

Exercices chapitre 6

Version du 31 mars 2015

CC-BY-SA Olivier Cleynen – thermodynamique.ninja

Les propriétés de l'eau sont toutes tabulées dans les abaques n°1, 2 et 3.

L'air est considéré comme un gaz parfait.

$$c_{v(\text{air})} = 718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad R_{\text{air}} = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_{p(\text{air})} = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad \gamma_{\text{air}} = 1,4$$

Nous admettons que pour une évolution adiabatique réversible (sans apport de chaleur et infiniment lente) les propriétés de l'air suivent les trois relations suivantes :

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right) = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} \quad (4/36)$$

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right) = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4/37)$$

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} \quad (4/38)$$

6.1 Efficacité d'un moteur

Le moteur Diesel d'une excavatrice a une efficacité de 40 % et développe une puissance continue de 80 ch (c'est-à-dire 60 kW). Il est alimenté par du carburant de capacité calorifique 35 MJ kg⁻¹.

1. Quelle est la consommation horaire de carburant de la machine ?
2. Quelle est la puissance qu'elle rejette sous forme de chaleur dans le conduit d'échappement ?

6.2 Efficacité d'un réfrigérateur

Un réfrigérateur dont le COP est de 1,2 doit extraire 100 kJ d'un aliment placé dans la chambre froide. Combien d'énergie électrique doit-il consommer pour cela ? Quelle quantité de chaleur aura-t-il rejetée à la fin du refroidissement ?

6.3 Efficacité d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur dont le COP est de 3,1 fournit une puissance de 4000 W à une habitation. Quelle est la puissance électrique consommée ? Quelle est la puissance absorbée à l'atmosphère ?

6.4 Thermodynamique de soirée

Un groupe d'étudiants assoiffés par un cours de thermodynamique interminable prépare le week-end en plaçant au réfrigérateur dix packs de six bouteilles contenant une boisson à base d'eau minérale (figure 6.19).

Une expérience effectuée sur une bouteille montre qu'elle est constituée de 172 g de verre de capacité calorifique massique 0,75 kJ kg⁻¹ K⁻¹, et qu'elle contient 25 cL de liquide de capacité 4,2 kJ kg⁻¹ K⁻¹.

Lorsqu'ils sont placés au réfrigérateur, les packs sont à température ambiante (19 °C). Quatre heures plus tard, ils ont atteint la température de 5 °C.



FIGURE 6.19 – Pack de six bouteilles d'un liquide utilisé pour noyer l'exaspération propre à l'étude de la thermodynamique.

photo CC-BY Moritz Barcelona

Le réfrigérateur a un rendement de 95 %. Les parois du réfrigérateur, imparfaitement isolées, absorbent de la chaleur de la pièce avec une puissance de 10 W.

1. Quelle quantité d'énergie électrique le réfrigérateur a-t-il consommée pendant ces quatre heures ?

L'opérateur du réseau électrique local applique un tarif de 0,15 €/ (kW h).

2. Quel est le coût financier du refroidissement effectué ?
3. La pièce dans laquelle le réfrigérateur est entreposé s'est-elle refroidie ou réchauffée ?
4. La pièce se refroidira-t-elle si la porte du réfrigérateur est laissée ouverte ?

6.5 Fonctionnement d'une pompe à chaleur

Décrivez le cycle thermodynamique suivi par le fluide à l'intérieur d'une pompe à chaleur, en indiquant le sens des flux de chaleur et l'emplacement (intérieur/extérieur) des différents composants.

Pourquoi laisse-t-on le fluide se détendre dans une soupape, au lieu d'utiliser une turbine qui pourrait fournir du travail ?

On peut aussi s'exercer en s'intéressant aux cycles et configurations d'un climatiseur, d'un réfrigérateur ou d'un moteur : quelle partie est réchauffée et à quelle température ?

6.6 Algèbre

Montrez, à partir de la définition du rendement du climatiseur, que celui-ci peut s'exprimer selon la relation :

$$\eta_{\text{climatiseur}} = \frac{1}{\left| \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \right| - 1} \quad (6/7)$$

Cette démonstration nous sera utile au chapitre prochain (§7.5). On peut aussi s'exercer en s'attaquant de la même manière aux équations 6/5 et 6/9. Attention aux valeurs absolues !

6.7 Refroidissement d'une soufflerie

La soufflerie cryogénique ETW (pour *European Transonic Windtunnel*, figure 6.20) permet la circulation d'azote dans un circuit fermé pour observer les écoulements autour de maquettes. Elle permet d'atteindre Mach 0,8 à 4 bar et -200°C , à l'aide d'une soufflante de 50 MW.

Les parois de la soufflerie sont fortement isolées, de sorte que ses transferts thermiques avec l'extérieur sont négligeables comparés aux autres transferts énergétiques. Le système de refroidissement de l'azote a un COP de 0,8.

Lorsque la soufflerie fonctionne à plein régime, quelle puissance mécanique est consommée par le système de refroidissement ? Quelle puissance est rejetée sous forme de chaleur dans l'atmosphère ?

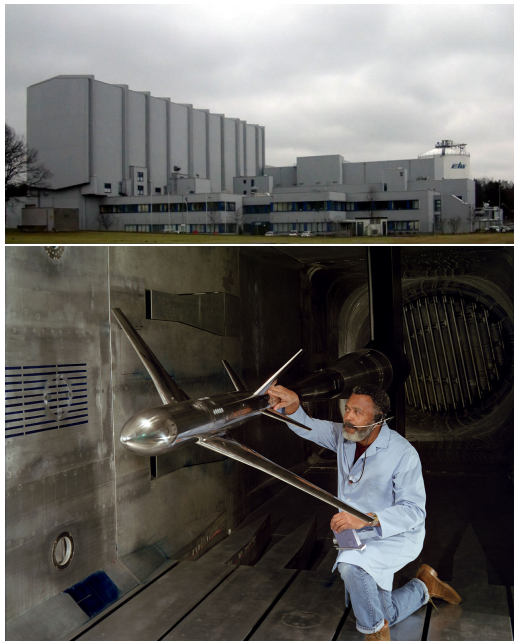


FIGURE 6.20 – Bâtiments de l'ETW (*European Transonic Windtunnel*) à Köln et veine d'essais de la *National Transonic Facility* de la NASA, de taille et capacités similaires.

Photo 1 CC-BY-SA par l'utilisateur-rice Commons Dantor
Photo 2 domaine public Fred Jones (NASA)

6.8 Génératrice d'électricité à turbine

Un turbomoteur est mis en place pour faire fonctionner une génératrice de courant électrique (figure 6.21) ; il fonctionne avec un débit de $0,5 \text{ kg s}^{-1}$ d'air atmosphérique.

- L'air pénètre dans la machine à 20°C et 1 bar ; il est comprimé (A \rightarrow B) jusqu'à 30 bar dans le compresseur.
- L'air reçoit ensuite de la chaleur par combustion, à pression constante (B \rightarrow C), jusqu'à ce que sa température atteigne 1000°C .
- L'air est enfin détendu dans une turbine (C \rightarrow D) jusqu'à retrouver la pression atmosphérique et être rejeté à l'extérieur.

Le compresseur est alimenté mécaniquement par la turbine et l'arbre qui les relie entraîne également la génératrice de courant.

Pour étudier le rendement maximal qui pourrait être atteint par la machine, nous considérons que le compresseur et la turbine sont adiabatiques réversibles (c'est-à-dire que la compression et la détente se font de façon très lente et sans transfert de chaleur).

1. Tracez le chemin suivi par l'air pendant un cycle sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative (c'est-à-dire sans représenter les valeurs numériques).
2. À quelle température l'air sort-il du compresseur ?
3. Quelle est la puissance du compresseur ?
4. À quelle température l'air est-il rejeté dans l'atmosphère ? Quelle puissance est rejetée sous forme de chaleur dans l'atmosphère ?
5. Quelle est l'efficacité de la machine ?
6. Comment les quatre transferts énergétiques de cette machine théorique se comparent-ils à ceux d'une machine réelle, dans laquelle le compresseur et la turbine ne peuvent pas être réversibles ?

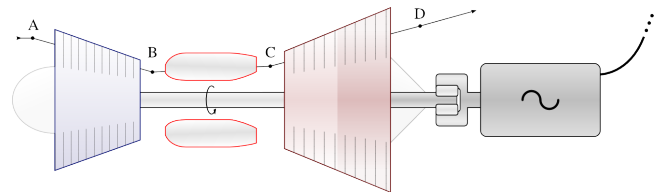


FIGURE 6.21 – Une turbomachine statique, nommée *turbomoteur*, alimentant une génératrice électrique. On tente généralement de détendre le gaz (dans la turbine, entre C et D) jusqu'à pression atmosphérique.

schéma CC-BY-SA Olivier Cleynen

6.9 Cycle d'un moteur à vapeur

Dans une centrale à vapeur, l'eau circule en continu en traversant quatre composants :

- Une pompe quasi-adiabatique dans laquelle elle rentre à l'état de liquide saturé et qui porte sa pression depuis 0,5 bar jusqu'à 40 bar ;
- Une chaudière dans laquelle sa température est portée à 650 °C, à pression constante ;
- Une turbine quasi-adiabatique qui laisse l'eau retourner jusqu'à 0,5 bar en perdant de l'énergie sous forme de travail ;
- Un condenseur qui refroidit l'eau à pression constante (0,5 bar) jusqu'à son retour dans la pompe.

Nous acceptons les hypothèses suivantes :

- À la sortie de la turbine, la vapeur est⁴ à température de 110 °C.
- La compression dans la pompe est réversible, et la masse volumique de l'eau ne varie pas lorsqu'elle la traverse.

1. Tracez le cycle suivi par l'eau sur un diagramme pression-volume et sur un diagramme température-volume, de façon qualitative.
2. Quelle est l'efficacité du moteur ?
3. Que se passerait-il si, pour éliminer les rejets de chaleur, on supprimait le condenseur, en connectant l'entrée de la pompe directement sur la sortie de la turbine ?

6.10 Réfrigération industrielle

Une chaîne de supermarchés fait appel à votre expertise pour évaluer la rentabilité d'un ambitieux projet de renouvellement d'une flotte de réfrigérateurs.

Tous les supermarchés de l'entreprise utilisent le même modèle de réfrigérateur. Son efficacité est de 100 %.

Vous vous déplacez jusqu'à un supermarché représentatif, ce qui vous permet d'effectuer des mesures et de quantifier les transferts thermiques du bâtiment. Vous mettez en évidence que :

- La puissance absorbée sous forme de chaleur par la chambre froide des réfrigérateurs, moyennée sur l'année, est de 80 kW.
- L'hiver, le bâtiment perd de la chaleur avec une puissance moyenne de 400 kW. Il est réchauffé avec une batterie de pompes à chaleur de COP 4.
- L'été, le bâtiment absorbe de la chaleur avec une puissance moyenne de 160 kW. Il est refroidi avec une batterie de climatiseurs de COP 0,9.
- Pendant l'automne et le printemps, les besoins en chauffage/refroidissement sont quasi-nuls.

L'entreprise envisage de remplacer toute sa flotte de réfrigérateurs avec un modèle d'efficacité 220 %, ce qui demande un investissement important. Elle compte 100 supermarchés au total, et paie l'électricité 0,15 € par kWh en moyenne.

Quelle serait l'économie financière annuelle générée par le changement de modèle de réfrigérateur ?

4. Après le chapitre 8 (*l'entropie*) nous saurons prédire cette température de sortie.

6.11 Fonctionnement d'un climatiseur

Un climatiseur fonctionne selon le circuit schématisé en figure 6.22. Le fluide utilisé dans le circuit est de l'air⁵.

L'air à l'intérieur du circuit y tourne de façon continue. Le compresseur et la turbine sont tous les deux adiabatiques et nous considérons qu'ils sont réversibles. Les transferts de chaleur se font à pression constante.

Lorsqu'on met en route le climatiseur, la température extérieure et la température intérieure sont égales à 30 °C.

Les températures de l'air à l'intérieur du circuit sont $T_A = 20$ °C, $T_B = 60$ °C, et $T_C = 40$ °C.

1. Représentez l'évolution sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative et en y représentant les transferts de travail et de chaleur.
2. Quel est le rapport des pressions entre A et B ?
3. Quelle est la température de l'air du circuit en D ?
4. Calculez les puissances spécifiques pour chacun des quatre transferts énergétiques, et calculez ainsi l'efficacité du climatiseur.
5. Le/la propriétaire souhaite obtenir un flux d'air frais à 12 °C de débit $0,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Quelle puissance électrique faut-il fournir au climatiseur pour cela ?
6. Quel sera alors le débit minimal d'air extérieur à faire circuler dans la section extérieure du climatiseur ?
7. Pendant l'hiver, le/la propriétaire souhaite modifier le climatiseur pour le transformer en pompe à chaleur. Décrivez (de façon qualitative) une modification du circuit pour cela, et tracez l'évolution de l'air du

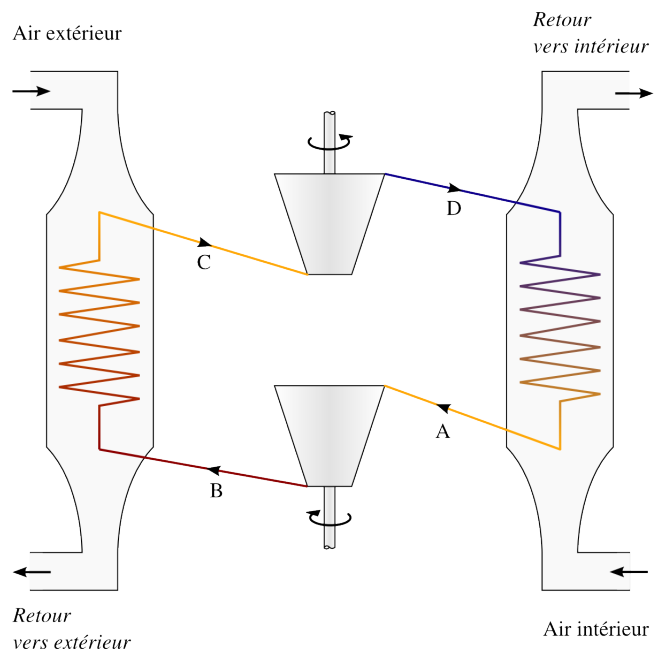


FIGURE 6.22 – Schéma de principe d'un climatiseur. L'air du circuit du climatiseur tourne en continu (A → B → C → D → A), sans jamais quitter la machine.

schéma CC-BY-SA Olivier Cleynen

5. On utilise souvent, en pratique, des fluides qui se liquéfient et s'évaporent dans la machine ; mais le principe de fonctionnement reste le même.

circuit sur un nouveau diagramme pression-volume en y indiquant les transferts énergétiques.

6.12 Pack de conditionnement

Un « pack » de conditionnement d'air est une machine thermodynamique utilisée dans les avions de transport pour pressuriser le fuselage et pour maintenir la température dans le cockpit, la cabine et les soutes à un niveau confortable quelles que soient les conditions extérieures.

Les packs (souvent appelés ECS ou ACM, pour *Environment Control System* et *Air Cycle Machine*) sont souvent placés autour du caisson de voilure dans la zone non-pressurisée des avions de ligne (figure 6.27). Une particularité intéressante de leur fonctionnement est que c'est l'air du circuit thermodynamique lui-même qui est inséré dans la cabine à destination des passagers.

Nous étudions ici les fonctions de chauffage et de climatisation d'un pack : pour cela, nous simplifions la modélisation de son fonctionnement.

L'air destiné à la cabine commence son chemin à l'entrée des moteurs à turbine de l'avion⁶. Dans le compresseur d'un de ces moteurs, sa pression est multipliée par 5 pendant une évolution approximativement adiabatique réversible ; puis il est conduit jusqu'au pack.

En entrant dans le pack, cet air passe par un échangeur de chaleur où il perd de la chaleur (figure 6.24). Cette chaleur est prélevée par un flux d'air distinct, dit RAM : c'est de l'air extérieur aux conditions atmosphériques, prélevé et rejeté sous le fuselage. Les circuits d'air cabine et d'air RAM sont à des pressions très différentes et ne sont jamais mélangés.

Après son passage dans l'échangeur de chaleur, l'air du pack peut suivre trois circuits distincts avant d'arriver dans la cabine :

Le circuit A est utilisé par temps froid, lorsque l'on souhaite porter ou maintenir la cabine à une température plus haute que la température extérieure ;

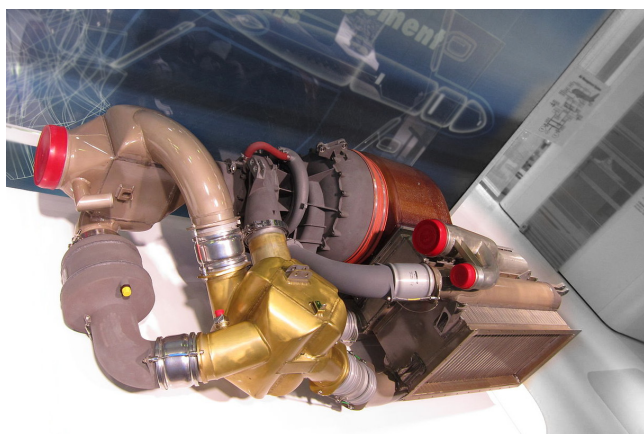


FIGURE 6.23 – Un ECS destiné à un Comac C919, de longueur environ 1,5 m.

Photo CC-BY-SA Olivier Cleynen

6. Excepté lorsque l'avion, au sol, est connecté à une source d'air conditionné ou pressurisé.

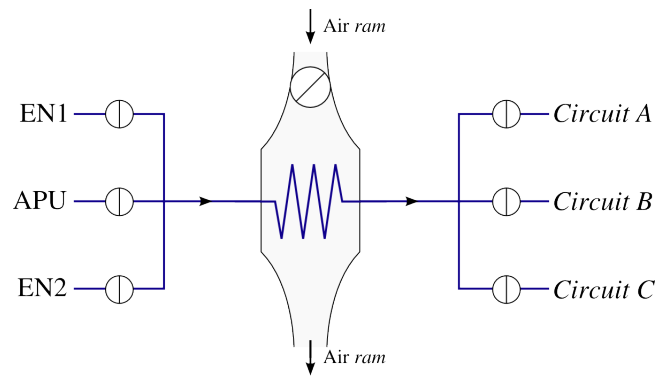


FIGURE 6.24 – Circuit représentant l'air arrivant dans le pack par la gauche, en provenance des moteurs (EN1 et EN2) ou du groupe auxiliaire de puissance (APU). Cet air repart dans un des trois circuits A, B ou C après avoir perdu de la chaleur au profit de l'air RAM.

schéma CC-0 o.c.

Le circuit B est utilisé par temps modéré, lorsque la cabine doit être portée ou maintenue à température proche de la température extérieure ;

Le circuit C est utilisé par temps chaud, lorsque les besoins en climatisation de la cabine sont importants.

Le pack contrôle automatiquement le débit d'air extérieur (RAM) et sélectionne le circuit à suivre par l'air destiné à la cabine, pour porter sa température jusqu'à la valeur demandée par l'équipage au poste de pilotage (figure 6.28).

Circuit A : Réchauffage par temps froid

Dans le circuit A, l'air destiné à la cabine est simplement détendu dans une soupape (figure 6.25) avant d'être inséré dans la cabine.

Dans la soupape, la pression chute brutalement et le volume spécifique augmente ; pourtant, aucun travail ou transfert de chaleur n'est effectué. Il s'agit d'une détente dite « de Joule et Gay-Lussac » (cf. §4.3.2). Le processus est entièrement irréversible.

Lorsque l'avion est au sol par conditions climatiques froides (-35°C , 1 bar) :

1. Quelle est la température *maximale* de l'air que le pack peut insuffler en cabine ? (pour cela, nous fermons entièrement le circuit d'air extérieur RAM).
2. Représentez l'évolution sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative.

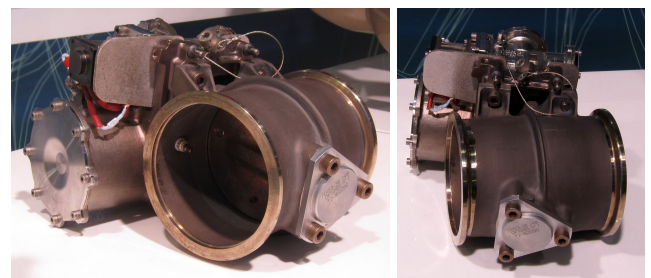


FIGURE 6.25 – Valve de régulation de l'écoulement d'air d'un ECS destiné à un Comac C919.

photos CC-0 o.c.

3. Quel serait le débit minimal d'air extérieur à faire circuler dans le circuit RAM pour amener 0,5 kg/s d'air conditionné à 24 °C dans la cabine ?
4. Tracez l'évolution que subirait alors l'air conditionné sur le diagramme $p - v$ plus haut.

Circuit B : Climatisation cabine par temps modéré

En pratique, il est possible de faire chuter la température de l'air destiné à la cabine avec un débit d'air RAM beaucoup plus faible. Pour cette raison, lorsque les besoins en refroidissement sont importants, l'air destiné à la cabine passe par le circuit B. Il est alors détendu à l'aide d'une turbine jusqu'à la pression cabine (1 bar). Nous considérons que la turbine est idéale (détente adiabatique réversible).

Lorsque les conditions extérieures sont de 20 °C, 1 bar :

5. À quelle température l'air rentrera-t-il dans la cabine si le circuit RAM est fermé ?
6. Quelle énergie sera alors extraite à l'air par la turbine ?
7. Tracez l'évolution suivie par l'air sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative.
8. À quelle température *minimale* le circuit peut-il porter l'air destiné à la cabine ?

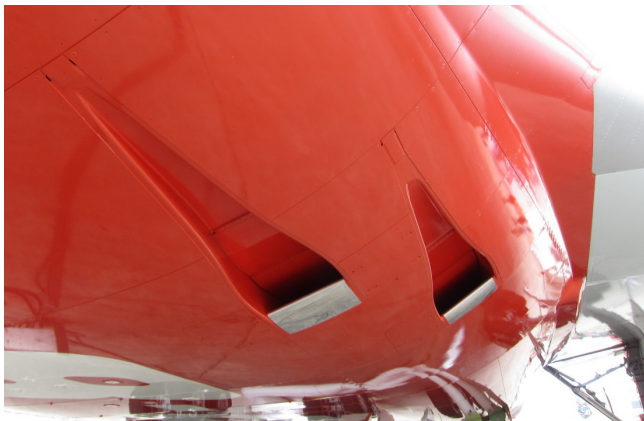


FIGURE 6.26 – Les entrées d'air du circuit RAM au caisson de voilure d'un Boeing 747-8I.

Photo CC-BY-SA Olivier Cleynen



FIGURE 6.27 – Pack de conditionnement positionné à l'emplanture d'aile d'un Sukhoi SuperJet S100

Photo CC-BY-SA A.Katranzhi

9. Quelle énergie sera alors extraite à l'air par la turbine ?
10. Tracez l'évolution sur le diagramme $p - v$ plus haut.

Circuit C : Climatisation cabine par temps chaud

Lorsque l'appareil évolue au sol par conditions climatiques très chaudes (45 °C, 1 bar) l'air destiné à la cabine passe par le circuit C.

Au passage dans l'échangeur, sa température ne descend que jusqu'à 217 °C.

Il est ensuite comprimé dans un compresseur (adiabatique réversible) jusqu'à 20 bar.

Il passe ensuite de nouveau par un échangeur de chaleur traversé par le circuit d'air RAM.

Enfin, il est détendu dans une turbine⁷ (adiabatique réversible) jusqu'à pression atmosphérique, puis insufflé dans la cabine.

11. Représentez le circuit suivi par l'air au travers du pack et schématisez l'évolution sur un diagramme pression-volume.
12. À quelle température doit-on porter l'air dans le second échangeur, avant sa détente, pour obtenir un flux d'air à 5 °C dans la cabine ?
13. Quelle est alors l'énergie sous forme mécanique que le pack reçoit ou fournit pour fonctionner ?

Conclusion

14. Quel est le COP du réchauffage généré avec le circuit A en question 3 ?
15. Quel est le COP de la climatisation effectuée avec le circuit C en question 12 ?

7. En pratique, il s'agit de la turbine du circuit B.

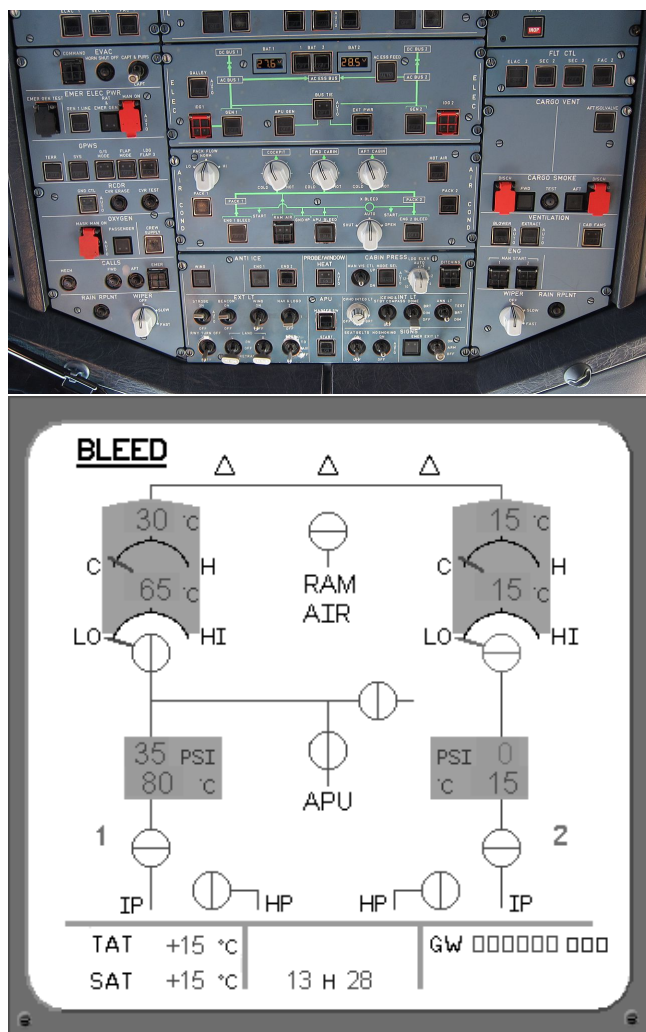


FIGURE 6.28 – Interface de contrôle de l'ECS au centre du panneau supérieur du cockpit d'un Airbus A320 et le panneau d'affichage EFIS correspondant.

Photo CC-BY-SA Olivier Cleynen

Solutions des exercices

6.1 1) $\dot{Q}_{in} = \frac{-\dot{W}_{net}}{\eta_{moteur}} = \frac{-(60 \cdot 10^3)}{0,4} = +150 \text{ kW}$; ainsi $\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{in}}{c_{carburant}} = 15,4 \text{ kg h}^{-1}$ (environ 12 litres par heure);
2) $\dot{Q}_{out} = -\dot{Q}_{in} - \dot{W}_{net} = -90 \text{ kW}$.

6.2 $W_{net} = \frac{Q_{in}}{\eta_{réfrigérateur}} = +83,3 \text{ kJ}$; $Q_{out} = -Q_{in} - W_{net} = -183,3 \text{ kJ}$.

6.3 $\dot{W}_{net} = \frac{-\dot{Q}_{out}}{\eta_{thermopompe}} = \frac{-(-4 \cdot 10^3)}{3,1} = +1,29 \text{ kW}$; $\dot{Q}_{in} = -\dot{W}_{net} - \dot{Q}_{out} = +2,71 \text{ kW}$.

6.4 1) Si l'on suppose que la masse volumique du liquide est égale à celle de l'eau liquide ($\rho_{liquide} = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$), la chaleur Q_{in} absorbée par le réfrigérateur est $Q_{in} = -Q_{verre} - Q_{liquide} - Q_{parois} = -n_{bouteilles}(m_{verre}c_{verre} + m_{liquide}c_{liquide})(\Delta T)_{packs} - \dot{Q}_{parois}\Delta t = -60(0,172 \times 0,75 \cdot 10^3 + 0,25 \times 4,2 \cdot 10^3) \times (5 - 19) - 10 \times 4 \times 3600 = +1134,4 \text{ kJ}$. Ainsi, $W_{net} = \frac{Q_{in}}{\eta_{réfrigérateur}} = +1194,1 \text{ kJ}$.

2) $W_{net} = +1194,1 \text{ kJ} = +1194,1 \text{ kJ s} = +0,332 \text{ kWh}$. Ainsi le coût revient à 0,05 € (!).

3) La pièce sera réchauffée par le rejet $Q_{out} = -Q_{in} - W_{net} = -2,538 \text{ MJ}$.

4) L'ouverture de la porte ne fait qu'augmenter la chaleur Q_{in} à extraire de la chambre froide, et donc contribuera à augmenter Q_{out} et le réchauffement de la pièce (avec une puissance nette $\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out} = -\dot{W}_{net}$).

6.5 Voir §6.2.3, et en particulier les figures 6.5, 6.7 et 6.8.

6.6 $\eta_{climatiseur} \equiv \left| \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{W}_{net}} \right| = \frac{\dot{Q}_{in}}{-\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}} = \frac{1}{-1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}}$. Or, par définition $\dot{Q}_{out} < 0$ et $\dot{Q}_{in} > 0$; ainsi $\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} = -\left| \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \right|$. On a donc $\eta_{climatiseur} = \frac{1}{-1 + \left| \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \right|}$. À vous maintenant avec les équations 6/5 et 6/9 !

6.7 Les 50 MW dépensés par la soufflante sont entièrement dissipés sous forme de frottements dans la soufflerie, et donc convertis en chaleur qu'il faut prélever si l'on veut maintenir la température constante. Ainsi $\dot{W}_{net} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\eta_{réfrigération}} = +62,5 \text{ MW}$ (un sacré réfrigérateur...). Il suit que $\dot{Q}_{out} = -\dot{Q}_{in} - \dot{W}_{net} = -112,5 \text{ MW}$.



6.8

774,7 K;

$\dot{m}c_p(T_B - T_A) = +242 \text{ kW}$;

$T_C \left(\frac{p_B}{p_A} \right)^{-\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 481,8 \text{ K}$. Ainsi, l'air rejeté doit perdre $\dot{Q}_{D \rightarrow A} = c_p \Delta T = -94,8 \text{ kW}$ pour revenir à son état initial (§6.2.1);

2) Avec l'équation 4/37, $T_B = T_A \left(\frac{p_B}{p_A} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} =$

3) Avec les équations 3/14 et 4/14, $\dot{W}_{A \rightarrow B} =$

4) Avec l'équation 4/37, $T_D = T_C \left(\frac{p_D}{p_C} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} =$

5) $\eta_{moteur} \equiv \left| \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \right| = \left| \frac{\dot{W}_{A \rightarrow B} + \dot{W}_{C \rightarrow D}}{\dot{Q}_{B \rightarrow C}} \right| = 62,3 \%$

(fort honorable, mais seulement atteignable avec une turbine et un compresseur parfaits);

6) Avec un compresseur réel $\dot{W}_{A \rightarrow B_2} > \dot{W}_{A \rightarrow B}$ et $T_{B_2} > T_B$. Il s'ensuit que si T_C est gardée constante, $\dot{Q}_{B \rightarrow C_2} < \dot{Q}_{B \rightarrow C}$. Néanmoins, on a encore $\dot{W}_{C \rightarrow D_2} < \dot{W}_{C \rightarrow D}$ et $T_{D_2} > T_D$ dans la turbine. La puissance \dot{W}_{net} diminue, le rejet \dot{Q}_{out} augmente. Nous montrerons au chapitre 7 (le second principe) que le rendement diminue également.

N.B. Nous avons déjà étudié ce moteur aux exercices 1.9 et surtout 3.2. Notre capacité d'analyse et de quantification des performances s'améliore à chaque fois...



6.9

1) Pour s'aider à construire ces diagrammes,

on peut réviser les figures 5.7 et 5.9, ainsi que la section §5.4.

2) $h_A = h_{L0,5 \text{ bar}}$; $h_B = h_A + \int_A^B v dp = h_A + v_L \Delta p$ (5/13 & 5/14 avec $q_{A \rightarrow B} = 0$); $h_C = h_{650^\circ \text{C} \& 4 \text{ MPa}}$;

$h_C = h_{110\text{ °C}} \approx 0,05 \text{ MPa}$; Avec ces données on calcule aisément $\eta_{\text{moteur}} \equiv \left| \frac{w_{\text{net}}}{q_{\text{in}}} \right| = -\frac{w_{\text{net}}}{q_{\text{in}}} = -\frac{w_{\text{turbine}} + w_{\text{pompe}}}{q_{\text{chaudière}}} = -\frac{(h_D - h_C) + (h_B - h_A)}{h_C - h_B} = 31,47\%$ (intéressant dans la mesure où on peut utiliser n'importe quel carburant).

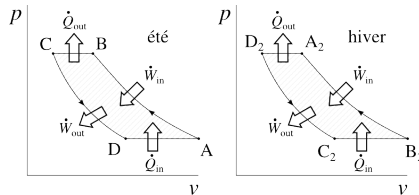
3) Dans ce cas, la pompe ferait (presque) effectuer le chemin $D \rightarrow C$ à la vapeur, la ramenant à température de 650 °C et rendant impossible l'apport de chaleur dans la chaudière. Nous aurions donc effectivement une machine faite d'une turbine et d'une pompe échangeant de l'eau : impossible de dégager ainsi du travail...

6.10 Dans un supermarché, au printemps comme à l'automne, l'économie d'énergie électrique permise par les nouveaux réfrigérateurs représente $43,6 \text{ kW}$.

En été, la chaleur à absorber par les climatiseurs est diminuée. Il faut donc ajouter une économie de $48,5 \text{ kW}$ électriques au niveau des climatiseurs.

En hiver, la chaleur à apporter par les pompes à chaleur est augmentée. Il faut donc ajouter une dépense supplémentaire de $10,9 \text{ kW}$ au niveau des pompes à chaleur.

Au final, cela représente une économie annuelle de $1,672 \cdot 10^{12} \text{ J}$ soit $69,7 \text{ k€}$ par supermarché, qu'il faut comparer à l'investissement requis et aux coûts engendrés (notamment l'appel à votre expertise...).



6.11

2) Avec l'équation 4/37, $\frac{p_B}{p_C} = \left(\frac{T_B}{T_A}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 1,565$;
 3) Idem, détente $C \rightarrow D$ adiabatique réversible, $T_D = T_C \left(\frac{p_D}{p_C}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_C \left(\frac{p_A}{p_B}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_C \frac{T_A}{T_B} = 275,6 \text{ K}$ soit $2,4\text{ °C}$;

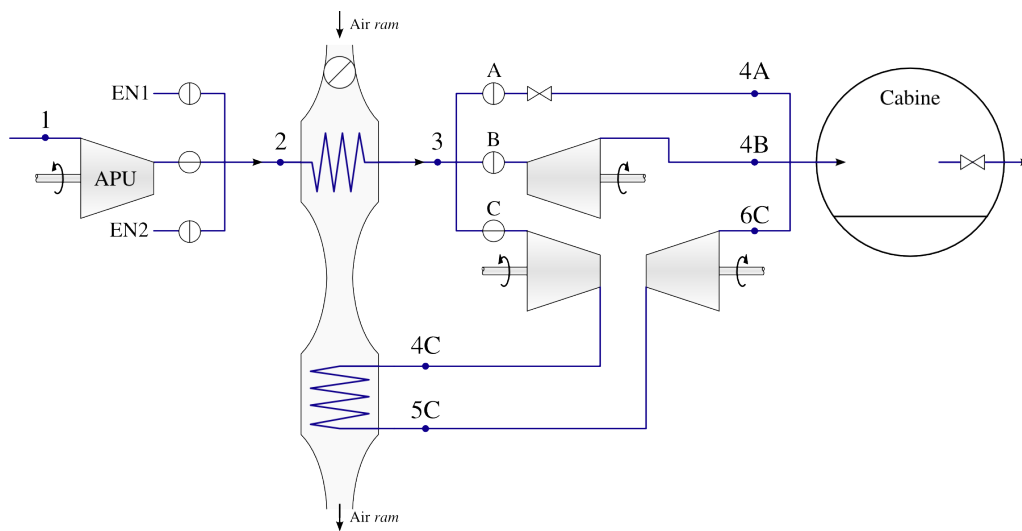
4) Avec les équations 3/15 et 4/14, $w_{\text{in}} = +40,2 \text{ kJ kg}^{-1}$;

$q_{\text{out}} = -20,1 \text{ kJ kg}^{-1}$; $w_{\text{out}} = +37,76 \text{ kJ kg}^{-1}$; $q_{\text{in}} = +17,6 \text{ kJ kg}^{-1}$; Ainsi avec l'équation 6/6, $\eta_{\text{climatiseur}} = 7,213$

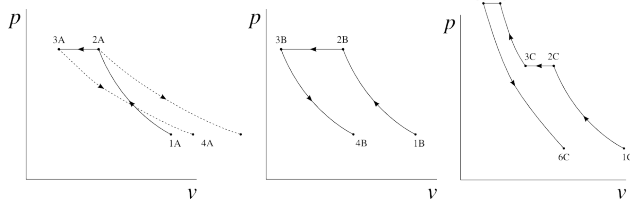
5) On veut obtenir en 2 (bouche de sortie intérieure) $\dot{m}_{\text{air intérieur}} = \frac{\dot{V}_2}{v_2} = \frac{\dot{V}_2 p_2}{RT_2} = 0,305 \text{ kg s}^{-1}$. Il faut donc retirer à l'air intérieur une puissance $\dot{Q}_{\text{air intérieur}} = \dot{m}_{\text{air intérieur}} c_p (T_2 - T_1) = -5,51 \text{ kW}$ (3/14 & 4/14). Le climatiseur requerra donc $\dot{W}_{\text{net}} = \frac{-\dot{Q}_{\text{air intérieur}}}{\eta_{\text{climatiseur}}} = 765 \text{ W}$.

6) Pour minimiser $\dot{m}_{\text{air extérieur}}$, il faut maximiser sa température de sortie T_4 . Or on a nécessairement $T_4 \leq T_B$, sinon le transfert de chaleur se fait dans le mauvais sens. Ainsi $\dot{m}_{\text{air extérieur min.}} = \frac{-\dot{Q}_{\text{out climatiseur}}}{c_p (T_{4\text{max.}} - T_3)} = \frac{-\dot{Q}_{\text{in}} - \dot{W}_{\text{net}}}{c_p (T_{4\text{max.}} - T_3)} = 0,208 \text{ kg s}^{-1}$ (minimum théorique).

7) En principe, il suffit d'inverser la position du compresseur et de la turbine. En pratique, il faudra également décaler les plages de températures pour permettre l'absorption de chaleur par temps froid.



6.12



1) Si le circuit RAM est fermé, alors $T_{3A} = T_{2A}$; et puisque $T_{4A} = T_{3A}$ (§4.3.2) on obtient $T_{4A} = T_{1A} \left(\frac{p_{2B}}{p_{1B}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 377,19 \text{ K} = 104,1^\circ \text{C}$.

3) Dans l'échangeur RAM on a $\dot{Q}_{\text{air cabine}} = -\dot{Q}_{\text{air RAM}}$ soit $\dot{m}_{\text{air cabine}} q_{\text{air cabine}} = -\dot{m}_{\text{air RAM}} q_{\text{air RAM}}$ ou encore $\dot{m}_{\text{air cabine}} c_p (T_{3A} - T_{2A}) = -\dot{m}_{\text{air RAM}} c_p (T_{\text{rejet RAM}} - T_{\text{entrée RAM}})$. Ainsi, $\dot{m}_{\text{air RAM}}$ est minimal lorsque $T_{\text{rejet RAM}}$ est maximal, or on a nécessairement $T_{\text{rejet RAM}} \leq T_{2C}$. Ainsi, $\dot{m}_{\text{air RAM min.}} = -\dot{m}_{\text{air cabine}} \frac{T_{3A} - T_{2A}}{T_{2C} - T_{\text{entrée RAM}}} = 0,29 \text{ kg s}^{-1}$ (soit environ 200 L s^{-1} à l'entrée).

5) Si le circuit RAM est fermé, alors $T_{3B} = T_{2B}$; on a $T_{4B} = T_{3B} \left(\frac{p_{4B}}{p_{3B}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_{2B} \left(\frac{p_{1B}}{p_{2B}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_{1B} = 293,15 \text{ K} = 20^\circ \text{C}$.

6) $w_{\text{turbine B}} = c_p (T_{4B} - T_{3B}) = -w_{\text{compression B}} = -172 \text{ kJ kg}^{-1}$

8) On obtient $T_{4B \text{ min.}}$ lorsque $T_{3B} = T_{3B \text{ min.}} = T_{\text{extérieur}}$. Alors $T_{4B \text{ min.}} = T_{3B \text{ min.}} \left(\frac{p_{4B}}{p_{3B}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 185,1 \text{ K} = -88,1^\circ \text{C}$ (résultat purement hypothétique bien sûr).

9) Elle diminue : $w_{\text{turbine B2}} = c_p (T_{4B \text{ min.}} - T_{3B \text{ min.}}) = -108,6 \text{ kJ kg}^{-1}$.

12) $T_{5C} = T_{6C} \left(\frac{p_{5B}}{p_{6B}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 654,6 \text{ K} = 381,5^\circ \text{C}$. 13) On calcule d'abord $T_{4C} = T_{3C} \left(\frac{p_{4C}}{p_{3C}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 728,4 \text{ K}$. Dans le pack les transferts de travail sont de $w_{\text{pack}} = w_{\text{compresseur pack}} + w_{\text{turbine pack}} = c_p (T_{4C} - T_{3C}) + c_p (T_{6C} - T_{5C}) = -138,9 \text{ kJ kg}^{-1}$; Ainsi l'air dépense un travail net dans le pack, qui reçoit en permanence de l'énergie sous forme pneumatique (mécanique).

14) Pour calculer ces COP, il faut compléter les cycles en faisant retourner l'air aux conditions d'entrée depuis la cabine (§6.2.1). En question 3 on a $\eta_{\text{thermopompe}} = \left| \frac{q_{\text{out}}}{w_{\text{in}}} \right| = -\frac{c_p (T_{4A} - T_{1A})}{c_p (T_{2A} - T_{1A})} = 0,424$ (rare application où un COP inférieur à 100 % est acceptable).

15) En question 12 on a $\eta_{\text{climatiser}} = \left| \frac{q_{\text{in}}}{w_{\text{in}}} \right| = \frac{c_p (T_{1C} - T_{6C})}{c_p (T_{2C} - T_{1C} + T_{4C} - T_{3C} + T_{6C} - T_{5C})} = 0,842$.

En pratique toutefois, le travail net développé par l'air dans le pack n'est pas récupéré : il est rejeté par frottement dans l'air RAM. On a donc $w_{\text{net}} = c_p (T_{2C} - T_{1C})$ et le COP est diminué.

Quelques commentaires de fin : 1) En réalité les évolutions adiabatiques ne sont pas réversibles, ce qui réduit plus encore les rendements calculés ici. 2) Les faibles valeurs de ces rendements découlent des compromis effectués pour réduire l'encombrement, la complexité et surtout le poids des systèmes embarqués. Dans cette application, la puissance mécanique disponible est élevée, l'énergie pneumatique est largement disponible, et les dépassements en volume et en poids ont des conséquences démesurées. 3) Dans les appareils les plus récents (dits *plus électriques*) tels le B787

et l'A350, les packs sont désormais alimentés à l'électricité, et non plus au moyen de l'air-même destiné à la cabine.

