

المسيلة في : 2019/06/29

رقم: 777/ع.ل.ق.ف/2019

## مستخرج من محضر اجتماع اللجنة العلمية لقسم الفيزياء

وافقت اللجنة العلمية في اجتماعها المنعقد يوم 2019/06/25 على الساعة الواحدة زوالا على المصادقة على مطبوعة الدروس الخاصة بالأعمال التطبيقية (TP) المقدمة من طرف الأستاذ

بن دراجي رزيق  
تحت عنوان:

Travaux pratiques Transferts Thermiques

وهذا بناءا تقرير الخبرة الإيجابي المنجز من قبل الأستاذ سي عبدالله معيوف

رئيس اللجنة العلمية لقسم الفيزياء

أ. معيوف سي عبدالله



**POLYCOPIÉ DES TRAVAUX PRATIQUES**  
**TRANSFERTS THERMIQUE**

**3<sup>ème</sup> Année LMD : Physique Energétique et Energies  
Renouvelables**



**Préparés par :**

**Dr : BENDERRADJI Razik**

**Année universitaire 2018 /2019**

## **Notes aux étudiants**

Il faut préparer soigneusement à l'avance chaque manipulation. L'étudiant doit consulter ses cours et son polycopié de travaux pratiques de façon à savoir ce que l'on est sensé observer et étudier avant d'entrer dans la salle.

L'étudiant une fois en salle de travaux pratiques doit être en mesure de répondre à trois questions importantes: i) le but de la manipulation, ii) les grandeurs à mesurer et les grandeurs recherchées, iii) l'aspect théorique introduit pour expliquer ou exploiter les résultats expérimentaux.

A la fin de chaque séance de travaux pratiques, chaque groupe doit remettre un compte rendu présentant proprement les résultats. Le jugement sera fait non seulement sur la précision et l'exactitude des résultats, mais aussi sur la pertinence des remarques et sur la clarté et la propreté de la présentation du rapport.

L'étudiant est appelé à préserver le matériel mis à sa disposition.

## Préface

Les transferts thermiques sont une science clé de l'énergie. On appelle chaleur l'échange d'énergie qu'il faut ajouter au travail reçu pour obtenir l'échange total d'énergie, et encore « la chaleur, comme le travail, n'est pas une énergie mais un transfert d'énergie ». Destiné en priorité aux étudiants en LMD et aux élèves ingénieurs, ce polycopié aborde les principaux modes de transferts d'énergie: la conduction, le rayonnement et la convection.

Ces phénomènes très différents, mais pouvant interagir, doivent être connus de l'étudiant qui sera confronté un jour ou l'autre à un problème de transfert thermique. Il trouvera dans cette polycopie de nombreuses applications concrètes. Dans ce polycopié, la priorité est donnée à la compréhension physique des phénomènes et à l'apprentissage de la modélisation physique.

Le but de ces travaux pratiques est d'illustrer une partie de ce que vous voyez dans le cours de transfert thermique, d'une part. D'autre part, ces travaux pratiques permettent de vous familiariser avec les méthodes de mesures et de détermination des différents coefficients de transfert thermique.

Enfin, le travail demandé va vous inciter à dépouiller et analyser des données expérimentales, à discuter les résultats obtenus et à rédiger des comptes rendus techniques. Ces trois activités forment l'essentiel de ce que la majorité des étudiants sont appelés à faire le long de leurs carrières. Les comptes rendus sont le véhicule de transmission de vos réflexions, observations et solutions. Votre capacité à composer des rapports clairs et concis augmentera votre crédibilité et propulsera votre réussite. En effet, les résultats les plus intéressants ne peuvent intéresser le lecteur (votre patron ou votre client) que lorsque celui-ci arrive à saisir ce que vous lui présentez, sans s'ennuyer et abandonner la lecture. La capacité de préparer de bons comptes rendus s'apprend par la pratique. C'est la raison pour la quelle on exige un compte rendu bien rédigé. Dans tout travail expérimental, vous devez estimer l'incertitude des paramètres mesurés ou calculés à partir de mesures directes.

Le polycopié est structuré en cinq TP.

Dans la première partie, nous présenterons tout d'abord des généralités sur le transfert thermique, et quelques notions de base de calcul. La seconde partie présente les cinq travaux pratique, en détails de chacune.

## **1- Introduction sur le transfert thermique**

Les procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur (fours, échangeurs de chaleur, induction, refroidissement, chauffage). Les phénomènes de transfert thermique et en particulier de la chaleur, ont une importance décisive pour l'étude et le fonctionnement des appareils tels que ; les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs de chaleur, les condenseurs, ...etc. En raison de développement rapide de l'industrie et l'accroissement de la demande et du prix de l'énergie, l'utilisation efficace d'une installation (d'échange de chaleur) pour une dépense d'énergie minimale est le but recherché dans tous les cas.

Le transfert thermique est la science qui tente à prédire le transfert d'énergie entre les molécules ou les particules de la matière à différentes températures. Le but est d'expliquer la manière et de prédire le taux d'échange de la chaleur sous certaines conditions spécifiques. Il complète les deux premiers principes de la thermodynamique par des lois expérimentales additionnels afin d'établir les proportions de transfert d'énergie.

Le transfert de chaleur est une science qui contient plusieurs concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industriels. Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents, la conduction, la convection et le rayonnement. Les connaissances de base dans ce domaine, sont donc indispensables pour comprendre et maîtriser l'utilisation pratique de ces phénomènes.

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre une fois la différence de température entre elles établie. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation. Dans la littérature relative à cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

## **2- Modes du transfert de la chaleur**

### **a) La conduction**

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur au sein d'un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Elle s'effectue selon deux mécanismes différents: une transmission par vibration des molécules ou atomes et une transmission par les électrons libres. Ce mode se produit au sein d'une même phase au repos ou mobile, en présence d'un gradient de température. Dans ce cas, le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.

### **b) La convection**

La convection consiste essentiellement en la transmission de l'énergie par le mouvement ou le déplacement macroscopique d'une parcelle (grand nombre de molécules), généralement d'un fluide d'une région à autre. Ce mécanisme est accompagné toujours par le transfert d'énergie dû au mouvement moléculaire et qui représente le côté conductif de ce mode. On distingue deux types de convection ; la convection naturelle (convection libre) où le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. La différence de température implique une différence de masses volumiques (déplacement des particules,

dilatation), exemple (chauffage de l'air pour une montgolfière, chauffage de l'eau dans un récipient). La convection forcée où le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques, (d'une pompe par exemple). Le transfert de la chaleur par convection, se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement, en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques ( $\rho$ ) due aux différences de températures.

### c) Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas de support matériel. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques.

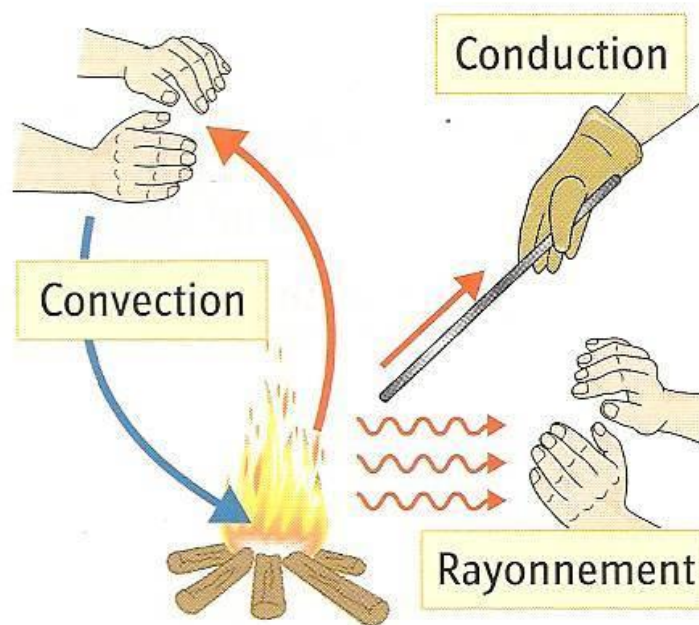


Figure.1: illustration des trois modes du transfert de la chaleur

## 3- Lois fondamentales du transfert de la chaleur

### 3-1 Loi fondamentale de la conduction (loi de J.Fourier)

La loi fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction, a été proposée par le mathématicien et physicien Français, Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822.

- Considérons une plaque plane (D), de surface (S) et d'épaisseur (e) (voir Figure.2);
- Soit dQ, la quantité de chaleur échangée entre la plaque et l'air ambiant pendant le temps dt ;

- On définit le flux de chaleur (flux thermique,  $\phi$ ) comme la puissance échangée entre la surface  $S$  de la plaque et le milieu extérieur.

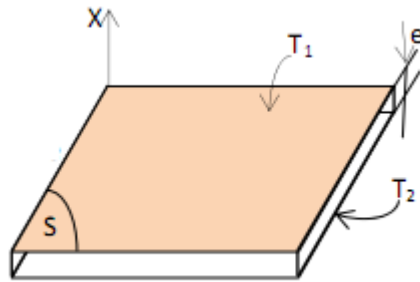


Figure.2 : plaque plane.

$$\phi = \frac{dQ[J]}{dt [s]} [W] \quad (1)$$

On définit la densité de flux thermique comme la puissance échangée par unité de surface de la plaque:

$$\phi = \frac{dQ[J]}{S dt [m^2 \cdot s]} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

- Les principes fondamentaux de la thermodynamique nous font savoir que :
  - ❖ L'énergie est conservée en l'absence d'une source de chaleur ;
  - ❖ La chaleur transmise passe toujours du corps chaud vers le corps froid (dans notre cas :  $T1 > T2$ ).

On peut vérifier expérimentalement que :

$$Q = \lambda \cdot S/e \cdot (T1 - T2) \quad (3)$$

Tels que ;

$Q$  : la quantité de chaleur échangée à travers la surface ( $S$ );

$\lambda$  : le facteur de proportionnalité appelé conductivité thermique qui est une caractéristique du matériau, son unité de mesure est  $[W/m.K]$  ou  $[kcal/h.m.C]$ ;

Pour un élément infinitésimal,  $ds$ , la relation (3) s'écrit:

$$dQ = - \lambda \cdot ds \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Le signe (-) : pour tenir compte du sens de flux thermique, le gradient qui va de la plus grande grandeur à la plus petite est négative (voir interprétation mathématique ci-après).

L'équation (4) est attribuée au mathématicien et physicien Français J. B. Fourier qui en 1822 énonça sa loi et qui peut se traduire comme suit : (En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantané, est proportionnelle à la conductivité thermique du milieu et au gradient de température).

La forme vectorielle de cette loi qui exprime la densité de flux thermique est définie comme étant la quantité de chaleur transmise par unité de surface, soit :

$$\vec{\varphi} = \lambda. \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (5)$$

### 3-2 Loi fondamentale de la convection (loi de I. Newton)

La loi fondamentale de la convection est la loi d'Isaac Newton (1643-1727), traduite par la relation expérimentale de flux de chaleur échangé par convection entre un fluide et une paroi solide.

$$\Phi = h.S (T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}) \quad (6)$$

$$h = k_{\text{fluide}} / \delta \quad \text{Tells que;}$$

$\delta$  : représente l'épaisseur d'un film mince du fluide adhérent à la paroi solide;

$k_{\text{fluide}}$  : la conductivité thermique du fluide

$h$  : représente le coefficient du transfert de chaleur par convection ; [W/m<sup>2</sup>.K] ou [kcal/h.m<sup>2</sup>.C]

### 3-3 Loi fondamentale du rayonnement (loi de Stefan-Boltzmann)

Le flux de chaleur rayonné par un milieu de surface (S) et de température (T) s'exprime grâce à la loi de Joseph Stefan (1835-1893) et Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)

$$\Phi_{\text{émis}} = \varepsilon . \sigma . S . T^4 \quad (7)$$

Tells que ;

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 4.92.10^{-8}$  kcal/h.m<sup>2</sup>.K

$\varepsilon$  : l'émissivité de la surface sans unité et  $T$  en [K]

### Remarques générales :

$$\Phi = \frac{(T_1 - T_2)}{e/k.s} \quad , \quad \text{tel que ;}$$

$R_{th} = e/k.s$  représente la résistance thermique que le matériau oppose à l'écoulement de la chaleur par conduction.

L'inverse de la résistance thermique représente la conductance thermique et désignée par :

$$K_{th} = k.s/e$$

$k/e$  : représente la conductance thermique par unité de surface et est appelé l'unité de conductance thermique pour l'écoulement de la chaleur par conduction.

En convection, la résistance thermique de transfert de chaleur, et qui représente l'inverse de la conductance thermique par convection est donnée par :

$$R_{th} = 1/h.s$$

$h$  : représente aussi, l'unité de conductance thermique moyenne de convection, le coefficient superficiel de transmission de la chaleur par convection ou le coefficient d'échange de chaleur par convection.

## TP1 : Conduction

### Conduction linéaire

#### Introduction

La conduction thermique est un mode de la Transfert de chaleur qui a lieu dans un matériel. C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\phi = -\lambda S \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Avec :  $\phi$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ )

**Objectifs** : Les objectifs du TP sont multiples :

1. La démonstration expérimentale de la loi de Fourier ;
2. Détermination de la conductivité thermique ;
3. Détermination de la résistance thermique.

#### Description de l'appareillage :

L'appareil se compose d'une console électrique et de deux modules distincts, chauffés électriquement et montés sur un support. Un des modules contient un ensemble de barreaux cylindriques métalliques servant à une série d'expériences sur la conduction linéaire axiale (problème du mur) ; l'autre module comprend un disque cylindrique utilisé pour l'étude de la conduction radiale. Ces deux modules sont équipés respectivement de 9 et 6 sondes de température. Une circulation d'eau de refroidissement, prélevée sur un robinet de distribution et munie d'un régulateur de débit et d'un débitmètre de contrôle, est reliée à l'extrémité du barreau linéaire refroidi ou à la périphérie du disque cylindrique, de manière à maintenir dans les modules un gradient de température constant.

La console électrique permet une mesure précise des températures à l'aide de sondes à thermistances, à réponse rapide, avec une résolution de  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  (affichage numérique). Le circuit de commande de l'alimentation du chauffage fournit une puissance de sortie variable de 0 à 100 Watts, à réglage progressif et affichage numérique. Les modules d'essai sont conçus pour minimiser les erreurs dues au transfert réel en trois dimensions, ainsi que les phénomènes de convection et de radiation. Les barreaux et le disque sont entourés d'un manchon de nylon isolant qui définit un matelas d'air autour de chaque module.

Le barreau servant aux essais linéaires comprend une série de sections intermédiaires interchangeables de diverses matières conductrices. Les faces extrêmes des sections métalliques sont bien finies de manière à assurer un bon

contact thermique. Cependant, en vue de réduire encore la résistance thermique de contact, on peut appliquer une fine couche de produit conducteur.

L'unité ou l'appareil est développée par EDIBON est constitué de deux modules d'échange de chaleur

- **Le module de conduction linière** : constitué par deux barres cylindriques à sections multiples, en laiton, alignées et isolées. Une barre est chauffée électriquement tandis que l'autre est refroidie à l'eau. Une section intermédiaire de 30 mm peut être insérée entre les deux barres. Chaque barre est munie de trois points de mesure de température le long de son axe installé à des intervalles de 10 mm.
- **Le module de conduction radiale** : constitué d'un disque isolé en laiton d'épaisseur 3mm chauffé en son centre par une résistance électronique et refroidi sur sa périphérie ce disque est équipé de six prises de température positionnées radialement.

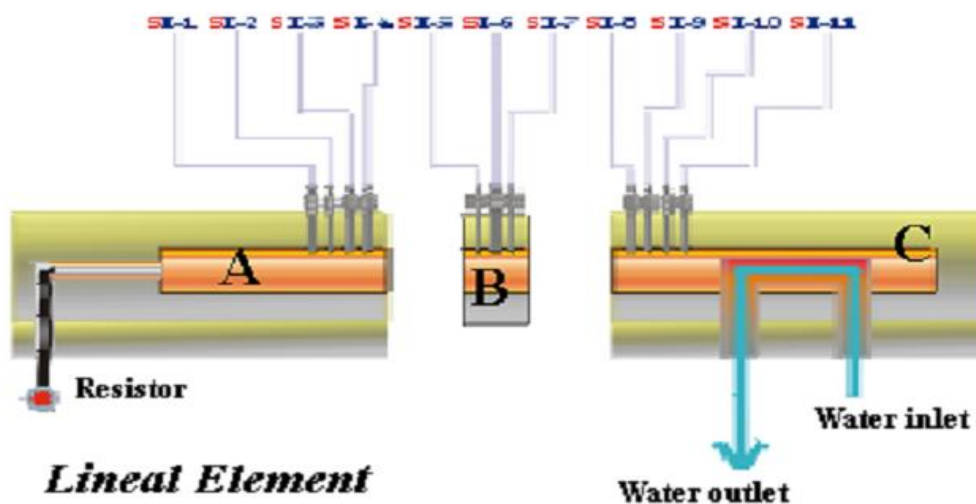
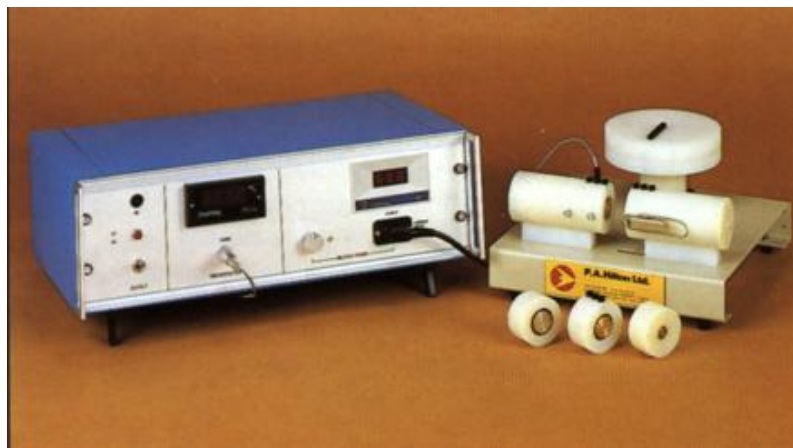


Figure 1 : Dispositif expérimental (*Module de conduction linière*)

## Consignes pour la réalisation du montage

- Brancher la prise de l'élément chauffant du module linéaire sur la face avant de la console électrique.
- Mettre l'interrupteur électrique mural sur ON.
- Mettre l'interrupteur de la console électrique sur ON.
- Tourner la commande de l'élément chauffant située sur la console électrique dans le sens inverse des aiguilles d'une montre pour l'amener en butée vers la gauche. La valeur affichée sur le wattmètre est alors égale à zéro.
- Ouvrir le robinet d'alimentation en eau de refroidissement. Régler le débit à une valeur moyenne, constante au cours de l'expérience.

## Mesures à réaliser

1) Régler la commande de chauffage du module de façon à ce que le flux thermique affiché soit égal à  $\phi_A = 20W$  et déclencher le chronomètre. A l'aide du commutateur de mesures des températures, relever T1 et T9 toutes les 5 minutes pendant 45 minutes environ.

Tracer les courbes d'évolution de T1 et T9 en fonction du temps. Noter le temps au bout duquel le régime permanent est atteint. Relever alors les températures T1, T2, ...T9 ainsi que  $\phi_A$ .

2) Modifier la puissance de chauffage pour obtenir  $\phi_B = 35W$ . Chronométrer à nouveau pendant 45 minutes puis relever les températures d'équilibre des 9 sondes.

3) Modifier à nouveau la puissance de chauffage pour obtenir  $\phi_C = 50W$ . Chronométrer pendant 45 minutes puis relever les températures d'équilibre des 9 sondes.

Ramener la puissance de chauffage à zéro dès que les mesures sont achevées. Enlever la section 7 et laisser en attente.

## Exploitation des résultats

Remplir le tableau ci-dessous :

	$\phi_w$	$T(min)$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$\frac{dT}{dX}$	$\lambda$	$\bar{T}$
Essai A			45											
Essai B			45											
Essai C			45											

Tracer les variations de température  $T$  en fonction de la distance  $X$  à l'élément chauffant pour les essais A, B et C. Conclusions.

Pour chaque essai, calculer le gradient de température  $\frac{dX}{dT}$ . En déduire la conductivité thermique du laiton  $\lambda(\bar{T})$  sur l'intervalle (T1,T9). On admettra que la valeur obtenue pour  $\bar{T}$  correspond à une température = T5.

Tracer la courbe expérimentale de variation de  $\lambda$  avec  $\bar{T}$  pour les différents flux. Conclusion.

## Conduction Radiale

### Introduction

Dans le cas de cette deuxième manipulation, on s'intéressera à la conduction radiale à travers un cylindre. On considère un cylindre creux de conductivité thermique  $\lambda$ , de rayon intérieur  $R_1$ , de rayon extérieur  $R_2$ , de longueur  $L$ , les températures des faces internes et externes étant respectivement  $T_1$  et  $T_2$ . On suppose que le gradient longitudinal de température est négligeable devant le gradient radial.

De la même manière, La loi de Fourier stipule: la densité de flux est proportionnelle au gradient de température est donnée par la formule :

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dr}, \quad \text{Avec :}$$

$\Phi$  Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$  Conductivité thermique du milieu ( $W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )

$r$  Variable radiale (rayon) dans la direction de propagation du flux de chaleur (m)

$S$  Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ )

Cette écriture n'est valable que si le régime est permanent et que la conductivité est constante au cours du processus de conduction ou de diffusion.

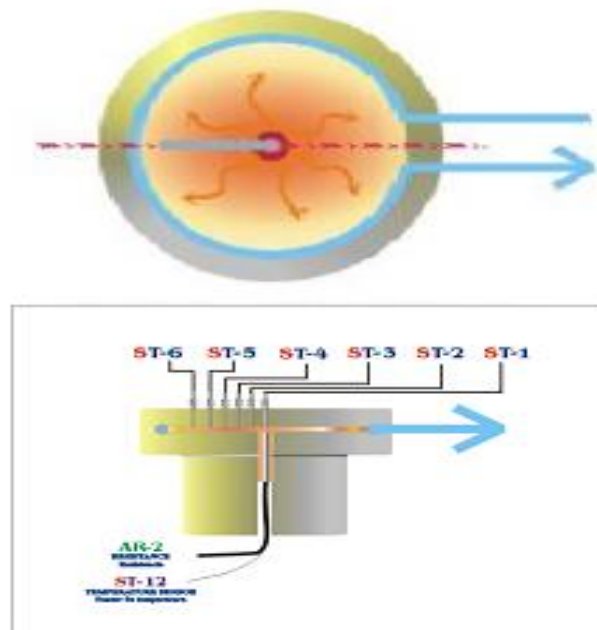
### Objectif

Les objectifs du TP sont multiples :

Examiner le profil de température et déterminer le flux de transfert de chaleur résultant de la conduction à travers les parois d'un cylindre.

### Description de l'appareillage :

Le module de conduction radiale est constitué d'un disque isolé en laiton d'épaisseur 3mm chauffé en son centre par une résistance électronique et refroidi sur sa périphérie ce disque est équipé de six prises de température positionnées radialement.



**Figure 1 : Dispositif expérimental (*Module de conduction radial*)**

### Consignes pour la réalisation du montage

- Débrancher la prise de l'élément chauffant du module linéaire et brancher à sa place celle du module radial.
- Débrancher délicatement les sondes T1, T2, T3, T4, T5, T6 du module linéaire et les installer sur les broches du module radial, la sonde T1 étant située au centre du module.
- Remettre l'interrupteur de la console électrique sur ON.

### Mesures à réaliser

- 1) Régler la commande de chauffage du module de façon à ce que le flux thermique affiché soit égal à  $\phi_A = 10w$  et déclencher le chronomètre.
- 2) Relever T1 et T6 toutes les 5 minutes pendant 45 minutes environ.
- 3) Tracer les courbes d'évolution de T1 et T6 en fonction du temps.

4) Noter le temps au bout duquel le régime permanent est atteint. Relever alors les températures T1 à T6 ainsi que  $\phi_A$ .

5) En fin de séance, ramener la puissance de chauffage à zéro. Couper la console électrique. Fermer l'interrupteur mural et couper la circulation d'eau de refroidissement.

### Exploitation des résultats

Remplir le tableau ci-dessous :

	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$
Essai A		20	45			

Tracer les variations de température T en fonction du rayon r du cylindre pour  $0 \leq r \leq R_f$  sachant que le rayon intérieur du cylindre est  $R_i = 4$  mm et que le rayon externe est  $R_f = 55$  mm. Conclusion.

Déterminer graphiquement les températures limites  $T_i$  pour  $r = R_i$  et  $T_f$  pour  $r = R_f$ . En déduire la résistance thermique  $\mathfrak{R}$  du disque.

Tracer la courbe  $T = f(\ln r)$  pour  $R_i \leq r \leq R_f$ . Conclusion.

Calculer, à partir de la valeur expérimentale obtenue pour  $\mathfrak{R}$ , la conductivité thermique du

laiton  $\lambda$ . On prendra  $\lambda$  pour  $\bar{T} = \frac{T_1 + T_6}{2}$ .

Comparer la valeur de  $\lambda$  obtenue pour le module radial avec les valeurs obtenues pour le module linéaire.

**Remarque :** Pour la conduction radiale la Théorie de la loi de Fourier est commet suite  
En régime permanent, et conductivité constante, l'équation générale de conduction s'écrit comme suite :

$$\lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

Ce réduit à l'expression suivante :

$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0}$$

Qu'on peut la réécrire sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \Rightarrow r \frac{\partial T}{\partial r} = A \text{ (avec A est une contante quelconque)}$$

$$\Rightarrow \partial T = A \frac{\partial r}{r} \Rightarrow \int \partial T = \int A \frac{\partial r}{r} \Rightarrow \boxed{T(r) = A \ln r + B}$$

Les conditions aux limites imposent :

$$\text{à } r = R_1: T(R_1) = T_1$$

$$\text{à } r = R_2: T(R_2) = T_2$$

Aussi,

$$T_1 = A \ln R_1 + B, \quad \text{et: } T_2 = A \ln R_2 + B$$

$$\text{Ainsi : } T_1 - T_2 = A \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \Rightarrow A = \frac{T_1 - T_2}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \text{ et: } B = T_1 - A \ln R_1$$

$$\Rightarrow B = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \ln R_1$$

L'expression finale de la température prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} T(r) &= \frac{T_1 - T_2}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \ln r + T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \ln R_1 = T_1 + \frac{T_1 - T_2}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} (\ln r - \ln R_1) \\ &= T_1 + (T_1 - T_2) \frac{\ln \left( \frac{r}{R_1} \right)}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \Rightarrow T(r) = T_1 + (T_1 - T_2) \frac{\ln \left( \frac{r}{R_1} \right)}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \end{aligned}$$

Le flux de chaleur est adonné par l'expression :

$$\phi = -\lambda S \frac{dT}{dr} = -\lambda 2\pi r l \frac{1}{r} \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \Rightarrow \phi = \frac{\lambda 2\pi l}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} (T_1 - T_2)$$

# TP 3 : Transfert de chaleur par Convection naturelle et Convection forcée dans des surfaces planes

## Introduction

La convection est un des trois modes de transfert de chaleur avec la conduction et le rayonnement. Le terme de convection fait référence aux transferts de chaleur se produisant entre une surface et un fluide en mouvement lorsque ceux-ci sont à des températures différentes. En plus du transfert d'énergie dû à la diffusion, il y a également transfert par le biais du mouvement du fluide. Ce dernier est associé au fait que de multiples molécules ont un mouvement collectif, ce qui implique un transfert de chaleur dans le cas où il existe un gradient thermique.

La contribution due au mouvement aléatoire des molécules, la diffusion, domine près de la surface où la vitesse du fluide est faible. En effet, à l'interface entre la surface et le fluide, étant donné que la vitesse du fluide est nulle, le seul mode de transfert est la diffusion. La contribution due au mouvement du fluide tient son origine du fait que la couche limite croît au fur et à mesure de l'avancée du fluide sur la surface. Le transfert thermique par convection est divisé en deux parties suivant la nature de l'écoulement :

La convection est un transfert de chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert ne concerne donc que les fluides ou les échanges entre un solide et un fluide. Dans le cas d'un transfert entre un solide et un fluide, la puissance transférée par convection est donnée par la relation suivante :

$$\phi = h S(T_p - T_f) \quad (1)$$

Avec :

$T_p$ : la température de la paroi du solide ;

$T_f$ : la Température du fluide loin de la paroi ;

$h$  : le coefficient d'échange de surface. Sa détermination fait intervenir des relations de corrélations entre des nombres sans dimension, déterminés à partir des propriétés thermo physiques du fluide.

On distingue deux types de convection :

➤ **La convection libre** (ou naturelle) dans laquelle les mouvements du fluide sont dus aux variations de masse volumique,

➤ **La convection forcée** dans laquelle les mouvements du fluide sont imposés par une pompe ou un ventilateur.

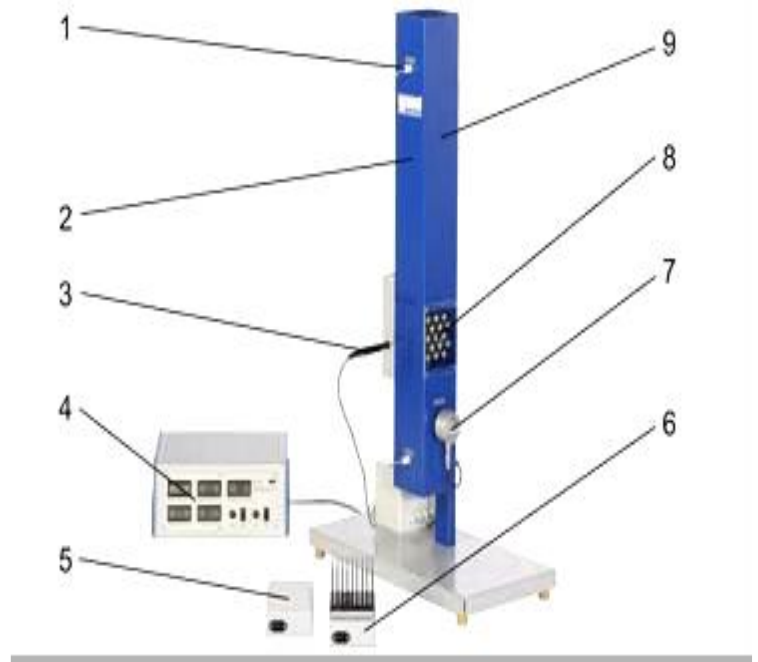
**Objectifs** : Les objectifs du TP sont multiples :

- Calculer le flux de chaleur échangée par convection naturelle et forcée ;
- Calculer le coefficient d'échange par convection.
- comparer les résultats expérimentaux du coefficient  $H$  à celle trouvée dans la théorie .

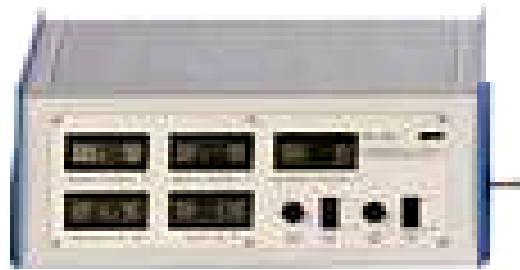
**Description de l'appareillage** :

L'appareil WL 352 (Figure 1) est destiné à la transmission de la chaleur (Convection libre et convection forcée dans un écoulement d'air)

- 1- capteur de température.
- 2 - canal d'air.
- 3 - thermocouple type K.
- 4- appareil d'affichage et de commande.
- 5- élément chauffant "plaque".
- 6- élément chauffant "ailettes".
- 7- capteur d'écoulement,
- 8- élément chauffant "faisceau tubulaire".
- 9- raccord de mesure pour thermocouple



**Figure 1 :** L'appareil WL 352(Transfert de chaleur par convection)



**Figure 2 :** Amplificateur de mesure

Dans le mode de transfert thermique par convection, l'analyse adimensionnelle intervient afin de pouvoir calculer les caractéristiques du régime d'écoulement et le coefficient d'échange convectif  $h$ .

On travaille généralement avec 4 modèles pour exprimer les calculs se sont :

Nombre de Nusselt	$Nu = \frac{hl}{\lambda}$	$h$ : coefficient de convection l : longueur caractéristique $\lambda$ : conductivité thermique du fluide	$Nu$ traduit la qualité de l'échange thermique : une augmentation de ce nombre traduit une contribution importante de l'écoulement sur l'échange de chaleur avec la paroi
Nombre de Prandtl	$Pr = \frac{\nu}{a}$	$\nu$ : viscosité cinématique $a$ : diffusivité thermique du fluide	$Pr$ compare l'aptitude du fluide à diffuser la quantité de mouvement par le biais de sa viscosité à son aptitude à diffuser la chaleur par le biais de sa diffusivité thermique
Nombre de Reynolds	$Re = \frac{Ud}{\nu}$	$U$ vitesse moyenne de l'écoulement, $d$ dimension caractéristique et $\nu$ viscosité cinématique du fluide	
Nombre de Péclet	$Pe = \frac{Ud}{\alpha}$	$U$ vitesse moyenne de l'écoulement, $d$ dimension caractéristique et $\alpha = \frac{\nu C_p}{\lambda}$ diffusivité thermique du fluide	une valeur élevée de $Pe$ traduit une distorsion importante du champ de température due à l'écoulement par rapport à ce qu'il serait si seule la diffusion était présente

Le nombre de Nusselt est variée selon l'écoulement de fluide (turbulent ou laminaire) donc coefficient d'échange de chaleur par convection sera aussi variée

Dans le cas de convection libre pour une plaque verticale de longueur L le nombre de Nusselt est calculé par la relation suivante :

$$Nu = \left\{ 0.825 + 0.387Ra^{1/6} \left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-8/17} \right\}^2 \quad \text{où } h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

Où :  $k$  est la conductivité thermique de l'air à 25°C = 0.02603W/m.K

$L$  : est la longueur caractéristique de l'élément (0.098 m)

### Consignes pour la réalisation du montage

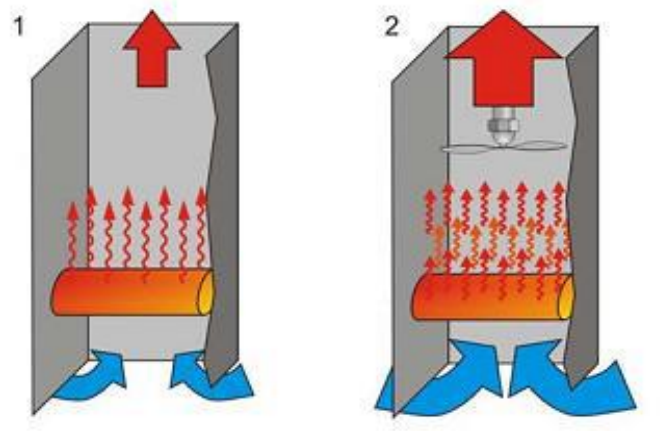
Les valeurs de la puissance de résistance utilisées dans ce TP doit être petite (vers des valeurs maximales de 50 à 60 % dans l'AR-1) lorsque l'appareil étant des valeurs de risque et de prévention du choc et de sécurité.

1-Activer l'amplificateur de mesure ; Fixer la source de chaleur choisie (plaque plane, faisceau tubulaire, ailettes) 3 Échangeurs en aluminium,

- Échangeur de chaleur plat,
- Échangeur de chaleur à goujons.
- Échangeur de chaleur à ailettes.

1. Activer l'interrupteur de puissance électrique et choisissez une puissance pour échauffer la source de chaleur ;

2. placez l'échangeur plat dans la tour. Un thermocouple est relié à l'échangeur (ST8-dans l'unité TXC-FF ou ST-0 dans l'unité TXC-FFB), les autres thermocouples, sont connectés à l'orifice du tunnel.
3. Réguler la puissance de l'AR-1 résistance (%) avec des valeurs prédéfinies.
4. Patienter (30 à 40 minutes) pour que l'air à l'intérieur de la conduite s'échauffe
5. Noter  $T_0$  la température auprès de la source de chaleur déterminée par le thermocouple type K
6. Enregistrer les valeurs qui s'affichent à l'amplificateur de mesure tel que
  - $T_1$  (température de l'air à l'entrée)-
  - $w$  (vitesse de l'air)
  - $T_2$  (température de l'air à la sortie),
  - $P$  (puissance électrique).



**Figure 3:** convection libre sur élément chauffant (1), convections forcées sur élément chauffant (2)

## Mesures à réaliser

### 1- Données pour la série du TP

La température ambiante :  $20\text{C}^\circ$

La longueur caractéristique de l'élément :  $0.098\text{ m}$

La surface de la plaque plane :  $0.009604\text{ m}^2$

Le nombre de Prandtl :  $0.7$

La viscosité cinématique de l'air à ( $20\text{C}^\circ$ ) :  $1.513.10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$

La conductivité de l'air à ( $20\text{C}^\circ$ ) :  $0.02603\text{W}/\text{m.K}$

La chaleur spécifique de l'air à ( $20\text{C}^\circ$ ) :  $1007\text{J}/\text{Kg.K}$

Efficacité  $AR1(\%) = (Q_{\text{exp}}/Q_{\text{th}})*100$

**Exploitation des résultats** (*convection naturelle*)

- 1) Calculer les nombres adimensionnelle intervient afin de pouvoir calculer les caractéristiques du régime d'écoulement et le coefficient d'échange convectif  $h$ .

$Pr$ ,  $Ra$ ,  $Nu$ ,  $h$   $th$

- 2) Remplir les tableaux ci-dessous :

$AR1(\%)$	$AR(w)$	$ST8= STs$	$ST1$	$ST4$	$ST7$	$ST$ <i>moye</i>	$\Delta T$
<b>20</b>							
<b>30</b>							
<b>40</b>							
<b>50</b>							
<b>60</b>							

$AR1(\%)$	$Ra$	$Nu$	$h$ $th(w/m^2k)$	$H exp$	$Q(w) th$	$Eff (\%)$	$temps$
<b>20</b>							
<b>30</b>							
<b>40</b>							
<b>50</b>							
<b>60</b>							

- 3) Tracer le graphe  $Q = f(t)$  :
- 4) Interprétations des résultats :
- 5) Conclusion :

## Exploitation des résultats (*convection forcée*)

### Remarque

Pour la convection forcée on suivra les même étapes et on ajoute une action extérieur représentée par la ventilation et on choisi une vitesse pour le mouvement du fluide.

- 1) Calculer les nombres adimensionnelle intervient afin de pouvoir calculer les caractéristiques du régime d'écoulement et le coefficient d'échange convectif  $h$ .

$Pr$ ,  $Ra$ ,  $Nu$ ,  $h_{th}$

- 2) La vitesse de l'air et le régime d'écoulement

- 3) Remplir les tableaux ci-dessous :

<b>AR1(%)</b>	<b>AR1(w)</b>	<b>ST8= STs</b>	<b>ST1</b>	<b>ST4</b>	<b>ST7</b>	<b>ST moy</b>	<b><math>\Delta T</math></b>
20							
25							
30							
35							
40							
50							

<b>AR1(%)</b>	<b>Re</b>	<b>Nu</b>	<b>Pr</b>	<b><math>Q_{exp}(w)</math></b>	<b><math>Q_{th}(w)</math></b>	<b>Eff(%)</b>	<b><math>h_{th}</math></b>	<b><math>h_{exp}</math></b>
20								
25								
30								
35								
40								
50								

- 4) Interprétations des résultats :

- 5) Conclusion :

# TP 4 : Transfert de chaleur par rayonnement

## Introduction

Le rayonnement thermique est distribué de façon continue sur tout le spectre électromagnétique.

Cependant, en fonction de la température du corps émetteur, il se concentre dans une certaine région du spectre. Ainsi, à température ambiante, le rayonnement est important dans l'infrarouge (IR, longueur d'onde  $\lambda \approx 10 \mu\text{m}$ ), communément associé à la production de chaleur. A plus haute température  $T$ , le spectre d'émission se déplace vers le visible, comme dans le cas du soleil

( $T \approx 5800 \text{ K}$ ), en commençant par le rouge. Dans une lampe à incandescence, le filament se trouve à une température de  $2800 \text{ K}$ , émettant seulement une petite partie de son énergie (environ 5%) dans le spectre visible et le reste dans l'IR, raison pour laquelle une telle lampe chauffe plus le milieu ambiant qu'elle n'éclaire. Une lampe halogène opère à plus haute température ( $3200 \text{ K}$ ), de sorte que la portion du spectre d'émission comprise dans le domaine du visible est élargie. Par conséquent, une telle lampe ou une résistance (chaude) possède une meilleure efficacité énergétique qu'une lampe à incandescence classique.

Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps, séparés par du vide ou un milieu transparent, par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Nous ne considérerons que les corps solides opaques au rayonnement.

Pour l'étude du rayonnement, on définit un corps de référence appelé le corps noir dont on peut déterminer les propriétés. La seule propriété qui nous intéressera par la suite est l'émittance  $M$  définie comme étant la puissance émise par unité de surface sur toute la gamme de longueur d'ondes (entre 0 et  $\infty$ ) dans tout le demi-espace supérieur. On démontre que :

$$M = \sigma T^4 \quad (1)$$

$T$  : la température absolue du corps considéré (K) ;

$\sigma$  : la constante de Stefan.

Les propriétés des corps réels sont définies par rapport à celles du corps noir. On ne considérera par la suite que l'approximation du corps gris diffusant. Dans ce cas, les propriétés du corps réel sont déduites de celles du corps noir par simple multiplication par l'émissivité  $\varepsilon$ . L'émissivité est un nombre strictement inférieur à 1. La puissance échangée entre deux corps (respectivement de surface  $S_1$ , température  $T_1$  et de surface  $S_2$ , température  $T_2$ ) se met sous la forme :

$$Q = S_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

$F_{1,2}$  : un nombre sans dimension appelé facteur de forme qui fait intervenir la géométrie considérée et les émissivités des 2 corps.

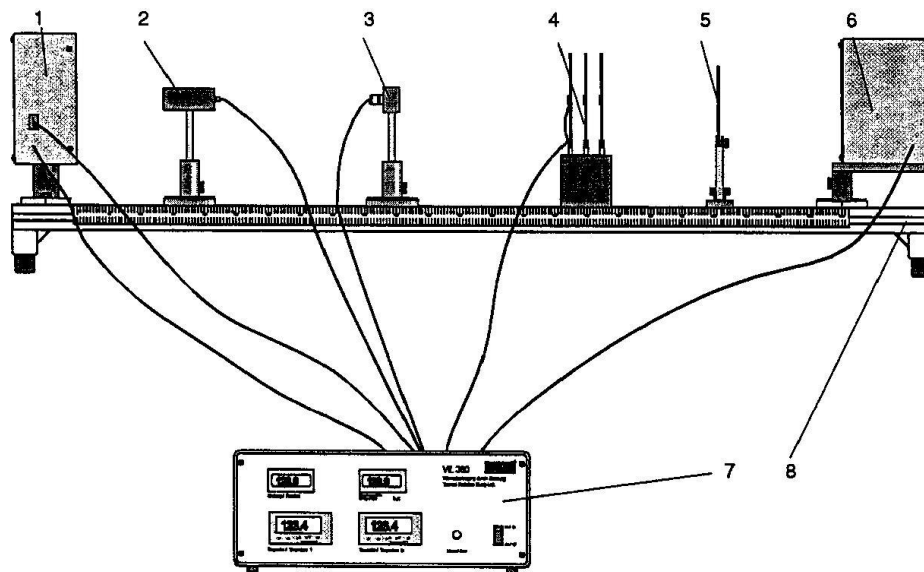
**Objectifs :** Les objectifs du TP sont multiples :

- L'exposant de la loi de Stefan Boltzmann, et la valeur de la constante de Stefan Boltzmann ;
- La loi de l'inverse du carré de Lambert ;
- La loi du cosinus de Lambert.

**Description de l'appareillage :**

L'appareil WL 360 (Figure. 1) est destiné pour la transmission de la chaleur par rayonnement. L'appareil WL 360 transmission de la chaleur par rayonnement est destiné à l'analyse des conformités à la loi du rayonnement en prenant l'exemple du rayonnement thermique et lumineux.

L'appareil possède un corps thermorayonnant sous forme de source noire avec pile thermoélectrique correspondant qui mesure l'intensité lumineuse. Un luxmètre avec source lumineuse saisit l'intensité lumineuse, des thermocouples mesurent la température.



**Figure 1 :** L'appareil WL 352 (Transfert de chaleur par rayonnement).

- 1) Corps thermorayonnant.
- 2) Pile thermoélectrique pour la mesure du rayonnement, sur support rotatif.
- 3) Luxmètre pour mesurer l'intensité lumineuse, sur support rotatif.
- 4) Plaque d'absorption avec points de mesure de température.
- 5) Filtres colorés (rouge, vert, infrarouge) avec fixation par pince.
- 6) Source lumineuse orientable.
- 7) Amplificateur de mesure avec câble de raccordement.
- 8) bâti de réception des dispositifs.

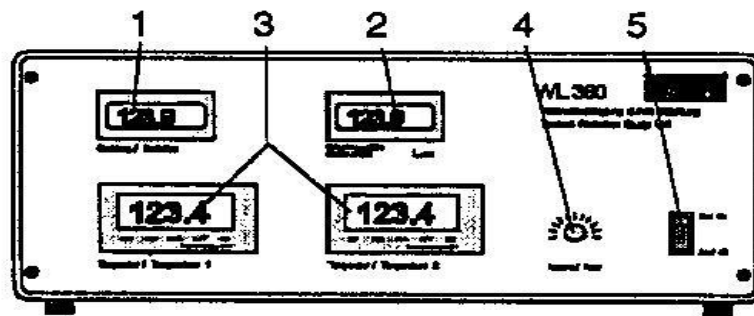


Figure 2 : Amplificateur de mesure

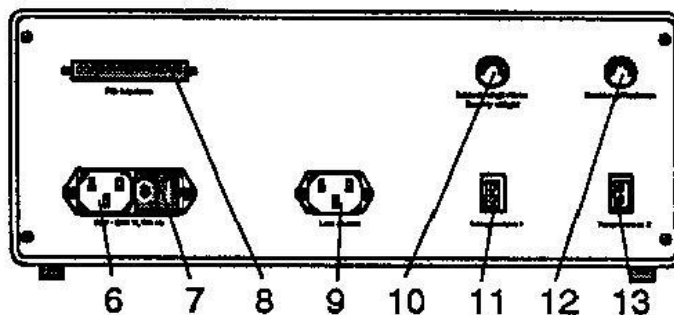


Figure 3 : Dos de l'amplificateur de mesure.

- 1) Afficheur de flux d'énergie du rayonnement ( $w/m^2$ ).
- 2) Afficheur de l'intensité lumineuse en Lux.
- 3) Afficheur des températures des thermocouples raccordés.
- 4) Régulateur de puissance pour modifier la tension d'alimentation.
- 5) interrupteur de régulateur.
- 6) Raccordement secteur.
- 7) Interrupteur principal.
- 8) Port PC.
- 9) Raccordement d'alimentation.
- 10) Sonde pour mesurer l'intensité lumineuse.
- 11) et 13) Sondes thermoélectriques.
- 12) Sonde pour mesurer le flux d'énergie du rayonnement.

## Consignes pour la réalisation du montage

- Activez l'amplificateur de mesure.
- Fixez la pile thermoélectrique à une distance de  $L=50$  mm par rapport au corps thermorayonnant et enlever tous les autres modules intégrés entre ces appareils.
- Notez la température ambiante.
- Réglez le régulateur de mesure sur 7. la température augmente lentement.
- Enregistrez la série de mesures en notant tous les 10 kelvins la température et le flux d'énergie du rayonnement affiché.

## Mesures à réaliser

En augmente la température de la plaque noire et mesure la valeur de rayonnement émis par elle .pour ce faire, nous plaçons le radiomètre a une distance fixe pour échange la température du corps noire (émetteur) nous approchant la plaque a l'élément chauffant. Donc le radio mètre est en face de la plaque noire .la résistance chauffe la plaque et la plaque qui sera irradiée par une énergie. Cette énergie est mesurée par le radiomètre,

La distance entre la plaque noire et l'AR-1 doit être maintenue constante au cours de l'expérience, il est recommandé de modifier la température de la plaque noire en changeant la puissance de la résistance au lieu de changer la distance.

En doit suivie les conseille de notre prof pour un bon déroulement de l'expérience.

## Exploitation des résultats

Remplir le tableau ci-dessous :

Résistance (Watt/m <sup>2</sup> )	Température (C°)	Radiations (Watt/m <sup>2</sup> )
50		
55		
60		
65		
70		
75		
80		
85		

- 6) Tracer le graphe radiations en fonction des températures :
- 7) Vérifier la loi de stefan-boltzmann :
- 8) Interprétations des résultats :
- 9) Conclusion :

## TP 5 : Moteur STIRLING

### Introduction

Un cycle de Stirling qui fait référence au moteur éponyme, est un cycle thermodynamique réalisé en deux isothermes et deux isochores

Le moteur en question, comprenant un cylindre, un piston de déplacement  $P_d$ , et un piston de travail  $P_t$ , ainsi qu'un accumulateur d'énergie, contenant un gaz qui peut être de l'air au tout autre, une de ses partie est communiquée (en contact) avec une source de chaleur extérieure (source chaude), à une température  $T_c$ , et l'autre partie est en contact avec la source froide (en général avec de l'air ambiant).

Afin d'avoir des changements de pression et température, le moteur est équipé de deux piston de déplacement du gaz (on comprime en réalité le gaz froid) vers le source chaude, qui assure l'expansion du gaz engendrant le déplacement de deuxième piston, et enfin un autre refroidissement du gaz avant de répéter les même étape ( on appelle ici d'un cycle thermodynamique).

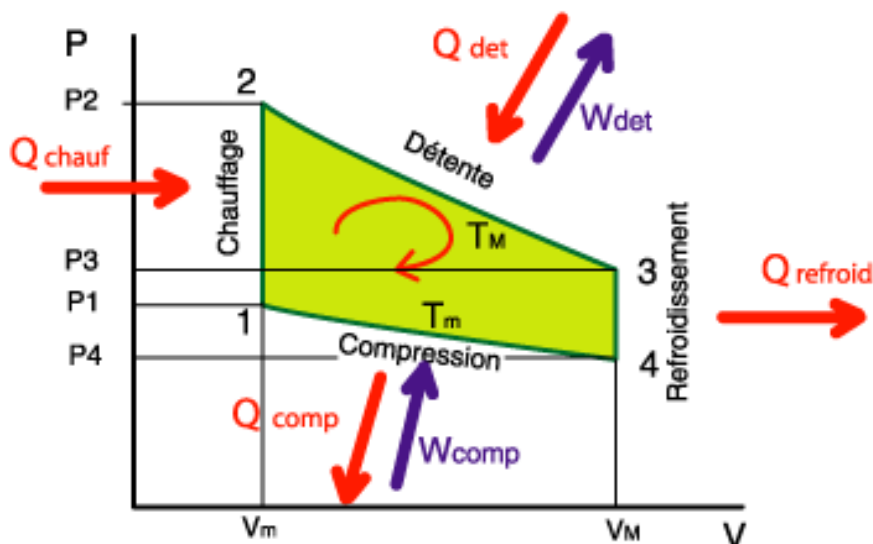
Le cycle de Stirling est constitué de quatre transformations ou évolutions :

**Tronçon 4-1** : correspond à une compression isotherme, réalisée par la montée du piston  $P_t$  au cours de laquelle le gaz reçoit de travail et cède de la chaleur  $Q_f$  à la température  $T_f$  ;

**Tronçon 1-2** : correspond à un chauffage isochore, réalisé par la descente du piston  $P_d$ , au cours de laquelle le gaz traverse l'accumulateur A, de bas en haut, et reçoit de ce dernier de la chaleur, à une température variant entre  $T_f$  et  $T_c$  ;

**Tronçon 2-3** : correspond à une détente isotherme, réalisé par la descente des deux pistons, au cours de laquelle le gaz donne de travail et reçoit de la chaleur  $Q_c$  à la température  $T_c$  ;

**Tronçon 3-4** : correspond à un refroidissement isochore, réalisé par la montée du piston  $P_d$ , au cours de laquelle le gaz retransverse l'accumulateur A, cette fois ci de haut en bas, et donne à ce dernier de la chaleur à une température variant de  $T_c$  et  $T_f$



**Figure 1 : cycle de Moteur STIRLING**

### Etude énergétique du cycle Stirling

#### ➤ Chaleur fournie au cycle

Il s'agit de la quantité de chaleur introduite au cours de deux processus de chauffage et détente, ainsi, pendant ces deux transformations, la chaleur reçue par le cycle ce fait premièrement d'une manière isochore suivie d'une isotherme, elles sont égales à:

$$Q_{1-2} = Q_{\text{chauffage}} = \Delta U = nC_v(T_2 - T_1) = nC_v(T_c - T_f) \text{ avec:}$$

$T_c$ : température de la source chaude;

$T_f$ : température de la source froide.

$$\begin{aligned} Q_{2-3} = Q_{\text{détente}} = -W_{2-3} &= \int P dV = \int \frac{nRT}{V} dV = nRT_2 \ln \frac{V_3}{V_2} = nRT_c \ln \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \\ &= nRT_c \ln \frac{P_2}{P_3} \end{aligned}$$

Aussi,

$Q_{\text{reçue}} = Q_{1-2} + Q_{2-3} = nC_v(T_c - T_f) + nRT_c \ln \frac{P_2}{P_3}$
--

#### ➤ Chaleur cédée par le cycle

Il s'agit de la quantité de chaleur cédée au bien dégagée par le cycle au cours de refroidissement et de compression, ainsi, pendant ces deux transformations, la chaleur cédée par le cycle ce fait premièrement d'une manière isochore suivie d'une isotherme, elles sont égales à:

$$Q_{3-4} = Q_{\text{Refroidissement}} = \Delta U = nC_v(T_4 - T_3) = nC_v(T_f - T_c) \text{ et}$$

$$\begin{aligned} Q_{4-1} = Q_{\text{compression}} = -W_{4-1} &= \int P dV = \int \frac{nRT}{V} dV = nRT_1 \ln \frac{V_1}{V_4} = nRT_f \ln \frac{V_{\min}}{V_{\max}} \\ &= nRT_f \ln \frac{P_4}{P_1} \end{aligned}$$

Aussi,

$$Q_{\text{cédée}} = Q_{3-4} + Q_{4-1} = nC_v(T_f - T_c) + nRT_f \ln \frac{P_4}{P_1}$$

➤ Calcul des travaux mis en jeu lors du cycle

Il est à noter que le cycle de Stirling comprend deux palier de travail seulement à cause des deux isochore qui annule les travaux aussi on peut écrire :

Si on regarde le diagramme ci-contre, on peut écrire :

$$W_{\text{net}} = W_{\text{detente}} + W_{\text{compression}} \text{ avec}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{detente}} = W_{2-3} &= -Q_{2-3} = - \int P dV = - \int \frac{nRT}{V} dV = - nRT_2 \ln \frac{V_3}{V_2} = - nRT_c \ln \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \\ &= nRT_c \ln \frac{V_{\text{min}}}{V_{\text{max}}} - nRT_c \ln \frac{P_2}{P_3} \end{aligned}$$

Et

$$\begin{aligned} W_{\text{compression}} &= -Q_{4-1} = -Q_{\text{compression}} = - \int P dV = - \int \frac{nRT}{V} dV = - nRT_1 \ln \frac{V_1}{V_4} \\ &= -nRT_f \ln \frac{V_{\text{min}}}{V_{\text{max}}} = nRT_f \ln \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} = -nRT_f \ln \frac{P_4}{P_1} \end{aligned}$$

Aussi,

$$\begin{aligned} W_{\text{net}} = W_{\text{cycle}} &= -nRT_c \ln \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} + nRT_f \ln \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} = -nR(T_c - T_f) \ln \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \\ &= -nR(T_c - T_f) \ln \frac{P_1}{P_4} \end{aligned}$$

Le rendement thermique et ainsi définit comme étant le rapport entre le travail net et la chaleur fournie au cycle aussi,

$$\eta_{\text{thermique}} = \frac{|W_{\text{net}}|}{Q_{\text{reçue}}} = \frac{nR(T_c - T_f) \ln \frac{P_1}{P_4}}{nC_v(T_c - T_f) + nRT_c \ln \frac{P_2}{P_3}}$$

Dans les isochores :

$$P_4 V_4 = nRT_4$$

$$P_3 V_3 = nRT_3$$

$$V_3 = V_4 \text{ et } T_4 = T_{\text{froide}}, T_3 = T_{\text{chaude}}$$

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{T_{\text{froide}}}{T_{\text{chaude}}} \text{ et par le même raisonnement : } \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_{\text{froide}}}{T_{\text{chaude}}}$$

$\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}$  qu'on désigne par taux volumétrique:  $\tau =$

$$\text{Dans les deux isothermes: } P_4 V_4 = P_1 V_1 \Rightarrow P_4 = \frac{P_1 V_1}{V_4} = \frac{P_1}{\tau} \text{ aussi,}$$

$$P_4 = \frac{P_1}{\tau} \text{ et } P_3 = \frac{P_2}{\tau}$$

$$C_v = 713 \text{ J/kgK}$$

Aussi, il nous suffit de savoir les pressions aux différents points et les températures à la source chaude et froide afin de calculer le rendement thermique du moteur de Stirling.

**Objectifs :** Les objectifs du TP sont :

Le but principal est de voir la variation du rendement thermique en fonction de la température.

**Description de l'appareillage :**

Le dispositif expérimental (figure 1) se compose du moteur lui-même et d'une unité de détection reliée au moteur, permettant de mesurer la pression  $p$ , le volume  $V$  et la vitesse de rotation  $n$ . Les températures  $T_1$  et  $T_2$  sont mesurées par des thermocouples. Les informations issues des différents capteurs sont envoyées sur une unité de mesure ( $pVnT$ ).

L'unité de mesure présente des sorties analogiques, permettant de visualiser les variations de pression et de volume au cours du temps sur les voies d'un oscilloscope et de les enregistrer à l'aide d'un ordinateur. Elles sont ensuite traitées et analysées.



Figure 1 : Dispositif expérimental du moteur de Stirling

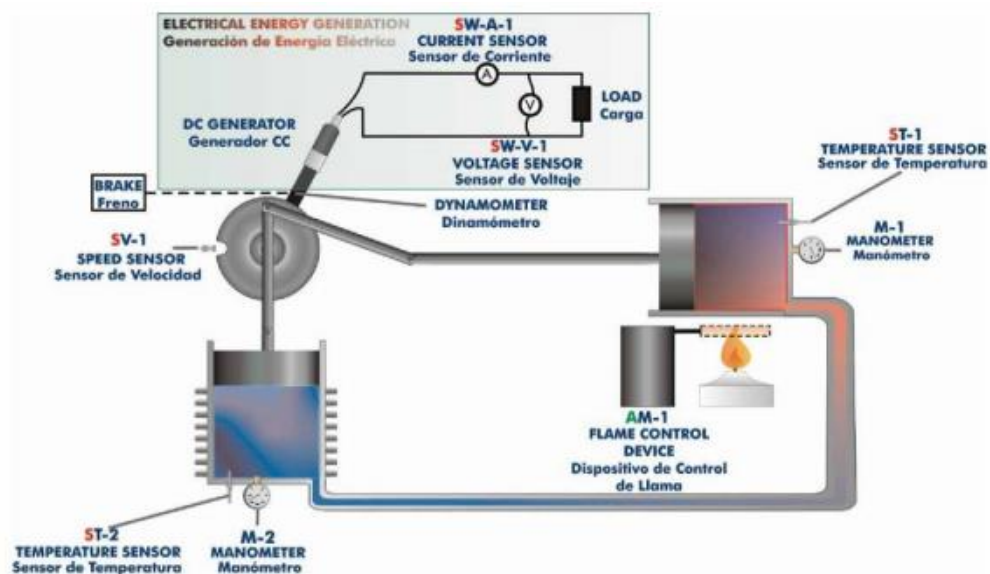


Figure 2 : Esquisse du moteur (chemin électrique)

Consignes pour la réalisation du montage

Dans un premier temps, nous ferons fonctionner le dispositif à l'aide d'une alimentation pour l'utiliser comme un récepteur (machine frigorifique, pompe à chaleur). Ensuite, pour actionner le moteur, une quantité de chaleur doit être fournie à l'air contenu dans la chambre de détente. Ceci est réalisé par une résistance chauffante couplée à une alimentation continue (chauffage par effet Joule). On peut aussi utiliser une petite lampe à alcool ou une lampe au foyer d'une parabole ce qui simule un apport d'énergie solaire. Nous ne le ferons pas ici. On peut aussi faire tourner le moteur à l'aide d'une petite alimentation et utiliser alors le moteur de Stirling comme refroidisseur. Durant son fonctionnement en mode moteur, une charge extérieure peut être soumise au moteur, soit en appliquant un couple mécanique ajustable sur son arbre, ici un torsiomètre du type frein de Pony, soit en couplant ce dernier à un générateur électrique débitant dans une résistance. On étudiera alors les variations de fréquence de rotation du moteur, les changements de température, de pression et de volume dans les chambres. Les énergies thermiques, mécaniques puis électriques mises en jeu et échangées seront analysées. L'analyse du diagramme  $p = f(V)$  permettra de déterminer la quantité d'énergie convertie par cycle moteur.

### Procédures préliminaires et mesures de sécurité

- Avant de commencer, on doit vérifier tout d'abord que la source de chaleur contienne de l'alcool ou de la paraffine sinon, il faut la remplir jusqu'au presque la moitié.
- Cessez de remplir au d'ajout lorsque la flamme brûle ;
- Fermer bien la bouteille après son utilisation ;
- Gardez-vous loin de la flamme et pas touchez les cylindres lors des essais ou bien quand l'expérience termine, laissez le moteur se refroidir

### Mesures à réaliser

Avant de mettre sous tension l'unité de mesure (pVnT), s'assurer qu'elle soit connectée à l'unité de détection (pVn). Relier les sorties analogiques p et V aux canaux Y1 et Y2 de l'oscilloscope numérique.

### Exploitation des résultats

- 1) Représenter dans un graphe la différence de température  $\Delta T$  (°C) et la vitesse de rotation (rps) en fonction de temps. Que remarquez-vous ;
- 2) Tracez le cycle de Stirling sur un diagramme (P, V) ;
- 3) Calculer la chaleur mise en jeu lors de cycle (chaleurs reçues et cédées) (prenez 2<sup>ème</sup> minute et 8<sup>ème</sup> minute) ;
- 4) Calculez le travail net (prenez 2<sup>ème</sup> minute et 8<sup>ème</sup> minute) ;
- 5) Calculez le rendement  $\rho = 1 - \frac{T_f}{T_c}$  ;
- 6) Calculer la puissance Electrique P ;
- 7) Interprétations des résultats ;
- 8) Conclusion ;