Thème III. L'énergie : conversions et transferts (Thermodynamique)

TD n°20 Machines thermiques – *Corrigé*

I Exercices d'application directe du cours

Exercice n°1 Moteur ou récepteur ?

On considère un système fermé fluide parcourant des cycles thermodynamiques dithermes, au cours desquels il reçoit algébriquement le travail $W = -53$ J, le transfert thermique $Q_F = -70$ J de la part de la source froide de température $T_F = 278$ K et le transfert thermique Q_C de la part de la source chaude de température $T_C = 500$ K.

R1. S'agit-il d'un cycle moteur ou d'un cycle récepteur ?

Solution: Le travail algébriquement reçu est négatif, ce cycle fournit donc réellement du travail au milieu extérieur, il s'agit d'un $\boxed{\text{cycle moteur}}$.

R2. Déterminer le transfert thermique Q_C qu'il reçoit algébriquement de la part de la source chaude. Faire l'application numérique.

Solution: D'après le premier principe sur un cycle : $\Delta_{\text{cycle}}U = Q_C + Q_F + W$, or $\Delta_{\text{cycle}}U = 0$.
Ainsi $\boxed{Q_C = -W - Q_F = 123 \text{ J} > 0}$

R3. Le fonctionnement de cette machine ditherme est-il réversible ?

Solution: D'après le deuxième principe sur un cycle $\Delta_{\text{cycle}}S = \dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} + S_{\text{créée}}$, avec $\Delta_{\text{cycle}}S = 0$.
Soit $S_{\text{créée}} = -\dfrac{Q_C}{T_C} - \dfrac{Q_F}{T_F} = 0,0058 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} > 0$
Le fonctionnement est donc irréversible.

Exercice n°2 Congélateur

Un congélateur est placé dans une pièce à température ambiante de 21 °C. Pour que son intérieur reste à −19 °C, il est nécessaire d'en extraire un transfert thermique de 400 kJ par heure. On supposera cette opération faite de manière réversible.

R1. Rappelez l'expression puis donnez la valeur de l'efficacité de ce congélateur.

Solution: Efficacité du congélateur : $e = \dfrac{Q_f}{W_{\text{cycle}}}$
Si le congélateur a un fonctionnement réversible, $e = e_C = \dfrac{T_f}{T_c - T_f} = 6,35$

R2. Calculez la puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner le congélateur dans les conditions indiquées.

Solution: $\mathscr{P}_{th,f} = 400$ kJ/h, donc $\mathscr{P} = \dfrac{\mathscr{P}_{th,f}}{e_C} = 17,5$ W

R3. Comment cette dernière valeur est-elle modifiée s'il fait 30 °C à l'extérieur ? Commentez.

Solution: S'il fait plus chaud à l'extérieur, l'efficacité diminue, et la puissance électrique nécessaire augmente.

R4. Que vaut le transfert thermique vers l'extérieur en une heure ?

Solution: Sur un cycle : $Q_f + Q_c + W_{\text{cycle}} = 0$, donc $Q_c = -Q_f - W_{\text{cycle}} = -128,6$ W

Exercice n°3 Centrale nucléaire

Une centrale nucléaire est une machine ditherme en contact avec

— Un bain d'eau chaude à $T_c = 320$ °C

— Un fleuve à $T_f = 10$ °C

La puissance délivrée par la centrale est $\mathcal{P} = 1,00$GW.

R1. Calculez le rendement η de la centrale, sachant qu'il vaut 60% du rendement de Carnot.

Solution: Rendement de la centrale nucléaire : $\eta = 60\% \times \eta_{\text{Carnot}} = 0,6 \times \left(1 - \dfrac{T_c}{T_f}\right) = 0,31$

R2. Exprimez puis calculez $\dot{Q}_c$ le transfert thermique reçu par la machine de la part de la source chaude par unité de temps, et $\dot{Q}_f$ le transfert thermique reçu par la machine de la part de la source froide par unité de temps.

Solution: Par définition du rendement $\eta = \dfrac{\mathscr{P}}{\dot{Q}_c}$, ainsi $\dot{Q}_c = \dfrac{\mathscr{P}}{\eta} = 3,2$ GW

R3. Quelle énergie par unité de temps reçoit le fleuve ? Quelle conséquence a-t-elle ?

Solution: L'énergie reçue par le fleuve est $-\dot{Q}_f$ reçu par la machine ditherme.
D'après le 1er principe sur un cycle (en algébrisant !!) : $-\mathscr{P} + \dot{Q}_c + \dot{Q}_f = 0$, soit $-\dot{Q}_f = -\mathscr{P} + \dot{Q}_c = 2,2$ GW
Cette énergie reçue par le fleuve va réchauffer le fleuve.

Exercice n°4 Cycle d'Ericson

En 1833, John Ericson brevette son moteur (éponyme), capable de produire une puissance de 5 ch (3,7 kW). Le fluide utilisé est simplement de l'air (supposé gaz parfait diatomique, $\gamma = 1,4$), de quantité de matière n. Le cycle est constitué de deux isothermes réversibles (notons T_1 et $T_2 = 2T_1$ leurs températures) et deux isobares (de pressions P_1 et $P_2 = 2P_1$).

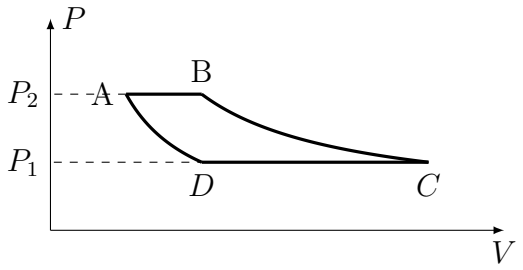
R1. Rappeler les expressions des capacités thermiques à volume et à pression constante d'un gaz parfait en fonction de n, R et γ. Les simplifier compte tenu de la valeur $\gamma = 1,4 = \dfrac{7}{5}$.

Solution: Capacité thermique à volume constant : $C_V = \dfrac{nR}{\gamma - 1} = \dfrac{5}{2}nR$

Capacité thermique à pression constante : $C_P = \dfrac{nR\gamma}{\gamma - 1} = \dfrac{7}{2}nR$

R2. Comment est représentée une transformation isotherme dans le diagramme de Clapeyron (P, V) ? même question pour une transformation isobare ?
Représenter les deux isobares à P_1 et P_2, et les deux isothermes à T_1 et T_2.

Solution: Une transformation isotherme d'un gaz est représentée par une hyperbole dans le diagramme (P, V).
Une transformation isobare est représentée par un segment horizontal.



de B à C : isotherme à la température $T_2 = 2T_1 > T_1$
de D à A : isotherme à la température T_1

A	$\longrightarrow$	B	$\longrightarrow$	C	$\longrightarrow$	D
$P_2 = 2P_1$		$P_2 = 2P_1$		P_1		P_1
T_1		$T_2 = 2T_1$		$T_2 = 2T_1$		T_1
$V_A = \dfrac{nRT_1}{2P_1}$		$V_B = \dfrac{nRT_2}{2P_1} = \dfrac{2nRT_1}{2P_1} = \dfrac{nRT_1}{P_1}$		$V_C = \dfrac{2nRT_1}{P_1}$		$V_D = \dfrac{nRT_1}{P_1} = V_B$

R3. Dans quel sens est décrit un cycle moteur ?
Représenter le cycle d'Ericson dans le plan (P, V) et indiquer son sens dessus.

Solution: Un cycle moteur est décrit dans le sens horaire : sens ABCDA ci-dessus.

R4. Exprimer les travaux reçus par l'air pour chacune des étapes du cycle, en fonction du produit nRT_1.

Solution:

- $A \to B$:

$$\begin{aligned} W_{AB} &= \int_{V_A}^{V_B} -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V \\ &= \int_{V_A}^{V_B} -P_2\mathrm{d}V \\ &= -2P_1(V_B - V_A) \\ &= -2P_1\left(\frac{nRT_1}{P_1} - \frac{nRT_1}{2P_1}\right) \\ &= -P_1V_1 < 0 \end{aligned}$$

- $B \to C$:

$$\begin{aligned} W_{BC} &= \int_{V_B}^{V_C} -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V \\ &= \int_{V_B}^{V_C} -P\mathrm{d}V \\ &= -\int_{V_B}^{V_C} \frac{2nRT_1}{V}\mathrm{d}V \\ &= -2nRT_1 \ln\frac{V_C}{V_B} \\ &= -2nRT_1 \ln(2) < 0 \end{aligned}$$

- $C \to D$:

$$\begin{aligned} W_{CD} &= \int_{V_C}^{V_D} -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V \\ &= \int_{V_C}^{V_D} -P_1\mathrm{d}V \\ &= -P_1(V_D - V_C) \\ &= -P_1\left(\frac{nRT_1}{P_1} - \frac{2nRT_1}{P_1}\right) \\ &= P_1V_1 > 0 \end{aligned}$$

- $D \to A$:

$$\begin{aligned} W_{DA} &= -nRT_1 \ln\frac{V_A}{V_D} \\ &= -nRT_1\ln(1/2) \\ &= nRT_1\ln(2) > 0 \end{aligned}$$

R5. De même pour les transferts thermiques.
Pour les transformations isobares, on utilisera la version la plus adaptée du premier principe.

Solution:

- 1er principe sur $A \to B$ avec l'enthalpie car la transformation est isobare : $Q_{AB} = \Delta_{AB}H = nC_{Pm}(T_B - T_A)$, soit $\boxed{Q_{AB} = \frac{7}{2}nRT_1 > 0}$
- 1er principe sur $C \to D$ avec l'enthalpie car la transformation est isobare : $Q_{CD} = \Delta_{CD}H = nC_{Pm}(T_D - T_d)$, soit $\boxed{Q_{CD} = -\frac{7}{2}nRT_1}$
- 1er principe sur $B \to C$: $\Delta_{BC}U = W_{BC} + Q_{BC}$, or $\Delta_{BC}U = 0$ (d'après 1re loi de Joule), donc $\boxed{Q_{BC} = -W_{BC} = 2nRT_1\ln(2) > 0}$
- De même, $\boxed{Q_{DA} = -W_{DA} = -nRT_1\ln(2)}$

R6. En déduire l'expression puis la valeur du rendement du cycle.
Comparer au rendement de Carnot.
On donne : $\ln 2 \simeq 0,69$

Solution: Les transferts thermiques reçus par le gaz de la part de la source chaude sont positifs dans un moteur ditherme, donc $Q_c = Q_{AB} + Q_{BC}$

$$\begin{aligned} \text{Rendement : } \quad \eta &= \frac{-W_{\text{cycle}}}{Q_c} \\ &= -\frac{W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}}{Q_{AB} + Q_{BC}} \\ &= -\frac{nRT_1(\ln(2) - 2\ln(2))}{\frac{7}{2}nRT_1 + 2nRT_1\ln(2)} \\ &= \frac{\ln(2)}{\ln(2) + \frac{7}{2}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{7}{2\ln(2)}} \\ &\approx \frac{1}{1 + \frac{7}{1,38}} \approx \frac{1}{1+5} \approx 0,17 \end{aligned}$$

Rendement de Carnot : $\eta_C = 1 - \dfrac{T_f}{T_c} = 0,5 > \eta$
Le cycle d'Ericson présente deux transformations isobares en contact avec les thermostats, au cours desquelles la température du gaz varie pour atteindre la température du thermostat. Ces transformations ne sont pas réversibles car le transfert thermique est échangé entre deux système de températures différentes.

II Exercices d'approfondissement

Exercice n°5 Contraintes liées aux principes

On considère une machine thermique fonctionnant au contact d'une unique source de chaleur de température T_0. Sur un cycle, le fluide reçoit le transfert thermique Q_0 de la part de la source de chaleur et un travail W.

R1. Appliquer les deux principes sur un cycle.

Solution:

$$\begin{aligned} 0 &= Q_0 + W \\ 0 &= \frac{Q_0}{T_0} + S_{\text{créée}} \end{aligned}$$

R2. Déterminer les signes de Q_0 et W. Est-il possible d'avoir un moteur monotherme ?

Solution: $S_{\text{créée}} \geq 0 \Rightarrow Q_0 \leq 0 \Rightarrow W \geq 0$
Un moteur monotherme n'existe donc pas ! (c'est un énoncé historique du deuxième principe).

On étudie un réfrigérateur dont on ouvre la porte.

R3. Démontrer qu'il est impossible de refroidir sa cuisine en laissant ouverte la porte de son réfrigérateur.

Solution:
Le réfrigérateur en fonctionnement libère dans la cuisine le transfert thermique $-Q_c > 0$.
La porte ouverte, il libère également le transfert thermique $-Q_f < 0$.
La question est de savoir s'il est possible d'avoir $|Q_f| > |Q_c|$, c'est-à-dire $Q_f > -Q_c$
D'après le premier principe $W + Q_c + Q_f = 0$, donc $Q_f = -Q_c - W$
Or $W > 0$ (machine réceptrice), donc $Q_f < -Q_c$
Il est donc impossible de refroidir l'air de la cuisine en ouvrant la porte du réfrigérateur !

Exercice n°6 Cycle de Joule

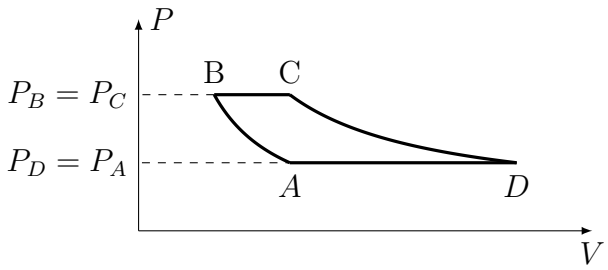
On étudie le principe d'une turbine à gaz. Dans cet exercice, le gaz est supposé parfait (coefficient adiabatique $\gamma = 7/5$) :

- $A \to B$: Le gaz est comprimé dans un compresseur (compression adiabatique réversible)
- $B \to C$: Il est chauffé à pression constante $P_B = P_C$ en contact avec une source chaude à $T_C = 600$ K
- $C \to D$: Il est détendu, entraînant avec lui une hélice (détente adiabatique réversible)
- $D \to A$: Le gaz est refroidit à pression constante $P_D = P_A$ au contact d'une source froide à $T_A = 300$ K

On notera n la quantité de matière du gaz, R la constante des gaz parfaits et α le rapport de compression $\alpha = \dfrac{P_B}{P_A} = 5$

R1. Représente le cycle dans le diagramme (P, V).

Solution: Pour un gaz parfait en transformation adiabatique réversible nous pouvons écrire que PV^γ est constant. Dans le diagramme (P, V) une telle transformation se représente par une hyperbole « plus pentue » que celle de l'isotherme.



R2. Définir le rendement et montrer que l'on peut l'exprimer $\eta = 1 + \dfrac{T_\mathrm{A} - T_\mathrm{D}}{T_\mathrm{C} - T_\mathrm{B}}$

Solution: Le rendement du moteur est défini par : $\eta = -\dfrac{W_\text{cycle}}{Q_c}$, avec $Q_c = Q_{BC}$ (la transformation BC a lieu en contact avec la source chaude).
D'après le premier principe sur un cycle : $0 = W_\text{cycle} + Q_{BC} + Q_{AD}$ (les autres transformations sont adiabatiques).
Ainsi $\eta = 1 + \dfrac{Q_{DA}}{Q_{BC}}$
Enfin, sur les transformations BC et DA isobares, le premier principe avec l'enthalpie permet d'écrire $Q_{BC} = nC_{Pm}(T_C - T_B)$ et $Q_{DA} = nC_{Pm}(T_A - T_D)$
Ainsi $\boxed{\eta = 1 + \dfrac{T_A - T_D}{T_C - T_B}}$

R3. Établir une nouvelle expression de η, uniquement en fonction de α et γ, puis faire l'application numérique.

Solution: L'idée est d'exploiter la loi de Laplace sur les transformations AB et CD.

$$\begin{aligned}
T_A^\gamma P_A^{1-\gamma} &= T_B^\gamma P_B^{1-\gamma} \\
T_A &= T_B \left(\frac{P_B}{P_A}\right)^{\frac{1}{\gamma}-1} \\
T_A &= T_B^{\frac{1}{\gamma}-1} \\
T_C^\gamma P_C^{1-\gamma} &= T_D^\gamma P_D^{1-\gamma} \\
T_D &= T_C \left(\frac{P_C}{P_D}\right)^{\frac{1}{\gamma}-1} \\
T_D &= T_C \left(\frac{P_B}{P_A}\right)^{\frac{1}{\gamma}-1} \\
T_D &= T_C^{\frac{1}{\gamma}-1}
\end{aligned}$$

ainsi $\eta = 1 + \dfrac{T_B^{\frac{1}{\gamma}-1} - T_C^{\frac{1}{\gamma}-1}}{T_C - T_B}$, soit $\boxed{r = 1 - 5^{\frac{1}{\gamma}-1} = 0,37}$

R4. Comparer au rendement de Carnot puis commenter.

Solution: Rendement de Carnot : $\eta_C = 1 - \dfrac{T_f}{T_c} = 1 - \dfrac{T_A}{T_C} = 0,5 > \eta$

Le cycle de Joule présente deux transformations isobare en contact avec les thermostats, au cours desquelles la température du gaz varie pour atteindre la température du thermostat. Ces transformations ne sont pas réversibles car le transfert thermique est échangé entre deux système de températures différentes.

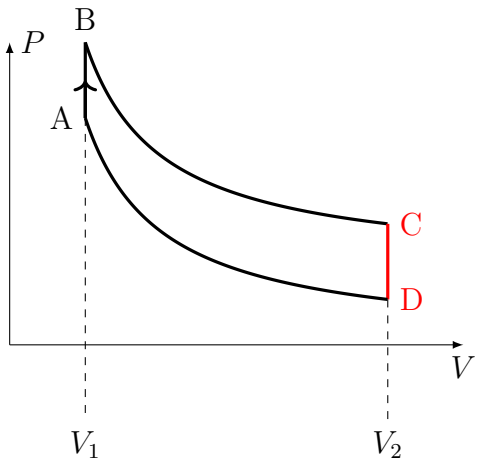
On donne le calcul suivant : $5^{-\frac{2}{7}} \simeq 0,63$

Exercice n°7 Moteur de Stirling

Un cycle de Stirling est formé de deux transformations isothermes ($T_1 < T_2$) et de deux transformations isochores ($V_1 < V_2$) alternées. Le cycle est décrit de façon à ce que l'équilibre thermodynamique soit réalisé en chaque instant dans le sens moteur par n moles de gaz parfait caractérisé par le coefficient γ supposé constant.

R1. Dans quel sens est décrit un cycle moteur dans le diagramme de Clapeyron ?
Représenter ce cycle de Stirling dans le diagramme de Clapeyron.

Solution: Sur un cycle moteur, le travail reçu algébriquement par le gaz est négatif, donc l'aire du cycle est positive. Le cycle doit donc être décrit dans le sens direct.



R2. Exprimer les travaux et les transferts thermiques reçus par les n moles du gaz parfait sur chacune des quatre transformations, en fonction des températures T_1 et T_2, du taux de compression $a = \dfrac{V_2}{V_1}$, et de n, R et γ. Déterminer les signes.

Solution:

- Transformation $A \to B$
  - La transformation est isochore, donc $W_{AB} = 0$
  - D'après le 1er principe sur $A \to B$: $\Delta_{AB}U = Q_{AB}$

    Soit $\boxed{Q_{AB} = \dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) > 0}$
- Transformation $B \to C$
  - La transformation est isotherme à T_2

$$\begin{aligned} W_{BC} &= \int_{V_1}^{V_2} -P\mathrm{d}V \\ &= \int_{V_1}^{V_2} -\frac{nRT_2}{V}\mathrm{d}V \\ &= -nRT_2 \int_{V_1}^{V_2} \frac{\mathrm{d}V}{V} \\ &= -nRT_2 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \end{aligned}$$

Soit $\boxed{W_{BC} = -nRT_2 \ln(a) < 0}$

- La transformation est isotherme à T_2 et le gaz est parfait, donc $\Delta_{BC}U = 0$
- D'après le 1er principe sur $B \to C$: $\Delta_{BC}U = Q_{BC} + W_{BC}$

  Ainsi $\boxed{Q_{BC} = nRT_2 \ln(a) > 0}$

■ Transformation $C \to D$

De même que sur $A \to B$: $W_{CD} = 0$ et $\boxed{Q_{CD} = \dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_1 - T_2) < 0}$

■ Transformation $D \to A$

De même que sur BC : $\boxed{W_{DA} = -nRT_1 \ln\left(\dfrac{V_1}{V_2}\right) = nRT_1 \ln(a) > 0}$ et $\boxed{Q_{BC} = -nRT_1 \ln(a) < 0}$

R3. Identifier les transferts thermiques reçus par le gaz parfait de la part de la source chaude, et ceux reçus de la part de la source froide.

Solution: On étudie ici un moteur, donc le transfert thermique reçu de la part de la source chaude est positif : $\boxed{Q_{\text{ch}} = Q_{AB} + Q_{BC} = \dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) + nRT_2 \ln(a)}$

Le transfert thermique reçu de la part de la source froide est négatif :

$$\boxed{Q_{\text{fr}} = Q_{CD} + Q_{DA} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_1 - T_2) - nRT_1 \ln(a)}$$

R4. Exprimer le rendement thermodynamique de ce cycle en fonction des températures T_1, T_2, de γ et du taux de compression a.

Solution: Le rendement d'un moteur est défini par :

$$\begin{aligned} r &= \frac{-W_{\text{cycle}}}{Q_{\text{ch}}} \\ &= -\frac{-nRT_2 \ln(a) + nRT_1 \ln(a)}{\dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) + nRT_2 \ln(a)} \\ &= \frac{(T_2 - T_1)\ln(a)}{\dfrac{T_2 - T_1}{\gamma - 1} + T_2 \ln(a)} \end{aligned}$$

$$\boxed{r = \frac{1}{\dfrac{1}{\ln(a)(T_2 - T_1)} + \dfrac{T_2}{T_2 - T_1}}}$$

R5. On admet que le transfert thermique fourni au gaz lors du chauffage isochore est récupérée par un régénérateur lors du refroidissement isochore.

Que devient le rendement ?

Comparer ce rendement à celui de Carnot.

Solution: Le transfert thermique fourni au gaz lors du chauffage isochore est récupérée par un régénérateur lors du refroidissement isochore, il ne coûte donc rien.

Par conséquent, $Q_{\text{ch}} = Q_{BC}$

Ainsi

$$\begin{aligned} r' &= -\frac{-nRT_2\ln(a)+nRT_1\ln(a)}{nRT_2\ln(a)} \\ &= \frac{T_2-T_1}{T_2} \\ &= 1-\frac{T_1}{T_2} \end{aligned}$$

Le rendement est alors égal à celui de Carnot.

III Résolution de problème

Exercice n°8 Congélateur

Sur la fiche technique d'un congélateur figurent la consommation et le pouvoir de congélation. Voici les valeurs numériques annoncées par le constructeur pour son modèle.

Consommation pendant 24 h	0,67 kWh
Pouvoir de congélation	22kg/24h

Estimer l'efficacité frigorifique de ce congélateur.
Données :

- Température extérieure : $\theta_i = 20$ °C ; température intérieure $\theta_f = -18$ °C
- Capacité thermique massique des aliments décongelés : $c_d = 3,6$ kJ · K^{-1} · kg^{-1}
- Capacité thermique massique des aliments congelés : $c_c = 1,5$ kJ · K^{-1} · kg^{-1}
- Enthalpie massique de fusion des aliments à 0 °C : $\Delta_{\text{fus}}h(0\text{ °C}) = 2,5.10^2$ kJ · kg^{-1}

Solution:

- Fonctionnement du réfrigérateur : Le fluide frigorigène reçoit du travail au niveau du compresseur (qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique), prélève du transfert thermique à la source froide et en libère à la source chaude.
- Étudions le fonctionnement sur une durée $\Delta t = 24$ h.
  $\boxed{\text{Système : \{ fluide frigorigène \}}}$
  L'efficacité du congélateur est définie par : $e = \dfrac{Q_f}{W}$, avec Q_f le transfert thermique reçu par le fluide frigorigène durant 24h et W le travail mécanique reçu par le fluide durant 24h.
  Considérons que le compresseur ait un rendement de 1 (toute l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique), donc $\boxed{W = 0,67\text{ kWh}}$
  Le transfert thermique Q_f reçu par le fluide frigorigène est prélevé aux aliments contenus dans le congélateur.
- Pour déterminer Q_f, nous allons étudier $\boxed{\text{Système : \{}m = 22\text{ kg d'aliments \}}}$
  Appliquons le 1er principe à $m = 22$ kg d'aliments que l'on congèle en $\Delta t = 24$ h.
  On peut légitimement considérer que la transformation est isobare, donc nous pouvons écrire le 1er principe sous la forme : $\Delta H = Q_{\text{aliments}}$, avec $Q_{\text{aliments}} = -Q_f$, le transfert thermique reçu par les aliments est égal à l'opposé du transfert thermique reçu par le fluide frigorigène.
  L'enthalpie étant une fonction d'état la variation d'enthalpie ne dépend pas du chemin suivi, on « change de chemin » et on peut alors écrire $\Delta H = \Delta H_a + \Delta H_b + \Delta H_c$

$$\begin{tikzcd}
\text{EI} \arrow[rr, "\Delta H"] & & \text{EF} \\
\begin{array}{c}\text{aliments décongelés}\\ \theta_i\end{array} \arrow[d, "\Delta H_a = mc_d(\theta_0 - \theta_i)"'] & & \begin{array}{c}\text{aliments congelés}\\ \theta_f\end{array} \\
\begin{array}{c}\text{aliments décongelés}\\ \theta_0 \ = \ 0\ ^\circ\text{C}\end{array} \arrow[rr, "\text{congélation}", "\Delta H_b = -m\Delta_{\text{fus}}h(0\ ^\circ\text{C})"'] & & \begin{array}{c}\text{aliments congelés}\\ \theta_0 \ = \ 0\ ^\circ\text{C}\end{array} \arrow[u, "\Delta H_c = mc_c(\theta_f - \theta_0)"']
\end{tikzcd}$$

Ainsi $\boxed{Q_f = -Q_{\text{aliments}} = -\Delta H = -mc_d(\theta_0 - \theta_i) + m\Delta_{\text{fus}}h(0\ ^\circ\text{C}) - mc_c(\theta_f - \theta_0)}$

— Ainsi $\boxed{e = \dfrac{Q_f}{W} = -m \times \dfrac{c_d(\theta_0 - \theta_i) - \Delta_{\text{fus}}h(0\ ^\circ\text{C}) + c_c(\theta_f - \theta_0)}{W} = 3,2}$