

Moteur Stirling

1 Objectif de la manipulation

L'objectif de cette manipulation est d'étudier le cycle de Stirling dans les différentes configurations suivantes, soit en moteur thermique « à combustion externe », soit en machine frigorifique ou en pompe à chaleur. L'appareillage dont on dispose, permet tout d'abord de visualiser les courbes $P = f(V, T)$ et de déterminer les rendements des cycles pour les différents modes de fonctionnement.

2 Dispositif expérimental

Le moteur à air chaud qui constitue notre dispositif de travail en TP, cf. Figure 1, est une simulation optimisée du moteur à air chaud de Stirling ; il est constitué d'un cylindre en verre très résistant à l'intérieur duquel se déplacent deux pistons, cf. Figure 2-a. Ce cylindre est entouré par un autre cylindre. Entre les deux, s'effectue une circulation d'eau (c'est la source froide pour le moteur thermique et la pompe à chaleur, et la source chaude pour la machine frigorifique). Dans la partie supérieure du cylindre on peut fixer soit une résistance chauffante (fonctionnement en moteur thermique), soit un thermocouple (ou éprouvette contenant de l'eau) pour les deux autres fonctionnements.

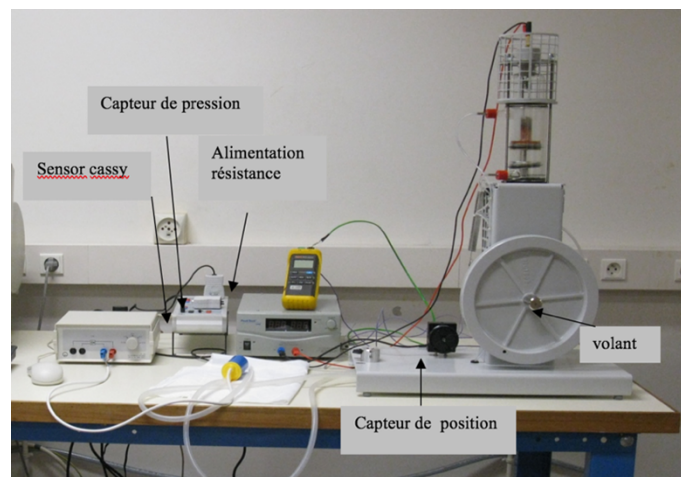
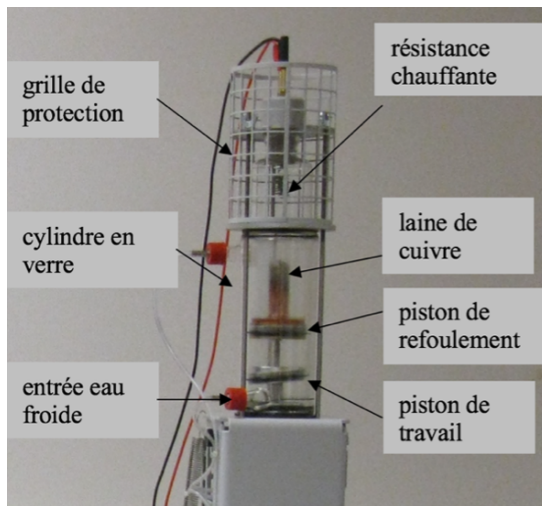


FIGURE 1 – Banc du moteur Stirling et Schéma Pistons-volant

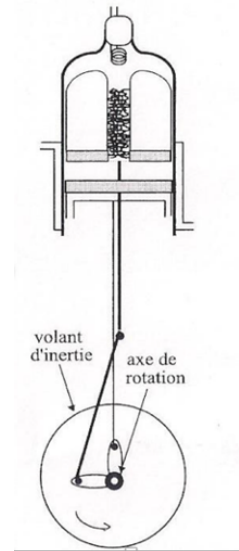
2.1 Les pistons

Toute l'ingéniosité du système repose sur le déphasage de $\pi/2$ de 2 pistons :

- **Le piston de refoulement** (piston supérieur) possède une cavité axiale remplie de laine de cuivre (cela permet l'amélioration du rendement). Dans sa partie inférieure, il possède une plaque de métal, munie de fentes radiales qui laissent passer le gaz de la partie inférieure à la partie supérieure et inversement. Son rôle est donc de forcer le gaz à passer d'un côté à l'autre.
- **Le piston de travail (ou piston moteur)** (piston inférieur), en métal, isole le volume du cylindre de l'extérieur, et permet de fournir ou de prélever du travail.



– (a) Composants du moteur Stirling



– (b) Composants du moteur Stirling

FIGURE 2 – Schématisation des entrées/sorties du système ouvert O et du système fermé F (pointillés)

Les deux tiges des pistons (Figure 2-b) se terminent par deux coussinets montés excentriquement sur un volant (de 25 cm de diamètre environ). Ce volant doit assurer une marche uniforme de la machine. Par l'intermédiaire de ce volant, on peut entraîner les pistons par un moteur auxiliaire pour le fonctionnement en pompe à chaleur ou en machine frigorifique.

2.2 Les capteurs

Deux capteurs, un de pression et un de déplacement, permettent de fournir les informations (respectivement P_{B1} et s_{A1}) à une carte d'acquisition - par l'intermédiaire du module (Sensor-Cassy)-couplée à un logiciel (Cassy-Lab2) et d'obtenir ainsi le diagramme de Clapeyron (P , V) l'ordinateur.

3 Rappel de thermodynamique sur le fonctionnement d'une machine thermique

Une machine thermique est un dispositif permettant au milieu extérieur d'agir sur un gaz qui décrit un cycle. La machine thermique la plus simple fonctionne entre deux réservoirs de chaleur à des températures différentes. Pendant un cycle, le système subit une suite de transformations qui le ramène à son état initial. L'énergie interne étant une fonction d'état, sa variation est nulle au cours d'un cycle et par le premier principe, on a : $Q = -W$.

La chaleur échangée est donc égale au travail échangé, qui s'obtient en mesurant l'aire limitée par l'intérieur du cycle dans un diagramme de Clapeyron. Si le cycle est effectué dans le sens des aiguilles d'une montre, le système fournit du travail à l'extérieur et reçoit de la chaleur et la machine thermique fonctionne comme un moteur. Inversement, si le cycle est effectué dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, le système reçoit du travail et l'utilise pour faire passer la chaleur du réservoir de chaleur à basse température au réservoir de chaleur à haute température. On parle alors de machine frigorifique ou de pompe à chaleur.

On peut résumer les trois fonctionnements précédents par les schémas de la Figure 3. Par convention, on prendra positif ce qui est fourni au système et négatif ce qui est cédé à l'extérieur.

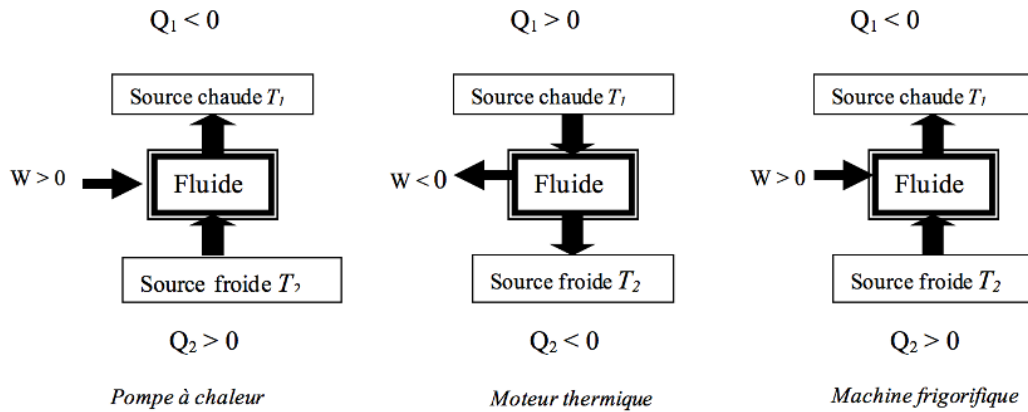


FIGURE 3 – Description des 3 fonctionnements décrits précédemment

4 Le cycle de Carnot

En pratique, quand on parle de moteur cyclique ditherme, on pense plutôt instantanément à celui de Carnot constitué de deux isothermes et de deux adiabatiques. Or ces transformations sont des cas limites, irréalisables en pratique. Le cycle de Carnot représente donc le cycle d'une machine thermique théorique idéale, cyclique, réversible, fonctionnant avec deux sources thermiques, dont le rendement serait maximal et égal à :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

T_2 étant la température de la source froide et T_1 la température de la source chaude.

5 Le cycle de Stirling

5.1 Description du cycle de Stirling

Le dispositif utilisé dans cette manipulation fonctionne suivant le cycle thermodynamique de Stirling, cf. Figure 4. Ce cycle est la suite des évolutions d'un gaz parfait entre 2 sources de chaleur de températures constantes et uniformes T_1 et T_2 séparées par un échangeur parfait qui travaille en isochore. Il comporte 2 isothermes et 2 isochores. Nous admettrons, pour la compréhension du fonctionnement, que les parties supérieure et inférieure du cylindre sont en contact thermique avec deux réservoirs de chaleur de capacité calorifique infinie, à des températures T_1 et T_2 , respectivement. Le cycle peut se décomposer en 4 phases :

- **Phase 1 :** tout le gaz se trouve quasiment dans la zone froide, à température T_2 . Le piston de travail le comprime à cette température (contact thermique avec le réservoir froid) jusqu'au volume V_2 minimum. Comme c'est une compression isotherme, le gaz cède la chaleur Q_2 au réservoir froid. Le travail à fournir est inférieur au travail récupéré lors de la phase 3, car la température du gaz est plus faible. Ce travail est fourni par l'inertie de la roue couplée au moteur. Sans cette roue (volant) on ne disposerait pas d'énergie mécanique pour assurer cette compression et le moteur ne pourrait fonctionner.
- **Phase 2 :** le volume total occupé par le gaz est V_2 (minimum). Le gaz est transféré, sous l'effet du piston de refoulement, de la zone où il règne la température T_2 à la zone chaude à T_1 en traversant la laine de cuivre. Le volume ne change pas, le processus est isochore.
- **Phase 3 :** tout le gaz se trouve quasiment dans la zone chaude, où il reçoit la chaleur Q_1 , ce qui provoque sa détente à l'isotherme T_1 . Au cours de ce processus les deux pistons sont poussés vers le bas, et l'on récupère un travail dit « moteur » W_r plus grand que W_f . La différence entre les deux sert à la phase 1 et pour faire tourner la machine. Le volume final total occupé par le gaz est le volume maximum V_1 .

- **Phase 4 :** le volume total occupé par le gaz est égal à $V_{max} = V_1$. Le piston de refoulement contraint le gaz à se déplacer dans la partie inférieure du cylindre en cédant de la chaleur Q_c au régénérateur (laine de cuivre). Ce qui évite une surchauffe du circuit de refroidissement de la partie froide. La température du gaz s'abaisse donc à la température froide T_2 , c'est un refroidissement isochore. Les calories cédées au régénérateur Q_r (échangeur-accumulateur de calories) durant cette phase, seront restituées lors de la phase 2, quand le gaz est renvoyé dans la zone chaude. Dans le cas idéal, cette phase ne consomme pas de travail mécanique, puisqu'il n'y a pas de variation de volume (ou encore : l'inertie du gaz étant très faible, le travail à fournir pour le pousser d'un côté à l'autre est négligeable).

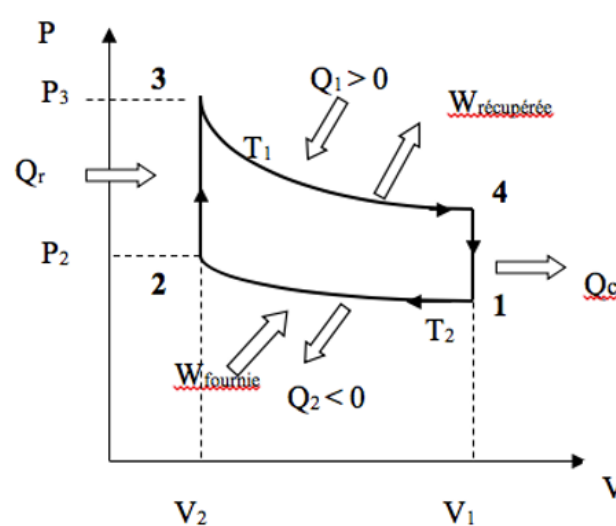


FIGURE 4 – Cycle de Stirling

5.2 Cycle de Stirling : machine thermique

Le rendement du cycle thermodynamique théorique de Stirling est égal au rendement thermodynamique théorique de Carnot, aux mêmes températures de fonctionnement. Ces deux rendements sont indépendants de la masse et de la nature physico-chimique du système évoluant. Par contre, si on compare le rendement du cycle de Carnot par rapport à celui du cycle de Stirling réel, le premier est plus favorable car, dans le cas du cycle de Stirling, il faut apporter de la chaleur au gaz pendant l'échauffement isochore. Cette chaleur sera dégagée sans travail au cours du refroidissement isochore. Le cycle de Stirling est donc tributaire comme une infinité de cycles de l'existence d'un parfait échangeur de chaleur. Seul le cycle de Carnot échappe à cette contrainte. Afin d'améliorer le rendement, dans la pratique, on s'arrange pour récupérer la chaleur produite au cours du refroidissement isochore pour s'en servir pour l'échauffement isochore. C'est pourquoi, dans le moteur utilisé, le gaz passe à travers un générateur de chaleur en laine de cuivre. Il est à noter que dans les installations industrielles, on peut atteindre avec un moteur de ce type, le rendement d'un moteur fonctionnant suivant le cycle de Carnot.

5.3 Cycle de Stirling : pompe à chaleur et machine frigorifique

Ce cycle thermodynamique est un cycle de Stirling inverse. La machine frigorifique extrait une quantité de chaleur Q_2 de la source froide en recevant un travail W alors que la pompe à chaleur extrait la quantité de chaleur Q_2 de la source froide et cède une quantité de chaleur Q_1 à la source chaude en recevant un travail W .

6 Tracé du diagramme de Clapeyron (P,V). Calcul de l'aire du cycle

Le tracé du cycle nécessite d'étalonner les deux capteurs de pression et de déplacement. Ceci se fait à l'aide du logiciel CASSY LAB2. **[Cette opération un peu délicate s'effectuera en présence de l'enseignant.]**

6.1 Étalonnage du volume, de la pression, tracé du cycle et calcul de l'aire du cycle

Pour l'étalonnage du volume et de la pression, suivre les informations disponibles en annexe, de même que pour le tracé du cycle et le calcul de l'aire.

7 Manipulations

7.1 Fonctionnement en moteur thermique

Dans ce fonctionnement, l'air contenu dans la partie supérieure du cylindre est chauffé par la résistance chauffante et se trouve donc porté à une température élevée. Il se détend alors (à température constante). Le piston moteur est poussé vers le bas et le gaz passe dans la partie inférieure. Ceci correspond au seul « temps moteur ». On récupère ainsi un travail au niveau du volant. Au cours de ce fonctionnement comme dans celui de la machine frigorifique ou pompe à chaleur, des pertes par frottement vont intervenir. Ces pertes proviennent soit du frottement du piston dans le cylindre soit dans les paliers. Seuls les frottements du piston peuvent être déterminés quantitativement étant donné qu'ils occasionnent un réchauffement de l'eau de refroidissement.

7.1.1 Mise en route du moteur pour le fonctionnement en "moteur thermique"

Recommandations importantes : Ne jamais faire fonctionner le moteur sans circulation d'eau et couper l'alimentation électrique si le moteur s'arrête de tourner.

Procédure de mise en route (en présence de l'enseignant) :

- Mettre l'eau en ouvrant la vanne rouge située sur le mur ;
- Régler le débit à 100 CCM environ ($1CCM = 1cm^3.mn^{-1}$) ;
- Mettre sous tension le boîtier d'alimentation de la résistance chauffante. Pour le démarrage se mettre aux environs de 11 V ;
- Dès que la résistance chauffante se met à rougir, attendre environ une minute et lancer vigoureusement le moteur en faisant tourner le volant dans le sens horaire, lâcher. Si l'air est suffisamment chaud, alors la détente va se produire et le moteur démarrer. S'il ne démarre pas, recommencer l'opération.

7.1.2 Mesures : suivre les indications données en annexe

a) Moteur non freiné

Faire varier la tension de 9 à 15 V par pas de 2V. Entre deux mesures, attendre impérativement au moins 5 mn, pour que la vitesse du moteur soit bien stabilisée. Relever toutes les données disponibles qui permettront de :

- tracer le cycle dans le diagramme de Clapeyron (ceci se fera sur l'ordi par le logiciel Cassy Lab)
- calculer les diverses pertes
- calculer le rendement de la machine. Comparer avec le rendement de Carnot.

Remarques : pour la tension 13 V (uniquement), enregistrer les données PV et P sur un tableau Excel. Elles seront utilisées pour diverses questions ultérieures.

b) *Moteur freiné*

Pour une valeur de la tension choisie, effectuer trois freinages à l'aide du dispositif adéquat. Relever toutes les données nécessaires, judicieuses à l'étude de ce fonctionnement.

Lorsque toutes les mesures sont terminées, ramener la tension à 0 et couper l'alimentation. Le moteur s'arrête. Attendre quelques minutes que le haut du cylindre soit suffisamment refroidi pour couper la circulation d'eau.

7.1.3 Exploitation des mesures

A partir des données obtenues, exploiter au mieux les différents fonctionnements.

Autres questions complémentaires :

- A partir de l'allure théorique du diagramme de Clapeyron, donner l'allure du diagramme d'Amagat : $PV = f(P)$. Montrer comment l'on peut en déduire les deux températures T_{min} et T_{max} .
- A partir des conditions atmosphériques et en supposant l'air comme un gaz parfait, calculer le nombre de moles enfermées dans le moteur.
- A partir des données obtenues pour la tension 13 V, essayer de calculer les deux températures précédentes.
- Calculer le rendement théorique de Carnot.

7.2 Fonctionnement en machine frigorifique et en pompe à chaleur

Pendant le déplacement du piston de travail, l'air subit une transformation isotherme en échangeant de la chaleur avec l'eau de circulation. Pendant le déplacement du piston de refoulement, l'air subit une transformation isochore, la laine de cuivre servant à absorber ou à céder de la chaleur. Le travail extérieur W est fourni par le moteur auxiliaire. Suivant qu'il tourne dans un sens ou dans l'autre les processus dans les volumes supérieur et inférieur sont inversés. Si le moteur tourne dans le sens horaire on aura affaire à une machine frigorifique. Si le moteur tourne dans le sens trigonométrique on aura affaire à une pompe à chaleur. C'est-à-dire que si on place un thermocouple en partie haute du cylindre, il détectera soit une chute de température (machine frigo), soit une élévation (pompe à chaleur). Il est ainsi possible de refroidir bien en dessous de 0 °C ou de réchauffer bien au-delà de 100°C. Suite à d'importants incidents (fissure du cylindre en verre), on ne peut désormais faire fonctionner le moteur Stirling ni en pompe à chaleur, ni en machine frigorifique. Cependant, en travail préparatoire, et d'après les explications données dans le texte TP, il est demandé de déterminer l'efficacité ϵ ou le coefficient de performance COP dans les deux fonctionnements. Pour cela, il faudra bien voir où et vers quoi est transférée la chaleur et exprimer l'expression du travail mécanique à mettre en œuvre par cycle pour transférer la chaleur du réservoir froid vers le plus chaud. Donner la puissance mécanique correspondante. (On tiendra compte de la convention de signe, voir la section 3. Dans le cas de la machine frigo, réfléchir au dispositif expérimental qui permettrait de connaître la puissance « froide » produite ?

8 Travail à réaliser avant d'arriver en séance

1. Exprimer le volume V en fonction du déplacement sB_1 du piston de travail. A partir de la représentation du cycle, Fig. 5, écrire pour chaque transformation, l'expression du travail et de la chaleur fournis ou reçus par le système. Donner la somme des travaux et des quantités de chaleur sur le cycle. Donner l'expression du rendement.
2. Dans le cas où le moteur Stirling possède un régénérateur qui récupère la chaleur et la retransmet au fluide froid (rôle de la laine de cuivre dans ce dispositif) et en supposant que cela soit fait de manière idéale, de sorte que Q_{total} soit égale à Q_{34} , montrer que l'on obtient alors un rendement équivalent à celui de Carnot. Conclusion.
3. Sachant que le diamètre intérieur du cylindre de travail est de 60 mm, calculer la section du piston de travail. Donner l'expression de V que l'on rentrera dans le logiciel CASSY-LAB2.
4. Vérifier, à l'aide des équations aux dimensions que le produit pV est équivalent à un travail.
5. Exprimer le travail fourni par un tour de moteur. Le logiciel l'affiche en $hPa.cm^3$. Donner le en Nm.
6. Déduire du travail, la puissance fournie par le moteur.
7. Ecrire le bilan énergétique par cycle, à partir de la figure 5.
8. Donner l'expression littérale du rendement η dans le cas du fonctionnement en moteur thermique et montrer qu'il est toujours inférieur à 1. Donner l'expression du rendement de Carnot.
9. Répondre aux questions de la section 7.2
10. Chercher les utilisations actuelles du moteur Stirling.

A Annexes : Procédure à suivre pour la manipulation

A.1 Étalonnage du volume

a) A partir de la fenêtre « Modules CASSY », activer les canaux correspondants aux voies d'acquisition : position sB_1 et pression pA_1 . Au cours de l'activation, les points noirs se mettent en rouge et bleu, et les fenêtres correspondantes apparaissent sur l'écran. L'activation de la voie « position » donne l'angle α_{B1} , or ce qui nous intéresse ici est le déplacement sB_1 , il est donc possible de l'obtenir en l'activant dans la fenêtre « paramétrages » située à droite de l'écran. Toutefois les canaux activés inutiles doivent être désactivés dans la fenêtre « paramétrages ».

b) A partir du déplacement sB_1 , il est possible d'obtenir le volume puisqu'une relation simple les relie. Une nouvelle grandeur à rentrer est donc le volume V : Fenêtre « paramétrages » → Calculatrice → Formule → Nouveau → Nouvelle Grandeur « Volume », symbole V , unité cm^3 , de 0 à 200 cm^3 (valeurs min et max du volume occupé par le gaz à l'intérieur du cylindre). Pour calculer V : rentrer la formule que vous aurez obtenue au cours de la préparation du TP !

Pour faire apparaître la fenêtre correspondante, cliquer sur la barre des menus en haut de l'écran sur l'icône V^* . Faire tourner le volant du moteur. Quand le piston de travail est au point mort haut, le volume affiché doit être environ 50 cm^3 . Si ce n'est pas le cas, régler la position du capteur de déplacement (potentiomètre correspondant) en tirant un peu sur le fil maintenant le ressort. Vérifier que le volume max est d'environ 185 $cm^3 < 200 cm^3$. A ce V_{max} doit correspondre un déplacement sB_1 de l'ordre de $\sim 6cm$. Si $V < 0$, aller dans la fenêtre « paramétrages » à « déplacement » et cliquer sur la fenêtre suivante : $s < - - - > -s$. Le déplacement doit toujours être > 0 .

c) Rentrer la durée de l'acquisition (commencer avec 0,25 s) et le temps entre deux acquisitions soit 2 ms. Le nombre de points relevés s'affiche automatiquement ! Si le temps choisi est trop petit, c'est-à-dire que le cycle ne peut pas être tracé complètement, alors augmenter ce temps.

A.2 Étalonnage de la pression

Vérifier que la voie correspondant à la pression est bien activée dans la fenêtre « paramétrages ». La fenêtre correspondante doit être ouverte sur l'écran de même la boîte de dialogue. Pour travailler en pression absolue il est impératif d'effectuer une correction de l'offset. Il sera pris égal à 1 bar. Utiliser la touche « Correction », « Corriger l'offset ». Faire de même avec le facteur qui doit être -1. La plage de mesure du capteur de pression doit être ± 2000 hPa. Vérifier qu'au point mort haut, la pression est max et atteint environ 1600 hPa.

A.3 Tracé du cycle

Fermer la fenêtre « Modules CASSY » afin de visualiser le graphe qui se trouve en dessous. Dans la barre des menus, sous « standard » cliquer droit sur t/s (temps en seconde), puis : → changer l'assignation des colonnes : sur la fenêtre « courbe » mettre V en x et pA_1 en y. Pour changer la valeur d'origine de l'axe des ordonnées et l'imposer à 0, cliquer droit dessus. Pour obtenir le tracé du cycle, déclencher l'acquisition en cliquant sur la montre située sur la barre des menus.

A.4 Aire du cycle

L'aire s'obtient directement après avoir cliqué droit sur le graphique puis :

→ Calcul de l'intégrale → surface de crête

Ensuite, amener le curseur sur le sommet du graphe et cliquer gauche pour faire apparaître un point que l'on déplacera sur le contour du cycle de façon à ce que celui-ci se colorie. La valeur de l'aire en $hPa.cm^3$ s'affiche alors en bas de l'écran à gauche. Il n'est pas nécessaire de faire un enregistrement des données à chaque manipulation. Relever simplement la valeur de l'aire correspondante.

Pour relancer une nouvelle acquisition cliquer de nouveau sur la montre.