Supplément EXERCICES – TH5 – Machines Thermiques – Feuille 1/3

Principe d'un moteur essence

Le principe des moteurs a déjà été analysé en détail en cours, en TD, en DM et en fiche complémentaire (rendement). Cet exercice résume le fonctionnement d'un moteur à essence

Exercice 1 : Moteur automobile (essence)

Les moteurs sont classés en deux catégories suivant la technique d'inflammation du mélange air carburant : les moteurs à allumage commandé (moteurs à essence) et les moteurs à allumage par compression (auto-inflammation du mélange, moteurs Diesel). Ce sont tous deux des moteurs à combustion interne car la combustion s'effectue à l'intérieur du moteur. Dans le cas des moteurs à allumage commandé, un mélange convenable air essence obtenu à l'aide d'un carburateur est admis dans la chambre de combustion du cylindre. L'allumage y est provoqué par une étincelle éclatant entre les deux électrodes d'une bougie.

Le moteur comporte en général plusieurs cylindres. Dans chaque cylindre, le piston entraîné par le vilebrequin permet de recevoir le travail mécanique des forces pressantes lors de la dilatation des gaz chauds produits par la combustion de l'essence. Il coulisse entre le point mort haut (PMH) où le volume V_{min} de la chambre de combustion est minimal et le point mort bas (PMB) où le volume V_{max} de la chambre de combustion est maximal. Le volume ainsi balayé est appelé la cylindrée, il est noté $C_Y = V_{max} - V_{min} = 2000\ cm^3 = 2L$. Le mélange détonant air essence est introduit dans le cylindre par l'intermédiaire d'une valve : la soupape d'admission. Les gaz de combustion sont évacués par une autre valve : la soupape d'échappement. L'ouverture et la fermeture des valves sont commandées par l'arbre à cames et les culbuteurs.

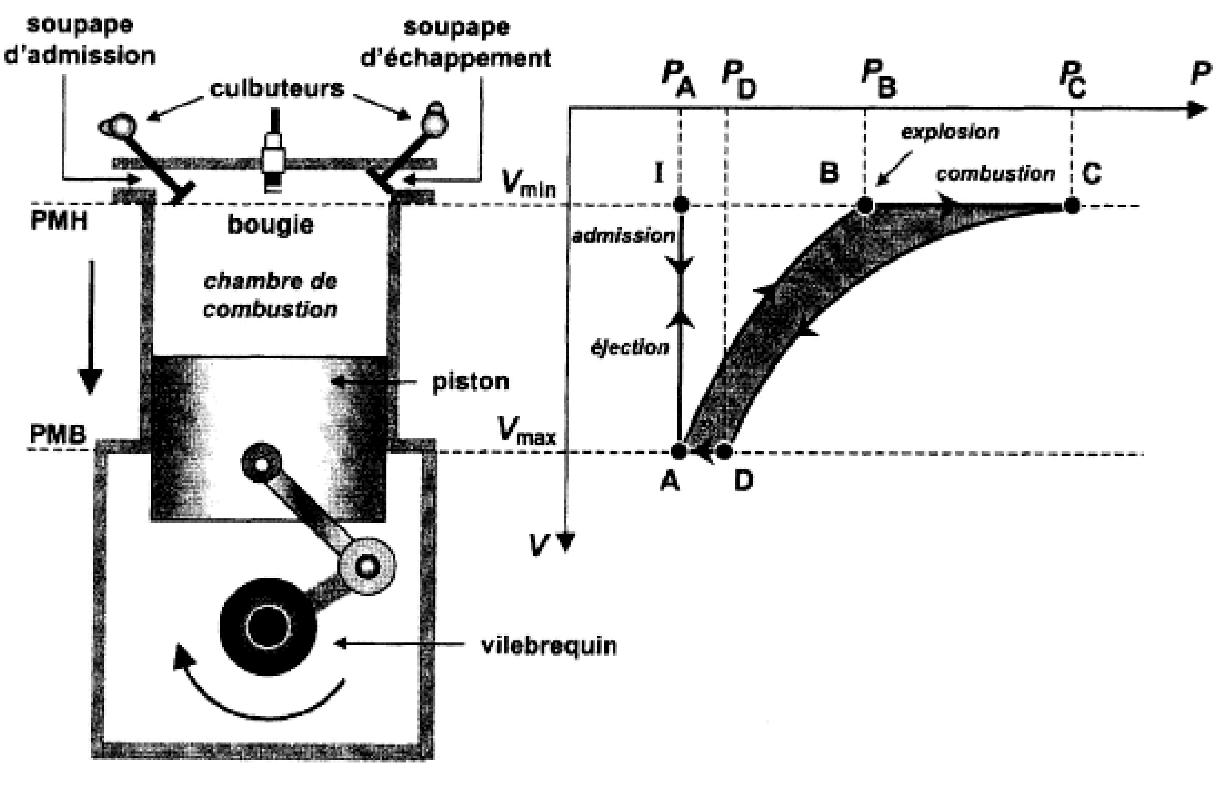
Le fonctionnement du moteur est cyclique. Il se décompose en 4 temps successifs décrit comme suit :

- 1^er^ temps : l'admission. La soupape d'admission s'ouvre ; le piston descend et aspire le mélange gazeux air essence venant du carburateur.
- 2^ème^ temps : la compression. Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées ; le piston, en remontant, comprime le mélange.
- 3^ème^ temps : la combustion et la détente. Les soupapes sont encore fermées : une étincelle jaillissant de la bougie provoque la combustion du mélange. La pression augmente brutalement, le piston est repoussé : ce temps est moteur.
- 4^ème^ temps : l'échappement. Le piston remonte, la soupape d'échappement s'ouvre. Les gaz brulés sont éjectés.

A la fin du quatrième temps, le piston et les soupapes sont revenus dans leur position initiale.

Le fonctionnement du moteur est schématisé sur un diagramme de Watt (P,V) où P est la pression du gaz contenu dans le volume V de la chambre du cylindre. Les étapes successives du cycle sont décrites comme suit :

- I→A : admission du mélange gazeux air essence dans la chambre de combustion à la température ambiante T_A = 300K et sous la pression atmosphérique P_A = 1 bar ;
- A→B : compression adiabatique réversible du mélange air essence (les frottements du piston sur le cylindre sont négligés) ;
- B→C : en B, l'étincelle provoque l'explosion du mélange suivie d'une compression isochore ;
- C→D : en C, fin de la combustion suivie d'une détente adiabatique réversible du gaz brulé ;
- D→A : l'ouverture de la soupape d'échappement ramène le gaz brulé à la pression atmosphérique ;
- A→I : la remontée du piston évacue le gaz brulé vers l'extérieur



Le système fermé constitué du fluide gazeux décrit indéfiniment le cycle ABCDA appelé cycle Beau de Rochas (brevet d'invention déposé en 1862, première mise en application sur monocylindre en 1876 par Otto). Dans cette approche idéalisée, le mélange initial air essence et les gaz brulés d'échappement sont assimilés à un même gaz de coefficient $\gamma = C_{Pm} / C_{Vm} = 1{,}35$ constant et le nombre n de moles de gaz admis dans le cylindre (à l'état A) est supposé inchangé par la combustion interne.

1. Etude du cycle

1.1. Justifier le caractère adiabatique de la compression A→B, de la détente C→D et le caractère isochore de la combustion B→C et du refroidissement D→A. Pourquoi ne prend-t-on pas en compte les étapes I→A et A→I au cours desquelles le système constitué par le gaz contenu dans le cylindre est un système ouvert ?

1.2. Exprimer le transfert thermique Q_{BC} mis en jeu dans l'étape B→C, en fonction de R, n, γ, T_B et T_C. Dans quel sens le transfert thermique Q_{BC} s'effectue-t-il ?

1.3. Exprimer le transfert thermique Q_{DA} dans l'étape D→A, en fonction de R, n, γ, T_D et T_A. Dans quel sens le transfert thermique Q_{DA} s'effectue-t-il ?

1.4. Exprimer le travail échangé W au cours du cycle ABCD, en fonction de Q_{BC} et Q_{DA}.

2. Rendement thermique

2.1. Définir puis exprimer le rendement thermique η_{th} (celui habituellement étudié) en fonction de Q_{BC} et Q_{DA}, puis en fonction de T_A, T_B, T_C et T_D.

2.2. Le rapport volumétrique a, encore appelé taux de compression est défini par $a = V_{max} / V_{min}$. Exprimer le rendement thermique η_{th} en fonction de γ et de a uniquement. Comment η_{th} varie-t-il en fonction de a ? Calculer sa valeur pour un rapport volumétrique a = 9 (cette valeur sera conservée dans la suite du problème).

2.3. Le rendement global η du moteur dépend du rendement thermique η_{th} mais aussi du rendement mécanique $\eta_{méca}$ caractérisant le transfert d'énergie du piston vers le vilebrequin. Le rendement mécanique n'excède pas 85% et peut descendre en dessous de 60% pour un moteur usagé. Calculer le rendement global η du moteur pour un rendement mécanique $\eta_{méca} = 75\%$ et en déduire le volume d'essence produisant effectivement du travail sur 10L d'essence consommés.

3. Influence de la combustion

La réaction qui a lieu au sein de la chambre est une réaction de combustion entre le carburant (dans le problème, l'octane C_8H_{18}, de masse volumique $\mu_{oct} = 720$ kg.m^{-3}, sera choisi) et le comburant, l'air. Ceux-ci sont injectés dans des proportions stœchiométriques.

3.1. Exprimer puis calculer le nombre de moles du mélange gazeux aspiré par le cylindre au cours de la phase d'admission I→A, en fonction de P_A, T_A, R et C_Y.

3.2. Au point B du cycle, exprimer la température T_B et la pression P_B qui règnent dans la chambre de combustion au moment de l'explosion, en fonction de T_A, P_A, a et γ. Effectuer les applications numériques.

3.3 Une anomalie de combustion est l'auto-allumage qui limite l'augmentation a priori recherchée du rapport volumétrique : le mélange air essence s'enflamme spontanément dans certaines conditions de confinement avant le déclanchement de l'étincelle. Ce phénomène est reconnaissable aux cliquetis métalliques émis par le moteur. La température d'auto-allumage étant de 430°C, calculer le rapport volumétrique maximal a_{max} permettant d'éviter l'auto-allumage au cours de la phase A→B. en déduire le rendement thermique maximal du moteur dans ces conditions.

3.4. Ecrire l'équation de la combustion. En déduire la masse m d'octane injectée pour la combustion, sachant que la composition de l'air (en pourcentages molaires) est 20,9% en O_2 et 79,1% en N_2.

3.5. Expliquer pourquoi le mélange initial air essence et les gaz d'échappement peuvent être assimilés en première approximation à un même gaz parfait. Justifier qualitativement pourquoi le meilleur fonctionnement du moteur est obtenu lorsque carburant et comburant constituent un mélange stœchiométrique.

3.6. Le Pouvoir Calorifique Inférieur (noté PCI) est la quantité de chaleur libérée par kilogramme de carburant. Dans le cas de l'octane et dans ces conditions de confinement, il est de 44700 kJ.kg^{-1}. Calculer la température T_C et la pression P_C qui règnent dans la chambre en fin de combustion. Comment expliquez-vous ces valeurs anormalement élevées ?

3.7. L'automobile se déplace sur une autoroute à la vitesse constante de 110 km.h^{-1}, le vilebrequin effectuant 3500 tours par minute. En supposant que le moteur fonctionne exactement selon le cycle Beau de Rochas, un cycle correspondant à 2 tours du vilebrequin, calculer la consommation en carburant C pour 100km parcourus et la puissance P développée par le véhicule en chevaux (un cheval-vapeur est équivalent à une puissance de 736W). Commenter ce résultat.

Cycles Moteurs : Calcul de Rendement

Exercice 2 : Rendement du cycle de Stirling

→ Voir Exercice 1.1 du TD22 et Fiche Rendement des Moteurs

→ Calculer le rendement η d'un cycle de Stirling (2 isothermes / 2 isochores) effectué par un gaz parfait de coefficient caractéristique γ entre une source chaude de température T_C et une source froide de température T_F. On définit le taux de compression $\alpha = V_{max}/V_{min}$. Montrer que :

$$\eta_{Stirling} = \frac{1}{\frac{1}{(\gamma-1)\ln\alpha} + \frac{T_C}{\Delta T}}$$

Supplément EXERCICES – TH5 – Machines Thermiques – Feuille 2/3

Exercice 3 : Rendement du cycle Beau de Rochas

→ Voir Exercice 1.2 du TD22 et Fiche Rendement des Moteurs

→ Calculer le rendement η d'un cycle Beau de Rochas (moteurs essence 2 temps et 4 temps, 2 adiabatiques réversibles / 2 isochores) effectué par un gaz parfait de coefficient caractéristique γ. On définit le taux de compression $\alpha = V_{max}/V_{min}$. Montrer que :

$$\eta_{BeaudeRochas} = 1 - \alpha^{1-\gamma}$$

Exercice 4 : Rendement du cycle Diesel

→ Voir Fiche Rendement des Moteurs

Le moteur de Rudolf Diesel est un moteur à combustion interne. Il fonctionne par auto-allumage du gazole que l'on injecte dans l'air préalablement comprimé sous pression élevée. Cette forte compression porte le fluide à une température supérieure à son point d'inflammabilité, et il n'y a alors pas besoin de bougie. On peut ainsi atteindre des taux de compression plus important, ce qui augmente les rendements des moteurs. Le cycle du moteur Diesel comporte toujours 4 temps :

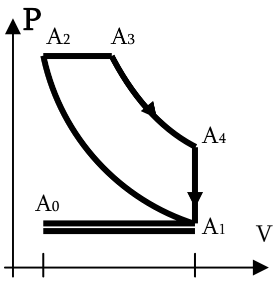
→ 1er temps : admission de l'air seul A_0A_1.

→ 2ème temps : compression isentropique A_1A_2.

→ 3ème temps : introduction du combustible après la compression de l'air seul et échauffement isobare A_2A_3 suivi d'une détente isentropique A_3A_4.

→ 4ème temps : refroidissement isochore A_4A_1 puis échappement A_1A_0.

1. Quelle est la différence avec le cycle Beau de Rochas ? Quel en est le but ?
2. Déterminer le rendement η du cycle Diesel en fonction de γ et des taux de compression $\alpha = \dfrac{V_1}{V_2}$ et $\beta = \dfrac{V_1}{V_3}$, le fluide étant assimilé à un GP.



Exercice 5 : Rendement d'un cycle de Joule (Brayton)

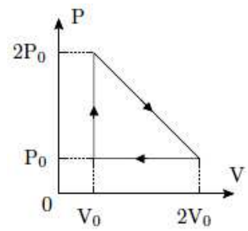
Une mole de GP décrit une suite cyclique (A→B→C→D) de transformations constituées de deux adiabatiques réversibles (A→B) et (C→D), et de deux isobares (B→C) et (D→A).

Données : $\gamma = 1{,}4$, A (P_0=1bar, T_0=280K), B(P_1=10bar, T_1), C(P_1=10bar, T_2=1000K), D(P_0,T_3), On note $a = P_1/P_0$ le rapport de compression.

1. Exprimer les températures T_1 et T_3 en fonction de a, T_0 et T_2. Les calculer.
2. Représenter le cycle suivi dans le diagramme de Clapeyron. Quelle est la nature de la machine thermique envisagée ?
3. Exprimer le rendement η de cette machine en fonction des températures du cycle, puis en fonction de a et de γ uniquement. Le calculer.
4. En considérant qu'il s'agit d'une machine ditherme, quel serait le rendement η_c du moteur de Carnot qui fonctionnerait entre les mêmes sources chaude et froide ?

Exercice 6 : Rendement d'un cycle

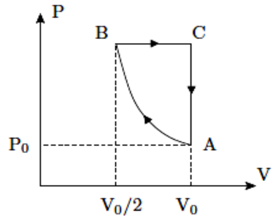
Une mole de gaz parfait monoatomique décrit un cycle dont la représentation dans le diagramme de Clapeyron est le triangle dessiné.



→ Calculer le rendement η du cycle

Exercice 7 : Rendement d'un cycle

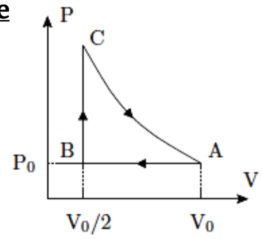
Une mole de gaz parfait diatomique de coefficient $\gamma = 1{,}4$ décrit le cycle représenté. La transformation A → B est adiabatique réversible. On note T_0 la température dans l'état (P_0,V_0) au point A.



1. Exprimer le rendement η de cette machine thermique en fonction des températures T_A, T_B et T_C.
2. Exprimer η en fonction de γ uniquement. Calculer η.
3. Quel serait le rendement η' d'une machine ditherme réversible qui fonctionnerait entre les mêmes sources chaude et froide que la machine considérée ? Calculer η'.

Exercice 8 : Rendement d'un cycle

Un système constitué par n moles d'un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1{,}4$ suit le cycle représenté sur le diagramme de Clapeyron ci-contre. La phase C → A est une détente adiabatique réversible. On note T_0 la température dans l'état A.



1. Exprimer les températures T_B et T_C en fonction de T_0.
2. Quelle est la nature de cette machine thermique ? Exprimer son rendement η en fonction de γ et de T_A, T_B et T_C, puis uniquement en fonction de γ. Le calculer.
3. Calculer le rendement η_{max} de la machine de Carnot entre les mêmes sources chaude et froide.

Cycles Récepteurs

Exercice 9 : Cycle de Carnot / diagramme entropique

Le cycle de Carnot est un cycle réversible dont les étapes successives sont les suivantes :

→ [A→B] : détente isotherme à la température T_F.

→ [B→C] : adiabatique de T_F à T_C (avec $T_F < T_C$).

→ [C→D] : compression isotherme à la température T_C.

→ [D→A] : adiabatique de T_C à T_F.

1. Comparer qualitativement les pentes des courbes de l'adiabatique et de l'isotherme en un point où elles se croisent. En déduire la représentation du cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, V). Représenter également le cycle dans un diagramme entropique (T, S).

2. Comment peut-on, sans calculs, savoir si le cycle proposé est celui d'un moteur ou d'un système mécaniquement récepteur ? S'agit-t-il d'un cycle de type moteur thermique ou réfrigérateur ? Comparer les aires des deux cycles.
3. Définir l'efficacité du système. L'exprimer en fonction de T_C et T_F par une méthode graphique. Dépend-elle de la nature du fluide considéré ?

Exercice 10 : Exemple de cycle d'une pompe à chaleur

Une mole d'air, assimilée à un GP de rapport des capacités thermiques γ constant décrit un cycle thermodynamique réversible dans le sens trigonométrique. Les étapes successives du cycle décrit par l'air sont les suivantes :

$$\left[A\begin{pmatrix}P_A\\V_A\\T_A\end{pmatrix}\right]\xrightarrow{isoS}\left[B\begin{pmatrix}P_B\\V_B\\T_B\end{pmatrix}\right]\xrightarrow{isoP}\left[C\begin{pmatrix}P_C\\V_C\\T_C\end{pmatrix}\right]\xrightarrow[\text{réversible}]{isoT}\left[A\right]$$

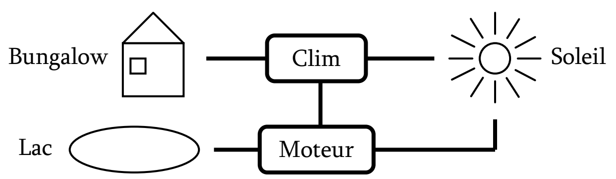
1. Représenter le cycle en coordonnées de Clapeyron (P, V)
2. Exprimer P_A, T_B, P_B, T_C, V_C et P_C en fonction de T_A, V_A, V_B et γ.
3. Déterminer pour chacune des trois branches du cycle le travail et la chaleur reçus par le gaz. Préciser le signe de ces 6 grandeurs.
4. Le système fonctionne en pompe à chaleur. Sur quelle branche du cycle pompe-t-il de la chaleur ? Sur quelle branche en cède-t-il ?
5. Définir l'efficacité thermodynamique de cette machine e_{pompe}. L'exprimer en fonction de T_A et de T_B.

Exercice 11 : Couplage moteur / climatiseur

On souhaite réguler la température d'un bungalow à la valeur t_2 = 20°C, celui-ci étant situé dans l'atmosphère à la température t_1 = 37°C. Le bungalow est situé à proximité d'un lac dont l'eau est à la température t_3 = 12°C. Un climatiseur va pour cela fonctionner entre le bungalow et l'air extérieur, et il va être alimenté en énergie par un moteur fonctionnant avec pour sources l'air extérieur et l'eau du lac.

On suppose que le climatiseur et le moteur sont tous deux réversibles.

1. Compléter le dessin en indiquant les différents types d'énergie échangés ainsi que le sens réel de ces échanges.
2. En considérant que seule la source chaude (chaleur absorbée par le moteur uniquement) est onéreuse, exprimer l'efficacité thermique e_T du dispositif en fonction des températures des sources. Calculer e_T.



Exercice 12 : Pertes thermiques

On désire maintenir dans un appartement une température constante égale à T_1 = 290K, grâce à une pompe à chaleur utilisant comme source froide un lac de température T_0 = 280K. L'air extérieur a pour température constante T_0. On suppose que les pertes thermiques subies par l'appartement ont une puissance donnée par la loi : $P_{th} = aC\left(T - T_0\right)$ où C = 10^7 J.K^{-1} est la capacité thermique de l'appartement, T sa température et a une constante.

1. Dans le but d'évaluer les pertes thermiques, on arrête la pompe à chaleur alors que l'appartement est à la température T_1. Au bout d'une durée Δt = 2h, la température a chuté à T_2 = 285K.
   1.a) Etablir l'équation différentielle vérifiée par T(t), en prenant pour origine des dates l'instant d'arrêt du chauffage.
   1.b) En déduire la valeur numérique de a.
2. Sachant que le coefficient d'efficacité thermique réel e_T de la pompe à chaleur ne représente que 40% de l'efficacité maximale théorique, exprimer puis calculer e_T.
3. Quelle doit être la puissance P de la pompe à chaleur pour maintenir constante la température dans l'appartement ?

Une curiosité : Machine tritherme

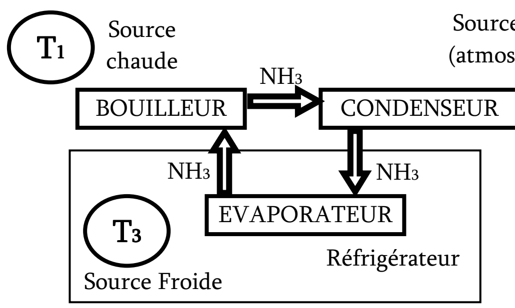
Exercice 13 : Machine frigorifique à absorption

Vous avez sans doute un jour constaté qu'un liquide volatile comme l'éther (ou dans une moindre mesure l'alcool ou l'eau) posé sur votre peau provoque une sensation de froid : les liquides absorbent de la chaleur en se vaporisant, et inversement, les gaz cèdent de la chaleur en se liquéfiant.

Un réfrigérateur à absorption est une machine frigorifique tritherme qui n'échange pas de travail avec le milieu extérieur.

Le cycle de l'ammoniac d'un réfrigérateur à absorption est représenté sur le schéma suivant. Une source chaude à la température T_1 produit dans le bouilleur la vaporisation d'une solution d'ammoniac. L'ammoniac se rassemble dans une enceinte de faible volume : le condenseur. Dans le condenseur, l'ammoniac est comprimé et se liquéfie en cédant de la chaleur à l'atmosphère à la température T_2. L'ammoniac liquide est ensuite détendu dans un évaporateur à l'intérieur du réfrigérateur à la température T_3 puis est renvoyé dans le bouilleur. Le système ne reçoit pas de travail.

1. Déterminer le signe des quantités de chaleur Q_1, Q_2 et Q_3 reçues par l'ammoniac (en justifiant avec les principes)
2. Calculer l'efficacité du réfrigérateur, et sa valeur maximale.



T_1 = 373K
T_2 = 293K
T_3 = 268K

Supplément EXERCICES – TH5 – Machines Thermiques – Feuille 3/3

Cycles avec pseudo-sources

Une pseudo-source est une source dont la température est variable. Il faut en tenir compte dans les bilans, le cycle évolue avec le temps. Par exemple lorsqu'on souhaite extraire de l'énergie d'une source chaude = réservoir d'eau chaude de taille limitée, celui-ci se refroidit au fur et à mesure, limitant le travail total extractible. Lorsqu'on chauffe un système, sa température évolue également…

Exercice 14 : Extraction d'énergie de pseudo-sources

Soit un moteur thermique réversible fonctionnant entre deux sources thermiques de même capacité thermique $C = 4.10^5$ J.K^{-1}, dont les températures initiales respectives sont $t_{20} = 10$°C et $t_{10} = 100$°C. Ces deux sources peuvent être constituées par exemple d'une même masse d'eau liquide contenue dans des citernes, l'une sur le toit chauffée au soleil, l'autre au sous-sol. On pose T = 273+t, avec T en K. Les températures des deux sources, supposées isolées du milieu extérieur, vont évoluer par suite des échanges avec l'agent thermique circulant dans ce moteur (c'est pour cela que l'on parle de pseudo-sources). On note dT_1 et dT_2 ces variations au cours d'un cycle, les températures des sources sont définissables et égales à T_1 et T_2.

1. Fonctionnement du moteur sur un cycle élémentaire (sur un intervalle de temps [t, t+dt])
   - 1.a) Donner le schéma de principe de ce moteur en indiquant le sens des échanges énergétiques.
   - 1.b) Montrer que les températures des sources vérifient l'équation différentielle : $\dfrac{dT_1}{T_1}+\dfrac{dT_2}{T_2}=0$
   - 1.b) Quelle est la température T_f des deux sources quand le moteur s'arrête de fonctionner réversiblement ?
2. Travail récupérable et rendement global
   - 2.a) Calculer le travail maximal fourni par ce moteur jusqu'à son arrêt. Interpréter son signe.
   - 2.b) Calculer le rendement global. Comparer avec le rendement théorique maximal que l'on pourrait obtenir si les températures initiales des deux sources restaient constantes (sources idéales de chaleur).

Exercice 15 : Chauffage par pompe à chaleur

On veut échauffer une masse d'eau liquide m = 1000kg contenue dans une citerne de 10°C à 40°C sous la pression atmosphérique (on rappelle la capacité thermique massique de l'eau $c_P = 4{,}18.10^3\,J.K^{-1}.kg^{-1}$). A cet effet, on utilise une pompe à chaleur fonctionnant réversiblement entre cette masse d'eau et un lac à une température constante, égale à $T_0 = 10$°C.

1. Définir l'efficacité thermique « vraie » ou « instantanée », en considérant un cycle élémentaire au cours duquel la source chaude (la masse m d'eau) voit sa température évoluer de T à T+dT.
2. Calculer l'énergie à fournir au cours de cette opération.
3. En déduire l'efficacité thermique apparente, associée au bilan énergétique.

Exercice 16 : Moteur thermique entre 2 masses d'eau

Un moteur thermique fonctionne réversiblement entre deux masses d'eau : m_1 de température initiale T_{01}, et m_2 de température initiale T_{02}.

1. Quand le moteur cesse-t-il de fonctionner ? Calculer la température finale T_F atteinte alors par les masses d'eau.
2. Déterminer le travail fourni par le moteur pendant toute la durée du fonctionnement.
3. Effectuer les applications numériques pour m_1 = 600kg, m_2 = 1000kg, T_{01} = 360K et T_{02} = 300K.

Données : Capacité thermique de l'eau - $c_P = 4{,}18kJ.K^{-1}.kg^{-1}$

Exercice 17 : Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) fonctionne réversiblement entre une source de température variable au cours du temps et une source idéale de température constante :

- → 1 tonne d'eau de capacité thermique massique $c_P = 4{,}18.10^3\,J.K^{-1}.kg^{-1}$ dont la température $T_C(t)$ varie ; elle est contenue dans une citerne et sa température initiale est $T_{0C} = T_F = 283$K.
- → L'atmosphère de température constante $T_F = 283$K.

1. Déterminer le travail fourni par le milieu extérieur quand l'eau de la citerne a atteint la température $T_f = 320$K.
2. Calculer l'efficacité thermodynamique e_{PAC} de la PAC.
3. Quelle aurait été l'élévation de température si la même énergie avait été fournie à l'eau directement par une résistance chauffante ? Commenter.

Exercice 18 : Climatiseur

Un local de capacité thermique totale μ = 4000 kJ.K^{-1} est initialement à la température $t_0 = 32$°C de l'air extérieur. Un climatiseur fonctionnant de manière ditherme réversible entre l'air extérieur à température constante e le local de température variable ramène la température de celui-ci à $t_1 = 20$°C en une durée Δt = 1h. On note δQ_1 et δQ_2 les échanges thermiques entre le fluide thermique et respectivement le local et l'air extérieur, au cours d'un cycle élémentaire où la température du local varie de T(t) à T(t)+dT.

1. Schématiser le fonctionnement du dispositif au cours d'un cycle élémentaire. Indiquer le sens réel des échanges de chaleur.
2. Exprimer les quantités de chaleur totales Q_1 et Q_2 échangées durant le refroidissement du local de la température t_0 à t_1.
3. En déduire le travail total W fourni au climatiseur. Faire l'application numérique.
4. Quelle est la puissance moyenne P fournie au climatiseur ?

SOLUTION des EXERCICES – TH5 – Machines Thermiques – Feuille 1/2

Principe du moteur essence

Exercice 1 : Moteur automobile (essence)

1.1. Transfo adiabatique ? Les transferts thermiques lors de la compression et de la détente sont lents par rapport à la durée des évolutions

Transfo isochore ? La combustion et le refroidissement sont trop rapides pour que le piston ait le temps de se déplacer.

Prise en compte des étapes I→A et A→I : Non nécessaire car les travaux et chaleurs se compensent sur l'ensemble.

1.2. Etape B→C : $\boxed{Q_{BC} = \Delta U = C_V\left(T_C - T_B\right) = \frac{nR}{\gamma-1}\left(T_C - T_B\right)}$

On a $Q_{BC}>0$ → Chaleur reçue par le gaz lors de combustion.

1.3. Etape D→A : $\boxed{Q_{DA} = \Delta U = C_V\left(T_A - T_D\right) = \frac{nR}{\gamma-1}\left(T_A - T_D\right)}$

On a $Q_{DA}<0$ → Chaleur fournie par le gaz.

1.4. Premier principe : $W + Q_{BC} + Q_{DA} = 0$ → $\boxed{W = -Q_{BC} - Q_{DA}}$

2.1. Rendement $\boxed{\eta_{th} = \left|\frac{W}{Q_{BC}}\right| = \frac{-W}{Q_{BC}} = \frac{Q_{BC}+Q_{DA}}{Q_{BC}} = 1 + \frac{\left(T_A - T_D\right)}{\left(T_C - T_B\right)}}$

2.2. On a la loi de Laplace $TV^{\gamma-1}$ lors des évolutions adiabatiques réversibles AB et CD : $\begin{cases} T_A V_{\max}^{\gamma-1} = T_B V_{\min}^{\gamma-1} \\ T_D V_{\max}^{\gamma-1} = T_C V_{\min}^{\gamma-1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T_A a^{\gamma-1} = T_B \\ T_D a^{\gamma-1} = T_C \end{cases}$

Ainsi, on obtient : $\boxed{\eta_{th} = 1 - a^{1-\gamma}}$

Si on dérive : $\frac{d\eta_{th}}{da} = -\left(1-\gamma\right)a^{-\gamma} = \frac{\gamma-1}{a^{\gamma}} > 0$

Le rendement est une fonction croissante de a, il faut augmenter le taux de compression pour augmenter η_{th}.

AN : Pour a = 9, $\boxed{\eta_{th} = 0{,}54 = 54\%}$

2.3. Rendement global $\boxed{\eta = \eta_{th} \times \eta_{méca} = 0{,}40 = 40\%}$

Sur 10L d'essence, seuls 4L produisent du travail.

3.1. Gaz absorbé : $\boxed{n = \frac{P_A C_Y}{RT_A} = 80{,}2\,mmol}$ (il en reste toujours un peu, correspondant à V_{min}, on absorbe la différence C_Y).

3.2. Point B : $\boxed{\begin{cases} T_B = \frac{T_A V_{\max}^{\gamma-1}}{V_{\min}^{\gamma-1}} = T_A \cdot a^{\gamma-1} = 647{,}3\,K \\ P_B = \frac{P_A V_{\max}^{\gamma}}{V_{\min}^{\gamma}} = P_A \cdot a^{\gamma} = 19{,}4\,bar \end{cases}}$

3.3 Si Tauto = 430°C = 703K, alors $\boxed{a_{\max} = \sqrt[\gamma-1]{\frac{T_{auto}}{T_A}} = 11{,}4}$,

Et le rendement max : $\boxed{\begin{cases} \eta_{th\_\max} = 1 - a^{1-\gamma} = 57{,}3\% \\ \eta_{\max} = \eta_{th\_\max} \cdot \eta_{méca} = 43{,}0\% \end{cases}}$

3.4. Combustion : $\boxed{C_8H_{18} + \left(8 + \frac{9}{2}\right)O_2 \to 8CO_2 + 9H_2O}$

Il y a donc 1 mole d'octane pour 25/2 = 12,5 moles d'O_2, et donc pour 12,5/0,209 = 59,8 moles d'air. A chaque injection, de n moles de gaz, $n_{oct} = n/(60{,}8) = 1{,}32$mmol, d'où une masse injectée : $\boxed{m = n_{oct} \times M(C_8H_{18}) = 0{,}15g}$

(Remarque : cela fait un pourcentage molaire de 1,64%)
(Remarque : cela fait un pourcentage massique de 6,15%)

3.5. Les mélanges peuvent être assimilés en première approximation à un même gaz parfait car il y a en majorité du N_2 dans les deux, à une pression qui reste faible (<50 bar). Le meilleur fonctionnement (rendement) du moteur est obtenu lorsque carburant et comburant constituent un mélange stœchiométrique car alors, tout le carburant est utilisé pour générer de l'énergie.

Remarque : la combustion incomplète pollue, notamment à l'origine de la production de CO (manque d'O_2…) qui est toxique, et d'autres polluants (suie, cendres, goudron, autres oxydes d'azotes ou d'hydrocarbures, …).

3.6. On brûle à chaque explosion 0,15g, ce qui génère une chaleur $Q_{BC} = 6705J = \frac{nR}{\gamma-1}\left(T_C - T_B\right)$ (on approxime la quantité totale de gaz par n), et $\boxed{\begin{cases} T_C = T_B + Q_{BC}\frac{\gamma-1}{nR} = 4167K \\ P_C = P_B \cdot \frac{T_C}{T_B} = 124{,}9\,bar \end{cases}}$

Valeur anormalement élevée due au caractère idéal de ce qui a été considéré ici, combustion totale, octane pur, pas de pertes de chaleur, valeur calculées pour des molécules diatomiques, alors que beaucoup sont plus complexes…

3.7. 3500 tours/min → 1750 injections/min = 262,5g/min = 364,6mL/min = 21,9L/h = $\boxed{19{,}9 \text{ L/100km}}$

Puissance développée : on sait que le rendement est de 40%, donc sur les 6,08mL/s consommés, 2,43mL/s produisent un travail, c'est-à-dire 1,75g/s, c'est-à-dire d'après le PCI, $\boxed{P = 78{,}2kJ/s = 78{,}2kW = 106{,}28 \text{ cv}}$

On obtient des valeurs d'un bon ordre de grandeur, mais un peu surévaluées, du fait que l'on suppose que le moteur est parfait et que l'on prend pas en compte tous les paramètres… De plus, 3500 tours/min pour aller à 110km/h avec un moteur de 2L signifie qu'il doit avoir une forte charge à tirer, d'où la valeur importante de la consommation en essence.

Exercice 2/3/4/5 : Calculs de rendements

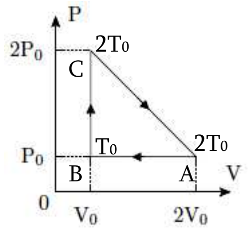
→ Voir la correction sur la fiche distribuée

(Cycles de Carnot, Stirling, Beau de Rochas, Diesel, Brayton)

Remarque sur le moteur Diesel

Différence par rapport au moteur essence : Dans un moteur Diesel simple, la combustion du mélange air-combustible n'est pas provoquée par une étincelle (bougie), mais par auto-inflammation. Au dessus d'une certaine pression (et donc température), le mélange brûle spontanément. Il faut donc un taux de compression plus élevé. Dans un Diesel plus évolué, on comprime l'air seul, puis on ajoute par un injecteur du combustible au moment où l'air commence à se détendre (A_2A_3), donc combustion quasi-isobare. Le moteur Diesel est plus efficace que le moteur essence, et évite le phénomène d'auto-allumage qui handicape les moteurs essence (explosion du mélange avant la fin de la compression, d'où un cognement du moteur).

Exercice 6 : Rendement d'un cycle



On calculer les chaleurs :

- $Q_{AB} = C_P\Delta T = -C_PT_0 < 0$ fournie
- $Q_{BC} = C_V\Delta T = C_VT_0 > 0$ reçue
- $W = -P_0V_0/2$ (- aire cycle) < 0 fourni
- Et avec le premier principe :

$$Q_{CA} = -W - Q_{AB} - Q_{BC} = \frac{+P_0V_0}{2} - C_VT_0 + C_PT_0$$

Ainsi : $Q_{CA} = \frac{+P_0V_0}{2} - \frac{nRT_0}{\gamma-1} + \frac{\gamma nRT_0}{\gamma-1} = \frac{3P_0V_0}{2} > 0$ (chaleur reçue)

On a donc la chaleur reçue totale : $Q_C = Q_{BC}+Q_{CA} = C_VT_0 + 3P_0V_0/2$

Donc : $\boxed{\eta = \frac{-W}{Q_C} = \frac{P_0V_0}{2C_VT_0+3P_0V_0} = \frac{\gamma-1}{2+3(\gamma-1)} = \frac{\gamma-1}{3\gamma-1} = 16{,}7\%}$

Exercice 7 : Rendement d'un cycle

1. Chaleurs $\begin{cases} Q_{AB}=0 \\ Q_{BC}=C_P(T_C-T_B) \\ Q_{CA}=C_V(T_A-T_C) \end{cases}$, et $\eta = \frac{-W}{Q_C} = \frac{Q_C+Q_F}{Q_C} = 1+\frac{Q_{CA}}{Q_{BC}}$

$$\boxed{\eta = 1+\frac{T_A-T_C}{\gamma(T_C-T_B)}}$$

2. Mais on a (Laplace) : $\begin{cases} T_B = \frac{T_AV_0^{\gamma-1}}{(V_0/2)^{\gamma-1}} = T_A\cdot 2^{\gamma-1} = 1{,}32\cdot T_A \\ P_B = \frac{P_AV_0^{\gamma}}{(V_0/2)^{\gamma}} = P_A\cdot 2^{\gamma} \end{cases}$

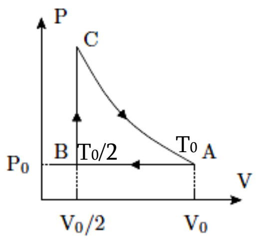
Et sur BC : T/V = cstte $\Rightarrow T_C = T_B\frac{V_0}{V_0/2} = 2T_B = 2^{\gamma}T_A = 2{,}64T_A$

Ainsi : $\boxed{\eta = 1+\frac{1-2^{\gamma}}{\gamma\cdot 2^{\gamma-1}} = 11{,}3\%}$

3. Rendement de Carnot : $\boxed{\eta' = 1-\frac{T_F}{T_C} = 1-\frac{T_A}{T_C} = 1-2^{-\gamma} = 62\%}$

(On prend les températures extrêmes T_A et T_C)

Exercice 8 : Rendement d'un cycle



1. Températures
   - → $T_A = T_0$ donc $T_B = T_0/2$
   - → $T_C = 2^{\gamma-1}T_0$ (loi de Laplace)
2. Machine motrice (sens horaire)

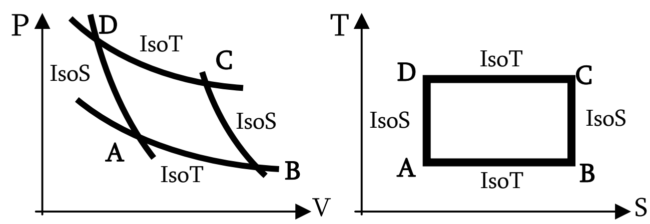
   On calcule les chaleurs
   - → $Q_{AB} = C_P\Delta T = -C_PT_0/2 < 0$ fournie
   - → $Q_{BC} = C_V\Delta T = C_VT_0(2^{\gamma}-1)/2 >$ reçue
   - → $Q_{CA} = 0$ (adiabatique réversible)

   Rendement : $\eta = \frac{-W}{Q_C} = \frac{-W}{Q_{BC}} = \frac{Q_{AB}+Q_{BC}}{Q_{BC}} = 1+\frac{Q_{AB}}{Q_{BC}}$

   Donc : $\boxed{\eta = 1-\frac{C_P}{C_V(2^{\gamma}-1)} = 1-\frac{\gamma}{(2^{\gamma}-1)} = 14{,}6\%}$
3. Rendement de Carnot : $\boxed{\eta' = 1-\frac{T_F}{T_C} = 1-\frac{T_B}{T_C} = 1-2^{-\gamma} = 62\%}$

Exercice 9 : Cycle de Carnot / diagramme entropique

1. Adiabatique plus pentue (démo - voir DM).



2. Cycle moteur : parcouru dans le sens horaire, cycle récepteur : parcouru dans le sens antihoraire. Il s'agit ici d'un réfrigérateur. Les deux cycles ont la même aire (diagramme de Clapeyron, Aire = -W, et diag entropique : Aire = Q, mais W + Q = 0, l'aire est donc la même).
3. Efficacité : Ne dépend pas du fluide considéré :

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} = \frac{Aire\_Cycle}{Aire\_Courbe\_Haute} = \frac{(T_C-T_F)(S_B-T_A)}{T_C(S_B-T_A)} = \boxed{\eta = 1-\frac{T_F}{T_C}}$$

Exercice 10 : Cycle d'une pompe à chaleur

1. Diagramme de Clapeyron (P, V)…
2. On a $P_A = \frac{nRT_A}{V_A}$, $T_B = T_A\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma-1}$, $P_B = \frac{nRT_B}{V_B} = \frac{nR}{V_B}T_A\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma-1}$,

$$T_C = T_A,\ V_C = \frac{nRT_C}{P_C} = \frac{V_B^{\gamma}}{V_A^{\gamma-1}}.$$

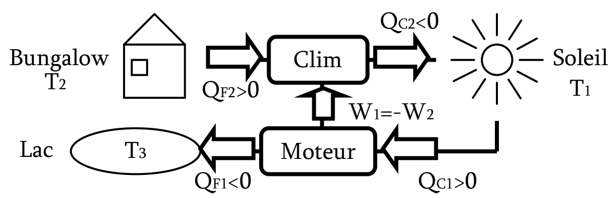
3. $\begin{cases} Q_{AB}=0 \\ W_{AB} = \frac{nRT_A}{\gamma-1}\left[\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma-1}-1\right] < 0 \end{cases}$,

$\begin{cases} Q_{BC} = \frac{\gamma nRT_A}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma-1}\right] > 0 \\ W_{BC} = nRT_A\left[\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma-1}-1\right] < 0 \end{cases}$, $\begin{cases} Q_{CA} = -W_{CA} < 0 \\ W_{CA} = \gamma nRT_A\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) > 0 \end{cases}$

4. Pompage de la chaleur : sur BC, en cède sur CA
5. Efficacité thermo : $\boxed{e_{pompe} = \frac{-Q_{CA}}{W_{reçu}} = \frac{\ln\left(\frac{T_A}{T_B}\right)}{\frac{T_B}{T_A}-1+\ln\left(\frac{T_A}{T_B}\right)} < \frac{T_C}{T_C-T_F}}$

Exercice 11 : Couplage moteur / climatiseur

1. On complète le schéma :



2. On a $\begin{cases} Q_{C2}+Q_{F2}+W_2=0 \\ \frac{Q_{C2}}{T_1}+\frac{Q_{F2}}{T_2}=0 \\ Q_{C1}+Q_{F1}+W_1=0 \\ \frac{Q_{C1}}{T_1}+\frac{Q_{F1}}{T_3}=0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q_{F2} = -\frac{T_2}{T_1}Q_{C2} \\ Q_{C2}+Q_{F2}+Q_{C1}+Q_{F1}=0 \\ Q_{F1} = -\frac{T_3}{T_1}Q_{C1} \end{cases}$

   On injecte tout dans la 2nde équation :

$$\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right)Q_{C2}+\left(1-\frac{T_3}{T_1}\right)Q_{C1}=0 \quad \Rightarrow Q_{C1} = \frac{-(1-T_2/T_1)}{(1-T_3/T_1)}Q_{C2}$$

   Si on considère que seule la chaleur absorbée par le moteur est onéreuse :

$$e_T = \frac{Q_{F2}}{Q_{C1}} = \frac{-\frac{T_2}{T_1}Q_{C2}}{\frac{-(1-T_2/T_1)}{(1-T_3/T_1)}Q_{C2}} = \boxed{e_T = \frac{-\left(1-\frac{T_3}{T_1}\right)}{\left(1-\frac{T_1}{T_2}\right)} = 1{,}39}$$

SOLUTION des EXERCICES – TH5 – Machines Thermiques – Feuille 2/2

Exercice 12 : Pertes thermiques

1. Evaluation des pertes :
   1.a) Bilan thermique à P constante :

$$dH = CdT = -P_{th} = -aC\left(T-T_0\right) \qquad \boxed{\Rightarrow \frac{dT}{dt} + aT = aT_0}$$

1.b) On en déduit $\dfrac{d\left(T-T_0\right)}{\left(T-T_0\right)} = -adt$ et $\ln\left(\dfrac{T_2-T_0}{T_1-T_0}\right) = -a\Delta t$

Ce qui nous donne $\boxed{a = \dfrac{-1}{\Delta t}\ln\left(\dfrac{T_2-T_0}{T_1-T_0}\right) = 9{,}6.10^{-5}\,s^{-1}}$

2. Efficacité maximale (Carnot) : $e_C = \dfrac{T_C}{\Delta T} = 29$, donc notre pompe fonctionne à $\boxed{e_T = 0.4\cdot\dfrac{T_C}{\Delta T} = 11{,}6}$

3. Pour que la chaleur soit constante, il faut que

$$\cancel{CdT} = e_T P_{PAC}dt - P_{th}dt = 0 \qquad \Rightarrow e_T P_{PAC} = P_{th} = aC\left(T-T_0\right)$$

La PAC doit compenser directement les pertes :

$$\boxed{\Rightarrow P_{PAC} = \frac{P_{th}}{e_T} = \frac{aC\left(T_1-T_0\right)}{e_T} = 826W}$$

Exercice 13 : Machine frigorifique à absorption

1. Etude des chaleurs

→ Système étudié : l'ammoniac NH_3 = fluide caloporteur

→ L'évaporation absorbe de la chaleur : $Q_3 < 0$.

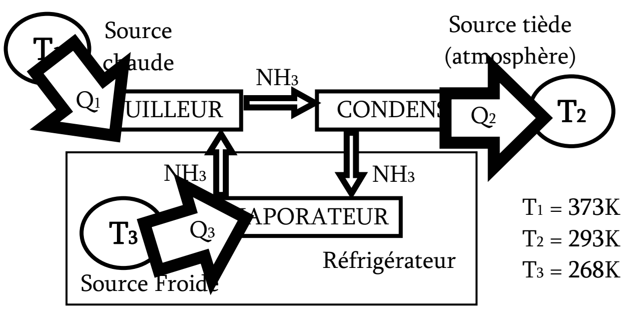
→ 2 principes : $\begin{cases} Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0 \\ \dfrac{Q_1}{T_1} + \dfrac{Q_2}{T_2} + \dfrac{Q_3}{T_3} \underset{rév}{\overset{irr}{\leq}} 0 \end{cases}$

Pour étudier le signe de Q_1, on élimine Q_2 dans l'inégalité :

$$Q_1\underbrace{\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)}_{<0} + Q_3\underbrace{\left(\frac{1}{T_3}-\frac{1}{T_2}\right)}_{>0} \underset{rév}{\overset{irr}{\leq}} 0 \qquad \boxed{\Rightarrow Q_1 > 0}$$

Pour étudier le signe de Q_2, on élimine Q_1 dans l'inégalité :

$$Q_1\underbrace{\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right)}_{>0} + Q_3\underbrace{\left(\frac{1}{T_3}-\frac{1}{T_1}\right)}_{>0} \underset{rév}{\overset{irr}{\leq}} 0 \qquad \boxed{\Rightarrow Q_2 < 0}$$



$T_1 = 373K$
$T_2 = 293K$
$T_3 = 268K$

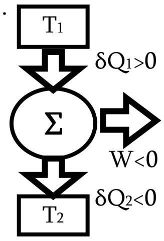
2. Efficacité : $\boxed{e = \dfrac{Q_3}{Q_1} \underset{rév}{\overset{irr}{\leq}} \dfrac{T_3\left(T_1-T_2\right)}{T_1\left(T_2-T_3\right)} = 2{,}3}$

Exercice 14 : Extraction d'énergie de pseudo-sources

1. Fonctionnement du moteur sur un cycle élémentaire (entre τ et $\tau+d\tau$). On peut supposer les T constantes sur ce cycle.

1.a) Schéma classique d'un moteur thermique…
Attention aux signes reçus pour le moteur
Mais fourni par les sources

δQ_1 reçu par le moteur,
Donc $\delta Q_1 = -CdT$ pour la source



1.b) Sur un cycle élémentaire :

$$\begin{cases} 1^{er} \text{ Principe : } & dU_{cycle} = 0 = \delta W + \delta Q_C + \delta Q_F \\ 2^{ème} \text{ Principe : } & dS_{cycle} = 0 = \dfrac{\delta Q_1}{T_1} + \dfrac{\delta Q_2}{T_2} \end{cases}.$$

Le second principe donne directement :

$$\boxed{0 = \frac{-CdT_1}{T_1} + \frac{-CdT_2}{T_2}}$$

1.c) T_1 et T_2 vont évoluer jusqu'à ce qu'elles s'équilibrent à la valeur T_f, telle que (en intégrant) : $0 = \ln\left(\dfrac{T_f}{T_1}\right) + \ln\left(\dfrac{T_f}{T_2}\right)$,

Ainsi : $\boxed{T_f = \sqrt{T_1T_2} = 325K = 52°C}$

2. Travail récupérable et rendement global

2.a) Calcul du travail avec le 1[er] principe :

$$\Delta U = 0 = W + Q_C + Q_F \qquad \Rightarrow W = -Q_C - Q_F,$$

$$\boxed{W = \int CdT_1 + \int CdT_2 = C\left(2T_f - T_1 - T_2\right) = -2{,}48.10^6\,J}$$

2.b) Rendement global : $\boxed{\eta = \dfrac{W}{Q_1} = \dfrac{C\left(2T_f - T_1 - T_2\right)}{C\left(T_f - T_1\right)} = 12{,}9\%}$

Rendement faible par rapport au cycle de Carnot effectué de manière réversible entre 2 sources de température fixe :

$$\boxed{\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 24{,}1\%}$$

Exercice 15 : Chauffage par pompe à chaleur

1. Cycle élémentaire :

$$\begin{cases} 1^{er} \text{ Principe : } & dU_{cycle\_élémentaire} = 0 = \delta W + \delta Q_C + \delta Q_F \\ 2^{ème} \text{ Principe : } & dS_{cycle\_élémentaire} = 0 = \dfrac{\delta Q_C}{T} + \dfrac{\delta Q_F}{T_0} \end{cases}$$

Efficacité thermique « vraie » ou « instantanée » :

$$\boxed{e_{pompe} = \frac{-\delta Q_C}{\delta W} = \frac{\delta Q_C}{\delta Q_C + \delta Q_F} = \frac{T}{T-T_0}}$$

2. Energie à fournir :

$$\delta W = \frac{-\delta Q_1}{e_{pompe}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\left(-\delta Q_1\right) = mc\left(1 - \frac{T_2}{T}\right)dT$$

(Attention aux signes, comme dans l'exercice 14, la chaleur reçue par le moteur est fournie par la source → dH=-mcdT)

Et $\boxed{W = mc\left[\left(T_{max} - T_0\right) - T_0\ln\left(\dfrac{T_{max}}{T_0}\right)\right] = 6{,}21.10^6\,J}$

3. Efficacité thermique apparente :

$$\boxed{e_{pompe} = \frac{-Q_{C(totale)}}{W_{(total)}} = \frac{mc\left(T_{max} - T_0\right)}{mc\left[\left(T_{max} - T_0\right) - T_0\ln\left(\dfrac{T_{max}}{T_0}\right)\right]} = 20{,}2}$$

Exercice 16 : Moteur thermique entre 2 masses d'eau

1. On applique la même méthode que dans les exercices précédents, on fait un bilan sur un cycle élémentaire :

$$\begin{cases} 1^{er} \text{ Principe :} & dU_{cycle\_élémentaire} = \delta W + \delta Q_C + \delta Q_F = 0 \\ 2^{ème} \text{ Principe :} & dS_{cycle\_élémentaire} = \dfrac{\delta Q_C}{T_C(t)} + \dfrac{\delta Q_F}{T_F(t)} = 0 \end{cases}$$

Et pour chacune des sources, on a :

$$\begin{cases} 1^{ère}\ Source : & dU_C = \delta Q_{V1}^{ech} = m_1 c dT_C = -\delta Q_C \quad (reçue) \\ 2^{ème}\ Source : & dU_F = \delta Q_{V2}^{ech} = m_2 c dT_F = -\delta Q_F \quad (reçue) \end{cases}$$

Ce qui donne, avec le second principe :

$$dS_{cycle\_élémentaire} = -c\left(\frac{m_1 dT_C}{T_C(t)} + \frac{m_2 dT_F}{T_F(t)}\right) = 0$$

Et $m_1 \ln\left(\dfrac{T_f}{T_{01}}\right) + m_2 \ln\left(\dfrac{T_f}{T_{02}}\right) = 0$ $\boxed{\Rightarrow T_f = T_{01}^{\frac{m_1}{m_1+m_2}} \cdot T_{02}^{\frac{m_2}{m_1+m_2}}}$

(moyenne géométrique des températures initiales)

2. Travail fourni : Bilan global

$$\boxed{W = -Q_C - Q_F = m_2 c(T_f - T_{02}) + m_1 c(T_f - T_{01}) = -8{,}5.10^6 J}$$

3. AN : $\boxed{T_f = 321{,}2K}$

Exercice 17 : Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) fonctionne réversiblement entre une source de température variable au cours du temps et une source idéale de température constante :

→ 1 tonne d'eau de capacité thermique massique $c_P = 4{,}18.10^3 J.K^{-1}.kg^{-1}$ dont la température $T_C(t)$ varie ; elle est contenue dans une citerne et sa température initiale est $T_{0C} = T_F = 283K$.

→ L'atmosphère de température constante $T_F = 283K$.

1. On applique les principes sur un cycle élémentaire :

$$\begin{cases} dS_{cycle\_élémentaire} = \dfrac{\delta Q_F}{T_F(t)} - mc\dfrac{dT_C}{T_C(t)} + = 0 \\ \delta W = -(\delta Q_F + \delta Q_C) = mc\left(dT_C - T_F(t)\dfrac{dT_C}{T_C(t)}\right) \end{cases}$$

On intègre la seconde relation :

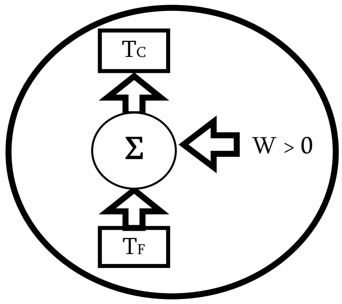
$$\boxed{W = mc\left((T_f - T_F) - T_F \ln\left(\frac{T_f}{T_F}\right)\right) = 9{,}3.10^6 J}$$

2. Efficacité : $\boxed{e_{PAC} = \dfrac{-Q_{C(totale)}}{W_{(total)}} = \dfrac{mc(T_f - T_F)}{mc\left((T_f - T_F) - T_F \ln\left(\dfrac{T_f}{T_F}\right)\right)} = 16{,}6}$

3. Si la même énergie avait été fournie à l'eau directement par une résistance chauffante, l'élévation de température aurait été 16,6 fois moins grande, car l'efficacité d'une résistance chauffante n'est que de 1 (énergie électrique convertie directement en énergie thermique par effet Joule). On a ici ΔT= 37K, on aurait eu seulement 2,3K.

Exercice 18 : Climatiseur

1. Schéma habituel d'un réfrigérateur…



2. Chaleurs totales :

$$\begin{cases} 2^{ème} \text{ Principe :} \quad \dfrac{\delta Q_1}{T} + \dfrac{\delta Q_2}{T_0} = 0 \\ \delta Q_1 = -\mu dT & \boxed{\Rightarrow Q_1 = -\mu(T_1 - T_0)} \\ \delta Q_2 = -T_0\dfrac{(-\mu dT)}{T} & \boxed{\Rightarrow Q_2 = \mu T_0 \ln\left(\dfrac{T_1}{T_0}\right)} \end{cases}$$

3. Travail (1er principe) : $\boxed{W = -Q_1 - Q_2 = 970\,kJ}$

4. Puissance fournie (1h = 3600s) $\boxed{P = W/\Delta t = 269W}$