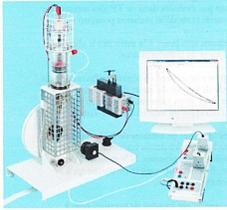


# Moteur de Stirling

- ◇ Carte d'acquisition pour la pression et angle, ordinateur.
- ◇ Moteur de Stirling, transformateur.



Utilisation du matériel

- **Ne débranchez pas les fils reliés au transformateur sans en informer l'enseignant. Ne touchez pas le moteur en fonctionnement.**
- **Le circuit de refroidissement doit fonctionner si le moteur tourne, la température en sortie doit être inférieure à 30°C**
- Lancez le moteur à la main d'un geste vif (la roue doit faire un tour minimum). **Faites attention à vos doigts!**
- **Éteindre la culasse** si le moteur ne tourne pas ou a tourné depuis plus de 5 min.
- Vous pouvez lubrifier l'intérieur du cylindre avec un pinceau et de l'huile de silicone : demandez au professeurs ou au technicien.
- **Remettre en l'état avant de quitter la salle, remettre les fils aux emplacements initiaux.**

## Notions et contenus

Machines thermiques, principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes rendement, efficacité, théorème de Carnot.

## Capacités exigibles

Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération.  
**Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.**

Le but est de relever en temps réel le cycle moteur de cette machine à air chaud (souvent modélisé par deux isothermes et deux isochores) et d'en déduire le travail produit par cycle ainsi que la puissance mécanique a priori disponible. Une étude plus avancée peut être d'étudier les pertes thermiques dans l'eau de refroidissement en utilisant le principe industriel des systèmes ouverts au programme de deuxième année.

## 1 Installation et modèle idéalisé de fonctionnement.

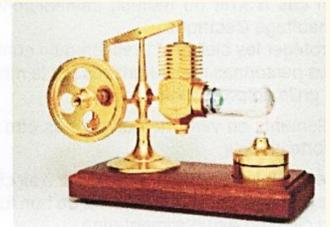
C'est un moteur à combustion externe : on alimente en énergie le système par une quantité de chaleur qui pourrait être une source quelconque extérieure chauffant une chambre fermée. Le chauffage du dispositif que vous étudierez est indirectement assuré par une résistance électrique chauffante ( $1\Omega$ ) alimentée par le secteur par l'intermédiaire d'un transformateur abaisseur de tension mais les modèles réduits (qualitatifs!) que l'on peut se procurer facilement sur le web sont chauffés à la flamme d'une simple bougie.

Le moteur de Stirling étudié dans ce TP dispose de deux pistons reliés à un vilebrequin par des bielles, le piston déplaceur devant le piston moteur de  $90^\circ$  (figure 1 gauche). Pendant que le piston moteur est au point mort haut (a), le piston déplaceur se meut vers le bas tout en déplaçant l'air vers le haut dans la partie chauffée du cylindre. Il y est chauffé, se détend et pousse le piston moteur vers le bas (b). Du travail mécanique est ainsi cédé au volant. Pendant que le piston moteur est au point mort bas (e), le piston déplaceur se meut vers le haut et déplace l'air vers le bas dans la partie refroidie du cylindre. Il y est refroidi et comprimé par le piston moteur (d).

A cet effet, le volant moteur fournit du travail mécanique.

Grâce à un perçage axial dans le piston déplaceur, l'air dans le cylindre en dessus du piston déplaceur est relié à l'air en dessous de ce même piston. Pendant que l'air chaud est refoulé vers le bas, il cède sa chaleur à une charge en laine de cuivre située dans le perçage. Lorsque l'air froid est ensuite à nouveau déplacé vers le haut, il absorbe la chaleur de la laine de cuivre. La laine de cuivre sert donc de régénérateur thermique.

L'échauffement et le refroidissement de l'air ont lieu de manière très simplifiée pour un volume constant alors que son expansion et sa compression laissent de manière tout aussi simplifiée, la température telle quelle.



Le cycle thermodynamique du moteur à air chaud consiste donc en un apport de chaleur isochore (a), une expansion isotherme à haute température (b), une perte de chaleur isochore (e) et une compression isotherme à basse température (d). Ce processus très idéalisé (voir fig. 1) est en général caractérisé de cycle de Stirling.

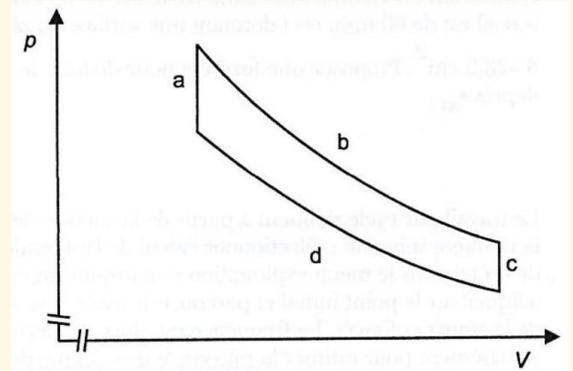
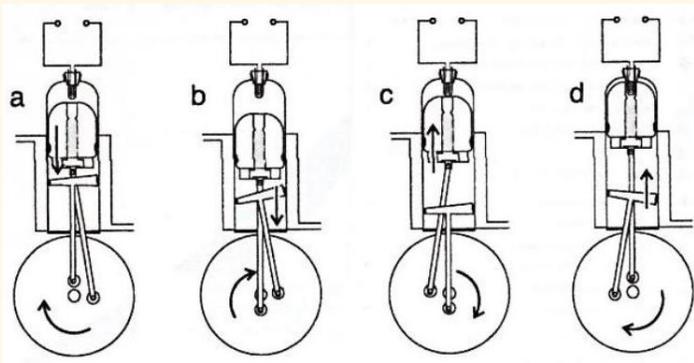


FIGURE 1 – Figure gauche : Schéma illustrant le principe de fonctionnement du moteur à air chaud utilisé comme moteur thermique. Figure droite : diagramme pV idéalisé du moteur à air chaud

## 2 Précautions de fonctionnement et conseils de sécurité.

Le moteur à air chaud fonctionnant en moteur thermique ne démarre pas automatiquement et s'arrête, par exemple après une coupure de courant. Un blocage des bielles et du vilebrequin peut également susciter un arrêt du moteur. En cas d'arrêt, la chaleur délivrée à la culasse n'est pas suffisamment dissipée.

Respecter les instructions spécifiées dans le mode d'emploi du moteur à air chaud.

- Lorsque la machine est à l'arrêt, ne pas chauffer la culasse en permanence.
- Ne faire fonctionner le moteur à air chaud que sous surveillance.
- En cas d'arrêt du moteur, immédiatement arrêter le chauffage électrique.
- Protéger les bielles et le vilebrequin contre l'accès par des personnes non autorisées par la mise en place de la grille de protection.

Les éléments en verre ne doivent pas être soumis à une trop forte chaleur.

- Ne pas faire fonctionner le moteur à air chaud sans eau de refroidissement et s'assurer du bon fonctionnement du circuit d'eau d'alimentation.

Veiller à ce que la température de l'eau de refroidissement alimentée ne dépasse pas 30°C.

- Ne pas porter le filament chauffant à des températures élevées (incandescence jaune) en fonctionnement permanent et en tout cas, seulement lorsque le moteur tourne rapidement. Le dispositif de refroidissement à l'eau froide devra fonctionner quelques secondes avant le lancement et quelques minutes après l'arrêt.

Les évidentes pertes calorifiques autour des chambres de compression ne seront pas évaluées dans ce TP sauf si le temps le permet. Dans ce cas mesurez le débit massique (utilisez un récipient, une balance et un chronomètre), multipliez le par la variation de température de l'eau entre l'entrée et la sortie du circuit (ne débranchez pas le tuyau, réfléchissez un peu plus) et enfin multipliez le tout par la capacité thermique massique de l'eau ( $4,18 \times 10^3 \text{ J/K/kg}$ ). Vous obtiendrez la puissance dissipée dans l'eau de refroidissement et vous pourrez la comparer à la puissance motrice : vous vous rendrez compte que le moteur sert plus à faire chauffer de l'eau qu'à faire tourner le disque.

Le disque d'entraînement sera lancé à la main dès le chauffage allumé avec l'interrupteur du transformateur.

**La durée totale des prises de mesure en régime permanent peut être assez courte (cycle de l'ordre du quart de seconde). L'intervalle de temps entre deux mesures est à choisir pertinemment dans l'interface du logiciel CASSY Lab 2.**

Après plusieurs essais (dizaines de minutes de fonctionnement), on n'hésitera pas à re-lubrifier les parois intérieures avec de l'huile de silicone appliquée au pinceau. Si le moteur n'est pas suffisamment lubrifié, il devient bruyant et ne tourne qu'à vitesse de rotation réduite.

Dans l'expérience proposée, un capteur de pression relié à l'interface Sensor CASSY 2 envoie ses mesures instantanées au logiciel CASSY Lab. Le volume disponible à l'air emprisonné sera lui déduit d'une mesure de déplacement de piston par l'intermédiaire d'un montage fil-poulie-ressort de rappel, la poulie entraînant un curseur de potentiomètre solidaire de sa rotation. Le potentiomètre devra fournir une valeur de volume de 50 cm<sup>3</sup> pour le point mort haut du cylindre de travail.

### 3 Procédure et exploitation des mesures

Test du bon réglage du capteur pour le transducteur de mouvement : on fait tourner le moteur à fond à la main tout en observant si l'affichage du volume (ou de  $s_{A1}$  si l'expression volume n'a pas été proposée) est compris dans la gamme de mesure. Si tel n'est pas le cas, détendre légèrement le fil et faire tourner la roue du capteur de mouvement jusqu'à ce que l'affichage soit correct.

- Enclencher le chauffage à l'aide de l'interrupteur sur la bobine secteur du transfo . Au premier démarrage, il est préférable d'attendre près d'1 minute avant de lancer le moteur pour que le gaz soit suffisamment chaud pour un démarrage facile. (pour les autres expériences, on peut démarrer le moteur lorsque le filament chauffant se met à rougir)
- Lancer la mesure en cliquant sur l'icône « chronomètre » de CASSY Lab . Le nombre prédéfini de points de mesure est mesuré et représenté automatiquement ; la mesure doit être réglée sur peu de tours pour ainsi simplifier le calcul de travail cyclique par intégration dans ce diagramme de WATT (  $\neq$  Clapeyron !)

Expression du volume : Le diamètre intérieur du cylindre de travail est de 60 mm, ceci donnant une surface du piston de  $S = 28,3 \text{ cm}^2$ . Proposez une formule pour déduire le volume depuis  $s_{A1}$  :

Le travail par cycle s'obtient à partir de la surface délimitée, de la manière suivante : sélectionner calcul de l'intégrale (surface de crête) dans le menu exploitation et marquer un cycle (cliquer sur le point initial et parcourir le cycle avec le bouton de la souris enfoncé). La fréquence est alors à déterminer précisément pour estimer la puissance mécanique disponible avant frottements.

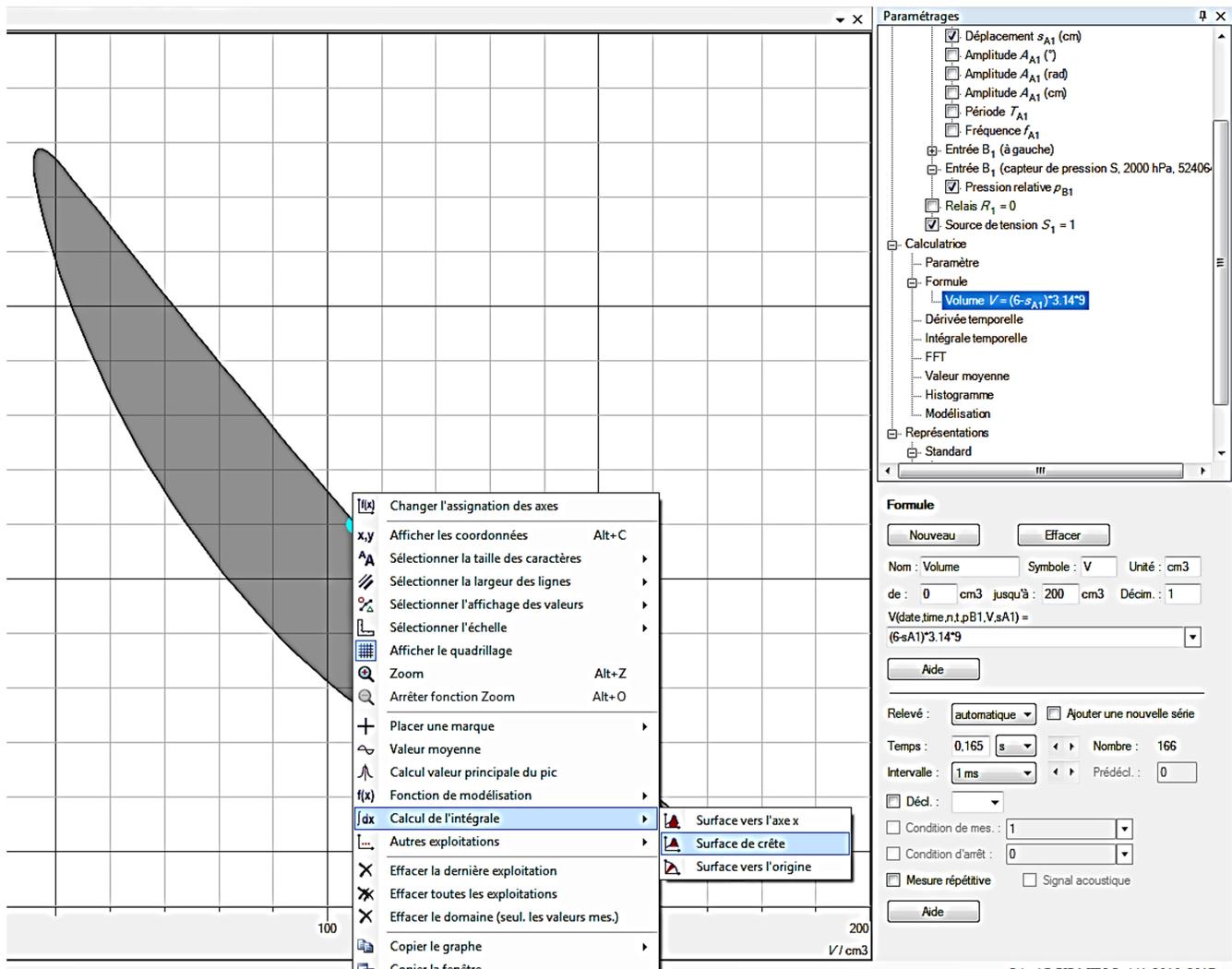


FIGURE 2 – Capture d'écran lors de l'utilisation du logiciel CASSY Lab. Dans "paramétrages" à droite, le déplacement et la pression sont cochés. Une formule a été ajoutée permettant de calculer le volume à partir du déplacement. Des valeurs maximales et minimales permettent de fixer l'axe des ordonnées à l'écran et un temps de cycle a été choisi. L'air du cycle peut être mesuré (clic souris sur le cycle), le résultat s'affichera en bas à gauche. Attention aux unités et découper le cycle en deux si le logiciel est capricieux pour mesurer l'air.

Présentez brièvement le système (schéma et principe de fonctionnement). Indiquez ce que mesurent les capteurs et comment parvenir avec ceux-ci à une mesure du travail du moteur. Estimez le rendement du moteur et si le temps le permet, estimez la puissance dissipée dans le circuit de refroidissement. Commenter

