

THERMODYNAMIQUE

Moteur de Stirling

Mesure de la pression de vapeur
saturante de l'eau

Pompe à chaleur

Etude d'une machine thermique : le moteur de Stirling

Avertissement : ces moteurs sont fragiles, en cas de problème, il faut **immédiatement** arrêter le chauffage du filament sur le transformateur sous les tables. Les principaux problèmes nécessitant une telle intervention sont les suivants : arrêt du moteur, fuite sur un circuit d'eau, déconnexion d'un tuyau sur ces mêmes circuits, autres incidents qui vous semblent suspects.

I Principe du moteur de Stirling :

I.1) Généralités

Les moteurs thermiques sont des dispositifs permettant de produire du travail mécanique à partir de chaleur. Ces machines sont à la source de la révolution industrielle du XIX^e siècle, ce sont elles qui ont permis l'essor de l'industrie avec d'abord les machines à vapeur, puis, à partir du XX^e siècle, les moteurs à explosion. L'enjeu colossal de ces machines a donné naissance à la branche de la physique connu sous le nom de thermodynamique. L'un de ses buts fondamentaux est de trouver et comprendre les quelques principes de base utiles pour décrire le fonctionnement des machines thermiques, puis d'utiliser ce savoir pour améliorer et optimiser les machines réelles. De par les problèmes énergétiques actuels, la thermodynamique demeure une discipline aux enjeux cruciaux.

Bien que méconnu, le moteur de Stirling est en fait l'un des premiers moteurs thermiques conçus par l'homme, il date de 1816. Il a été conçu par l'écossais Robert Stirling, et a assez rapidement sombré dans l'oubli avec l'avènement des machines à vapeur. Il est réapparu vers 1940, et ses particularités intéressantes ont enclenchés de nouvelles recherches à son sujet : il n'y a ni explosion, ni échappement (on peut espérer un fonctionnement plus silencieux) et il fonctionne toujours avec le même gaz de travail, qui peut être un gaz quelconque tel que l'air. En outre, son fonctionnement est réversible : en supprimant la source de chaleur et en forçant la rotation de la machine avec un autre moteur (qui peut être électrique par exemple), on peut le transformer en réfrigérateur.

I.2) Principe de fonctionnement

Le principe de ce moteur est très astucieux : il se compose d'un cylindre dans lequel se déplace deux pistons (et non pas un comme dans les moteurs à explosion), il est schématisé sur le figure 1.

Toute l'ingéniosité du système repose dans un déphasage de $\pi/2$ des mouvements des deux pistons et sur le dispositif appelé régénérateur. Le gaz de travail est le gaz situé au-dessus du piston inférieur (attention à la forme du piston, qui exclut une partie du volume).

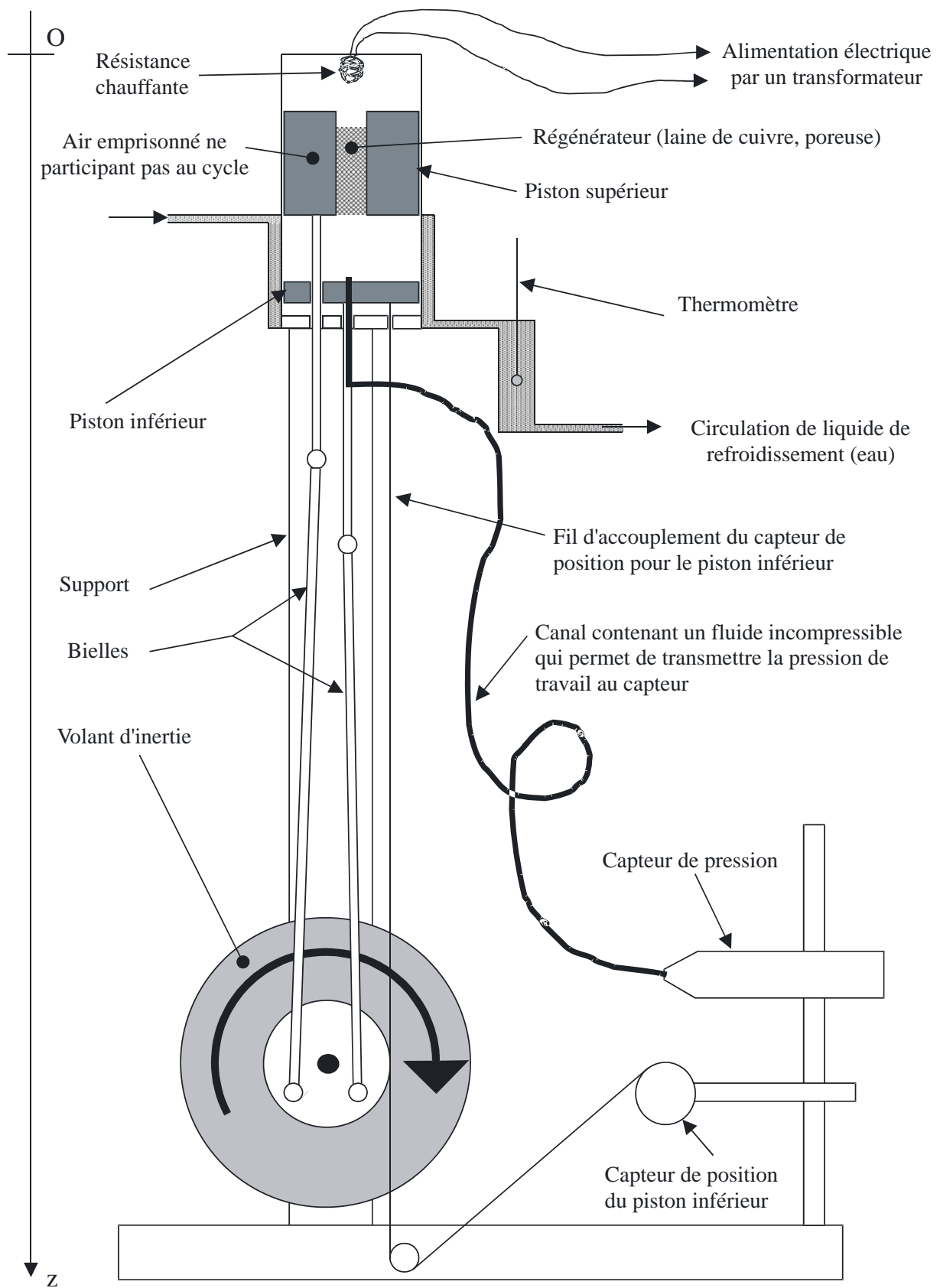


Figure 1

Le mouvement des pistons est schématisé sur la figure 2 : L'axe (Oz) étant orienté vers le bas, on a représenté les cotes des pistons inférieur et supérieur en fonction du temps. Le volume total occupé par le gaz est donné par la cote du piston inférieur. L'écart entre la position du piston supérieur et l'axe donne le volume de gaz chaud (V_C) et l'écart entre les deux pistons donne le volume de gaz froid (V_F)

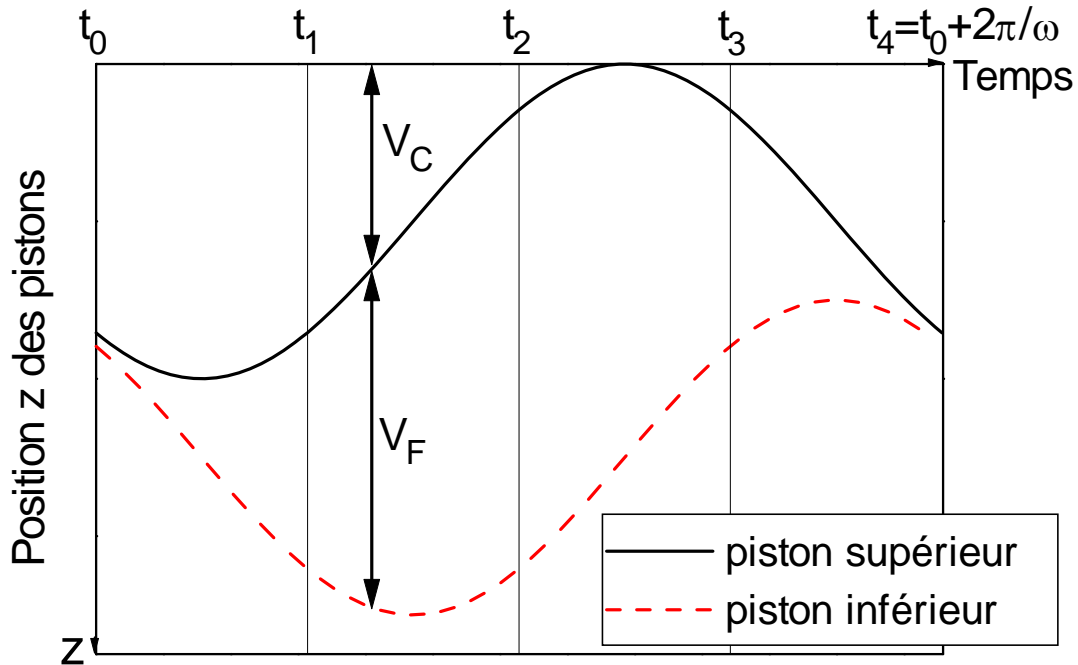


Figure 2

Le cycle peut se décomposer en 4 phases :

Phase 1, $t \in [t_0, t_1]$: tout le gaz se trouve à peu de chose près dans la zone chaude, la phase peut être considérée comme isotherme, la température du gaz est T_C , il se détend en poussant les deux pistons. Le volume final total occupé par le gaz à la fin de cette phase est V_{MAX} .

Phase 2, $t \in [t_1, t_2]$: le volume total occupé par le gaz est sensiblement constant et égal à V_{MAX} (cette phase est modélisée par une transformation durant laquelle le volume est constant, elle est dite isochore), le gaz est transféré de la zone où il règne la température T_C à la zone où il règne la température T_F . Dans le cas idéal, cette phase ne consomme pas de travail mécanique, puisqu'il n'y a pas de variation de volume (autre façon de voir : l'inertie du gaz étant très faible, le travail à fournir pour le pousser d'un côté du piston à l'autre est négligeable). Lors de cette phase, le gaz traverse le régénérateur, qui est un échangeur-accumulateur de calories : c'est un dispositif très important, côté chaud il est à la température T_C et côté froid à la température T_F . Lors de la traversée (pour la phase 2), le gaz doit progressivement abandonner de la chaleur, de telle sorte que sa température soit à T_F à la sortie du régénérateur, ce qui évite une surchauffe du circuit de refroidissement de la partie froide. Les calories cédées au régénérateur lors de cette phase seront rendues au gaz lors de la phase 4, quand il est renvoyé dans la zone chaude.

Phase 3, $t \in [t_2, t_3]$: tout le gaz se trouve à peu de chose près dans la zone froide, la phase peut être considérée comme isotherme, la température du gaz est T_F , il subit une compression jusqu'au volume V_{MIN} . Le travail à fournir est inférieur au travail récupéré lors de la phase 1,

car la température du gaz est plus faible. Ce travail est fourni par l'inertie de la roue couplée au moteur. Notons que sans cette roue, on ne disposerait d'énergie mécanique pour assurer cette compression et le moteur ne pourrait pas fonctionner.

Phase 4, $t \in [t_3, t_4]$: le volume total occupé par le gaz est sensiblement constant et égal à V_{MIN} , le gaz est transféré de la zone où il règne la température T_F à la zone où il règne la température T_C . Comme pour la phase 2, dans le cas idéal, cette phase ne consomme pas de travail mécanique. Avec un régénérateur idéal, le gaz récupère les calories qu'il a cédé à ce dispositif lors de la phase 2, et il arrive dans la zone chaude à la température T_C , sans que l'utilisateur ait à lui fournir de l'énergie thermique.

I.3) Rendement théorique du moteur de Stirling

Le rendement théorique ρ_{th} du moteur de Stirling idéal peut très facilement se calculer grâce aux principe de la thermodynamique. Il se définit de la manière suivante :

$$\rho_{\text{th}} = \frac{\text{Travail récupéré par l'utilisateur}}{\text{Energie fournie par l'utilisateur}} \quad (1)$$

On suppose que le cycle est décrit de manière quasi-statique réversible et que le gaz de travail est un gaz parfait. On considère ce qui se passe durant un cycle. Pour ce calcul, il faut se placer du point de vue du gaz de travail : nous considérerons le travail algébrique W reçu par le gaz (qui doit être négatif, puisque le gaz fournit du travail) et la chaleur algébrique Q reçue par le gaz. Dans ces conditions, le travail récupéré par l'utilisateur s'identifie à $-W$.

Pour un cycle idéal, le travail est nul durant les deux phases isochores :

$$W_2 = 0 \text{ et } W_4 = 0 \quad (2)$$

Durant les phases isothermes, le travail peut se calculer aisément :

$$W_1 = \int -P dV \quad (3)$$

Le cycle étant décrit de manière quasi-statique réversible, l'équation d'état du gaz est vérifiée à tout instant :

$$P = nRT_C/V \quad (4)$$

Après avoir substitué P par son expression dans l'intégrale (3), l'intégration est immédiate :

$$W_1 = nRT_C \ln(V_{\text{MIN}}/V_{\text{MAX}}) \quad (5)$$

De même, on peut calculer W_2 :

$$W_3 = nRT_F \ln(V_{\text{MAX}}/V_{\text{MIN}}) \quad (6)$$

D'où, le travail total $-W$ récupéré par l'utilisateur vaut :

$$-W = nR(T_F - T_C) \ln(V_{\text{MAX}}/V_{\text{MIN}}) \quad (7)$$

Le bilan calorifique est plus rapide : le régénérateur est supposé parfait, il en résulte qu'il n'est pas nécessaire de chauffer ou de refroidir le gaz lors des phases isochores.

$$Q_2 = 0 \text{ et } Q_4 = 0 \quad (8)$$

Les seules phases où il y ait échange de chaleur sont donc les phases 1 et 3. La phase 1 est celle où le gaz récupère l'énergie thermique que lui fournit l'utilisateur. Lors de la phase 3, le gaz est refroidi (il est nécessaire de refroidir à un moment le moteur, sinon la température divergerait...), ce sont des calories perdues, on ne peut malheureusement rien en faire.

Finalement, l'énergie fournie par l'utilisateur s'identifie à Q_1 . La définition du rendement prend donc l'expression suivante :

$$\rho_{th} = \frac{-W}{Q_1} \quad (9)$$

Le calcul de Q_1 est très facile grâce au premier principe de la thermodynamique (principe de conservation de l'énergie) :

$$\Delta U_1 = W_1 + Q_1 \quad (10)$$

Or le gaz est supposé parfait. Donc son énergie interne U ne dépend que de T . La phase 1 étant isotherme, il en résulte que $\Delta U_1 = 0$ et on en déduit immédiatement Q_1 :

$$Q_1 = -W_1 \quad (11)$$

En utilisant les expressions (5), (7) et (11), l'expression (9) du rendement se simplifie de façon sympathique :

$$\rho_{th} = 1 - \frac{T_F}{T_C} \quad (12)$$

II Démarrage du moteur

II.0) Travail préliminaire (à faire **avant** la séance de TP)

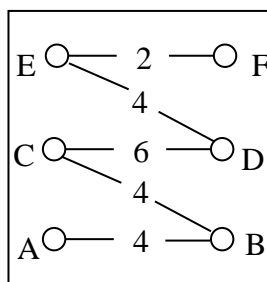
Tracer le cycle décrit ci-dessus sur les diagrammes (P,V) et (T,S).

II.1) Matériel

On dispose d'un certain nombre d'éléments :

- Moteur proprement dit, avec ses capteurs (figure 1)
- Transformateur situé sous la table : c'est lui qui fournit l'intensité nécessaire à l'alimentation de la résistance chauffante. Attention, l'intensité étant très forte, les fils électriques utilisés ne sont pas des fils standards, ce sont des fils à gros diamètre, qu'il ne faut pas mélanger avec les autres fils. La tension d'alimentation V_0 (valeur efficace) se choisit de façon approximative sur le transformateur en connectant les fils aux bornes adéquates :

Arrière du transformateur



Bornes	V_0 (V)	Bornes	V_0 (V)	Bornes	V_0 (V)
A-B	4	B-C	4	C-E	10
A-C	8	B-D	10	C-F	12
A-D	14	B-E	14	D-E	4
A-E	18	B-F	16	D-F	6
A-F	20	C-D	6	E-F	2

Figure 3

- Pince ampèremétrique, faisant aussi fonction de multimètre : on l'utilisera pour déterminer la puissance que l'on fournit au moteur (l'énergie fournie par l'utilisateur est initialement sous forme électrique, elle est intégralement convertie sous forme de chaleur grâce à la résistance

chauffante). Attention, la tension fournie par le transformateur est alternative et l'intensité peut être très élevée (il faut utiliser la pince ampèremétrique-multimètre en mode AC).

- Disque de couplage : c'est un disque percé de dix trous, doté d'un aimant en son centre qui lui permet de se coller sur l'axe du moteur. Il peut éventuellement être utilisé pour déterminer la vitesse de rotation du moteur à l'aide d'un stroboscope. Il est surtout utile pour bloquer le frein de Prony.
- Oscilloscope numérique : il récupère les données issues des capteurs et permet une visualisation rapide des cycles grâce au mode XY.
- Ordinateur : il récupère les données de l'oscilloscope, avec lesquelles on peut tracer proprement le diagramme (P,V).
- Frein de Prony : c'est une pince en bois qui vient serrer l'arbre moteur pour le freiner par frottement.
- Dynamomètre : il permet de déterminer le couple (c'est-à-dire le moment) qu'exerce le frein de Prony sur l'arbre moteur.

II.2) Démarrage

Avant le démarrage, on doit précéder aux opérations suivantes :

- Graissage (**opération à laisser faire par l'enseignant**)
- Mise en route de la circulation de l'eau de refroidissement, vérifier que l'eau coule normalement (le débit doit rester faible)

Ces opérations préliminaires étant faites, on peut démarrer le moteur : ceci est à faire **avec** l'enseignant

- Sélectionner une tension de chauffage suffisante (12 ou 14V)
- Mettre l'interrupteur en position marche
- Démarrer **immédiatement** le moteur à la main (si le démarrage n'est pas immédiat, la résistance chauffante n'est pas refroidie et peut griller). **Attention, il faut tourner dans le bon sens!**
- Attendre quelques minutes que le régime permanent soit bien établi. Si le moteur s'arrête, le relancer immédiatement. S'il ne veut vraiment pas tourner tout seul, arrêter le chauffage au niveau du transformateur.
- **Lorsque le moteur est bien chaud, mettre en place le frein de Prony, avec le dynamomètre.** On peut éventuellement changer la tension d'alimentation de la résistance chauffante. On bénéficie pour cela de l'inertie thermique de celle-ci : il est inutile d'arrêter le moteur et de refaire une procédure de démarrage, il suffit de faire la commutation très rapidement (c'est-à-dire 2-3 secondes), le moteur n'a alors pas le temps de s'arrêter. Le nouveau régime permanent ne s'établit pas immédiatement, il faut bien entendu attendre un peu après la commutation avant de commencer les mesures.

III Travail à faire

III.1) Mesurer la puissance fournie (sous forme électrique, tout est transformé en énergie thermique) au moteur grâce à un multimètre. La tension alimentant la résistance chauffante sera déterminée grâce à la fonction multimètre de la pince ampèremétrique (ne pas oublier de la mettre en position "volt AC" pour cette mesure). Pour la détermination de l'intensité du courant, on utilisera la fonction pince ampèremétrique.

III.2) La pression sera mesurée grâce au manomètre Keller PR-23. Ils mesurent la pression relative, c'est-à-dire l'écart entre la pression atmosphérique et la pression à l'intérieur du cylindre moteur. Brancher le capteur sur l'un des canaux d'entrée de l'oscilloscope. Le principe de branchement de ce type de capteur est décrit en annexe.

La position du piston est déterminée grâce au potentiomètre tournant couplé au moteur par le fil. Ce potentiomètre est monté en pont de Wheatstone avec le boîtier d'alimentation, il faut régler la borne médiane de ce boîtier pour avoir un offset proche de zéro. Brancher les 2 bornes mobiles des potentiomètres (capteur de position et boîtier d'alimentation) sur l'autre canal d'entrée de l'oscilloscope. L'alimentation est assurée par 2 piles de 4.5 V, elle est totalement flottante et il n'y a pas de problème de masse.

Utiliser l'oscilloscope pour visualiser le cycle du moteur ($P=f(V)$) [**Attention**, il peut y avoir un offset important pour le capteur de position. En outre, il y a une calibration à faire entre le signal électrique (lu sur l'oscilloscope) et la position du piston inférieur].

Déterminer la vitesse de rotation du moteur. Calculer le travail fourni par le moteur, en déduire son rendement réel (cf annexe "Rappels de mécanique du solide").

III.3) Transférer les données "pression-position du piston" sur un ordinateur via le logiciel "OpenChoice". Tracer le cycle $P=f(V)$ à l'aide de Kaleidagraph ou Excel (voir annexe II, III et IV pour l'utilisation de ces logiciels), puis déterminer l'aire du cycle. Comparer cette aire au travail réel produit par le moteur durant un cycle.

Pour déterminer l'aire du cycle, on peut, par exemple, imprimer le cycle et mesurer son aire manuellement en le décomposant en polygones adéquats.

Attention : le capteur de position donne la position du piston et non le volume occupé par le gaz. Il ne faut pas oublier de multiplier l'aire obtenue sur le graphe par la section du piston pour se ramener au volume. Le diamètre intérieur du piston est 6 cm.

III.4) Refaire III.1-3) pour plusieurs valeurs de chauffage et/ou de freinage si on a le temps.

III.5) Analyse du rendement réel :

Le rendement pratique est souvent très loin du rendement théorique, du fait des nombreuses imperfections du moteur :

Régénérateur : ce dispositif est un compromis délicat. Si l'on veut avoir une bonne thermalisation (ce qui évite d'avoir à fournir de la chaleur supplémentaire pour réchauffer un gaz trop froid à la fin de la phase 4), il faut avoir un échangeur thermique assez long. Mais cela risque d'induire une impédance, c'est-à-dire une différence de pression entre l'amont et l'aval de l'échangeur. Or, une telle situation nécessite de fournir un travail pour transférer le gaz (alors que dans le cas idéal, la phase de transfert étant isochore, ce transfert ne nécessitait pas d'apport d'énergie mécanique). Dans les deux cas, il s'ensuit une chute du rendement.

Forces de frottements : le moteur idéal suppose qu'il n'y a pas de frottement entre les pistons et le cylindre, ce qui n'est bien entendu pas le cas. Cela induit une énergie mécanique à fournir pour vaincre cette force parasite, qui n'arrive pas à l'arbre de sortie du moteur.

Pertes de chaleur vers l'extérieur : les pistons et le cylindre sont supposés adiabatiques, ce qui n'est pas le cas. Une partie de la chaleur fournie par l'utilisateur pour la partie chaude du moteur est perdue vers l'extérieur du moteur via des fuites thermiques.

Influence de la taille du moteur : les pertes augmentent en général moins vite que le volume du moteur (par exemple, les frottements du piston sont proportionnels au diamètre du cylindre et non à sa section). Ceci fait qu'en pratique plus le moteur est gros, meilleur risque d'être le rendement.

Etude de la pression de vapeur saturante de l'eau

Avertissement : le matériel est fragile, il faut le manipuler avec **précaution** et ne toucher aucun élément chaud. L'eau est chauffée à plus de 100°C, ce qui peut provoquer de **très graves brûlures** en cas de renversement ou de bris de l'erenmeyer contenant l'eau. La température de la plaque chauffante peut aller jusqu'à 350°C, ce qui provoque instantanément des brûlures en cas de contact avec la peau.

I Principe de l'expérience

I.1) Généralités

Pour un corps pur, la donnée du couple (température, pression) détermine son état liquide, gaz ou solide. Pour une température T donnée, la coexistence simultanée du corps sous les deux états liquide et gaz n'est possible que pour une seule valeur de la pression, que l'on appelle pression de vapeur saturante, et que nous noterons ici $P_s(T)$. Le but de cette séance de travaux pratiques est de déterminer expérimentalement la fonction $P_s(T)$ dans le cas d'un corps pur très commun, en l'occurrence l'eau, puis de la comparer avec l'expression semi-théorique de Dupré.

I.2) Principe de l'expérience

L'expérience se déroule en deux temps : on commence par enfermer de l'eau dans un récipient fermé par une soupape. La pression est initialement la pression atmosphérique et, outre le liquide, le récipient contient de l'air dans sa partie supérieure. On fait bouillir cette eau, lorsque la pression est suffisante, la soupape s'ouvre et la vapeur s'échappe, entraînant avec elle l'air enfermé initialement. Lorsque cet air est purgé, on arrête le chauffage, la température se met alors à redescendre, la pression retombe et la soupape se referme. Le récipient ne contient alors plus que l'eau liquide en contact avec de la vapeur d'eau. Il ne reste plus qu'à mesurer la pression en fonction de la température au fur et à mesure que la température chute.

I.3) Formule de Dupré

C'est une formule semi-phénoménologique, elle repose sur trois lois :
La relation de Clapeyron, qui se démontre (voir cours de thermodynamique):

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{L}{T(V_G - V_L)}$$

La loi des gaz parfaits, la vapeur étant assimilée à un gaz parfait :

$$PV_G = RT$$

La dépendance de la chaleur latente de vaporisation de l'eau en fonction de T (loi phénoménologique) :

$$L = A - BT$$

En outre, on fait l'approximation que le volume molaire du liquide est négligeable devant le volume molaire du gaz :

$$V_G - V_L \approx V_G$$

En injectant ces trois résultats dans la relation de Clapeyron, on obtient :

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{AP_s}{RT^2} - \frac{BP_s}{RT} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{dP_s}{P_s} = \left(\frac{A}{RT^2} - \frac{B}{RT} \right) dT$$

L'intégration débouche sur la formule de Dupré :

$$\ln(P_s(T)) = \frac{\alpha}{T} + \beta \ln T + \gamma \quad \text{avec} \quad \alpha = -A/R, \beta = -B/R$$

En pratique, on travaille sur une gamme de température suffisamment restreinte pour pouvoir négliger les variations de L :

$$L \approx \text{constante} = A$$

Ceci conduit à une loi de "Dupré" simplifiée :

$$\ln(P_s(T)) = \frac{\alpha}{T} + \gamma \quad \text{avec} \quad \alpha = -A/R = -L/R$$

II Préparation de l'expérience

II.1) Matériel

Certains instruments sont soigneusement rangés, si vous ne les trouvez pas sur les tables, il faut demander à l'enseignant. Les différents objets dont vous aurez besoin sont les suivants :

- Agitateur magnétique chauffant
- Erlenmeyer
- Bouchon à trois trous, avec système de blocage du bouchon
- Soupape
- Tuyau de raccordement pour la transmission de pression vers le capteur (la partie rigide doit tremper dans l'eau après la mise en place, le tuyau doit être entièrement rempli de liquide, aucune bulle d'air ne doit être piégée, voir avec l'enseignant pour la procédure permettant d'obtenir ce résultat),
- Thermistance type germanium
- Thermomètre à thermocouple (pour l'étalonnage de la thermistance)
- Tube de graisse à vide
- Capteur de pression absolue Keller
- Alimentation du capteur de pression
- 2 multimètres pour la mesure de P et T

II.2) Etalonnage préliminaire

La mesure de la température se fait grâce à une résistance semi-conductrice. Pour être sûr de la bonne thermalisation de la résistance, on s'arrange pour qu'elle trempe dans le liquide. Les caractéristiques de ces composants peuvent légèrement varier de l'un à l'autre, aussi il est bon de faire un étalonnage préliminaire. Pour cela, on dispose d'un thermomètre à thermocouple. L'étalonnage doit être fait sur toute la gamme [20°C, 100°C], il se fait de la façon suivante : on remplit un petit bécher d'eau, que l'on place sur la plaque chauffante. On place la résistance semi-conductrice et la soudure du thermocouple dans l'eau, de telle sorte qu'elles soient bien au milieu du liquide et qu'il n'y est pas de contact avec les parois du bécher. Il ne reste plus qu'à chauffer, sans oublier l'agitateur magnétique, et à mesurer à

intervalle régulier simultanément la température donnée par le thermocouple et la résistance mesurée.

Les résistances semi-conductrice suivent des lois du type :

$$R = R_0 \exp(E_G/2k_B T)$$

où E_G est la largeur de bande interdite du semi-conducteur utilisé. Une fois les points d'étalonnage expérimentaux obtenus, il faut déterminer les paramètres optimum R_0 et E_G , qui serviront ensuite à déterminer la température.

II.3) Mise en place de l'expérience

La mise en place de l'expérience doit se faire avec l'enseignant,

Mettre environ 200 ml d'eau dans l'erlenmeyer, ajouter l'agitateur magnétique. Fermer l'Erlenmeyer avec le bouchon à deux trous, le bouchon doit être soigneusement graissé pour éviter les fuites d'air. Placer l'Erlenmeyer dans le dispositif de blocage du bouchon. Mettre en place la soupape après et la thermistance après avoir soigneusement graissé les différents points de jonction (attention, ce sont des objets fragiles, il faut forcer un peu pour les mettre en place, cette opération doit se faire sans forcer sur le collage noir entre le tuyau interne et le tuyau externe). La thermistance doit plonger dans l'eau sans toucher les parois de verre. Placer l'ensemble sur l'agitateur magnétique chauffant. Raccorder le tuyau de transmission de pression au capteur, en faisant en sorte de ne pas piéger de bulle d'air.

Mettre en route le chauffage, utiliser la puissance maximale ($\approx 400^\circ\text{C}$). On rappelle que la plaque chauffante et les différents éléments métallique sont très chauds et qu'il ne faut en aucun cas les toucher. Lorsqu'on atteint l'ébullition, arrêter le chauffage, l'inertie thermique de la plaque suffit pour vaporiser suffisamment d'eau et purger l'air résiduel. Si la pression monte trop, il faut desserrer la soupape pour éviter une surpression trop forte dans l'erlenmeyer. Dans le cas inverse, c'est-à-dire si la soupape s'ouvre trop facilement, il peut être bon de resserrer la soupape. L'idéal est de réussir à tarer la soupape pour une pression d'environ 1.25 bar.

Lorsque la pression et la température commencent à redescendre, on peut resserrer un peu la soupape pour avoir une meilleure étanchéité. Il ne reste alors plus qu'à mesurer à intervalles réguliers la température T et la pression, qui doit s'identifier à $P_s(T)$.

II.4) Analyse des données

Avec le logiciel que vous préférez, tracez la courbe $P_s(T)$. Quelle courbe serait-il judicieux de tracer pour déterminer le coefficient α ? Déduire de α la chaleur latente de vaporisation L dans la gamme de températures explorée. D'après les tables, $L(100^\circ\text{C}) = 2258 \text{ J.g}^{-1}$, cela correspond-il à ce que vous avez trouvé? Est-ce une bonne méthode pour déterminer L ?

Etude d'une pompe à chaleur

I Principe de la pompe à chaleur :

I.1) Généralités

Le principe de la pompe à chaleur est identique à celui du réfrigérateur à compresseur, la différence réside dans la façon de l'employer. Pour un réfrigérateur, le but est de refroidir l'intérieur de l'armoire frigorifique. Ceci a pour contre-coup de chauffer la cuisine, la chaleur prise à l'intérieur de l'armoire étant rejetée à l'extérieur, c'est-à-dire dans la cuisine. Cette puissance de chauffage étant très faible, elle ne se remarque pas. Dans le cas de la pompe à chaleur, on exploite ce contre-coup : on refroidit une réserve de calories "inutile" (sous-sol du jardin ou nappe phréatique), et le but est de rejeter la chaleur ainsi récupérée dans une habitation pour la chauffer. Il faut remarquer que pour avoir un chauffage significatif contrairement à celui observé dans les cuisines du fait des réfrigérateurs, il faut recourir à des machines beaucoup plus grosses.

La pompe à chaleur peut apparaître comme une solution économe pour se chauffer, mais, il faut garder à l'esprit qu'elle présente des limites : elle présente une inertie importante (temps d'attente long entre la mise en route et le début du chauffage effectif), son efficacité chute si la température de la réserve calorifique baisse et un réservoir calorifique tel que le sol du jardin risque d'être insuffisant pour les régions froides et les maisons mal isolées thermiquement. En dépit de quelques contre-exemple (maison de la radio), c'est une technique pas du tout adaptée pour des bâtiments de grande taille tels que des immeubles.

I.2) Principe de fonctionnement

Les pompes à chaleur fonctionnent en général sur le même principe que les réfrigérateurs, c'est-à-dire selon un cycle de Rankine.

Le cycle peut se décomposer en 4 phases :

Etat initial : le fluide est à l'état gazeux à la température de la source la plus froide. Sa pression est faible.

Phase 1 : le fluide est comprimé. Dans le cas idéal, on suppose cette compression adiabatique réversible. A l'issue de la compression, le fluide est toujours gazeux et très chaud, sa température est supérieure à celle de la source la plus chaude. La pression est élevée.

Phase 2 : c'est une phase isobare à pression élevée. Au contact de la source la plus chaude, le fluide va d'abord se refroidir, puis se condenser lorsque la température passe au-dessous de la température de condensation correspondant à la pression dans cette zone du circuit.

Phase 3 : le liquide subit une détente de Joule-Thomson. A la sortie du détendeur, la pression a chuté à la valeur de la zone basse pression du circuit, une partie du fluide s'est évaporé et il y a coexistence de liquide et de gaz. La pression étant faible, cette coexistence signifie une température basse, inférieure à celle du liquide avant la détente. L'énergie thermique du fluide avant la détente a été absorbée par l'évaporation d'une partie du liquide, ce qui a permis le refroidissement du fluide.

Phase 4 : le fluide achève son évaporation dans l'évaporateur (c'est-à-dire l'échangeur du seau froid = la source froide). Ce processus absorbe de la chaleur et refroidit l'eau du seau. A

l'issue de cette phase, tout le fluide est revenu à l'état gazeux. Le cycle est bouclé, on repart au début de la phase 1, le gaz est prêt à être réinjecté dans le compresseur.

I.3) Rendement théorique d'une pompe à chaleur

A préparer et à rendre au début de la séance de TP.

La thermodynamique permet de calculer une efficacité maximum pour une pompe à chaleur. Entre la réalisation pratique du cycle et le modèle idéal théorique utilisé dans le cadre de la thermodynamique, il y a des différences importantes : frottements non pris en compte, transformation adiabatique qui ne l'est pas vraiment, échanges de chaleur non parfaits au niveau des échangeurs, transformation isotherme (resp. isobare) non parfaitement isotherme (resp. isobare), etc... Il en résulte que l'efficacité réelle est souvent assez éloignée de l'efficacité thermodynamique théorique. Mais, cette efficacité théorique reste une référence importante, elle permet de se faire une idée des possibilités d'un cycle, de la qualité de la machine créée et elle peut donner des pistes quant à la stratégie à adopter pour améliorer la machine. Le but est ici de déterminer ce rendement idéal.

Pour le calcul qui suit, on supposera donc que les différentes phases du cycle sont décrites de manière idéale. En outre, on se place dans le cadre du cycle de Carnot : les 2 phases avec échange de chaleur avec l'extérieur c'est-à-dire avec la source chaude et la source froide, seront assimilées à des phases isothermes réversibles, et les 2 autres phases seront considérées comme adiabatiques réversibles.

Etapes du calcul :

I.3.1) En approximant le cycle de la pompe à chaleur décrit en I.2 à un cycle de Carnot, quelles seront les phases isothermes réversibles?

I.3.2) On note Q_i la chaleur échangée durant la phase i et W_{ext} le travail échangé avec l'extérieur durant un cycle. Exprimer la variation totale d'énergie interne ΔU_{cycle} durant un cycle en fonction de W_{ext} , Q_2 et Q_4 .

I.3.3) Exprimer la variation totale d'entropie ΔS_{cycle} en fonction de Q_2 , T_2 , Q_4 et T_4 . Que représentent T_2 et T_4 ?

I.3.4) Justifier le fait que $\Delta U_{\text{cycle}} = 0$ et $\Delta S_{\text{cycle}} = 0$. En déduire Q_2 en fonction de W_{ext} , T_2 et T_4 .

I.3.5) Définir l'efficacité η de la pompe à chaleur, puis montrer qu'elle vaut : $\eta = \frac{T_n}{T_2 - T_4}$

Remarques :

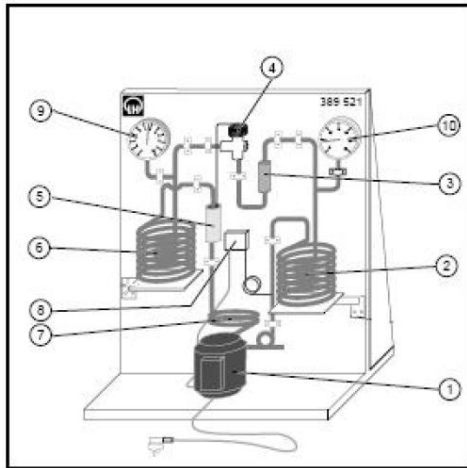
- pour mettre un peu de suspense, on a laissé planer une incertitude sur T_n qui peut être T_2 ou T_4 (en fait, la valeur de T_n dépend du but : refroidir ou chauffer. On regardera les 2 cas). Mais, on pourra noter que si on n'oublie pas de mettre la température en Kelvin, cela a assez peu d'incidence sur l'efficacité pratique de la pompe à chaleur.

- les vrais spécialistes emploient le terme COP au lieu d'efficacité, COP voulant dire "COefficient de Performance".

I.3) Matériel

On dispose d'un certain nombre d'éléments :

- Groupe pompe à chaleur avec compresseur, circuit de fluide rempli de R134A, manomètres pour contrôler la pression dans les 2 parties isobares du circuit et sécurités.
- 2 seaux : ces seaux plein d'eau serviront de sources froide et chaude.



- 1 Compresseur 230 V; 50/60 Hz.
- 2 Condenseur, diamètre intérieur d'env. 13 cm
- 3 Collecteur/épurateur
- 4 Vanne de détente à régulation thermostatique
- 5 Sonde de température de la vanne de détente, isolée thermiquement
- 6 Evaporateur, diamètre intérieur d'env. 13 cm
- 7 Tuyau en serpentin comme liaison élastique entre le compresseur et l'échangeur thermique
- 8 Manostat
- 9 Manomètre dans la partie basse pression; échelle intérieure pour la mesure de la pression de -1 à +10 bars, échelle extérieure avec température des points de rosée pour R134a de -60 °C à +40 °C.
- 10 Manomètre dans la partie haute pression; échelle intérieure: pression de -1 à +30 bars, échelle extérieure avec température des points de rosée pour R 134a de -60 °C à + 85°C.

- Balance pour déterminer la quantité d'eau dans les seaux
- 2 thermomètres pour contrôler la température de l'eau dans les 2 seaux.
- Agitateur pour s'assurer de l'homogénéité de la température de l'eau dans les seaux.
- Wattmètre pour mesurer la consommation électrique du compresseur
- Chronomètre
- Ordinateur pour traiter les données.

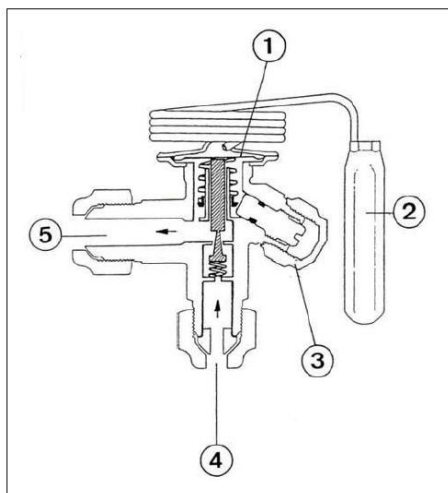
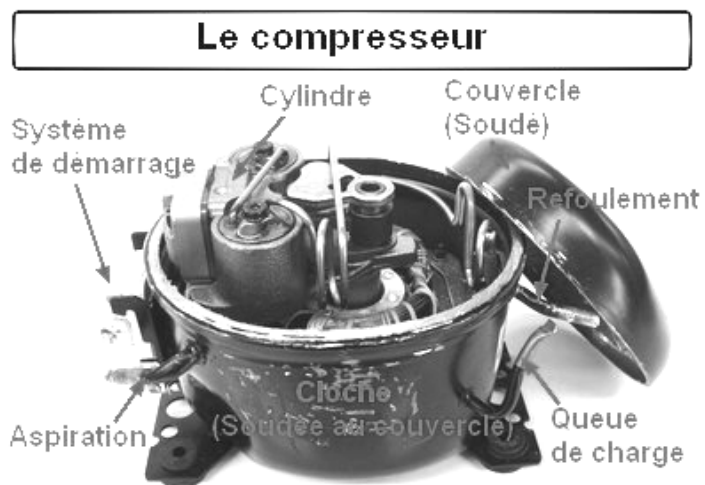


Fig. 1: Cross sectional drawing of the expansion valve schematically. Shaded: control cone of the injection valve. Flow direction of the coolant marked by arrows.
 (1) membrane
 (2) temperature probe: gas-filled metal capsule which is clamped on the outlet of the evaporator,
 (3) adjustment screw
 (4) inlet port
 (5) outlet port



(c) Tout-electromenager.fr

II Travail à faire

II.1) Travail préliminaire :

- localiser sur le montage les différentes zones qui correspondent aux différentes phases du cycle. Etudier les différentes graduations des manomètres. A quoi correspondent-elles?
- Remplir les seaux d'eau avec environ 4.5 litres, peser soigneusement la quantité d'eau de chaque seau (ne pas oublier de faire la tare lorsque le seau est vide).
- Mettre en place les seaux de telle sorte que les échangeurs tubulaires (repère 2 et 6 sur la figure) soient entièrement immergés.
- Mettre en place les agitateurs et les activer. Vérifier le brassage de l'eau dans les seaux. Attention, le régime permanent n'est atteint qu'après une dizaine de seconde. Choisir une vitesse raisonnable, permette un bon brassage de l'eau sans générer un tourbillon excessif.
- Placer les thermomètres dans les seaux d'eau sans gêner le fonctionnement des agitateurs.
- Noter soigneusement la température dans les 2 seaux et la pression des 2 côtés du circuit avant le démarrage.
- Mettre sous tension le compresseur, il démarre immédiatement : cela suffit pour activer la pompe à chaleur, la circulation du fluide est induite par la différence de pression entre l'amont et l'aval du compresseur. Déclencher le chronomètre dès que le compresseur démarre.

II.2) Mesures :

- Noter les paramètres toutes les minutes jusqu'à l'arrêt du compresseur. Les 5 paramètres à noter à chaque série de mesures sont : la température des 2 sources (2 températures à noter), - la pression dans les 2 zones isobares du circuit (2 pressions à noter) et la puissance consommée par le compresseur.
- Arrêter la pompe à chaleur lorsque la température atteint une valeur de l'ordre de 1°C.
- Après l'arrêt du compresseur, ne pas arrêter les agitateurs et mesurer de temps en temps la température des sources : le but est de se faire une idée des pertes thermiques.
- Au bout d'une quarantaine de minutes, on peut tout arrêter.

II.3) Analyse des données :

- D'après la pression et la température mesurées dans chacun des seaux, et d'après les manomètres, quel doit être le fluide utilisé dans cette pompe à chaleur?
- Tracer l'évolution $T(t)$ pour chacune des sources.
- Déterminer les puissances moyennes de chauffage et de refroidissement pour chaque seaux (voir annexe VII).
- En déduire 2 efficacités expérimentales instantanées $\eta_i(t)$: celle de la machine considérée comme une pompe à chaleur et celle de la machine considérée comme un réfrigérateur. Tracer η_i en fonction de l'écart de température entre les 2 sources.
- Laquelle des deux efficacités est la plus forte? Quelle différence devrait-on avoir entre ces deux efficacités? Est-ce le cas? Comment peut-on expliquer cette différence?
- Comment évolue l'efficacité lors ΔT augmente? Commenter.

II.4) Comparaison avec un fonctionnement idéal :

- Tracer le cycle sur le diagramme de Mollier au début des mesures et à la fin.

- En déduire l'efficacité que l'on pourrait attendre de cette pompe à chaleur.
- Comparer à l'efficacité réelle obtenue. Comment expliquer la différence?

II.5) Travail annexe à faire en parallèle si on se sent capable d'être suffisamment efficace :

- Placer dans le freezer du réfrigérateur une masse connue d'eau à température ambiante, avec une sonde de température type thermistance à l'intérieur.
- Mesurer la température de cette eau en fonction du temps. En déduire une évaluation du COP de cette machine domestique.

Annexe I : RAPPELS DE MECANIQUE DU SOLIDE

Vitesse de rotation d'un solide : c'est la vitesse avec laquelle il tourne sur lui-même. De façon plus précise, on définit le vecteur rotation $\vec{\omega}$ grâce à la relation suivante :

$$\vec{V}_A = \vec{V}_B + \vec{\omega} \wedge \vec{AB}$$

où A et B sont 2 points du solide, et \vec{V}_A et \vec{V}_B leur vitesse. Dans le cas d'un arbre en rotation, les point du centre de l'axe sont fixes. Si on choisit un point O sur l'axe de rotation, la relation précédente se réduit à :

$$\vec{V}_M = \vec{\omega} \wedge \vec{OM}$$

A l'aide de cette relation, on peut vérifier qu'on retrouve la vitesse instantanée d'un point situé à la distance r de l'axe de rotation :

$$\vec{V} = \omega r \vec{u}_\theta \quad (\text{dans ce cas, } \omega \text{ doit s'exprimer en rad.s}^{-1})$$

La vitesse de rotation $\omega = \|\vec{\omega}\|$ correspond au nombre de tours effectués par le solide durant une unité de temps, elle peut s'exprimer en tr.min⁻¹, tr.s⁻¹ ou encore en rad.s⁻¹. Pour les calculs de travaux (voir plus loin), la bonne unité est le rad.s⁻¹.

Conversion : 1 tr.s⁻¹ = 2π rad.s⁻¹

Moment d'une force : par définition, le moment d'une force \vec{F} par rapport à un point O est :

$$\vec{M}_O = \vec{OM} \wedge \vec{F} \quad \text{où M est le point d'application de la force } \vec{F}$$

Un moment de force s'exprime en N.m.

Notion de couple : De manière générale, en physique, on appelle **couple** tout système d'actions mécaniques (forces et moments) pour lequel la résultante totale des forces est nulle, mais dont le moment total résultant par rapport à un point O arbitrairement choisi est **non nul**. On montre facilement que ce moment total est alors indépendant du point O. On emploie souvent le terme "couple" pour désigner le moment total résultant.

En mécanique, l'exemple typique de **couple** est l'effort en rotation appliqué à un axe. Dans le cas d'un effort transmis à l'aide d'un arbre de transmission (c'est le cas du moteur), il n'y a pas une force localisée en un point précis, mais une distribution de force sur toute la section de l'arbre de transmission. Si l'on fait la sommation de toute les forces s'exerçant sur une section d'arbre, du fait de la symétrie, le total est nul. Le centre de gravité de l'arbre moteur ne bouge pas. Mais, cela ne veut pas dire que l'arbre moteur reste immobile, il est aussi soumis au couple, qui tend à le faire tourner sur lui-même.

Remarque importante : Lorsque la somme des forces s'exerçant sur un objet est nulle, il en résulte que le moment total devient indépendant du point par rapport auquel on le calcul. Le moment total exercé via l'arbre de transmission s'obtient en intégrant tous les moments des forces s'exerçant au niveau d'une section de l'arbre de transmission. Le résultat intégré s'identifie au couple, il a la même dimension qu'un moment de force et s'exprime donc en N.m.

Equilibre : à l'équilibre, la somme des forces doit être nulle, mais, ce n'est pas suffisant, une deuxième somme doit aussi être nulle : celle des moments et des couples.

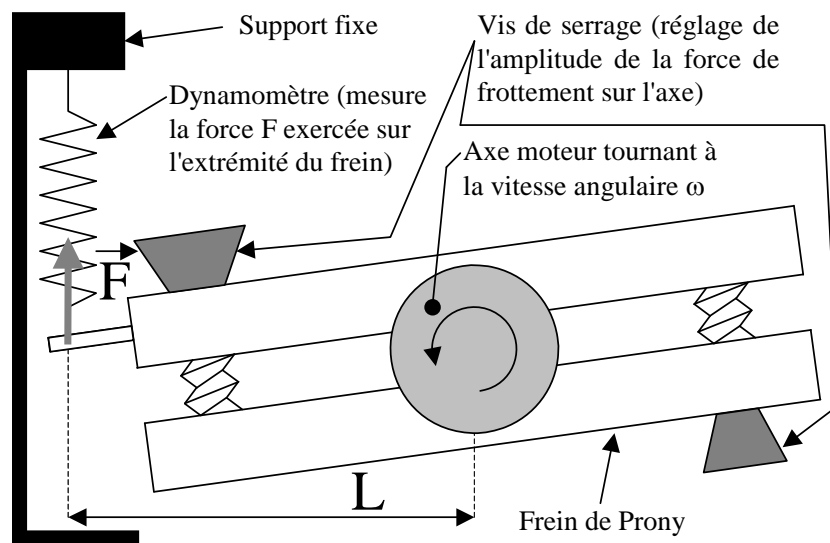
Travail d'un couple ou d'un moment $\vec{\Gamma}$: lorsqu'on a la vitesse de rotation, on accède directement à la puissance P (pour obtenir le travail, il suffit d'intégrer sur la durée considérée) :

$$P = \vec{\omega} \cdot \vec{\Gamma}$$

Si $\vec{\omega}$ et $\vec{\Gamma}$ sont colinéaires, cette formule devient : $P = \omega \cdot \Gamma$

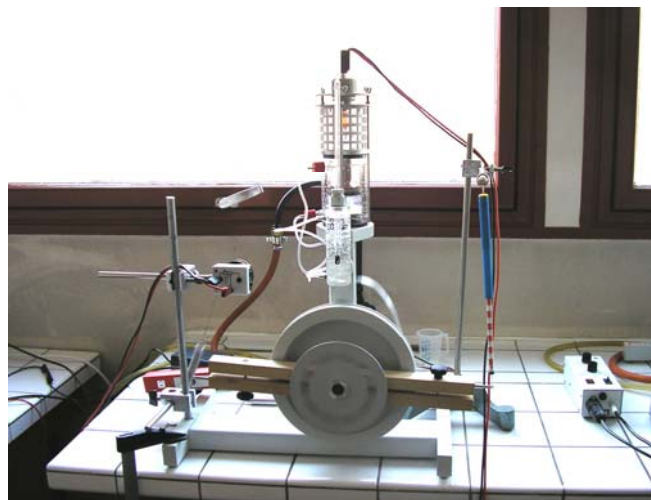
☠ Attention, il ne faut pas oublier de mettre ω en rad.s^{-1} .

Mise en place du frein de Prony : le frein de Prony exerce un couple sur l'arbre de sortie du moteur. Ce couple peut être adapté en serrant plus ou moins les deux branches du frein sur l'arbre.



En régime permanent, le frein de Prony adopte une position stable d'équilibre. Il est soumis au couple de l'arbre moteur et au moment du dynamomètre. Ce dernier se mesure sans problème, la condition d'équilibre permet alors de déterminer le couple exercé par l'arbre moteur. D'après le principe d'action et de réaction, on en déduit le couple exercé Γ par le frein sur l'axe de l'arbre.

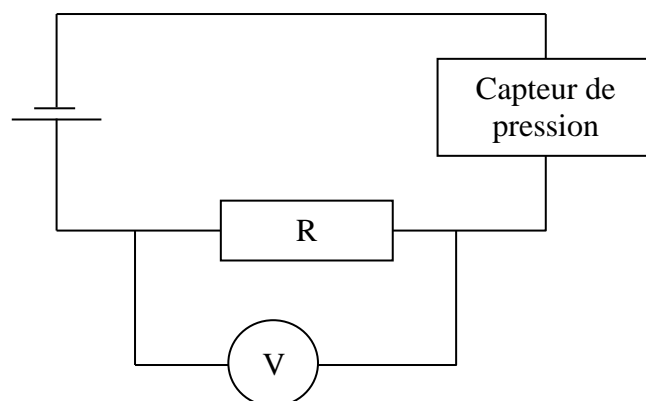
$$\Gamma = F.L$$



Moteur de Stirling en fonctionnement avec le frein de Prony.

Annexe II : fonctionnement des capteurs de pression Keller

Le montage électrique de ces capteurs de pression est le suivant :



C'est un montage classique et très tolérant. La tension appliquée doit être comprise entre 8 V et 28 V (ici, l'alimentation utilisée délivre une tension de 15V). La pression est récupérée grâce à l'intensité qui circule dans le circuit. L'électronique située dans le capteur délivre un courant allant de 4 à 20 mA. Un courant de $I_0 = 4$ mA correspond à la pression minimale (0 si capteur de pression absolue, 1 atm si capteur de pression relatif), tandis qu'un courant de $I_1 = 20$ mA correspond à la pression maximale P_1 du capteur. Dans ce montage, le courant est déduit de la tension aux bornes de la résistance R montée en série, et la pression est obtenue grâce à une interpolation linéaire :

$$P = P_0 + \frac{I - I_0}{I_1 - I_0} (P_1 - P_0)$$

Les capteurs 4-20mA sont très classiques, c'est un montage très utilisé dans la pratique. L'intérêt est la communication entre le capteur et l'interface utilisateur avec seulement 2 fils. La raison du choix de 4 mA au lieu de 0 mA est la suivante : dans la pratique, les montages peuvent être complexes, lointains et soumis à des conditions difficiles. Tout cela génère des accidents : coupure d'un fil de transmission ou court-circuit. Ce genre d'accident sera immédiatement détecté par la chute du courant à zéro et permet de réagir de manière appropriée.

En pratique, les capteurs vieillissent et l'offset de 4 mA peut fluctuer avec le temps : il faut vérifier cet offset. Par contre, la variation de courant ΔI entre P_0 et P_1 semble ne pas varier.

Annexe III : fonctionnement du logiciel "Kaleidagraph"

Problème : on dispose de n couples de points (x_i, y_i) et on voudrait tracer $y(x)$.

Entrée des données : de façon très intuitive, elles se rentrent en colonne de la façon suivante :

A ou 0	B ou 1
x ₁	y ₁
x ₂	y ₂
x ₃	y ₃
x ₄	y ₄
x ₅	y ₅
...	...

Création d'une nouvelle colonne : sélectionner "Append Column" dans le menu "Data"

Remplissage d'une nouvelle colonne à partir des précédentes par une relation mathématique : faire apparaître la fenêtre "Formula entry" en cliquant sur "Formula entry" dans le menu "Windows". Les colonnes sont numérotées de 0 à n, la colonne n a pour nom c_n (exemple : c₀ pour la colonne 0, c₁ pour la colonne 1, ...). Les affectations dans la colonne n se font en écrivant $c_n = f(c_0, c_1)$ dans la fenêtre "Formula Entry", où f est explicitée. Exemple :

$$c_2 = 4 * c_1 + \exp(c_0)$$

L'affectation devient effective en cliquant sur "Run" dans la fenêtre "Formula Entry".

Création d'une courbe à partir des données : sélectionner "Gallery" dans le menu, puis "Linear" dans la fenêtre qui apparaît, puis "Scatter" dans la deuxième fenêtre qui apparaît. Une nouvelle fenêtre s'ouvre, qui permet de choisir quelle colonne correspond aux valeurs de x et quelle(s) colonnes correspond(ent) aux valeurs de y. On peut choisir plusieurs colonnes pour y. Cliquer sur "OK" pour valider le choix, la courbe s'affiche.

Modification des échelles : faire un double-clic sur l'échelle que l'on veut modifier, une fenêtre de dialogue apparaît alors, avec laquelle il est possible de définir toutes les caractéristiques de l'échelle.

Titres : faire un double-clic sur le titre que l'on veut modifier, une fenêtre de dialogue apparaît alors, avec laquelle on peut rédiger le titre comme on le désire. Il est possible de mettre des lettres en exposant en sélectionnant ces lettres avec la souris, puis en cliquant sur "Style" et en sélectionnant "Superscript".

Mise à jour de la courbe après modification des données : sélectionner "Update Plot" dans le menu "Plot"

Régression linéaire : sélectionner "Linear" dans le menu "Curve fit". Cocher la case correspondant aux données voulues dans la fenêtre qui apparaît, et valider en cliquant sur "OK".

Comment faire apparaître l'équation de la courbe de régression sur le graphe : Sélectionner "Display Equation" dans le menu "Plot".

Comment faire pour que la droite de régression linéaire s'étale sur toute l'échelle du graphe : sélectionner "Curve Fit Options" dans le menu "Format". Cocher "Extrapolate Fit to Axis Limits" dans la fenêtre qui s'ouvre, puis valider en cliquant sur "OK" toujours dans cette fenêtre.

Comment importer une série de points via un fichier (.txt, .csv ou .dat) dans lequel les données ont été rangées en colonnes :

Dans le menu "File", sélectionner "Open". Dans la fenêtre de dialogue qui s'ouvre, sélectionner "Any file" comme type de fichiers. Naviguer dans l'arborescence pour avoir le fichier voulu, puis le sélectionner par un double-clic. Il s'ouvre alors une nouvelle fenêtre de dialogue nommée "Text File Input Format" : choisir "Tab" au niveau de l'option "Delimiter", puis cliquer sur "OK" pour valider le choix.

Annexe IV : fonctionnement du logiciel "Excel"

Problème : on dispose de n couples de points (x_i, y_i) et on voudrait tracer $y(x)$.

Entrée des données : de façon très intuitive, elles se rentrent en colonne de la façon suivante :

A ou 0	B ou 1
x ₁	y ₁
x ₂	y ₂
x ₃	y ₃
x ₄	y ₄
x ₅	y ₅
...	...

Remplissage d'une nouvelle colonne à partir des précédentes par une relation mathématique : taper dans la 1^o case "=\$nomcolonnenuméroligneopération". Exemple : pour déduire la colonne D de la colonne B à partir de la ligne n°6, il faut taper dans la case D6 : "=log(\$B6)".

Pour que toute la colonne subisse le même traitement, il faut sélectionner la première case par un clic de souris, puis venir se placer dans le coin inférieur droit avec la souris (le pointeur se change alors en croix), et sélectionner toutes les cases que l'on veut voir se transformer. le numéro de ligne est automatiquement incrémenté lors de cette manipulation

Création d'une courbe à partir des données : sélectionner avec la souris les deux parties des colonnes de données contenant les valeurs de (x, y) . Sélectionner "graphiques" dans le menu "Insertion". Sélectionner "Nuages de points" dans la fenêtre qui s'ouvre (attention, ne pas sélectionner "Courbes", cette option **ne** trace **pas** $y(x)$). Cliquer sur "Suivant", puis sur "terminer" après avoir sélectionné les bonnes options dans les fenêtres successives.

Modification des échelles : faire un double-clic sur l'échelle que l'on veut modifier, une fenêtre intitulée "Format de l'axe" apparaît alors. Sélectionner l'onglet "Echelle", qui permet de modifier les paramètres de l'axe sélectionné (borne, échelle linéaire ou log...).

Titres : si ils n'ont pas été entrés au moment de la fabrication du graphique, on peut le faire grâce à un clic droit dans la fenêtre graphique ou via le menu principal "Graphique". Il faut alors sélectionner "Options du graphique" dans la fenêtre qui apparaît, puis l'onglet "Titres" dans la fenêtre "Options du graphique". Il ne reste plus qu'à entrer les titres dans les cases adéquates.

Mettre un quadrillage : On utilise de nouveau la fenêtre "Options du graphique", il suffit de sélectionner l'onglet "Quadrillage" et de cocher les bonnes cases.

Mise à jour de la courbe après modification des données : la mise à jour des données se fait automatiquement.

Régression linéaire : "Excel" n'ayant probablement pas été traduit par un scientifique, il possède une terminologie très particulière. Ainsi, les droites de régression linéaire deviennent des "courbes de tendance". Sélectionner d'abord le graphique à modifier en cliquant dedans. Ensuite, dans le menu principal "Graphique", sélectionner "Ajouter une courbe de tendance...". Une fenêtre intitulée "Insertion d'une courbe de tendance" apparaît. Sélectionner le type de régression désirée, puis valider en cliquant sur "OK".

Comment faire apparaître l'équation de la courbe de régression sur le graphe : double-cliquer sur la courbe de régression, une fenêtre intitulée "Format de courbe de tendance" doit apparaître. Sélectionner l'onglet "Options" dans cette fenêtre et cocher la case "Afficher l'équation sur le graphique".

Rajouter ou retirer des données : on rajoute les données dans le tableau principal au-dessous des données déjà mise, puis il faut sélectionner l'option "Données source" dans le menu principal "Graphique". Une fenêtre "Données source" s'ouvre alors, qui permet de modifier la zone prise en compte pour le tracé de la courbe.

Imprimer uniquement le graphique en pleine page : sélectionner la zone du graphique en cliquant dedans, puis cliquer sur l'icône d'impression ou sur la commande "Imprimer" du menu principal "Fichier" (on peut vérifier ce qui sera imprimé grâce à la commande "Aperçu avant impression").

Comment importer une série de points via un fichier (.txt, .csv ou .dat) dans lequel les données ont été rangées en colonnes : dans le menu "Fichier", sélectionner "ouvrir". Une nouvelle fenêtre intitulé "Ouvrir" apparaît. Dans "Type de fichiers" en bas de la fenêtre, sélectionner l'option "Fichiers texte (*.prn; *.txt, *.csv)". Naviguer dans les répertoires pour atteindre le bon fichier, puis cliquer sur "Ouvrir". la fenêtre "Ouvrir" est remplacée par une nouvelle fenêtre. Pour l'étape 1 sur 3, sélectionner "Délimité", puis cliquer sur suivant. Pour l'étape 2 sur 3, sélectionner "tabulation", les autres ne sont pas cochées, puis cliquer sur suivant. Dans l'étape 3 sur 3, "Standard" doit être sélectionnée, puis cliquer sur "Finir". Les données doivent alors apparaître bien rangée dans les cases adéquates.

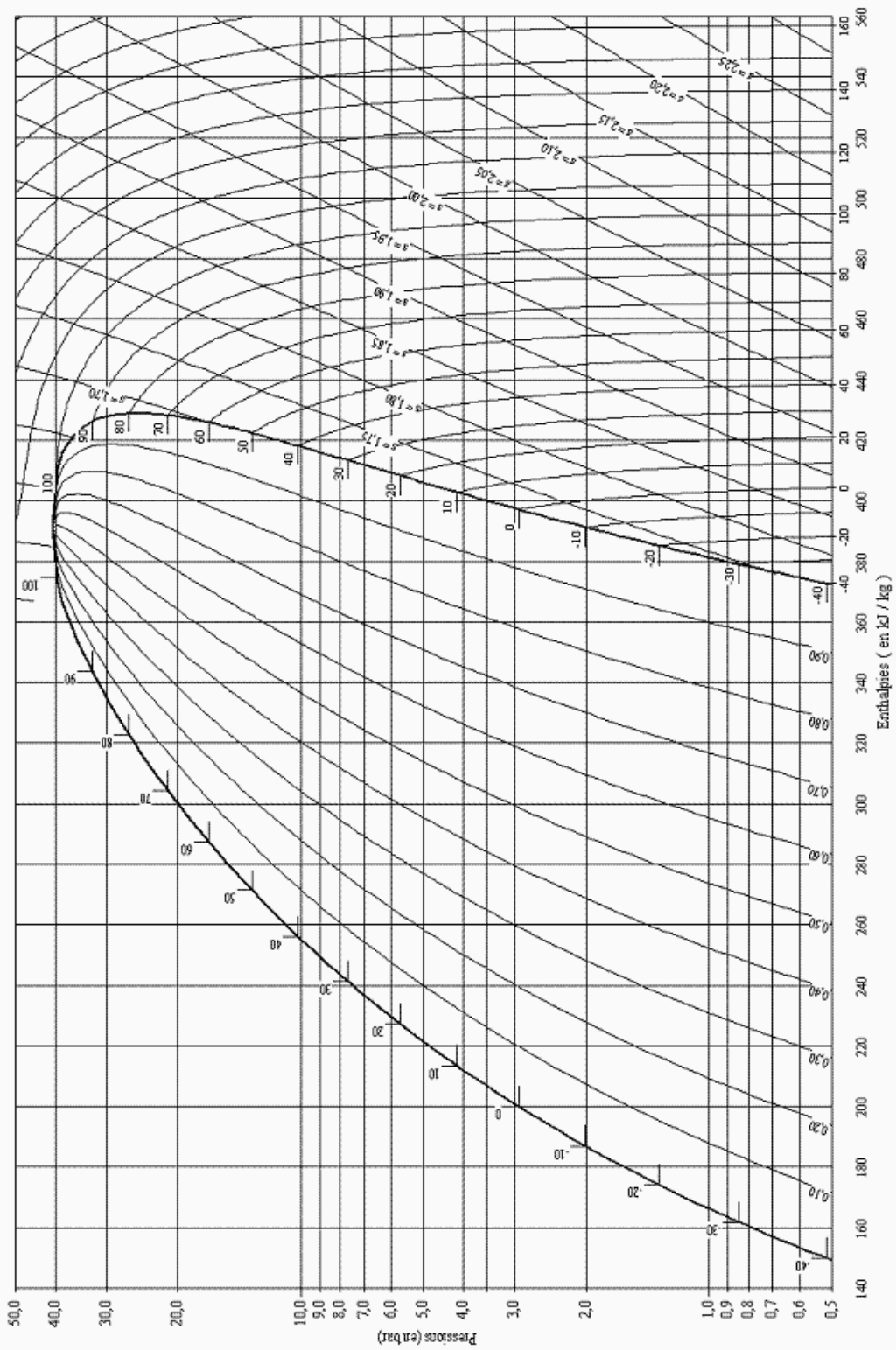
Annexe V : récupération des données provenant de l'oscilloscope

Démarrage des ordinateurs : le mot de passe est "Itpe"

Cela se fait grâce au programme "OpenChoice Desktop" :

- Lancer ce programme en double-cliquant sur son icône.
- Sélectionner l'onglet "Capture ecran"
- Sélectionner "Instrument" : une fenêtre s'ouvre, sélectionner "USB:0X0699:....:INSTR." dans cette fenêtre et cliquer sur "OK"
- Sélectionner ensuite l'onglet "Capture donnée signal"
- Sélectionner l'option "canaux" : une nouvelle fenêtre s'ouvre, cocher les canaux que l'on désire récupérer, puis cliquer sur "Afficher données". La récupération des données démarre, le transfert est un peu lent, il faut rester patient.
- Pour sauvegarder les données, sélectionner "Enregistrer sous". Plusieurs options sont proposées quant au format de sauvegarde. L'option qui semble la mieux comprise par Excel ou kaleidagraph est l'option ".TXT". Les données sont alors structurées en colonnes. Pour une ligne, le contenu de deux colonnes adjacentes est séparé par une tabulation (choisir : séparateur = TAB pour excel ou kaleidagraph).

Annexe VI : diagramme de Mollier du R134a



Annexe VII : procédure pour évaluer l'efficacité instantanée de la pompe à chaleur

Le but est d'avoir l'efficacité instantanée de la machine.

La puissance calorifique P_C reçue par le seau d'eau rouge se déduit de la température de l'eau :

$$P_C = m_C C_P \frac{dT_C}{dt}$$

où m_C est la masse d'eau dans le seau rouge, C_P la capacité calorifique massique de l'eau et T_C la température dans le seau rouge.

On peut évaluer de manière similaire la puissance calorifique P_F reçue par le seau bleu :

$$P_F = m_F C_P \frac{dT_F}{dt}$$

où m_F est la masse d'eau dans le seau rouge, C_P la capacité calorifique massique de l'eau et T_F la température dans le seau rouge. P_F est algébrique, et doit être <0 (c'est logique, T diminue pour un réfrigérateur).

Selon le point de vue, l'efficacité s'identifie à :

- Pompe à chaleur : $\eta = P_C/P_E$

- Réfrigérateur : $\eta = -P_F/P_E$

où P_E est la puissance électrique consommée.

Le problème est le suivant : on dispose d'une série de points $T_i(t_i)$, avec $i = 0, 1, \dots, n$ et il s'agit d'en déduire dT/dt . Ceci peut se faire numériquement, avec une précision raisonnable en utilisant 2 points consécutifs. On fait alors l'approximation suivante :

A l'instant $t = (t_{i+1} + t_i)/2$, on a sensiblement la température $T = (T_{i+1} + T_i)/2$ et la dérivée vaut :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i}$$