

## Exercices chapitre 3

Version du 1<sup>er</sup> mars 2015  
CC-BY-SA Olivier Cleynen – thermodynamique.ninja

### 3.1 Turbine à vapeur

Une turbine à vapeur (figure 3.10) équipe une petite centrale électrique alimentée par la combustion de matières organiques végétales.

À l'entrée de la turbine, la vapeur a les propriétés suivantes :

- Pression : 45 bar
- Température : 400 °C
- Volume spécifique :  $0,06477 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
- Énergie interne :  $2\,914,2 \text{ kJ kg}^{-1}$

À la sortie de la turbine, on mesure les propriétés suivantes :

- Pression : 0,75 bar
- Température : 91,61 °C
- Volume spécifique :  $2,122 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
- Énergie interne :  $2\,316,3 \text{ kJ kg}^{-1}$

Les pertes sous forme de chaleur sont négligeables.

1. Quelle est la puissance spécifique sous forme de travail qui est dégagée par la turbine ?
2. Quel débit de vapeur faut-il admettre pour générer une puissance de 4 MW ?

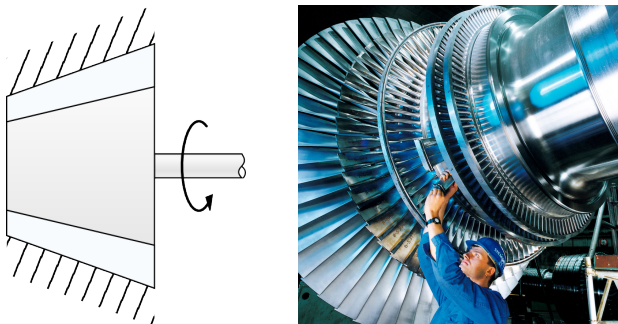


FIGURE 3.10 – Schéma de principe et photo d'une turbine à vapeur.

schéma CC-0 o.c.; photo CC-BY-SA Siemens Pressebild

### 3.2 Génératrice de courant électrique

Dans une installation portable génératrice d'électricité, le générateur électrique est entraîné par un axe mécanique. Le long de cet axe, on trouve un compresseur à air et une turbine (figure 3.11). Ce type d'installation, parfois simplement nommé « turbine à gaz », est particulièrement compact et efficace ; il nécessite par contre l'emploi de carburants raffinés.

Le compresseur porte l'air depuis les conditions atmosphériques jusqu'à une forte pression et une haute température.

Entrée du compresseur :

- Pression : 1 bar
- Volume spécifique :  $0,751 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
- Énergie interne :  $206,78 \text{ kJ kg}^{-1}$

Sortie du compresseur :

- Pression : 35 bar
- Volume spécifique :  $6,602 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
- Énergie interne :  $578,13 \text{ kJ kg}^{-1}$

Entre le compresseur et la turbine, la chambre de combustion porte les gaz à très haute température. La combustion se fait à pression constante ; elle porte les gaz à un volume spécifique de  $0,1168 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  et à une énergie interne de  $1\,028,8 \text{ kJ kg}^{-1}$ .

À la sortie de la turbine, les gaz sont prêts à être refroidis dans un circuit d'échappement catalytique destiné, entre autres, à réduire les émissions de bruit.

Sortie de la turbine :

- Pression : 1,2 bar
- Volume spécifique :  $1,526 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
- Énergie interne :  $460,88 \text{ kJ kg}^{-1}$

Le débit d'air admis dans la machine est de  $8 \text{ kg s}^{-1}$  ; les variations de son énergie mécanique sont quasi nulles.

Les déperditions de chaleur par les parois de la machine sont négligeables. Les pertes mécaniques sont de l'ordre de 2 % de la puissance transmise au générateur. Le générateur électrique lui-même a une efficacité de 85 %.

1. Quelle puissance est perdue ou gagnée par l'air dans le compresseur ?
2. Quelle puissance est perdue ou gagnée par l'air dans la turbine ?
3. Quelle est la puissance électrique générée par l'installation ?
4. Représentez l'évolution suivie par l'air lorsqu'il traverse le moteur sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative (c'est-à-dire sans représenter les valeurs numériques).

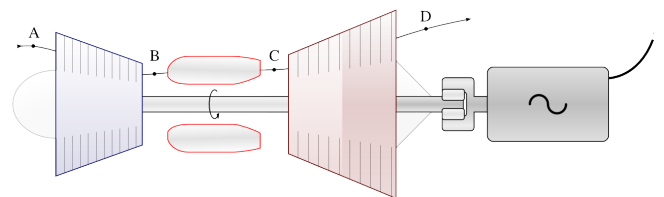


FIGURE 3.11 – Schéma de principe d'une turbomachine génératrice d'électricité.

CC-BY-SA Olivier Cleynen

5. Quelle est la puissance perdue sous forme de chaleur avec les gaz d'échappement ?  
[indice : c'est la chaleur que les gaz devraient perdre pour retrouver leur état à l'entrée du compresseur]

### 3.3 Chaudière à vapeur

Une centrale fournit de l'électricité ainsi que de la chaleur industrielle et domestique à partir de la combustion de déchets ménagers (installation dite *de cogénération*). Elle est équipée d'un circuit d'eau qui reçoit une partie de la chaleur dégagée par la combustion, à pression constante, dans une chaudière.

L'eau pénètre dans la chaudière (figure 3.12) à l'état liquide, pressurisée à 70,5 bar. Son énergie interne est alors de  $1\,160,2\text{ kJ kg}^{-1}$ . On souhaite alimenter la turbine avec  $317\text{ t h}^{-1}$  de vapeur à enthalpie de  $3\,595,9\text{ kJ kg}^{-1}$ .

La combustion des déchets ménagers génère entre 9 et  $11\text{ MJ kg}^{-1}$  de chaleur ; l'efficacité de la chaudière est de 76 %.

Quel est le débit minimum de déchets que la centrale doit recevoir pour assurer la production de vapeur ?

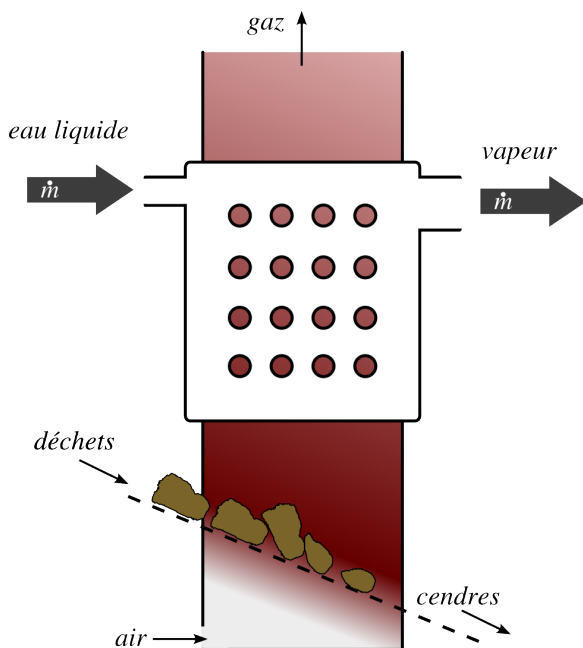


FIGURE 3.12 – Schéma de principe d'une chaudière fonctionnant à partir de la combustion de déchets.

schéma CC-0 o.c.

### 3.4 Tuyère de turboréacteur

Dans la tuyère d'un petit turboréacteur, la pression de l'air chute tandis que sa vitesse augmente. La tuyère (figure 3.13) est un élément sans aucune pièce mobile : aucun transfert de travail n'y est effectué. Les pertes en chaleur y sont négligeables et le débit d'air est de  $26\text{ kg s}^{-1}$ .

À l'entrée, on mesure les caractéristiques suivantes :

- enthalpie spécifique  $1\,092\text{ kJ kg}^{-1}$
- vitesse  $10\text{ m s}^{-1}$
- température  $950\text{ K}$
- volume spécifique  $1,36\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}$
- pression  $2,28\text{ bar}$
- énergie interne  $781,85\text{ kJ kg}^{-1}$

À la sortie, l'air est redescendu à pression atmosphérique (1 bar). On prédit<sup>3</sup> que les caractéristiques de l'air atteindront :

- température  $780,2\text{ K}$
- volume spécifique  $2,55\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}$
- énergie interne  $642,1\text{ kJ kg}^{-1}$

1. À quelle vitesse les gaz sont-ils éjectés ?
2. Quels sont les débits volumiques d'air à l'entrée et à la sortie de la tuyère ?

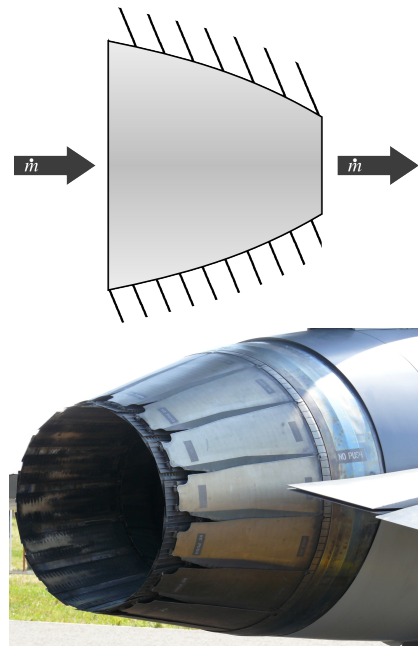


FIGURE 3.13 – Schéma de principe d'une tuyère et installation (avec géométrie variable) sur le moteur Pratt & Whitney F100 d'un Lockheed Martin F-16.

schéma CC-0 o.c.; Photo : CC-BY-SA Ad Meskens

3. Il faut attendre le chapitre 4 (*le gaz parfait*) pour que nous puissions effectuer ces « prédictions ».

### 3.5 Turbine à eau

Un/e ingénieur/e travaille sur un projet de petite installation hydroélectrique. L'objectif est d'exploiter la circulation d'un cours d'eau ( $12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) avec une turbine reliée à un générateur électrique (figure 3.14).

À l'état liquide, l'eau est essentiellement incompressible (c'est-à-dire que sa masse volumique ne varie pas lorsque sa pression change). Son énergie interne varie également de façon négligeable pendant les compressions et détente adiabatiques.

L'ingénieur/e pense tout d'abord positionner la turbine au pied d'une retenue d'eau, où la pression est de 4 bar et la vitesse quasi-nulle. Le dénivelé parcouru par l'eau à travers la turbine est de 2 m et sa vitesse d'éjection est de  $4 \text{ m s}^{-1}$ , à pression atmosphérique (1 bar).

1. Quelle puissance la turbine pourrait-elle transmettre à la génératrice ?

L'ingénieur/e étudie ensuite une configuration différente (figure 3.15). La turbine garderait les mêmes caractéristiques, mais serait positionnée plus en aval de la retenue d'eau (décalage de 25 m horizontalement et autant verticalement).

2. Quelle serait alors la puissance transmise ?

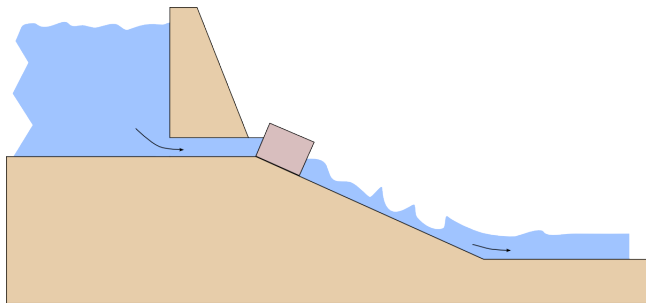


FIGURE 3.14 – Schéma de principe d'une installation génératrice hydraulique.

schéma CC-0 o.c.

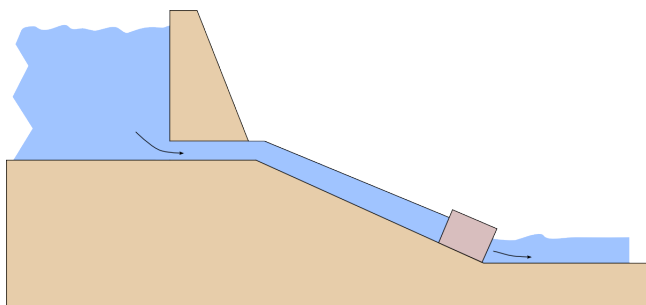


FIGURE 3.15 – Schéma de principe de l'installation modifiée. Une conduite rigide amène l'eau jusqu'à la turbine placée plus en contrebas.

schéma CC-0 o.c.

### 3.6 Système de post-combustion

Pour augmenter la poussée qu'elle génère, on modifie la tuyère de l'exercice 3.4 pour y ajouter un appareillage de réchauffe (la réchauffe est souvent appelée *postcombustion*, cf. §10.6.2). Il s'agit d'un ensemble de brûleurs qui permettent une seconde combustion de carburant dans le moteur, juste avant que l'air n'entame sa détente dans la tuyère (figure 3.16). Après la seconde combustion, l'air effectue sa détente et son accélération jusqu'à la pression atmosphérique.

À l'entrée, les conditions sont identiques à celles indiquées dans l'exercice 3.4.

La puissance spécifique apportée sous forme de chaleur par les brûleurs atteint  $1\,322,5 \text{ kJ kg}^{-1}$ . Le carburant brûlé a une capacité calorifique massique de  $30 \text{ MJ kg}^{-1}$ . La combustion se fait à pression constante et elle n'augmente pas l'énergie cinétique du gaz.

Lorsque l'air termine son accélération, on peut prédire son énergie interne à  $1\,412,8 \text{ kJ kg}^{-1}$  et son volume spécifique à  $5,61 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ .

1. Quelle est l'augmentation de la vitesse d'éjection (et ainsi de la poussée) générée par la postcombustion ?
2. Quel débit de carburant doit-on injecter dans les brûleurs, en kg/h ?
3. Quel est le débit volumique d'air après son accélération finale ?
4. Quelle est l'efficacité de la postcombustion, c'est à dire le rapport entre l'augmentation de l'énergie cinétique des gaz et l'augmentation de la puissance à apporter sous forme de chaleur ?

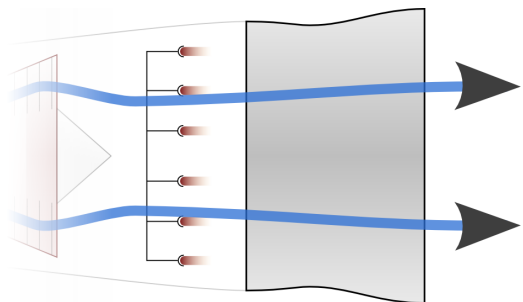


FIGURE 3.16 – Schéma de principe d'un système de post-combustion. Son fonctionnement est étudié en §10.6.2

CC-BY-SA Olivier Cleynen

### 3.7 Turbine à vapeur

Une turbine à vapeur de petite taille dégage 500 kW de puissance, avec un débit massique de  $1,35 \text{ kg s}^{-1}$ .

La vitesse moyenne de la vapeur est de  $60 \text{ m s}^{-1}$  à l'entrée,  $360 \text{ m s}^{-1}$  à la sortie ; elle gagne 3 m d'altitude au cours du parcours. La perte de chaleur représente 3 kW.

1. Quelles sont les variations d'énergie cinétique, d'énergie potentielle et d'enthalpie de la vapeur, lorsqu'elle traverse la turbine ?
2. Puisque la perte de chaleur est de 3 kW, pourquoi ne pas isoler thermiquement la turbine pour pouvoir récupérer cette puissance sous forme de travail ?

### 3.8 Turbines théorique et réelle

Dans la turbine libre du turbomoteur d'un hélicoptère, l'air est détendu pour extraire du travail transmis aux deux rotors. Les caractéristiques sont les suivantes :

- Débit de masse :  $2 \text{ kg s}^{-1}$
- Pertes sous forme de chaleur : négligeables
- Entrée : 4 bar et  $0,41 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
- Pression de sortie : 1,1 bar

Dans le cas le plus favorable, la détente se ferait de façon réversible et l'air suivrait une relation de type  $p v^{1,4} = k$  (où  $k$  est une constante).

1. Quelles conditions devraient être respectées pour que la détente soit réversible ?
2. Quelle serait la puissance fournie par la turbine dans ce cas ?

En pratique, il est constaté que la puissance fournie par la turbine est de 20 % inférieure à la valeur calculée plus haut. Un/e ingénieur/e installe des sondes à l'entrée et à la sortie de la turbine et constate que la pression y atteint pourtant bien les valeurs prévues en théorie. Il/elle mesure également le transfert de chaleur de l'air vers la turbine et confirme qu'il est négligeable.

3. Représentez les chemins suivis par l'air dans le cas réversible et le cas réel sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative.
4. Sous quelle forme l'ingénieur/e pourra-t-il/elle retrouver (et mesurer) les 20 % de puissance manquants ?

### 3.9 Compresseur et turbine de turbopropulseur

Le compresseur au sein d'un turbopropulseur (figure 3.17) fonctionne en régime permanent et admet un débit constant d'air aux conditions ambiantes ( $0,8 \text{ bar}$  et  $1 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ). Il doit amener cet air à pression finale de 11 bar, sans transfert de chaleur.

Au sein du compresseur, l'air se comporte de façon telle que ses propriétés suivent la relation  $p v^{1,4} = k$ , où  $k$  est une constante.

1. Quelle est la puissance spécifique minimale à fournir au compresseur pour qu'il puisse fonctionner ?

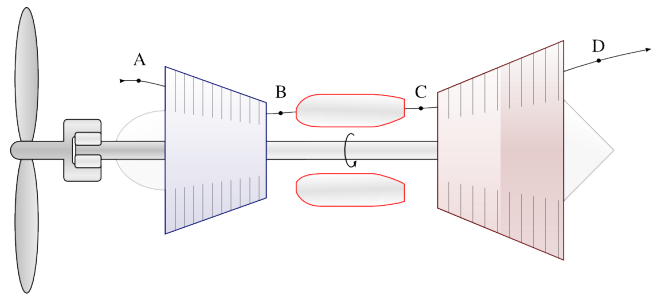


FIGURE 3.17 – Schéma de principe d'un turbopropulseur. Ces moteurs sont étudiés plus en détail au §10.5.4.

CC-BY-SA Olivier Cleynen

2. Représentez les propriétés du gaz lorsqu'il traverse le compresseur sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative.
3. Sur le schéma ci-dessus, représentez l'évolution que le gaz suivrait si le compresseur n'était pas réversible (compresseur réel, induisant un frottement interne au gaz) mais que l'on maintenait sa pression de sortie à 11 bar.

Au sein du même moteur, la turbine, qui est adiabatique, doit alimenter non seulement le compresseur mais aussi l'hélice à l'avant du moteur. Elle est munie de nombreuses sondes qui permettent de mesurer les propriétés de l'air.

On mesure à l'entrée les propriétés suivantes :

- Pression : 11 bar
- Vitesse :  $12 \text{ m s}^{-1}$
- Volume spécifique :  $0,36 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
- Énergie interne :  $985,8 \text{ kJ kg}^{-1}$

À la sortie les propriétés de l'air sont devenues :

- Pression : 0,8 bar
- Vitesse :  $12 \text{ m s}^{-1}$
- Enthalpie spécifique :  $652,5 \text{ kJ kg}^{-1}$

4. Quelle puissance spécifique la turbine développe-t-elle ?
5. Quelle condition doit-on respecter au sein du moteur pour qu'il fournisse à l'hélice une puissance de 600 kW ?

# Solutions des exercices

3.1 1)  $w_{A \rightarrow B} = -730,3 \text{ kJ kg}^{-1}$

2)  $\dot{m} = \frac{\dot{W}_{A \rightarrow B}}{w_{A \rightarrow B}} = 5,477 \text{ kg s}^{-1}$



3.2

1)  $\dot{W}_{A \rightarrow B} = +4,219 \text{ MW}$

2)  $\dot{W}_{C \rightarrow D} = -6,349 \text{ MW}$

3)  $\dot{E}_{\text{génératrice}} = \eta_{\text{génératrice}} \eta_{\text{transmission}} (\dot{W}_{A \rightarrow B} + \dot{W}_{C \rightarrow D}) =$

$-1,774 \text{ MW}$

5)  $\dot{Q}_{\text{refroidissement}} = -\dot{W}_{A \rightarrow B} - \dot{Q}_{\text{combustion}} - \dot{W}_{C \rightarrow D} =$

$-2,897 \text{ MW}$  (soit plus de la moitié de la chaleur de combustion...)

3.3 1)  $\dot{m}_{\text{déchets}} \geq 93,59 \text{ t h}^{-1}$

3.4 1)  $C_2 = 624 \text{ m s}^{-1}$  (environ 2 250 km/h...)

2)  $\dot{V}_1 = \dot{m} v_1 = 35,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  &  $\dot{V}_2 = 66,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

3.5 1)  $\dot{W}_{A \rightarrow B} = -3,5 \text{ MW}$

2)  $\dot{W}_{A \rightarrow B2} = -6,45 \text{ MW}$

3.6 1) +52 % par rapport à la poussée sèche ( $C_{3b} = 950,1 \text{ m s}^{-1}$ )

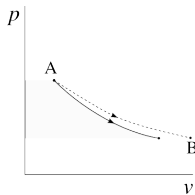
2)  $\dot{m}_{\text{carburant}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}} q_{1 \rightarrow 2b}}{q_{\text{carburant}}} = 4 157 \text{ kg/h}$

3)  $\dot{V}_{3b} = 145,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

4)  $\eta_{\text{postcombustion}} = \frac{\frac{1}{2}(C_{3b}^2 - C_2^2)}{q_{1 \rightarrow 2b}} = 19,3 \%$  (raison pour laquelle elle n'est jamais utilisée sur les appareils civils)

3.7 1)  $\Delta e_c = +63 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $\Delta e_p = +0,0294 \text{ kJ kg}^{-1}$  (!),  $\Delta h = -435,6 \text{ kJ kg}^{-1}$ .

2) Dans l'équation 3/14, imposer  $q_{1 \rightarrow 2} = 0$  ne garantit pas que  $w_{1 \rightarrow 2}$  augmentera. Il est probable que les conditions de sortie soient modifiées : les 3 kW seront au moins en partie retrouvés dans les  $\Delta$  calculés ci-dessus.



3.8

1) cf. §2.4.4

2)  $\dot{W}_{A \rightarrow B} = \dot{m} k^{\frac{1}{1,4}} \left[ \frac{1}{-\frac{1}{1,4} + 1} p^{-\frac{1}{1,4} + 1} \right]_{p_A}^{p_B} = -354,1 \text{ kW}$

4) Sous forme de  $\Delta h$  - l'air de sortie aura un volume spécifique et une température (énergie interne) plus importants. Peut-être également sous forme d'énergie cinétique.

3.9 1)  $w_{A \rightarrow B} \geq \int_A^B v dp = +312 \text{ kJ kg}^{-1}$

2) & 3) cf. figure 3.8

4)  $w_{C \rightarrow D} = -729,3 \text{ kJ kg}^{-1}$

5)  $\dot{m}_{\text{air}} = \frac{\dot{W}_{\text{hélices}}}{w_{\text{hélices}}} = \frac{\dot{W}_{\text{hélices}}}{w_{A \rightarrow B} + w_{C \rightarrow D}} = 1,438 \text{ kg s}^{-1}$ .

