



TD 22 – Machines thermiques

Ce qu'il faut savoir et savoir faire

- Analyser et modéliser une machine cyclique ditherme.
- Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.
- Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours du cycle.
- Justifier et utiliser le théorème de Carnot.
- Positionner les phases dans les diagrammes (P, T) et (P, v) .
- Equilibre liquide-vapeur : déterminer la composition d'un mélange diphasé en un point d'un diagramme $P(v)$
- Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases.
- Exploiter la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie associées à une transition de phase.

J'apprends mon cours : Questions de cours, 1, 2 3, 4.

Questions de cours

- Q1. Montrer qu'une machine monotherme est nécessairement réceptrice ?
- Q2. Etablir l'inégalité de Clausius dans le cas d'une machine ditherme. Dans quel cas a-t-on une égalité ?
- Q3. Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur thermique ditherme (donner le signe de Q_C , Q_F et W).
- Q4. Même question pour une machine réceptrice ditherme.
- Q5. Définir le rendement d'un moteur ditherme. Établir l'expression du rendement en fonction des transferts thermiques Q_C , Q_F . Quelle est l'expression de la valeur maximale du rendement d'un moteur en fonction de T_F et T_C ?
- Q6. Mêmes questions pour une PAC et une machine frigorifique.
- Q7. Citer quelques ordres de grandeur des efficacités des machines thermiques réelles actuelles.
- Q8. Donner les étapes suivies dans un cycle de Carnot et discuter de la pertinence d'un tel modèle.

Exercices

Exercice 1 : Centrale nucléaire ♥

★★★
Ref. 0175

- ✓ Machine motrice
- ✓ Efficacité de Carnot

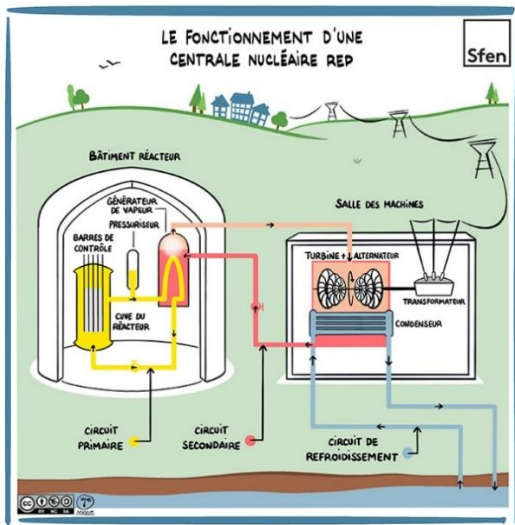
Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité. Elle est composée de trois circuits d'eau distincts :

- Un **circuit primaire** fermé dont l'eau récupère la chaleur produite par le réacteur nucléaire.

- Un **circuit secondaire** fermé qui convertit cette énergie thermique en énergie mécanique par la création de vapeur qui actionne les turbines.
- Un **circuit tertiaire** destiné à refroidir le circuit secondaire après la turbine pour liquéfier la vapeur.

Le rendement théorique des centrales nucléaires françaises actuelles est de l'ordre de 30 %.

On donne quelques caractéristiques de la centrale nucléaire de Golfech.



RÉGIME NOMINAL

- Puissance thermique : 3 817 MW
- Puissance fournie au réseau : 1 310 MW

CUVE DE RÉACTEUR

- Hauteur : 13,60 m
- Poids : 418 t
- Poids d'uranium : 104 t

GÉNÉRATEURS DE VAPEUR : 4

CIRCUIT PRIMAIRE

- T° sortie : 328°C
- T° entrée : 298°C
- Pression : 155 bar

- 1) Pourquoi les centrales sont-elles installées près d'un fleuve ou de la mer ?
- 2) D'où provient l'électricité engendrée ?
- 3) On s'intéresse au circuit secondaire. Quelle est la source chaude ? la source froide ?
- 4) Etablir l'expression du rendement d'une machine motrice fonctionnant selon un cycle de Carnot.
- 5) Calculer le rendement maximal de la centrale de Golfech (ou pourra prendre 15°C pour la température de la Garonne).
- 6) Calculer son rendement réel. Commenter.
- 7) On suppose que le débit de circulation de l'eau du circuit de refroidissement d'une centrale est de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Calculer l'écart de température entre l'entrée et la sortie du condenseur.
Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{eau} = 4180 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Exercice 2 : Climatiseur de voiture

★★★
Ref. 0176

- ✓ Machine frigorifique
- ✓ Efficacité de Carnot

On veut maintenir une température $T_1 = 20^\circ\text{C}$ dans un habitacle de voiture alors que la température de l'air extérieur est $T_2 = 35^\circ\text{C}$. On utilise pour cela un climatiseur ayant une efficacité $e = 3$. La puissance thermique transférée entre l'habitacle et l'air extérieur vaut $P = h(T_2 - T_1)$ avec $h = 170 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$.

- 1) Faire un schéma faisant apparaître les différents échanges énergétiques ainsi que leur sens.
- 2) Quelle est la puissance thermique que doit prélever le climatiseur à l'habitacle pour que sa température soit maintenue à 20°C ?
- 3) Quelle est la puissance consommée par le climatiseur ?
- 4) La combustion d'1 L d'essence dégage 35 MJ. Le rendement global du moteur est de l'ordre de 10 %. Sachant que la voiture consomme 7 L aux 100 km en roulant à 100 km.h⁻¹, évaluer la surconsommation engendrée par la climatisation.

Exercice 3 : Moteur Diesel ♥

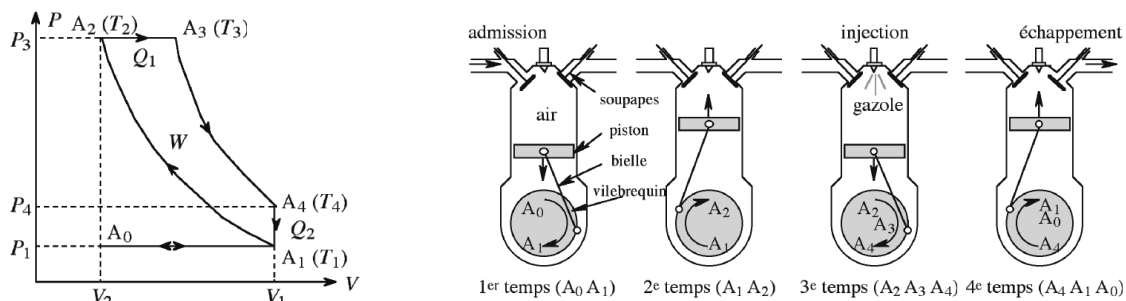
★★★
Ref. 0177

- ✓ Moteur thermique
- ✓ Lois de Laplace

Le moteur d'un véhicule automobile au gazole fonctionne par inflammation spontanée du gazole finement pulvérisé et injecté dans de l'air fortement comprimé et chaud. Son fonctionnement est modélisé par le cycle théorique idéal de Diesel qui suit les quatre temps suivants :

- **1^{er} temps (A_0A_1)** : ouverture de la soupape d'admission et aspiration d'air dans le cylindre à pression constante (pression atmosphérique) par la descente du piston entraîné par le vilebrequin.
- **2^{ème} temps (A_1A_2)** : compression adiabatique réversible de l'air par remontée du piston.
- **3^{ème} temps ($A_2A_3A_4$)** : injection progressive du gazole pulvérisé en fines gouttelettes provoquant l'inflammation spontanée du mélange air/gazole. Cette combustion se produit à pression constante (A_2A_3). Les gaz se détendent de façon adiabatique ensuite en poussant le piston vers le bas et entraîne le vilebrequin. La détente est supposée réversible.
- **4^{ème} temps ($A_4A_1A_0$)** : ouverture de la soupape d'échappement ramenant les gaz brûlés instantanément à la pression initiale (isochore A_4A_1). Les gaz sont alors refoulés par la remontée du piston (isobare A_1A_0).

Le cycle correspondant est représenté ci-dessous.



L'air est assimilé à un gaz parfait de masse molaire $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$, de capacité thermique massique à pression constante $c_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$ avec $\gamma = 1,4$ et $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.K^{-1}$. La quantité de carburant injectée est faible devant la quantité d'air et on suppose que la combustion du carburant ne modifie pas cette quantité d'air, autrement dit le gaz circulant dans ce moteur sera considéré comme une même quantité d'air tout au long du cycle. En début de compression (A_1), l'air admis dans le moteur est à la pression $P_1 = 1 \text{ bar}$ et à la température $T_1 = 293 \text{ K}$. Le taux de compression est $\alpha = \frac{V_1}{V_2} = 15$ et le taux de détente est $\beta = \frac{V_1}{V_3} = 5$.

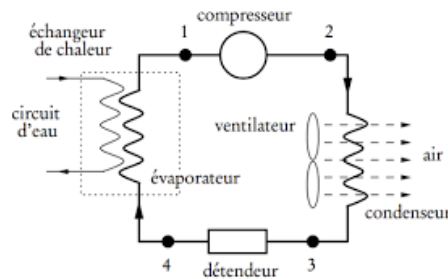
- 1) Calculer la pression P_2 et la température T_2 en fin de compression (A_2).
- 2) Calculer les températures T_3 et T_4 en début et en fin de la détente A_3A_4 et la pression P_4 .
- 3) Définir puis calculer le rendement de ce moteur.
- 4) La cylindrée du moteur (volume total maximum des cylindres) est $V_1 = 2 \text{ L}$. Déterminer la masse d'air admise dans chaque cycle et déduire des calculs précédents le transfert thermique Q_1 mis en jeu pendant la combustion.
- 5) L'énergie thermique dégagée par la combustion par unité de masse de carburant est $q_{comb} = 46,8.10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$. En déduire la masse de carburant injectée à chaque cycle.
- 6) A une vitesse de 130 km.h^{-1} , le vilebrequin tourne à 3000 tr.min^{-1} . Déterminer la durée d'un cycle et la distance parcourue par le véhicule pendant ce cycle.
- 7) La masse volumique du gazole est $\rho = 0,8 \text{ kg.L}^{-1}$. Quelle est la consommation (en L aux 100 km) de ce véhicule à 130 km.h^{-1} .
- 8) Déterminer la puissance du véhicule. (1 ch = 736 W)

Exercice 4 : Circuit de réfrigération

★★★
Ref. 0178

- ✓ Machine frigorifique
- ✓ Changement d'état
- ✓ Lois de Laplace

On effectue l'étude d'un système destiné à réfrigérer de l'eau. Le schéma de principe est donné à la figure ci-dessous. Le fluide subissant le cycle thermodynamique est du fréon. Le circuit est représenté en trait épais.



1, 2, 3, 4 sont les points du circuit correspondants aux entrées et sorties de chaque élément.

Un ventilateur soufflant de l'air sur le condenseur assure le refroidissement du dispositif.

L'évaporateur et le circuit d'eau sont mis en contact thermique par un échangeur de chaleur, représenté en pointillé. Le circuit d'eau est représenté en trait fin.

- Au point 1 le fréon est totalement gazeux : $P_1 = 1,9 \text{ bar}$; $T_1 = 272 \text{ K}$.
- Au point 2 le fréon est totalement gazeux : $P_2 = 8,5 \text{ bar}$; T_2 .
- Au point 3 le fréon est totalement liquide : $P_3 = P_2$; $T_3 = 310 \text{ K}$.
- Au point 4 le fréon est partiellement gazeux : $P_4 = P_1$; T_4 .

La vapeur de fréon sera considérée comme un gaz parfait. On désigne respectivement par P et T sa pression et sa température. Les caractéristiques thermodynamiques du fréon sont les suivantes :

- Masse molaire du fréon : $M = 121 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
- Enthalpie massique de vaporisation du fréon : $\Delta_{vap}h = 30 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ à 310 K .
- Capacité thermique molaire à pression constante du fréon gazeux : $C_{p,m} = 49,9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
- Rapport des capacités thermiques à pression constante et à volume constant du fréon gazeux : $\gamma = 1,2$.
- Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{eau} = 4180 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

- 1) La masse de fréon circulant en un point du circuit en une minute est $m = 2,25 \text{ kg}$. Quel volume V_1 le fréon occupe-t-il à l'état gazeux sous la pression P_1 et à la température de T_1 ?
- 2) On suppose que la transformation réalisée dans le compresseur est adiabatique et réversible. Calculer le volume V_2 occupé le fréon à la pression P_2 . En déduire la température T_2 .
- 3) Dans le condenseur, le fréon subit sous pression constante un refroidissement à l'état gazeux de T_2 à T_3 , puis une liquéfaction totale à la température T_3 . Calculer la quantité de chaleur Q_{2-3} échangée par le fréon, en une minute, dans le condenseur pour son refroidissement et sa liquéfaction. Commenter son signe.
- 4) Dans l'évaporateur, la valeur algébrique de quantité de chaleur reçue par le fréon, en une minute, est $Q_{4-1} = 240 \text{ kJ}$. En déduire le débit maximal de l'eau, si l'on veut abaisser la température de celle-ci de $5,0^\circ\text{C}$. On exprimera ce débit en litres par minute.
- 5) En considérant que le transfert d'énergie coûteux est le travail mis en jeu au niveau du compresseur, définir puis calculer l'efficacité de la machine.

Exercice 4 : Chauffage d'une habitation

★★★
Ref. 0179

- ✓ Efficacité de Carnot
- ✓ PAC

On souhaite maintenir la température d'une habitation (H) à la température $T_H = 293\text{ K}$, alors que la température de l'extérieur (E) est égale à $T_E = 273\text{ K}$. Pour cela, on doit fournir à la maison une puissance thermique $P = 12\text{ kW}$ qui correspond aux pertes thermiques. On propose de comparer différents procédés de chauffage.

Méthode 1 : On chauffe directement la maison en utilisant du bois comme combustible.

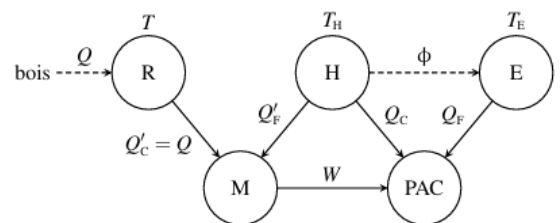
- 1) Déterminer la masse m_B de bois consommée par heure sachant que le pouvoir calorifique du bois est $q_B = 18\text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Méthode 2 : On utilise une pompe à chaleur (PAC) fonctionnant selon un cycle de Carnot réversible avec (H) comme source chaude et (E) comme source froide.

- 2) Etablir l'expression de son efficacité e . La calculer.
- 3) En déduire la puissance électrique consommée pour faire fonctionner la PAC.

Méthode 3 :

On imagine maintenant que le bois est utilisé pour maintenir la température $T = 573\text{ K}$, d'un réservoir (R) qui sert de source chaude à un moteur dont la source froide est constituée par l'habitation (H). Le travail fourni par le moteur (M) est intégralement transformé en énergie électrique. Celle-ci sert à alimenter une PAC fonctionnant selon un cycle de Carnot inversé entre (H) qui sert de source chaude et (E) qui sert de source froide.



On note Q le transfert thermique fourni par le bois et transmis au moteur par l'intermédiaire du réservoir. Sur la figure, Q'_C et Q'_F sont positifs quand le moteur reçoit de l'énergie. W , Q_C et Q_F sont positifs quand la PAC reçoit de l'énergie (les flèches n'indiquent pas le sens des transferts...)

- 4) Préciser les signes de Q_C , Q_F , Q'_C , Q'_F et W .
- 5) Exprimer Q_C , Q_F , Q'_F et W en fonction de Q , de l'efficacité e de la PAC et du rendement η du moteur.
- 6) En déduire l'expression du transfert thermique Q_H reçu par l'habitation au total.
- 7) On suppose que les deux machines fonctionnent de manière réversible. Calculer la masse m'_B de bois consommée par heure. Comparer m'_B et m_B .

Exercice 5 : Etude d'un congélateur ♥

★★★
Ref. 0180

- ✓ Machine frigorifique
- ✓ Diagramme $P(v)$ de l'équilibre liquide-vapeur
- ✓ Théorème des moments

On considère un cycle de transformations réversibles **DABCD** réalisé à partir du point **D** situé sur la courbe de rosée de l'isotherme $T_2 = 60^\circ\text{C}$ d'une masse unité de fréon.

- **DA** : liquéfaction totale sous la pression $P_2 = 15 \text{ bar}$ et à la température $T_2 = 60^\circ\text{C}$
- **AB** : détente isentropique qui amène le fluide dans l'état *B* défini par la température $T_1 = -10^\circ\text{C}$ et une fraction massique en vapeur $x_v(B)$;
- **BC** : vaporisation partielle sous la pression $P_1 = 2.2 \text{ bar}$ et à la température $T_1 = -10^\circ\text{C}$
- **CD** : compression isentropique passant par *D* ; l'état *C* est caractérisé par une fraction massique en vapeur $x_v(C)$.

On lit dans les tables pour le fréon :

	Pression de vapeur saturante (bar)	Enthalpie massique du liquide saturant $h_l(kJ.kg^{-1})$	Enthalpie massique de la vapeur saturante $h_v(kJ.kg^{-1})$	Entropie massique du liquide saturant $s_l(kJ.K^{-1}.kg^{-1})$	Entropie massique de la vapeur saturante $s_v(kJ.K^{-1}.kg^{-1})$
$T_1 = 263 \text{ K}$	2.2	28.8	184	0.11	0.70
$T_2 = 343 \text{ K}$	15	96.8	210	0.34	0.68

- 1) Représenter le cycle *DABCD* sur un diagramme de Clapeyron $P(v)$.
- 2) Calculer les enthalpies massiques de vaporisation aux températures T_1 et T_2 .
- 3) Calculer les titres massiques en vapeur $x_v(B)$ et $x_v(C)$.
- 4) Calculer les transferts thermiques massiques q_{BC} et q_{DA} avec le milieu extérieur au cours des transformations *BC* et *DA*.
- 5) En déduire le travail w reçu par l'unité de masse du fluide au cours du cycle.
- 6) Le cycle précédent est utilisé pour faire fonctionner un congélateur. Exprimer l'efficacité e_R de cette machine frigorifique. Comparer à l'efficacité de Carnot en analysant le cycle étudié.

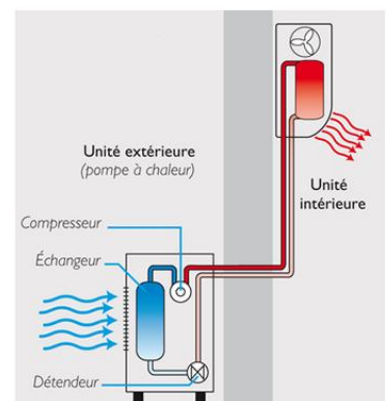
Exercice 7 : Chauffage d'une pièce ♥

★★★
Ref. 0181

- ✓ PAC
- ✓ Pseudo sources

Cet exercice s'intéresse à l'évolution de la température intérieure T_C lorsque la PAC est mise en marche alors que la température extérieure T_F est constante. La puissance du compresseur P_m est supposée constante. Les pertes thermiques au travers des murs de la maison sont également négligées. Toutes les évolutions thermodynamiques de la PAC sont considérées réversibles.

- 1) Par application des principes de la thermodynamique au fluide caloporteur de la PAC pendant une durée infinitésimale dt , établir deux relations entre les puissances mises en jeu et les températures des sources.
- 2) Etablir l'équation différentielle vérifiée par la température intérieure.
- 3) En déduire la durée de chauffage τ nécessaire pour que la température intérieure s'élève de T_0 à $T_0 + \Delta T$. Faire l'application numérique pour $T_0 = T_F = 5^\circ\text{C}$, $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ et $P_m = 500 \text{ W}$.
- 4) Comment évolue cette durée si le cycle n'est plus réversible ?



Exercice 8 : Piscine et patinoire

★★★

Ref. 0182

- ✓ PAC
- ✓ Changement d'état
- ✓ Pseudo sources

Une pompe à chaleur réversible fonctionne entre la masse d'eau m_1 contenue dans une piscine et la masse d'eau $m_2 = 5 m_1$ d'une patinoire. L'idée est de prendre la chaleur à la patinoire et de la céder à la piscine. On adoptera indice 1 : *piscine*; indice 2 : *patinoire*

Initialement $T_{10} = T_{20} = 280 \text{ K} = T_0$.

On donne l'enthalpie massique de fusion de l'eau : $\Delta_{fus}h = 333 \text{ kJ.kg}^{-1}$. La capacité thermique de l'eau liquide est $c_l = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et celle de la glace est : $c_g = 2,1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

- 1) On amène l'eau liquide de la patinoire à la température $T'_2 = 273 \text{ K}$ (l'eau restant liquide). Calculer la température de la piscine T'_1 .
- 2) Toute l'eau de la patinoire passe ensuite à l'état de glace. Calculer la température de la piscine T''_1 .
- 3) Enfin, la glace ainsi formée est portée à la température $T_{2f} = 260 \text{ K}$. Calculer la température de la piscine T_{1f} .
- 4) Déterminer également le travail total qu'il a fallu fournir à la pompe. On introduira les grandeurs nécessaires.

Résolution de problème

Exercice 9 : Changement d'état dans 2 compartiments

★★★

Ref. 0183

Vous achetez six bouteilles de 1 L de jus de fruit que vous rangez dans votre réfrigérateur. Une heure plus tard, elles sont à la température du frigo.

Question : combien vous coûte ce refroidissement ?

Données :

- L'efficacité thermodynamique du réfrigérateur vaut 1,5
- L'isolation imparfaite du réfrigérateur se traduit par des fuites thermiques de puissance 10 W
- Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4180 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- Tarifs EDF : 1 kWh coûte 0,20 euros.