USTHB
Université des Sciences et de la Technologie
Houari Boumediene

Faculté de Physique - Département EMF

Année 2024-2025 *L3 Licence Energétique*

Travaux Pratiques
THERMODYNAMIQUE

Pr. Meriem AMOURA
Dr. Toufik BENMALEK
Dr. Djamal Eddine GHEERSI

SOMMAIRE

QUELQUES CONSIGNES ***Page 01***

COMPTE-RENDU TYPE ***Page 03***

RAPPELS ***Page 05***

TP N°1 : *Chaleurs latentes de changement d'état de l'eau* ***Page 9***

TP N°2 : Dilatation thermique d'un solide ***Page 14***

TP N°3 : Etude Thermodynamique d'un moteur à combustion externe : Moteur de Stirling ***Page 17***

TP N°4 : Evaluation du rendement d'un moteur thermique ***Page 21***

TP N°5 : Détermination du zéro absolu ***Page 24***

QUELQUES CONSIGNES

Les travaux pratiques sont des compléments des enseignements et doivent être considérés comme une initiation à : la méthodologie ; la précision de la mesure, l'analyse et l'esprit critique.

Avant la séance, vous devez lire l'énoncé et savoir répondre aux questions : Quel est le système étudié ? Que va-t-on mesurer, avec quels moyens et dans quel but ? Quelle modélisation utilise-t-on et quelles sont les conclusions attendues ?

Les parties théoriques du TP doivent être faites avant la séance pour vous permettre de vous consacrer pleinement aux mesures et à leur traitement.

Les séances de TP durent 03 heures pendant lesquelles vous êtes susceptibles d'être interrogés sur votre préparation. Chaque étudiant sera interrogé et noté au minimum une fois lors des 03 séances. Vous devez manipuler pour répondre aux questions de l'énoncé. Vous devez rendre à la fin de la séance un compte-rendu qui sera noté.

Tout compte-rendu commence par une introduction qui décrit brièvement les buts du TP, les moyens de mesures et les résultats attendus. Il se termine par une conclusion reprenant les principaux résultats obtenus. Il faut éviter de trop s'étaler ou de recopier le texte de TP : perte de temps. Eviter les ''copiés-collés'' issus directement de l'internet. Même si la question ne vous a pas été posé, vous devez donner avec quelle précision sont faites les mesures (incertitude, écart relatif). N'hésitez pas à proposer des améliorations, ayez l'esprit critique. La présentation et l'orthographe comptent pour beaucoup dans la note.

Le compte-rendu de TP doit être rédigé en utilisant OBLIGATOIREMENT de **grandes double-feuilles.** Ne pas utiliser de stylo rouge.

Les ordres de grandeur des résultats finaux à obtenir doivent être connus à l'avance : ils doivent être recherchés dans la littérature ou sur internet avant la séance de TP.

Les 03 notes de comptes-rendus et la note d'interrogation vous donnent une note qui compte pour 1/3 de la note finale, contre 2/3 pour le test de TP. Attention, toute absence non justifiée (une absence se justifie par un certificat médical qui doit impérativement porter la griffe du médecin traitant, une convocation au service militaire, un certificat de décès…) entraîne un zéro pour le TP non fait. La justification devra être fournie à la séance de TP suivante.

Les travaux pratiques de thermodynamique programmés sont au nombre de cinq (05). Les quatre premiers se dérouleront dans l'ordre suivant :

TP1 : Chaleurs latentes de changement d'état de l'eau

TP2 : Dilatation thermique d'un solide

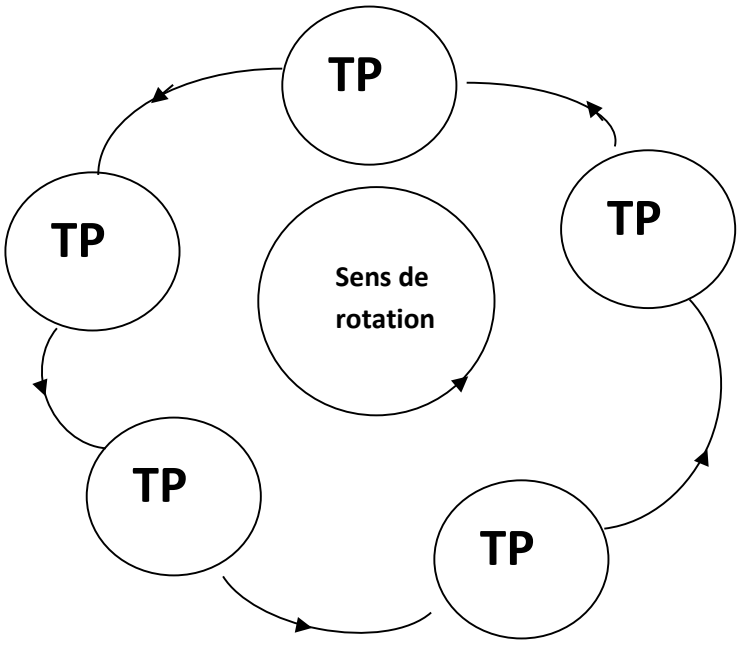
TP3 : Etude Thermodynamique d'un moteur à combustion externe : Moteur de Stirling

TP4 : Evaluation du rendement d'un moteur thermique

TP5 : Détermination du zéro absolu

Les séances de TP seront effectuées par rotation successive selon l'ordre croissant des 4 TP. Si un binôme commence par faire le TP **N°4,** le TP suivant à réaliser 15 jours après, sera le TP **N°1**. Si un binôme commence par faire le TP **N°1**, le TP suivant à réaliser sera le TP **N°2** ***etc.***

Le numéro du premier TP de chaque binôme est fixé lors de la séance zéro, pour que chaque binôme étudie et prépare l'ossature (titre du TP, noms et prénoms du binôme, objectif du TP, matériel utilisé et tableaux de mesures) du compte-rendu du TP avant de se présenter au laboratoire.



COMPTE- RENDU TYPE

Nom1 Prénoms1
Nom2 Prénoms2
Nom3 Prénoms3

Groupe :…….

TITRE DU TP

I. Objectifs du TP

Dans l'expérience proposée, nous devons : vérifier…., déterminer….. et comparer à……, calculer……

II. Description et analyse du montage expérimental

- Le montage expérimental permet de faire subir…, varier (telle évolution) constitué de…..
- Vérification des hypothèses d'évolutions : l'évolution est…..car…..
- L'expérience consiste en ….dans laquelle on fait varier…..et on mesure…

III. Exploitations des mesures-Analyse des résultats

A partir des relevés de……., nous avons pu tracer……..

L'allure de la courbe obtenue est de type….. (dont la pente nous permet de calculer….par…. , ou autre)

La valeur obtenue semble (correcte, trop forte, trop faible….) car….si nous comparons à la valeur (théorique, des tables…) ; nous observons que…

Les écarts constatés peuvent provenir de… (tel phénomène, cause…). En effet … (calcul d'erreur ou autre permettant d'argumenter votre proposition d'explication).

IV. Conclusions

- Sur les résultats obtenus
- Sur la manipulation
- De façon générale

RAPPELS

I. INCERTITUDES ET REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Tout nombre a, résultant de la mesure d'une grandeur physique, n'est qu'une valeur approchée de la valeur exacte a_e de cette grandeur. L'écart entre la valeur approchée et la valeur "exacte" est appelé *erreur absolue* ou *incertitude* de la mesure. On distingue l'***incertitude*** Δa, qui s'exprime avec la même unité que la grandeur mesurée, et l'*erreur relative*, quotient de la précédente par la valeur approchée a de la grandeur. L'erreur relative est sans unité et s'exprime généralement en %. Elle permet de comparer la précision de mesures portant sur des ordres de grandeurs différents ou, la précision de mesures exprimées en unités différentes ou encore, la précision de mesures effectuées par plusieurs expériences.

Un résultat s'écrit sous la forme :

$$a \pm \Delta a$$

Cela signifie que la vraie valeur a_e est telle que :

$$a - \Delta a \leq a_e \leq a + \Delta a$$

***Erreur relative*:** $\frac{\Delta a}{a}$

⇨Les erreurs peuvent être classées principalement en deux groupes: directes et indirectes

1. Erreurs directes

Ce sont celles résultant directement de la prise des mesures:
Exemples:

- Erreur de parallaxe liée à l'angle de vue de la lecture
- Erreur de zéro
- Erreurs dues au calibre (ampèremètre, voltmètre, ...)

⇨ $\Delta I \text{ ou } \Delta V = \frac{classe \times calibre}{100}$; **classe**: qualité nominale prévue par le constructeur.

↳ 💣 Pas de mesures dans le premier tiers du calibre!

Remarque: Souvent l'incertitude est à estimer par l'expérimentateur lui-même car elle peut être supérieure à celles citées ci-dessus. En effet, il faut toujours **surestimer** une incertitude que la sous-estimer

2. Erreurs indirectes

Elles concernent les grandeurs déduites soit graphiquement, soit à partir de relations analytiques (R=V/I par ex.) dépendant de valeurs directes. Les erreurs sur ces grandeurs sont alors déduites soit graphiquement soit à partir des valeurs directes, de leurs incertitudes ainsi que de la relation qui existent entre elles.

Autrement dit, si une grandeur recherchée *y* se calcule à l'aide d'une relation dans laquelle interviennent une ou plusieurs grandeurs mesurées séparément, et donc entachées d'incertitudes, la recherche de l'incertitude sur *y* est un problème mathématique qui se résout en calculant la variation Δy résultant de petites

variations sur la ou les grandeurs mesurées. Les incertitudes sont en général suffisamment petites pour qu'il soit possible d'appliquer le calcul différentiel au calcul des incertitudes. L'incertitude relative sur *y* se calcule, soit à partir de l'incertitude absolue en divisant par y, soit en cherchant la différentielle du logarithme naturel de *y* car: $d(\ln y) = \frac{dy}{y}$

Le tableau suivant indique les incertitudes et les erreurs relatives des fonctions les plus courantes.

FONCTION y	INCERTITUDE Δy	ERREUR RELATIVE $\frac{\Delta y}{y}$
Somme: $x+z$	$\Delta x + \Delta z$	$\frac{\Delta x + \Delta z}{\lvert x+z\rvert}$
Soustraction: $x-z$	$\Delta x + \Delta z$	$\frac{\Delta x + \Delta z}{\lvert x-z\rvert}$
Produit: $x\times z$	$\lvert z\rvert \Delta x + \lvert x\rvert \Delta z$	$\frac{\Delta x}{\lvert x\rvert} + \frac{\Delta z}{\lvert z\rvert}$
Quotient: $\frac{x}{z}$	$\frac{\lvert z\rvert \Delta x + \lvert x\rvert \Delta z}{z^2}$	$\frac{\Delta x}{\lvert x\rvert} + \frac{\Delta z}{\lvert z\rvert}$
ax, a constante	$\lvert a\rvert \Delta x$	$\frac{\Delta x}{\lvert x\rvert}$
x^n	$\lvert n\, x^{n-1}\rvert \Delta x$	$\lvert n\rvert \frac{\Delta x}{\lvert x\rvert}$
$\sin x$	$\lvert\cos x\rvert \Delta x$	$\frac{\Delta x}{\lvert tgx\rvert}$
$\cos x$	$\lvert\sin x\rvert \Delta x$	$\lvert tgx\rvert \Delta x$
e^x	$e^x \Delta x$	Δx
$\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{x\lvert\ln x\rvert}$

3. Ecriture d'un résultat, chiffres significatifs

Toute grandeur physique ne se détermine qu'avec une incertitude. Elle doit donc être représentée qu'avec une précision limitée à cette incertitude. Seul le dernier (ou les deux derniers) chiffre à droite de la valeur mesurée est entaché d'erreur.
Ainsi, si une mesure de longueur est donnée au centième de millimètre près (palmer):

$$a = 2{,}86 \pm 0{,}01\,\text{mm} \quad \text{ou} \quad a = (2{,}86 \pm 0{,}01)\times 10^{-3}\,\text{m}$$

Il est insuffisant d'indiquer la mesure avec un nombre trop restreint de chiffres significatifs:

~~$a = 2{,}8 \pm 0{,}01$ mm~~

car la précision obtenue nécessite l'indication du chiffre des centièmes de millimètre. Si la mesure est de 2,80 mm, on écrit alors:

$$a = 2{,}80 \pm 0{,}01\,\text{mm}$$

D'autre part, il ne sert à rien d'écrire des chiffres significatifs au-delà de ceux indiqués par la précision de la mesure, comme par exemple :

$$a = 2{,}80343 \pm 0{,}01\text{mm} \quad \text{(incorrect)}$$

De même, si un résultat est obtenu avec son incertitude relative, il ne faut conserver que le nombre de chiffres vraiment significatifs. Par exemple :

$\nu = 434{,}571$ Hz (à 1,1 % près, donné par l'appareil par ex.)

signifie que l'incertitude absolue vaut environ 5 Hz au lieu de 4.8 Hz; il faut donc écrire

$\nu = 435 \pm 5$ Hz

De manière générale, il faut garder un seul chiffre en définitive dans le calcul de l'incertitude.

Représentation des résultats : *résumé*

- *Un résultat expérimental est toujours suivi de son incertitude absolue*
- *Les nombres exprimant la grandeur et l'incertitude absolue s'écrivent avec le même nombre de décimales*
- *Le nombre de chiffres significatifs est déterminé par la précision, c'est à dire par l'incertitude*
- ***L'incertitude comporte TOUJOURS un seul chiffre significatif***
- *L'unité doit toujours être indiquée*

II. PAPIERS POUR TRACES DE COURBES

1. Papier millimétré

Il est défini par une échelle arithmétique linéaire (échelle usuelle) en abscisse et en ordonnée.

Exemple d'application: Dans le tableau suivant sont reportées des données recueillies lors de mesures expérimentales dans une étude des caractéristiques d'un gaz parfait. Représenter ces points, V(T), sur le papier mm.

ATTENTION:

- Choix d'une bonne échelle pour les 2 axes
- Graduation régulière des axes
- Les intitulés des axes et unité respectives…

T(K)	293	303	308	318	323	333
V(10^{-5} m^3)	1,84	1,88	1,92	1,95	2,01	2,09

Remarque: Pour la vérification expérimentale d'une loi de la forme:

$y = Ax^n + B$, n connu, on reporte sur l'axe des abscisses x^n et sur l'axe des ordonnées y et on évalue A (la pente) et B (l'ordonnée à l'origine).

III. UNITES DE MESURE EN PHYSIQUE (Unités du Système International)

Le Système International compte sept unités de base : le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la Candela, supposées quantifier des grandeurs physique indépendantes. Chaque unité possède en outre un symbole (dans l'ordre pour les unités de base : m, kg, s, A, K ; mol et Cd).

Système	Unités
MKSA	**Mètre, kg, seconde et Ampère**
SI	**MKSA + Kelvin (K) et Candela (Cd)**
CGS	**cm, g et seconde**

CHALEURS LATENTES DE CHANGEMENT D'ETAT DE L'EAU

TP N°1

I. Introduction

Dans ces deux expériences qui sont proposées ; nous allons voir qu'à travers un bilan énergétique simple il est possible de déterminer respectivement, la valeur des chaleurs latentes de ***condensation*** de l'eau et de ***fusion*** de la glace.

La manipulation comportera deux expériences distinctes, l'une pour la mesure de la chaleur latente de ***condensation*** de l'eau et l'autre pour la détermination de la chaleur latente de ***fusion*** de la glace. Ce travail se base sur le principe de conservation de l'énergie $\sum Q_i$=0, appliqué aux systèmes isolés thermiquement.

II. Rappels

Lorsqu'un solide ou un liquide échange de la chaleur, et en absence d'autres transferts d'énergie, son énergie interne varie. Cela peut se traduire par une variation de sa température et, pour des valeurs de température et de pression spécifique à chaque corps, il se produit un changement d'état avec absorption ou dégagement de chaleur.

1) *Chaleur sensible*

A pression constante et lorsqu'il n'y a pas de changement d'état, la quantité de chaleur ***Q*** , qu'il faut fournir à un système pour y provoquer une augmentation de température ΔT est donné par la relation :

$$Q = m.\, C_p.\, \Delta T$$

Où C_p est la chaleur spécifique massique à pression constante de la substance, elle représente la quantité de chaleur qu'il faut apporter à une unité de masse d'un corps pour élever sa température de 1°C. Elle s'exprime en kJ/kg/K (exemple : pour l'eau : C_p =4,18 kJ/kg/K).

2) Chaleur latente

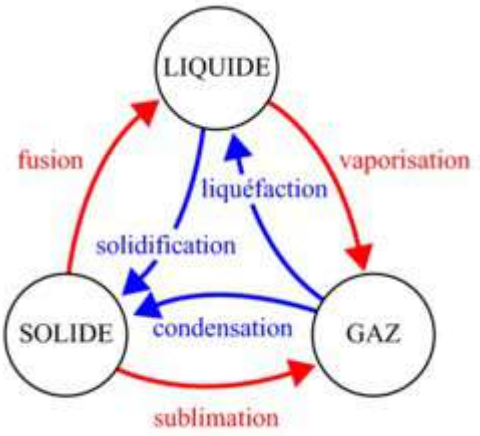
Pour ***fondre*** un solide, ou pour ***vaporiser*** un liquide, il faut fournir à l'unité de masse d'un corps à température et pression constantes, une quantité de

chaleur L appelée **chaleur latente de changement d'état** (respectivement de fusion : L_f ; de vaporisation : L_v). Cette chaleur est donnée par la relation :

$$Q = m.L$$

Où : L est la chaleur latente de changement d'état et elle s'exprime J/Kg.

Remarque : Les changements d'état sont des transformations réversibles. Et donc La chaleur absorbée par un solide, à température et pression constantes, pour passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sera entièrement restituée au cours de la transformation inverse (solidification).



3) Calorimétrie

La calorimétrie repose sur un principe fondamental : principe de l'égalité des échanges thermiques (ce qui est perdu par un milieu est gagné par un autre milieu). Les transformations se font à pression constante et les systèmes étudiés sont incompressibles (Volume constant).

La conséquence est que tout échange d'énergie thermique s'écrit :

$$Q = mC_p(T_f - T_i)$$

Où T_f et T_i sont les températures finale et initiale du sous-système.

III. Manipulations

Partie 1 ⇒ **CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION DE L'EAU**

1) But

Déterminer la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

2) Matériel

Le matériel utilisé dans cette première partie :

- Un générateur de vapeur
- Un vase d'expansion.
- Un calorimètre.
- Un thermomètre.
- Une balance.
- Eau

 ***Attention au thermomètre : éviter les chocs physique et thermique !***

3) Modes opératoires

1. Mesurer T_a, la température ambiante de la salle.
2. Remplir le générateur de vapeur au trois quart d'eau à température ambiante.

3. Fermer le générateur de vapeur à l'aide du bouchon en caoutchouc muni de deux sorties. L'une des sorties est fermée à laide d'un petit tube souple muni d'une pince.

4. A l'aide du tube souple relier la seconde sortie du générateur de vapeur au vase d'expansion. (*Le vase d'expansion doit être surélevé par rapport au calorimètre*)

5. Insérer le tube souple muni d'un prolongateur en verre sur la seconde buse du vase d'expansion.

6. Mettre en marche le générateur de vapeur.

7. Déterminer M_{cal}, la masse du calorimètre vide. Le remplir à moitié d'eau froide (de température inferieur de 10° environs à la température ambiante ***Ta***).

8. Mesurer T_i et $M_{cal+eau,}$ la température de l'eau froide et la masse du calorimètre rempli d'eau.

9. Quand la vapeur commence à apparaitre, attendre que la buée dans le vase d'expansion disparaisse et introduire le prolongateur en verre dans le calorimètre à travers l'orifice du couvercle de celui-ci.

10. Agiter continuellement le calorimètre en surveillant le thermomètre. Lorsque la température de l'eau du calorimètre avoisine la température ambiante initiale, retirer le prolongateur.

11. Continuer à agiter l'eau avec le thermomètre et noter la température d'équilibre (T_f) de l'eau dans le calorimètre.

12. Repeser le calorimètre et noter sa nouvelle masse (M_f).

13. Déterminer la masse initiale M_{eau} de l'eau et la masse de la vapeur condensée M_c.

14. Consigner vos mesures dans le tableau suivant :

M_{cal} ( )	$M_{cal+eau}$( )	M_f ( )	M_{eau} ( )	M_c ( )	T_a ( )	T_i ( )	T_f ( )

4) Exploitation

1. Ecrire le bilan des énergies thermiques mises en jeu et déterminer la chaleur latente de vaporisation de l'eau L_v.

2. La chaleur latente de vaporisation de l'eau est en réalité L_v =2260 kJ/kg :

- Quel est le pourcentage d'incertitude de votre résultat par rapport à la valeur théorique ?
- Essayer d'expliquer les raisons de cet écart.

Partie 2 ⇒ CHALEUR LATENTE DE FUSION DE LA GLACE

1) But

Déterminer la chaleur latente de fusion de la glace.

2) Matériel

Le matériel utilisé dans cette seconde partie :

- Une plaque chauffante
- Un bécher
- Un calorimètre.
- Des cubes de glace
- De l'eau
- Un thermomètre.
- Une balance.

⚠ ***Attention au thermomètre : éviter les chocs physique et thermique !***

3) Modes opératoires

1. Mesurer T_a, la température ambiante de la salle

2. Déterminer M_{cal}, la masse du calorimètre vide.

3. Remplir le calorimètre à moitié avec de l'eau à température supérieure à la température ambiante d'environ 15°C.

4. Mesurer T_i la température initiale de l'eau.

5. Déterminer la masse $M_{cal+eau}$, la masse du calorimètre rempli d'eau.

6. Prendre des petits glaçons non mouillés (placés sur une éponge ou du papier absorbant) et les mettre un par un dans l'eau du calorimètre en agitant continuellement et en surveillant la température de l'eau.

7. Quand la température de l'eau est inferieure, d'environ 15°C, à la température ambiante, mesurer T_f , la température finale.

8. Immédiatement après avoir mesuré la température finale, peser de nouveau le calorimètre pour déterminer le poids final (M_f).

9. Déterminer M_g la masse de la glace ainsi que M_{eau} la masse initiale de l'eau.

10. Consigner vos mesures dans le tableau suivant :

Masse M_{cal} ( )	Masse $M_{cal+eau}$ ( )	Masse M_{eau} ( )	Masse M_f ( )	Masse M_g ( )	Température T_a( )	Température T_i ( )	Température T_f ( )

4) Exploitation

1. Ecrire le bilan des énergies thermiques mises en jeu et déterminer la chaleur latente de fusion de la glace L_f.

2. La chaleur latente de fusion de la glace est en réalité L_f =334 kJ/kg :

   - Quel est le pourcentage d'incertitude de votre résultat par rapport à la valeur théorique ?

   - Essayer d'expliquer les raisons de cet écart.

Dilatation thermique d'un solide

TP N°2

I. Objectif

Il s'agit de déterminer le coefficient de dilatation linéaire d'un solide.

II. Théorie

Une augmentation de la température T d'un corps a pour effet de provoquer une augmentation de l'amplitude d'oscillation des atomes du corps. La distance moyenne (ou libre parcours moyen) entre les atomes devient plus grande et par là également, le volume total V (à pression constante P).

On définit le coefficient de dilatation volumique α comme :

$$\propto = \frac{1}{V_0}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$ avec : v_0 le volume initial

et α mesuré en $(°C)^{-1}$ ou $(K)^{-1}$

Remarque

➢ Pour les corps solides, on considèrera une seule dimension (qui sera la longueur du tube solide) et nous aurons :

$$\propto_1 = \frac{1}{L}\left(\frac{\partial L}{\partial T}\right)_P$$ (L: longueur totale du tube solide)

Comme les modifications de longueur $\Delta L = L - L_0$ sont petites par rapport à la longueur initiales L_0, on peut écrire : $\propto_1 = \frac{\Delta L}{L_0}\ \frac{1}{\Delta T}$ et par conséquent :

$$L = L_0\,(1+\alpha_1(T-T_0))$$ (T_0 : température initiale).

III. Manipulation

Détermination des coefficients linéaire de dilatation thermique du cuivre et de l'aluminium

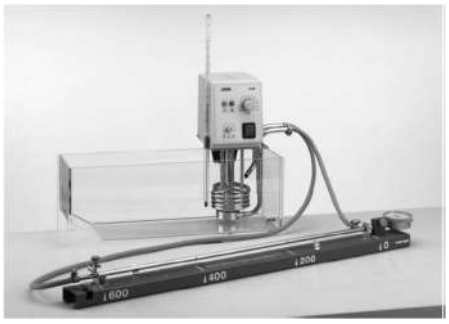
1) But

Il s'agit d'étudier la dilatation linéaire du cuivre et de l'aluminium en fonction de la température.

2) Matériel

Le matériel utilisé dans cette manipulation :

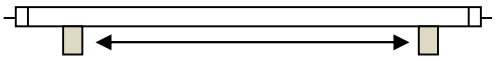
- Appareil de dilatation thermique
- Thermostat
- Un thermomètre
- Deux tiges (cuivre et aluminium)
- Eau



Dispositif expérimental

3) Modes opératoires

a. Mesurer la longueur initiale L_0 de la tige.



L

b. Placer la tige sur le support de l'appareil de dilatation thermique.

c. S'assurer que les tuyaux sont bien branchés.

d. S'assurer que le récipient est rempli d'eau.

e. Allumer la pompe pendant 10 secondes afin de permettre à l'eau de circuler dans la tige, puis l'éteindre.

f. Mettre le dilatomètre en contact avec l'une des extrémités de la tige ; puis s'assurer du bon réglage du zéro avant de visser la vis qui sert à sa fixation.

g. Noter la température initiale de l'eau T_0.

h. Remettre la pompe en marche, puis, en s'aidant du dilatomètre et du thermomètre, noter dans un tableau, les variations de la longueur de la tige ΔL correspondant à des variations de température $(T_i - T_{i-1})$ comprises entre 5 et 10 °C. i = 1…..,6. ΔT étant défini, quant à lui, par $\Delta T = T_i - T_0$.

ΔL (µm)						
ΔT (°C)						

i. Remplacer l'eau du récipient par une eau à température ambiante, puis refaite l'expérience en utilisant la deuxième tige.

4) Exploitation des résultats

1. Représenter sur papier millimétré, le nuage de points $(\Delta L_i , \Delta T_i)$ pour les deux tiges Al et Cu.

2. Lisser au sens des moindres carrés, le nuage de points obtenu. Donner l'équation de la courbe d'ajustement $\Delta L = f(\Delta T)$.
3. Déduire les coefficients linéaires de dilatation thermique α_{Cu} et α_{Al}, ainsi que les erreurs absolues correspondantes $\Delta\alpha_{Cu}$ et $\Delta\alpha_{Al}$, respectivement.
4. Comparer les valeurs trouvées avec celles de la littérature.
5. Commenter les résultats.
6. Quelles sont les principales sources d'erreurs dans cette expérience.

ETUDE THERMODYNAMIQUE D'UN MOTEUR A COMBUSTION EXTERNE : MOTEUR DE STIRLING

TP N°3

But du TP

L'objectif de ce TP est d'étudier le fonctionnement du moteur de Stirling, en application des principes de la thermodynamique : premier principe, cycle thermodynamique, isochores…

I. Le moteur de Stirling

I.1 Historique

Inventé en 1816 par le pasteur et ingénieur Robert Stirling, ce moteur est une alternative aux machines à vapeur. Le moteur Stirling utilise l'air plutôt que la vapeur comme fluide de travail contenu dans une enceinte fermée, chauffé 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.

I.2 Fonctionnement du moteur de Stirling

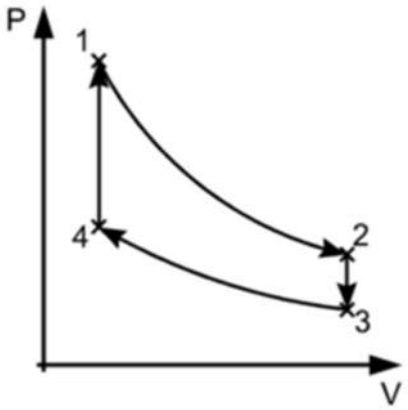


Diagramme de Clapeyron du cycle de Stirling théorique.

Pour simplifier les choses, le cycle thermodynamique du moteur de Stirling peut être divisé en 4 phases : apport de chaleur, expansion, transmission de chaleur et compression. Ils sont représentés schématiquement sur les figures 1 à 6 pour le modèle de fonctionnement étudié.

- **Apport de chaleur :** Pour l'apport de chaleur, le piston déplaceur (P1) se déplace vers le haut et refoule l'air vers le bas dans la zone chauffée du piston déplaceur. La température et la pression augmentent approximativement de façon isochore. Pendant ce temps, le piston moteur se trouve au point mort bas (Fig. 1). Le piston déplaceur dépasse le piston moteur et atteint le point mort

haut. L'air présente désormais le volume le plus faible, la température la plus élevée et la pression la plus haute (Fig. 2).

- **Détente :** L'air chauffé se détend approximativement de façon isotherme et pousse le piston moteur (P2) vers le haut. Pour cela, le travail mécanique est transmis à la tige oscillante par le biais du vilebrequin. Le volume d'air augmente, l'air absorbe la chaleur et la pression diminue (Fig. 3).
- **Dégagement de chaleur :** Pour le dégagement de chaleur, le piston moteur se trouve au point mort haut tandis que le piston déplaceur (P1) se déplace vers le bas et l'air est refoulé dans la zone supérieure du piston déplaceur. L'air est refroidi et la plaque supérieure absorbe la chaleur. Le piston déplaceur atteint le point mort bas (Fig. 4 et 5).
- **Compression :** L'air refroidi est comprimé de façon isotherme par le biais du déplacement vers le bas du piston moteur. Pour cela, le travail mécanique est fourni par la tige oscillante (Fig. 6).

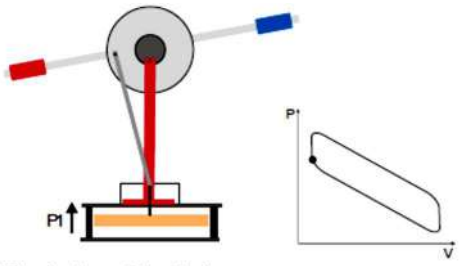


Fig. 1 : Apport de chaleur

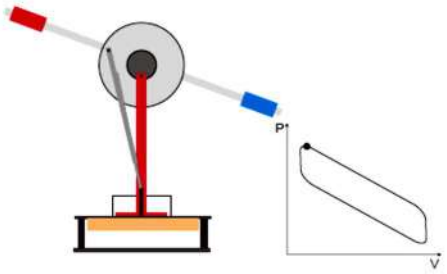


Fig. 2 : Apport de chaleur

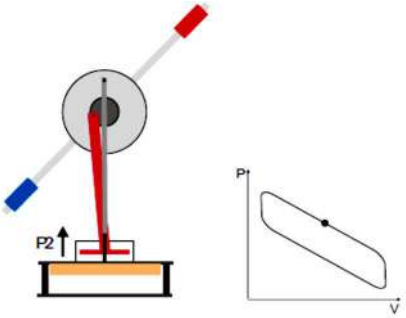


Fig. 3 : Détente

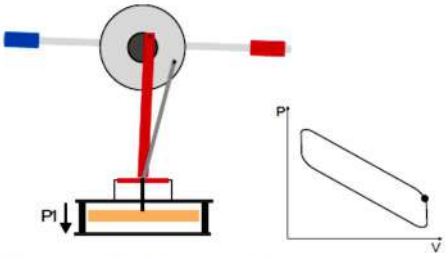


Fig. 4 : Dégagement de chaleur

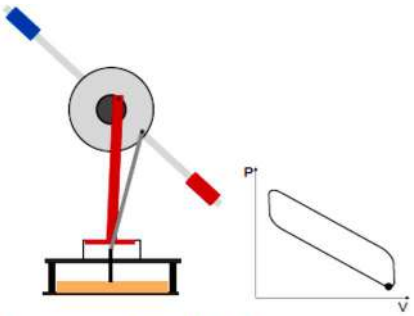


Fig. 5 : Dégagement de chaleur

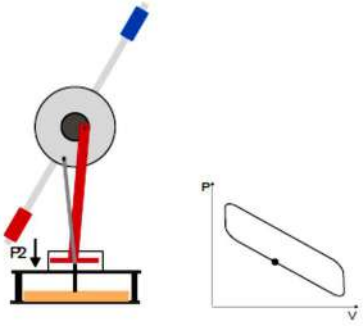


Fig. 6 : Compression

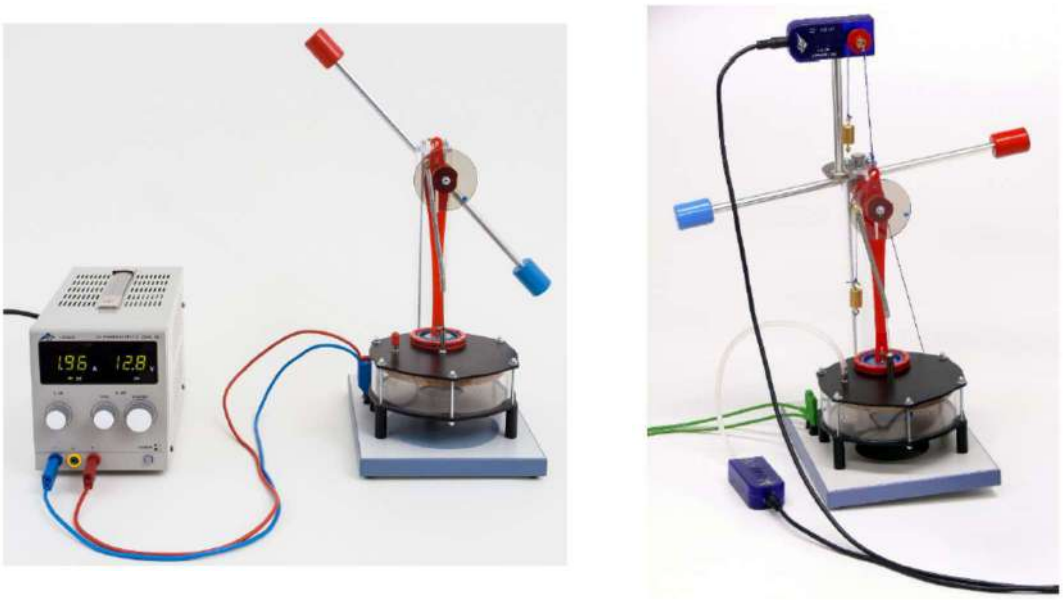
II. Le Cycle de Stirling

II.1 Acquisition du cycle expérimental

L'objectif est de pouvoir tracer la pression du fluide en fonction de son volume.

- **Réalisation :**

1- Connecter l'alimentation à l'entrée de la tension de chauffage.
2- Régler la tension de chauffage 12 V, attendre quelques minutes et démarrer le moteur Stirling monté sur la bielle manuellement en poussant la tige oscillante dans le sens des aiguilles d'une montre tout en regardant le moteur par sa face avant.
3- Démarrer l'enregistrement après la stabilisation de la vitesse.



Montage pour l'enregistrement du diagramme pV

- **Exploitation :**

1. Sur le graphe de la variation de la pression en fonction du déplacement du piston obtenu, on clique sur le point de départ et sur l'extrémité de la courbe. On lit les valeurs correspondantes à $S_{curseur\ droit}$ et $S_{curseur\ gauche}$ et leur différence puis on note les valeurs.
2. Pour déterminer le volume V, on saisit, dans la rubrique « Montage », la formule suivante dans l'éditeur de formule avec le centimètre cube (cm^3) comme unité de mesure :

$$330 + (S - S_{curseur\ gauche})*15/ (S_{curseur\ gauche} - S_{curseur\ droit})$$

3. Tracer le graphe de la pression en fonction du volume en sélectionnant les grandeurs adéquates sur les axes correspondant (Voir l'interface du logiciel).

4. Pourquoi l'allure du cycle est différente du cycle théorique ?
5. Pour que ce cycle soit moteur, dans quel sens doit-on le parcourir ? On justifiera la réponse.
6. Relever du graphe les valeurs max et min de la pression et du volume.
7. Pour rappel, la surface de la courbe du diagramme (p,V) correspond au travail mécanique W prélevé du système :

$$W = \oint_V -p\,dV = \int_{t_1}^{t_2} -p\,\frac{dV}{dt}\,dt = \int_{t_1}^{t_2} -P\,dt$$

avec la puissance : P(t) = $p\,\frac{dV}{dt}$

   a- Tracer l'évolution de la puissance P en fonction du temps, en saisissant dans l'éditeur de formule l'expression permettant son calcul. Elle est donnée par :

   (p/1000)*delta(s)* 15/ ($S_{curseur\ gauche}$ - $S_{curseur\ droit}$)

   b- En vous aidant par l'enseignant, mettez en œuvre une méthode d'estimation du travail mécanique fourni par le cycle étudié.
8. Quel est le travail effectué par course ou par tour ?
9. Calculer la puissance mécanique du moteur.
10. Calculer le rendement réel du cycle.
11. Calculer le rendement théorique du moteur de Stirling, sachant qu'il est égal à celui de Carnot. Comparer et conclure.

EVALUATION DU RENDEMENT D'UN MOTEUR THERMIQUE

TP N°4

I. Objectif:

Il s'agit de mesurer le rendement d'un moteur thermique et le comparer au rendement de Carnot.

II. RAPPEL THEORIQUE :

Au cours d'un cycle, un moteur ditherme (Figure 1) reçoit une quantité de chaleur Q_H de la source chaude à la température T_H, il fournit un travail W au milieu extérieur et restitue une quantité de chaleur Q_C à la source froide à la température T_C.

En appliquant le premier principe de la thermodynamique : $Q_H+Q_C+W=0$

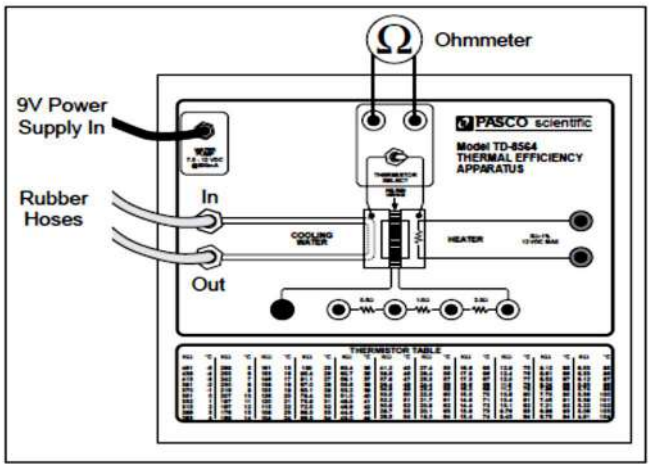


Figure 1 : Moteur Thermique

Le rendement du moteur est par définition $\eta = -\frac{W}{Q_H}$. Il peut être exprimé à l'aide des puissances reçue de la source chaude P_H, et fournie au milieu extérieur P_W :

$$\eta = -\frac{P_W}{P_H}$$

On donne : $P_H = \frac{dQ_H}{dt}$; $P_W = \frac{dW}{dt}$ et $P_C = \frac{dQ_{HC}}{dt}$

Dans le cas d'un cycle réversible (cycle de Carnot) le rendement η_C s'écrit à l'aide des températures T_H et T_C :

$$\eta_C = \frac{T_H - T_C}{T_H}$$

III. MANIPULATION

III.1 Montage

Réaliser le montage suivant (voir figure 2) :

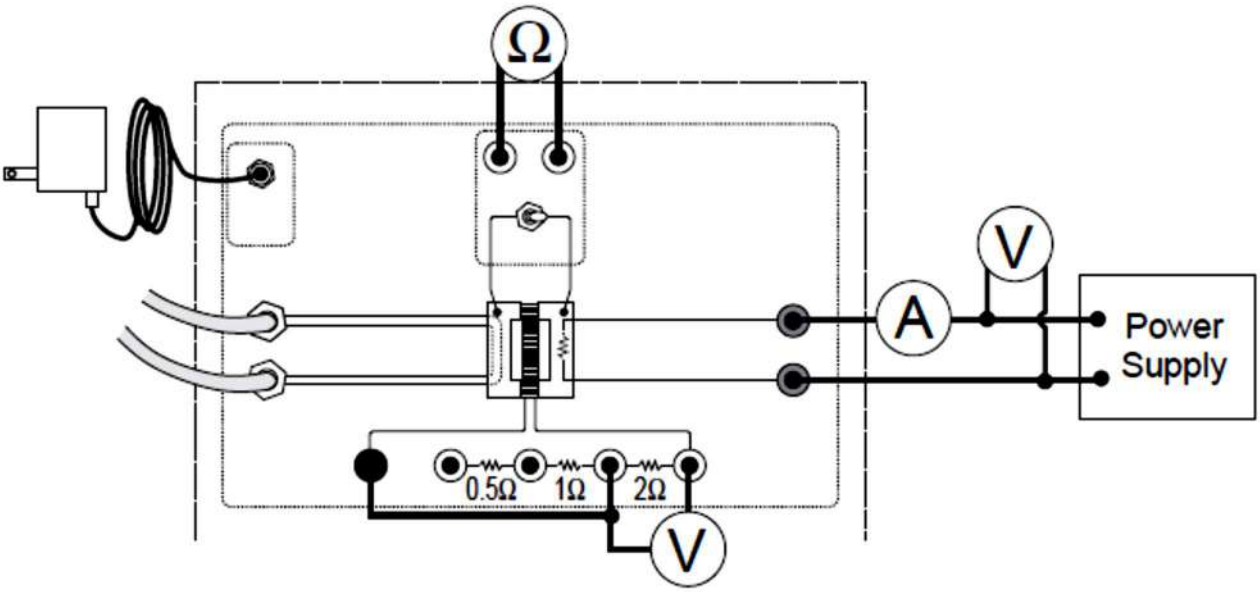


Figure 2 : Montage

a. Plonger la pompe dans un bac contenant le mélange glace-eau.
b. Brancher la pompe à l'alimentation.
c. Brancher l'Ohmmètre aux bornes de la thermistance
d. Brancher l'alimentation à l'entrée du dispositif et ajuster la tension à 11 V environ
e. Brancher le voltmètre aux bornes de la résistance 2Ω comme indiqué sur la figure2.

III.2. Procédure

a. Attendre que le système atteigne l'équilibre : c'est-à-dire attendre que les températures restent constantes (cela peut prendre 5 à 10 minutes)
b. Mesurer les résistances R_H et R_C des sources chaude et froide.

Dans le tableau 1 reporter les valeurs des résistances mesurées, les températures correspondantes, la tension V_H, l'intensité I_H et la ddp V_w aux bornes de la résistance de charge R=2Ω.

c. Diminuer la tension d'alimentation de 2V et reporter l'étape b pour 5 valeurs de V_H.

III.3 Exploitation

a. Pour les 5 valeurs de V_H, calculer la puissance P_H de la source chaude, la puissance P_W.
b. Calculer le rendement du moteur à partir des puissances.
c. Calculer le rendement de Carnot à partir des températures.
d. Reporter les valeurs trouvées dans le tableau 2.

IV. Questions :

a. Tracer sur le même graphe η et η_C en fonction de ΔT. Interpréter et comparer.
b. Quelle fraction (en %) du travail théorique le moteur peut-il fournir ?
c. Quelles applications peut-on espérer pour ce type de moteurs ?

Tableau1 :

Essai	$R_H(k\Omega)$	$R_C(k\Omega)$	$T_H(^oC)$	$T_C(^oC)$	V_H	I_H	V_W
1							
2							
3							
4							
5							

Tableau2 :

Essai	P_H	P_W	$T_H(K)$	$T_C(K)$	$\Delta T(K)$	η	η_C
1							
2							
3							
4							
5							

DETERMINATION DU ZERO ABSOLU

TP N°5

1) Objectif

Il s'agit de déterminer expérimentalement la température du zéro absolu en degré Celsius.

2) Introduction

Le zéro absolu (0 Kelvin) correspondant à la valeur (-273,15°C exactement) est la température la plus basse que l'on puisse envisager. En physique on utilise donc une autre échelle de température appelée température absolue T en Kelvins (symbole K). Cette échelle se déduit simplement de l'échelle des températures θ en degrés Celsius par translation.

$$\mathbf{T(K) = \theta(°C) + 273,15}$$

La détermination expérimentale de la température du zéro absolu en degré Celsius se fait en utilisant un dispositif appelé : **Appareil du zéro absolu** (figure 1).

Cet appareil est piloté par un ordinateur équipé du logiciel« *Data studio* », qui permet de déterminer la relation entre la température et la pression par régression linéaire d'où on déduit le zéro absolu.

Par définition le zéro absolue c'est le point ou le gaz n'exerce aucune pression sur le milieu externe (pression nulle).



Figure1 : Appareil du zéro absolu

3) Théorie

Pour un gaz parfait, la pression absolue est directement proportionnelle à la température absolue du gaz :

$$PV = nRT \Rightarrow \quad T=\frac{V}{nR} P$$

Le graphe de la température en fonction de la pression, déterminé par logiciel « *Data Studio* », est une droite qui s'exprime :

$T= (pente)\ P+b \quad \Rightarrow \quad$ avec $b=0$

Si la température est exprimée en degrés Celsius, la valeur à l'origine ne devient plus nulle.

3) Manipulations

Cas où le nombre de moles est constant

i. Procédure

Dans cette expérience on utilise de l'eau chaude (la plus chaude possible). Puis on la refroidie graduellement en ajoutant des cubes de glaces.

On relie les capteurs de pression et de température à l'appareil du zéro absolu. On se fixe au départ une fréquence de mesure égale à 10 Hz et on plonge complètement la sphère de l'appareil du zéro absolu dans le bac contenant l'eau chaude et en même temps On clique sur START pour commencer les mesures (figure 2). Une fois la température se stabilise on rajoute de la glace à l'eau chaude de manière à diminuer sa température de 10°C. Une fois la température se stabilise on refait la procédure jusqu'à atteindre une température d'eau égale à 10°c. On arrête les mesures à ce moment



Figure 2 : *Photo de l'appareil du zéro absolu immergé dans l'eau*

Remarque : On vide partiellement le bac s'il risque de déborder.

ii. **<u>Question</u>** Déterminer la valeur du zéro absolu.

<u>Cas où le nombre de moles est variable</u>

i. Procédure

L'expérience se déroule de la même manière et dans les mêmes conditions que dans le cas de la première manipulation, sauf que dans cette partie on nécessite trois bacs remplies d'eau à différentes températures (eau à température ambiante, eau chaude et eau glacée).

La sphère de l'appareil du zéro absolu est plongée successivement dans les trois bacs, en utilisent différentes combinaisons.

- **1er combinaison : :(eau froide →eau à température ambiante→ eau chaude)**

On commence par plonger la sphère dans l'eau froide et une fois la température se stabilise, on change de bac tout en gardant la pression constante. On attend que la température se stabilise puis on change de bac comme précédemment. On arrête l'expérience après avoir obtenue une température stable.

- **2em combinaison : (eau à température ambiante →eau chaude →eau froide)**

La même procédure est adoptée, dans ce cas sauf qu'on commence cette fois par l'eau à température ambiante.

- **3em combinaison : (eau chaude →eau froide →eau à température ambiante)**

Comme précédemment on fait notre expérience en commençant par l'eau chaude cette fois ci.

<u>Remarque importante</u>

Il est nécessaire de déconnecter les deux capteurs (pression et température) après chaque combinaison. Pour les reconnectés, il faut que la sphère soit plongée dans le premier bac.

ii. Exploitation des résultats

1. Représentez les évolutions de la température en fonction de la pression pour les différentes combinaisons.
2. A partir des différentes courbes (pour les différentes combinaisons) et en utilisant la régression linéaire déterminer la valeur du zéro absolu
3. Quelle est la combinaison qui donne la valeur la plus proche du zéro absolu ?
4. Déterminer le nombre de mole pour les différentes combinaisons