



Qualité de l'air dans un avion de ligne

James P. Rydock
SINTEF Building & Infrastructure, Norvège

1 Introduction

Ce VIP se penche sur les bonnes pratiques et les défis en matière de conditionnement de l'environnement intérieur des cabines d'avions de transport de passagers, et de leurs implications du point de vue de la ventilation. Cet article se base en grande partie sur les résultats du projet PC5 de l'UE 'CabinAir' (voir la dernière page).

2 Ventilation de la cabine d'un avion

Dans les premiers avions commerciaux, les cabines de passagers étaient aérées avec 100 % d'air extérieur. Dans les avions plus récents, ce pourcentage est d'environ 50 %, le reste étant de l'air de cabine filtré et recyclé. Cette évolution a permis une économie de carburant ainsi qu'une amélioration supposée de l'humidité relative de l'air de cabine.

Cependant, il a été démontré qu'avec les densités de passagers particulières dans les cabines d'avions modernes, les concentrations de dioxyde de carbone dépassent les 1000 ppmv (parties par million en volume) dans certaines parties des cabines sur certains vols, ce qui a soulevé la question de savoir si la qualité de l'air et la ventilation étaient acceptables dans les cabines d'avion de ligne modernes.

Afin de percevoir la nature du défi concernant la ventilation des cabines d'avion, voici un bref aperçu de la façon dont l'air extérieur est transféré dans la cabine et conditionné pour pouvoir servir d'air de ventilation pour maintenir les passagers et l'équipage dans un espace sûr, sain et confortable. L'apport en air extérieur en vol est presque toujours prélevé au droit des compresseurs du moteur.

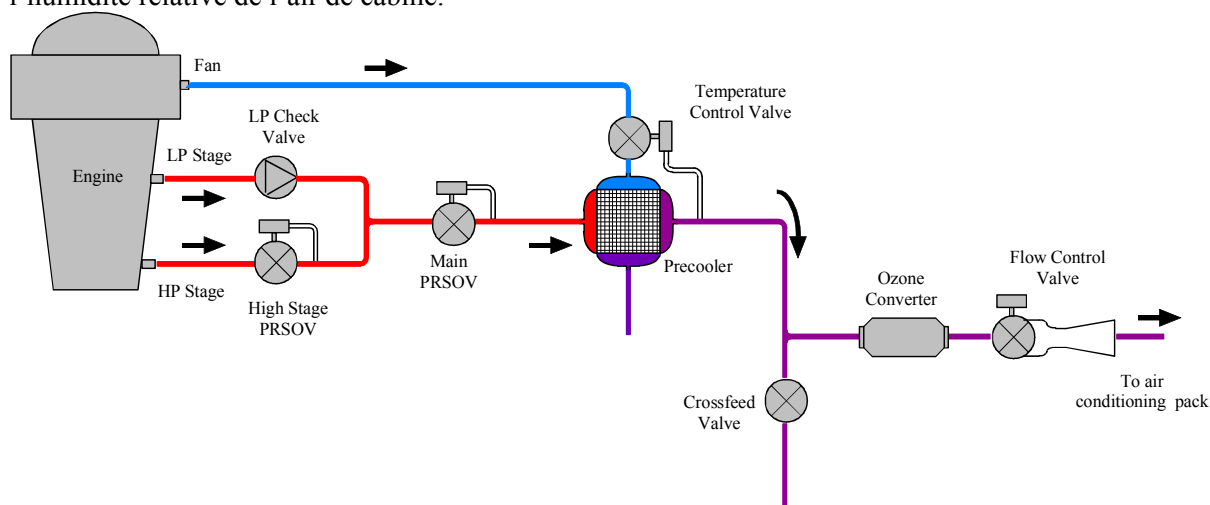


Figure 1 : Système de prélèvement typique d'un avion commercial moderne

L'air chaud comprimé par les moteurs est ensuite conditionné par le système de contrôle environnemental (ECS) et réparti dans toute la cabine. L'air prélevé provenant des compresseurs pour des services pneumatiques a un effet préjudiciable sur la performance du moteur. On tente dès lors de le réduire au maximum.

Comme les caractéristiques de fonctionnement du moteur ont tendance à varier fortement durant un vol (roulage, décollage, vol et atterrissage), la température et la pression de l'air prélevé varient tout autant. Les températures peuvent aller de 65 °C à 650 °C et les pressions peuvent se situer entre 10 et 600 psig [70~4136 kPa (pression relative)]. Dès lors, un système de conditionnement complexe est nécessaire pour permettre un flux constant de l'air de ventilation dans la cabine tout au long d'un vol.

La plupart des avions commerciaux modernes utilisent un système de changement de prélèvement comme celui illustré à la Figure 1. Lorsque la puissance du moteur est plus élevée quand l'avion décolle ou au cours de nombreuses conditions de vol, l'air comprimé est prélevé à partir du port de prélèvement sur l'étage de basse pression (LP). Dans les cas où l'étage LP suffit, la valve de régulation et d'arrêt de la pression (PRSOV) de phase haute sera fermée, ce qui est réalisé soit par voie pneumatique, soit par un régulateur électronique qui reçoit des signaux venant du FADEC (Full Authority Digital Engine Control) du moteur. Lorsque l'avion se trouve dans certaines phases de missions telles qu'un roulage au sol, un vol sur-place et certaines conditions de vol à faible vitesse, la production de l'étage LP ne suffit pas pour rencontrer les exigences du système pneumatique. Dans ces conditions, la valve de l'étage élevé s'ouvre et l'air à haute pression (HP) se mélange à l'air LP. Lorsque la pression de la gaine de distribution excède celle fournie par le port de l'étage LP, la valve de contrôle de l'étage LP se ferme, empêchant ainsi un reflux dans le moteur, et le prélèvement HP devient la seule alimentation. Dès que la puissance du moteur atteint un niveau suffisamment élevé, l'étage PRSOV élevé se ferme et le port de

prélèvement LP alimente de nouveau le système pneumatique.

Lorsque les moteurs ne tournent pas mais que l'avion est occupé, par exemple pendant l'embarquement et le débarquement quand l'avion est arrêté à une porte, l'ECS a besoin d'une autre source d'air comprimé pour fonctionner. Il peut s'agir de l'unité de puissance auxiliaire (APU) de l'avion, un petit moteur à bord conçu pour servir de système de secours en cas de défaillance du système de prélèvement, à partir d'un groupe au sol ou d'un approvisionnement central en air au sol [ref.5].

En raison des conséquences acoustiques et des impacts sur la qualité de l'air liés à l'APU et aux groupes au sol dans les aéroports, il apparaît qu'un approvisionnement en air centralisé et souterrain serait préférable [ref.4].

L'air comprimé qui arrive dans l'ECS doit être refroidi. Pour y parvenir, un moyen typique consiste à utiliser un échangeur de chaleur de pré-refroidissement, comme illustré à la Figure 2. Celui-ci ramènera la température de l'air prélevé à un niveau mieux gérable plutôt qu'au niveau requis à l'entrée de l'ECS. L'objectif consiste généralement à ramener la température de l'air à la sortie du pré-refroidisseur à un niveau inférieur au point d'éclair du carburant stocké dans les ailes.

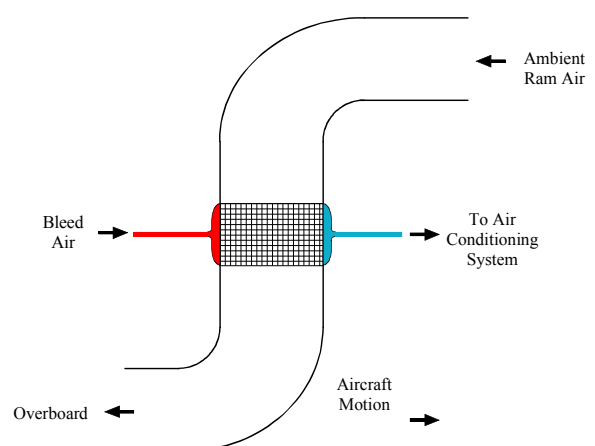


Figure 2 : Refroidissement du pré-refroidisseur par de l'air dynamique

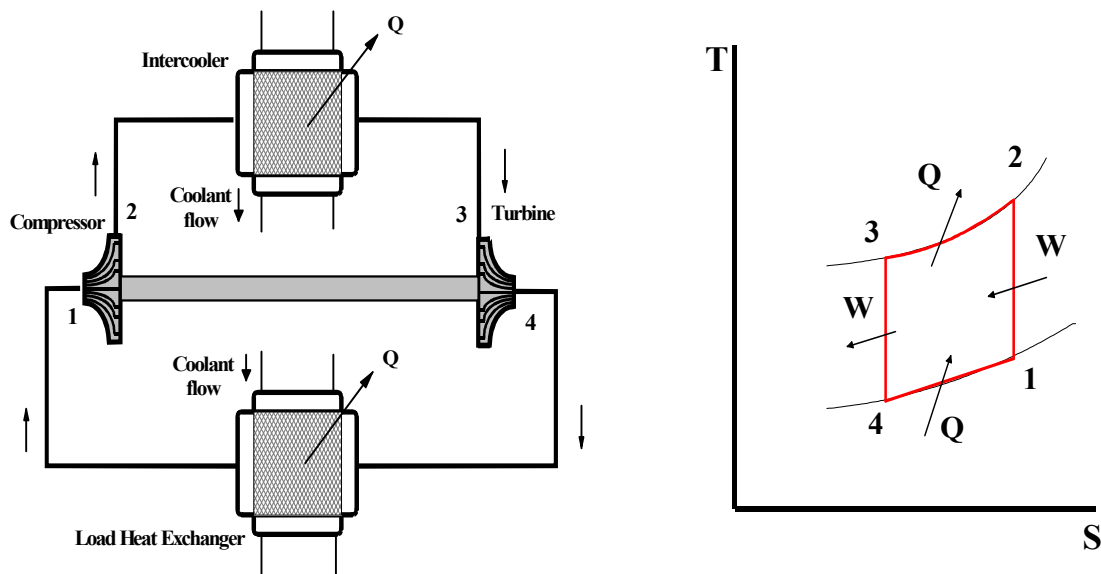


Figure 3 : Cycle de Joule ou Brayton inversé. L'air est amené dans le compresseur au point 1. Sa pression et sa température y sont toutes deux augmentées. La température élevée est non désirable et l'air passe donc par un échangeur de chaleur de refroidissement intermédiaire (points 2 à 3) avant d'arriver dans le dispositif de dilatation, qui est normalement une turbine. Le processus de dilatation (points 3 à 4) diminue encore la température jusqu'à ce que celle-ci atteigne le niveau requis. Enfin, le flux d'air froid traverse l'échangeur de chaleur de charge (points 4 à 1), éliminant ainsi la chaleur de l'espace refroidi avant que le cycle ne recommence.

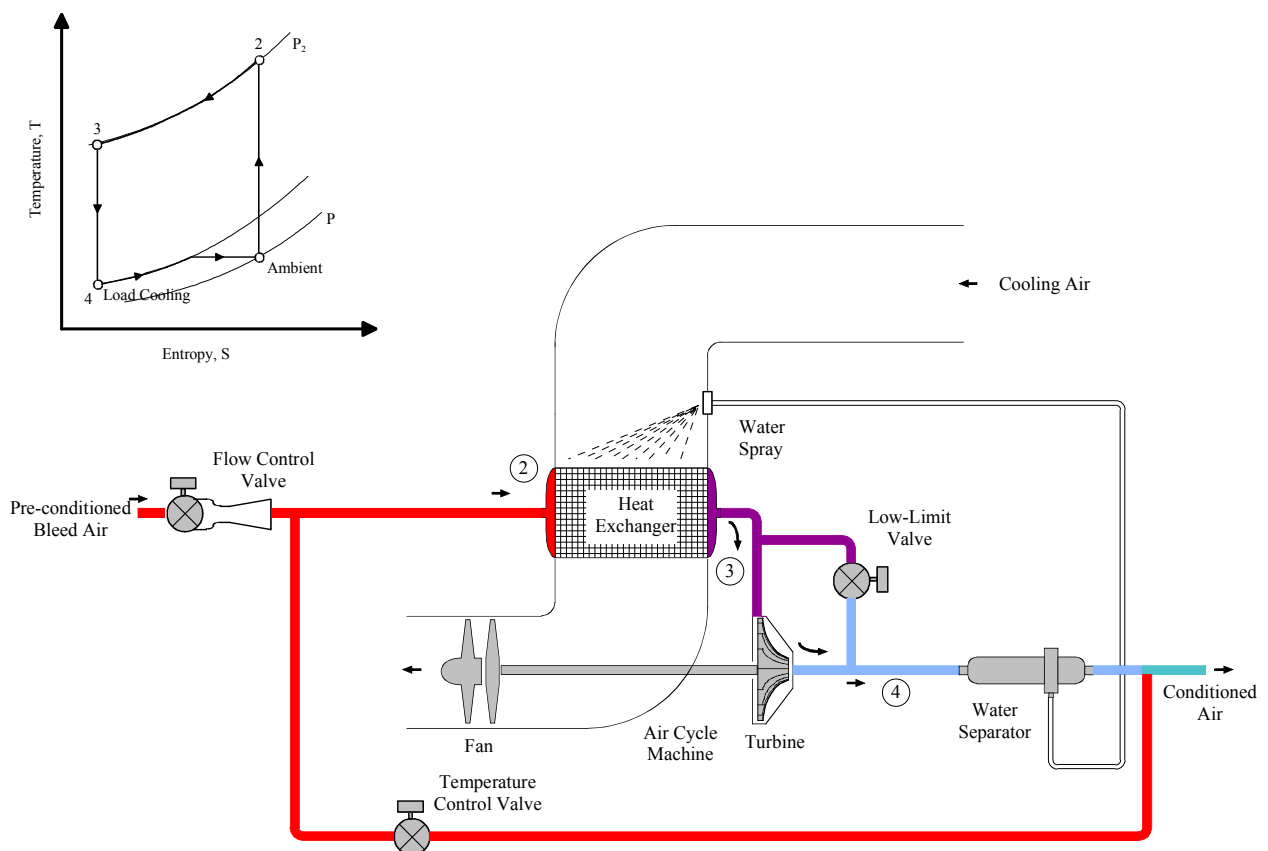


Figure 4 : Système de turbo-ventilateur simple pour le système d'air conditionné d'un avion

Presque tous les systèmes d'air conditionné des avions utilisent le cycle de l'air pour le refroidissement. Contrairement aux systèmes de compression de la vapeur qui utilisent un transfert de chaleur latent, le cycle de l'air fonctionne suivant le principe selon lequel la température d'un gaz parfait augmente ou diminue respectivement en fonction de sa compression ou de son expansion. Le cycle théorique correspondant le plus au cycle de l'air est le cycle de Joule ou Brayton inversé, représenté à la Figure 3. Il consiste en des processus de compression et d'expansion isentropiques¹ et en des processus de transfert de chaleur isobare.

Le système de cycle de l'air le plus simple est le turbo-ventilateur, représenté à la Figure 4. Dans ce système, l'air à haute pression est d'abord refroidi dans un échangeur de chaleur refroidi par air dynamique. Il est ensuite expansé dans une turbine pour que la température diminue davantage. L'énergie d'expansion sert à faire tourner un ventilateur qui aspire l'air au travers de l'échangeur de chaleur refroidi par air dynamique. Lorsqu'il quitte la turbine, l'air passe par un extracteur d'eau à basse pression évacuant toute eau libre qui se serait condensée à partir de l'air. Cette eau est vaporisée dans le circuit d'air dynamique pour profiter de son effet refroidissant.

Les systèmes à turbo-ventilateur sont utilisés dans des avions équipés de moteurs à rapport haute pression, des avions militaires subsoniques, des hélicoptères et des petits avions commerciaux, régionaux et d'affaires. Les avions commerciaux plus grands utilisent des systèmes plus complexes.

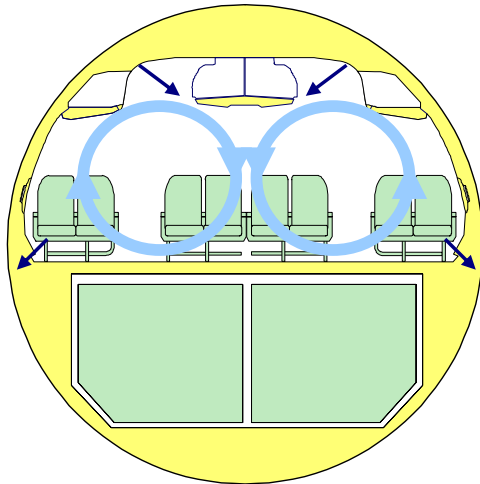
Pour la distribution de l'air conditionné, l'air entre généralement dans la cabine par le centre du plafond et près des panneaux des parois latérales, avant d'être évacué par les grilles qui se trouvent dans le bas des panneaux des parois latérales (voir Figure 5). L'objectif du système de répartition de l'air est de fournir une ventilation égale dans le sens longitudinal de la cabine, ce qui signifie que chaque mètre de la cabine reçoit la même quantité d'air de

¹ Isentropique signifie que l'entropie est constante, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un processus idéal sans perte dans lequel le système n'absorbe et ne dégage pas de chaleur. Isobare signifie à pression constante.

ventilation, qu'il s'agisse de l'avant, du milieu ou de l'arrière de la cabine. Ce principe associé à une aspiration égale de la cabine vers la zone sous le plancher, réduit les flux longitudinaux à l'intérieur de la cabine.

3 Qualité de l'air et confort thermique de la cabine d'un avion

Tous les avions commerciaux doivent être certifiés conformes aux règles de l'Administration de l'Aviation Fédérale (FAA) et/ou aux Spécifications de Certification de l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (AESA). Ces documents règlementent tous les aspects de la performance d'un avion, y compris la quantité d'air comprimé requise pour la ventilation. Les spécifications de l'AESA prévoient seulement que « *Chaque compartiment de passager et de membre d'équipage doit être ventilé et chaque compartiment de membre d'équipage doit contenir suffisamment d'air frais (mais pas moins de 0.28 m³/min ... [4.7 litres/seconde] par membre d'équipage) pour permettre aux membres de l'équipage d'effectuer leurs tâches sans manquer de confort ou éprouver de la fatigue* » [ref.1]. D'autre part, la FAA énonce que « *pour des conditions de fonctionnement normales, le système de ventilation doit être conçu pour fournir à chaque occupant un flux d'air contenant au moins 0,55 lb d'air frais (extérieur) par minute* » [ref.2]. Fonctionnellement, cela équivaut aux spécifications de l'AESA, puisque 4,7 litres pèsent environ 0,55 lb à une pression et une température typiques d'une cabine. De plus, selon l'amendement de 1996 autorisant l'utilisation de la recirculation : « *La section 25.831 (a) telle qu'amendée autorise un système de ventilation qui utilise un mélange de la quantité minimale d'air frais avec la quantité désirée d'air recyclé non contaminé par des odeurs, des particules ou des gaz* » [FAR Amdt. 25-87, 1996]. L'AESA prévoit que « *lorsque l'approvisionnement en air est complété par un système de recyclage, il doit être possible d'arrêter le système de recyclage et de... tout de même maintenir la quantité d'air frais prescrite* » [AMC 25.831(c), 2003].



- Flux d'air du haut de la cabine vers le bas
- Une bouche d'air par côté de la cabine
- La position des bouches assure une bonne ventilation des couloirs et des passagers

Figure 5 : Exemple de schéma de circulation de l'air dans une cabine à deux couloirs

D'autres amendements de la FAA (1997) et de l'AESA requièrent une quantité maximale de 5000 ppmv (équivalent du niveau de la mer) de CO₂ [ref.1,2].

Les systèmes de ventilation des cabines d'avions ont été conçus et introduits conformément à ces exigences, qu'ils dépassent généralement avec addition du flux de recyclage. Cependant, le caractère approprié de ces taux de ventilation requis fait l'objet de discussions, si bien que des sociétés comme l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) tentent de parvenir à un consensus sur de nouvelles valeurs à respecter.

4 Résultats des mesures de CabinAir

Le programme de monitoring a été mené par NBI (désormais SINTEF), BRE et TNO, en collaboration avec British Airways, KLM, Scandinavian Airlines, ainsi que Airbus et Boeing. Les 50 vols ont été effectués par huit types d'avions (Airbus A319, A321, A340, Boeing B737, B747, B757, B767, et MD11) représentant la flotte moderne actuelle. La Figure 6 donne un exemple des mesures prises à un siège sur un vol placé sous monitoring. Le gradient de température de la tête au pied était généralement bas, mais a dépassé 5 °C à environ 04:46 GMT. La plupart du temps, la concentration de CO₂ était supérieure à 1000 ppmv pour ce vol en particulier. Pour l'ensemble des vols, la concentration de CO₂ a dépassé les 1000 ppmv pendant 40 % du temps en classe business, et pendant 65 % du temps

en classe économique. Même si la concentration en dioxyde de carbone a très souvent été supérieure à 1000 ppmv tant dans la classe business que dans la classe économique sur l'ensemble des vols, les concentrations supérieures à 1500 ppmv ont été relativement peu fréquentes, et celles supérieures à 2000 ppmv ont été rares.

Pour en revenir à la Figure 6, l'humidité relative dans la cabine était de plus de 50 % au départ du vol, mais est descendue sous les 10 % à l'altitude de croisière. Ces mesures suggèrent que les conditions pour ce vol ne représentent probablement pas le niveau de confort optimal pour les occupants d'autres environnements intérieurs (comme défini par exemple dans la Ref. 3), mais il n'y avait dans ce cas-ci rien d'inquiétant au niveau de la santé et de la sécurité des passagers ou des membres d'équipage. Cependant, il convient de souligner que la fonction première du système de contrôle environnemental est de préserver la vie des passagers et de l'équipage dans un environnement inhabitable. Le contrôle du confort est important, mais il s'agit néanmoins d'une préoccupation secondaire.

Des mesures précises des conditions environnementales des cabines à altitude de croisière ont montré un certain degré de variation tout au long de la cabine, particulièrement dans les cabines les plus grandes, ce qui était à prévoir. Le Tableau 1 présente des mesures prises dans l'ensemble de la cabine à altitude de croisière, sur un vol B747.

Tableau 1: Répartition longitudinale des conditions de cabine à altitude de croisière

Rangée	T_a (°C)	HR (%)	CO ₂ (ppmv)	v_a (m/s)
14	23.5	4.6	967	0.17
20	25.8	4.5	811	0.16
34	24.6	7.7	1123	0.30
46	26.6	8.7	1306	0.33
63	25.8	4.7	985	0.17

T_a est la température de l'air, HR est l'humidité relative et v_a est la vitesse de l'air dans le couloir. Nous pouvons voir que c'est à la rangée 46, en classe économique, que la température et la concentration de CO₂ sont les plus élevées. D'autre part, cette classe, qui présentait la plus grande densité de passagers, contenait également moins d'air sec.

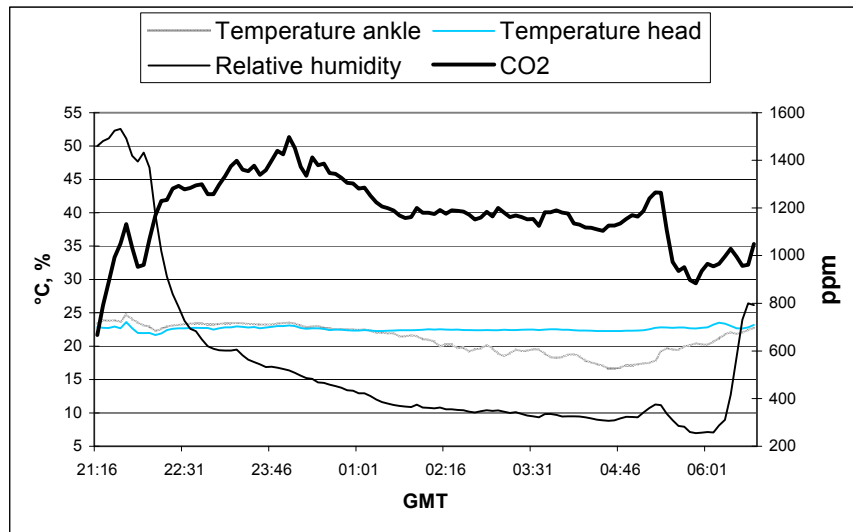


Figure 6 : Température d'une porte à l'autre et de la tête au pied, humidité relative et concentration de CO₂ à un siège, sur un vol typique placé sous monitoring.

Tableau 2: Résumé des résultats du questionnaire sur la perception de l'environnement de la cabine par son équipage

Question	Extrême (cote 1)	Score moyen	Extrême (cote 7)	N
Température	Trop chaud	3.78	Trop froid	292
Déplacement de l'air	Trop immobile	3.75	Trop de courants d'air à hauteur de la tête	288
Déplacement de l'air	Trop immobile	3.76	Trop de courants d'air à hauteur des pieds	278
Qualité de l'air	Sec	2.07	Humide	296
Contrôle de la température	Aucun	3.40	Contrôle maximal	293
Contrôle de la ventilation	Aucun	2.07	Contrôle maximal	292
Température	Stable	3.95	Varie pendant le vol	288
Température	Satisfaisante	3.75	Insatisfaisante	282
Qualité de l'air	Frais	4.80	Etouffant	287
Qualité de l'air	Inodore	4.04	Mauvaise odeur	289
Qualité de l'air	Satisfaisante	4.40	Instatisfaisante	291
Eclairage	Satisfaisant	2.61	Insatisfaisant	298
Bruit	Satisfaisant	4.15	Insatisfaisant	299
Confort général	Satisfaisant	3.73	Insatisfaisant	297

5 Résultats du questionnaire de CabinAir

Les questionnaires ont seulement été remplis par les membres d'équipage de cabine pendant les vols placés sous monitoring. Initialement, l'intention était de faire remplir également le questionnaire par les passagers, mais cela s'est avéré impossible à la suite du 11 septembre, en raison de contraintes économiques dans le chef des compagnies aériennes participantes. Les vols placés sous monitoring ont été effectués durant l'hiver et le printemps 2002.

Le questionnaire portait sur les conditions environnementales. Il s'agissait entre autres d'évaluations de la température, du déplacement de l'air, de la qualité de l'air, de l'éclairage, du bruit et du confort général.

De plus, on posait des questions sur le degré de contrôle perçu de la température et de la ventilation dans la cabine. Au total, 309 questionnaires ont été renvoyés. Le Tableau 2 donne un résumé des résultats. Il s'agissait de répondre aux questions sur une échelle de 1 à 7, les extrêmes pour chaque question étant reprises dans le tableau. Nous pouvons voir que, à l'exception d'une impression d'air sec, les équipages de cabine se sont montrés très neutres dans leur évaluation de la température, du déplacement de l'air, de la qualité de l'air et du confort général dans la cabine des passagers. L'éclairage a obtenu un score positif, ce qui est intéressant. Par ailleurs, le « Contrôle de la ventilation » a obtenu un score médiocre, ce qui n'est pas surprenant étant donné que la ventilation de la cabine est contrôlée automatiquement sur la base des réglages effectués par l'équipage du vol.

6 Implications des résultats du programme de monitoring CabinAir

L'analyse ci-dessus montre que le système de ventilation d'un avion commercial moderne est extrêmement complexe. D'autre part, cette complexité ne va pas jusqu'à fournir un degré appréciable de contrôle local des flux d'air et des températures (excepté pour des ventilations individuelles, en option dans la plupart des avions) dans la cabine des passagers. D'autres études ont démontré qu'un contrôle local

permettait aux personnes de se sentir mieux dans leur environnement intérieur. Les moyens de parvenir à un tel contrôle local de la ventilation de cabine constituent un important résultat propre aux travaux de CabinAir.

Le résultat considéré comme le plus provocant du programme de monitoring consiste probablement à dire que, même si la concentration en dioxyde de carbone (généré par des bio effluents) dans la cabine ou dans des zones de la cabine sur les vols placés sous monitoring dépasse souvent les 1000 ppmv, les membres de l'équipage ayant répondu au questionnaire ne se sont pas montrés insatisfaits de leur environnement de travail.

7 Références

- [1] European Aviation Safety Agency (EASA), *Certification Specifications For Large Aeroplanes CS 25, Book 1 – Airworthiness Code; §25.831 'Ventilation', 2003*
<http://www.easa.eu.int/>
- [2] Federal Aviation Administration (FAA), *Federal Aviation Regulations (FAR), §25.831 'Ventilation', last amended 1997*
<http://www.faa.gov/>
- [3] ISO 7730:1994: *Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, International Organization for Standardization, Geneva.
- [4] Lannaud, Par Jean ; 'Aéroports : Préconditionnement d'air des avions au sol', *Chauffage Ventilation Conditionnement d'Air (CVC) no. 830/831, sept./oct. 2004,*
<http://www.aicvf.com/>
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Auxiliary_power_unit
- [6] <http://projects.bre.co.uk/envdiv/cabinair/>

Le projet CabinAir [ref.6] était un projet de recherche de 3 ans du 5^e Programme cadre de l'UE. Ce projet a été dirigé par BRE au Royaume-Uni, avec des membres de consortium émanant de cinq instituts de recherche, trois compagnies aériennes, deux constructeurs d'avions, deux constructeurs de pièces et de systèmes d'avions et une autorité d'aviation civile. Le projet a été divisé en cinq phases de travaux, la première étant centrée sur un programme de monitoring qui consistait en des mesures et des questionnaires sur 50 vols de compagnies aériennes commerciales. L'objectif général de cette première phase de travaux (PT 1) était d'identifier les bonnes pratiques actuelles, ainsi que les domaines posant problème, afin d'en informer les développements dans les phases de travaux ultérieures. Les phases de travaux 2-4 impliquaient des progrès techniques dans les systèmes de contrôle environnemental (ECS), les systèmes de filtration et les systèmes de distribution de l'air. La 5^e phase des travaux consistait à élaborer des critères européens prénormatifs en matière de qualité de l'air et de confort dans les cabines d'avions. Le NBI (désormais SINTEF) en Norvège était chargé d'achever l'identification des bonnes pratiques actuelles afin de s'assurer que le programme de monitoring était réalisé correctement. Cet article se concentre sur les résultats de la PT 1 et leurs implications.

Version originale en anglais

Traduction française réalisée avec le soutien de :



L'« **Air Infiltration and Ventilation Centre** » (**AIVC**) a été créé dans le cadre de l'Agence internationale de l'Énergie et est financé par les sept pays suivants : Belgique, République Tchèque, France, Grèce, Pays-Bas, Norvège et États-Unis d'Amérique.

L'Air Infiltration and Ventilation Centre apporte son soutien technique à la recherche théorique et appliquée sur l'infiltration d'air et la ventilation. Il ambitionne de promouvoir la compréhension de la complexité de la circulation de l'air dans les bâtiments. Il entend également faire progresser l'application efficace de mesures d'économie d'énergie dès la conception des nouveaux bâtiments et l'amélioration du parc immobilier existant.