



Particules ultrafines & Aviation

Etude bibliographique

Acnusa – Pôle Qualité de l’Air

Réka Vallier

2017

Table des matières

Table des matières.....	2
Introduction.....	3
Les particules ultrafines.....	3
Les particules ultrafines & la santé.....	5
Les effets sur la santé	6
Les études épidémiologiques	6
Etudes d'exposition & Etudes toxicologiques.....	7
Les particules ultrafines sur les aéroports.....	9
Aéronefs & Particules ultrafines	9
Aéroports & Particules ultrafines	11
Etudes de particules ultrafines sur les aéroports	11
Etudes de particules ultrafines autour des aéroports.....	13
Conclusions.....	18
Perspectives.....	18
Annexe 1 – Tableau et graphique des études APEX	22
Annexe 2 – Tableau de l'étude réalisée par FOCA.....	23

Introduction

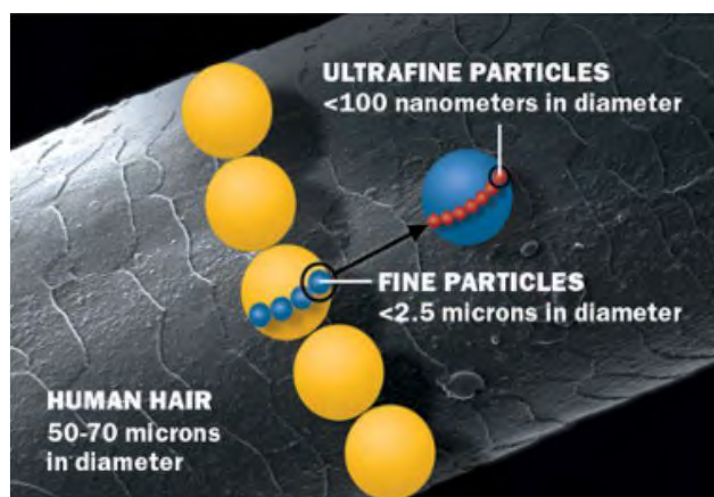
Les études concernant les particules ultrafines se sont multipliées ces deux dernières décennies. Plusieurs visaient à comprendre l'impact sur la santé humaine de ces polluants qui sont présents en très grand nombre dans l'air qu'on respire.

Des études ont également été réalisées dans le domaine de l'aviation depuis les années 2000. Toutefois c'est celle sur l'aéroport de Copenhague en 2010 qui a éveillé les consciences sur la dangerosité de ces particules émises sur les aéroports et qui a engendré un fort besoin d'approfondir les travaux sur le sujet.

Ce document est une étude bibliographique. Il a donc comme but de rassembler les connaissances actuelles sur ce sujet, afin d'offrir une vue globale sur la problématique des particules ultrafines sur les aéroports et d'identifier les éventuelles lacunes.

Les particules ultrafines

On parle de particules ultrafines (PUF), quand le diamètre d'une particule ne dépasse pas 100 nm (0,1µm). Les PM_{0.1} sont donc cent fois plus petites que les PM₁₀. La figure ci-dessous présente la taille d'une particule ultrafine comparée à un cheveu humain.



Source : Tuft University

FIGURE 1 – LA TAILLE D'UNE PARTICULE COMPAREE A UN CHEVEU HUMAIN

Les particules ultrafines sont des polluants primaires ou secondaires. Elles peuvent être d'origine naturelle ou anthropogénique, néanmoins elles sont dans la majorité des cas issues de combustion (procédés industriels, moteurs des véhicules, etc.). Selon l'étude de Paasonen et al. (2013), dans l'UE28, en 2010, la source principale des PUF était le trafic routier (60%) devant les autres transports (19%) et la combustion domestique (13%). [1]

Leurs morphologie et composition chimique sont très variées et dépendent de leur source et de leur transformation. Etant donné que la masse totale des particules ultrafines est moins importante que celles des plus grandes particules, il est préférable de mesurer leur concentration en nombre (nombre des particules par cm³ d'air) plutôt que leur concentration en masse. [2] [3]

La figure ci-dessous récapitule les connaissances sur les distributions en taille et les répartitions en nombre et en masse des particules. Les données sont basées sur une étude réalisée à Erfurt (Allemagne) entre 1995 et 1998.

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.

FIGURE 2 – CONTRIBUTION EN NOMBRE ET EN MASSE DES PARTICULES EN FONCTION DE LEUR TAILLE

Pour une même masse, la composition des particules en termes de nombre et de taille peut varier considérablement. Par exemple, une concentration en nombre d'une particule par cm³ de 2,5 µm de diamètre est suffisante pour conduire à une concentration en masse de 10 µg/m³, tandis que plus de deux millions de particules d'un diamètre de 0.02 µm sont nécessaires pour obtenir la même concentration massique. [2][4]

Dans le tableau ci-dessous sont présentées les concentrations en nombre de particules ultrafines dans l'air selon la localisation.

	Typical particle numbers (1000 #/cm ³)
Clean mountain air	< 1
Clean office	2 - 4
Urban background (NL)	8 (R'dam) - 9.5 / 22 (A'dam)
Urban background (EU)	7 - 11
Urban streets (NL)	30 - 40
Urban streets (EU)	31.5 ± 16
Outdoors, smog	> 50
Airport near gate	40
Airport end runway (LAX)	150
Industry (melting / furnace)	200-2700

Source : <https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-L--16-026>

TABLEAU 1 – CONCENTRATION EN NOMBRE DES PARTICULES ULTRAFINES

Au voisinage d'une source de pollution, le nombre de particules ultrafines peut atteindre dix fois le nombre de particules de la pollution de fond, alors que dans le cas des PM₁₀ ou PM_{2.5} cette

augmentation est moins importante, de l'ordre de 25-30%. En conséquence, une bonne identification de la source émettrice de PUF est possible et cela d'autant plus que leur nombre diminue considérablement avec la distance à la source. [2]

De manière générale, on peut constater que les études sur les particules ultrafines sont plus rares que sur les PM_{10} et $PM_{2.5}$. De plus, actuellement, ni réglementation, ni mesures standardisées n'existent pour ces polluants.

Les particules ultrafines & la santé

Les particules ultrafines peuvent pénétrer dans l'organisme humain par les voies respiratoires (via la bouche et/ou le nez), par ingestion ou par voie percutanée. Par inhalation, le dépôt peut se faire dans trois régions distinctes :

- La région extra-thoracique (la bouche, le nez, le larynx et le pharynx),
- L'arbre trachéo-bronchique,
- La région alvéolaire (les bronchioles terminales et les alvéoles).

Après inhalation, les particules peuvent arriver dans le sang et parvenir jusqu'aux organes, comme le cœur ou le cerveau. [5] [7]

La figure ci-dessous montre les dépôts par région anatomique et le dépôt total des particules entre 0,001 et 100 μm (Pour le calcul, le model CIPR¹ a été utilisé, en considérant que le sujet (travailleur) respirait majoritairement par la bouche ou le nez, en effectuant 1/3 de son temps de travail assis et 2/3 dans une activité « légère »).

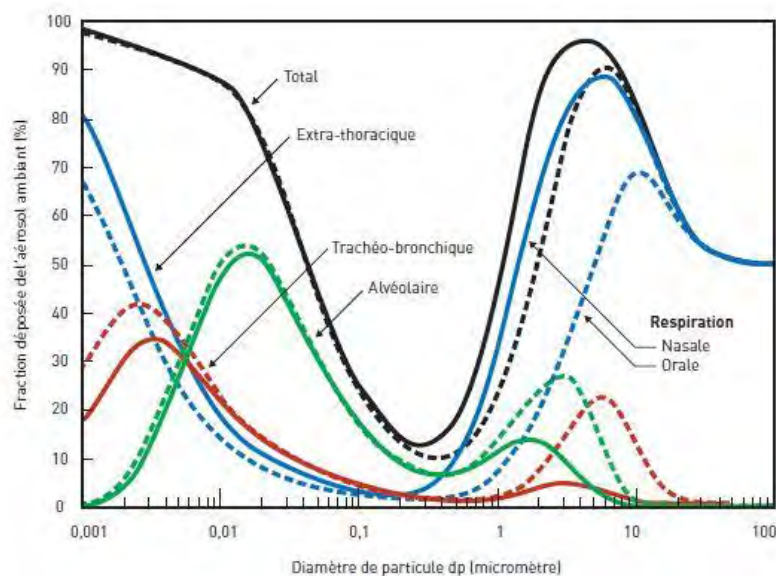


FIGURE 3 - DEPOTS PAR REGION ANATOMIQUE ET DEPOT TOTAL DES PARTICULES

On constate que les particules de diamètre inférieur à 0,01 μm se déposent plutôt dans les régions extra-thoracique et trachéo-bronchique, les particules de taille comprise entre 0,01 et 0,1 μm se

¹Commission Internationale de Protection Radio biologique

déposent dans la région alvéolaire, tandis que les plus grosses particules ($>1\mu\text{m}$) restent dans la région extra-thoracique.

Les effets sur la santé

Les particules ultrafines peuvent franchir les barrières biologiques, se retrouver dans le flux sanguin et donc atteindre des organes. Selon l'article du Pr. F. Morano [7], plusieurs études ont démontré que certaines PM ultrafines, notamment le carbone suie, produisaient des radicaux libres et provoquaient un stress oxydant, et cela de manière plus importante que les particules identiques mais d'une taille plus importante.

L'article « Particules ultrafines et santé au travail » (INRS) reprend et présente les hypothèses développées par Kreyling et coll. concernant les effets sur la santé des particules fines et ultrafines ambiantes. La figure ci-dessous illustre ces hypothèses et donc les interactions possibles avec les différentes cellules cibles, fluides et tissus de l'organisme [6] :

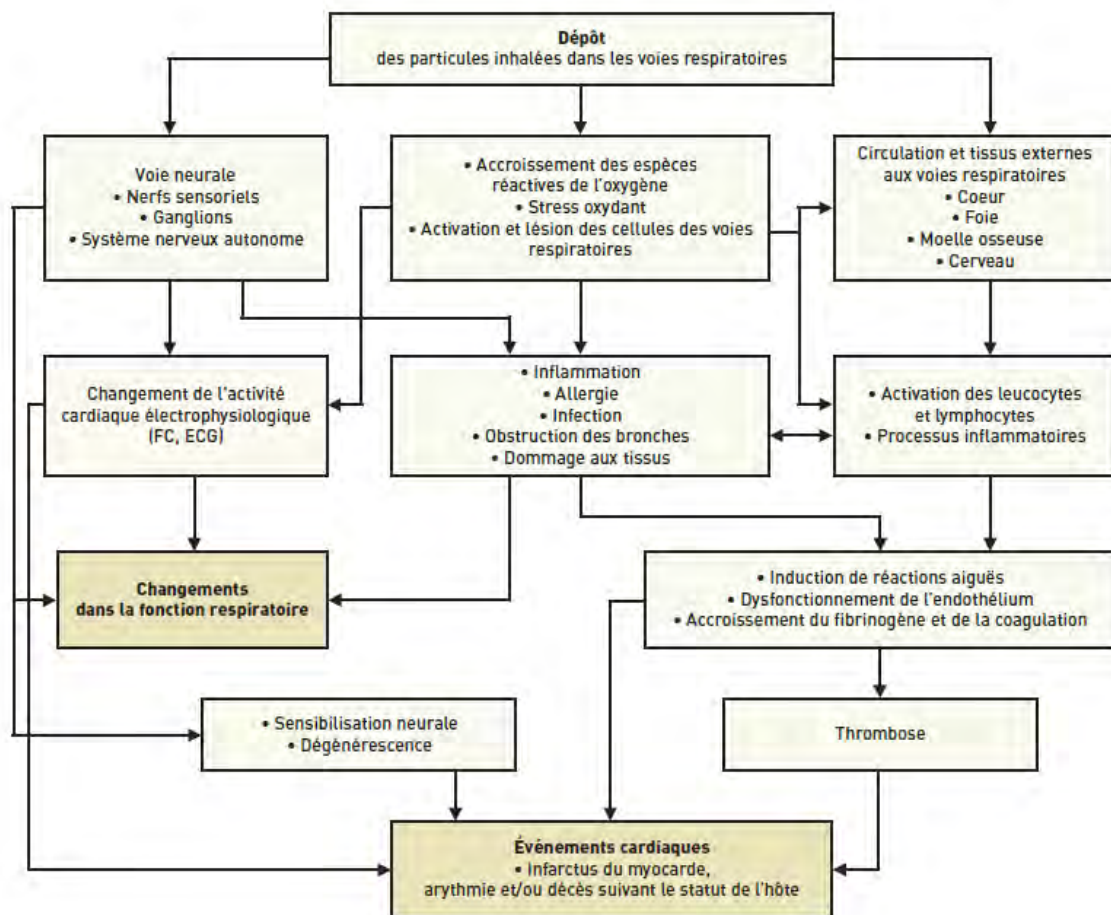


FIGURE 4 – HYPOTHESES CONCERNANT LES EFFETS SUR LA SANTE DES PARTICULES FINES ET ULTRAFINES DE L'AEROSOL AMBIANT

Les études épidémiologiques

La plupart des études épidémiologiques ont été menées à la fin des années 90 et au début des années 2000. Des études plus récentes sont soit en cours, soit ne sont pas (ou pas encore) publiées.

Ces études sont en général réalisées sur un échantillon de personnes réduit, dit « population sensible », comme les personnes âgées, les enfants avec symptômes respiratoires chroniques, les adultes avec broncho-pneumopathie chronique obstructive, les adultes asthmatiques non-fumeurs ou avec une maladie cardiaque coronarienne. Peu d'études examinent l'effet des particules ultrafines sur la santé d'une population entière, comme celle de Wichmann et al.² (2000) ou l'étude UFIREG³ (2015).

Ces travaux épidémiologiques ont comme but d'étudier les effets des PM ultrafines sur la morbidité respiratoire ou cardiovasculaire, ou bien la mortalité respiratoire (ex : UFIREG) ou mortalité respiratoire et cardiovasculaire (ex : Wichmann et al, 2000).

Il est important de noter que même si la plupart des études établissent un lien entre la concentration de PUF et le changement du débit expiratoire maximal ou des effets négatifs sur la morbidité ou mortalité des maladies cardiovasculaires ou respiratoires, les résultats, en général, elles ne sont pas statistiquement significatives du fait du faible nombre de sujets examinés.⁴ [2]

Etudes d'exposition & Etudes toxicologiques

Les études d'exposition contrôlée chez l'homme et les études toxicologiques sont plus approfondies et explorent les effets concrets de certaines particules ultrafines sur les adultes sains et sur les animaux, notamment les rats. Elles démontrent les effets d'une exposition à court terme.

L'étude « Impacts des particules atmosphériques sur la santé : aspects toxicologiques » cite plusieurs recherches dans lesquelles des sujets sains et non tabagiques ont été exposés à des échappements diesel. Les résultats montrent une réponse allergique et inflammatoire pour les particules PDi (les particules issues des moteurs Diésel) induite soit par l'instillation nasale, soit par inhalation dans une chambre d'exposition. Afin de mieux comprendre ces réactions, des études chez l'animal (in vitro) ont été également réalisées.

Au sujet des études chez l'animal, il a été montré une grande différence d'accumulation entre les petits rongeurs et l'homme. Il est important de noter que les doses d'exposition utilisées pour les animaux sont largement supérieures à celles pour l'homme. Une des études conclut qu'il n'y a pas de différence quant à l'exposition pendant 24 mois aux particules diesel entre les rats normaux et des rats avec un emphysème induit. En revanche, une autre étude a démontré une augmentation générale plus importante des marqueurs de l'inflammation dans le lavage broncho-alvéolaire chez les jeunes rats vis-à-vis des rats adultes.

Toujours chez les rats, les études de cancérogenèse et mutagenèse ont démontré une probabilité que les PDi soient cancérogènes. Elles sont par conséquent classées dans le groupe 2A⁵ par l'IARC (International Agency for Research on Cancer). [8]

²<http://pubs.healtheffects.org/getfile.php?u=189>

³<http://www.ufireg-central.eu/>

⁴ Une seule étude porte sur une population générale et plusieurs études ciblées –enfants malades, fumeurs ou adultes avec maladies diverses. De plus, des études contradictoires existent également, notamment celle d'Osunsanya et al. réalisée en 2001, au Royaume-Uni, sur 44 adultes subissant des symptômes respiratoires chroniques

⁵L'agent est probablement cancérogène pour l'Homme

Les particules ultrafines sur les aéroports

Le début des années 2000 a apporté non seulement des études concernant les effets des particules ultrafines sur la santé humaine, mais aussi des recherches spécifiques sur leur source. Le domaine de l'aviation civile ne fait pas exception : des études ont été réalisées sur certains aéroports européens, australiens, américains (Aéroports de Copenhague, de Brisbane, Aéroport International de Los Angeles, ...) ainsi que sur des moteurs d'aéronef (études APEX, ...).

Aéronefs & Particules ultrafines

Le tableau récapitulatif ci-dessous présente les résultats des études APEX, de l'étude FOCA et l'étude de Mazaheri et al (2008). Les études APEX ont été réalisées aux Etats-Unis et avaient comme but de mettre à jour et d'améliorer les indices d'émission des PUF et le profil des sources chimiques des particules fines générées par les réacteurs, ainsi que de voir l'effet des propriétés des carburants et des conditions de fonctionnement sur la formation des PM. [9]

L'aviation civile Suisse (FOCA – Federal Office for Civil Aviation) a réalisé des mesures sur l'aéroport de Zurich en 2008. Ces mesures avaient comme objectif d'évaluer l'indice d'émission, le nombre et la taille des particules ultrafines pendant la phase de taxiing. La même année, en Australie, l'équipe de Mazaheri a réalisé une étude plus robuste vis-à-vis du nombre d'aéronefs inclus dans l'étude. Le but de l'équipe de Queensland University était d'identifier les indices d'émissions des polluants en conditions réelles. [3] [12]

	Etats-Unis	Suisse	Australie
Etude :	APEX 1, 2 & 3	FOCA	Mazaheri et al. (2008)
Nb de couples cellule/moteur testés	9 (voir annexe 1)	11 (voir annexe 2)	283
Distance du réacteur	30 m	70 m	80 m
Indice d'émission (mg/kg de carburant)	10 à 550	53 à 214	30 à 720 (PM _{2.5})
Nb de particules (#/kg de carburant)	10 ¹⁵ à 10 ¹⁷	1,48*10 ¹⁶ à 4,7*10 ¹⁶	4,16*10 ¹⁵ (B767 idle) à 5,42*10 ¹⁶ (A330 décollage) *
Distribution de la taille des particules	3 à 100 nm (uni-modal et log-normal)	-	4-100 nm
Diamètre géométrique moyen des particules (GMD)	10 – 35 nm	9,4 – 13,5 nm	-
Observations :	Plus le débit de carburant est élevé plus le GMD est grand (voir annexe 1) Poussée >85% = accumulation des particules	-	Le nombre de particules dépend du niveau de poussée. Selon l'étude, l'OACI sous-estime le niveau de poussée pour le taxiing par rapport à l'idle.

*Nb de particules pour les PM_{2.5}. Etant donné que les PM de taille 4-100 nm constituent en grande majorité les PM mesurées pendant chaque mode du cycle LTO, il est considéré en première approximation que le nombre de PM_{2.5} est très proche de celui des PUF.

TABEAU 2 – ETUDES SUR LES EMISSIONS DE PUF DES AERONEFS

Mazaheri et al. ont poursuivi l'étude de 2008 afin d'améliorer les connaissances concernant les émissions en PN (nombre de particules) en PM_{2.5} et en NO_x. Dans cette étude de 2011, le cycle LTO

(phase et régime du moteur) a été pris en compte comme défini par l'OACI ; en revanche, pour le time-in-mode (temps passé dans chaque phase), le temps réel du roulage sur l'aéroport a été utilisé :

Phases du cycle LTO	Régime du moteur (%)	Time-in-mode (min)	
		Vols intérieurs	Vols internationales
Approche	30	4	
Roulage	7	10,5(dép)/5,4(arr)	17,6(dép)/6,7(arr)
Décollage	100	0,7	
Montée	85	2,2	

TABLEAU 3 – REGIMES DU MOTEUR & TIM

Pour les calculs, un taux d'émission (*emission rates*) a été déterminé pour chaque aéronef, en utilisant les données de l'OACI pour la consommation de carburant et les indices d'émission définis dans l'étude précédente (Mazaheri 2008) :

$$\text{Emission Rates } ER(x) = N F_m^{\text{fuel}} EF(x)$$

Où : $ER(x)$ = le taux d'émission de polluant x (s^{-1} pour le PN)

N = le nombre de réacteurs contribuant au panache

F_m^{fuel} = débit carburant par réacteur contribuant au panache ($kg\ s^{-1}$)

$EF(x)$ = le nombre de particules émises par kg de carburant consommé (kg^{-1} pour le PN)

$$\text{Total émission } E(x) = ER(x)t$$

Où : t = durée de l'activité (s)

Dans le tableau ci-dessous, les résultats pour un B737 obtenus lors des deux études de Mazaheri sont présentés.

B737			
Phase LTO	Régime moteur	Indice d'émission EF(x) (PN) (kg^{-1})	Taux d'émission ER(x) (PN) (s^{-1})
Roulage	7	(1,28±0,48)* 10^{16} (idle) (3,29±0,20)* 10^{16} (taxi)	(2,84±1,06)* 10^{15}
Approche	30	(4,26±0,39)* 10^{16}	(2,70±0,15)* 10^{16}
Montée	85	-	(9,85±1,07)* 10^{16}
Décollage	100	(5,31±0,58)* 10^{16}	(1,18±0,13)* 10^{17}

TABLEAU 4 – INDICE ET TAUX D'EMISSIONS B737

Une des conclusions de l'étude de 2011 est ainsi que la phase pendant laquelle les émissions sont les plus élevées est la montée, car son temps est relativement long (2,2 min) et les taux d'émissions sont parmi les plus élevés. De plus, pendant les phases taxi & idle les émissions de particules sont équivalentes à celles de la phase de décollage à cause de la durée (de 5,4 à 17,6 min) de ces deux phases au sol.

Il a aussi été observé que les émissions pendant le départ (taxi-out, idle, décollage, montée) sont en général plus élevées qu'à l'arrivée (descente, taxi-in, idle) en raison des taux d'émissions pendant le décollage et la montée qui sont plus élevés et des temps plus longs en phases taxi et idle avant le décollage qu'après l'arrivée. [13]

Il s'avère donc que les réacteurs d'avion sont une source importante de PUF. De plus, ils émettent des PUF particulièrement petites, autour de 10-20 nm, contrairement aux PUF produits par les moteurs diesel (10-300 nm).

Toutefois il faut garder en tête que sur les aéroports, ce ne sont pas seulement les aéronefs qui émettent des PUF, mais aussi les engins de piste, les installations de production d'énergie, des véhicules circulant sur le tarmac, etc.

Aéroports & Particules ultrafines

En parallèle des études ci-dessus, les aéroports ont aussi réalisé des mesures, soit pour mieux connaître le danger pour la santé de leurs employés travaillant sur le tarmac, soit pour voir la zone impactée par les particules ultrafines dans le voisinage de l'aéroport.

Etudes de particules ultrafines sur les aéroports

Aéroport de Karstup, Copenhague, Danemark

L'étude réalisée sur l'aéroport de Copenhague est la seule qui visait de mesurer la quantité de PUF respirée par les travailleurs sur le tarmac (ainsi que les : NO_x, SO₂, PM_{2.5}, suie, HAP et VOC). Cette étude est également la seule qui a mis en place ces mesures sur une relativement longue période (août 2010 – juin 2011). Les valeurs mesurées aux 3 endroits de l'aéroport (1 dans l'enceinte de l'aérodrome, 1 à l'Est et 1 à l'Ouest) ont été comparées avec des mesures de référence d'une des voies urbaines les plus polluées au Danemark (HCBA), d'un toit d'un immeuble à Copenhague (HCOE) et de Lille Valby en rase de campagne.

En ce qui concerne les particules, il a été constaté que la concentration moyenne sur 24h de particules fines de diamètre entre 6 et 700 nm était 2 à 3 fois plus élevée sur la station en plein cœur de l'aéroport que sur le HCBA. 85-90% de ces particules avaient un diamètre compris entre 6 et 40 nm. En revanche, à la limite de l'aéroport, sur les deux autres sites de mesure, la concentration moyenne 24h de PUF (6-40nm) était de 20 à 40 % moins élevée que sur le HCBA. En analysant la variation de concentration de PUF durant 24h, il a été constaté que pendant la nuit, sans trafic aérien, la concentration de PUF (6-40nm) était identique sur l'aéroport et en rase de campagne (figure 6). Par contre en journée, et plus précisément en heure de pointe, la valeur de la demi-heure la plus élevée était supérieure à 500 000 particules par cm³. [10] [3]

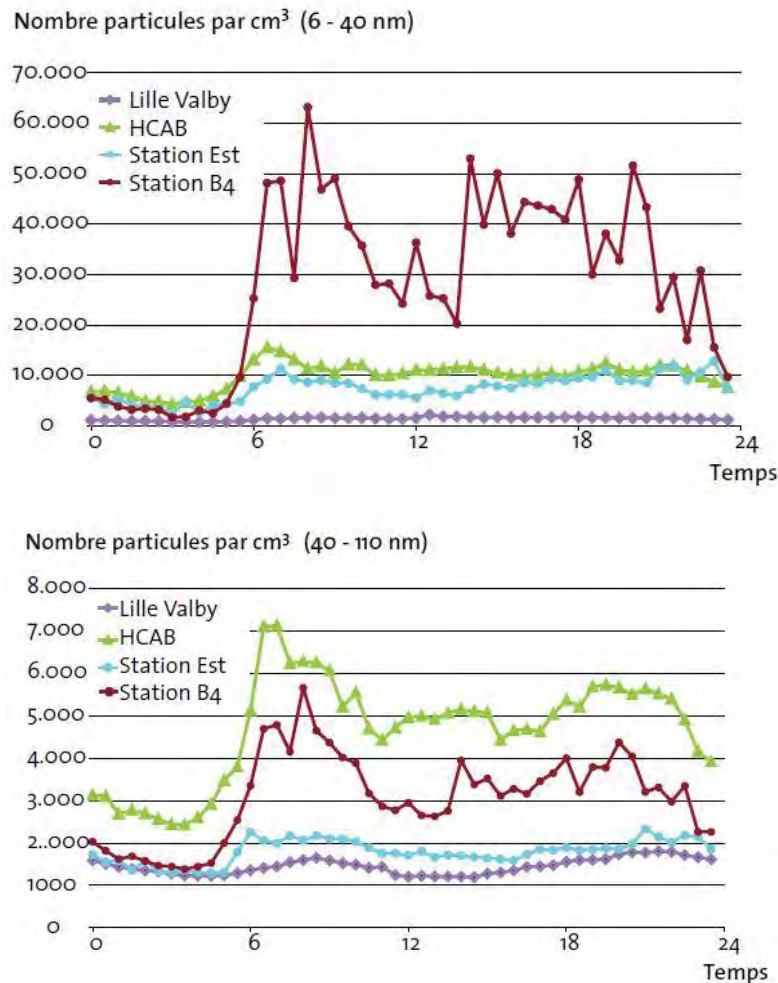


FIGURE 5 – CONCENTRATION EN NOMBRE DE PARTICULES EN 24H

Une deuxième étude a été réalisée en 2014 par Lauenborg, Miller et al., afin de mesurer ce que les employés respirent réellement en travaillant sur le tarmac. Cinq groupes de travailleurs étaient équipés d'un matériel portable (NanoTracer, Philips) pour mesurer les concentrations en particules entre 10 et 300 nm. Un GPS a également été utilisé afin de tracer leurs déplacements. Il a été démontré que les bagagistes sont exposés à des concentrations en PUF 7 fois plus importantes que les employés travaillant à l'intérieur de l'aéroport. [14]

Aéroport de Zurich, Suisse

Une étude datant de 2012 présente les mesures réalisées pendant 5 rotations avions (A320 équipés des moteurs CFM56-5B4) sur les postes de parking au contact (3) et au large (2).

Les résultats montrent que la concentration en nombre de particules est plus élevée sur les postes au contact qu'au large. Ceci peut être expliqué par la proximité des autres sources émettrices et par des obstacles empêchant la dispersion (bâtiments). Il est possible de différencier la source des PUF, car celles émises par les aéronefs ont des diamètres inférieurs (10-70 nm) aux « PUF diesel » (10-300 nm) et également grâce à la cognition sensorielle des odeurs « spécifiques aux échappements des réacteurs ».

La taille des particules mesurées était comprise entre 10 et 70 nm et la taille moyenne des particules entre 18 et 38 nm (et entre 10-16 nm en présence d'odeur typique de pot d'échappement des aéronefs), tandis que les concentrations en nombre de particules étaient quant à elles comprises entre 30 000 (poste au large) et 160 000 (poste au contact) particules/cm³. (Les niveaux de fond étaient de l'ordre de 3 et 10 000 #/cm³) [3]

Aéroport de Stockholm Årlanda, Suède

Swedavia a réalisé des mesures de PUF sur l'aéroport de Stockholm en 2012. Les mesures ont eu lieu en août-septembre et ont duré 3 semaines. Une semaine de mesures a été réalisée au terminal 5 et deux semaines au terminal 4 (dans les deux cas, à côté des postes de parking avion).

Les concentrations moyennes étaient de 35 600 particules/cm³ (T4) et 50 700 particules/cm³ (T5). La différence est due à la météorologie et au nombre de mouvements. Un des résultats de l'étude pointe la différence de concentration pendant la nuit (5 000 particules/cm³) et en journée de 6h00 à 22h00. De plus, les concentrations les plus élevées ont été mesurées pendant les heures de pointe de trafic aérien, ainsi entre 7h00 et 9h00 et entre 17h00 et 19h00. [3]

Aéroport de Heathrow, Royaume-Uni

Sur l'aéroport de Londres – Heathrow, des mesures des particules ultrafines ont été réalisées sur une journée en mai 2012. L'échantillonnage a été effectué aux rampes des Terminaux 3 et 5 avec un appareil mesurant les particules de diamètre compris entre 7 et 300 nm.

Plusieurs pics ont été observés, avec des concentrations en nombre de particules dépassant les 70 000 #/cm³. Ces événements étaient très courts et les concentrations baissaient rapidement pour atteindre les niveaux de base (10 000 et 20 000 #/cm³) correspondant aux activités au sol (handling et taxiing). Les concentrations moyennes pendant la journée étaient de l'ordre de 31 000 #/cm³ (T3) et 42 000 #/cm³ (T5). Aucune corrélation n'a été observée entre les UFP et le TSP⁶, en revanche, et contrairement aux attentes, une faible corrélation entre les concentrations de PUF et de NO₂ a été mise en évidence. [3]

Etudes de particules ultrafines autour des aéroports

Aéroport de Heathrow, Royaume-Uni

En parallèle aux mesures réalisées en mai 2012 sur l'aéroport, un camion laboratoire a effectué des mesures autour de l'aéroport de Heathrow et sur les autoroutes locales. Les concentrations étaient assez élevées à l'ouest et au sud de l'aéroport, ce qui était expliqué par la pollution issue du trafic routier et par les vents en provenance de l'aéroport. Les concentrations sur l'autoroute la plus éloignée de l'aéroport étaient similaires aux concentrations mesurées sur les routes à proximité de l'aéroport. En conséquent, le trafic routier est également un grand émetteur de particules fines et ultrafines. (Rappel : cette étude n'a pas distingué les groupes de particules de diamètre inférieur à 100 nm et jusqu'à 300 nm.) [3]

⁶ Total suspended particulate (Particules en suspension totales)

Aéroport de Schiphol, Amsterdam, Pays-Bas

En 2012, des mesures ont été réalisées à 7 et à 40 km de l'aéroport (sous l'influence de vents en provenance de l'aéroport) afin de combler les lacunes dans les connaissances concernant les émissions des aéronefs de particules fines et de leurs impacts dans le voisinage de l'aéroport.

Les mesures ont montré qu'à 7 km sous les vents de l'aéroport, la concentration en nombre de particules a été multipliée par 3 par rapport à la pollution de fond. A 40 km on a mesuré 20% de plus de particules fines par rapport aux périodes où le vent ne provenait pas de l'aéroport. La majorité des particules ont montré un diamètre compris entre 10 et 20 nm.

L'étude a également démontré une forte corrélation entre les périodes les plus chargées en termes de trafic aérien (8h00-12h00 et 20h00-22h00) et les heures où les concentrations en particules ultrafines étaient les plus élevées.

En ce qui concerne la population exposée aux émissions en provenance de l'aéroport, avec l'aide d'un modèle de dispersion (2012) il a été démontré que 200 000 foyers étaient impactés par les émissions de PUF de l'aéroport de Schiphol. [11]

Aéroport de Bruxelles – Zaventem, Belgique

En 2015, une étude a été réalisée sur l'aéroport de Bruxelles afin d'étudier l'impact de la plateforme sur la qualité de l'air alentour. En parallèle aux PUF, les concentrations en carbone suie et en NO_x ont été mesurées sur 5 sites, parmi lesquels le plus éloigné de l'aéroport se trouvait à 7 km. (Les concentrations en PUF ont été mesurées sur 4 sites.)

Les particules de taille comprise entre 10 et 294 nm ont été mesurées avec une attention toute particulière sur les particules ultrafines de taille de 10 à 20 nm, qui sont les plus représentatives des émissions des aéronefs.

Les résultats montrent que sur les sites les plus proches de l'aéroport (250 et 750 m), les PUF de taille de 10-20 nm représentaient 45% du nombre total, alors que sur les deux sites plus éloignés (5 et 7 km) le pourcentage était moins élevé, respectivement 28 et 35%.

Les roses de pollution montrent une augmentation en nombre de PUF de diamètre de 10 à 20 nm sur les sites à proximité de l'aéroport sous les vents de la plateforme, ce qui n'était pas le cas pour les PUF de diamètre >70 nm.

Un autre modèle, qui est estimé plutôt conservatif, a montré que la contribution maximale de l'aéroport sur les sites les plus près de l'aéroport pouvait atteindre des valeurs entre 255 000 et 276 000 particules/cm³.

Cette étude a également démontré le lien fort entre les heures de pointe (6h00-10h00 et 16h00-20h00) du trafic aérien et les concentrations élevées en PUF. [15]

Aéroport de Los Angeles, Californie, Etats-Unis

Plusieurs études ont été menées sur l'aéroport de Los Angeles afin d'étudier l'ampleur de l'impact sur la qualité de l'air des PUF dans le voisinage de l'aéroport.

Monitoring and modelling of ultrafine particles and black carbon at the Los Angeles International Airport, Fanning et al. (2007)

En 2007, E. Fanning et son équipe ont réalisé une étude comprenant des mesures réalisées à proximité de la source « avions » (140 m), sous les vents en direction de la source (2 fois 5 sites derrière les deux pistes, de 220 à 610 m), dans le voisinage de l'aéroport (6 quartiers de 1,8 à 3,5 km) et une étude de modélisation. (Ont été également mesurées, les concentrations en carbone suie, PM_{2.5}, CO, CO₂, HAP, COV.)

Les mesures sur le site à 140 m du point de décollage sur le tarmac (*take-off position*) ont montré une concentration en PUF très élevée sous les vents. La concentration moyenne en nombre de particules de diamètre de 14 nm (la taille des particules les plus nombreuses) était $1,4 \cdot 10^6$ particules/cm³. La plage de mesure de l'appareil était de 7 à 300 nm. Des pics ont été observés au moment des décollages. Le nombre de PUF total n'a pas pu être déterminé, car la capacité maximale de l'appareil ($9,99 \cdot 10^6$ #/cm³) a été atteinte plusieurs fois au moment de ces pics.

De plus, sous les vents de l'aéroport et sur les 5 points de mesures (de 210 à 660 m de la source) les particules de 15 nm ont été également mesurées (en même temps qu'à proximité directe du tarmac). La distribution temporelle a montré que les concentrations de particules de 15 nm étaient liées aux mouvements d'avions. De plus, les mesures sur le site de référence ont montré un niveau plus bas en concentration des particules ultrafines et une différence au niveau de la distribution en taille des particules.

Les mesures sur les 6 sites dans les quartiers sous les vents de l'aéroport ont montré que les concentrations moyennes des particules ultrafines ($2,0 \cdot 10^4 - 5,4 \cdot 10^4$ #/cm³) se situaient entre celles de l'aéroport et du site en-dehors de l'influence de l'aéroport. La distribution en taille des PUF était similaire à celle mesurée sur le tarmac. La taille des particules pendant les pics variait entre 10 et 20 nm. Les concentrations en carbone suie (1,0 - 1,9 µg/m³) et en PM_{2.5} (8,2 - 22,7 µg/m³) sont restées faibles. [16]

Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large International Airport, Zhu et al. (2011)

Au cours de cette étude la concentration en nombre des PUF et la distribution en taille (PUF<100nm) ont été mesurés, ainsi que le carbone suie, PM_{2.5}, CO, NO_x, COV. Les sites de mesure étaient installés sous les vents de l'aéroport : un à 140 m du point de décollage et 5 autres à différentes distances (jusqu'à 600 m du tarmac) et en amont de l'autoroute 405. Un site de mesure a aussi été installé au nord de l'aéroport dans une zone résidentielle pour mesurer la pollution de fond. Trois campagnes de mesures ont été réalisées de 5, 7 et 12 jours (été, hiver et printemps).

Les mesures montrent une concentration très élevée en nombre de PUF sur l'aéroport. La taille des particules les plus représentées correspond à 14 nm en été et 16 nm en hiver avec des concentrations moyennes de $1,4 \cdot 10^6$ particules/cm³ et $1,3 \cdot 10^6$ particules/cm³ respectivement. Les pics de PUF étaient corrélés avec les décollages des avions grâce à l'analyse de l'évolution temporelle du profil de PUF. Les données de décollage et de concentration ont été comparées pendant une période de 30 minutes. Au moment des décollages, la concentration la plus élevée en PUF de diamètre de 15 nm était de 28 000 #/cm³, soit 100 fois plus élevée que celles mesurées sans décollage (60-150 #/cm³) à 140 m du tarmac. Les pics de concentration en particules de taille 15 nm dus aux décollages correspondent aux pics

observés à 600 m de l'aéroport avec un décalage de quelques secondes. La concentration la plus élevée pendant les décollages en PUF totale a dépassé de 10^7 #/cm³.

La contribution du poids des aéronefs aux émissions de particules de diamètre de 15 nm a été également analysée au cours de cette étude. Les aéronefs ont été classés en 4 groupes selon leur MTOW⁷ (Maximum Take-Off Weight), et il a été considéré que tous avaient utilisé le même carburant. Il s'avère que les pics en particules de 15 nm sont plus élevés au moment du décollage des aéronefs ayant une MTOW plus importante (11 900 #/cm³ pour les avions les plus légers et 26 500 #/cm³ pour les plus gros). A noter que seulement 135 pics ont été analysés parmi toutes les décollages entre le 23 février et 2 mars 2006, donc l'incertitude reste assez élevée. [17]

Emissions from an International Airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind, Hudda et al. (2014)

En 2014, des mesures ont été réalisées par camion laboratoire autour de l'aéroport de Los Angeles (toujours sous les vents de l'aéroport). La campagne de mesure a duré 29 jours et en parallèle des particules, le carbone suie, le NO, le NO₂, les NOx ont également été mesurés.

Les résultats ont montré que la concentration en nombre de particules (PNC) double à 16 km de l'aéroport par rapport aux niveaux de pollution de fond, est multipliée par 5 à 8 km, et par 10 à 3 km (jusqu'à 150 000 #/cm³). La répartition spatiale des PNC élevées est alignée avec les vents dominants et avec des trajectoires.

Selon une estimation, pour avoir une concentration identique sans l'aéroport, il faudrait l'équivalent de la circulation de 280 à 790 km d'autoroute (à Los Angeles il y en a 1 500 km). [18]

Aéroport de Santa Monica, Californie, Etats-Unis

En 2008, une étude a été également réalisée sur l'aéroport de Santa Monica. Selon les résultats, l'impact de l'aéroport concernant la concentration en PUF est observé à plus de 660 m de la plateforme pour des vents en provenance de l'aéroport. La concentration a été multipliée par 10 à 100 m de l'aéroport, et par 2,5 à 660 m. La médiane des diamètres mesurés correspondait à 11 nm. [3]

Le tableau n° 5 montre une comparaison des études réalisées autour de ces aéroports.

Les résultats de ces études ont unanimement montré que les aéronefs émettent des particules ultrafines en très grande quantité. De plus, ces PUF ont un diamètre inférieur à ceux émis par des moteurs diesel.

Il est important de noter que les mesures de concentration en nombre de particules ont été souvent réalisées avec des appareils mesurant le nombre de particules de diamètre pouvant atteindre 300 nm, comme par exemple à Londres – Heathrow (7 – 300 nm) ; ainsi, le nombre de particules/cm³ est à prendre avec prudence (légère surestimation), même si celles de 10 à 20 nm constituent en général la majorité du nombre total des particules mesurés.

⁷En dessous de 50 t, entre 50 et 100 t, entre 100 et 200 t, au-dessus de 200 t

	Copenhague (2011)	Schiphol (2012)	Bruxelles (2015)	Los Angeles (2007)	Los Angeles (2011)	Los Angeles (2014)
Durée des mesures	2 * 6mois	3 mois	2 mois	3 campagnes : 10 jours 2 semaines 24 jours	3 * (+/- 1 semaine)	29 jours
Points de mesure	3 stations (1 dans l'enceinte de l'aéroport et 2 à la limite de la zone de l'aéroport)	2 sites de mesure (à 7 et à 40 km de l'aéroport)	4 stations de mesure (250 m, 750 m, 5 km, 7 km)	18 sites de 0,14 à 3,5 km	6 sites de 140 à 600 m	Camion de mesure, transect de 4*16 km, toujours sous les vents de l'aéroport
Concentration PUF #/cm³	Dans l'enceinte de l'aéroport : PN ₆₋₇₀₀ =32-38 000* Limite de l'aéroport : PN ₆₋₇₀₀ =10 et 11 000*	À 7 km de l'aéroport : PN ₄₋₄₈₀ =42 000** (poll. de fond*3) À 40 km de l'aéroport : PN ₄₋₄₈₀ +20% ** (sous le vent de l'aéroport)	À 250 et 750 m de l'aéroport : PN ₁₀₋₂₀ =69 - 74 000 (poll. de fond*3)***	A 140 m de la piste : PM ₁₀₋₁₀₀ = 532 000**, Dans les communes avoisinantes : PM ₁₀₋₁₀₀ = 20 000 – 54 000 **	A 140 m de la piste PUF totale (PN _{ND})= >10 ⁷ ****	À 3km de l'aéroport : (PN _{ND})= >100 000 (poll. de fond*10) À 8km de l'aéroport : (PN _{ND})= 75 000 (poll. de fond*5) *****
Diamètre géométrique moyen des PUF	6 à 40 nm	A 7 km : 10 à 20 nm A 40 km : 20 à 40 nm	10 à 20 nm	14 nm	14 nm (été) 16 nm (hiver)	ND
Site de mesure de comparaison	Site urbain le plus pollué et en rase campagne	Pollution de fond	Pollution de fond	Pollution de fond	Pollution de fond	Pollution de fond
Concentration sur le site de comparaison PUF #/cm³	13-16 000 et 4 000	14 100	19 600	7 000	ND	10-15 000
Observation	Pendant la nuit, sans trafic, la concentration des PUF (6-40nm) est identique dans l'aéroport et en rase campagne	La composition chimique des particules varie selon le carburant utilisé. Ex : le kérosène contient 400 mg de soufre par kg de carburant brûlé, tandis que pour le trafic routier c'est 10 mg/kg de carburant.	Corrélation entre l'heure de pointe du trafic aérien et les concentrations élevées en PUF.	Corrélation entre les décollages et les pics.	Les pics en particules de 15 nm étaient plus élevés au moment de décollages des avions ayant la MTOW la plus importante.	Selon une estimation, pour avoir une concentration identique sans l'aéroport, il faudrait l'équivalent de la circulation de 280 à 790 km d'autoroute (à Los Angeles il y en a 1 500 km).

*Moyenne 24h ** moyenne horaire ***Moyenne de la période de mesures ****Concentration maximale, mesurée pendant quelques décollages *****À 16km pollution de fond*2 ND=non disponible

TABLEAU 5 – TABLEAU RECAPITULATIF DE RESULTATS DES ETUDES AUTOUR DES AEROPORTS

Conclusions

Les études sur et autour des aéroports et sur les réacteurs d'avion ont démontré que la taille moyenne des particules ultrafines émises par les aéronefs est autour de 10-15 nm. La distribution en taille est entre 3 et 100 nm, bien que les résultats soient dépendants des appareils de mesure utilisés. Les PUF émises par les avions sont ainsi plus petites que celles émises par les engins ou véhicules diesel (10-300 nm).

Les études sur les réacteurs d'avion ont montré que le nombre et la taille des particules dépendent de la poussée moteur. Pour cette raison et à cause de sa durée, la phase du cycle LTO la plus polluante semble être la montée.

Sur les aéroports

Copenhague, Zurich, Stockholm-Årlanda et Londres-Heathrow ont réalisé des études pour mesurer la concentration des particules ultrafines sur les aéroports. Il en ressort que la concentration varie beaucoup d'un aéroport à l'autre ou même d'un poste de parking à l'autre. Les études ne sont donc pas toujours comparables, car les lieux, les appareils et la durée des mesures sont très variés. Néanmoins, pendant les heures de pointe du trafic aérien (matin et début de soirée) des pics de concentrations en PUF sont, en général, observés. La concentration moyenne varie entre 30 et 60 000 particules/cm³. Le maximum de concentration sur une ½ heure a été mesuré sur l'aéroport de Copenhague avec 500 000 particules/cm³. Il a été noté sur l'aéroport de Zurich que de fortes odeurs typiques d'échappement des aéronefs étaient corrélées avec des concentrations plus élevées en particules de taille entre 10-16 nm.

Autour des aéroports

Sur d'autres aéroports, comme Schiphol, Bruxelles, Los Angeles et Santa Monica, des études ont été réalisées pour évaluer la zone impactée par les particules ultrafines émises par l'aéroport dans son voisinage. Les particules de taille entre 10 et 20 nm dominent quand les vents viennent des aéroports. La corrélation entre les heures de pointe et les concentrations élevées a été également soulignée dans ces études. A Bruxelles, il a été estimé que la contribution maximale de l'aéroport sur les sites les plus proches de lui pouvait atteindre des valeurs entre 255 000 et 276 000 particules/cm³. De plus, quand le vent vient des aéroports, une concentration élevée de PUF peut être observée jusqu'à 40 km de la plateforme (+20% dans le cas de l'aéroport de Schiphol).

Il est ainsi très probable que les PUF de taille inférieure à 20 nm pourraient être des traceurs spécifiques des émissions aéronefs.

Perspectives

Un travail sur la certification des moteurs pour les particules ultrafines non volatiles (diamètre compris entre 10 et 100 nm) est en cours au sein du CAEP (Comité de la Protection de l'Environnement en aviation) de l'OACI. Le standard de certification devrait permettre de contrôler les émissions de PUF non volatiles. Son application est prévue pour 2020.

Une étude démarre en 2017 sur l'aéroport de Francfort concernant son impact sur les concentrations de polluants de l'air, dont les particules ultrafines. Il serait intéressant de suivre les résultats, mais également d'entreprendre une étude similaire sur un aéroport français.

Si, pour les PM₁₀ et PM_{2,5}, les mesures de concentrations sont bien harmonisées et maîtrisées à l'échelle européenne, pour les particules ultrafines, il est encore nécessaire de travailler sur les méthodes d'évaluation.⁸

⁸ The European project FORUM on Aviation and Emissions (& Environment), Work-package 1 - impact
<http://www.forum-ae.eu/workshops/impact>

Sources :

1. Aerosol Particle Number Emissions and Size Distributions: Implementation in the GAINS Model and Initial Results, Paasonen, P., Visshedjik, A., Kupiainen, K., Klimont, Z., Denier van der Gon, H. and Kulmala, M., IIASA Interim Report, December 2013
2. Health Impacts of Ultrafine Particles, Pr Lidia Morawska, Pr Michael R Moore, and Dr Zoran D Ristovski, Desktop Literature Review and Analysis, 2009, Australian Government, Department of the environment and Heritage
3. Ultrafine particles at airports, Discussion and assessment of ultrafine particles (UFP) in aviation and at airports in 2012, ACI Europe Environmental Strategy Committee, Autumn 2012
4. Daily Mortality and Fine and Ultrafine Particles in Erfut, Germany. Wichmann, H.-E., et al., Part I: Role of Particle Number and Particle Mass. Research Report 98. 2000, Health Effects Institute: Cambridge MA.
5. www.suva.ch/nanoparticules
6. Particules ultrafines et santé au travail, 1 – Caractéristiques et effets potentiels sur la santé, Olivier Witschger, Jean-François Fabriès, INRS – Hygiène et sécurité du travail – Cahier de notes documentaires – 2^e trimestre 2005-199
7. A-t-on raison de considérer que les particules atmosphériques fines et ultrafines sont dangereuses pour la santé ?, Pr. Francelyne Marano, Université Paris-Diderot, Paris 7, Pollution atmosphérique n° 195, Extrapol n° 33, décembre 2007
8. Impacts des particules atmosphériques sur la santé : aspects toxicologiques, Pr. F. Marano et al., Vol 3, n°2, Mars-Avril 2004, Environnement, Risque & Santé
9. Physical characterization of the fine particle emissions from commercial aircraft engines, Kinsey et al 2010; Atmospheric Environment; février 2010
10. La pollution de l'air dans les aéroports, Particules ultrafines, solutions, The Ecological Council – Danemark (brochure), mars 2012
11. Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands), Keuken et al., 2015; Atmospheric Environment; mars 2015
12. Particle and gaseous emissions from commercial aircraft et each stage of the LTO, Mazaheri et al., 2008, Environmental Science & Technology; février 2009
13. An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport, Mazaheri et al (2011); Atmospheric Environment; juin 2011
14. Occupational Exposure to ultrafine particles among airport employees, Lauenborg Moller et al 2014; PLOS ONE, septembre 2014
15. UFP- en BC-metingen rondom de luchthaven van Zaventem, Peters et al., 2016

16. Monitoring and modelling of ultrafine particles and black carbon at the Los Angeles International Airport; Fanning et al.; 2007
17. Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large International Airport, Zhu et al. (2011), Atmosphérique Environnement, novembre 2011
18. Emissions from an International Airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind, Hudda et al. (2014); Environmental Science & Technology ; 2014, 48

Annexe 1 – Tableau et graphique des études APEX

a) Couples avion/moteur

Table 1
Test engines and fuels for APEX 1–3.

Campaign	Airframe	Engine model ^a	Bypass ratio ^b	Engine pressure ratio ^b	Rated thrust (kN) ^b	Fuel type	Fuel sulfur (ppm) ^c	Fuel aromatics (vol%) ^c	Average ambient temperature (°C)	Average ambient relative humidity (%)
APEX	Test no.									
1	EPA 1	DC-8	CFM56-2C1	6.0	23.5	97.86	Base	409	17.5	29
	EPA 2								20	19
	NASA 1								32	6
	NASA 1a								17	24
	EPA 3						High Sulfur	1639	25	6
	NASA 2								33	6
	NASA 3								25	11
	NASA 4						High Aromatic	553	30	12
	NASA 5								20	15
2	T1	B737-700	CFM56-7B24	5.2	25.8	107.7	Fleet Fuel	132	19.7	13
	T4							412	20.3	14
	T2	B737-300	CFM56-3B1	5.1	22.4	89.41	Fleet Fuel	206	20.4	14
	T3		CFM56-3B2	5.1	24.1	98.30		352	22.7	14
3	T1	B737-300	CFM56-3B1	5.1	22.4	89.41	Fleet Fuel	700	17.4	8
	T11							400	16.8	13
	T2 & T5	Lear 25	CJ610-8ATJ	N/A	~7	13.12	Fleet Fuel	0 ^d	14.5	18
	T3 & T4	ERJ145	AE3007A1E ^e	4.8	17.8	33.7	Fleet Fuel	300	19.9	13
	T10		AE3007A1/1 ^e	4.8	17.9	34.74		200	18.6	9
	T6 & T7	A300	P&W 4158	4.6	30.7	258.0	Fleet Fuel	600	16.5	19
	T8	B757	RB211-535E4-B ^e	4.1	27.9	191.7	Fleet Fuel	300	19.4	17
	T9							300	19.1	10

^a All engines are turbofan except the CJ610-8ATJ which is a turbojet engine.

^b Civil Turbojet/Turbofan Specifications (<http://www.jet-engine.net/civttspec.html>) or International Civil Aviation Organization (ICAO) Emissions Databank Issue 15C.

^c All fuel analyses performed by outside organizations. No information available on precision/accuracy of the analytical results.

^d Questionable value as reported by NASA. Actual sulfur content should be similar to other APEX-3 tests.

^e Internally mixed engines where core and bypass flow are combined prior to discharge to the atmosphere.

b) Diamètre et débit de carburant

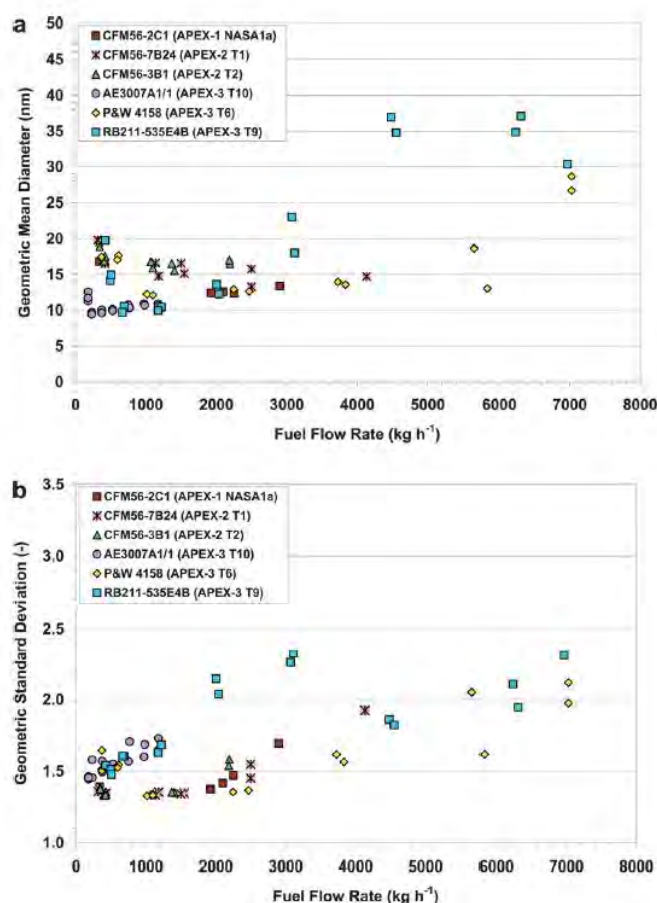


Fig. 6. Comparison of the: (a) geometric number mean particle diameter; and (b) geometric standard deviation vs. fuel flow for different engine types as a function of fuel flow rate.

Annexe 2 – Tableau de l'étude réalisée par FOCA

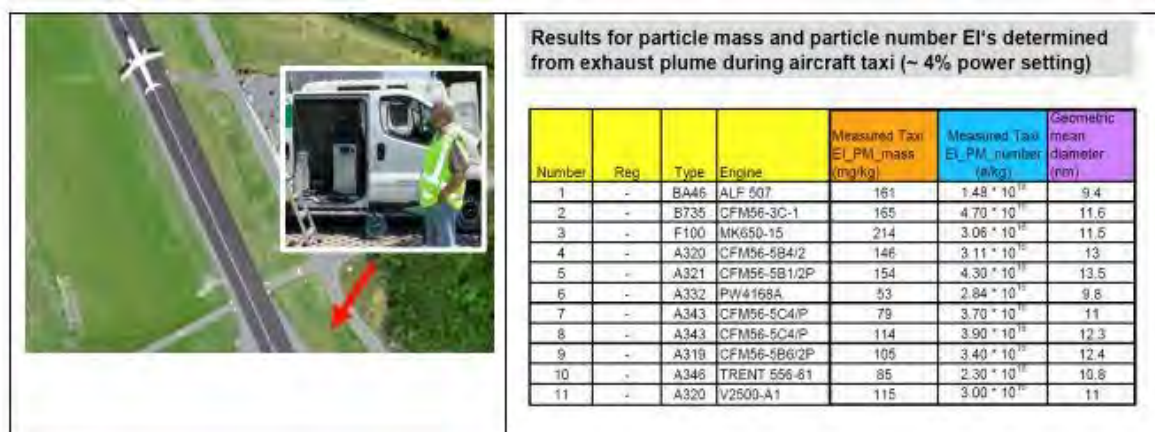


Fig 10: FOCA measurement results at Zurich airport 2008