

Thermodynamique des installations industrielles

-  Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
-  Difficulté technique et calculatoire ;
-  Exercice important.

Flasher ce code pour
accéder aux corrigés



Questions de cours

18.1 - Démontrer le premier principe de la thermodynamique appliqué à un fluide en écoulement stationnaire.

La démonstration est notoirement très longue : outre l'habituel travail de mémorisation, les étudiants doivent également faire un travail de concision, pour tout dire en un minimum de mots et de temps.

18.2 - Pour un composant thermodynamique au choix de l'interrogateur, indiquer son rôle et simplifier l'écriture du premier principe en justifiant les hypothèses faites.

Les composants à connaître sont le détenteur, la turbine, le compresseur, la tuyère, l'échangeur simple flux, l'échangeur double flux, le mélangeur et le séparateur.

18.3 - Rappeler les quatre composants constituant une machine frigorifique, en expliquant leur nécessité.

J'ai traité en cours l'exemple de la pompe à chaleur, mais la structure est identique dans toutes les machines frigorifiques : compresseur, condenseur (échangeur avec la source chaude), détenteur, évaporateur (échangeur avec la source froide). L'idée essentielle que les étudiants doivent savoir expliquer est qu'une machine frigorifique réalise un transfert thermique effectif de sens opposé au sens naturel ... mais lorsque le fluide caloporteur est au contact des sources dans les échangeurs, les « vrais » transferts thermiques ne peuvent se faire que dans le sens naturel. Ainsi, le fluide doit être plus froid que la source froide lorsqu'il est en contact avec elle dans l'évaporateur et plus chaud que la source chaude dans le condenseur. Or en sortie du condenseur le fluide est au moins à la température de la source chaude, le refroidissement adiabatique dans le détenteur est donc indispensable avant l'entrée de l'évaporateur. De même, en sortie de l'évaporateur le fluide est au plus à la température de la source froide, l'échauffement adiabatique dans le compresseur est donc nécessaire également.

18.4 - Dans un réfrigérateur, qui du condenseur ou de l'évaporateur est placé dans le compartiment réfrigéré ? à l'extérieur du réfrigérateur ? Pourquoi ?

Le condenseur et l'évaporateur sont deux échangeurs dans lesquels le fluide frigorigène change d'état : dans le condenseur, il se liquéfie (= il se condense) en cédant de l'énergie au milieu extérieur alors que dans l'évaporateur, il se vaporise en prélevant de l'énergie à son environnement. Dans un réfrigérateur, le fluide doit prélever de l'énergie au compartiment réfrigéré, c'est donc l'évaporateur qui s'y trouve, et la céder à l'extérieur, dans lequel se trouve le condenseur.

18.5 - Dans une pompe à chaleur, qui du condenseur ou de l'évaporateur est placé au contact du circuit de chauffage ? à l'extérieur de la maison ? Pourquoi ?

Le raisonnement est exactement l'inverse du réfrigérateur, le condenseur se trouve au contact du circuit de chauffage et l'évaporateur à l'extérieur de la maison.

Composants thermodynamiques élémentaires

Exercice 1 : Turbine à gaz

oral banque PT | 💡 2 | ✂️ 1



- ▷ Étude d'un composant thermodynamique ;
- ▷ Modèle du gaz parfait ;
- ▷ Bilan d'entropie.

De la vapeur d'eau assimilée à un gaz parfait évolue dans une turbine horizontale, de section constante $\Sigma = 1 \text{ m}^2$, munie d'une hélice. À l'extérieur, la température est constante égale à $T_0 = 35^\circ\text{C}$.

La vapeur est admise dans la turbine à la température $T_1 = 400^\circ\text{C}$ et pression $P_1 = 6,0 \text{ bar}$, et ressort à la température $T_2 = 100^\circ\text{C}$ sous pression $P_2 = 1,0 \text{ bar}$. Le débit au travers de la turbine vaut $D = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

On donne l'expression de l'entropie molaire d'un gaz parfait :

$$S_m(T, P) = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \ln \frac{T}{T_1} - R \ln \frac{P}{P_1} + S_m(T_1, P_1).$$

Données : masse molaire de l'eau $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, coefficient isentropique $\gamma = C_{P,m}/C_{V,m} = 1,3$.

- 1 - Rappeler l'expression des deux principes pour un fluide en écoulement stationnaire.
- 2 - On néglige les variations d'énergie cinétique. Que dire des échanges de chaleur entre le gaz et l'extérieur ? Montrer que la puissance cédée à la turbine est maximale dans l'hypothèse d'un écoulement adiabatique.
- 3 - Calculer la variation d'entropie entre l'entrée et la sortie. Est-ce en contradiction avec l'hypothèse d'un écoulement adiabatique ?
- 4 - Calculer la puissance cédée à la turbine en la supposant réversible.
- 5 - Calculer la vitesse du fluide à l'entrée et à la sortie de la turbine. Peut-on vraiment négliger la variation d'énergie cinétique ?

Exercice 2 : Compresseur étagé

💡 2 | ✂️ 2



- ▷ Étude d'un composant thermodynamique ;
- ▷ Modèle du gaz parfait.

On considère un gaz parfait, dont les capacités thermiques massiques à pression et volume constants sont respectivement

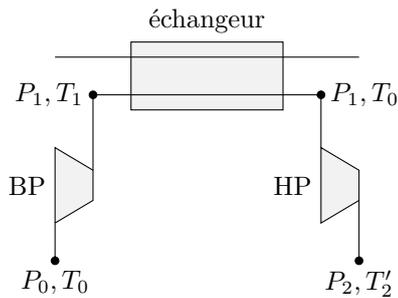
$$c_P = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} = 1,0 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \quad \text{et} \quad c_V = \frac{r}{\gamma - 1} = 0,714 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

où $r = R/M$, M étant la masse molaire du gaz. Partant de conditions initiales ($P_0 = 1 \text{ bar}$, $T_0 = 273 \text{ K}$), le gaz est comprimé jusqu'à la pression $P_2 = 25 \text{ bar}$. On appelle $\beta = P_2/P_0$ le taux de compression.

Cet exercice propose de comparer les performances d'un compresseur simple à celles d'un compresseur étagé, où la compression est réalisée en deux étapes successives séparées d'un refroidissement du fluide. On suppose les transformations dans les compresseurs réversibles et sans variation d'énergie cinétique et potentielle du fluide.

- 1 - Exprimer la température T_2 en sortie du compresseur en fonction du taux de compression et de la température d'entrée T_0 .
- 2 - Montrer que le travail indiqué reçu par le fluide dans le compresseur simple vaut

$$w = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} T_0 \left(\beta^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right).$$



La température T_2 est relativement élevée, et peut risquer d'endommager certains éléments du compresseur, en particulier les soupapes d'ouverture et de fermeture. Pour contourner cette difficulté, on préfère utiliser un compresseur à deux étages, qui permet d'atteindre le même rapport de compression mais avec une température finale plus faible.

- ▷ Dans l'étage basse pression (BP), le fluide est comprimé de façon isentropique jusqu'à la pression P_1 . On note $\beta_1 = P_1/P_0$ le taux de compression correspondant.
- ▷ Dans l'étage haute pression (HP), le fluide est comprimé de façon isentropique jusqu'à la pression P_2 . On note $\beta_2 = P_2/P_1$ le taux de compression correspondant.
- ▷ Entre les deux étages, le fluide subit un refroidissement isobare dans un échangeur thermique jusqu'à retrouver sa température initiale T_0 .

3 - Montrer que le travail indiqué total w' que le fluide reçoit dans le compresseur étagé vaut

$$w' = \frac{\gamma^r}{\gamma - 1} T_0 \left(\beta_1^{(\gamma-1)/\gamma} + \beta_2^{(\gamma-1)/\gamma} - 2 \right).$$

4 - On admet que w' est minimal si la pression de l'étage intermédiaire vérifie

$$P_1 = \sqrt{P_0 P_2}.$$

Calculer littéralement et numériquement β_1 et β_2 lorsque cette condition est satisfaite.

5 - Calculer numériquement T_1 et T'_2 dans le cas du compresseur optimisé. Comparer à la température T_2 obtenue précédemment. Conclure.

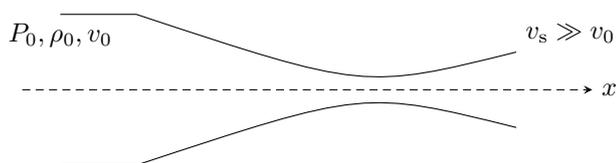
6 - Calculer numériquement le travail indiqué du compresseur étagé optimisé, et comparer au travail dépensé pour un compresseur mono-étagé. Conclure.

Exercice 3 : Tuyère calorifugée

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2



- ▷ Étude d'un composant thermodynamique ;
- ▷ Modèle du gaz parfait.



Une tuyère est une simple conduite de section variable, dans laquelle un gaz se détend tout en étant accéléré. On étudie l'écoulement d'un gaz parfait dans une tuyère calorifugée. On suppose négligeable la vitesse d'entrée du fluide par rapport à sa vitesse de sortie. Les grandeurs d'entrée de la tuyère sont indicées 0.

1 - Montrer que $h(x) + \frac{1}{2}v(x)^2 = \text{cte}$, avec h l'enthalpie massique du gaz et v la vitesse d'écoulement dans la tuyère.

2 - En déduire que

$$v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P(x)}{\rho(x)} \right)}$$

avec γ le coefficient isentropique du gaz.

3 - Dans l'hypothèse d'un écoulement réversible, établir alors la loi de Barré de Saint Venant,

$$v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{P(x)}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}.$$

Machines thermiques

Exercice 4 : Cycle réfrigérant au CO₂oral banque PT |  1 |  1 | 

- ▷ Cycle frigorifique ;
- ▷ Exploitation d'un diagramme des frigoristes.

Le CO₂ (R744) est un fluide frigorigène qui est de plus en plus utilisé car il est considéré comme un fluide écologique : son impact sur la couche d'ozone est nul et son impact sur l'effet de serre est faible¹. Ses caractéristiques thermodynamiques sont excellentes et permettent d'envisager un bel avenir pour ce fluide, malgré les pressions de service beaucoup plus élevées que celles des HFC qui peuvent poser des problèmes de sécurité. Le diagramme des frigoristes du CO₂ est représenté figure 1.

On s'intéresse à un cycle réfrigérant, parcouru par du CO₂, selon les étapes suivantes :

- ▷ une compression adiabatique réversible d'un état 1 ($P_1 = 35$ bar, vapeur saturante sèche) jusqu'à $P_2 = 90$ bar ;
- ▷ un refroidissement isobare jusqu'à $T_3 = 40$ °C ;
- ▷ une détente adiabatique jusqu'à la pression $P_4 = P_1$;
- ▷ une transformation isobare jusqu'à retrouver l'état de départ.

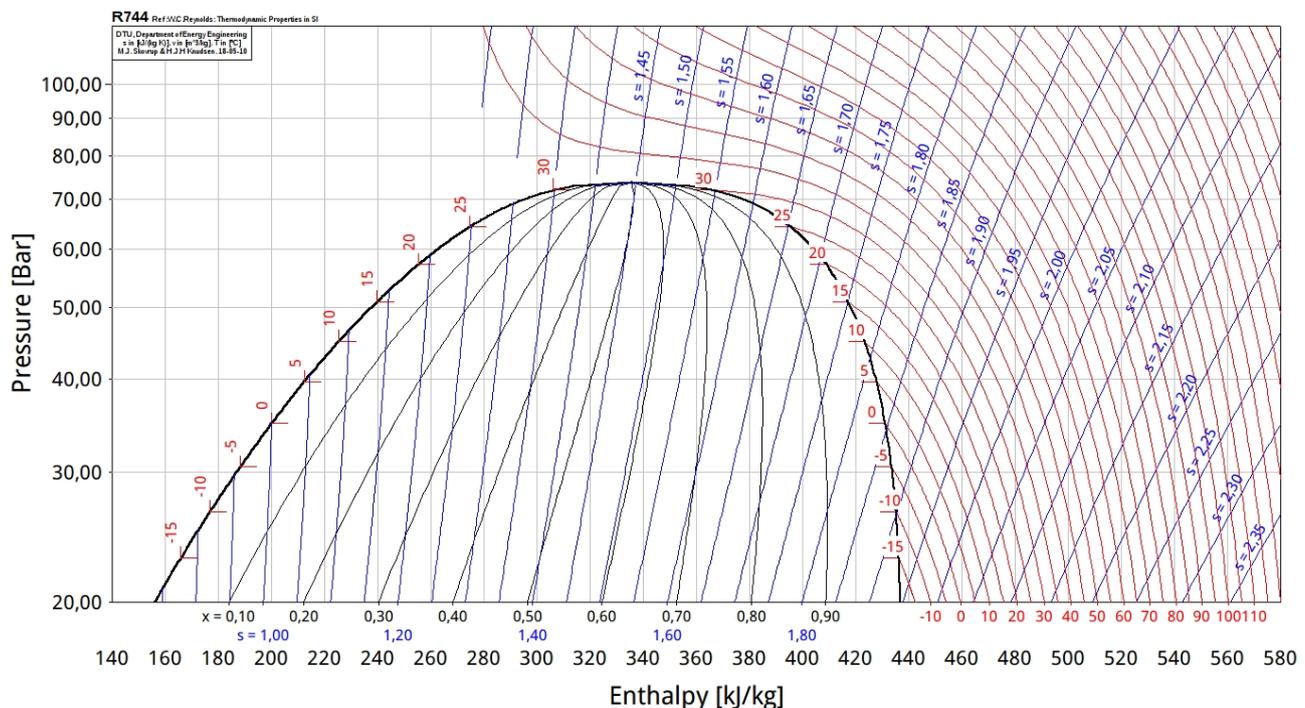


Figure 1 – Diagramme des frigoristes du CO₂.

- 1 - Justifier l'allure des courbes isothermes en utilisant les cas limites.
- 2 - Dessiner le cycle sur le diagramme.
- 3 - On utilise cette machine en fonctionnement frigorifique. Dans quel sens le cycle est-il parcouru ?
- 4 - Calculer la chaleur échangée avec la source froide.
- 5 - Calculer l'efficacité du cycle. Comment l'améliorer ?

1. Historiquement, les fluides massivement utilisés étaient des chlorofluorocarbures CFC, au très fort potentiel d'effet de serre et à fort impact sur la couche d'ozone. Ils ont été remplacés à partir des années 1980 par les hydrofluorocarbures HFC, sans impact sur la couche d'ozone mais dont le potentiel de réchauffement global à 100 ans (qui quantifie leur impact de long terme sur le réchauffement climatique) est plusieurs centaines voire milliers de fois supérieur à celui du CO₂, d'où la nécessité de leur trouver des alternatives.

Exercice 5 : Cycle de Hirn d'une centrale thermique



- ▷ Cycle moteur ;
- ▷ Exploitation d'un diagramme entropique.

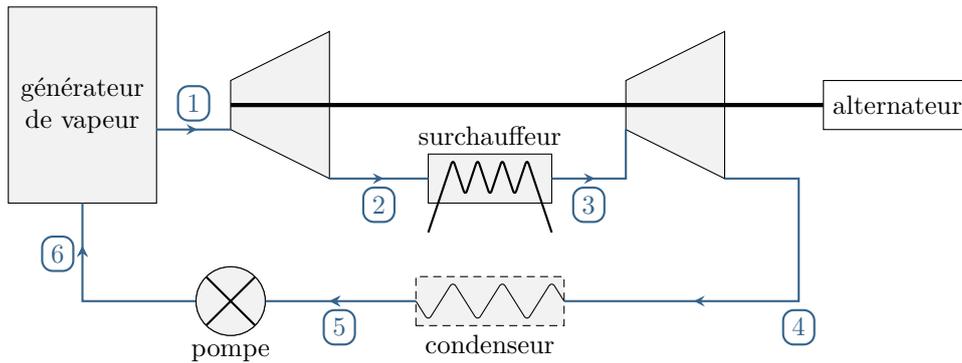


Figure 2 – Turbine à vapeur étagée.

On s'intéresse à l'installation représentée figure 2, qui modélise une centrale thermique à flamme (gaz ou charbon). Le fluide thermodynamique est de l'eau, qui suit un cycle de Hirn avec resurchauffe.

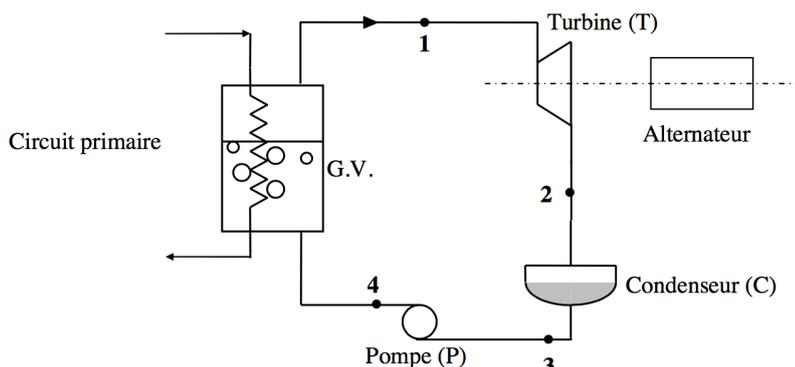
L'eau liquide est chauffée par une chaudière thermique dans un générateur de vapeur, qui débite de la vapeur d'eau à 550 °C et 100 bar (état 1). Cette vapeur subit une détente adiabatique réversible dans une première turbine dite haute pression, d'où elle sort à la pression de 10 bar (état 2). Un surchauffeur isobare, lui aussi relié à la chaudière, ramène la vapeur à la température initiale (état 3). La vapeur passe ensuite dans la seconde turbine, dite basse pression, d'où sort de l'eau à la température de 40 °C (état 4). Cette eau est envoyée dans un condenseur d'où elle sort à l'état de liquide juste saturant (état 5), puis elle est pompée de manière adiabatique réversible (état 6) et renvoyée en entrée du générateur de vapeur où elle subit un échauffement isobare. Les arbres des deux turbines sont liés entre eux.

- 1 - Tracer le cycle parcouru par l'eau dans le diagramme entropique de la figure 3. Pourquoi le point 6 est-il confondu avec le point 5 ? Commenter son sens de parcours.
- 2 - En déduire la température de l'eau dans l'état 2 et l'état de l'eau dans l'état 4.
- 3 - Déterminer les enthalpies massiques de l'eau aux six points du cycle. Comment interpréter physiquement l'égalité $h_5 = h_6$?
- 4 - Déterminer le travail massique disponible sur l'arbre des turbines.
- 5 - Si on considère que l'alternateur a un rendement électromécanique de 90 %, déterminer le débit d'eau à imposer pour obtenir une puissance électrique de 400 MW.
- 6 - Quelle est la quantité de chaleur massique dépensée au surchauffeur ?
- 7 - Calculer le rendement thermodynamique de l'installation.

Exercice 6 : Cycle de Rankine d'une centrale nucléaire



- ▷ Cycle moteur ;
- ▷ Exploitation d'une table thermodynamique ;
- ▷ Tracé qualitatif d'un diagramme des frigoristes.



Le circuit secondaire d'une centrale nucléaire est constitué en première approche d'un générateur de vapeur (GV), d'une turbine (T) reliée à un alternateur, d'un condenseur (C) et d'une pompe d'alimentation secondaire (P) comme l'illustre la figure ci-contre.

3 - Calculer le titre massique en vapeur x_2 et l'enthalpie massique h_2 . En déduire le travail massique indiqué w_{iT} échangé par le fluide dans la turbine. Calculer sa valeur numérique.

4 - En raisonnant à partir de l'identité thermodynamique, montrer que le travail massique indiqué fourni par la pompe au fluide vaut

$$w_{iP} = v(P_4 - P_3),$$

avec v le volume massique du liquide supposé incompressible. Calculer sa valeur numérique et commenter.

5 - Déterminer la température T_3 . Calculer la chaleur massique q_{eC} échangée par le fluide avec le condenseur.

6 - Calculer la chaleur massique q_{eGV} échangée par le fluide dans le générateur de vapeur.

7 - En déduire le rendement de ce cycle puis celui du cycle de Carnot de même sources froide et chaude. Commenter.

Exercice 7 : Turboréacteur simple flux

d'après écrit CCINP PC 2020 | 💡 2 | ✂️ 2 | ⚙️



- ▷ Étude d'un moteur;
- ▷ Modèle du gaz parfait.

On qualifie de *turbomachines* les machines transférant de l'énergie entre un fluide et un axe en rotation. Elles présentent deux grands avantages par rapport aux moteurs à piston : d'une part, leur conception nécessite moins de pièces et permet une masse plus légère ; d'autre part le fluide caloporteur peut être directement utilisé comme moyen de propulsion en le laissant se détendre dans une tuyère. En revanche, leur rendement chute drastiquement à faible puissance et leur temps de réponse est conséquent. Ainsi, les turbomachines sont omniprésentes en aéronautique mais complètement absentes, par exemple, du secteur automobile.

Cet exercice propose d'étudier un modèle simple de turbomachine : un turboréacteur à simple flux. Ces turboréacteurs étaient très utilisés au milieu du XX^e siècle, mais ils sont fortement consommateurs de carburant et très bruyants, si bien qu'ils sont aujourd'hui réservés à quelques avions militaires.

On considère un avion volant à une vitesse de croisière $V = 260 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ par rapport à l'air considéré au repos. À cette altitude, l'air est à 34,5 kPa et -40°C (état A). L'objectif est de calculer la force de poussée produite par le turboréacteur, donnée par

$$F = D_m(v_e - V)$$

avec D_m le débit d'air au sein du turboréacteur et v_e la vitesse d'éjection des gaz en sortie de tuyère, exprimée dans le référentiel lié à la tuyère.

Le turboréacteur est schématisé figure 4. L'air y traverse les cinq composants suivants, avec un débit massique constant $D_m = 45 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

- ▷ Le **diffuseur** permet de ralentir le flux d'air de manière adiabatique réversible, de sorte qu'en sortie du diffuseur (état B) l'énergie cinétique du gaz est négligeable.
- ▷ Le **compresseur** comprime l'air avec un rapport de compression $r = P_C/P_B = 10$. Le compresseur étant imparfait, la compression n'est pas parfaitement isentropique : en sortie du compresseur (état C), on a $T_C = 230^\circ\text{C}$.
- ▷ L'air est mélangé de manière isobare à du carburant enflammé dans la **chambre de combustion**, ce qui permet de porter la température du mélange à 1200°C (état D).
- ▷ La **turbine** a pour rôle de prélever juste assez d'énergie pour alimenter le compresseur. Le mélange de gaz y subit une détente adiabatique réversible (état E).
- ▷ Enfin, l'air subit également une détente adiabatique réversible dans la **tuyère**, sans échange de travail mais en augmentant fortement sa vitesse. À la sortie de la tuyère (état F), le mélange gazeux est rejeté dans l'atmosphère à la pression atmosphérique.

Toute l'étude est menée dans le référentiel lié au turboréacteur. Le mélange gazeux est assimilé à un gaz parfait d'exposant adiabatique $\gamma = 1,35$ et de capacité thermique isobare $c_p = 1,1 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ constants. Les variations d'énergie potentielle sont négligées. L'énergie cinétique du fluide est négligeable entre l'entrée du compresseur et la sortie de la turbine.

1 - Représenter le cycle suivi par le mélange gazeux dans un diagramme (T, s) qualitatif. On rappelle qu'une isobare s'y représente par une branche d'exponentielle croissante.

2 - Déterminer la température T_B en fonction de T_A , V et c_p ; puis la pression P_B en fonction de P_A , T_A , T_B et γ .

3 - Déterminer le travail massique w_{comp} fourni à l'air par le compresseur.

4 - Que vaudrait la température T'_C si la compression était idéale, c'est-à-dire isentropique avec le même rapport de compression ? Quelle serait alors le travail massique w'_{comp} fourni par le compresseur ? En déduire son rendement isentropique.

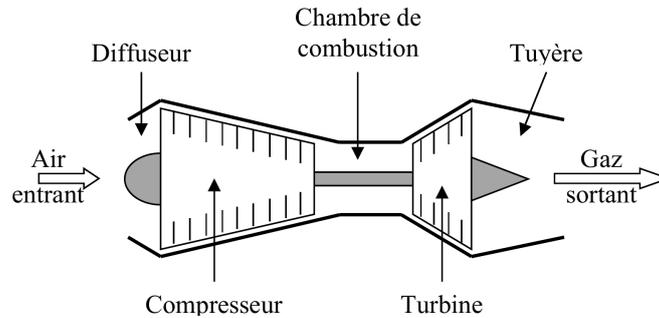


Figure 4 – Schéma d'un turboréacteur simple flux.

- 5 - Déterminer la puissance \mathcal{P}_{ch} reçue par le mélange gazeux dans la chambre de combustion.
- 6 - Sachant que le travail fourni par la détente du gaz dans la turbine est intégralement reçu par le compresseur, exprimer la température T_E en fonction de T_B, T_C et T_D . En déduire la valeur de la pression P_E .
- 7 - Déterminer la température T_F à laquelle le mélange gazeux sort de la tuyère. En déduire la vitesse v_e d'éjection des gaz.
- 8 - Déterminer la puissance \mathcal{P} fournie au turboréacteur par la force propulsive. En déduire son rendement thermodynamique. Commenter la valeur obtenue en la comparant au rendement d'autres installations motrices.

Autres installations

Exercice 8 : Puits canadien

exemple officiel oral CCP PSI | 💡 2 | ✂️ 2 | ⚙️



- ▷ *Système ouvert mésoscopique ;*
- ▷ *Modèle du gaz parfait ;*
- ▷ *Analyse de résultats expérimentaux.*

Lorsqu'un fluide de débit massique D_m s'écoule en régime stationnaire au travers d'une machine thermique, on peut lui appliquer le premier principe sous la forme ci-dessous (voir figure 5 page 10).

$$D_m [(e_{c2} - e_{c1}) + (e_{p2} - e_{p1}) + (h_2 - h_1)] = P_{th} + P_m$$

où la puissance thermique P_{th} et la puissance mécanique P_m reçues par le fluide de la part de la machine s'expriment en fonction de sa variation d'énergie cinétique, d'énergie potentielle et d'enthalpie massique.

- 1 - Exprimer la variation d'enthalpie massique pour un gaz parfait.

Le puits canadien est un système de préchauffage passif de l'air utilisant l'inertie thermique du sol (voir figure 6 page 10). Sous nos latitudes, la température moyenne du sol vaut environ $T_{sol} = 11^\circ\text{C}$ et on fait l'approximation que ses variations sont négligeables à la profondeur où est enterré le tuyau (2 m). On se place donc en régime stationnaire. On assimile l'air à un gaz parfait en écoulement incompressible. L'air qui circule dans le tuyau horizontal reçoit de la chaleur de la part du sol sous forme conducto-convective et on peut modéliser par

$$dP_{th} = \alpha dx (T_{sol} - T(x))$$

la puissance thermique reçue par un élément de longueur dx d'air.

- 2 - Quelle est la dimension de α ?

3 - En effectuant un bilan d'énergie en régime stationnaire sur un système élémentaire qu'on précisera, montrer que la température de l'air à l'intérieur du tuyau horizontal est solution de l'équation différentielle

$$\frac{dT}{dx} + \frac{T(x) - T_{sol}}{\ell_0} = 0$$

où ℓ_0 s'exprime en fonction de D_m , débit massique de l'air, c_P capacité thermique massique de l'air, et du coefficient α .

4 - Résoudre cette équation différentielle. On appelle T_{ext} la température de l'air extérieur. Quelle est la température maximale que peut atteindre l'air à l'intérieur du tuyau ?

- 5 - En déduire la puissance thermique reçue par l'habitation lorsque l'air a parcouru une longueur L de tuyau.

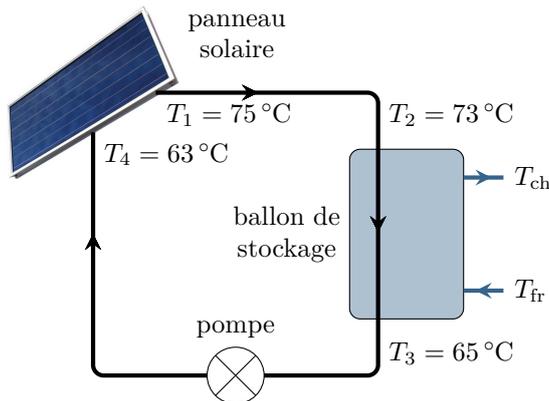
On considère le réseau expérimental de courbes $P_{th}(L)$ donné figure 7 page 10, obtenu pour une température du sol $T_{sol} = 11\text{ °C}$ et une température d'entrée de l'air $T_{ext} = -5\text{ °C}$. D est le diamètre du tuyau, $Q = D_m/\mu$ le débit volumique de l'écoulement d'air.

6 - Justifier que le palier atteint ne dépend que du débit volumique Q . Comment, à l'aide de ces courbes, accéder à la valeur numérique de ℓ_0 ? Comment justifier, pour un débit donné, l'existence d'un réseau de courbes qui varient en fonction du diamètre D du tuyau?

Exercice 9 : Chauffe-eau solaire

💡 3 | ✂ 2

- 
 ▷ Autre cycle thermodynamique ;
 ▷ Transitoire thermique ;
 ▷ Modèle du liquide indilatable et incompressible.



Une méthode économique et écologique pour chauffer de l'eau domestique consiste à utiliser des panneaux solaires thermiques². L'énergie du rayonnement solaire est captée par un fluide caloporteur antigel, un mélange d'eau et de propylène glycol à 30 % en masse, qui la transfère à l'eau sanitaire du ballon grâce à un échangeur thermique.

Les panneaux solaires ont une surface $S = 6\text{ m}^2$ et sont inclinés pour recevoir le rayonnement solaire en incidence normale. La circulation est imposée par une pompe qui maintient un débit massique constant $D = 180\text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ en période de chauffe.

Données :

- ▷ Caractéristiques thermodynamiques d'une solution d'eau glycolée à 30 % :
 → capacité thermique massique $c = 3,9 \cdot 10^3\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
 → masse volumique $\rho = 0,99\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
 ▷ Caractéristiques thermodynamiques de l'eau pure :
 → capacité thermique massique $c' = 4,2 \cdot 10^3\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
 → masse volumique $\rho' = 1,0 \cdot 10^3\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1 - Déterminer la puissance thermique transmise au fluide caloporteur dans les panneaux. Sachant que le flux solaire est d'environ $600\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, estimer le rendement de la conversion d'énergie solaire en énergie thermique.

2 - Estimer numériquement les pertes thermiques dans les conduites de raccordement du fluide caloporteur. Commenter. Comment les limiter ?

Le ballon de stockage contient $V = 200\text{ L}$ d'eau initialement à la température $T_i = 35\text{ °C}$. On note $T(t)$ la température de l'eau contenue dans le ballon, supposée uniforme. On suppose qu'au cours de la phase de chauffe la température du fluide à l'entrée de l'échangeur reste constante, égale à $T_2 = 73\text{ °C}$, et que sa température en sortie est égale à $T(t)$. On néglige les pertes thermiques du ballon.

3 - Établir l'équation différentielle vérifiée par la température $T(t)$, en introduisant un temps caractéristique τ à calculer.

4 - Combien de temps faut-il pour que la température du ballon atteigne sa valeur de consigne $T_b = 60\text{ °C}$?

Une fois la température T_b atteinte dans le ballon, la pompe s'arrête et ne se remet en route que pour la maintenir constante. De l'eau chaude sanitaire est alors prélevée à la température $T_{ch} = T_b$ avec le débit massique D' , remplacée dans le ballon par de l'eau froide à la température $T_{fr} = 15\text{ °C}$.

5 - Déterminer le débit maximal d'eau chaude sanitaire D' pour que celle-ci garde la même température T_b , la pompe fonctionnant alors en continu. Est-ce suffisant pour une douche dont le débit est de 20 litres par minute ?

6 - En pratique, un chauffe-eau solaire est muni des équipements suivants. Quel en est l'intérêt ?

6.a - Présence d'une résistance chauffante dans le ballon de stockage.

6.b - Fermeture du circuit caloporteur et du ballon de stockage par des soupapes de sécurité.

6.c - Ajout d'un circuit de refroidissement du fluide caloporteur.

2. À ne pas confondre avec des panneaux photovoltaïques : il n'y a aucune production d'électricité dans un chauffe-eau solaire !

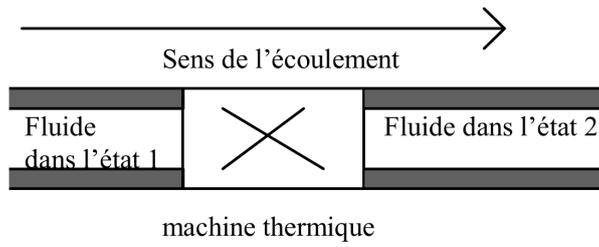


Figure 5 – Fluide en écoulement dans une machine thermique.

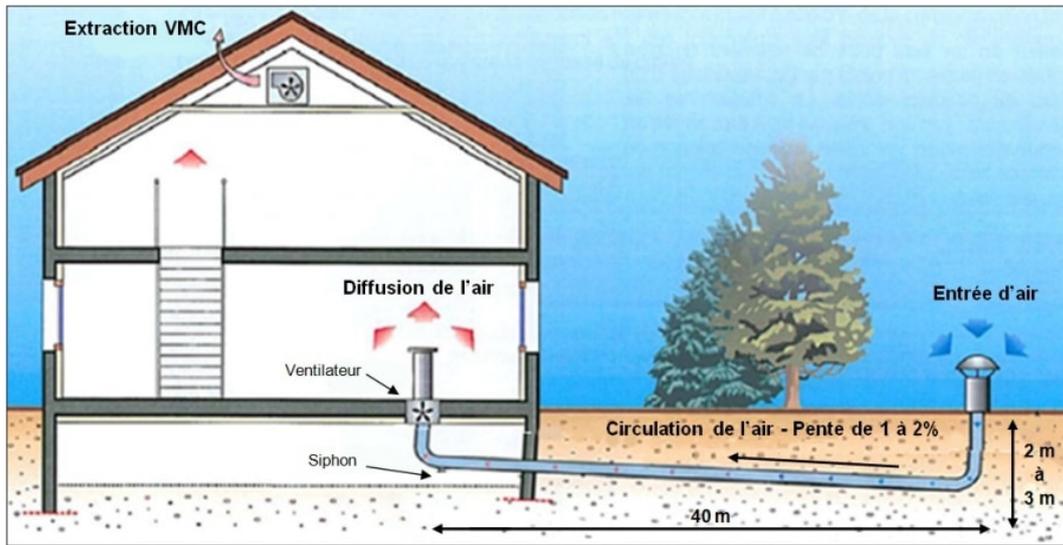


Figure 6 – Principe du préchauffage à l'aide d'un puits canadien.

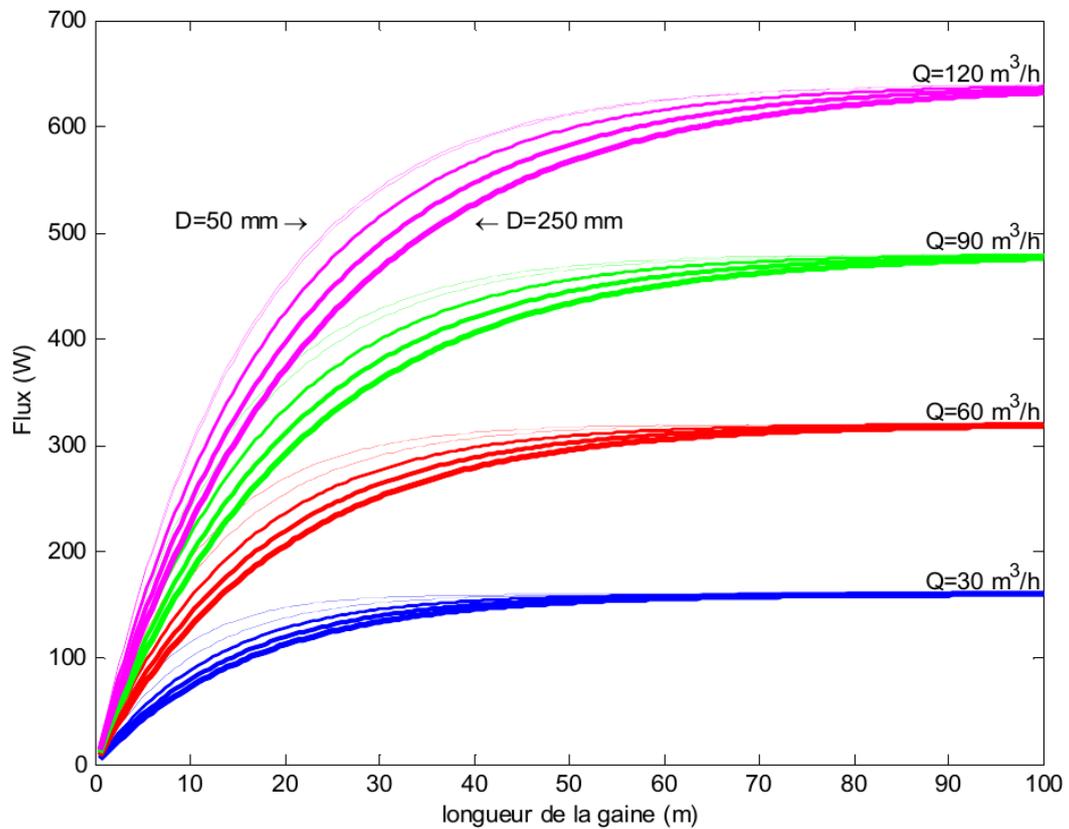


Figure 7 – Relevés expérimentaux.