

TD – Thermodynamique des systèmes ouverts, applications industrielles

I Vrai-faux/qcm

★ | [●○○]

- 1 - (V/F) Le premier principe pour un système ouvert s'applique uniquement pour un fluide incompressible.
- 2 - Rappeler les hypothèses sous lesquelles on peut écrire le premier principe pour un système ouvert.
- 3 - (V/F) Une turbine permet de récupérer un travail indiqué ?
- 4 - Une machine frigorifique comprend un condenseur. Doit-il être placé à l'intérieur ou à l'extérieur du compartiment à refroidir ?
- 5 - (V/F) En général, les diagrammes $p-v$ et $T-s$ sont parcourus dans le même sens lors d'un cycle.
- 6 - Dans quel sens une machine réceptrice parcourt-elle un cycle dans le diagramme $p-V$?
- 7 - (V/F) Pour un système fermé qui évolue entre un état initial et un état final, la notation ΔX signifie $X_{\text{état final}} - X_{\text{état initial}}$.
Pour un système ouvert, la notation Δx signifie $x_{\text{en sortie}} - x_{\text{en entrée}}$.
- 8 - Pour un système de masse m , on note $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ et $E_{p,pes} = mgz$ (axe z vers le haut). On note également, pour un système ouvert ou fermé, $e_c = \frac{1}{2}v^2$ et $e_{p,pes} = gz$.

Relier chaque élément de gauche à un élément de droite :

1 ^{er} principe pour un système ouvert	$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_{p,pes} = W + Q$
1 ^{er} principe pour un système fermé	$\Delta H + \Delta E_c + \Delta E_{p,pes} = W_{\text{autre que pression}} + Q$
1 ^{er} principe pour un système fermé version monobare ($p_{\text{ext}} = \text{cst}$ et $p_i = p_f = p_{\text{ext}}$)	$\Delta u + \Delta e_c + \Delta e_{p,pes} = w + q$
1 ^{er} principe pour un système ouvert en terme de puissances	$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = w_{\text{autre que pression}} + q$
1 ^{er} principe pour un système fermé version monobare avec grandeurs massiques	$\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz) = w_i + q$
1 ^{er} principe pour un système fermé avec grandeurs massiques	$D_m(\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz)) = \Psi_i + \Psi_{th}$

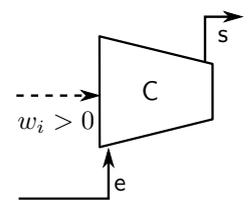
II Étude de quelques éléments des installations industrielles ★ | [●○○]

II.1 Compresseur ou pompe

Un compresseur (pour un gaz) ou une pompe (pour un liquide) permet de faire augmenter la pression du fluide.

Il faut pour cela fournir un travail massique indiqué w_i , qui est utilisé pour mettre en mouvement des parties mobiles de la machine (pâles, aubes, ou piston).

On supposera qu'on est en régime stationnaire, que la machine est calorifugée, que la différence d'énergie potentielle de pesanteur entre entrée et sortie est négligeable, et de même pour l'énergie cinétique du fluide.



- 1 – a – Qu'implique l'hypothèse de stationnarité sur les débits d'entrée et de sortie ?

- b – Donner la relation entre le travail indiqué massique w_i et la variation d'enthalpie massique $h_s - h_e$ du fluide.
- c – En appliquant le second principe au fluide en écoulement, montrer que $\Delta s \geq 0$.

On prend l'exemple d'un compresseur au fréon, qui fournit au fluide une puissance indiquée $\Psi_i = 0.3 \text{ kW}$. Le débit massique de l'écoulement est $D_m = 1.0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. À l'entrée du compresseur, l'enthalpie massique du fluide est $h_e = 190 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et sa pression est $p_e = 1 \text{ bar}$.

2 – Exprimer et calculer l'enthalpie massique h_s du fluide en sortie du compresseur.

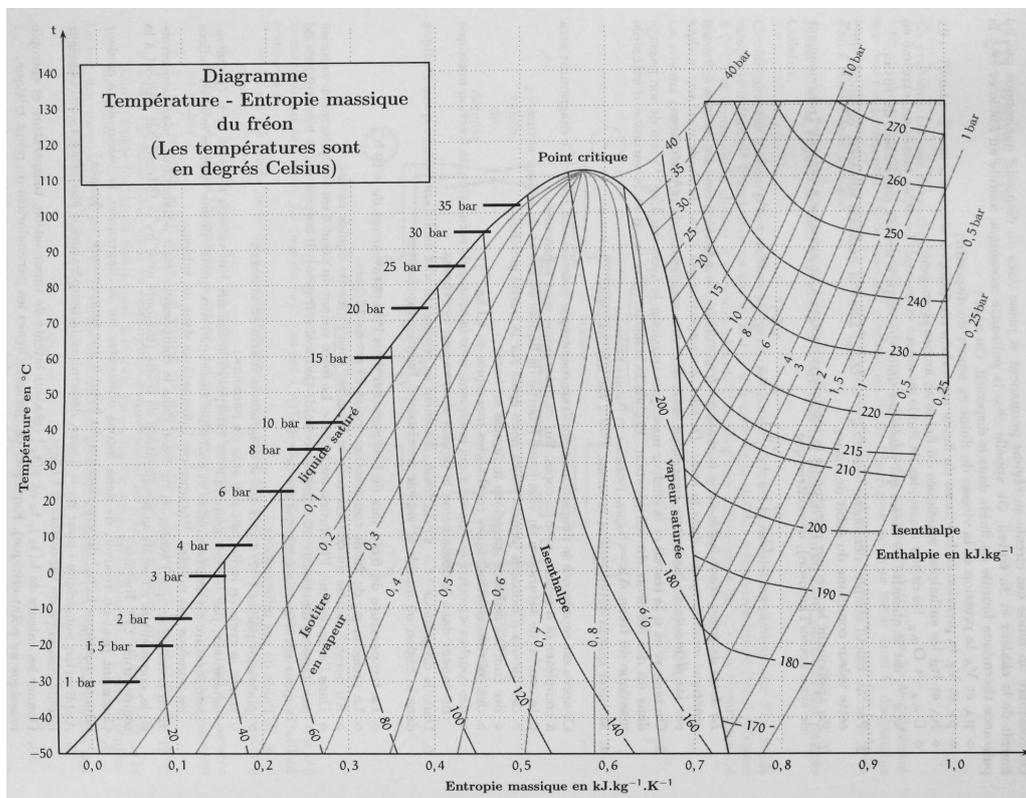
La valeur de h_s ne suffit pas pour déterminer la pression p_s en sortie. On voit en effet à l'aide du diagramme $T-s$ fourni ci-dessous qu'on peut être n'importe où sur l'isenthalpe $h = h_s$.

On suppose donc en plus que le compresseur fonctionne de façon réversible.

3 – Donner la valeur de la pression en sortie.

En réalité, le compresseur fonctionne de façon irréversible.

4 – Que peut-on alors dire du signe de $s_s - s_e$? Montrer alors à l'aide du diagramme $T-s$ que la pression en sortie est inférieure à celle du cas réversible, et donc que le compresseur est moins efficace.



II.2 Turbine

Un turbine permet de transformer une partie de l'énergie totale de l'écoulement en énergie mécanique. Le fluide passe donc d'un état d'enthalpie élevée (haute pression et température), à un état d'enthalpie plus basse, la différence étant récupérée sous forme de travail.

Concrètement, le fluide sous haute pression et température tape sur des parties mobiles (ailettes, aubages, pâles d'une hélice) qui entraînent la rotation d'un arbre. L'arbre peut ensuite entraîner une hélice de propulsion, ou bien un alternateur qui produit de l'électricité.

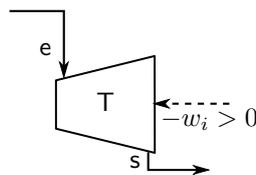
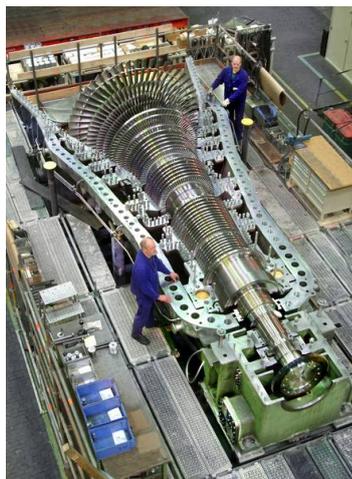
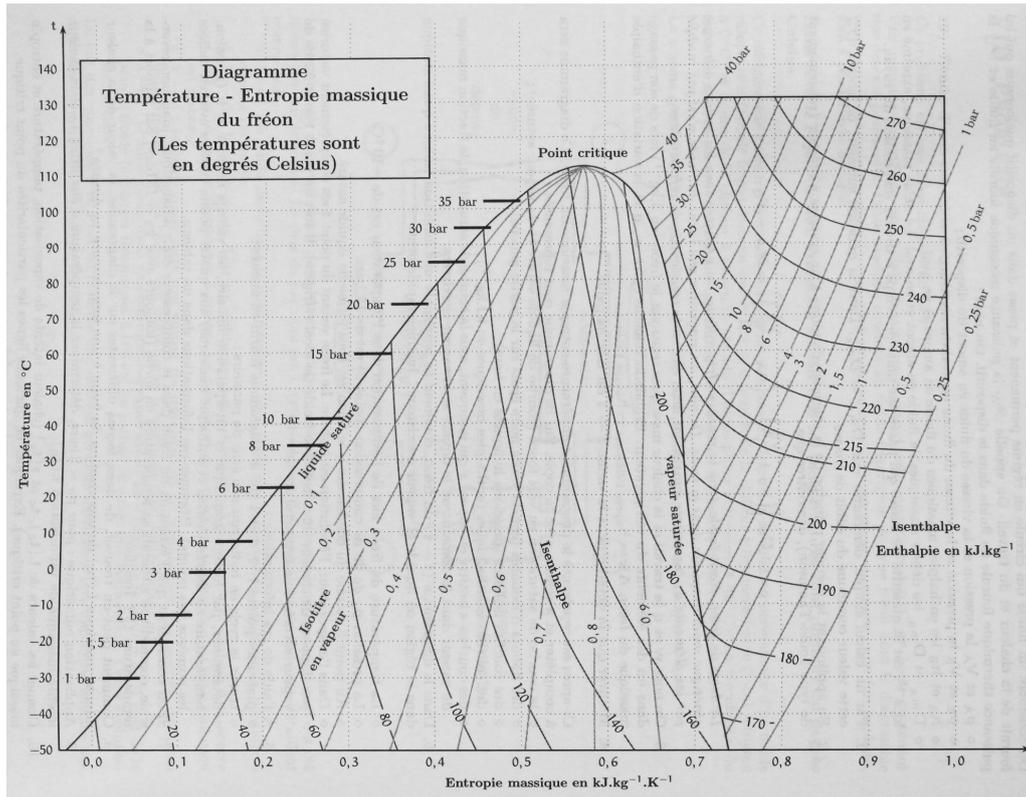
Les turbines sont ainsi employées dans les centrales d'électricité (nucléaires ou thermiques), les propulsions de bateaux, etc.

On supposera qu'on est en régime stationnaire, que la machine est parfaitement calorifugée, que la différence d'énergie potentielle de pesanteur entre entrée et sortie est négligeable, et de même pour l'énergie cinétique du fluide.

- 1 – a – Exprimer $h_s - h_e$ en fonction du travail massique indiqué reçu par le fluide.
- b – En déduire l'expression de la puissance $\mathcal{P}_{\text{cédée}}$ disponible sur l'arbre en rotation. On introduira le débit massique D_m dans la turbine.
- c – Écrire également le second principe pour le fluide en écoulement.

On prend comme exemple une turbine qui fait circuler du fréon. À l'entrée de la turbine, $p_e = 30 \text{ bar}$, $h_e = 250 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. En sortie, le fluide est à la pression $p_s = 15 \text{ bar}$.

- 2 – a – À l'aide du diagramme $T-s$, et en supposant l'évolution réversible, déterminer l'enthalpie massique en sortie. En déduire le travail massique indiqué récupéré sur l'arbre tournant.
- b – Récupère-t-on plus ou moins de travail si l'évolution n'est pas réversible?



Gauche : Turbine d'une centrale à vapeur (production d'électricité à partir de la combustion d'énergies fossiles), de taille moyenne. À mesure que le fluide évolue dans la turbine son enthalpie diminue, il se détend, et son volume massique v augmente. C'est pourquoi la turbine est de plus en plus large.

(Source : CC-by-sa MAN SE, issue du livre de O. Cleynen, Thermodynamique de l'ingénieur, p. 272)



Droite : schéma de principe d'une turbine, et une autre photographie de turbine.

II.3 Détendeur

Un détendeur est un élément sans parties mobiles, qui permet de faire baisser la pression du fluide en provoquant une perte de charge régulière ou singulière.



Un détendeur peut être réalisé à l'aide d'un étranglement (rétrécissement de la section d'une conduite, ou passage par un tube de petit diamètre appelé tube capillaire), ou encore en plaçant un matériau

poreux dans la conduite (tampon en coton si le fluide est un gaz). Dans ce dernier cas, la détente est appelée *détente de Joule-Thomson*.

De manière générale, on néglige les variations d'énergie potentielle de pesanteur, ainsi que celles d'énergie cinétique du fluide car les vitesses sont faibles.

1 – On considère un détendeur sans parties mobiles et calorifugé. Montrer que la détente est isenthalpique.

2 – Que dire de la température en entrée et en sortie si le fluide est modélisé par un gaz parfait ?

On s'intéresse maintenant au caractère réversible ou non d'une détente. On considère pour cela une particule de fluide qui traverse le détendeur. On utilise la seconde identité thermodynamique pour cette particule de fluide.

3 – a – Quelle est la propriété d'une particule de fluide qui permet d'utiliser cette identité ?

b – Simplifier l'identité compte tenu de la situation présente.

c – En déduire un lien entre δs_c et dp pour l'évolution de la particule de fluide. Conclure sur le caractère irréversible de la détente.

II.4 Tuyère

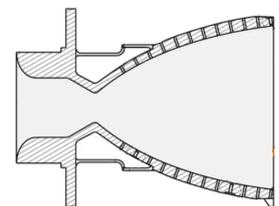
Dans une tuyère, le fluide subit une détente et gagne en énergie cinétique. Il n'y a pas de partie mobile, et on supposera la tuyère calorifugée.

Le fluide en entrée possède une enthalpie massique importante (donc haute pression et température), et lors de la détente cette enthalpie est transformée en énergie cinétique macroscopique.

Une tuyère est donc une sorte de détendeur, mais qui est optimisé pour que le fluide acquière une énergie cinétique importante en sortie.

On se place en régime permanent, on néglige la variation d'énergie potentielle de pesanteur. On suppose également que $v_e \ll v_s$.

À droite : Tuyère du moteur RL10 développé par la NASA pour la propulsion de ses lanceurs.
(Source : Wikipédia)



Vue en coupe d'une tuyère de fusée. La partie convergente accélère les gaz lorsqu'ils sont subsoniques (et donc incompressibles), la partie divergente lorsqu'ils sont supersoniques.

1 – À l'aide du premier principe, établir l'expression de la vitesse d'éjection des gaz en fonction de $h_e - h_s$.

On s'intéresse aux tuyères de la fusée Ariane 5. Le fluide est un gaz, modélisé par un gaz parfait, d'exposant adiabatique $\gamma = 1.2$ et de capacité thermique massique à pression constante $c_p = 1.0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ que l'on suppose indépendante de T . La pression et température d'entrée sont $p_e = 100 \text{ bar}$ et $T_e = 3.0 \times 10^3 \text{ K}$ (p et T sont élevées grâce, par exemple, à une combustion de carburant). On peut prendre $p_s = 1.0 \text{ bar}$ pour la pression de sortie. On suppose l'évolution réversible.

2 – a – Déterminer la température T_s en sortie.

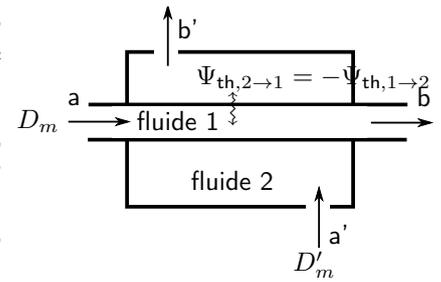
b – En déduire la vitesse d'éjection des gaz v_s .

II.5 Échangeur thermique

Un échangeur thermique est une enceinte calorifugée dans laquelle circulent deux fluides. Il n'y a pas de mélange de matière entre les deux fluides, mais seulement un échange thermique.

- 1 – On a vu en cours le premier principe appliqué à un système ouvert à une entrée et une sortie, qu'on peut écrire sous la forme $D_m \Delta h = D_m w_i + D_m q = 0$ si $w_i = q = 0$, soit encore $D_m h_s - D_m h_e = 0$.

Comment généraliser cette écriture dans le cas du système ouvert {échangeur thermique} qui possède deux entrées et deux sorties ?



- 2 – D'autre part, écrire le premier principe appliqué au système ouvert {conduite contenant le fluide 1}.

Remarque : Il existe d'autres types d'échangeurs thermiques. Par exemple une chaudière peut être vue comme un échangeur thermique, où le fluide passant dans la chaudière gagne de l'énergie thermique. D'autres échangeurs thermiques peuvent utiliser des changements d'états :

- Si le fluide passe de l'état liquide à l'état vapeur, ceci impose que le fluide reçoive de l'énergie thermique massique : $q_{\text{reçu}} > 0$. Cette énergie thermique est prise au milieu extérieur. Un tel échangeur thermique est appelé un **évaporateur**.

C'est un tel dispositif qui est placé à l'intérieur d'un réfrigérateur.

- Si le fluide passe de l'état vapeur à l'état liquide, ceci impose que le fluide cède de l'énergie thermique massique : $q_{\text{reçu}} < 0$. Cette énergie thermique est cédée au milieu extérieur. Un tel échangeur thermique est appelé un **condenseur**.

C'est un tel dispositif qui est placé à l'extérieur d'un réfrigérateur.



Gauche : Échangeur thermique à l'intérieur d'un réfrigérateur (appelé évaporateur). Droite : et à l'arrière du réfrigérateur (appelé condenseur).

II.6 Mélangeur

Un mélangeur est un dispositif à deux entrées et une sortie. Un exemple courant est un robinet d'eau avec une arrivée d'eau chaude, une arrivée d'eau froide, et une seule sortie.

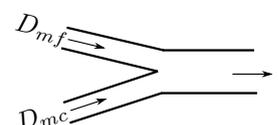
On note D_{mf} et D_{mc} les débits massiques de l'arrivée froide et de l'arrivée chaude, ainsi que T_f et T_c les températures correspondantes. On suppose que le fluide est le même sur les deux entrées, de capacité thermique massique c_p constante. On suppose également que le mélangeur est calorifugé et qu'on est en régime stationnaire.



Un type de mélangeur que vous utilisez quotidiennement.

- 1 – On a vu en cours le premier principe appliqué à un système ouvert à une entrée et une sortie, qu'on peut écrire sous la forme $D_m \Delta h = D_m w_i + D_m q = 0$ si $w_i = q = 0$, soit encore $D_m h_s - D_m h_e = 0$.

Comment généraliser cette écriture dans le cas du système ouvert {mélangeur} qui possède deux entrées et une sortie ?



- 2 – En déduire l'expression de la température T_s du fluide en sortie en fonction de T_f , T_c , D_{mf} et D_{mc} .

II.7 Autres dispositifs

On peut également mentionner :

- Séparateur de phases isobare : admet en entrée un mélange diphasique liquide-vapeur à l'équilibre, et possède deux sorties : une qui rejette la vapeur saturante sèche, et l'autre le liquide saturant seul.
- Mélangeur isobare : effectue le travail inverse du séparateur isobare.
- Diffuseur : effectue le travail inverse d'une tuyère. Le fluide voit sa vitesse diminuer entre l'entrée et la sortie.
- ...

III Exemple d'étude d'un système : la propulsion par turboréacteur

[● ● ○]

Rappel des machines thermiques étudiées jusqu'ici :

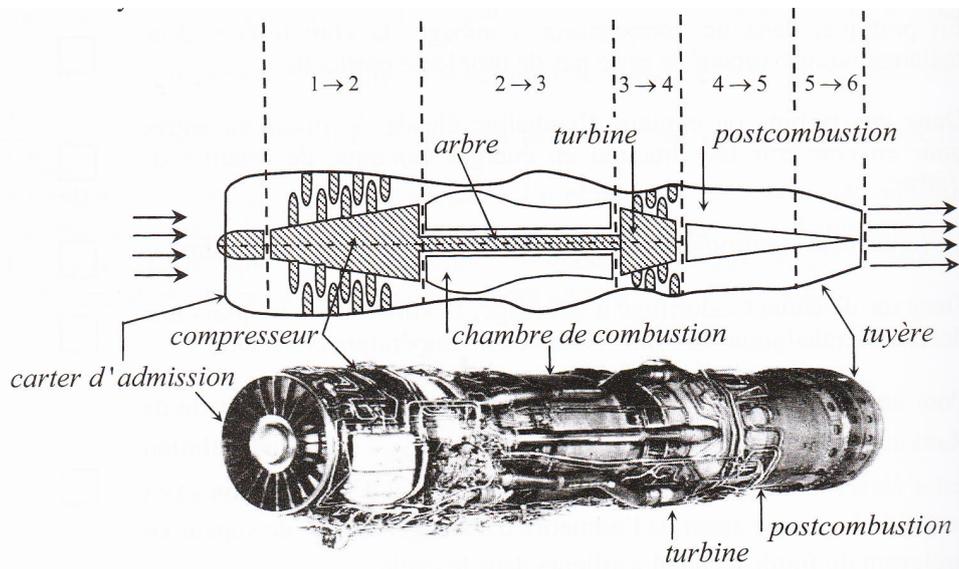
- Moteur de Stirling (TD rappels)
- Moteur à explosion avec cycle de Beau de Rochas (DM 6)
- Pompe à chaleur : avec sources idéales et pseudo-sources (TD chap. 4), simple (DS 3)
- Machine frigorifique : au fréon (TD chap. 5), au R134a (DM 8), congélateur à ammoniac (DS 3)
- Turboréacteur (TD chap. 7)
- Cycle de Brayton ou de Joule pour la turbine à gaz (TD chap. 7)
- Installation à turbine avec cycle de Rankine (DM 12)
- ? (DS 4)

Étude simplifiée d'un turboréacteur

On étudie un turboréacteur équipant les avions de chasse. Le schéma de principe simplifié est présenté ci-dessous.

L'air entre dans le turboréacteur par le carter d'admission. Il est comprimé par le compresseur ($1 \rightarrow 2$) jusqu'à la chambre de combustion, où du carburant est injecté en continu et où ce mélange air-carburant brûle ($2 \rightarrow 3$), ce qui a pour effet de produire un mélange gazeux sous haute température et haute pression, et donc d'enthalpie élevée. Cette enthalpie est convertie en travail par passage dans une turbine ($3 \rightarrow 4$) (qui sert à entraîner le compresseur), puis en énergie cinétique macroscopique par passage dans une tuyère ($5 \rightarrow 6$). Les gaz expulsés à grande vitesse par la tuyère génèrent une poussée sur l'avion, ce qui le fait avancer.

Pour obtenir une poussée plus importante, le pilote peut enclencher la postcombustion : le mélange subit alors une seconde combustion en sortie de turbine et avant la tuyère ($4 \rightarrow 5$).



Les différentes étapes et la modélisation que l'on en fait sont :

- Étape 1 → 2 : Le compresseur aspire l'air ambiant à la pression $p_1 = 1.0$ bar et à la température $T_1 = 288$ K, et le comprime jusqu'à la pression $p_2 = 6.15$ bar. On suppose cette compression adiabatique et réversible.
- Étape 2 → 3 : L'air entre ensuite dans la chambre de combustion, accompagné de carburant. Il est échauffé par combustion jusqu'à la température $T_3 = 1250$ K. On néglige les pertes de charge et cet échauffement est donc isobare.
- Étape 3 → 4 : L'air se détend partiellement dans la turbine, fournissant ainsi un travail indiqué à l'axe de la turbine. On suppose cette détente adiabatique et réversible.
- Étape 4 → 5 : Cette étape a lieu uniquement si la postcombustion est enclenchée. Les gaz subissent ici une deuxième combustion jusqu'à la température $T_5 = 1930$ K. On néglige les pertes de charge et cet échauffement est donc isobare.
- Étape 5 → 6 : Les gaz sont admis dans la tuyère à la pression p_5 et à vitesse supposée nulle, et s'y détendent jusqu'à la pression ambiante $p_6 = 1.0$ bar. On suppose cette détente adiabatique et réversible.

On suppose que le régime est permanent, que l'énergie potentielle de pesanteur ne varie pas, et que l'énergie cinétique du gaz ne varie que dans la tuyère. L'écoulement est unidimensionnel. L'air est modélisé comme un gaz parfait. L'exposant adiabatique $\gamma = c_p/c_v$ de l'air est constant égal à 1.4. On prendra $c_p = 1.0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Le débit massique est $D_m = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Enfin, le compresseur est entraîné par la turbine via un arbre. Le travail que le fluide fournit à la turbine est donc intégralement transféré au compresseur (on néglige toute perte).

On étudie d'abord le fonctionnement avec postcombustion enclenchée (ce qui est le cas au décollage ou en ascension rapide).

- 1 – Donner les expressions littérales puis les valeurs numériques de la température T_2 en sortie du compresseur, du travail massique indiqué $w_{i,12}$ fourni au fluide par le compresseur, et de la puissance indiquée $\Psi_{i,12}$ correspondante.
- 2 – Donner les expressions littérales puis les valeurs numériques de la température T_4 et de la pression p_4 en sortie de la turbine.
- 3 – Donner les expressions littérales puis les valeurs numériques de la température T_6 et de la vitesse des gaz éjecté v_6 en sortie de la tuyère. Donner la valeur de l'énergie cinétique massique e_{c6} correspondante.

4 – Donner les expressions littérales puis les valeurs numériques des transferts thermiques massiques q_{23} et q_{45} reçus par le fluide dans chacune des deux chambres de combustion.

On définit le rendement thermique du turboréacteur comme étant le rapport de l'énergie cinétique en sortie de la tuyère sur la chaleur apportée dans les chambres de combustion. Calculer ce rendement.

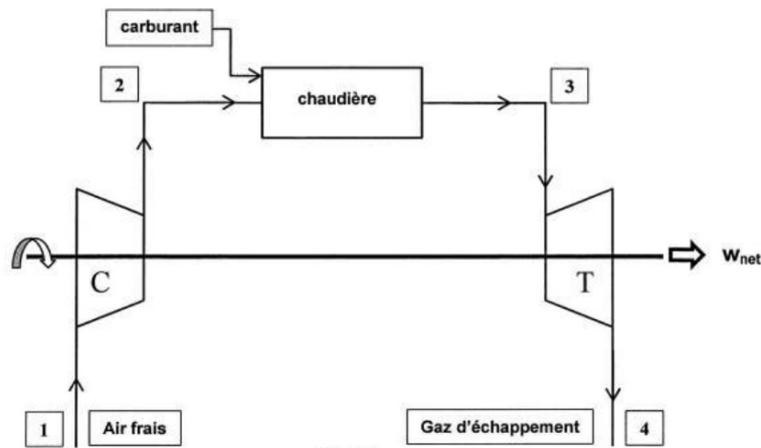
5 – Une fois en altitude de croisière, le vol s'effectue sans la postcombustion. L'étape $4 \rightarrow 5$ n'a donc pas lieu.

Calculer le rendement thermique du turboréacteur dans ce cas là.

IV Exemple d'étude d'un système : turbine à gaz

[••○]

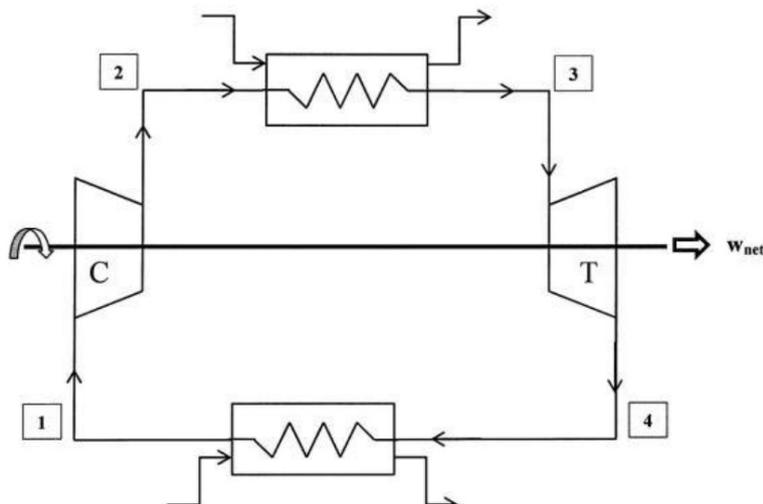
Ce problème étudie le fonctionnement d'une turbine à gaz, dont le schéma de principe est le suivant :



L'air frais pris à l'atmosphère est comprimé à haute pression dans le compresseur (C), puis il est admis dans la chambre de combustion (chaudière). Les gaz chauds résultants de la combustion se détendent alors dans la turbine (T) avant d'être évacués dans l'atmosphère sous forme de gaz d'échappement.

Ceci permet donc, à partir d'énergie thermique fournie par la chaudière, de récupérer un travail sous la forme de la rotation de l'arbre de la turbine. Une partie de ce travail est utilisée pour entraîner le compresseur, l'autre partie, que l'on notera w_{net} , est utilisée selon les besoins pour lesquels la machine est conçue : par exemple pour entraîner un alternateur pour produire de l'électricité s'il s'agit d'une centrale thermique, ou pour entraîner une hélice de propulsion.

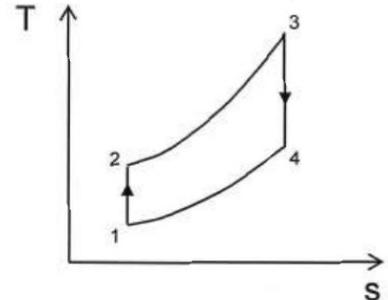
Le cycle ouvert présenté dans la première figure peut être modélisé par le cycle fermé suivant :



Les évolutions de compression et de détente restent inchangées. Le phénomène de combustion est remplacé par une évolution d'échange de chaleur à pression constante avec une source de chaleur externe. L'échappement des gaz brûlés et l'admission d'air frais est remplacé par une évolution d'échange de chaleur à pression constante avec le milieu extérieur.

On effectue un certain nombre d'hypothèses afin de pouvoir étudier simplement le cycle. En particulier, on suppose que l'air subit une succession de 4 évolutions réversibles au cours du cycle, qui sont également tracées sur le diagramme $T-s$:

- Au point 1 l'air entre dans le compresseur pour y subir une compression isentropique jusqu'au point 2.
- Entre les points 2 et 3 l'air échange de la chaleur avec un fluide extérieur dans un échangeur de chaleur isobare modélisant la chaudière.
- Au point 3 l'air entre dans la turbine pour y subir une détente isentropique jusqu'au point 4.
- Entre les points 4 et 1 l'air échange de la chaleur avec l'atmosphère dans un échangeur de chaleur isobare. L'air du cycle est ainsi refroidi.



On utilise le modèle du gaz parfait pour l'air. L'exposant adiabatique est $\gamma = 1.4$ supposé constant, et la capacité thermique massique à pression constante $c_p = 1.0 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ est également supposée indépendante de T .

Étude des différentes étapes

- 1 - Tracer l'allure du cycle dans le diagramme $p-v$. Les sens de parcours des cycles sont-ils cohérents ?
- 2 - Exprimer, en fonction des différentes températures des points 1, 2, 3 et 4 du cycle et de la capacité thermique massique de l'air :
 - a - Les transferts thermiques subis par l'air dans les deux échangeurs de chaleur que l'on notera respectivement q_{23} et q_{41} ;
 - b - le travail massique indiqué, noté w_{12} reçu par l'air en traversant le compresseur ;
 - c - le travail massique w_{34} reçu par l'air en traversant la turbine.
 - d - Exprimer le travail massique w_{net} (défini en début d'énoncé) en fonction des travaux w_{12} et w_{34} .
En déduire une expression de w_{net} uniquement en fonction des différentes températures des points 1, 2, 3 et 4 du cycle et de la capacité thermique massique de l'air.

Expression du rendement et optimisation

- 3 -
 - a - Définir le rendement de l'installation. L'exprimer en fonction des différentes températures des points 1, 2, 3 et 4 du cycle et de la capacité thermique massique de l'air.
 - b - Montrer qu'on peut le mettre sous la forme : $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$ (il faut d'abord montrer que $T_2 T_4 = T_1 T_3$).
- 4 - On introduit le taux de compression défini par : $\tau = \frac{p_2}{p_1}$.
 - a - Montrer alors que l'on peut mettre le rendement sous la forme : $\eta = 1 - \frac{1}{z}$ avec z que l'on exprimera uniquement en fonction de τ et du rapport des capacités thermiques à pression et volume constant γ .
 - b - D'après la question précédente, sur quelles grandeurs peut-on influencer pour augmenter le rendement ?
Au cours d'une étude de conception du dispositif, quel autre élément faudra-t-il prendre en compte pour concevoir la turbine à gaz ?

- 5 - On choisit de faire fonctionner la turbine entre $T_1 = 300 \text{ K}$ (température de l'air extérieur admis), et $T_3 = 1000 \text{ K}$ (température maximale que peuvent supporter les aubages de la turbine). On choisit également un rapport de compression tel que $z = 2.0$.

On remarque que si on reprend les résultats précédents, on a les relations $T_2 = zT_1$ et $T_3 = zT_4$.

- a - Donner la valeur numérique du rendement, ainsi que celle du travail massique w_{net} récupéré. Donner la valeur de la puissance correspondante si le débit massique est de 1.0 kg/s .

Cette turbine est utilisée pour produire de l'électricité. Sa puissance correspond-elle à une grosse installation ou un a une installation modeste ?

- 6 - À T_3 et T_1 fixées, montrer que le travail w_{net} est maximal pour une valeur de z que l'on déterminera en fonction de T_3 et T_1 . Faire l'application numérique avec les valeurs précédentes.