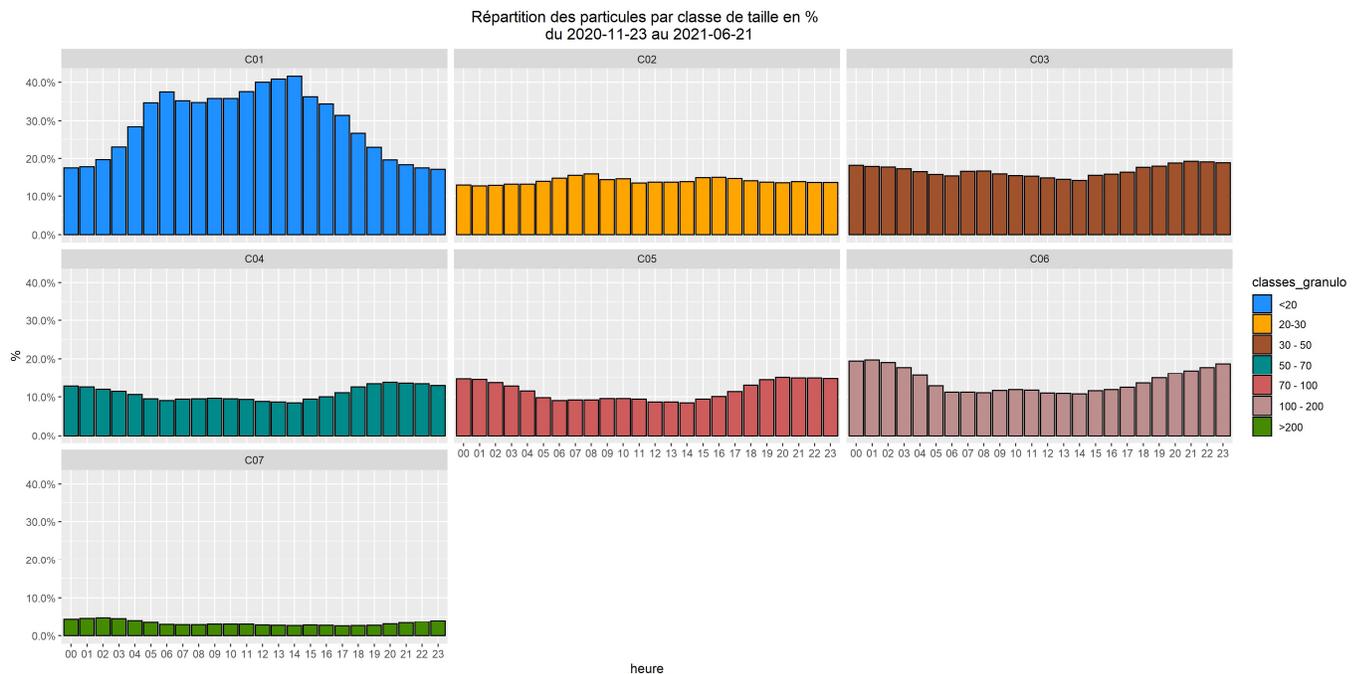


Figure 16 : Profil journalier moyen des concentrations, décomposé selon les différentes classes (heures TU)

Le profil journalier moyen des concentrations fait apparaître deux pics dans la journée. Les concentrations augmentent progressivement le matin à partir de 4h pour atteindre un premier pic à 7h aux alentours de 6 500 P/cm³ puis diminuent progressivement pour atteindre un minimum local de 4 500 P/cm³ à 12h. Elles réaugmentent en fin de journée pour atteindre un second pic vers 19h à 8 700 P/cm³ et rediminuent progressivement jusqu'à atteindre un niveau minimum de fond de 3 800 P/cm³ vers 2h.

On remarque, pour le pic du matin, que c'est particulièrement les concentrations de la première classe qui augmentent, et les classes 2, 3 et 4 dans une moindre mesure.

Les concentrations de la première classe se stabilisent vers 10h et restent quasi constantes jusqu'à 19h puis diminuent progressivement. Ce ne sont donc pas les concentrations en particules de cette première classe qui provoquent l'essentiel du pic du soir mais plutôt les classes 2, 3, 4, 5 et 6.



La figure 17 présente les proportions des différentes classes de particules ultrafines au sein de la journée. On remarque que la proportion des particules inférieures à 20 nm est plus élevée lors de la journée et particulièrement lors du pic du matin, à hauteur de 40% et en milieu d'après-midi jusqu'à 45%, puis diminue progressivement à partir de 15h TU pour atteindre les 17% la nuit. La première classe voit sa proportion plus que doubler entre la nuit et le milieu d'après-midi.

Les autres classes, de 3 à 6, varient peu par rapport à la première, avec des variations comprises entre 10% et 20%. Au sein de cette variabilité, ces classes suivent la tendance inverse de la première, avec des proportions plus élevées le soir à partir de 18h et dans la nuit, jusqu'à 6h TU, avec des proportions les plus faibles lorsque la première classe est au maximum.

La seconde et la dernière classe restent quant à elles relativement stables.

On peut également remarquer que les proportions des particules de la première classe diminuent lorsque le pic du soir survient.

L'augmentation des proportions de la première classe s'explique par le fait que les concentrations de cette même classe augmentent. Les variations des autres classes s'expliquent d'une part par l'augmentation des concentrations de ces mêmes classes, et d'autre part par la diminution des concentrations de la première classe.

Il paraît intéressant d'étudier l'évolution des concentrations au sein de la journée en distinguant les jours ouvrés des samedis et dimanches.

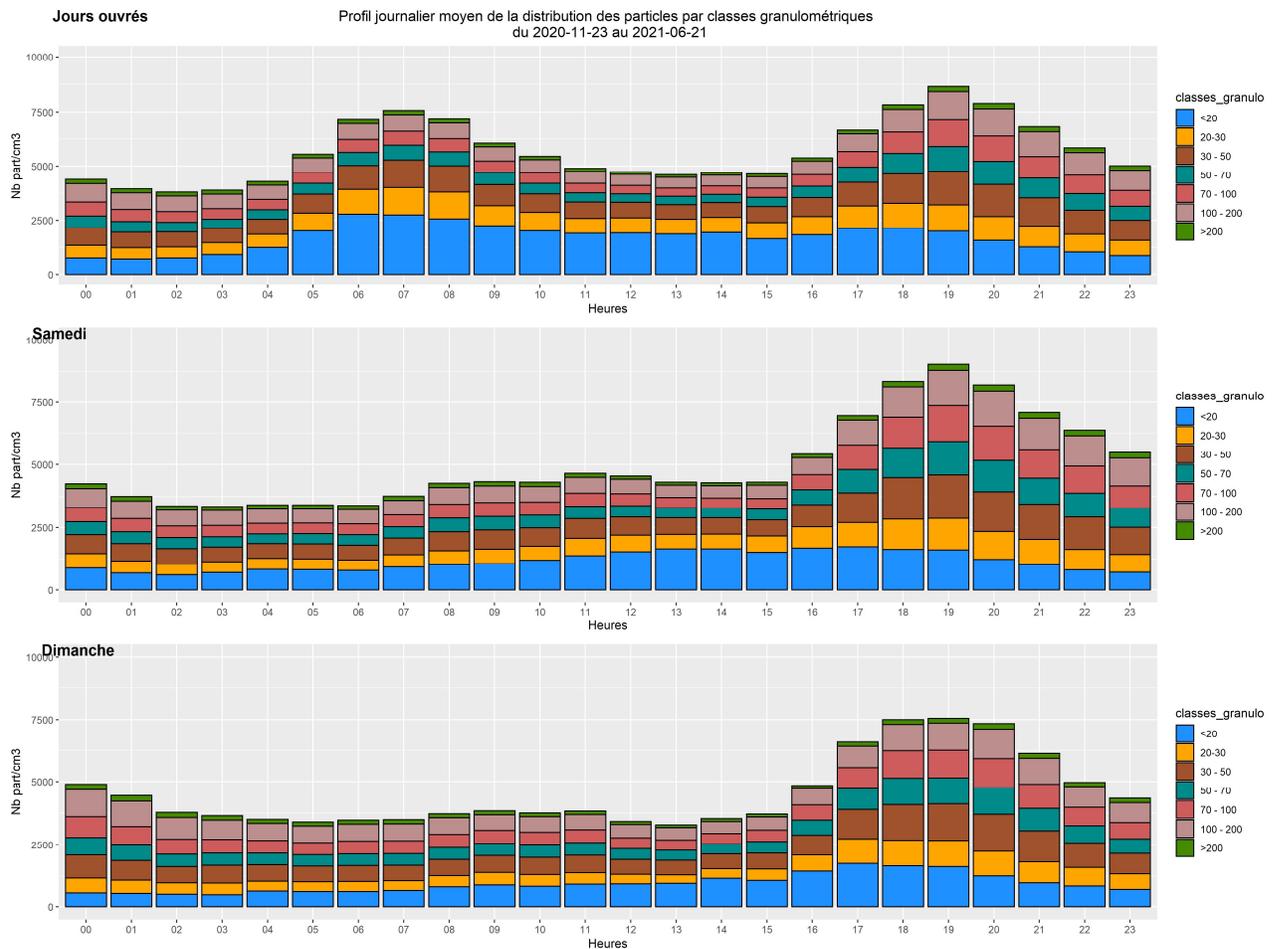


Figure 18 : Profils journaliers décomposés en Jours ouvrés, Samedi et Dimanche (heures TU)

Lorsque l'on décompose les profils journaliers en jours ouvrés, samedi et dimanche, on remarque que l'on ne retrouve pas le pic du matin lors du week-end, indiquant que ce pic serait dû au trafic automobile provoqué par les trajets domicile-travail ayant lieu les jours de la semaine en grande majorité. Celui du soir serait plutôt dû au cumul des émissions de chauffage et de trafic routier.

La figure 19 présente le profil journalier moyen des concentrations en faisant intervenir les diamètres des particules. Ainsi, on retrouve les diamètres des particules sur l'axe des ordonnées, l'heure de la journée (TU) en abscisses et les concentrations en dégradé de couleurs.

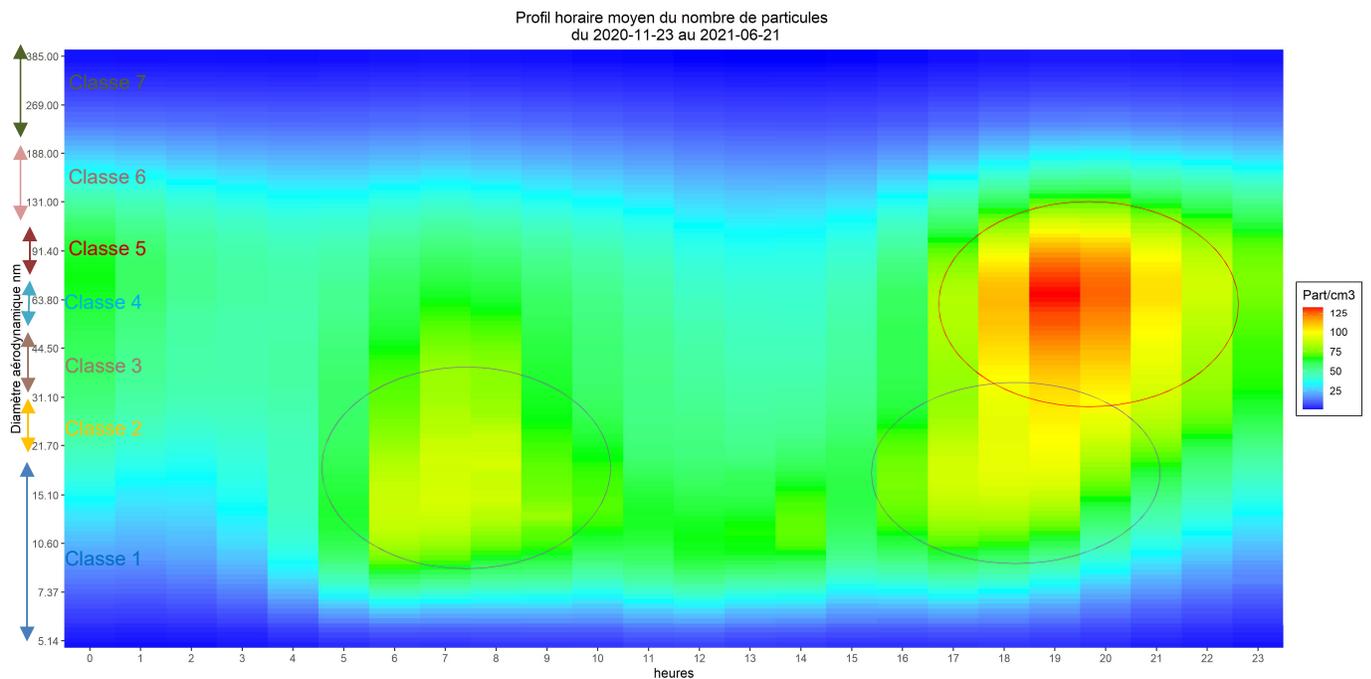


Figure 19 : Profil journalier 2D moyen des concentrations à la Chauvinière (heures TU)

On peut observer deux tâches distinctes dans la journée : une le matin entre 6h TU et 8h TU, pour des diamètres allant de 7 nm à 30 nm environ et une seconde le soir entre 17h TU et 21h TU et qui se prolonge dans la nuit.

La seconde tâche paraît être en réalité une superposition de tâches de concentrations élevées, semblable à celle du matin, et d'une autre caractérisée par des diamètres plus élevés, entre 30 nm et 130 nm et dont les concentrations sont encore plus élevées. Elle se prolonge dans la nuit à des concentrations plus faibles. On remarque également un léger décalage temporel entre les deux tâches de la nuit.

Les différents graphiques permettent de conclure que les concentrations de particules ultrafines en zone urbaine sont caractérisées par un pic de concentrations le matin et un autre le soir. Le pic du matin est provoqué par une augmentation des concentrations des particules inférieures à 50 nm, alors que celui du soir est provoqué principalement par les particules entre 10 et 130 nm. De plus, on observe la disparition du pic du matin pendant le week-end.

Ces résultats indiquent que les deux pics ont des origines distinctes. En effet, le pic du matin serait dû aux émissions liées aux trajets domicile-travail qui n'ont lieu qu'en jours ouvrés alors que le pic du soir serait une superposition des émissions routières travail-domicile et, de manière prépondérante, du chauffage urbain. Le trafic automobile est caractérisé par des émissions de particules entre 10 et 30 nm principalement, et entre 30 nm et 60 nm dans une moindre mesure. Le chauffage urbain est en revanche caractérisé par une gamme plus étendue de particules, allant jusqu'à 160 nm.

Caractérisation des particules ultrafines : au niveau de la Ranjonnière

Concentrations totales et modes

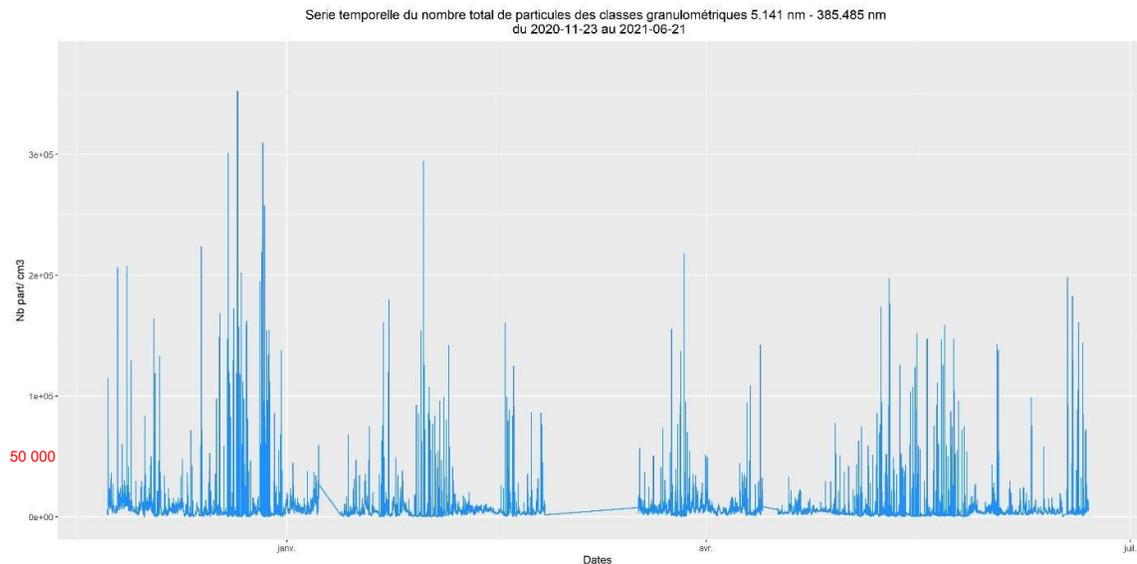


Figure 20 : Evolution temporelle des concentrations sur l'ensemble de la première période d'étude à la Ranjonnière

L'évolution temporelle des concentrations à la Ranjonnière est caractérisée par de faibles niveaux de concentrations de fond (de l'ordre de 4 000 P/cm³), auxquels viennent s'ajouter des pointes de concentrations bien plus élevées qu'à la Chauvinière, dépassant les 50 000 P/cm³ de manière bien plus fréquentes qu'en zone urbaine. La durée de ces pics est de l'ordre de 5 à 10 min. La concentration maximale sur l'ensemble de la période est d'environ 350 000 P/cm³ et a eu lieu en décembre, période durant laquelle on a pu observer les plus hautes concentrations.

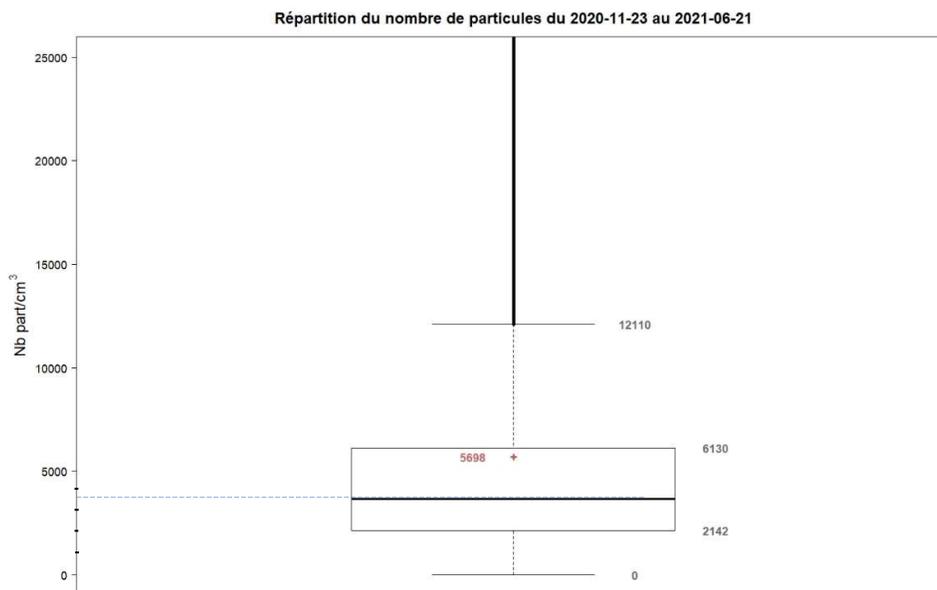


Figure 21 : Boxplots des concentrations sur l'ensemble de la période ; échelle des ordonnées limitée à 25 000 P/cm³

La figure 21 indique que la médiane des concentrations, sur l'ensemble de la période à la Ranjonnière, était environ à 3 700 P/cm³ contre près de 4 300 P/cm³ à la Chauvinière. La médiane des concentrations de la Ranjonnière était donc inférieure à celle de la Chauvinière sur la même période, indiquant que la pollution de fond en zone urbaine était plus élevée que près de l'aéroport.

La moyenne des concentrations à la Ranjonnière était de 5 698 P/cm³, comparable à celle de la Chauvinière, dont la moyenne était de 5 538 P/cm³. Les pics de pollutions de la Ranjonnière ont donc tiré la moyenne des concentrations de l'ensemble de la période.

L'étendue interquartile (P₃-P₁) était de 3 988 P/cm³ près de l'aéroport contre 3 880 P/cm³ en zone urbaine, indiquant une dispersion des concentrations de même ordre. On peut également remarquer des valeurs de quartiles P₁ et P₃ bien inférieures à la Ranjonnière, confirmant une pollution de fond inférieure près de l'aéroport.

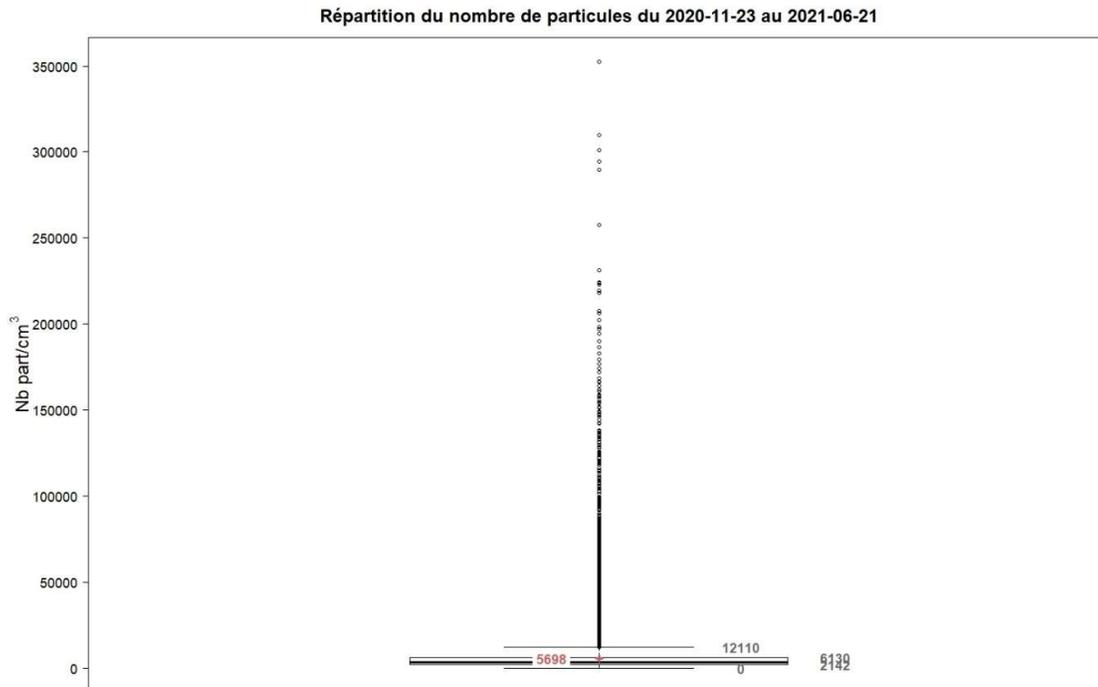


Figure 22 : Boxplot des concentrations sur l'ensemble de la période d'étude sans limite d'échelle

Ce second boxplot (figure 22) permet de voir les valeurs extrêmes à la Ranjonnière, qui atteignent les 350 000 P/cm³.

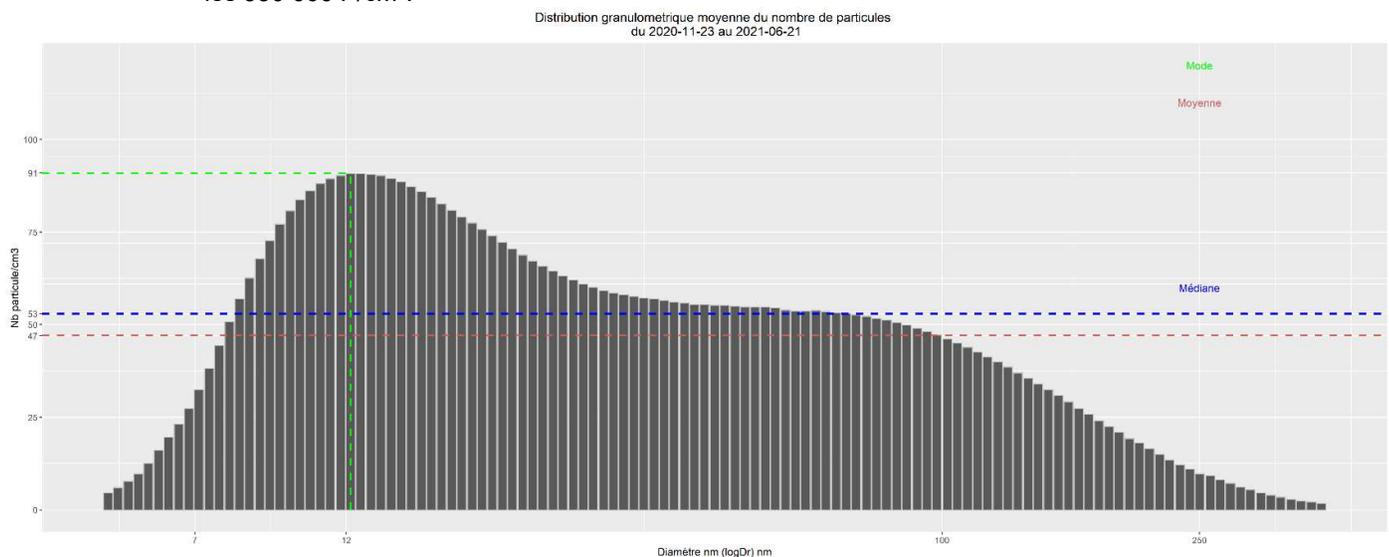


Figure 23 : Distribution granulométrique moyenne à la Ranjonnière

La distribution granulométrique de la Ranjonnière (figure 23) fait apparaître un mode très marqué dans la première classe, à 12 nm. Les concentrations autour de 60 nm restent élevées sans pour autant faire apparaître un second mode dans cette gamme.

Comparaison des différentes classes

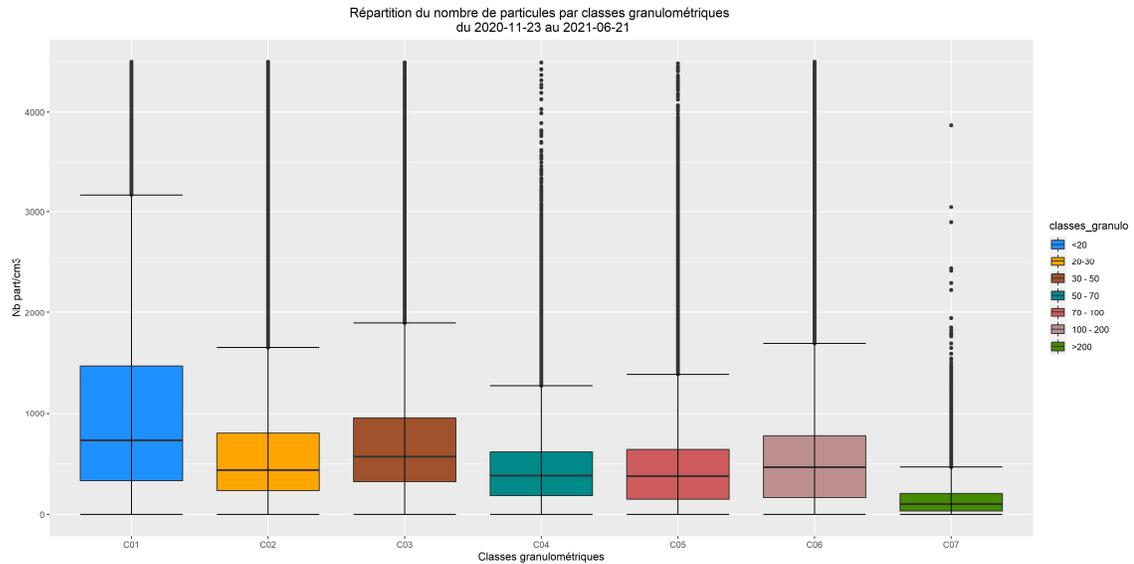


Figure 24 : Boxplots des concentrations décomposées selon les différentes classes

Les médianes des différentes classes sont assez similaires hormis pour la classe 7 (>200 nm) qui est plus faible. La médiane de la première classe se trouve vers 750 P/cm³ et est légèrement plus élevée que celles des autres classes qui gravitent autour de 500 P/cm³, avec les classes 2, 4, 5, 6 légèrement en-dessous de 500 P/cm³ et la classe 3 légèrement au-dessus.

La figure suivante présente l'évolution temporelle des concentrations au sein d'une journée type à la Ranjonnière. Les heures sont exprimées en heures TU.

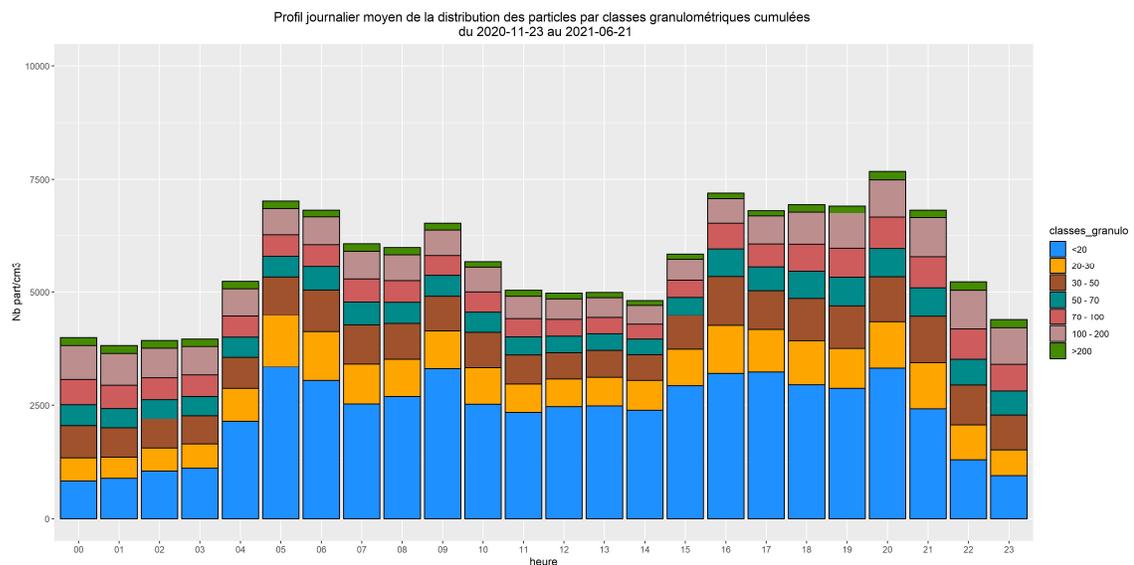


Figure 25 : Profil journalier moyen des concentrations à la Ranjonnière (heures TU)

Le profil journalier moyen à la Ranjonnière est moins « lisse » qu'à la Chauvinière. On retrouve des concentrations constantes à 3 800 P/cm³ la nuit, jusqu'à 3h, puis une augmentation relativement brusque des concentrations à 5 500 P/cm³ à 4h pour atteindre un maximum de 7 000 P/cm³ à 5h.

Les concentrations sont également constantes entre 11h et 14h aux environs de 5 000 P/cm³ et réaugmentent, à partir de 15h, à près de 6 000 P/cm³. Elles restent stables entre 7 000 et 7 700 P/cm³ entre 16h et 21h puis redescendent assez brusquement à 22h à 5 500 P/cm³ pour atteindre un niveau proche du niveau de fond à 23h.

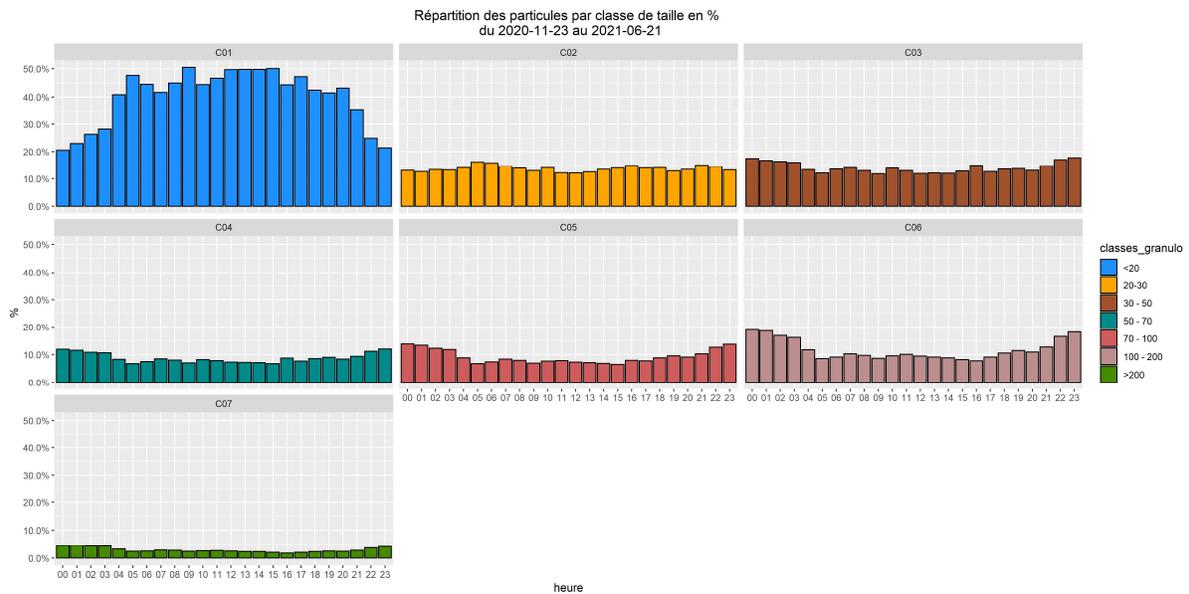


Figure 26 : Profils journaliers moyens en proportions des particules ultrafines selon les différentes classes (heures TU)

La figure 26 présente la proportion moyenne des particules ultrafines de chaque classe au sein de la journée. On peut voir que les particules inférieures à 20 nm sont relativement constantes, (40% à 50%) entre 4h et 20h, puis diminuent brutalement à 22h à des proportions inférieures à 25%. Durant la période 4h-20h, on n’observe pas les deux pics enregistrés à la Chauvinière. La proportion des autres classes reste relativement constante tout au long de la journée, avec toutefois une légère augmentation des proportions des classes 5 et 6 durant la nuit. Ces variations s’expliquent d’une part par l’augmentation des concentrations, et d’autre part par la diminution des concentrations de la première classe.

Les graphiques suivants présentent les évolutions temporelles des concentrations au sein de journées types, décomposées en jours ouvrés, samedi et dimanche et exprimées en heures TU :

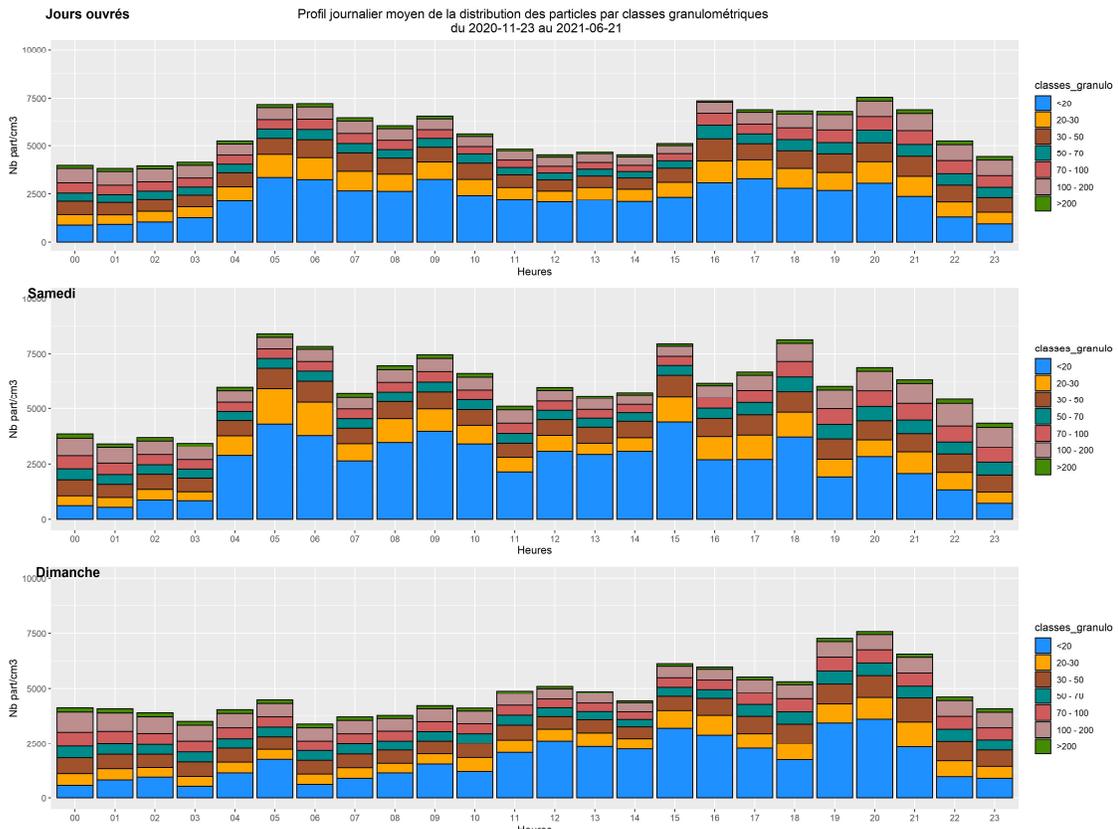


Figure 27 : Profils journaliers décomposés en Jours ouvrés, Samedi et Dimanche, à la Ranjonnière (heures TU)

La décomposition des profils journaliers montre des formes de profils assez différentes. En jours ouvrés, on retrouve la forme du profil intégrant l'ensemble des jours de la semaine (figure 25) en un peu plus lisse.

Le samedi en revanche on observe une augmentation des concentrations très marquée à partir de 4h, puis des variations assez marquées la journée. On remarque clairement que la proportion des particules issues de la première classe est sensiblement équivalente aux autres classes durant la nuit mais, augmente très significativement dès 4h, sur toute la journée.

Enfin, le profil moyen du dimanche est assez lisse, avec une augmentation progressive jusqu'à 13h. On observe une légère diminution à 14h puis une augmentation brusque des concentrations à 15h et à 19h. Les concentrations diminuent brusquement à 22h pour atteindre des niveaux de fond.

Quel que soit le profil, on remarque que lorsqu'il y a une augmentation des concentrations, c'est quasi-exclusivement les particules issues de la première classe qui font varier les concentrations. C'est une différence majeure des mesures près de l'aéroport avec celles en zone urbaine, où selon l'heure, on retrouvait des variations de la première classe en majorité, mais également des classes de 2 à 6, entre 20 nm et 200 nm.

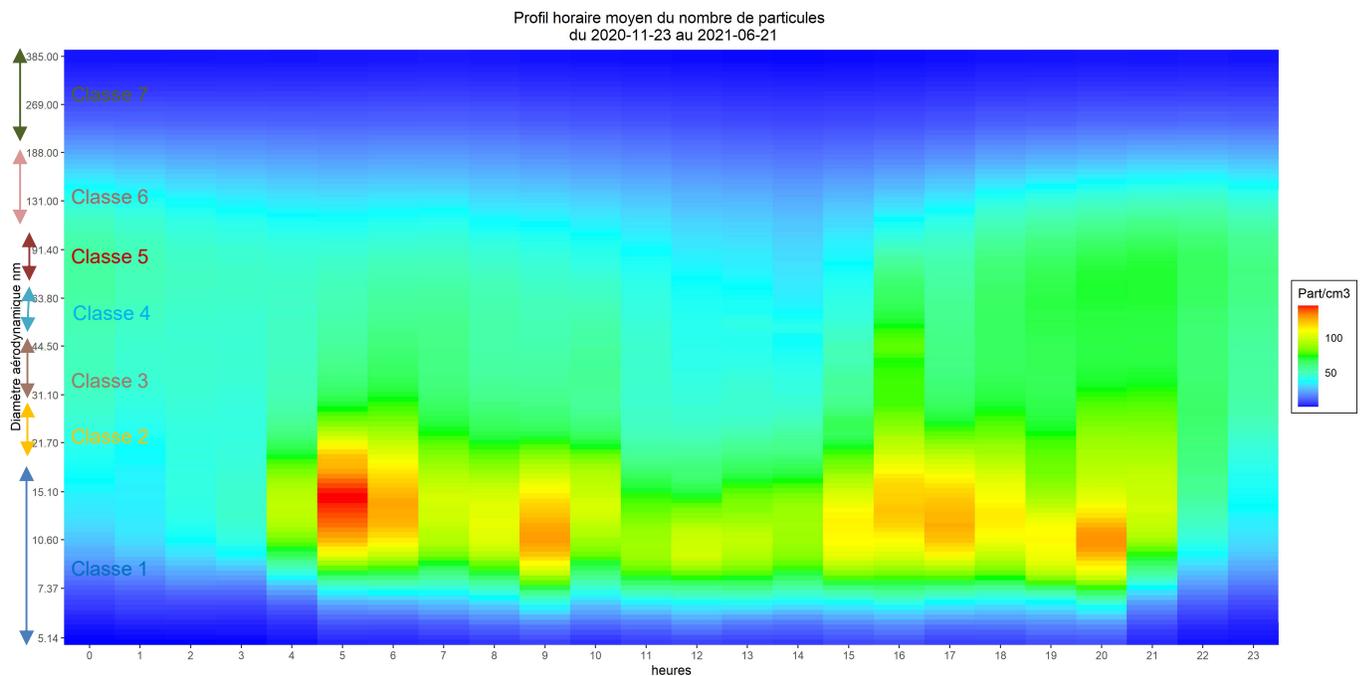


Figure 28 : Profil journalier 2D moyen des concentrations à la Ranjonnière (heures TU)

Le profil 2D moyen de la Ranjonnière montre des concentrations qui augmentent à partir de 4h, avec un pic des concentrations à 5h, entre 10 nm et 20 nm. Ces hautes concentrations surviennent donc une à deux heures plus tôt qu'à la Chauvinière, et pour des diamètres plus restreints, entre 10 et 20 nm.

Les concentrations diminuent entre 11h et 14h, puis réaugmentent à partir de 15h, atteignant un pic à 16h, pour retomber brusquement à partir de 22h dans les petits diamètres. On observe également des concentrations plus élevées que les niveaux de fond entre 30 et 130 nm mais de manière beaucoup moins marquée qu'en zone urbaine.

Les concentrations élevées de la Ranjonnière sont donc caractérisées par des particules de diamètres plus faibles qu'en zone urbaine, restreintes entre 10 nm et 20 nm, et également par des variations plus brusques des concentrations le matin et le soir.

Influence de l'aéroport sur les niveaux de particules ultrafines à la ferme de la Ranjonnière

Les mouvements du trafic aérien du 23/11/2020 au 31/05/2021 à Nantes-Atlantique nous ont été communiqués par la DGAC et concernent l'ensemble des vols passagers, de fret et non-commerciaux. Ce sont 7 962 vols au total.

Les heures pistes ont été préférées aux heures blocs afin d'établir les corrélations entre les mouvements d'avions et les évolutions de concentrations. Les heures sont exprimées en heures TU.

Corrélation des concentrations avec les mouvements d'avions

Afin de mettre en avant la corrélation des niveaux de concentrations des particules inférieures à 20 nm à la Ranjonnière avec les mouvements d'avions, nous allons comparer les profils journaliers moyens des concentrations avec les profils journaliers des mouvements d'avions. De plus, la période d'étude sera séparée en deux : une période allant du 23/11/2020 au 27/03/2021 correspondant aux heures d'hiver², et une période correspondant aux heures d'été, allant du 28/03/2021 au 31/05/2021 (date pour laquelle les derniers mouvements d'avions nous ont été transmis) afin d'être le plus en adéquation avec l'évolution du trafic aérien au sein de la journée (6h légale correspond à 5h TU en période hivernale, et à 4h TU en période estivale).

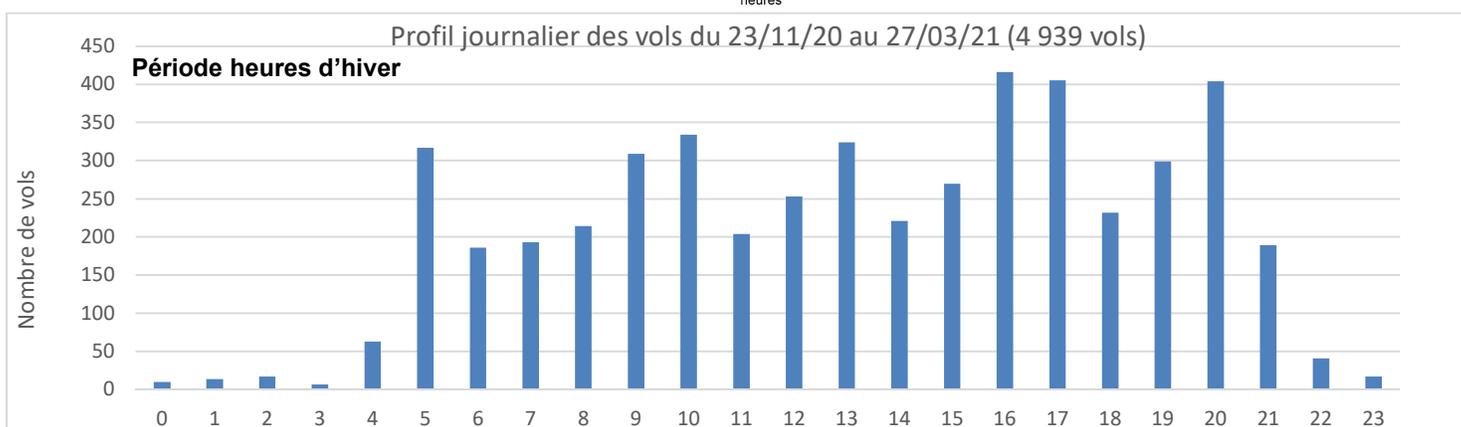
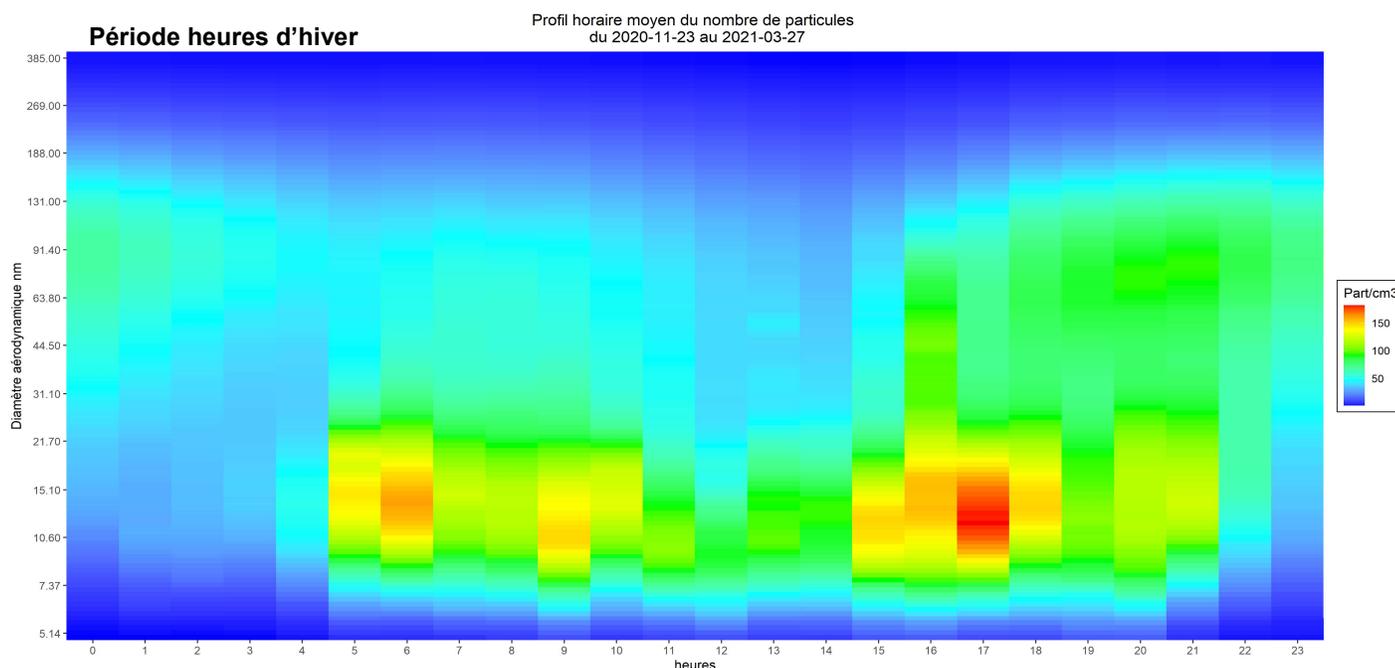


Figure 29 : Comparaison du profil journalier du nombre de vols avec le profil journalier moyen 2D des concentrations à la Ranjonnière du 23/11/20 au 27/03/21

² Le passage à l'heure d'été s'est produit le 28/03/2021 à 2h et le passage à l'heure d'hiver se produira le 31/10/2021 à 3h, heures légales

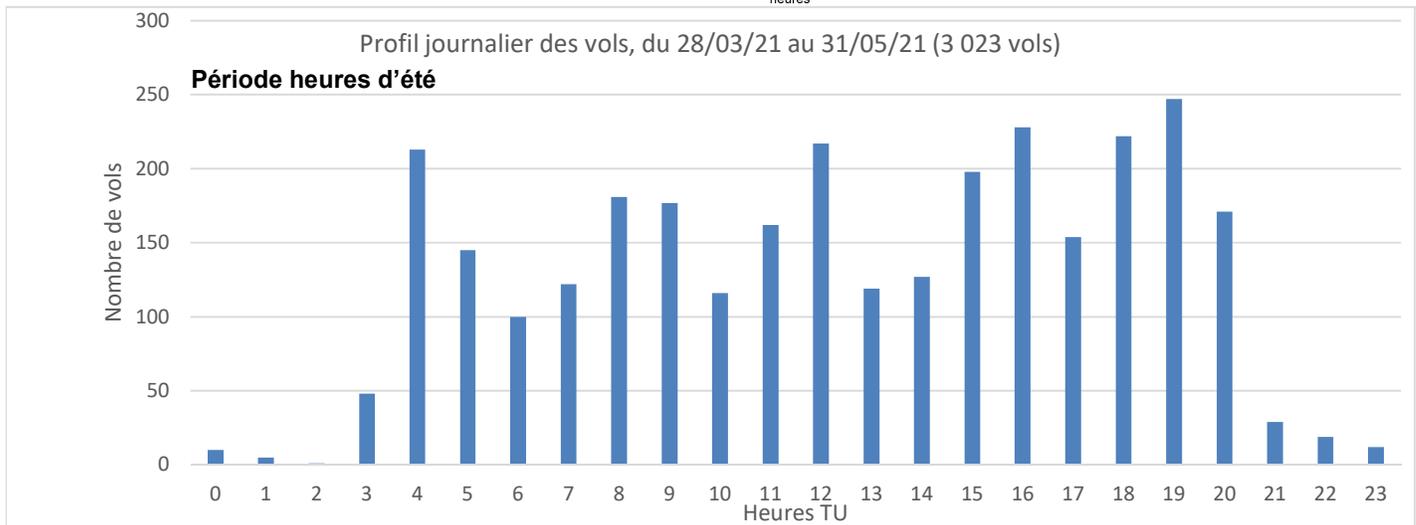
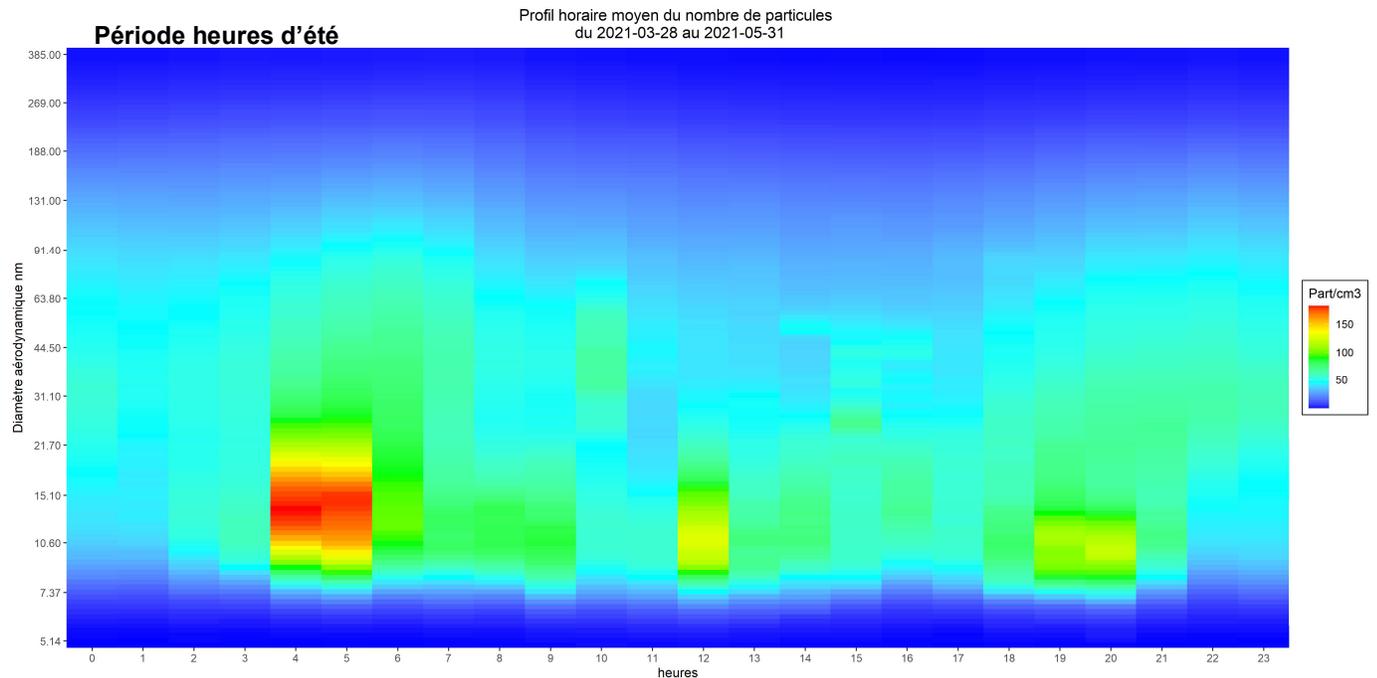


Figure 30 : Comparaison du profil journalier du nombre de vols avec le profil journalier moyen 2D des concentrations à la Ranjonnière du 28/03/21 au 31/05/21

En heures d'hiver, on observe que le nombre de vols commence à augmenter à partir de 4h et augmente brusquement à 5h. On l'observe également sur le profil des concentrations, avec l'augmentation brusque des concentrations à 5h et à 6h. De même à 9h-10h et 16h-17h où l'on observe des nombres de vols plus importants et des concentrations mesurées les plus importantes.

En heures d'été, les avions commencent à voler à partir de 3h mais cela ne s'observe pas sur les niveaux moyens de concentrations mesurés. Le nombre d'avions augmente grandement à 4h et les concentrations atteignent leur maximum à cette heure-ci. Les pics de concentrations à 12h et 19h-20h correspondent également à des créneaux horaires où le nombre d'avion était particulièrement élevé par rapport aux autres créneaux horaires. Les baisses de trafic aérien à 6h, 10h et 17h sont également visibles sur les concentrations en PUF.

Il peut cependant subsister des différences ponctuelles d'une heure entre mouvements d'avions et concentrations en PUF.

De la même manière, on comparera par la suite les décompositions des profils moyens en jours ouvrés, samedi et dimanche avec ceux des avions, en séparant période heures d'hiver et période heures d'été. Les émissions du trafic aérien se trouvant essentiellement dans la première classe,

nous comparerons les mouvements des avions avec les concentrations de cette première classe uniquement.

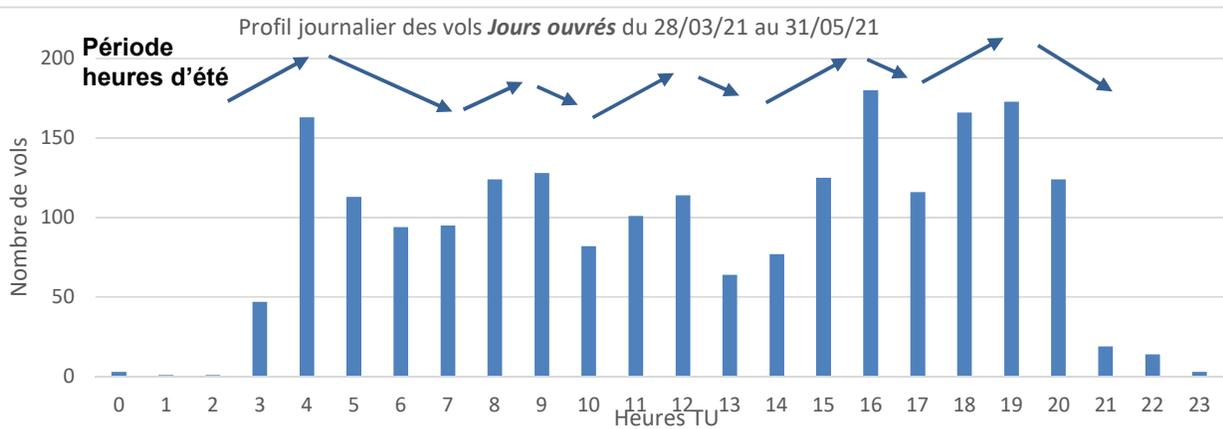
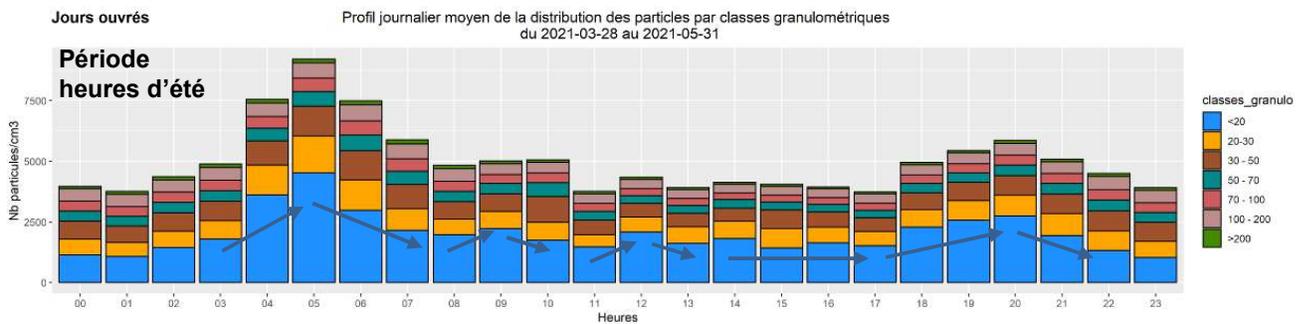
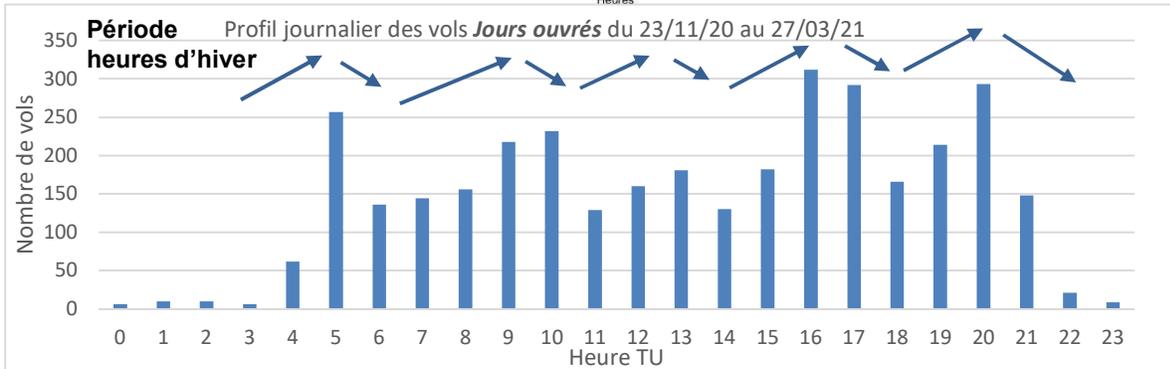
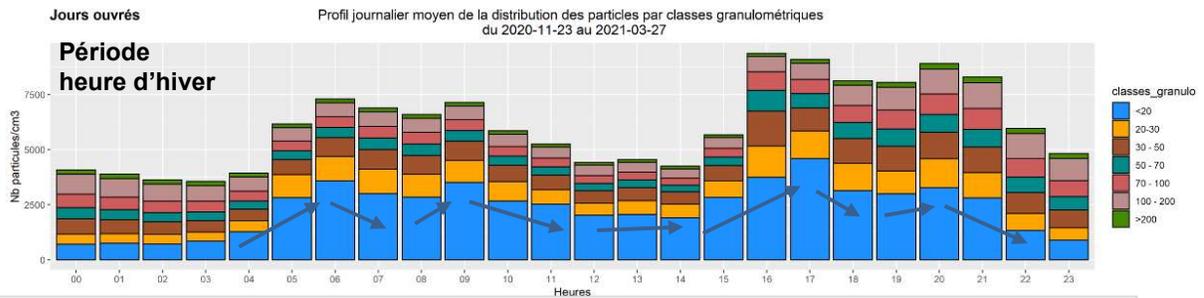


Figure 31 : Comparaison des profils journaliers du nombre de vols avec les profil journaliers moyens des concentrations à la Ranjonnière. En haut : comparaison *Jours ouvrés* en période heures d'hiver ; en bas : comparaison *Jours ouvrés* en période heures d'été

En jours ouvrés, que ce soit en heures d'hiver ou d'été, on retrouve des profils de concentrations assez lisses, avec tout de même des élévations de concentrations le matin à partir de 5h TU en heures d'hiver et 4h TU en heures d'été. On observe de la même manière le nombre de vols augmenter significativement aux mêmes heures. Les tendances sont globalement assez similaires mais il peut subsister des différences d'une heure entre les maximums locaux du nombre d'avions et les maximums locaux des concentrations.

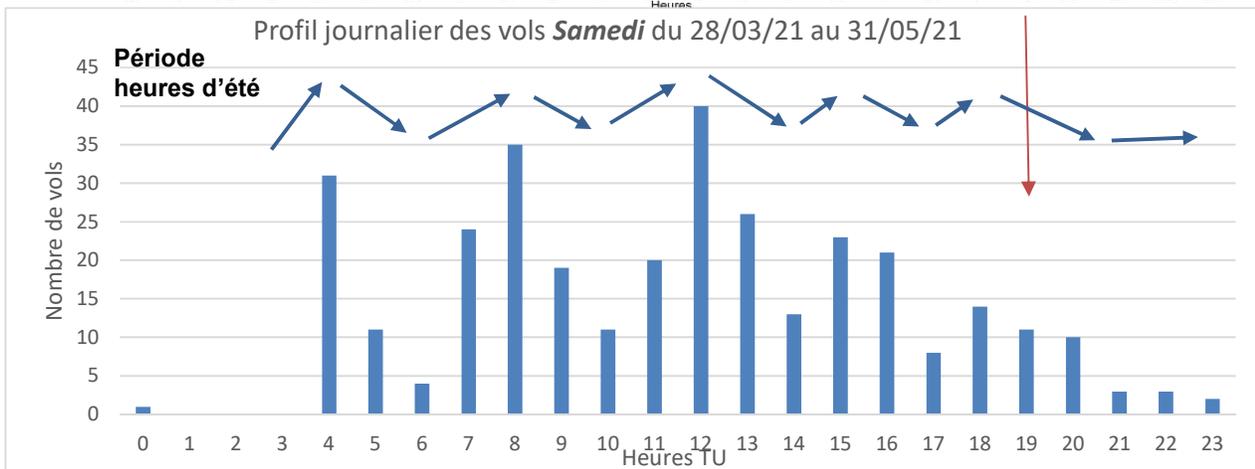
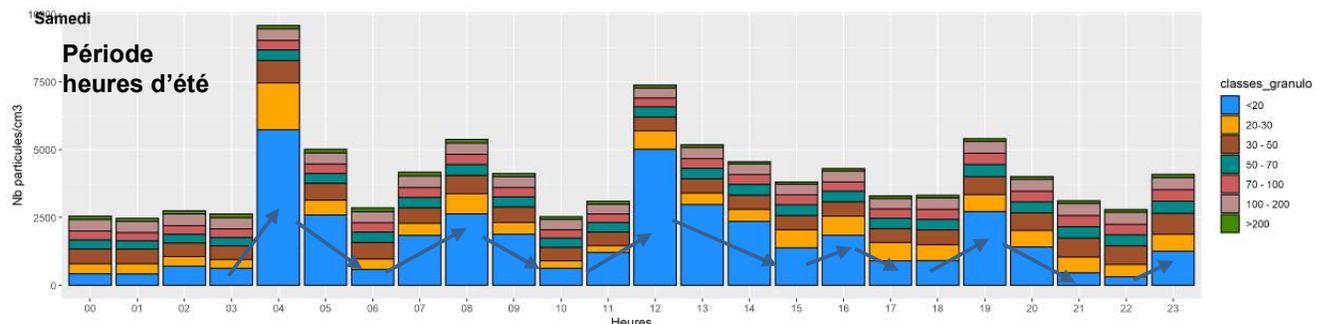
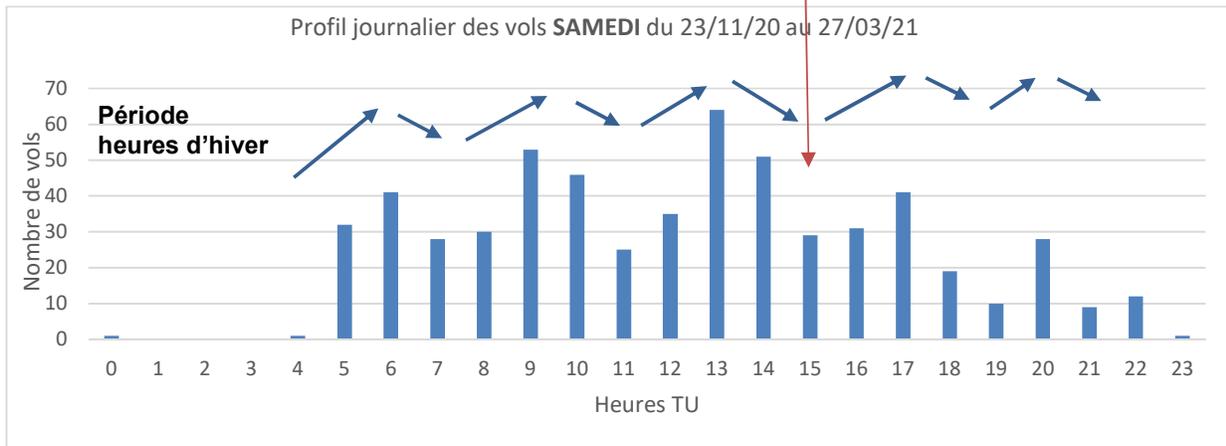
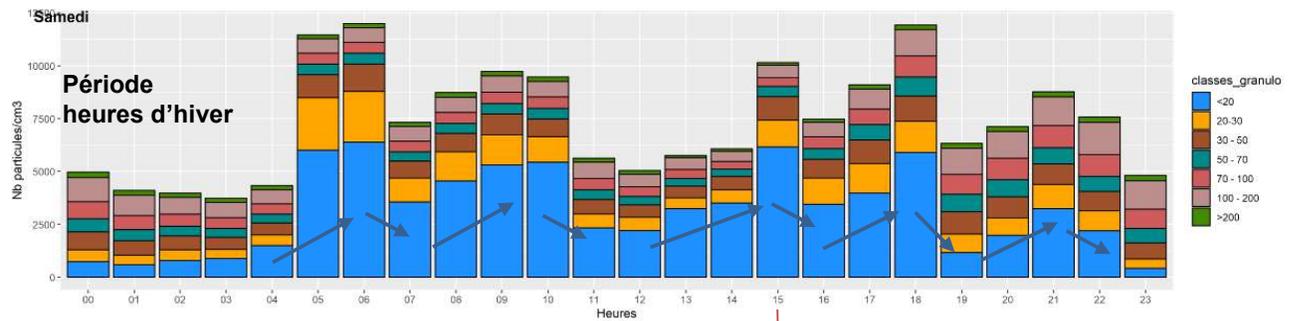


Figure 32 : Comparaison des profils journaliers du nombre de vols avec les profil journaliers moyens des concentrations à la Ranjonnière. En haut : comparaison Samedi en période heures d'hiver ; en bas : comparaison Samedi en période heures d'été

Les niveaux de concentrations sont plus variables le samedi, avec une augmentation très marquée à 5h TU en heures d'hiver et à 4h TU en heures d'été. On retrouve cette même augmentation sur les nombres de vols sur les deux périodes respectives. On peut également noter que les maximums et les minimums des concentrations et des vols correspondent particulièrement bien, tout comme les

tendances des deux types de profils. On remarque quelques différences (flèches rouges) où les concentrations sont plus élevées sans pour autant retrouver un nombre de vols particulièrement grand.

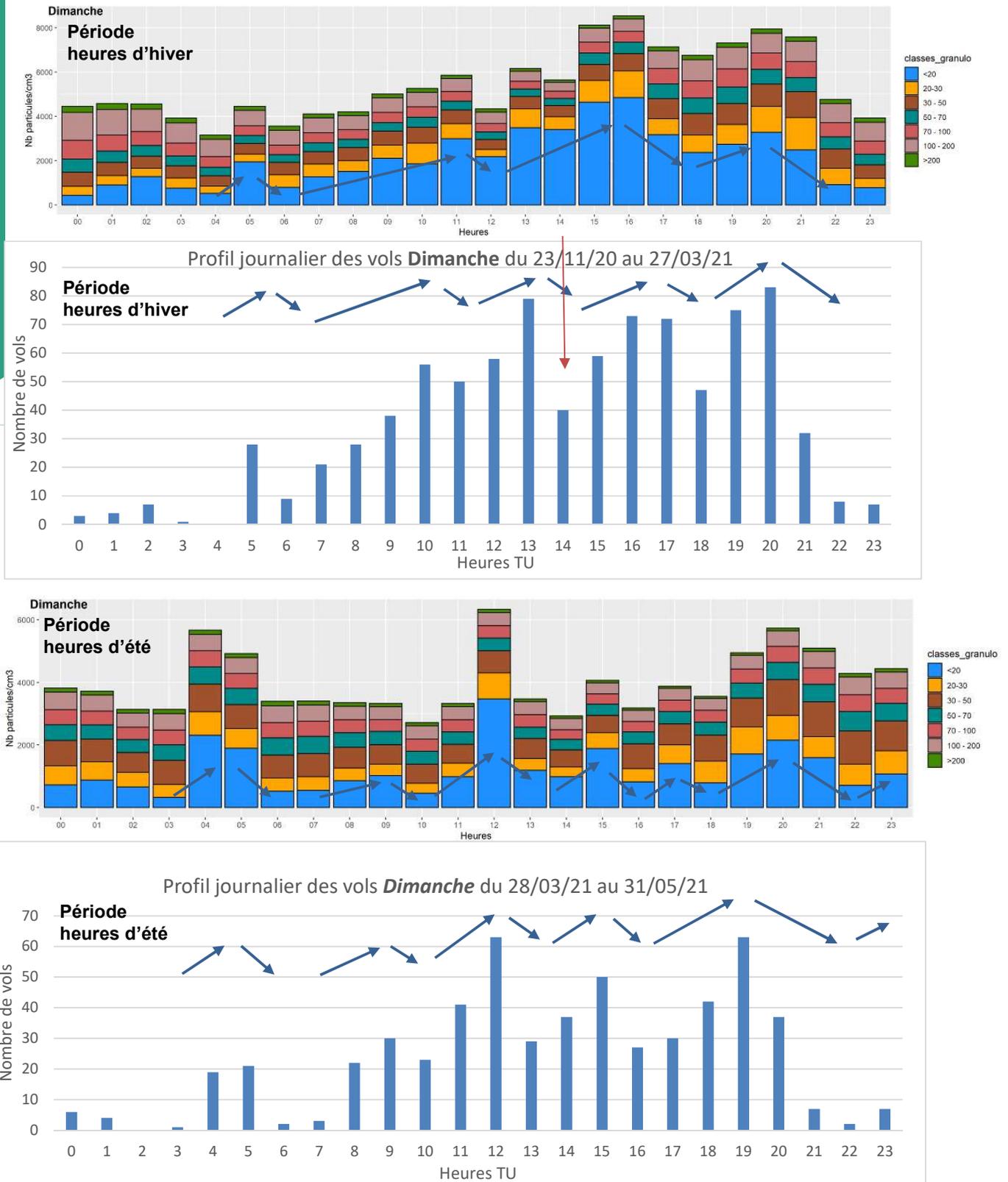


Figure 33 : Comparaison des profils journaliers du nombre de vols avec les profil journaliers moyens des concentrations à la Ranjonnière. En haut : comparaison **Dimanche** en période heures d'hiver ; en bas : comparaison **Dimanche** en période heures d'été

Les concentrations et nombre de vols suivent encore les mêmes tendances le dimanche, quel que soit la période considérée.

On observe une augmentation progressive des concentrations et des vols tout au long de la matinée en heures d'hiver. On retrouve une réduction du nombre de vols à 14h qui ne se ressent cependant pas sur les concentrations moyennes, contrairement au creux de 18h.

En heures d'été, on retrouve des concentrations moyennes très variables. On observe de particulièrement bonnes correspondances entre les vols et les concentrations moyennes, avec des maximum et minimums qui concordent, sauf pour le pic du nombre d'avions à 19h que l'on retrouve avec une heure de décalage sur les concentrations.

On retrouve ainsi une bonne cohérence entre l'évolution des mouvements d'avions au sein de la journée et l'évolution des concentrations en PUF, essentiellement issues de la première classe (<20 nm).

Sachant que les aéronefs émettent essentiellement dans cette première classe, et au vu de la corrélation entre mouvements d'avions et concentrations mesurées, on peut conclure à une influence probable des émissions des avions sur les niveaux de concentrations à la ferme de la Ranjonnière.

Roses de pollution des différentes classes de particules ultrafines

On a pu mettre en évidence, dans la partie précédente, des corrélations entre le nombre d'avions et les concentrations élevées dans les profils moyens journaliers. Dans cette partie, les niveaux de PUF seront étudiés en fonction de la direction des vents afin d'en connaître la provenance.

Site de la Chauvinière

Nous tracerons dans la suite, des roses de pollutions totales et pour chaque classe afin d'étudier la provenance des particules ultrafines. Ces graphiques ont été réalisés en associant les concentrations mesurées avec les directions de vents correspondants à l'heure de mesure de la concentration. Il y a donc un point par mesure de concentrations valide. Compte tenu de l'absence de station météorologique au niveau du site, les roses de la Chauvinière ont été tracées à partir des vents mesurés à la station Météo-France la plus proche, soit celle de la plateforme aéroportuaire.

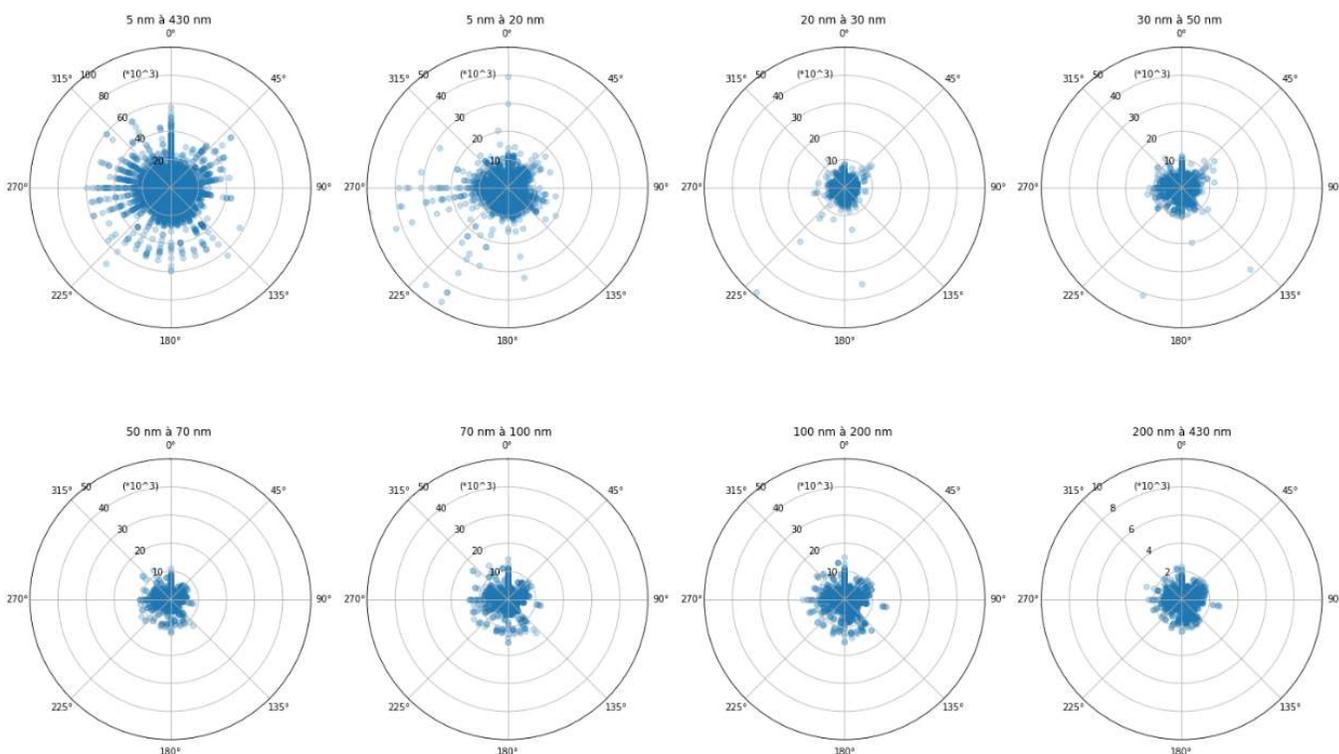


Figure 34 : Roses de pollution à la Chauvinière pour les différentes classes de particules ultrafines, du 23/11/2020 au 21/06/2021

La rose de pollution toutes classes confondues de la Chauvinière ne fait ressortir aucune direction de vents privilégiée. Il n'y a finalement que pour la première classe que l'on peut observer que lorsqu'il y a des concentrations plus élevées, les vents proviennent majoritairement de l'Ouest et du Sud-Ouest.

La Route de Rennes se trouve à l'Ouest du capteur. Le dernier comptage indiquait en 2019 une moyenne journalière de 18 085 véhicules/j. Boulevard de la Chauvinière, bien que plus proche du capteur, à une centaine de mètres sud-ouest de celui-ci, ne comprenait que 5 500 véhicules/j en 2019, soit près de trois fois moins. Les distances plus faibles Boulevard de la Chauvinière sont donc compensées par des débits de voitures plus faibles.

Le trafic routier de cette rue pourrait donc expliquer ces concentrations plus élevées provenant de l'ouest (*Annexe 3*).

Par ailleurs, les différentes roses de pollution pour les particules supérieures à 20 nm ne montrent aucune influence de la direction des vents sur les niveaux de concentrations.

Site de la Ranjonnière

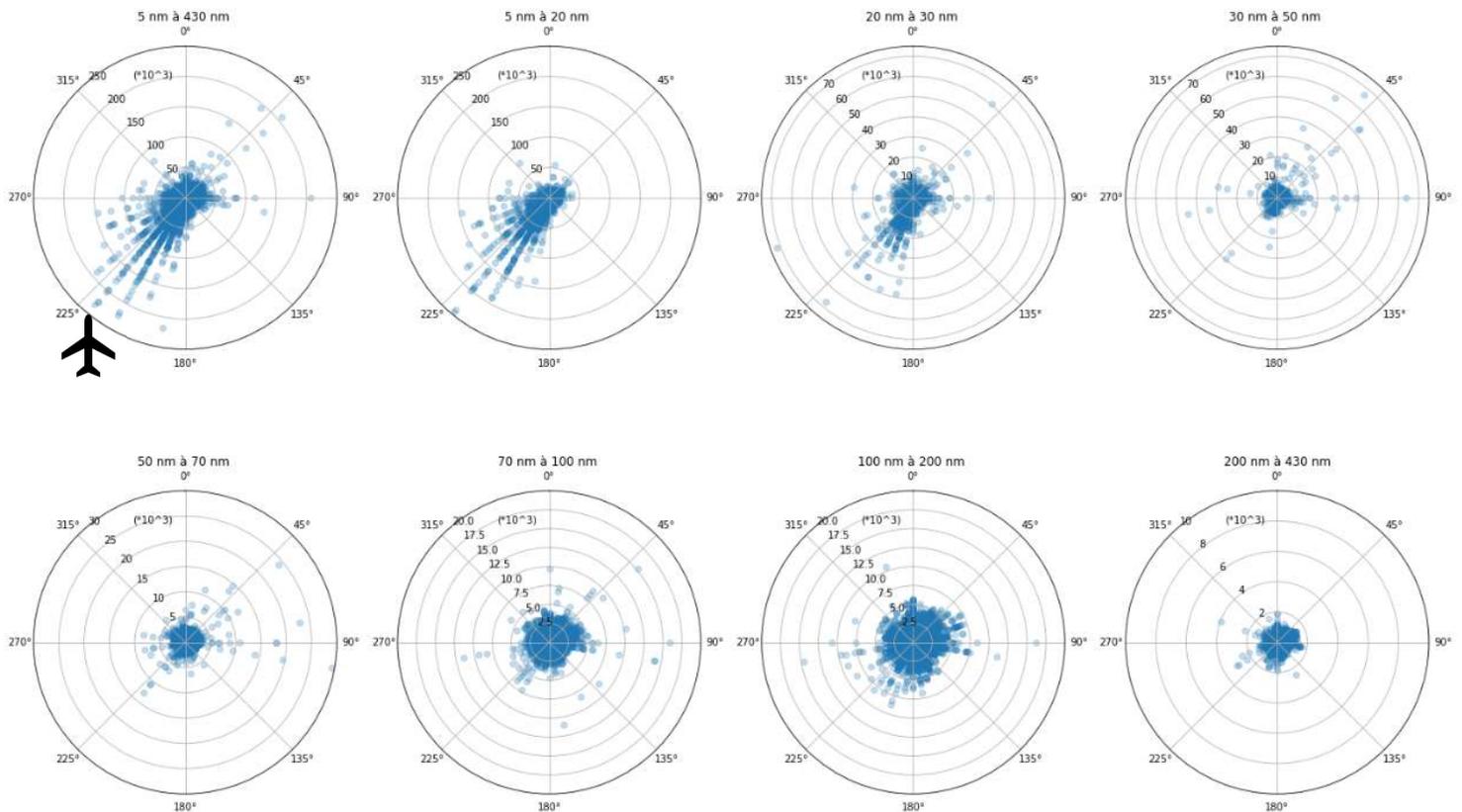


Figure 35 : Roses de pollution à la Ranjonnière pour les différentes classes de particules ultrafines, du 23/11/2020 au 21/06/2021

Les roses de pollution de la Ranjonnière suggèrent en revanche une influence de l'aéroport. En effet, on retrouve sur la rose de pollution toutes classes confondues, des directions de vents de Sud-Ouest lorsque l'on mesure les concentrations les plus élevées.

La décomposition en différentes classes permet de voir que ce sont effectivement les particules dont les diamètres n'excèdent pas 30 nm qui proviennent de la direction de l'aéroport.

Les roses de pollution des classes 3 et dans une moindre mesure de classe 4, font ressortir une faible influence du périphérique situé à près de 600 mètres au Nord-Ouest.

Les roses des classes 5, 6 et 7 ne font ressortir aucune direction de vents privilégiée.

Etude détaillée des élévations des concentrations en PUF enregistrées à la Ranjonnière

Pour approfondir l'influence des émissions des avions sur les concentrations en PUF, nous avons par la suite relevé toutes les élévations de concentrations supérieures à 20 000 P/cm³, depuis la mi-février, et avons relevé l'heure des mouvements d'avions proches des pics afin de calculer le délai entre le passage de l'avion et le début du pic de pollution. Nous avons également relevé si les avions décollaient ou atterrissaient, leur sens de décollage et d'atterrissage, les directions et vitesses des vents ainsi que les modes des pics.

Sur l'ensemble des 330 pics de concentrations relevés, nous avons pu constater la présence d'avions pour près de 90% d'entre eux.

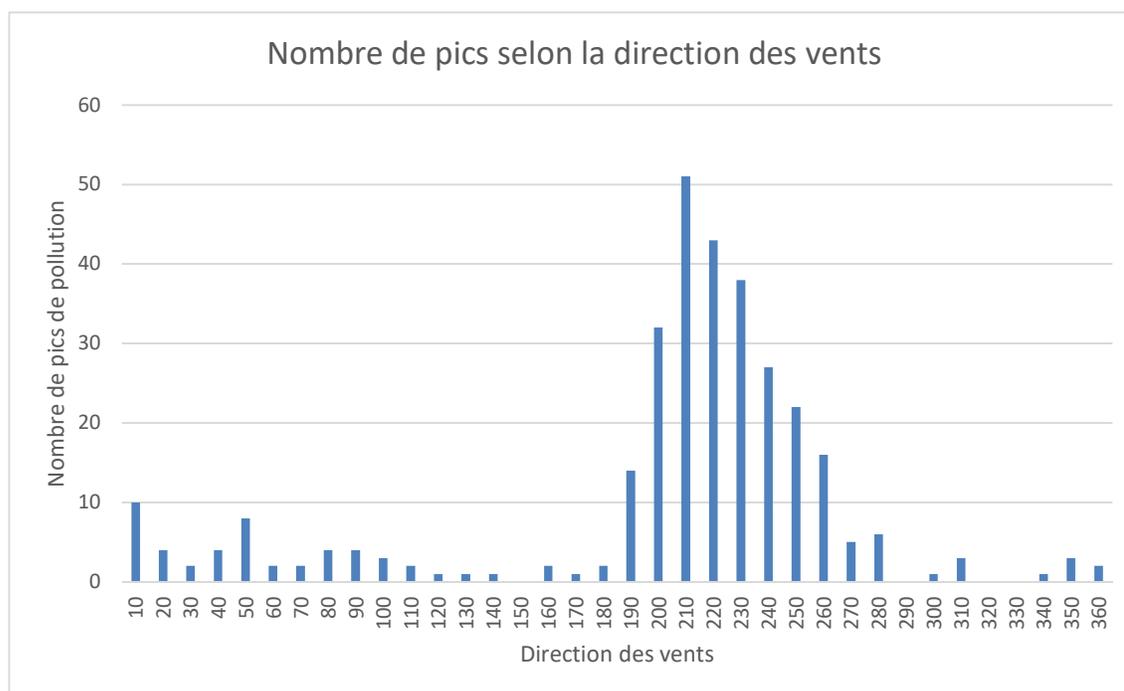


Figure 36 : Histogramme du nombre de pics supérieurs à 20 000 P/cm³ selon les directions de vents

La figure 36 permet de voir que ce sont lorsque les vents proviennent du secteur 210°N que l'on retrouve le plus de pics, et que près de 76% des pics étaient engendrés lorsque les vents soufflaient entre 190°N et 260°N. 70% des pics dont on n'a pas pu y associer d'avions se sont produits lorsque les vents soufflaient en dehors de cette plage. Pour des vents de 190°N à 260°N, le délai moyen était d'environ 3 minutes et 30 secondes entre la survenue du pic et le décollage ou l'atterrissage des avions. 55% des mouvements à proximité d'un pic étaient des décollages, contre 45% pour les atterrissages.

La moyenne globale des concentrations, toutes directions confondues, était de 55 600 P/cm³. Celle de la direction unique de 210°N était de 70 000 P/cm³.

Nous avons également pu constater que pour des directions des vents entre 190°N et 260°N, les concentrations moyennes des pics étaient de 61 000 P/cm³, alors qu'elles étaient de 39 500 P/cm³ pour la moyenne des autres directions de vents.

Ainsi, la surconcentration par rapport à la pollution de fond, lors des élévations de concentrations supérieures à 20 000 P/cm³ était de l'ordre de 50 000 P/cm³ toutes directions de vents confondues contre 65 000 P/cm³ pour la direction de 210°N. Rappelons ici que la durée des pics est comprise entre 5 et 10 minutes.

conclusions

Les particules ultrafines mesurées à la Ranjonnière, près de l'aéroport, diffèrent de celles mesurées à la Chauvinière, en zone urbaine, tant au niveau des tailles de particules qu'au niveau des concentrations mesurées, indiquant, à priori, des sources d'émissions différentes.

On retrouve à la Chauvinière une concentration médiane supérieure à celle de la Ranjonnière, indiquant une pollution de fond supérieure en zone urbaine qu'en zone périurbaine près de l'aéroport. La moyenne des concentrations est en revanche supérieure à la Ranjonnière, où l'on observe des pics de concentrations en particules ultrafines, généralement d'une durée de 5 à 10 minutes, de manière bien plus régulière qu'en zone urbaine.

La distribution granulométrique de la Chauvinière est caractérisée par deux modes, indiquant que les particules de la Chauvinière sont également issues de différentes sources. En effet, l'évolution des concentrations dans la journée fait apparaître un pic le matin et un autre, plus élevé, le soir. Le pic du matin est très probablement dû aux trajets domicile-travail et causé par des particules inférieures à 50 nm, alors que celui du soir serait plutôt induit par la somme des émissions des trajets de retour du travail et de chauffage, ce dernier étant prépondérant par rapport au premier. On retrouve une gamme de particules plus élevée le soir, entre 10 nm et 160 nm, avec des concentrations les plus élevées entre 30 nm et 130 nm.

La distribution granulométrique de la Ranjonnière ne fait en revanche apparaître qu'un seul mode à 12 nm. Les profils journaliers indiquent une augmentation brusque des concentrations à partir de 5h TU en heures d'hiver et 4h TU en heures d'été, heures auxquelles les avions commencent à voler, et une diminution nette à des niveaux de fonds à 22h TU, où le nombre d'avions diminue fortement.

Une corrélation entre les concentrations en particules ultrafines de moins de 20 nm et les mouvements des avions a par ailleurs été trouvée dans les profils journaliers. Nous avons également pu constater qu'il y avait, pour la grande majorité des pics de concentrations supérieurs à 20 000 P/cm³, la présence d'au moins un avion, dans un délai moyen de trois minutes et trente secondes du pic de concentration lorsque les vents provenaient de l'aéroport.

Enfin, les roses de pollutions de la Ranjonnière indiquent que l'ensemble des concentrations les plus élevées étaient issues de particules provenant du Sud-Ouest du capteur, en direction de l'aéroport de Nantes-Atlantique.

L'ensemble de ces résultats a permis de mettre en évidence un impact du trafic aérien de l'aéroport de Nantes-Atlantique sur les niveaux de concentrations en particules ultrafines à la ferme de la Ranjonnière. Cette observation devra être étayée lors de la poursuite de l'étude.

perspectives

Ce rapport présente les résultats des 6 premiers mois de mesures, où l'analyseur était placé au nord de la piste. La prochaine étape de l'étude consiste à déplacer l'analyseur à une distance de 2 km au sud de celle-ci en bout de piste sud. Cela va permettre d'évaluer l'impact du trafic aérien à une distance d'éloignement du capteur plus élevée et dans une autre direction de vents (Nord-Est).

En outre, la durée d'étude de deux ans devrait permettre d'évaluer l'impact de la reprise du trafic aérien sur les niveaux de concentrations au niveau des habitations proches de l'aéroport de Nantes-Atlantique.

annexes

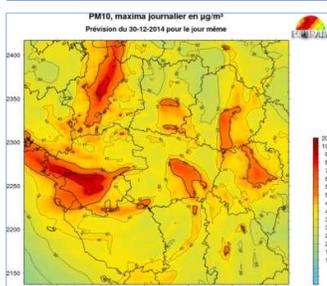
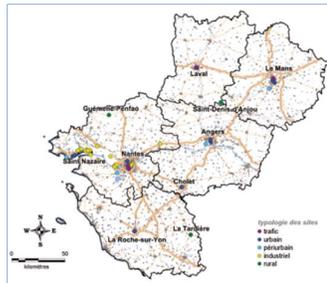
- annexe 1 : Air Pays de la Loire
- annexe 2 : Définition d'un boxplot
- annexe 3 : Trafic routier à la Chauvinière

Annexe 1 : Air Pays de la Loire

Dotée d'une solide expertise riche de trente ans d'expérience, Air Pays de la Loire est agréée par le Ministère de la Transition écologique et solidaire pour surveiller la qualité de l'air de la région des Pays de la Loire. Air Pays de la Loire regroupe de manière équilibrée l'ensemble des acteurs de la qualité de l'air : services de l'État et établissements publics, collectivités territoriales, industriels et associations et personnalités qualifiées.

Air Pays de la Loire mène deux missions d'intérêt général : surveiller et informer.

surveiller pour savoir et comprendre



PM10 le 30 décembre 2014



l'air de la région sous haute surveillance

Fonctionnant 24 heures sur 24, le dispositif permanent de surveillance est constitué d'une trentaine de sites de mesure, déployés sur l'ensemble de la région : principales agglomérations, zones industrielles et zones rurales.

mesurer où et quand c'est nécessaire

Air Pays de la Loire s'est doté de systèmes mobiles de mesure (laboratoires mobiles, préleveurs...). Ces appareils permettent d'établir un diagnostic complet de la qualité de l'air dans des secteurs non couverts par le réseau permanent. Des campagnes de mesure temporaires et ciblées sont ainsi menées régulièrement sur l'ensemble de la région.

la fiabilité des mesures garantie

Les mesures de qualité de l'air consistent le plus souvent à détecter de très faibles traces de polluants. Elles nécessitent donc le respect de protocoles très précis. Pour assurer la qualité de ces mesures, Air Pays de la Loire dispose d'un laboratoire d'étalonnage, airplab accrédité par le Cofrac et raccordé au Laboratoire National d'Essais.

simuler et cartographier la pollution

Pour évaluer la pollution dans les secteurs non mesurés, Air Pays de la Loire utilise des logiciels de modélisation. Ces logiciels simulent la répartition de la pollution dans le temps et l'espace et permettent d'obtenir une cartographie de la qualité de l'air. La modélisation permet par ailleurs d'estimer l'impact de la réduction, permanente ou ponctuelle, des rejets polluants. Elle constitue un outil d'aide à la décision pour les autorités publiques compétentes et les acteurs privés.

prévoir la qualité de l'air

Si le public souhaite connaître la pollution prévue pour le lendemain afin de pouvoir adapter ses activités, les autorités politiques ont, elles, besoin d'anticiper les pics de pollution pour pouvoir prendre les mesures adaptées. En réponse à cette attente, Air Pays de la Loire réalise des prévisions de la pollution atmosphérique grâce à la plateforme interrégionale ESMEALDA.

informer pour prévenir



pics de pollution : une vigilance permanente

En cas d'épisode de pollution, une information spécifique est adressée aux autorités publiques, aux médias et à tous les internautes inscrits gratuitement. Suivant les concentrations de pollution atteintes, le préfet de département prend, si nécessaire, des mesures visant à réduire les émissions de polluants (limitations de vitesse, diminution d'activités industrielles...)

sur Internet : tous les résultats, tous les dossiers

Le site Internet www.airpl.org donne accès à de très nombreuses informations sur la qualité de l'air des Pays de la Loire. Elles sont actualisées toutes les heures. On y trouve les cartes de pollution et de vigilance, les communiqués d'alerte, les indices de la qualité de l'air, les mesures de pollution heure par heure, les actualités, toutes les publications d'Air Pays de la Loire...

Air Pays de la Loire est l'organisme agréé par le Ministère de l'Environnement pour assurer la **surveillance de la qualité de l'air de la région des Pays de la Loire 24h/24 et 7j/7**.

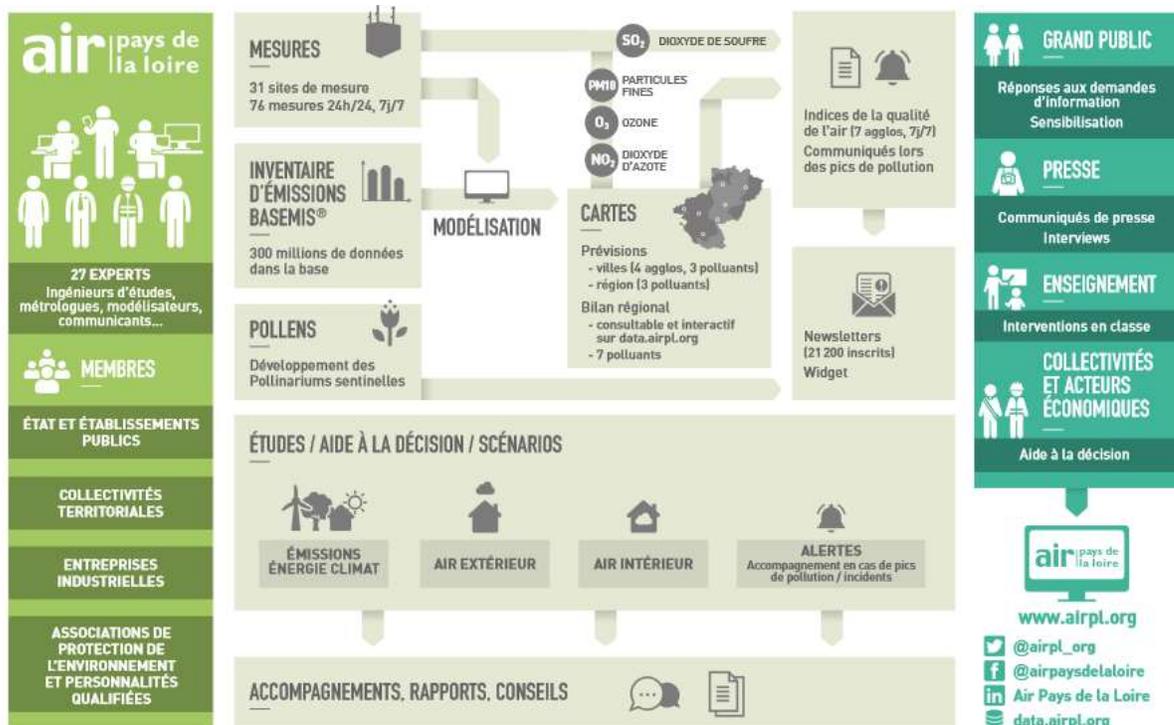
Air Pays de la Loire met quotidiennement à disposition de tous des informations sur la qualité de l'air :

- sur www.airpl.org : mesures en temps réel, prévisions régionales et urbaines, rapports d'études, actualités...
- via des newsletters gratuites : indices de qualité de l'air du jour et du lendemain, alertes pollution et alertes pollens ;
- sur Twitter (@airpl_org) et Facebook (Air Pays de la Loire)

Ses domaines d'expertise portent sur :

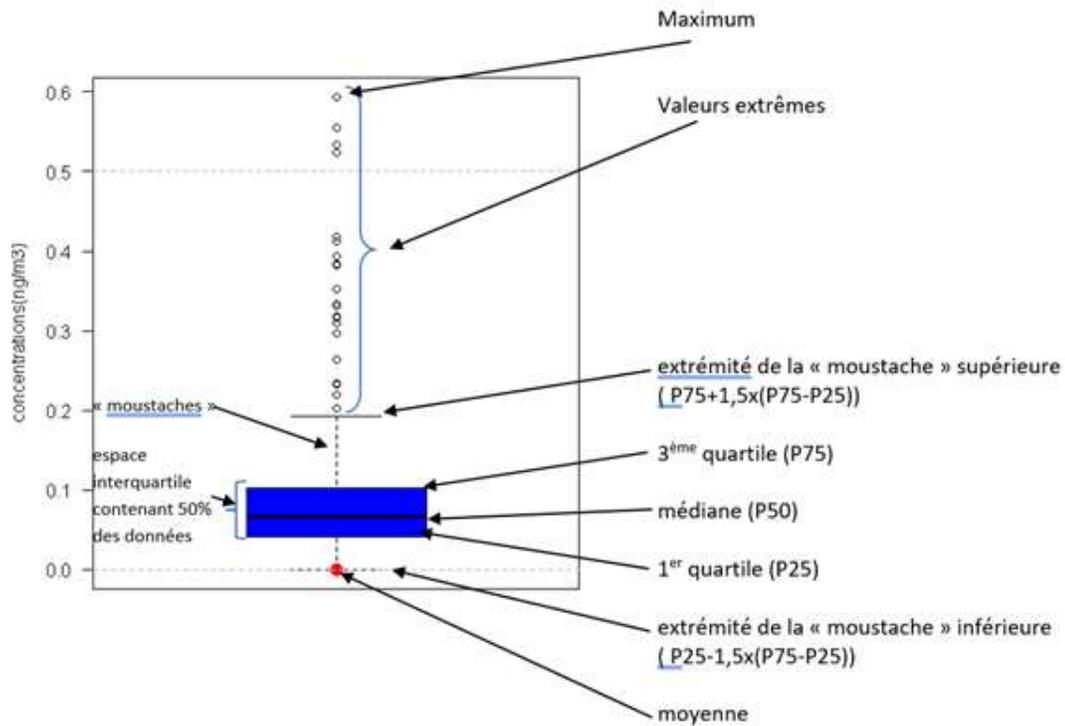
- **qualité de l'air extérieur** : mesures en temps réel, prévisions de qualité de l'air, cartographies, études autour d'industries, dans des zones agricoles...
- **qualité de l'air intérieur** : mesures dans des établissements recevant du public, appui aux collectivités dans les constructions de bâtiments, études spécifiques...
- **émissions, énergie, climat** : inventaire régional des émissions de polluants, gaz à effet de serre et des données énergétiques (BASEMIS®), aide à la décision pour les collectivités (plans climat air énergie territoriaux)...
- **pollens** : diffusion en temps réel des résultats sur la région.

Organisé sous forme pluri-partenaire, Air Pays de la Loire réunit quatre groupes de partenaires : l'Etat, des collectivités territoriales, des industriels et des associations de protection de l'environnement et de défense des consommateurs.

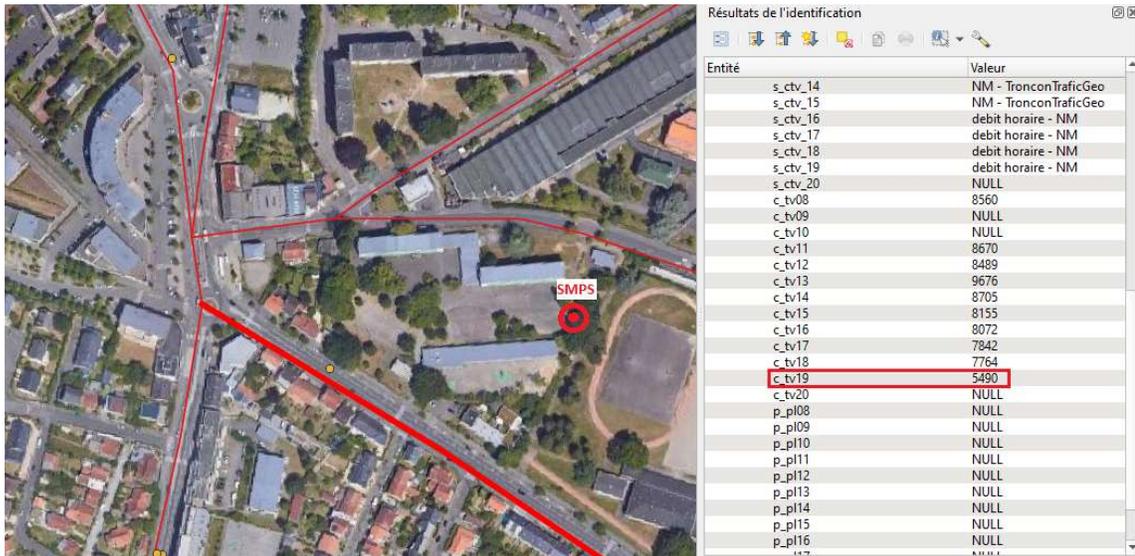


Annexe 2 : définition d'un boxplot

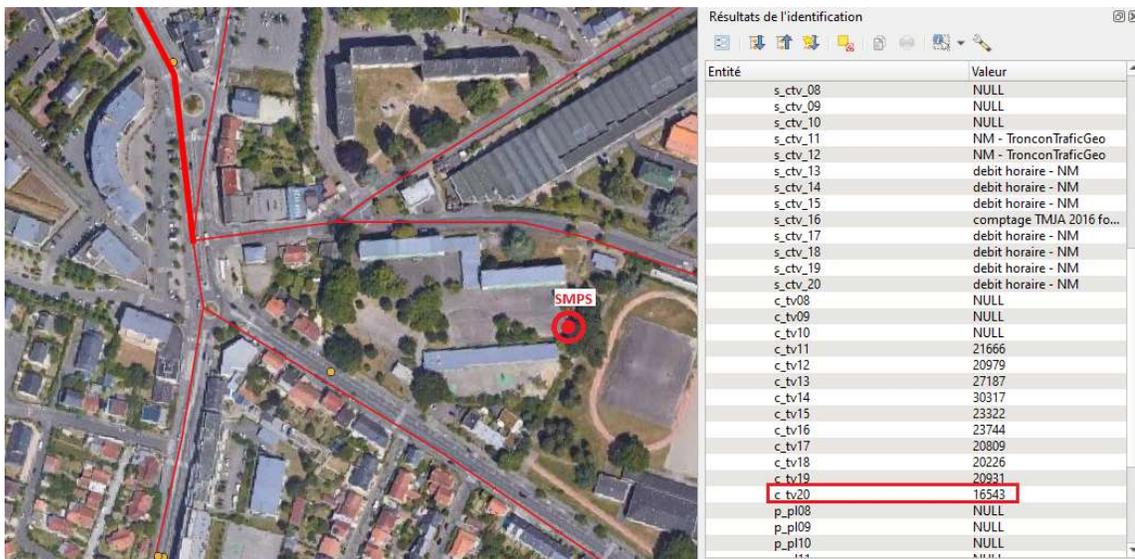
Le Boxplot, appelé également « Boîte à moustaches », permet d'étudier la distribution des concentrations. Il représente d'une manière simple la répartition d'un groupe d'observations et synthétise une série de statistiques récapitulatives telles que la médiane, le 1^{er} et 3^{ème} quartile ainsi que les observations qui s'écartent fortement de la population étudiée dites valeurs extrêmes.



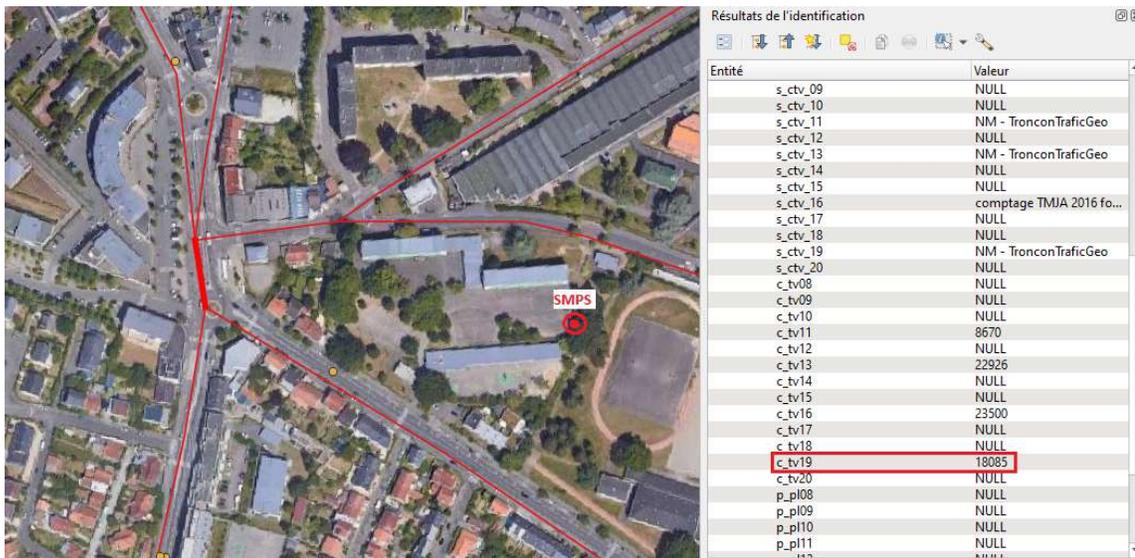
Annexe 3 : Trafic routier à la Chauvinière



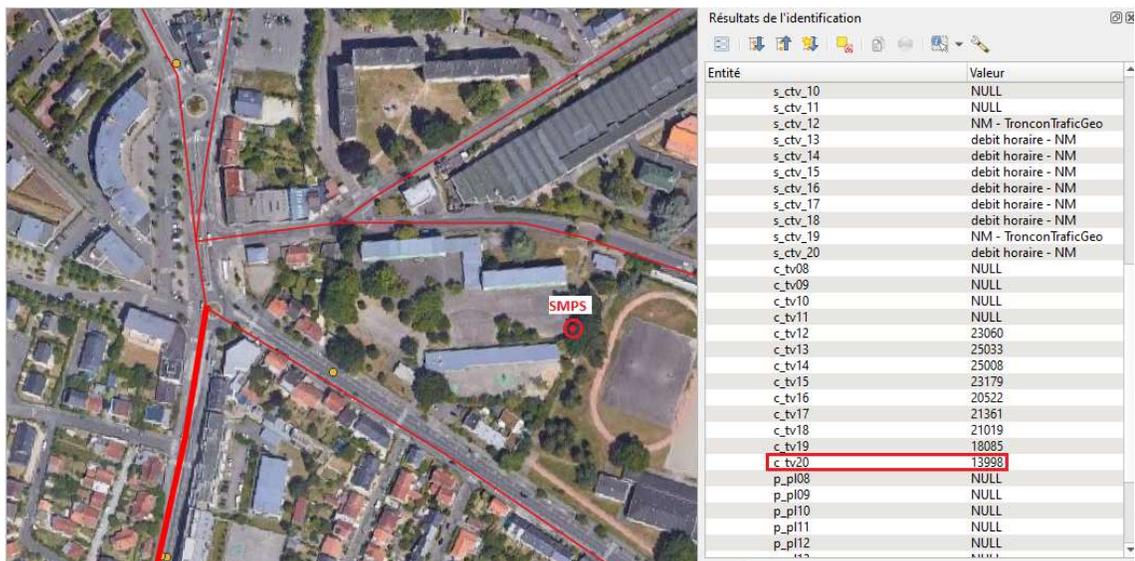
Annexe 1 : Trafic automobile Boulevard de la Chauvinière (point le plus proche à 100 mètres du SMPS), 5490 véh/j en moyenne en 2019



Annexe 2 : Trafic automobile Route de rennes Nord-Ouest (point le plus proche à 250 mètres du SMPS), 16 543 véh/j en moyenne en 2020



Annexe 3 : Trafic automobile Route de Rennes Ouest (point le plus proche à 220 mètres du SMPS) 18 085 véh/j en moyenne en 2019



Annexe 4 : Trafic automobile Route de Rennes portion Sud-Ouest (point le plus proche à 230 mètres du SMPS), 13 998 véh/j en moyenne en 2020

bibliographie

- Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (ACUSA), Particules ultrafines & Aviation, étude bibliographique, 2017
- AUSTIN, Elena, XIANG, Jianbang, GOULD, Timothy R., *et al.* Distinct Ultrafine Particle Profiles Associated with Aircraft and Roadway Traffic. *Environmental science & technology*, 2021, vol. 55, no 5, p. 2847-2858.
- CHOI, Wonsik, HU, Shishan, HE, Meilu, *et al.* Neighborhood-scale air quality impacts of emissions from motor vehicles and aircraft. *Atmospheric environment*, 2013, vol. 80, p. 310-321.
- FLEUTI, Emanuel, MARAINI, Silvio, BIERI, Lukas, FIERZ, Martin : Ultrafine Particle Measurements At Zurich Airport, 2017
- HUDDA, Neelakshi, GOULD, Tim, HARTIN, Kris, *et al.* Emissions from an international airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind. *Environmental science & technology*, 2014, vol. 48, no 12, p. 6628-6635
- Jacobi *et al.* 2016. Stefan Jacobi a, Holger Gerwig b, Wilma Travnicek a, Klaus Wirtz b: „Messung ultrafeiner Partikel im Umfeld des Frankfurter Flughafens“. FLK-Presentation, a HLNUG, Wiesbaden, b Umweltbundesamt, Langen. 2016-09-28
- KARNER, Alex A., EISINGER, Douglas S., *et NIEMEIER, Deb A.* Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data. *Environmental science & technology*, 2010, vol. 44, no 14, p. 5334-5344.
- KEUKEN, M. P., MOERMAN, M., ZANDVELD, P., *et al.* Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmospheric Environment*, 2015, vol. 104, p. 132-142.
- KUMAR, Prashant, ROBINS, Alan, VARDOULAKIS, Sotiris, *et al.* A review of the characteristics of nanoparticles in the urban atmosphere and the prospects for developing regulatory controls. *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, no 39, p. 5035-5052.
- LIATI, Anthi, BREM, Benjamin T., DURDINA, Lukas, *et al.* Electron microscopic study of soot particulate matter emissions from aircraft turbine engines. *Environmental science & technology*, 2014, vol. 48, no 18, p. 10975-10983.
- MØLLER, Karina Lauenborg, THYGESEN, Lau Caspar, SCHIPPERIJN, Jasper, *et al.* Occupational exposure to ultrafine particles among airport employees-combining personal monitoring and global positioning system. *PloS one*, 2014, vol. 9, no 9, p. e106671
- PAASONEN, Pauli, VISSHEDJIK, Antoon, KUPIAINEN, Kaarle, *et al.* Aerosol particle number emissions and size distributions: implementation in the GAINS model and initial results. 2013.
- RIVAS, Ioar, BEDDOWS, David CS, AMATO, Fulvio, *et al.* Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities. *Environment international*, 2020, vol. 135, p. 105345.
- Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2006
- SIOUTAS, Constantinos, DELFINO, Ralph J., *et SINGH, Manisha.* Exposure assessment for atmospheric ultrafine particles (UFPs) and implications in epidemiologic research. *Environmental health perspectives*, 2005, vol. 113, no 8, p. 947-955.
- SPRACKLEN, D. V., CARSLAW, K. S., MERIKANTO, J., *et al.* Explaining global surface aerosol number concentrations in terms of primary emissions and particle formation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, vol. 10, no 10, p. 4775-4793.
- STACEY, Brian. Measurement of ultrafine particles at airports: A review. *Atmospheric Environment*, 2019, vol. 198, p. 463-477.
- STACEY, Brian, HARRISON, Roy M., *et POPE, Francis.* Evaluation of ultrafine particle concentrations and size distributions at London Heathrow Airport. *Atmospheric Environment*, 2020, vol. 222, p. 117148.
- STAFOGGIA, M., CATTANI, G., FORASTIERE, F., *et al.* Particle number concentrations near the Rome-Ciampino city airport. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 147, p. 264-273.
- WICHMANN, H. Erich, SPIX, Claudia, TUCH, Thomas, *et al.* Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany part I: role of particle number and particle mass. Research report (Health Effects Institute), 2000, no 98, p. 5-86; discussion 87.
- ZHU, Yifang, HINDS, William C., KIM, Seongheon, *et al.* Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway. *Journal of the air & waste management association*, 2002, vol. 52, no 9, p. 1032-1042.



airpays de la Loire

5 rue Édouard-Nignon – CS 70709 – 44307 Nantes cedex 3

Tél + 33 (0)2 28 22 02 02

Fax + 33 (0)2 40 68 95 29

contact@airpl.org

air | pays de
la Loire
www.airpl.org