

MOTEUR STIRLING

But de ce TP

Découvert en 1816 par le pasteur et ingénieur Robert Stirling, ce moteur pourrait remplacer le traditionnel moteur à explosion, source de bruit et de pollution importants. Contrairement à ce dernier, le moteur Stirling utilise un fluide contenu dans une enceinte fermée, chauffée par une source de chaleur extérieure à l'enceinte. C'est donc un moteur à combustion externe, avec de nombreux avantages: combustion en continu, plus complète, pas de soupapes d'admission et d'échappement, donc moins de bruit, et possibilité (théorique) d'utiliser tout combustible solide, liquide, gazeux, solaire, nucléaire ! D'où des prototypes pour la production d'électricité, l'irrigation et le dessalement de l'eau.

Ce TP permet une étude approfondie du fonctionnement du moteur, en application des principes de la Thermodynamique : *premier principe, cycle thermodynamique, isochores et isothermes, rendement, conversion de chaleur.*

A/ PRINCIPE

I- Maquette

La maquette est constituée d'un piston moteur métallique et d'un piston de détente en verre, placés en V à 90°. Ce dernier assure aussi la régénération : il refroidit le courant de gaz chaud, accumule son énergie et la recède au gaz froid.

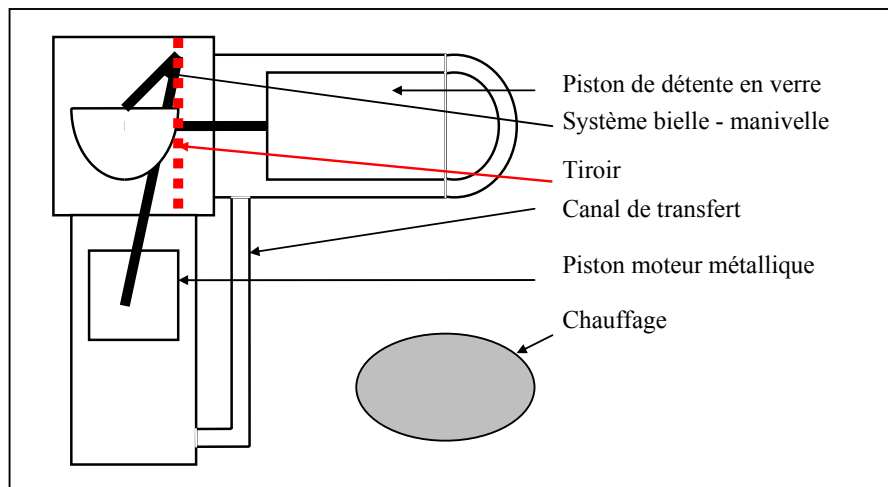


Figure 1: Dispositif du moteur Stirling

L'extrémité du cylindre de détente est chauffée par une lampe à alcool, alors que le cylindre moteur entraîne un volant d'inertie qui peut être couplé soit à un ensemble moteur-générateur, soit à un torsiomètre (mesure du couple mécanique). De plus, un ensemble de capteurs permet de mesurer le volume, la pression, les températures froide (au dixième de °C) et chaude et la vitesse de rotation.

II- Cycle thermodynamique

Le cycle thermodynamique théorique pour des transformations réversibles est le suivant:

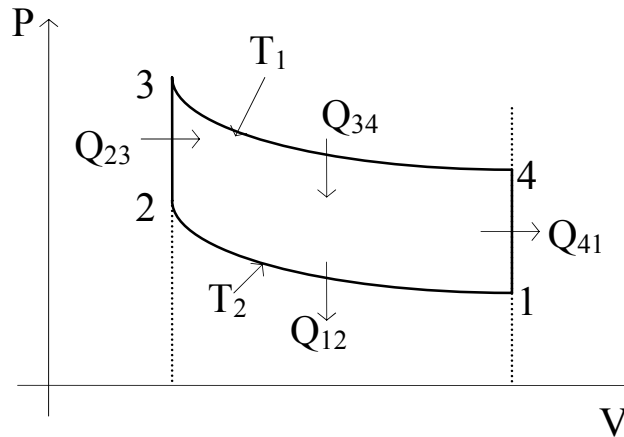


Figure 2: Cycle de Stirling

La chaleur Q_{12} produite par la compression est absorbée par la source froide T_2 . Q_{34} provenant de la source chaude T_1 permet la dilatation du gaz est donc un travail fourni vers l'extérieur. Les chaleur Q_{23} et Q_{41} n'absorbent ni ne produisent de travail de et à l'extérieur. Elles sont produites par les transformations à volume constant. La compression isotherme 1-2 absorbe le travail A_{12} . La dilatation isotherme 3-4 fournit le travail $A_{34} > A_{12}$. Au total, le cycle fournit donc un travail non nul vers l'extérieur. La grandeur de ce travail est donnée par la surface délimitée par le cycle.

Le cycle thermodynamique effectif en tenant compte du mouvement continu des pistons, de la circulation rapide du gaz de travail et des pertes thermique ressemblera plutôt à :

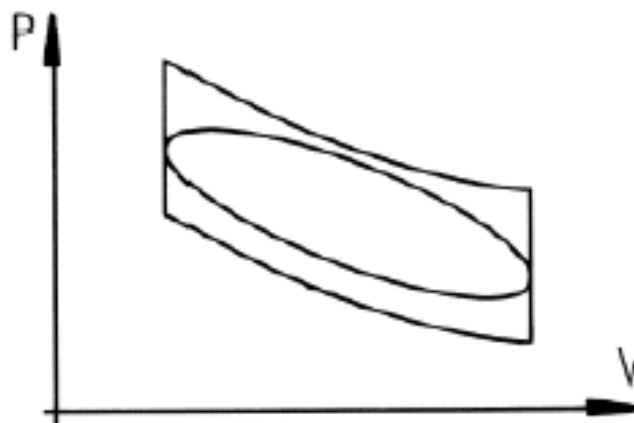


Figure 3: Cycle de Stirling effectif

III- Mode de fonctionnement du moteur

Dans les schémas suivants :

A= Piston de travail

V= piston de transfert

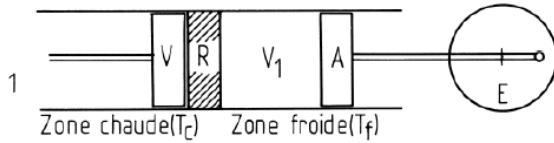
R : régénérateur : dispositif de grande surface permettant le passage du gaz et des échanges de chaleur entre eux. Par exemple un " bouchon " en paille du cuivre comme dans les 4 schémas ci-dessous.

E : pignon à excentriques reliant les pistons A et V à l'extérieur du moteur par systèmes bielle-manivelle. Seul la liaison avec A est indiquée.

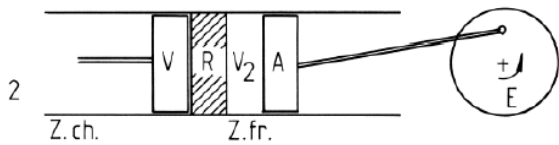
Zone froide : maintenue plus au moins à la température ambiante T_2 par des ailettes de refroidissement.

Zone chaude : en contact thermique avec la source de chaleur de température T_1 .

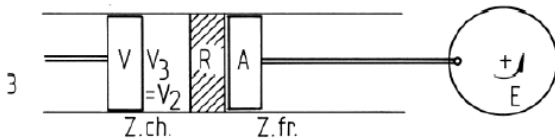
Chaque schéma indique la position des pistons aux points 1 à 4 de la figure 2.



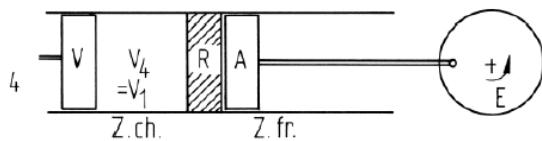
Le gaz occupe le volume maximum V_1 , il est à température T_2 et à la pression P_1 . En tournant, E déplace A en direction du régénérateur tout en maintenant V à sa place. Le gaz se comprime, P augmente mais la chaleur produite Q_{12} est éliminée par les ailettes de refroidissement et $T=T_2$



Le gaz occupe maintenant le volume $V_2 < V_1$, il est à pression P_2 et à T_2 . En tournant E déplace A et V de manière à maintenir constante V_2 , le volume occupé par le gaz. Le gaz est transféré dans la zone chaude, T_1 , en passant à travers le régénérateur. Ce faisant il absorbe la chaleur Q_{23} et sa pression s'élève pour atteindre $P_3 > P_2$.



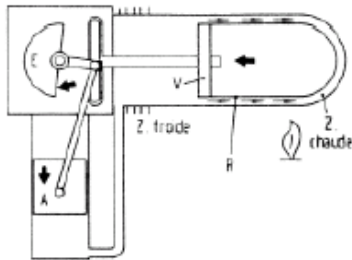
Le gaz occupe en ce point de cycle, le volume $V_3 = V_2$. Il est à pression P_3 et à la température T_1 . en contact avec la source chaude, il absorbe la chaleur Q_{34} et se détend à $T=T_2$ en repoussant le piston V ce qui imprime un mouvement de rotation à E. le volume à disposition du gaz augmente et la pression diminue pour atteindre respectivement $V_4 = V_1$ et $P_4 < P_3$.



Le gaz occupe le volume V_1 , il est à pression P_4 . les pistons ont les positions indiquées. En continuant de tourner, E déplace les pistons de manière à ce le gaz retourne, à volume constant dans la zone froide T_2 . dans ce retour à la position 1, la chaleur Q_{41} est libérée. Le rôle du régénérateur est d'absorber cette chaleur et de la restituer au gaz dans la phase 2 à 3. c'est grâce à cette astuce que le cycle théorique de Stirling peut atteindre celui de Carnot.

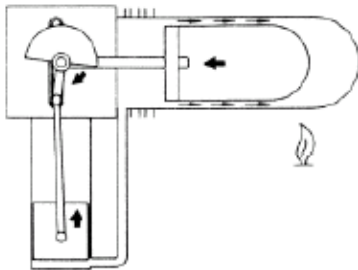
Le travail A_{34} étant plus grand que A_{12} et le travail étant nul sur les isochores, l'excentrique peut continuer de tourner et entamer le cycle suivant. Le moteur continuera de tourner à condition que T_1-T_2 soit suffisant pour que le travail net compense les pertes thermiques et les frottements.

La figure 4 représente les différentes étapes du cycle dans le cas de notre moteur. Il faut se rendre compte qu'on ne peut pas construire une machine à mouvement continu qui suive exactement le cycle théorique. Les quatre étapes effectives décrites ci-dessous sont donc des approximations des précédentes.



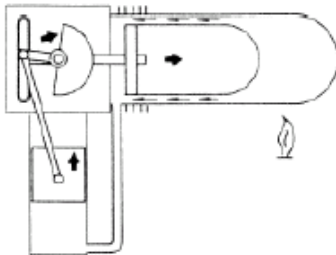
1- Sur la branche 1-2 du cycle

V ne se déplace que peu pendant que A descend. Le gaz est comprimé dans chambre froide. Absorption du travail A_{12}



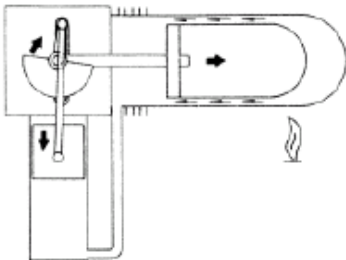
2- Sur la branche 2-3 du cycle

A ne se déplace que peu, V fait passer la gaz dans la chambre Chaude en le faisant récupérer tout au moins une partie de Q_{34} par son déplacement le long du récupérateur.



3- Sur la branche 3-4 du cycle

l'échauffement du gaz élève la pression ce qui provoque le mouvement de A vers le haut et produit le travail $A_{34} > A_{12}$.



4- Sur la branche 4-3 du cycle

le volume maximum a été atteint. A et V poussent le gaz dans la zone froide. Une partie de Q_{34} est absorbée dans R. Finalement la position 1 est à nouveau atteinte et le cycle recommence.

Figure 4: Les différentes étapes du cycle pour notre moteur.

Une première conclusion qu'on peut en tirer est que, pratiquement, le cycle thermodynamique de notre moteur aura les coins plus ou moins arrondis et donc un rendement plus faible que celui calculé sur le cycle idéal.

La centrale de mesure donne directement les températures et la vitesse, et transforme la pression et le volume en tensions récupérables sur la carte **National Instruments** avec fiches BNC.

IV- Calcul Thermodynamique du moteur

Le travail net du cycle de la figure 1 est donné par : $A = A_{34} - |A_{12}|$

Le rendement η est donné par le rapport : $\eta = \frac{A}{Q_{23} - Q_{34}}$

Sur la base du premier principe de la thermodynamique ($dQ = dU + pdV$) et en admettant que le gaz de travail est un gaz parfait ($pv = nRT$) : $R = cte$ des gaz parfaits $[T] = K$

$$A = RT_1 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) - RT_2 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right); \quad Q_{23} - Q_{34} = C_v(T_1 - T_2) + RT_1 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right);$$

Le régénérateur réinjecte : $Q_{41} = C_v(T_2 - T_1)$ d'où

$$Q_{23} - Q_{34} = RT_1 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

Comme $V_1 = V_4$ et $V_2 = V_3$ alors le rendement $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$; De plus $Q_{12} = (1 - \eta)Q_{34}$

B/ TRAVAIL A EFFECTUER

Mettre sous tension le "**pVnT**" mètre. Ce dernier affiche « **cal** ». Appuyer sur le bouton "**Calibration ΔT** " pour ajuster les deux thermocouples à la même température (le calibrage du capteur de température influe sur la différence de température et non pas sur la température absolue).

L'affichage haut affiche « **OT** » (upper dead centre point). A ce point, le moteur se trouve à son volume minimal. Ramener, le piston de travail à sa plus basse position (**voir figure 4, branche 2-3**) par l'intermédiaire de l'axe du moteur et appuyer sur le bouton "**Calibration V**" (Un mauvais calibrage cause un changement de phase dans la sortie V relative au volume).

Les trois afficheurs numériques fonctionnent et affichent respectivement **0 rev/min** pour la vitesse de rotation **n**, et les températures actuelles **T₁** et **T₂**.

I- Calibrages du capteur de pression:

Le capteur de pression mesure la pression relative en comparaison avec celle de la pression atmosphérique **P₀=1013 hPa**. La modification du volume d'une seringue permet le calcul de la modification de la pression en supposant que le changement d'état est **isotherme avec PV=constante**.

- **Pour le Volume** : le volume variant de 32 à 44 cm³.
5 V correspondent aux 12 cm³ de la cylindrée => conversion 1 Volt <=> 2,4 cm³.

• **Pour la Pression** : une seringue réglée à 20 ml sur le tube du capteur de pression, un voltmètre sur la sortie p de la centrale, on mesure la tension correspondant à une compression isotherme, puis une détente isotherme de l'air.

☞ **Question I.1** : Remplir les tableaux suivants:

Compression

V (ml)	20	19	18	17	16	15
p (hPa)	1013					
U (V)						

Détente

V (ml)	15	16	17	18	19	20
p (hPa)	1013					
U (V)						

☞ **Question I.2** : Tracer sur le même papier millimétré **p** en fonction de **U**. Déterminer la loi de régression linéaire **p = b + a.U**

Les coefficients **a** et **b** obtenus permettront de faire les calculs et l'affichage du diagramme PV avec les unités réelles.

II- Calcul du rendement réel du moteur

Après avoir calibré le capteur de pression, relier les sorties p et V du "pVnT" mètre respectivement aux voies AI 0 et AI 1 de la carte d'acquisition de National Instruments.

Le volume d'alcool dans la lampe doit être mesurer avant et après l'expérimentation cette différence est donné par ΔV . Le temps Δt de l'expérience est mesuré par un chronomètre ce qui permet de déterminer la masse de l'alcool consommée par unité de temps ($\frac{\Delta m}{\Delta t}$).

- **Mettre 20 ml d'alcool dans la lampe.**
- **Allumer la lampe à alcool et lancer le chronomètre afin de pouvoir mesurer le temps Δt à la fin de l'expérience.**

Quand la différence de température ΔT est de l'ordre de **80°C**, **tourner** à la main l'axe du moteur. Le moteur se met en marche et le cycle est autoentretenu.

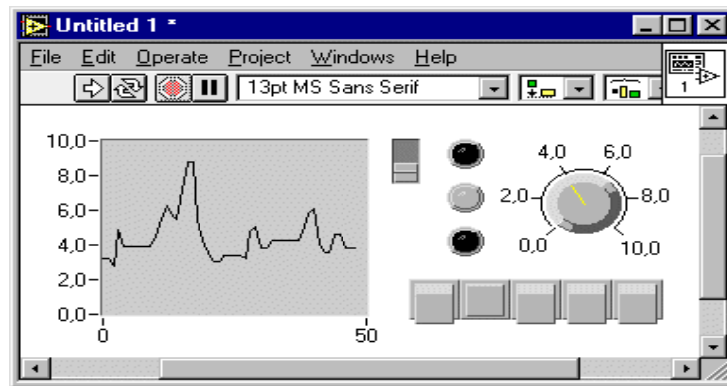
Mesures avec LABVIEW

Le moteur tournant à vitesse stabilisée, le cycle est affiché sur l'ordinateur par l'intermédiaire de la carte d'acquisition de National Instruments en utilisant LABVIEW.

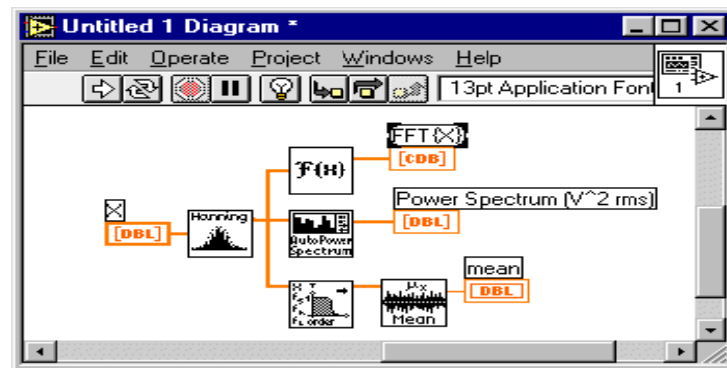
LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un logiciel de développement d'applications d'instrumentation. Bien que tout à fait utilisable dans un grand nombre de domaines, LabVIEW est plus particulièrement destiné à l'acquisition de données et au traitement du signal. En effet, ce logiciel offre de larges possibilités de communication entre l'ordinateur et le monde physique (par cartes d'acquisitions analogiques ou numériques, cartes GPIB, réseau, liaisons série et parallèles, etc.) ainsi que d'importantes bibliothèques mathématiques permettant de traiter les signaux mesurés.

LabVIEW permet de réaliser, entre autre, des instruments virtuels. Par extension on appellera VI (pour Virtual Instrument) toute application réalisée avec LabVIEW. Un VI est composé de deux parties liées :

Une face-avant (Front-Panel): c'est l'interface (ou moyen de communication) avec l'utilisateur. Cette face-avant, personnalisable à loisir, est composée d'objets graphiques comme des interrupteurs, des potentiomètres, des zones de graphismes, etc. Elle représente la face-avant de l'instrument.



Un diagramme (Block-Diagram) : cette partie décrit le fonctionnement interne du VI. On utilise le langage G pour décrire ce fonctionnement. Destiné à être utilisé par des ingénieurs et des scientifiques, non informaticiens de formation, LabVIEW utilise un langage de programmation graphique G (pour Graphique) afin de décrire les programmes dictant le comportement de l'application. Ainsi l'utilisateur est affranchi de la lourde syntaxe des langages de programmation textuels tels que C, Basic, etc. Normalement ce diagramme n'est pas visible par l'utilisateur.



Nous avons donc développé avec LABVIEW, un programme destiné à acquérir les signaux p et V (en Volts) délivrés par les sorties du "pVnT" mètre. En même temps, ce programme affiche le cycle pV avec les unités non réelles et le cycle pV avec les unités réelles après un certain traitement mathématique.

- **Acquisition et affichage des signaux p et V :**

Pour l'acquisition et l'affichage des signaux procéder de la manière suivante :

- **Lancer** LABVIEW
 - **Ouvrir le fichier** « moteur de Stirling ». La face-avant apparaît.
 - Le moteur tourne à vitesse stabilisée, **appuyer** sur le bouton « \Rightarrow : **Run** » pour exécuter le programme. L'acquisition est en cours et le cycle non réel est affiché sur la courbe intitulée « XY GRAPH ».
 - **Donner une valeur au coefficient a et une valeur au coefficient b (utiliser les valeurs de a et b déterminées précédemment).** Le cycle réel apparaît sur la courbe intitulée « Mixed Signal Graph ».
 - **Modifier les valeurs des isothermes 1 et 2** afin de pouvoir superposer avec la courbe précédente les deux droites isothermes. Ces deux droites doivent être tangentes à la courbe du cycle réel.
 - **Appuyer sur le bouton « enregistrer » et donner le nom de votre groupe au fichier.** Tout le Data sera enregistré dans ce fichier.
 - **Appuyer sur le bouton « stop »** pour arrêter l'acquisition et l'exécution du programme.
- **Relever les valeurs de n , T_1 et T_2 .**
 - **Eteindre la lampe d'alcool en même temps que le chronomètre.**

Question II.1: Déterminer le travail correspondant W_{cycle} (*Conversion surface – énergie*)

Pour le calcul du travail on procède de la manière suivante en utilisant le logiciel Origin 70 :

- Lancer le logiciel **Origin70**
- Sélectionner **File : Import : Single ASCII**
Choisir le fichier que vous avez enregistré sous le nom de votre groupe.
Cette opération a pour résultat l'importation du data sous forme de 5 colonnes.
- Considérer une série des valeurs comprises entre 32 et 44 et puis de 44 à 32 cm^3 pour le volume.
- Sélectionner **Plot : Line**
Choisir la colonne x et celle y. Le bon choix permet l'affichage de la courbe du cycle réel.
- Sélectionner **Analysis : Calculus, integrate.**
L'intégration du cycle réel donne le travail W_{cycle} qui n'est autre que l'aire délimitée par le cycle réel.

Question II.2: Imprimer le cycle thermodynamique réel affiché sur l'ordinateur.

Question II.3: Déterminer la puissance $P_C = n \cdot W_{cycle}$ du moteur.

Question II.4: Calculer le rendement expérimental η .

Question II.4: Calculer le rendement théorique et comparer les deux rendements.

Calcul de la puissance Thermique

La puissance thermique de la lampe est donnée par $P_{th} = h \frac{\Delta m}{\Delta t}$

La puissance thermique spécifique est $h = 25 \text{ kJ/g}$ est

La masse volumique de l'alcool est $\rho = 0,83 \text{ g/ml}$ est