

TP 25 - MACHINES THERMIQUES

Le but du TP que vous allez effectuer aujourd’hui double. La première partie s’intéresse à l’étude d’un moteur, il s’agit d’abord d’acquérir avec un micro-controleur (Arduino) le cycle de Watt d’un moteur de Stirling et d’exploiter ce cycle pour en déduire la puissance et le rendement expérimental η_{exp} . La deuxième partie s’intéresse à une pompe à chaleur dont on va tracer le cycle dans le diagramme des frigoristes pour déterminer le rendement.

I Le moteur de Stirling

I.1 Historique

En 1815, durant la révolution industrielle, en cherchant une alternative aux machines à vapeur, les frères James et Robert Stirling inventèrent leur propre moteur. Parce qu’il utilisait l’air plutôt que la vapeur comme carburant de travail, il évitait les risques d’explosion des machines à vapeur de cette époque, malheureusement courants.

Le moteur de Stirling peut utiliser n’importe quelle source de chaleur comme énergie motrice et a la particularité d’être réversible (il peut alors être utilisé comme pompe à chaleur et transférer de l’énergie thermique d’une source froide à une source chaude).

I.2 Le fonctionnement du moteur de Stirling

Le cycle de Stirling

Le cycle de Stirling est un cycle thermodynamique que décrivent les moteurs Stirling.

Le cycle est fermé régénératif, utilisant un fluide gazeux :

- « cycle fermé » signifie que le fluide travaillant est en permanence contenu dans la machine thermodynamique. Ceci catégorise également un moteur à combustion externe ;
- « régénératif » fait référence à la présence d’un échangeur de chaleur interne qui permet d’accroître le rendement thermique de l’appareil.

Le cycle est le même que la plupart des cycles thermiques et comprend quatre phases : 1. compression, 2. chauffage, 3. détente, 4. refroidissement (cf. [diagramme de Clapeyron](#) sur la gauche) :

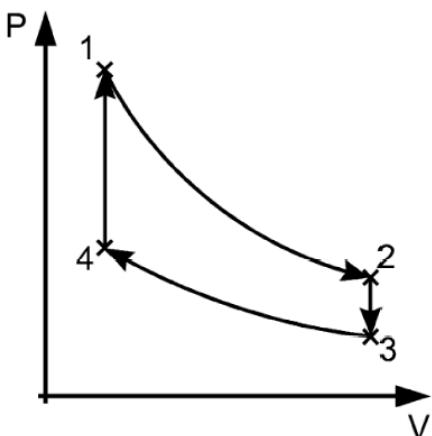


FIGURE 1 – Diagramme de Watt d’un moteur de Stirling

Remarque : On pourra noter deux différences notables du fonctionnement du moteur de Stirling avec celui d’un moteur thermique classique. Tout d’abord le fait que le fluide utilisé l’est en **circuit fermé**. Dans un moteur thermique, on utilise l’air extérieur que l’on mélange avec le carburant. Les gaz de combustion sont ensuite évacués via un circuit d’échappement. Ensuite, le **caractère génératif** avec la présence d’un échangeur interne qui permet d’augmenter le rendement.

Sur la figure qui suit sont mentionnées les différentes transformations subies par le fluide lors d’un cycle thermodynamique :

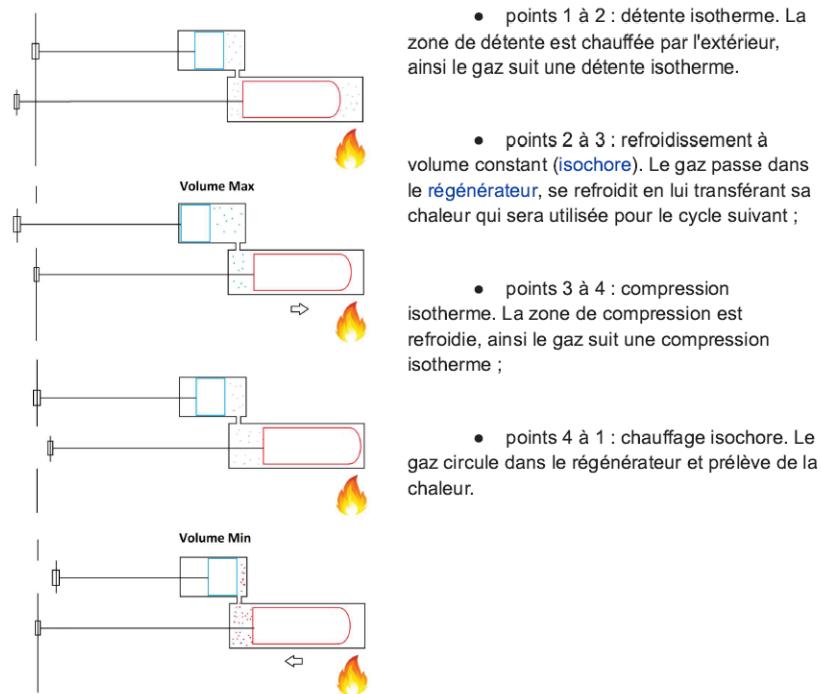


FIGURE 2 – Description du cycle de Stirling

II Cycle de Stirling

II.1 Acquisition du cycle expérimental

L'acquisition du cycle vous sera présentée lors de la séance de TP par l'enseignant.

Le traitement des données est classique de l'acquisition de données : des capteurs enregistrent les données qui sont ensuite traitées numériquement afin d'être exploitées. La seule particularité est qu'ici le traitement se fait *via* un microcontrôleur (arduino). L'objectif est de pouvoir tracer la pression p du fluide en fonction de son volume v . Le capteur de pression utilisé permet de déterminer la surpression dans le système par rapport à la pression atmosphérique.

La figure qui suit donne un exemple d'acquisition :

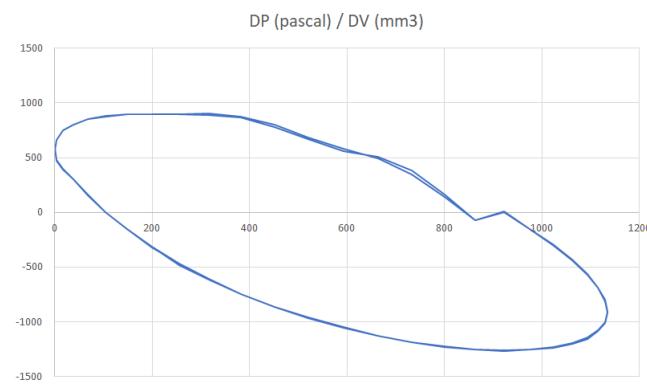


FIGURE 3 – Exemple d'acquisition

On remarquera bien que :

- en abscisses est donnée la variation de volume du fluide (notée DV) par rapport à une position de référence (d'où un volume nul qui apparaît pour certains points du cycle, correspondant au

- volume minimal $V_{min} = 85 \text{ cm}^3$). Les volumes sont donnés en mm³ ;
- en ordonnées est portée la surpression du fluide (notée DP) par rapport à la pression atmosphérique extérieure, mesurée en kPa.

II.2 Exploitation des mesures

Avant toute chose, il faut remplir de calorimètre d'eau chaude, presque à ras bord. Dans ce cas, la masse d'eau est d'environ 950 g et la masse en eau est de l'ordre de 50g, donc on considérera que la capacité calorifique du calorimètre est celle de 1kg d'eau. Il faut ensuite placer la sonde de température dans l'eau, et le moteur de Stirling sur le calorimètre puis le lancer pour atteindre un régime stationnaire avant de lancer les mesures.

Pour l'acquisition, une fois le logiciel Arduino (placé dans le dossier Ressources) lancé (le choix du bon port de mesure Port COM3 et la quantification 115 200 ont déjà été effectués normalement), vous pouvez lancer l'acquisition en ouvrant "moniteur série" (cocher l'horodatage afin d'avoir aussi les instants des mesures). Vous obtenez alors une série de mesures présentée sous la forme heure, compteur de cycles, dv, dp, T. Pour stopper l'acquisition après quelques cycles, il faut stopper le défilement automatique des données.

Pour exploiter les données sous regressi, il faut alors copier les données qui vous intéressent (entre 2 instants où DV vaut 0 pour un seul cycle) et les copier dans un fichier texte .txt. Ce fichier doit ensuite être ouvert avec Excel ou libre office calc pour séparer les données avec le séparateur de variable. Enfin, une fois les données sous forme de tableau dans excel, les copier dans le presse-papier (ctrl-C) puis ouvrir Regressi et faire document-nouveau-A partir du presse papier.

En raison de contrainte de temps sur ce TP, vous ferez bien attention à sauvegarder vos données qui seront exploitées plus profondément ultérieurement en TD ou AP.

Dans un premier temps, sélectionner les données correspondant à une vingtaine de cycles et afficher le résultat dans le diagramme de Watt.

Question (II.2.1)

Pourquoi l'allure du cycle que vous avez acquis est très différente du cycle modélisé présenté sur la figure 1 ?

Question (II.2.2)

Pour que ce cycle soit moteur, dans quel sens doit-on le parcourir ? On justifiera bien la réponse.

Question (II.2.3)

Proposer et mettre en œuvre une méthode d'estimation du travail W fourni par ce cycle.

Question (II.2.4)

Utiliser les données d'horodatage encore présentes dans le logiciel Arduino ou le fichier excel afin de mesurer la durée d'un cycle (en en comptant plusieurs pour diminuer les incertitudes de mesure) et de déduire la puissance du moteur étudié.

Question (II.2.5)

Identifier la partie du cycle qui correspond au fluide en contact avec la source chaude.

Question (II.2.6)

On souhaite maintenant effectuer une estimation de la chaleur reçue en contact de la source chaude. Exploiter les informations supplémentaires afin de proposer un protocole de mesure de Q_c puis de \mathcal{P}_c la puissance fournie par la source chaude.

Question (II.2.7)

En déduire une estimation du rendement expérimental η_{exp} du moteur de Stirling étudié et commenter par rapport à un moteur à explosion dont le rendement est de l'ordre de 30 % ou au rendement maximal atteint par un moteur réversible (cycle de Carnot).

Question (II.2.8)

Pour aller plus loin : proposer une méthode pour prendre en compte les pertes du calorimètre et la mettre en œuvre.

III La pompe à chaleur

III.1 Structure d'une pompe à chaleur

Le dispositif comprend les différents organes mentionnés (figure 4) :

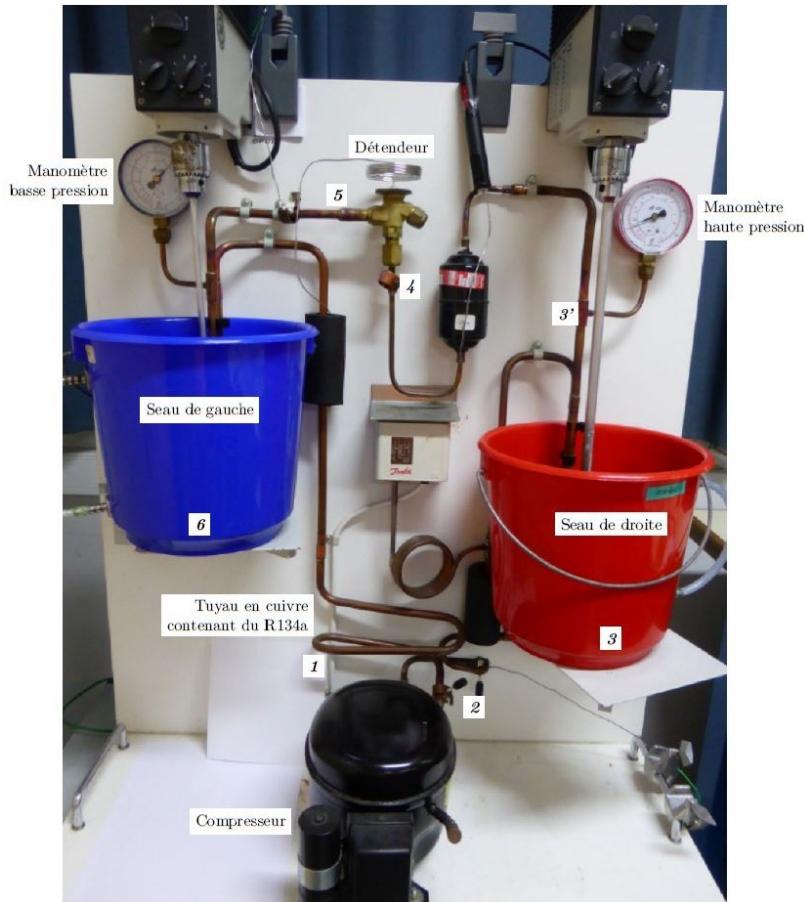


FIGURE 4 – Vue d'ensemble de la pompe à chaleur

Le fluide R134a est contenu dans un tuyau de cuivre parfaitement fermé. Sous forme gazeuse à la sortie du compresseur (point 2), il subit une liquéfaction au niveau du condenseur : le tuyau de cuivre prend la forme d'un serpentin plongé dans le seau rouge de droite contenant de l'eau (figure 5). Le liquide subit ensuite une détente au niveau du détendeur (évolution de 4 à 5) avant de se vaporiser complètement au niveau de l'évaporateur : le tuyau de cuivre prend la forme d'un serpentin plongé dans le seau de gauche contenant de l'eau (figure 5). Il retourne à nouveau dans le compresseur (point 1) pour suivre un nouveau cycle.

On dispose de deux manomètres (basse pression et haute pression) permettant une mesure de pression relative P_{rb} et P_{rh} (pour obtenir la pression absolue on doit ajouter 1 bar). Ces manomètres présentent une double graduation pression relative et température de saturation.



FIGURE 5 -

On peut schématiser le fonctionnement de la pompe à chaleur sur le schéma d'ensemble donné figure 6.

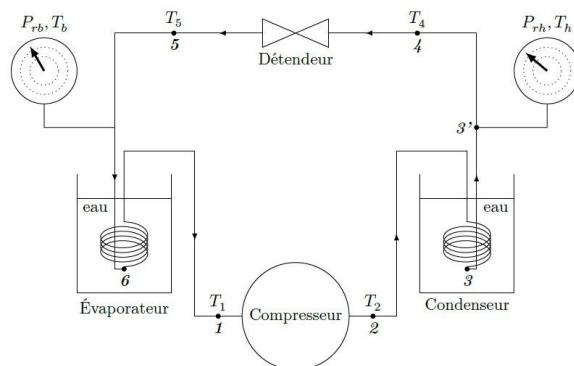


FIGURE 6 – Schéma d'ensemble de la pompe à chaleur

IV Etude sur un cycle

On modélise la pompe à chaleur par une machine cyclique réversible ditherme : au cours d'un cycle le fluide R134a reçoit le transfert thermique Q_f de la part de la source froide (à la température T_6), le transfert thermique Q_c de la part de la source chaude (à la température T_3) et le travail W de la part du compresseur. **On suppose que toutes les évolutions sont réversibles.**

Question (IV.0.9)

Donner, en le justifiant, le signe des grandeurs Q_f , Q_c et W .

Question (IV.0.10)

Définir l'efficacité maximale e_c de cette machine en fonction des transferts énergétique puis l'exprimer en fonction des températures des sources.

Question (IV.0.11)

Faire l'application numérique avec les températures des sources chaude et froide relevées en régime stationnaire (une fois qu'elles se sont stabilisées).

Question (IV.0.12)

Commenter le résultat en se référant à un ordre de grandeur de l'efficacité d'une machine réelle actuelle.

V Etude du fluide R134a lors de son cycle

On considère cette fois que le fluide est en écoulement stationnaire à travers les différents organes qui composent la pompe à chaleur (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur, tuyau).

En régime d'écoulement stationnaire, le fluide R134a subit les transformations suivantes (on peut se reporter à la figure 5) :

- 1 → 2 : le fluide est comprimé dans un compresseur à piston ;
- 2 → 4 : le fluide se refroidit et change d'état au contact de la source chaude. On suppose cette étape isobare ;
- 4 → 5 : le fluide subit une détente dans le détendeur. Cette détente peut être considérée comme adiabatique ;
- 5 → 1 : le fluide change d'état et se réchauffe au contact de la source froide. On suppose cette étape isobare.

On s'intéresse au détendeur. Il s'agit d'un organe sans pièce mobile. La détente est supposée adiabatique.

Question (V.0.13)

Quel(s) argument(s) permet(tent) de justifier l'adiabaticité de la transformation dans le détendeur ?

Question (V.0.14)

Montrer que l'enthalpie massique se conserve au cours de la transformation.

On considère le diagramme enthalpique (ou diagramme des frigoristes) fourni en annexe. Sur ce diagramme, on peut identifier la courbe de saturation composée de la courbe d'ébullition (liquide saturé, $x = 0$, courbe de gauche) et de la courbe de rosée (vapeur saturante sèche, $x = 1$, courbe de droite). On peut également identifier les isotrites, les isothermes, les isentropiques et les isochores.

Question (V.0.15)

A partir des pressions et températures relevées expérimentalement et des hypothèses faites, placer les points 1, 2, 4 et 5 sur le diagramme des frigoristes et tracer le cycle parcouru par le fluide.

Question (V.0.16)

A partir du cycle tracé, compléter le tableau suivant :

	1	2	4	5
p (bar)				
T (K)				
Etat du fluide				
Titre en vapeur x				
v ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)				
h ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
s ($\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)				

Question (V.0.17)

Déterminer la chaleur massique q_c reçue par le fluide au contact de la source chaude. Faire de même pour q_f au contact de la source froide.

Question (V.0.18)

En déduire à partir du premier principe sur un cycle le travail massique w_{12} reçu par le fluide dans le compresseur.

Question (V.0.19)

Exprimer et calculer le rendement expérimental de cette pompe à chaleur. Comparer à la valeur obtenue pour le rendement maximal et conclure.

Question (V.0.20)

On remarque que l'évolution au niveau du compresseur n'est pas isentropique. L'entropie augmente ou diminue-t-elle ? Que conclure sur l'adiabaticité de l'étape ?

Ainsi, le travail fourni réellement par le compresseur est au moins supérieur au travail nécessaire pour réaliser une compression isentropique.

Question (V.0.21)

Placer un point $2'$ qui correspondrait à une étape isentropique dans le compresseur (qui amènerait à la même pression p_2). En déduire alors le travail w_{isoS} fourni par le compresseur dans l'hypothèse isentropique.

Question (V.0.22)

Affiner votre définition de la COP de la PAC et calculer sa nouvelle valeur.

R134a Ref. D.P.Wilson & R.S.Basu, ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94, part 2.

