

ATA 21

LE CONDITIONNEMENT D'AIR

Climatisation • Ventilation • Pressurisation • Ditching

Anti-sèche de révision — basé sur le Livret CFA 1316

Document de révision à utiliser en complément du cours, pas en remplacement.

Sommaire

- 1. Généralités
- 2. La climatisation
- 3. La ventilation
- 4. La pressurisation — principe
- 5. Régulation du système — architecture générale
- 6. Alimentation pneumatique
- 7. Le Pack — principe et fonctionnement
- 8. Régulation de la température (Mixer Unit)
- 9. Alimentation / distribution
- 10. Recyclage de l'air
- 11. Les soutes (cargo)
- 12. Ventilation cockpit / équipements / galley / toilettes / avionique
- 13. Amélioration du rendement
- 14. Ventilation en mode dégradé (packs inopérants)
- 15. Ventilation des zones non pressurisées
- 16. La pressurisation
- 17. Le Ditching (amerrissage forcé)
- 18. La ventilation batterie
- Annexe — Chiffres clés à retenir

1. Généralités

Les 3 fonctions du système de conditionnement d'air

Fonction	Rôle	Catégorie
Climatisation	Assure une température viable en cabine, dans toutes les phases	CONFORT
Ventilation	Assure le renouvellement constant de l'air en cabine	VIE
Pressurisation	Maintien d'une pression atmosphérique cabine suffisante en altitude	VIE

Le conditionnement d'air et la pressurisation ont permis l'essor de l'aviation commerciale de masse : c'est une avancée technique aussi importante que d'autres révolutions des années 1950 (informatique, énergie nucléaire...). Ce système remplit une fonction de confort, mais surtout une fonction de survie en altitude.

Fonction de confort en cabine (climatisation)

- Température cabine régulée entre 18°C et 25°C
- Un passager dégage entre 75 et 150 Watt (à prendre en compte dans le calcul thermique)
- Distribution collective ET individuelle
- Régulation hygrométrique
- Temperature control + Cooling / Heating

Fonction maintien de la vie

Ventilation	Pressurisation
Renouvellement de l'air : apport O ₂ , évacuation CO ₂ , évacuation odeurs. Taux : 500 g/mn/passager	Maintien altitude cabine : ≈750 hPa soit ≈2500 m. Limitation Delta P : ≈8 psi. Gestion du vario cabine.

Les zones de l'avion

- Aircraft cabin — zone pressurisée principale, avec la Cabin Pressure Regulating Valve en sortie
- FWD Cargo, AFT Cargo, Bulk Cargo — soutes, pressurisées
- Avionics compartment — compartiment électronique, ventilé
- Air conditioning bay — zone NON pressurisée sous le plancher (ventilation par prise NACA)

2. La climatisation

- À l'altitude de croisière (~10 000 m), température extérieure ≈ -50°C
- Au sol, la température oscille entre -30°C et +50°C

- Le conditionnement d'air maintient une température viable en cabine dans tous les cas

Principe de la chaîne

- Prélèvement d'air chaud moteur (bleed air, ATA 36)
- Passage dans un échangeur thermique, refroidi par l'air extérieur
- Air envoyé vers la cabine

Schéma : Collecteur pneumatique → Échangeur thermique (refroidi par air extérieur) → Vers la cabine

3. La ventilation

- Débit de référence : 400 l/min/personne
- Apport extérieur d'air conditionné en entrée de cabine
- Expulsion pour renouvellement en sortie de cabine

Enjeu de conception : obtenir un bon rendement de distribution/renouvellement pour limiter la consommation en carburant (le prélèvement moteur est coûteux en énergie).

4. La pressurisation — principe

BLEED + PACK VALVE + OUTFLOW VALVE = AIR PRESSURISÉ UTILISABLE

L'air pressurisé provient du prélèvement moteur (Bleed), passe par la Pack Valve pour entrer en cabine ; la pression cabine est régulée en sortie par l'Outflow Valve, qui contrôle le débit de fuite.

Vue d'ensemble des solutions techniques

Bloc	Composition	Fonction
Pneumatique	Haute pression / haute température (45-60 PSI / 150-200°C) + échangeur AIR/AIR + ACM	Pressurisation air conditionné
Recyclage	Mélange air neuf / air recyclé cabine	Rendement (économie de prélèvement)
Outflow	Vanne de fuite régulée (outflow valve)	Renouvellement + contrôle pressurisation

5. Régulation du système — architecture générale

Le système est piloté par l'Air Conditioning System Controller (ACSC), qui assure :

- Temperature regulation
- Flow control and monitoring

Blocs fonctionnels

Bloc	Contenu / rôle
Servitudes — Distribution	Ventilation Controller (VC)
Servitudes — Alimentation	Pack Controller (PC)
System drive	ACSC (Air Conditioning System Controller)
Monitoring	ECAM
Cockpit panel / Commandes	Panneau Air Cond au poste
Cabine FAP	Interface de commande cabine (FAP)
Contrôle programmé	System report / test
Feedback probes	Sondes de température/altitude cabine (ex : CPC1)
Systèmes avion	Environnement interne/externe (structure avion)

6. Alimentation pneumatique

Sources d'air

- Prélèvement moteur (bleed engine)
- APU
- Compresseur électrique (ex. Cabin Air Compressors — B787 CAC's, pas de bleed moteur classique)
- Pneumatic ground cart / Air conditioning ground cart (au sol)

Chaîne de traitement

- Traitement de l'ozone (catalyseur Ozone O₃ → Oxygène O₂) avant le Pack
- Pack (transformation air chaud haute pression → air froid basse pression)
- Mixer unit (mélange air chaud/froid, alimente FWD, Flight Deck, etc. via vannes trim air)

7. Le Pack — principe et fonctionnement

Principe de base : le cycle vapeur (cycle à air / Bootstrap)

Le pack fonctionne selon un cycle machine à air, utilisant une turbine, un compresseur (booster) et un fan, montés sur un même arbre.

Fonctionnement (pack simple cycle)

- Pack air intake : entrée d'air
- Secondary heat exchanger puis Primary heat exchanger : refroidissement de l'air chaud par l'air du fan
- Passage Turbine / Compressor / Fan (même arbre)
- Pack air outlet : sortie d'air froid vers la cabine

Pack double cycle

Version plus performante : Turbine 1 + Turbine 2 + Compressor montés sur le même arbre, avec deux échangeurs (Secondary puis Primary Exchanger) et un Fan pour l'air de refroidissement, extrait via une entrée dédiée.

Indication / contrôle Pack (poste de pilotage)

- ACSC : Temperature Regulation + Flow Control and Monitoring, via Lane 1 / Lane 2 (interlane)
- Pack Controller (PC)
- Panneau cockpit : sélecteurs PACK FLOW (LO/NORM/HI), COCKPIT (cold/hot), CABIN (cold/hot), PACK 1/PACK 2 (FAULT/OFF)
- Hot Air 1 / Hot Air 2, ENG BLEED 1-2 / 3-4, APU BLEED, X BLEED (AUTO/OPEN/CLOSE)
- ECAM page BLEED : pression (PSI) et température (°C) par prise HP/IP, RAM AIR, TAT/SAT

Composants du circuit pack

- Primary heat exchanger / Secondary heat exchanger
- Turbine, Compressor, Fan
- Water separator (extraction de l'humidité de l'air comprimé refroidi)
- Temperature controller
- Flow control valve

8. Régulation de la température (Mixer Unit)

L'air froid provenant des packs est mélangé à de l'air chaud pour faire de l'air tiède (« détrône l'inventeur de l'eau tiède »).

Le principe de contrôle est d'une grande complexité : chaque zone reçoit un mélange dosé d'air froid (issu des packs, via le Mixer Unit) et d'air chaud (prélevé directement sur le Bleed system, via une Trim Air Valve), afin d'obtenir la température cible de la zone.

Détail du contrôle

- ACSC : Temperature Regulation + Flow Control and Monitoring
- CAB PROBE et SUPL PROBE : sondes de température cabine
- Trim Air Valve : une par zone (CKPT, FWD, MID, AFT...), module l'apport d'air chaud
- Trim Air Pressure Regulating Valve (PRV) : régule la pression de la ligne trim air
- Pack Flow Regulation Valve : régule le débit d'air froid sortant de chaque pack
- Mixer Unit : point de mélange central air froid (packs) / air chaud (trim air)

9. Alimentation / distribution

- Il faut au minimum un circuit bleed pour alimenter le système
- Pack 1 est dédié au cockpit
- 1 pack minimum doit fonctionner pour assurer ventilation/pressurisation
- Bleed 1 (moteur 1) et Bleed 2 (moteur 2) alimentent respectivement Pack 1 et Pack 2

- Panneau AIR COND poste : ENG 1/2 BLEED, APU BLEED, X BLEED AUTO, PACK 1/2, RAM AIR

Distribution en cabine

- Commande de température distribuée par zone : CKPT — FWD — MID — AFT (+ avionics)
- Distribution depuis le plafond (par zones AREA 1 à 6)
- Débit : 400 l/min/personne
- Évacuation par le pont inférieur : grilles latérales au plancher → OUT FLOW

Distribution cockpit / passagers

Alimentation cabine	Alimentation cockpit
Un circuit par zone. Air provenant des Pack 1 et Pack 2. Buses collectives fixes (plafond) + buses individuelles (au-dessus des sièges).	Circuit dédié dans le Mixer, alimenté par le PACK 1 uniquement. Multiples buses de distribution fixes et orientables.

10. Recyclage de l'air

Le recyclage améliore le rendement énergétique en réutilisant une partie de l'air cabine.

- L'air cabine circule vers le bas du fuselage, entre le fuselage et la cloison cargo
- Il est réinjecté dans le Mixer Unit en passant par des filtres (Recirculation Filters)
- Commandé par le Ventilation Controller (VC), via l'interrupteur CAB FANS (panneau VENTILATION)
- Capteur de pression : envoie un signal au CMC (Central Maintenance Computer)
- Le cockpit n'est PAS alimenté en air recyclé (air neuf uniquement)
- Valve d'isolation : se ferme si 2 packs OFF + 1 fan OFF
- Recirc fans (x2), Recirc valves — reliés au Ventilation Controller

11. Les soutes (cargo)

- Extraction VLV (Extraction Valve) et Inlet VLV + Blower par soute
- Isolation Valves : Inlet Isolation Valves / Outlet Isolation Valves
- Extraction Fan pour l'extraction d'air de la soute FWD Cargo
- Panneau CARGO AIR COND : Isol Valves (FWD / AFT / BULK), Cooling (OFF ↔ MAX), Hot Air
- Capteurs : Temp Sensor, Upper Duct Temp Sensor, Lower Duct Temp Sensor
- Alimentation : Cold Air Valve (depuis Pack 2), Trim Air Valve (air chaud depuis Trim Air PRV 1)
- (FWD/AFT) Cargo Ventilation Controller (VC) dédié

12. Ventilation cockpit / équipements / galley / toilettes / avionique

Cockpit, équipements, galley, toilettes

- Utilisation de l'air recyclé pour l'avionique (dérivation en amont du Mixer Unit)
- Galley et toilettes ventilées via un circuit d'extraction dédié

Ventilation galley et toilettes

- Air Cond ↔ Ventilation Controller, fonctionnant en séquence (Lane 1 / Lane 2)
- Galley/Toilet Extract : extraction par Blower fan (au sol / GROUND) ou par Delta P vacuum (en vol / FLIGHT)
- Extraction fan dédié (G&T Extraction Fan), Safety switch, Differential Pressure Switch
- 1 humidificateur/extracteur par zone (répartis le long de la cabine)

Ventilation avionique

- Skin exchanger : refroidissement par la peau de l'avion, utilisé en vol
- Ventilation forcée au sol : soufflage direct dans le compartiment avionique
- Avionics Equipment Ventilation Computer (AEVC) pilote le système
- Système de fluide frigorigène au sol (GRU) : évaporateur, compresseur scroll, condenseur, skin valve, détendeur calibré, filtre déshydrateur
- Panneau cockpit VENTILATION : AVNCS SMOKE, EXTRACT (FAULT/OVRD), GND COOL (FAULT/OFF), CAB FANS

Ventilation avionique au sol — logiques

Condition	Mode de ventilation
Pack ON	Outlet open only (recirculation via mixer unit)
Pack OFF + T° extérieure < 9°C	Skin exchanger (via OVBD)
ENG & Pack OFF (2 min)	Ventilation forcée au sol

Ventilation Crew Rest (ex. A380)

- Ventilation commandée automatiquement
- Système d'évacuation dédié pour chaque compartiment (FCRC, CCRC bas et haut pont)
- Contrôleurs dédiés : FCRC / LD-CCRC / UD-CCRC (vent., temp. control & monitoring, humidification)
- Alimentation en air : Mixed Air (Mixer Unit) + Trim Air ; extraction via Fresh/Recirculated Air Distribution

13. Amélioration du rendement

Outlet Heater (réchauffeur de sortie)

- Résistance placée en sortie de conduite cabine (Air Outlet), répartie dans la cabine
- Deux types : Panel Type et Duct Type
- Commandé par des contrôleurs spécifiques, reliés à l'ACSC (Temperature Regulation / Flow Control)
- Bénéfices : optimise la consommation énergétique et permet un contrôle de température par zone plus fin (moins besoin de prélever de l'air chaud sur le moteur)

Régulation hygrométrique — Humidificateur

- Participe au confort passager (sensation de chaleur/froid liée à l'hygrométrie)
- Optimise la consommation énergétique (gestion de la température ressentie)
- 1 humidificateur par zone

- Composants : Water Spray Nozzles, GlasDek Pad, Relative Humidity Sensor, Duct Temp Sensor, Water Pulse/Bypass/Shut off Valve

Graphique confort : plus l'humidité de l'air est élevée, plus la sensation de chaleur pour une même température est forte (ligne de confort maximal).

Régulation hygrométrique — Déshumidificateur

- Préviend la condensation dégagée par les passagers (au niveau des parois/structure)
- Participe à l'optimisation du rendement du système de recyclage
- Répartis dans la cabine

14. Ventilation en mode dégradé (packs inopérants)

- En dessous de 10 000 ft, possibilité d'ouvrir le RAM AIR (½ ouverte) pour ventiler la cabine
- Conditions logiques : P < 1 PSI ET Ditching OFF
- Circuit : RAM AIR → Skin check valve → Emergency RAM AIR inlet check valve → cabine
- Actuateur dédié : Emergency RAM Air Inlet Actuator
- En cas de pack(s) INOP : Trim Air Valve et Hot Air Valve isolées ; alimentation via RAM AIR uniquement

15. Ventilation des zones non pressurisées

- Les packs sont généralement situés sous le caisson central (zone non pressurisée)
- Il faut les ventiler pour ne pas chauffer le carburant (packs proches des réservoirs voilure)
- Ventilation en vol assurée par une prise NACA
- Au sol, avion à l'arrêt : un turbofan est mis en fonctionnement si les packs fonctionnent
- Composants : Turbofan Air Inlet, Turbofan Supply Valve, Check Valve, Flow Control Valve (FCV1/FCV2), Air Conditioning Bay, Piccolo tube

16. La pressurisation

Rappels physiologiques

- L'atmosphère contient 21% d'oxygène, aussi bien à 0 m qu'à 10 000 m
- Mais la pression (donc la quantité absolue d'oxygène) diminue avec l'altitude
- Au niveau de la mer : pression suffisante
- 2000 à 4000 m : certaines personnes ont du mal à respirer
- 6000 m : perte de connaissance rapide, puis la mort
- 7500 m : limite poétiquement appelée « zone de mort »
- Au-delà : domaine de l'aviation très haute altitude / spatial (autre problématique)

Objectifs de la pressurisation

- L'altitude cabine normale en vol est d'environ 2400 m (≈8000 ft)
- Avion « carbone » (composite) : cabine pressurisée à une altitude équivalente plus basse, ≈1800 m, car le fuselage composite tolère mieux les cycles de delta P

Les 3 modes de pressurisation

Mode	Principe
AUTO	Variation du taux de montée cabine en fonction de l'altitude de croisière programmée
SEMI-AUTO	Pressurisation en fonction de l'altitude cabine programmée manuellement
MANUEL	Fonction secours, commandée directement par le pilote

La variation de la pression cabine est contrôlée en fonction de la phase de vol (Take-off, Climb, Cruise, Descent, Ground).

Régulation — 3 paramètres contrôlés

- Pressure [altitude cabine]
- Cabin Vertical Speed variation (taux de montée/descente cabine)
- Delta P [in/out] : ne doit pas dépasser delta P max $\approx 8,3$ PSI (≈ 8 psi environ)

Profil type de pressurisation vs profil de vol

Phase	Delta P
Take-off	$\approx 0,1$ PSI (≈ 7 hPa)
Climb	Montée progressive jusqu'à la valeur de croisière
Cruise	≈ 7 PSI ($\approx 490,6$ hPa) — exemple FL360 / cabine 2000 m (6500 ft)
Descent	Réduction du delta P (palier ~ 1 min avant atterrissage)
Ground	$\approx 0,1$ PSI

Le circuit de pressurisation a trois fonctions

- Réguler la pression dans la cabine à une valeur supérieure ou égale à celle existante à 2 500 m (8 000 ft)
- Réguler la variation de pression : taux de montée maxi 600 ft/min, taux de descente maxi 400 ft/min
- Limiter la pression différentielle (ΔP) entre la cabine et l'extérieur

Contrôle et monitoring (cockpit)

- Panneau CABIN PRESS : VALVE SEL (MAN FWD/BOTH/AFT), MODE SEL (AUTO/MAN, FAULT), LDG ELEV (AUTO / manuel), DITCHING
- ECAM CAB PRESS : DELTA P (PSI), V/S (ft/min), CAB ALT (ft), LDG ELEV, GND COOL, VENT EXTRACT, SAFETY, PACK 1/2
- Alarme si l'altitude cabine dépasse $\sim 10\,000$ ft

Motorisation de l'Outflow Valve

Mode	Motorisation
Mode Auto Système 1	Moteur AC (courant alternatif)
Mode Manuel ou Semi-Auto	Moteur DC (courant continu)
Mode Auto Système 2	Moteur AC (courant alternatif)

- Outflow Valve commandée pour réguler le taux de fuite de l'air cabine
- Commandée automatiquement par défaut, commande manuelle en secours

Régulation — architecture calculateurs

- CPC 1 / CPC 2 (Cabin Pressure Controller) calculent la Cabin Altitude à partir des données FMGES (LFE, Time to Climb, QNH at landing, remaining time of arrival)
- ADIRS fournit Static Pressure et QNH at landing
- Chaque CPC pilote un système d'outflow valve (SYS 1 / MAN SYS / SYS 2, avant et arrière)

Sécurités de la pressurisation

- Negative Press Relief Valve : prévient une Delta P négative (dépression cabine anormale)
- Safety valves (fonctionnement pneumatique automatique) au niveau de la ligne de flottaison — protection ultime indépendante des CPC

17. Le Ditching (amerrissage forcé)

- En cas d'amerrissage, la fonction Ditching referme les ouvertures : Outflow valve, Pack RAM AIR, Ventilation avionique
- Cela permet à l'avion de maintenir une flottabilité durant l'évacuation de l'appareil
- Activation via le sélecteur DITCHING sur le panneau CABIN PRESS

18. La ventilation batterie

Point évoqué dans le support (batterie et son emplacement en pointe avant) : les batteries (ex. Li-ion) nécessitent une ventilation/évacuation dédiée en cas de surchauffe/emballlement thermique — à rattacher aux systèmes de détection/protection incendie/fumée (ATA 26) selon l'appareil.

Annexe — Chiffres clés à retenir

Paramètre	Valeur
Température cabine régulée	18°C à 25°C
Dégagement thermique passager	75 à 150 Watt
Débit ventilation	400 l/min/personne ; 500 g/mn/passager (renouvellement)
Altitude cabine normale en croisière	≈2400 m (≈8000 ft) ; avion composite ≈1800 m
Delta P maxi	≈8 à 8,3 PSI
Delta P croisière (exemple)	7 PSI (≈490,6 hPa)
Taux de montée cabine maxi	600 ft/min
Taux de descente cabine maxi	400 ft/min
Seuil alarme altitude cabine	≈10 000 ft
Ouverture RAM AIR secours	En dessous de 10 000 ft, P < 1 PSI, Ditching OFF
Zone de mort (physiologie)	≈7500 m
Pression pneumatique bleed	45-60 PSI / 150-200°C