

7 – MACHINES THERMIQUES

Plan du chapitre

1 Principe des machines thermiques cycliques dithermes	2
1.1 Exemples	2
1.2 Machine thermique cyclique ditherme	3
1.3 Bilan d'énergie d'une machine thermique cyclique ditherme	4
1.4 Inégalité de Clausius	4
2 Cycles dithermes moteurs	5
2.1 Exemples	5
2.2 Échanges énergétiques dans un moteur	6
2.3 Efficacité ou rendement d'un moteur	7
3 Cycles dithermes inverses ou récepteurs	8
3.1 Position du problème	8
3.2 Échanges énergétiques dans un récepteur	8
3.3 Réalisation pratique	8
3.4 Efficacité d'une machine frigorifique	9
3.5 Efficacité d'une pompe à chaleur	11
4 Cogénération	12
4.1 Définition et exemples	12
4.2 Efficacité de la cogénération	12
Exercices	14
Travaux dirigés	18

Programme officiel – Deuxième semestre – **Thème E – énergie : conversion et transfert**

NOTIONS	CAPACITÉS EXIGIBLES
<p>E.3. Formulation et application des principes de la thermodynamique à l'étude des machines thermiques.</p> <p>Application du premier principe de la thermodynamique et de l'inégalité de Clausius aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, limitation.</p>	<p>Décrire le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.</p> <p>Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.</p> <p>Définir un rendement ou une efficacité et le relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.</p> <p>Citer quelques ordres de grandeur des rendements ou efficacités des machines thermiques réelles actuelles.</p> <p>Expliquer le principe de la cogénération.</p>

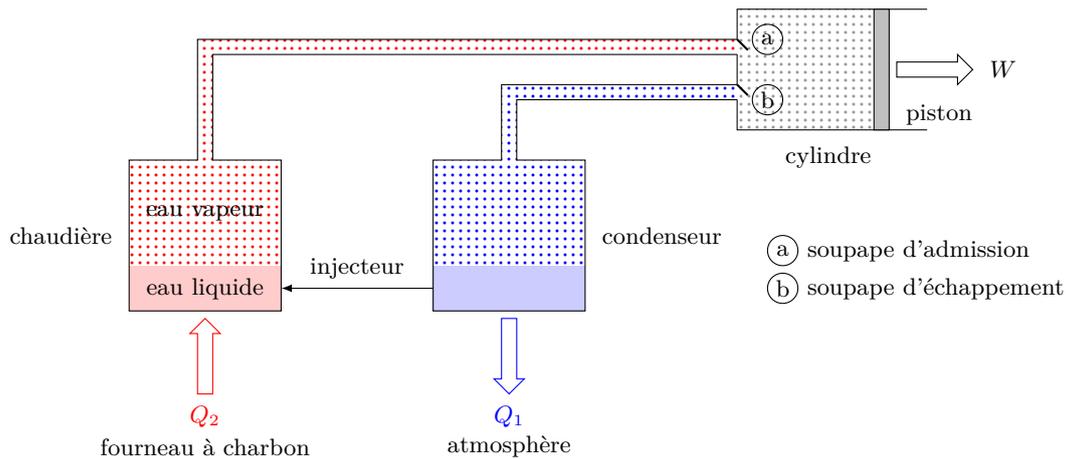
1 Principe des machines thermiques cycliques dithermes

1.1 Exemples

1.1.1 La machine à vapeur

L'exemple historique de machine thermique est la machine à vapeur, qui a permis l'essor de l'industrie au 19^e siècle. Celle-ci est composée de trois parties principales¹ :

- une chaudière dans laquelle on fait passer de l'eau liquide à l'état de vapeur sous pression,
- un cylindre, dans lequel la vapeur se détend en poussant un piston,
- un condenseur, chargé de liquéfier la vapeur, l'eau liquide étant réinjectée dans la chaudière.



L'eau liquide subit une transformation cyclique, au cours de laquelle elle échange de l'énergie avec l'extérieur :

- elle reçoit de l'énergie thermique au niveau de la chaudière, fournie par la combustion de charbon (ou autre combustible), soit $Q_{2\text{reçue}} > 0$,
- elle fournit un travail au niveau du cylindre, lorsqu'elle pousse le piston, soit $W_{\text{reçu}} < 0$,
- elle cède de l'énergie thermique au monde extérieur (usuellement l'atmosphère) au niveau du condenseur, soit $Q_{1\text{reçue}} < 0$.

1.1.2 Centrale nucléaire

Une centrale nucléaire est constituée d'un circuit secondaire, dans lequel circule de l'eau. Celle-ci subit également une transformation cyclique qui la fait passer par :

- un échangeur dans lequel l'eau liquide est vaporisée,
- une turbine, mise en mouvement de rotation par le passage de la vapeur,
- un condenseur, chargé de liquéfier la vapeur d'eau avant le début d'un nouveau cycle.

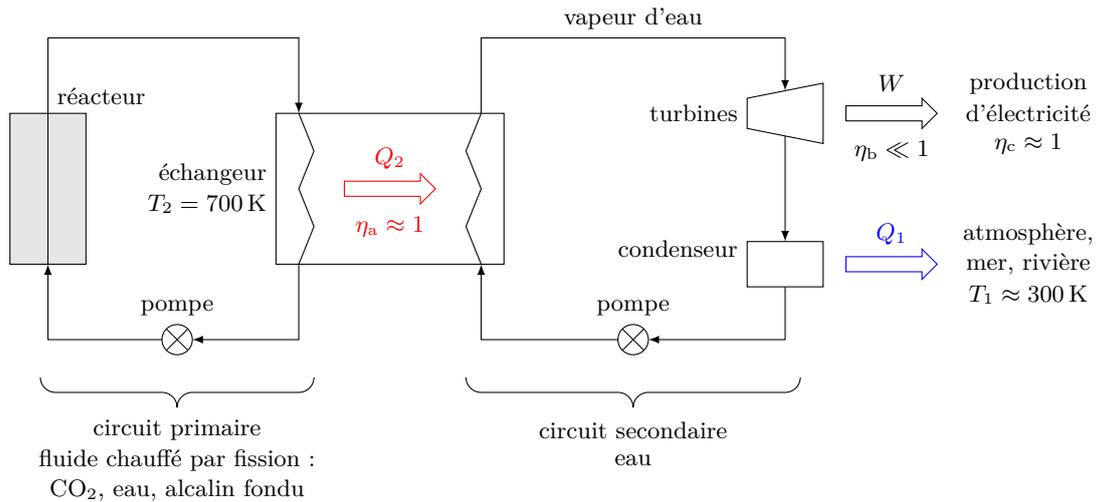
Dans l'échangeur, l'eau du circuit secondaire est mise en contact avec un autre fluide dont la nature dépend du type de centrale², qui circule dans le circuit primaire. Ce fluide est chauffé par la réaction de fission nucléaire au niveau du cœur du réacteur. C'est pour éviter les fuites radioactives que l'unique circuit de la machine à vapeur est remplacée par deux circuits séparés.

L'eau liquide du circuit secondaire subit une transformation cyclique, au cours de laquelle elle échange de l'énergie avec l'extérieur :

- elle reçoit de l'énergie thermique au niveau de l'échangeur, soit $Q_{2\text{reçue}} > 0$,
- elle fournit un travail au niveau de la turbine, soit $W_{\text{reçu}} < 0$,
- elle cède de l'énergie thermique au monde extérieur (l'atmosphère, la mer ou une rivière) au niveau du condenseur, soit $Q_{1\text{reçue}} < 0$.

1. On peut trouver une animation du fonctionnement de la machine à vapeur sur le site de Peter Valdivia : <http://www.petervaldivia.com/technology/mechanisms/steam-engine.php>

2. Dans les premières centrales nucléaires, c'était du dioxyde de carbone ; c'est actuellement de l'eau dans les centrales occidentales. Du sodium fondu a été utilisé dans des prototypes de surgénérateurs aujourd'hui abandonnés.



Le rendement d'une centrale nucléaire est de l'ordre de 30% :

- la conversion de l'énergie nucléaire produite dans le circuit primaire en énergie thermique au niveau du circuit secondaire se fait avec un rendement η_a proche de 100%,
- le travail de la turbine est converti en énergie électrique avec un rendement η_c proche de 100%
- la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique au niveau de la turbine se fait avec un rendement médiocre de l'ordre de $\eta_b \approx 30\%$.

1.2 Machine thermique cyclique ditherme

Fluide caloporteur

Dans une machine thermique, les échanges d'énergie se font par l'intermédiaire d'un fluide, appelé le **fluide caloporteur**.

Cycle de transformation

Dans la plupart des machines, le fluide caloporteur circule dans un circuit fermé, autrement dit subit une suite de transformations à l'issue desquelles il revient à son état initial.

Sources

On appelle **source** une partie du monde extérieur avec laquelle le fluide caloporteur échange de l'énergie sous forme de transfert thermique.

Source et pseudo-source

Si une source est un thermostat, sa température reste constante au cours du fonctionnement.
Si une source est de dimension petite, sa température varie à chaque cycle de fonctionnement. On parle de pseudo-source.

Machine ditherme

Dans une machine thermique **ditherme**, le fluide caloporteur échange de l'énergie thermique avec deux sources différentes :

- la source de température la plus haute est appelée **source chaude**,
- la source de température la plus basse est appelée **source froide**.

1.3 Bilan d'énergie d'une machine thermique cyclique ditherme

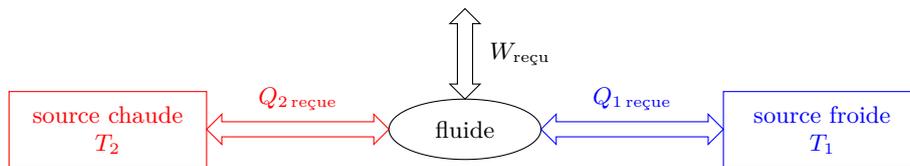
Échange d'énergie d'une machine thermique cyclique ditherme

Dans une machine thermique cyclique ditherme, le réalise fluide caloporteur subit un cycle de transformations au cours duquel il reçoit :

- un transfert thermique $Q_{2\text{reçue}}$ au contact de la source chaude de température T_2 ,
- un transfert thermique $Q_{1\text{reçue}}$ au contact de la source froide de température $T_1 < T_2$,
- un travail $W_{\text{reçu}}$.

Convention de signe

Dans toutes les formules du cours, le système est le fluide caloporteur. Les grandeurs $Q_{1\text{reçue}}$, $Q_{2\text{reçue}}$ et $W_{\text{reçu}}$ sont les énergies reçues par le fluide caloporteur au cours d'un cycle.



Bilan d'énergie au cours du fonctionnement global

Pour le système constitué du fluide caloporteur, à l'issue d'un nombre entier de cycles :

$$\Delta U = W_{\text{reçu}} + Q_{1\text{reçue}} + Q_{2\text{reçue}} = 0$$

Bilan d'énergie sur un cycle

Pour le système constitué du fluide caloporteur, un cycle de fonctionnement correspond à une évolution très petite du système ; sur un cycle :

$$dU = \delta W_{\text{reçu}} + \delta Q_{1\text{reçue}} + \delta Q_{2\text{reçue}} = 0$$

Expression à utiliser impérativement pour une source de température variable.

1.4 Inégalité de Clausius

Inégalité de Clausius au cours du fonctionnement global

On constate que, pour toute machine thermique cyclique ditherme, sur un nombre entier de cycles de transformation du fluide caloporteur :

$$\frac{Q_{1\text{reçue}}}{T_1} + \frac{Q_{2\text{reçue}}}{T_2} \leq 0$$

Inégalité de Clausius sur un cycle

Sur un cycle de fonctionnement, on a :

$$\frac{\delta Q_{1\text{reçue}}}{T_1} + \frac{\delta Q_{2\text{reçue}}}{T_2} \leq 0$$

Expression à utiliser impérativement pour une source de température variable.

Remarque : c'est une formulation du second principe de la thermodynamique.

Fonctionnement réversible

On dit que la machine fonctionne de façon réversible lorsque l'égalité de Clausius est vérifiée :

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_{1\text{reçue}}}{T_1} + \frac{Q_{2\text{reçue}}}{T_2} &= 0 \\ \frac{\delta Q_{1\text{reçue}}}{T_1} + \frac{\delta Q_{2\text{reçue}}}{T_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ si réversible}$$

Signification physique

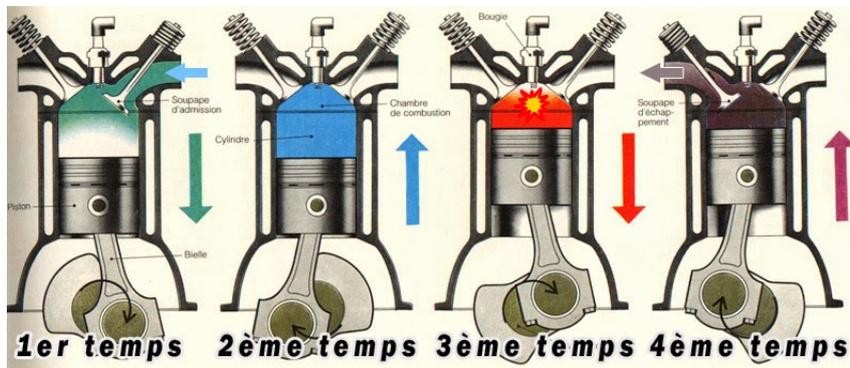
L'égalité de Clausius correspond à un fonctionnement idéal de la machine, dans laquelle il n'y aurait aucune perte d'énergie, en particulier par frottement.

2 Cycles dithermes moteurs

2.1 Exemples

Déjà vus : machine à vapeur, centrale nucléaire.

2.1.1 Moteur à explosion

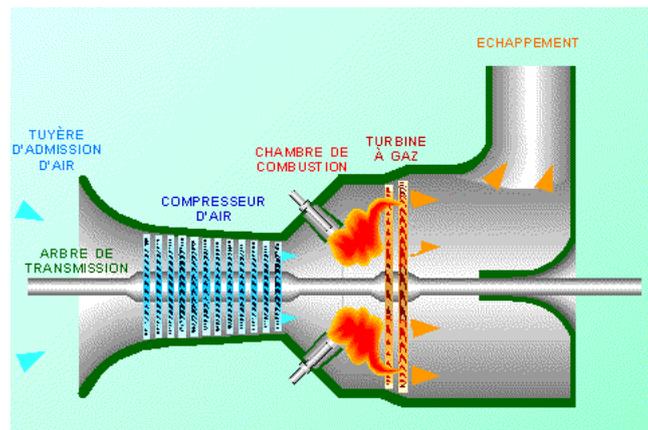


Fonctionnement d'un moteur à explosion³.

- **Admission.** La soupape d'admission étant ouverte, le mélange d'air et de carburant est aspiré dans le cylindre lors de la translation du piston. Le volume du cylindre atteint sa valeur maximale V_{\max} .
- **Soupape d'admission fermée,** le mélange est comprimé par retour du piston à sa position initiale. Le volume du mélange d'air et de carburant est V_{\min} .
- **Allumage.** La bougie provoque une étincelle qui déclenche la réaction de combustion du carburant. Cette réaction est fortement exothermique, ce qui provoque une augmentation de la température, c'est-à-dire que le fluide reçoit un transfert thermique Q_2 . La source chaude est donc le fluide lui-même au moment de la réaction exothermique d'explosion.
- **L'élévation de température et de pression** due à l'explosion entraîne une détente brusque des gaz brûlés. Le piston est alors repoussé à sa valeur V_{\min} . Le fluide fournit alors un travail au piston.
- **Échappement.** Soupape d'échappement ouverte, le retour du piston expulse les gaz brûlés, qui se refroidissent au contact de l'atmosphère (source froide). Le cylindre revient à sa position initiale.

3. Des animations permettant de visualiser le fonctionnement du moteur à 4 temps sont visibles en ligne : http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Thermo/Machines/4temps.html (site de Geneviève Tulloue de l'université de Nantes en format java), http://www.petervaldivia.com/technology/mechanisms/4_stroke_engine.php (site de Peter Valdivia), <http://www.animatedengines.com/otto.html> (site *AnimatedEngines*).

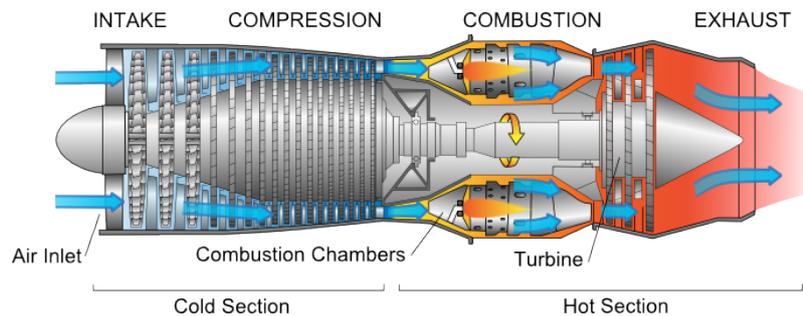
2.1.2 Turbine à combustion



- De l'air est injecté sous pression (passage dans un compresseur).
- Dans la chambre de combustion, du carburant est injecté de façon continue. Il y a donc combustion en continu (au contraire du moteur à 4 temps).
- Les gaz brûlés sont éjectés à travers une turbine qui permet la production d'électricité⁴.

2.1.3 Turboréacteur

Dans un réacteur, on maximise l'énergie cinétique d'éjection des gaz vers l'arrière pour faire avancer l'avion⁵.



2.2 Échanges énergétiques dans un moteur

Définition d'un moteur

Un **moteur** ou **machine motrice** est un dispositif permettant à l'utilisateur de récupérer du travail.

Échanges énergétiques dans une machine motrice ditherme

source chaude
 T_2

fluide

source froide
 T_1

4. Explications supplémentaires sur la turbine à gaz : https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_%C3%A0_gaz

5. Description plus poussée du turboréacteur sur le site de Peter Valdivia : <https://www.petervaldivia.com/turbo-jet/>

2.3 Efficacité ou rendement d'un moteur

Définition de l'efficacité ou rendement d'un moteur

On appelle **efficacité** ou **rendement** d'un moteur le rapport entre l'énergie utile récupérée et l'énergie coûteuse, c'est-à-dire l'énergie que l'utilisateur doit dépenser.

Expression de l'efficacité ou rendement d'un moteur

Expression en fonction des puissances

Efficacité ou rendement maximum d'une machine ditherme motrice

L'efficacité maximum d'une machine ditherme motrice fonctionnant entre une source froide de température T_1 et une source chaude de température T_2 est :

$$\eta_{\text{réel}} < \eta_{\text{max}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Démonstration (à connaître)

Théorème de Carnot

Le rendement maximum d'un moteur est obtenu pour un fonctionnement réversible (au sens thermodynamique). Il ne dépend ni de la machine ni du fluide caloporteur, mais uniquement des températures des sources chaude et froide.

Quelques rendements réels.

- Moteur à 4 temps : jusqu'à $\approx 35\%$ mais généralement 25% .
- Moteur Diesel : jusqu'à 42% .
- Centrale nucléaire : ≈ 30 à 35% .
- Centrale thermique à combustion : $\approx 40\%$.

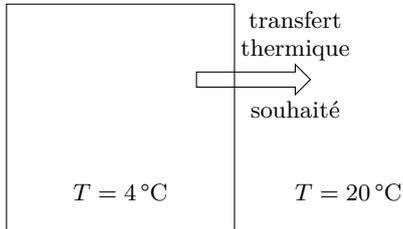
Exemple d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire fonctionne entre deux sources de températures $T_C = 300^\circ\text{C}$ et $T_F = 20^\circ\text{C}$ et fournit à l'alternateur une puissance de 1300 MW . Son rendement ne vaut que 55% du rendement théorique maximal. Déterminer les puissances thermiques échangées.

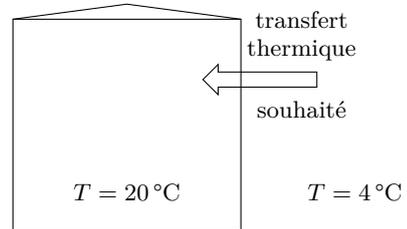
3 Cycles dithermes inverses ou récepteurs

3.1 Position du problème

Machine frigorifique.



Pompe à chaleur.



Machine thermique réceptrice

On appelle **machine thermique réceptrice** ou **récepteur** une machine dans laquelle le fluide calporteur reçoit réellement un travail, et effectue un transfert thermique dans le sens non spontané : de la source froide vers la source chaude.

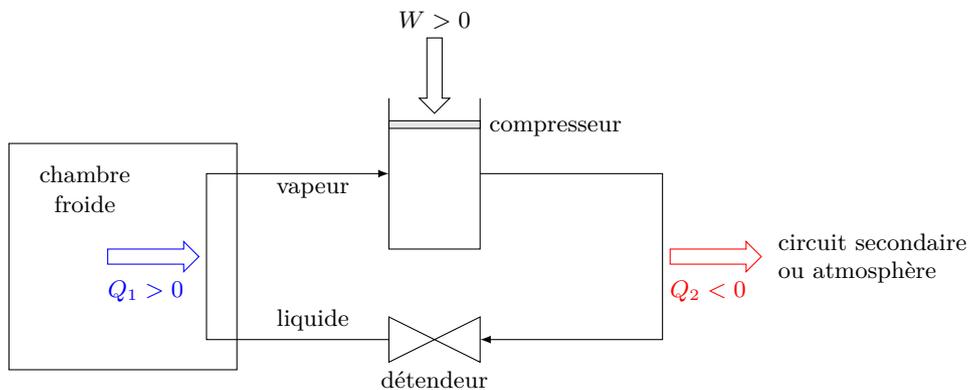
3.2 Échanges énergétiques dans un récepteur

Échanges énergétiques dans une machine réceptrice ditherme

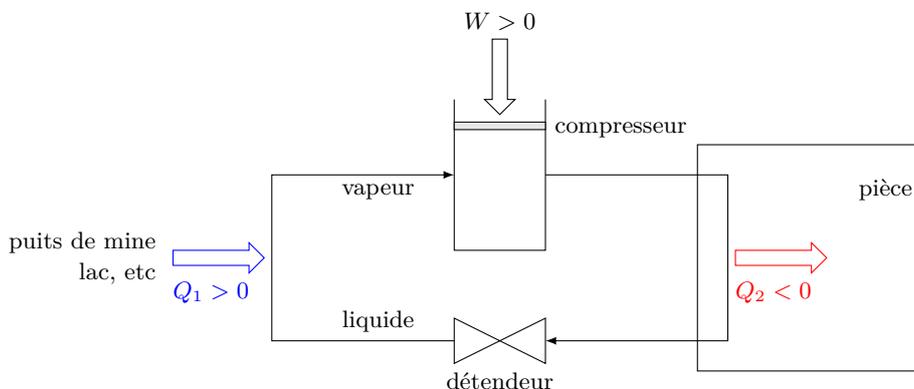


3.3 Réalisation pratique

Dans une machine frigorifique, le fluide est un liquide facile à vaporiser (actuellement des halogénoalcanes), c'est-à-dire dont l'enthalpie de vaporisation est faible.



Même principe pour une pompe à chaleur, mais la partie intéressante pour l'utilisateur est la source chaude et non plus la source froide. Dans les pompes à chaleur fonctionnant avec le sous-sol comme source froide, le fluide caloporteur est généralement de l'eau.



3.4 Efficacité d'une machine frigorifique

Efficacité d'une machine frigorifique

On appelle **efficacité énergétique** d'une machine frigorifique le rapport entre l'énergie utile récupérée et l'énergie coûteuse, c'est-à-dire l'énergie que l'utilisateur doit dépenser.

Efficacité d'une machine frigorifique

- Efficacité d'un réfrigérateur commercial : $e = 2 \text{ à } 4$.
- La performance réelle est moindre (pertes thermiques, ouverture des portes, formation de givre...).
- Dans les machines frigorifiques performantes, une partie de l'énergie libérée au niveau de la source chaude est récupérée, ce qui augmente l'efficacité.

Pompe à chaleur	Coefficient de performance COP	2 à 4
Réfrigérateur	Ratio d'efficacité énergétique EER	2 à 4

Ces valeurs dépendent des conditions d'utilisation (température extérieure en particulier)
Elles tiennent compte du rendement du compresseur

A	EER > 3,20
B	3,20 ≥ EER > 3,00
C	3,00 ≥ EER > 2,80
D	2,80 ≥ EER > 2,60
E	2,60 ≥ EER > 2,40
F	2,40 ≥ EER > 2,20
G	2,20 ≥ EER

A	COP > 3,60
B	3,60 ≥ COP > 3,40
C	3,40 ≥ COP > 3,20
D	3,20 ≥ COP > 2,80
E	2,80 ≥ COP > 2,60
F	2,60 ≥ COP > 2,40
G	2,40 ≥ COP

Efficacité maximale d'une machine frigorifique

L'efficacité maximum d'une machine frigorifique ditherme fonctionnant entre une source froide de température T_1 et une source chaude de température T_2 est :

$$e_{\text{réel}} < e_{\text{max}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

Démonstration (à connaître)

On retrouve le théorème de Carnot.

Exemple d'une machine frigorifique

Soit une machine frigorifique, dont la chambre froide est maintenue à la température $T_1 = -10^\circ\text{C}$, fonctionnant avec l'atmosphère à $T_2 = 30^\circ\text{C}$ comme source chaude. Que vaut l'efficacité énergétique maximale? Comparer avec une machine frigorifique réelle.

Efficacité d'un congélateur commercial

La fiche technique d'un réfrigérateur indique une consommation de $0,67 \text{ kW} \cdot \text{h}$ pendant 24 h et un pouvoir de congélation de $22 \text{ kg}/24 \text{ h}$, pour un fonctionnement dans un local à 20°C et une température de consigne de -18°C . Estimer l'efficacité du congélateur.

Capacité thermique massique moyenne des aliments décongelés : $c_d = 3,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Capacité thermique massique moyenne des aliments congelés : $c_c = 1,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Enthalpie massique moyenne de fusion des aliments : $\ell_{\text{fus}} = 250 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

3.5 Efficacité d'une pompe à chaleur

Efficacité d'une pompe à chaleur

On appelle **efficacité** ou **coefficient de performance COP** d'une pompe à chaleur le rapport entre l'énergie utile récupérée et l'énergie coûteuse, c'est-à-dire l'énergie que l'utilisateur doit dépenser.

Efficacité ou coefficient de performance d'une pompe à chaleur

Coefficient de performance des pompes à chaleur commerciale : $\text{COP} = 1,5 \text{ à } 4$.

Efficacité maximale d'une pompe à chaleur

L'efficacité maximum d'une pompe à chaleur ditherme fonctionnant entre une source froide de température T_1 et une source chaude de température T_2 est :

$$e_{\text{réel}} < e_{\text{max}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Démonstration (à connaître)

On retrouve le théorème de Carnot.

Exemple de pompe à chaleur

Une des plus anciennes pompe à chaleur installée a permis le chauffage de l'Hôtel de ville de Zürich ; la source froide est le lac de Zürich. On souhaite une température intérieure de 19°C , un jour où l'eau du lac est à 8°C . Que vaut l'efficacité énergétique maximale ? Comparer avec une pompe à chaleur réelle.

Comparaison entre un chauffage électrique et une pompe à chaleur

Comparer l'efficacité d'une pompe à chaleur et d'un radiateur électrique.

4 Cogénération

4.1 Définition et exemples

Principe de la cogénération

La cogénération consiste à combiner deux modes de production d'énergie utile dans une même centrale.

Cogénération électrique

Dans une centrale à cycles combinés, on produit de l'électricité de deux façon différentes (selon deux cycles juxtaposés) :

- une turbine à combustion (généralement du gaz),
- une turbine à vapeur.

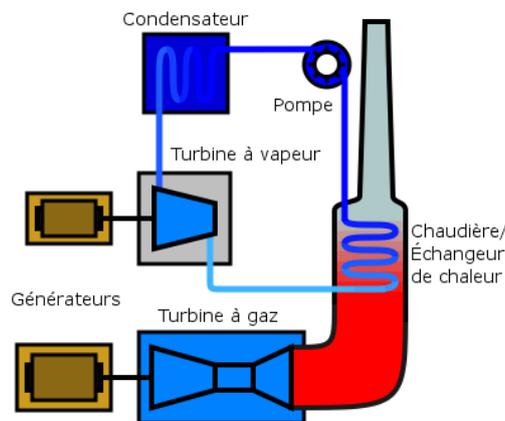


Schéma : Alexandre Delode, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:COGAS-diagramFR.png>

Cogénération thermique

On produit simultanément du travail et de l'énergie thermique :

- une turbine à combustion produit de l'électricité,
- le transfert thermique libéré au niveau de la source froide alimente un réseau de chauffage.

Contraintes liées à la cogénération thermique.

- Contrainte de proximité : l'énergie thermique se transporte beaucoup moins bien que l'électricité donc la centrale doit être proche du lieu de consommation de l'énergie thermique.
- Contrainte de régularité : gestion des périodes de mise à l'arrêt de la centrale (entretien).

Exemples.

- À grande échelle : une centrale alimente en électricité une zone industrielle et en énergie thermique des serres agricoles.
- À petite échelle : un groupe électrogène alimente une maison en électricité et en énergie thermique.

4.2 Efficacité de la cogénération

Efficacité globale

L'efficacité globale d'un dispositif de cogénération est le rapport de la somme de toutes les énergies utiles récupérées à l'énergie coûteuse.

Efficacité d'une centrale à cogénération électrique

- Centrale électrique à gaz : $\eta \approx 35\%$.
- Centrale à cycle combiné : jusqu'à $\eta = 60\%$.

Efficacité de la cogénération thermique

Attention ! La puissance thermique utile n'est pas égale à puissance cédée à la source froide qui inclut aussi les pertes dans tout le dispositif.

Économie réalisée par la cogénération thermique

Une turbine à gaz munie d'une chaudière de récupération permet de produire 33 MJ électrique et 50 MJ thermique à partir d'un combustible libérant 100 MJ. Le rendement électrique typique d'une turbine à gaz simple est de 40% et celui d'une chaudière à gaz simple est de 90%.
Comparer les rendements électriques dans les deux cas. Comparer les rendements thermique dans les deux cas. Comparer les rendements globaux, et calculer l'économie en combustible réalisée.

Exercices

Application directe du cours

Exercice 1 : efficacité énergétique d'une machine à vapeur

Une machine à vapeur développe une puissance mécanique de 73,5 kW (soit 100 chevaux). Elle consomme par heure et par cheval une masse $m = 1,0$ kg de charbon, dont la combustion dégage 33,44 MJ. La source froide est l'atmosphère à $T_1 = 20^\circ\text{C}$ et la source chaude est la chaudière à charbon à la température $T_2 = 200^\circ\text{C}$.

1. Sachant que 80% du transfert thermique dégagé par la combustion est fournie au moteur, calculer l'efficacité de la machine.
2. Quel serait l'efficacité d'une machine réversible (idéale) fonctionnant entre les deux mêmes sources ?
3. Calculer le rapport de l'efficacité réelle à l'efficacité maximale théorique.

Exercice 2 : efficacité d'une machine frigorifique

1. Montrer que l'efficacité énergétique d'une machine frigorifique, dans le cas où le fluide ne reçoit du travail qu'au niveau du compresseur, est inférieure à une valeur maximale.
2. Comment évolue l'efficacité maximale de la machine lorsque la différence de température entre les deux sources augmente ? Commenter.

Exercice 3 : intérêt d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur réversible (idéale) utilise comme source froide l'eau d'un lac à $T_1 = 10^\circ\text{C}$ pour chauffer une pièce à $T_2 = 50^\circ\text{C}$.

1. Déterminer le rapport du transfert thermique reçu par la pièce au travail fourni. Comparer avec les pompes à chaleur commerciale.
2. Quel serait ce rapport si le même travail était dissipé par effet Joule dans une résistance chauffante située dans la pièce ? En déduire le gain d'énergie réalisé en utilisant une pompe à chaleur.

Exercice 4 : efficacité d'une machine réceptrice

Un appareil est utilisé l'été pour climatiser un appartement et l'hiver comme chauffage, de sorte à avoir une température constante.

1. Quelle est l'efficacité maximale de la machine si on veut une température intérieure de 19°C lorsque la température extérieure est de 2°C ?
2. Quelle est l'efficacité maximale de la machine si on veut une température intérieure de 25°C lorsque la température extérieure est de 35°C ?

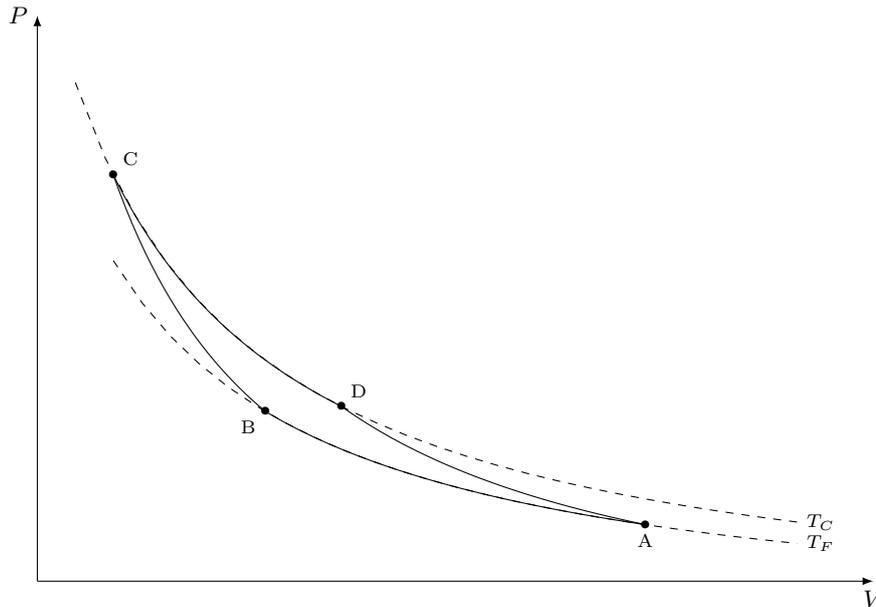
Entraînement

Exercice 5 : cycle de Carnot d'un gaz parfait

On considère une quantité de matière n d'un gaz parfait de capacité thermique molaire à volume constant C_{vm} enfermé dans un cylindre. Partant de l'état A (P_1, V_1, T_F), il subit la suite de transformations :

- compression isotherme jusqu'à l'état B (P_2, V_2, T_F),
- compression adiabatique jusqu'à l'état C (P_3, V_3, T_C),
- détente isotherme jusqu'à l'état D (P_4, V_4, T_C),
- détente adiabatique jusqu'à l'état A.

Le dispositif est tel que : $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$.



1. Justifier que le gaz soit à l'équilibre de pression avec l'extérieur au cours des transformations $A \rightarrow B$ et $C \rightarrow D$. En déduire l'expression du travail reçu W_{AB} et W_{CD} par le gaz au cours de ces transformations.
2. À l'aide du premier principe, calculer les transferts thermiques reçus Q_{AB} et Q_{CD} au cours des transformations $A \rightarrow B$ et $C \rightarrow D$.
3. À l'aide du premier principe, calculer les travaux reçus W_{BC} et W_{DA} au cours des transformations $B \rightarrow C$ et $D \rightarrow A$.
4. Montrer que l'égalité de Clausius est vérifiée.
5. Calculer le travail total reçu au cours d'un cycle. La machine est-elle motrice ou réceptrice ?
6. Quelle est le transfert thermique échangé par le gaz au contact de la source froide ? Quel est son signe ? Même question pour le transfert thermique échangé au contact de la source chaude.
7. À quoi correspond la machine qui décrirait le même cycle mais en sens inverse : $A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$?

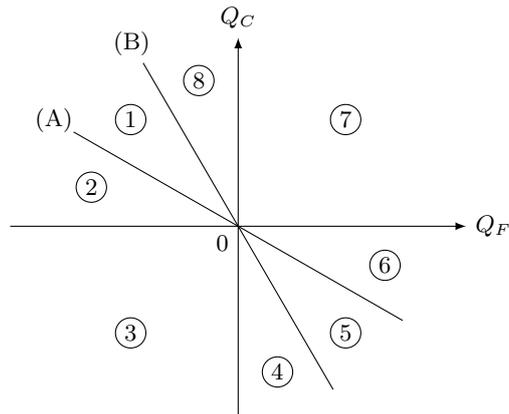
Exercice 6 : diagramme de Raveau (concours e3a 2010)

Soit un fluide, définissant le système étudié, effectuant un cycle de transformations entre deux thermostats de températures respectives T_C et T_F , avec $T_C > T_F$, appelées respectivement sources chaude et froide. Au cours d'un cycle, le fluide reçoit les transferts thermiques algébriques Q_C et Q_F au contact des sources chaude et froide ; en outre le travail algébrique reçu au cours d'un cycle est W .

1. Établir la relation entre W , Q_C et Q_F . Rappeler l'inégalité de Clausius. Que devient-elle si la machine fonctionne de façon idéale ?

Il est possible de discuter du principe de fonctionnement général des machines dithermes en considérant un diagramme dit « de Raveau », représenté ci-dessous. Les deux droites qui y sont portées ont pour équations : $Q_C = -Q_F$ (droite A) et $Q_C = -Q_F T_C / T_F$ (droite B). Le diagramme fait apparaître huit domaines.

2. Indiquer les domaines correspondant à des fonctionnements interdits par les loi de la thermodynamique.
3. Quels sont les domaines correspondant à un fonctionnement de la machine en moteur ? en pompe à chaleur ? en réfrigérateur ?
4. À quoi correspondent physiquement les domaines qui n'ont pas encore été attribués ?
5. Dans le cas d'une machine fonctionnant en moteur, exprimer le rendement (ou efficacité énergétique), en fonction de Q_C et Q_F . Montrer que le rendement est toujours inférieur à une valeur maximale qu'on déterminera.
6. Proposer une valeur numérique plausible pour le rendement maximal d'un moteur.



Exercice 7 : fonctionnement d'un réfrigérateur (CAPES 2011)

On considère un fluide décrivant un cycle ditherme entre une source chaude de température T_c et une source froide de température T_f . On note Q_c et Q_f les transferts thermiques reçus par le fluide pendant un cycle de la part des sources chaude et froide. Cette machine est un réfrigérateur réversible ; la source chaude est l'extérieur du réfrigérateur et la source froide est l'intérieur du réfrigérateur.

1. Préciser, en justifiant avec des arguments de la vie courante, les signes de Q_c et Q_f .
2. Définir l'efficacité (performance) du réfrigérateur, et l'exprimer en fonction de Q_c et Q_f . Déterminer l'efficacité maximale en fonction des températures des sources. Faire le calcul pour $T_c = 297 \text{ K}$ et $T_f = 277 \text{ K}$.

Dans la suite, on considère que la machine fonctionne à son efficacité maximale. En régime permanent, la température de la source froide reste constante et le fluide reçoit une puissance mécanique moyenne $\mathcal{P}_m = 100 \text{ W}$.

3. Calculer le transfert thermique moyen Q_{fm} reçu par la source froide de la part du fluide effectuant le cycle, pendant une durée de fonctionnement Δt de 1 jour.
4. L'isolation de la source froide est imparfaite, et elle reçoit de l'extérieur une puissance thermique $\mathcal{P}_{\text{perte}}$. Calculer $\mathcal{P}_{\text{perte}}$.

Dans les mêmes conditions qu'à la question précédente, on place un volume $V = 1,0 \text{ L}$ d'eau initialement à la température $T_0 = 297 \text{ K}$ dans le réfrigérateur réversible. On suppose que la masse d'eau ajoutée est suffisamment petite pour que la source froide garde une température constante égale à T_f . On constate que, lors du refroidissement du volume V d'eau, la puissance mécanique moyenne reçue par le fluide est $\mathcal{P}'_m = 103 \text{ W}$.

5. Calculer la durée nécessaire $\Delta t'$ pour que le volume V d'eau atteigne la température T_f .

masse volumique de l'eau : $\rho_e = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

capacité thermique massique de l'eau : $c_e = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Exercice 8 : étude d'une machine frigorifique

Une machine frigorifique réversible fonctionne entre une source froide composée d'un mélange eau-glace à la pression atmosphérique et une source chaude constituée par l'atmosphère à la température de 20°C .

1. Expliquer pourquoi il se forme de la glace dans la source froide. Que dire de sa température ?
2. Établir une relation entre le transfert thermique reçu par le fluide de la part de la source froide, le travail reçu et les températures des deux sources.
3. En déduire la masse de glace qui se forme dans la source froide par $\text{kW} \cdot \text{h}$ dépensé.

Chaleur latente massique de fusion de l'eau à 0°C : $\ell_f = 334,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Exercice 9 : production de vapeur d'eau par une pompe à chaleur

On souhaite utiliser une pompe à chaleur pour produire de la vapeur d'eau. La pompe à chaleur utilise un fluide qui échange de l'énergie thermique avec :

- une masse $m_2 = 500$ kg d'eau initialement à la température $T_{2\text{ini}} = 20$ °C contenue dans un puits,
- une grande masse m_1 d'eau liquide à la température $T_1 = 100$ °C et à pression atmosphérique.

On suppose que le puits est isolé thermiquement du milieu ambiant, et ne réalise de transfert thermique qu'avec le fluide de la machine. La pompe à chaleur fonctionne réversiblement, au contact mécanique avec l'atmosphère. La capacité thermique massique de l'eau liquide est $c = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. La chaleur latente massique de vaporisation de l'eau sous pression atmosphérique est $\ell_v = 2260 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1. Identifier la source chaude et la source froide. Dans quel sens les échanges thermiques se font-ils avec chacune d'entre elles ?
2. Expliquer comment cette pompe à chaleur produit de la vapeur d'eau. Que dire de la température de la source chaude au cours du fonctionnement de la pompe ?
3. Pourquoi ne peut-on pas considérer l'eau du puits comme un thermostat ? En déduire comment évolue sa température lorsque la machine fonctionne.

On considère un cycle parcouru par le fluide ; au début du cycle, la température de l'eau du puits est T_2 . Au cours de ce cycle, le fluide reçoit un transfert thermique δQ_1 de la source chaude et un transfert thermique δQ_2 de la source froide. À la fin du cycle, la température de l'eau du puits a varié de dT_2 , et il s'est formé une masse dm de vapeur d'eau.

4. Quelle est la relation entre δQ_1 et dm ? Quelle est la relation entre δQ_2 et dT_2 ? Attention aux signes !
5. La pompe fonctionnant de façon réversible, quelle est la relation entre δQ_1 et δQ_2 ? En déduire une équation différentielle reliant entre m et T_2 .
6. On laisse fonctionner la pompe tant que l'eau du puits ne gèle pas. En déduire la masse de vapeur totale qu'on peut former.
7. Calculer les transferts thermiques totaux échangés par le fluide avec les deux sources, ainsi que le travail total que l'opérateur a dû fournir à la pompe. En déduire le coefficient d'efficacité global de la pompe.

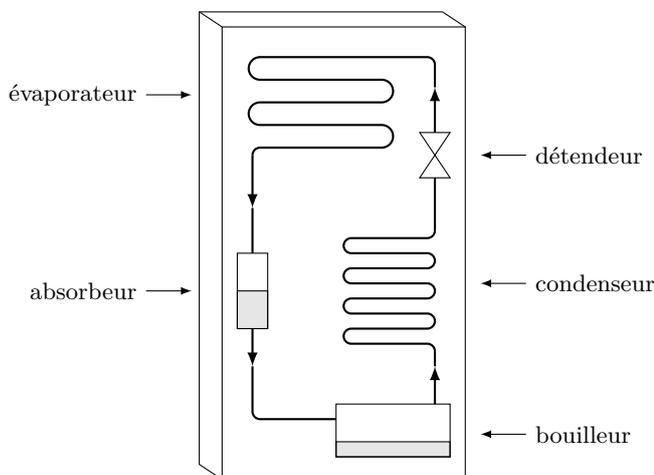
Travaux dirigés

Exercice 1 : machine à absorption

Certains réfrigérateurs de camping fonctionnent sur le principe d'une machine à absorption, dont le schéma de principe est donné ci-contre. Dans une telle machine, on fournit au fluide caloporteur non pas du travail mais un transfert thermique par l'intermédiaire d'une source auxiliaire, appelée le bouilleur.

Le fluide caloporteur s'évapore au contact de la source froide, dont la température est $T_F = -6^\circ\text{C}$ en régime stationnaire. La source chaude est l'atmosphère, de température constante $T_C = 30^\circ\text{C}$. La température du bouilleur est $T_B = 220^\circ\text{C}$.

On appelle Q_F , Q_C et Q_B les transferts thermiques reçus par le fluide caloporteur au niveau des sources froide, chaude et du bouilleur.

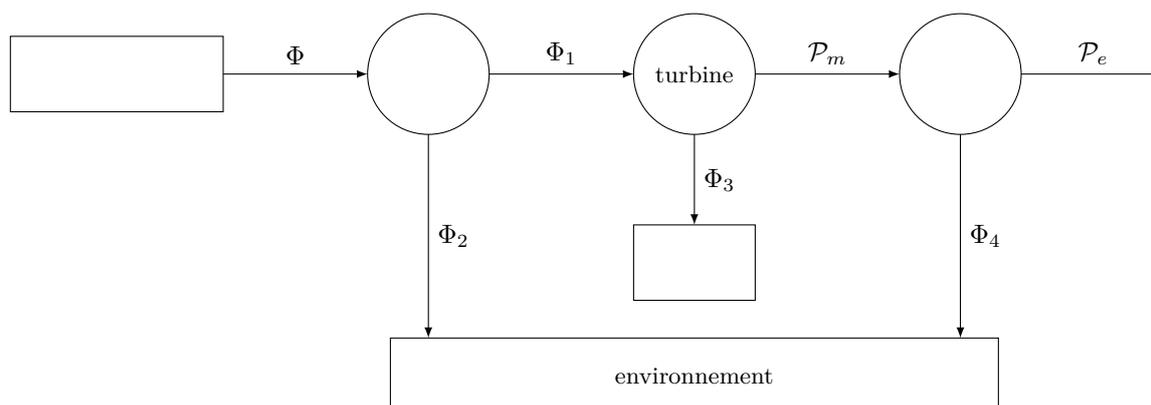


1. Écrire deux relations entre Q_F , Q_C et Q_B , dans le cas d'un fonctionnement cyclique de la machine. L'inégalité de Clausius se généralise à davantage de source.
2. Définir l'efficacité e de la machine. Déterminer sa valeur maximale e_{\max} .
3. Sachant que $e = 2,5$ et que le bouilleur consomme une puissance moyenne $\mathcal{P}_B = 384\text{ kWh/an}$, calculer les puissances thermiques échangées avec les sources froide et chaude, et la création d'entropie par seconde.
4. Quel est le rapport de l'efficacité réelle à l'efficacité maximale ?
5. Quelle serait l'efficacité de cette machine si on la faisait fonctionner en pompe à chaleur ?

Exercice 2 : bilan énergétique d'une centrale nucléaire (extrait de Banque G2E 2009)

Une tranche de centrale nucléaire, produisant une puissance électrique $\mathcal{P}_e = 900\text{ MW}$, a un rendement de 32%. L'énergie dégagée dans le réacteur nucléaire (RN) est extraite par un fluide caloporteur circulant dans le circuit primaire. Le passage du fluide du circuit primaire dans le générateur de vapeur (GV) permet de vaporiser l'eau du circuit secondaire. Dans le circuit secondaire, la vapeur sous pression passe dans une turbine dont le rendement thermique est $\eta = 43\%$. La vapeur refroidie revient ensuite à l'état liquide dans le condenseur (C). D'autre part, la turbine entraîne le rotor d'un alternateur (AL) qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

1. À l'aide des informations fournies, compléter la chaîne énergétique du schéma ci-dessous en donnant les noms manquants.



2. La puissance totale cédée à l'environnement est égale à 430 MW. Déterminer les valeurs numériques des transferts de puissance représentés sur le diagramme. Pourquoi certaines de ces puissances sont-elles notées \mathcal{P} et d'autres Φ ?

La production d'énergie dans la centrale est due à la fission de noyaux d'uranium 235 provoquée par un bombardement de neutrons. La valeur moyenne de l'énergie libérée par noyau de matière fissile est de 200 MeV.

3. Quelle énergie (en joule) peut-on libérer avec une tonne d'uranium 235 ?
4. Calculer la masse de pétrole ou de charbon nécessaire pour obtenir la même énergie. Conclusion ?
5. Calculer la masse annuelle d'uranium 235 consommé par la centrale.

Masse molaire de l'uranium 235 : $M = 235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Nombre d'Avogadro : $\mathcal{N}_A = 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Valeur de l'électronvolt : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Valeur de la tonne équivalent pétrole : $1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ}$

Valeur de la tonne équivalent charbon : $1 \text{ tec} = 0,69 \text{ tep}$

Exercice 3 : source de température variable

On considère une pompe à chaleur qui fonctionne entre l'intérieur d'une habitation et l'extérieur dont la température est de 5°C . Au départ, la température intérieure est la même que la température extérieure, et on souhaite réchauffer l'intérieur jusqu'à 20°C .

La pompe à chaleur consomme une puissance électrique constante $\mathcal{P} = 2,0 \text{ kW}$ et on suppose qu'elle fonctionne avec l'efficacité maximale possible. Les pertes thermiques sont négligées durant tout la phase de chauffe. L'intérieur de l'habitation a une capacité thermique à volume constant totale de $4 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Rappeler le sens des échanges énergétiques dans la pompe à chaleur.
2. Écrire les relations entre les énergies échangées par le fluide caloporteur sur un cycle de fonctionnement.
3. Déterminer le temps nécessaire pour atteindre la température voulue.