

Supplément TDT2 – Bilans pour un fluide en écoulement stationnaire & TDT3 – Machines thermiques

1 Cycle de Linde-Hampson (d'après E3A MP 2019)

Pour refroidir des supraconducteurs haute-température, type cuprates, on peut utiliser du diazote liquide. La figure 1 ci-dessous représente le schéma de principe du procédé Linde-Hampson utilisé pour produire du diazote liquide (état 5).

- Au repère 1, le diazote entre dans le compresseur, noté C, dans l'état 1 à la pression $P_1 = 1$ bar et à la température $T_1 = 290$ K.
- Dans le compresseur, le diazote subit une compression isotherme réversible qui l'amène au repère 2 à $P_2 = 200$ bar.
- Le diazote sortant du compresseur passe dans l'échangeur thermique E (repère 3) où il y est refroidi à pression constante.
- Le détendeur D détend le gaz jusqu'à la pression atmosphérique P_1 . Le détendeur est un simple robinet et ne comporte donc pas de parties mobiles. À sa sortie, le diazote est un mélange de gaz et de liquide.
- Le liquide formé est extrait au niveau du séparateur S et la vapeur saturée (repère 6) est renvoyée dans l'échangeur thermique E. Le repère 5 ne fait pas partie du cycle. Le diazote gazeux est ramené à l'état 1 à la sortie de l'échangeur E.
- Le détendeur D, le séparateur S, l'échangeur E et tous les circuits de liaison sont supposés parfaitement calorifugés. Lors du passage dans le séparateur et l'échangeur thermique, les transformations sont considérées comme isobares.

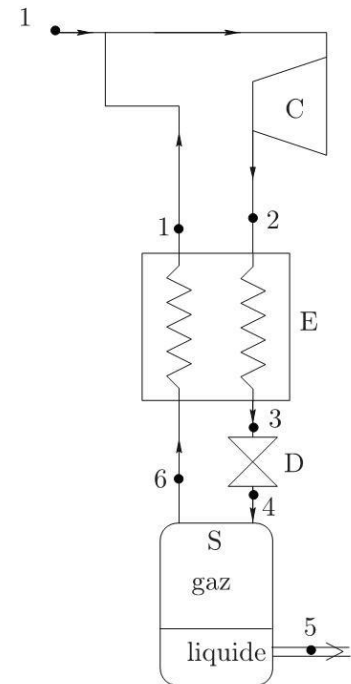


FIG. 1 - Cycle de Linde-Hampson

F / Premier et deuxième principes dans un écoulement

Prenons un fluide qui s'écoule en passant d'un état thermodynamique 1 à un état thermodynamique 2. Ce dernier échange de l'énergie avec l'extérieur sous forme de travail et de transfert thermique. L'écoulement est considéré permanent dans toute la suite du problème.

Les principes appliqués à chaque organe s'écrivent :

$$\begin{cases} h_s - h_e = w_u + q \\ s_s - s_e = \frac{q}{T_{ext}} + s_c, \text{ avec } s_c \geq 0 \end{cases}$$

F1. Quelle est la signification de chaque terme du système d'équations précédent.

F2. Quelle hypothèse fondamentale permet d'établir ce système ?

G / Étude du cycle

♦ On donne le diagramme enthalpique (P, h).

G1. Placer les points 1, 2, 5 et 6 sur le diagramme (P, h) du document réponse.

G2. Par lecture graphique, déterminer pour ces points leurs enthalpies et entropies massiques.

♦ On s'intéresse à la validité du modèle du gaz parfait.

G3. Pour un gaz parfait, comparer les isothermes et les isenthalpes dans un diagramme (P, h).

G4. En déduire à partir du diagramme, dans quel domaine de pression on peut considérer le diazote comme un gaz parfait.

♦ On étudie maintenant la transformation $1 \rightarrow 2$ dans le compresseur.

G5. Comment se simplifie le deuxième principe pour une transformation isotherme réversible ? En déduire l'expression du transfert thermique massique q_{12} . Faire l'application numérique.

G6. En déduire le travail massique w_{12} fourni par le compresseur au système.

♦ On s'intéresse à l'étude du détendeur (transformation 3 → 4) et du séparateur (transformation 4 → 6). On rappelle que l'étape 5 ne fait pas partie du cycle.

G7. Déterminer la nature de la transformation 3 → 4.

G8. On note y la fraction massique en **diazote liquide**. À partir du point 4, le diazote est séparé en deux : le liquide d'enthalpie massique h_5 est extrait et le gaz d'enthalpie massique h_6 est envoyé dans l'échangeur thermique. Déterminer l'expression de h_4 en fonction de y , de l'enthalpie massique du liquide h_5 et celle du gaz h_6 .

♦ On regarde maintenant l'échangeur thermique E (transformation 2 → 3 et 6 → 1). On peut montrer en utilisant le premier principe que $h_3 - h_2 + (1 - y)(h_1 - h_6) = 0$.

G9. En déduire l'expression de y en fonction des enthalpies massiques h_1 , h_2 et h_5 .

Faire l'application numérique.

G10. Calculer numériquement le travail pour extraire 1 kg d'azote liquide.

G11. En utilisant la question G9, placer le point 4 sur le diagramme (P , h). En déduire l'enthalpie massique h_4 et l'entropie massique s_4 .

G12. Placer alors le point 3 sur le diagramme (P , h). En déduire l'enthalpie massique h_3 et l'entropie massique s_3 .

G13. Calculer la différence entre les entropies à l'entrée et à la sortie du détendeur.

En déduire l'entropie massique créée. Préciser l'origine de l'irréversibilité si elle existe.

G14. Sachant que le prix du kWh (kilowatt-heure) en France en 2017 est de 0,15 euros, déterminer l'énergie nécessaire et le coût pour liquéfier un volume de 10 L de diazote.

Donnée : Masse volumique du diazote liquide : $\rho(\text{N}_2) = 8,1 \times 10^2 \text{ kg.m}^{-3}$

Diagramme $\log(P)$ - h du diazote

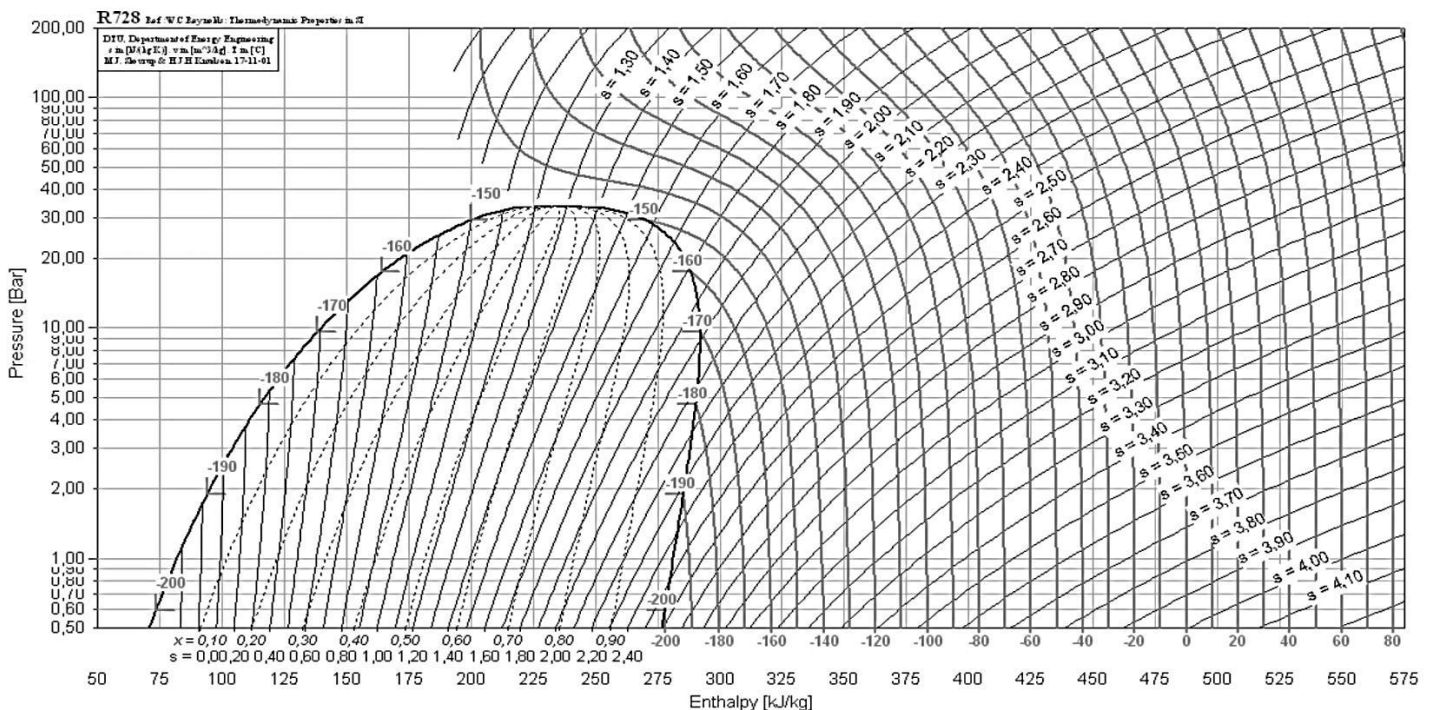


FIG. 1 – Les entropies massiques s sont en kJ/K/kg et les températures en degrés Celsius.

2 Turboréacteur double corps, avec soufflante, à flux séparés (d'après CCS2 PSI 2020)

Cette partie étudie, de façon simplifiée, le fonctionnement du turboréacteur double-flux séparés et double-corps du type CFM56 qui équipe l'Airbus A320. Pour cela, on se place dans le cadre d'un test au sol sur un banc d'essai fixe. La figure 7 présente le schéma de principe simplifié du turboréacteur.

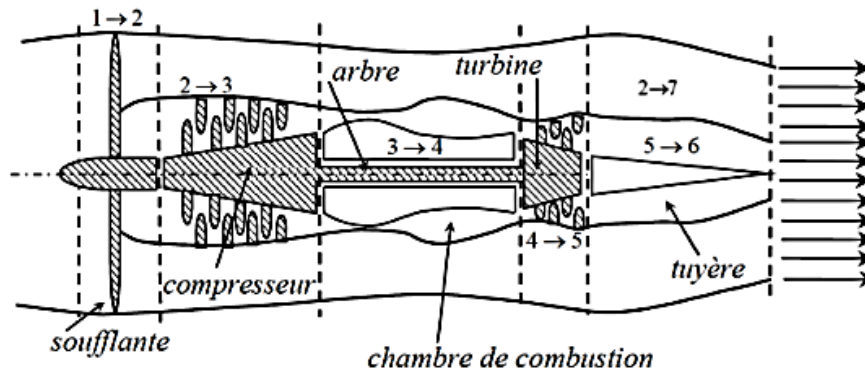


Figure 7

L'air est aspiré (étape $1 \rightarrow 2$) par la soufflante à la température $T_1 = 288 \text{ K}$ et à la pression $P_1 = 1 \text{ bar}$. Il se divise ensuite en deux flux, le flux primaire de débit massique D_{m1} et le flux secondaire de débit massique D_{m2} . On note $\beta = D_{m2}/D_{m1} = 5,7$ le facteur de by-pass (taux de dilution) et $D_m = D_{m1} + D_{m2}$ le débit massique total. Le flux primaire, dit *flux chaud* du fait de son passage dans la chambre de combustion, décrit dans le corps principal du turboréacteur les étapes suivantes :

- $2 \rightarrow 3$, compression de P_2 à P_3 par un compresseur axial ;
- $3 \rightarrow 4$, dans la chambre de combustion où le carburant est injecté, le mélange air-carburant est chauffé par combustion. La flamme est confinée au voisinage des injecteurs alimentés par un débit de kérosène ici négligé devant celui de l'air qui traverse la chambre. La température (température de flamme) s'abaisse ensuite rapidement dans la chambre pour atteindre une valeur compatible avec la tenue des matériaux de la turbine. Les caractéristiques de l'air ne sont pas modifiées par la combustion. On prendra en sortie de la chambre de combustion $T_4 = 1450 \text{ K}$. La chambre est supposée isobare ;
- $4 \rightarrow 5$, détente partielle dans la turbine axiale ;
- $5 \rightarrow 6$, détente dans la tuyère, de la pression P_5 , à vitesse supposée nulle, jusqu'à la pression ambiante $P_6 = 1 \text{ bar}$ où une première contribution à la poussée est produite.

Le flux secondaire, dit *flux froid*, s'écoule sans perte de charge autour du corps principal et passe directement dans une tuyère séparée de la première où l'essentiel de la poussée est produite. En sortie de cette tuyère $P_7 = 1 \text{ bar}$ et la température est notée T_7 .

Les taux de compression de la soufflante et du compresseur sont respectivement donnés par $P_2/P_1 = 2$ et $P_3/P_2 = 13$.

On suppose que le régime est stationnaire et que l'énergie potentielle de pesanteur du fluide est partout négligeable devant les autres grandeurs énergétiques. De même on négligera partout l'énergie cinétique du fluide sauf en sortie des tuyères. Les évolutions dans la tuyère, la turbine et le compresseur sont supposées adiabatiques et réversibles. Le système ne comporte aucune pièce mobile en dehors de la turbine, du compresseur et de la soufflante. Le compresseur, la turbine et la soufflante ont un arbre commun supposé sans perte mécanique. On néglige aussi les pertes mécaniques dans le compresseur et dans la turbine.

Q 17. Dans le cadre des hypothèses du problème, hormis dans la chambre de combustion, montrer que le travail massique utile reçu par le gaz pour une transformation de l'état i vers l'état j est donné par :

$$w_{i \rightarrow j} = C_{p, \text{mass}}(T_j - T_i) + \frac{1}{2}(c_j^2 - c_i^2)$$

où c_i est la vitesse du gaz dans l'état i et c_j celle du gaz dans l'état j et où $C_{p, \text{mass}}$ désigne la capacité thermique massique du gaz.

Q 18. Établir l'expression de la pression P_j en fonction de T_i , P_j , P_i et du coefficient isentropique de l'air γ .

Q 19. En exploitant le couplage mécanique entre turbine, compresseur et soufflante, établir les expressions littérales et les valeurs numériques des températures T_2 , T_3 , T_5 et de la pression P_5 en sortie de turbine.

Q 20. Établir l'expression littérale et la valeur numérique de c_6 , vitesse du gaz du flux chaud à la sortie de la tuyère.

Q 21. Établir également l'expression littérale et la valeur numérique de c_7 , vitesse du gaz du flux froid à la sortie de la tuyère.

HP | **Q 22.** Par un bilan de quantité de mouvement sur une surface de contrôle judicieusement choisie, justifier
MP | que les poussées produites par les tuyères relatives au flux chaud et froid sont respectivement données par :
 | $F_c = D_{m1}c_6$ et $F_f = D_{m2}c_7$.

Q 23. Exprimer la poussée F du turboréacteur complet uniquement en fonction de D_m , des vitesses d'éjection c_6 et c_7 et du facteur de by-pass.

Q 24. En déduire l'expression et la valeur numérique de la poussée par unité de débit massique D_m , dite *poussée spécifique* du turboréacteur, notée F_g .

Q 25. Quel est le pourcentage de la poussée assurée par le flux chaud ?

Q 26. Lors d'un essai au sol sur banc fixe, le turboréacteur délivre une poussée de 20 kN. Quel débit massique D_m doit alors assurer la soufflante ?

Données

Sauf indication contraire, les valeurs dépendantes de la température sont fournies à 298 K.

Accélération de la pesanteur terrestre	$g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
Composition de l'air	$\text{N}_2 : 80 \%, \text{O}_2 : 20 \%$
Masse volumique de l'air sous une pression de 1 bar	$\rho = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Viscosité dynamique de l'air	$\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Coefficient isentropique de l'air	$\gamma = 1,4$
Capacité thermique massique à pression constante de l'air	$C_{p\text{mass}} = 1,0 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$