

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Thème

**Réalisation d'une maquette didactique
pour étude du phénomène de la conduction
thermique**

Préparé par :

Messieurs MEDINI Abdelhak et MEDINI Abderezak

Soutenu publiquement le 19/09/2021, devant le Jury composé de :

MM.

HADDOUCHE Kamel	Professeur (Univ. de Tiaret)	Président
MEKROUSSI Said	Maître de conférences classe A (Univ. de Tiaret)	Examineur
AKERMI Nasreddine	Maître de conférences classe B (Univ. de Tiaret)	Examineur
BELMILOUD Mohamed Amine	Maître de conférences classe B (Univ. de Tiaret)	Encadreur
BEY Mohamed	Maître de conférences classe B (Univ. de Tiaret)	Invité

Année universitaire : 2020 – 2021

Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en leurs exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis ; merci mes parents.
- ❖ A toute ma famille.
- ❖ A mon frère et ma sœur.
- ❖ A tous mes amis sans exception.

MEDINI Abdelhak

Je tiens à dédier ce modeste travail :

- ❖ A mes Parents, merci pour tout leur amour et leur soutien depuis toujours. Ils m'ont donné toutes les chances pour réussir. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, la conséquence de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.
- ❖ A mon frère et ma sœur qui ont été toujours présents pour moi, merci pour vos encouragements et votre confiance.
- ❖ Ainsi qu'à tous mes amis.

MEDINI Abderezak

Remerciements

Tout d'abord nous remercions le Dieu, notre créateur de nous avoir donné le courage et la volonté pour terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur Monsieur BELMILOUD Mohamed Amine pour son aide précieuse, sa confiance, ses encouragements, sa patience et son soutien favorable pour l'aboutissement de ce travail.

Nous sommes très heureux d'avoir pu travailler avec Monsieur BEY Mohamed, en particulier, pour ces nombreux conseils liés à la programmation et la mise en œuvre.

Nos remerciements vont aux Enseignants qui ont pris le soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire.

Nous remercions également l'ensemble des membres du Jury Messieurs HADDOUCHE Kamel, MEKROUSSI Saïd et AKERMI Nasreddine pour avoir examiné notre travail.

Nous tenons à présenter nos vifs remerciements aux personnes qui ont contribué à la préparation de ce mémoire.

Sommaire

Dédicaces	I
Remerciements	III
Table des matières	IV
Listes des figures et des tableaux	VI
Nomenclature	VIII
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Phénomène de la conduction thermique

1.1. Introduction.....	3
1.2. Définition de la conduction thermique [2].....	3
1.3. Loi de Fourier [3].....	3
1.4. Conductivité thermique [5].....	5
1.5. Transfert de chaleur par conduction en régime permanent [6].....	5
1.5.1. Equation de la chaleur [6].....	5
1.5.1.1. Equation de la chaleur en coordonnées cartésiennes	6
1.5.1.2. Equation de la chaleur en coordonnées cylindriques	7
1.5.1.3. Equation de la chaleur en coordonnées sphériques	7
1.5.2. Conduction dans une paroi plane [6].....	8
1.5.2.1. Mur simple	8
1.5.2.2. Mur multicouche [6].....	9
1.5.3. Cylindre creux long (tube) [6].....	11
1.5.3.1. Cylindre creux simple	11
1.5.3.2. Cylindre creux multicouche	12
1.6. Conduction vive [8]	13
1.6.1. Cas d'une plaque plane [8]	14
1.6.2. Cas d'un cylindre plein avec source interne de chaleur [8].....	15
1.7. Conduction unidirectionnelle en régime variable sans changement d'état et avec une température uniforme [8].....	16

Chapitre 2 : Éléments de réalisation de la maquette

2.1. Introduction.....	19
2.2. Capteurs de température [9].....	19
2.2.1. Principaux types de capteurs de température [10].....	19

2.2.2.	Cas d'utilisation standards pour les capteurs de température [10].....	20
2.2.3.	Capteur de température LM 35 [11]	22
2.2.4.	Capteur de température PT 100 [12]	22
2.2.4.1.	Caractéristiques de la PT 100.....	23
2.2.4.2.	Module amplificateur pour sonde PT 100 [14]	23
2.3.	Carte Arduino [15].....	24
2.3.1.	Histoire d'Arduino [15].....	24
2.3.2.	Avantages de la carte Arduino [16].....	24
2.3.3.	Types de la carte Arduino® [17].....	25
2.3.4.	Constitution d'une carte Arduino® [17]	26
2.4.	Source de chaleur [19]	29
2.5.	Plaque d'essais [21].....	30
2.6.	Ecran d'affichage [22]	31

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3.1.	Introduction.....	33
3.2.	Partie hardware	33
3.2.1.	Système à étudier.....	33
3.2.2.	Câblage	33
3.3.	Partie software	36
3.4.	Résultats obtenus	39
	Conclusion générale	43
	Liste des références bibliographiques	44

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Figure 1.1 : Transfert de chaleur à travers la paroi par conduction [2]	3
Figure 1.2 : Interprétation mathématique de la densité de flux thermique [4]	4
Figure 1.3 : Bilan thermique sur un système élémentaire [6].....	6
Figure 1.4 : Bilan thermique élémentaire sur un mur simple [6]	8
Figure 1.5 : Schéma électrique équivalent d'un mur simple [6]	9
Figure 1.6 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouche [6]	9
Figure 1.7 : Schéma électrique équivalent d'un mur multicouche [6]	10
Figure 1.8 : Murs en parallèle [7].....	10
Figure 1.9 : Schéma des transferts dans un cylindre creux [6].....	11
Figure 1.10 : Schéma électrique équivalent d'un cylindre creux [6]	12
Figure 1.11 : Schéma des transferts dans un cylindre creux multicouche [6].....	13
Figure 1.12 : Schéma électrique équivalent d'un cylindre creux multicouche [6].....	13
Figure 2.1 : Capteur de température LM 35 [11]	22
Figure 2.2 : Capteur de température PT 100 [13].....	22
Figure 2.3 : Amplificateur pour PT 100 [14]	23
Figure 2.4 : Carte Arduino® UNO [18]	27
Figure 2.5 : Vue d'ensemble du logiciel Arduino [18]	27
Figure 2.6 : Interface du logiciel Arduino [18]	28
Figure 2.7 : Vue d'ensemble de l'espace de travail du logiciel Arduino [18].....	28
Figure 2.8 : Source de chaleur [20]	29
Figure 2.9 : Plaque d'essais [21].....	30
Figure 2.10 : Fils de connexion [21]	30
Figure 2.11 : Ecran d'affichage [22]	31
Figure 2.12 : Module I2C [22]	31
Figure 2.13 : Montage LCD-I2C-Arduino [22].....	32
Figure 3.1 : Schéma de câblage de la maquette.....	33
Figure 3.2 : Montage complet de la maquette	34
Figure 3.3 : Composants de la maquette	35
Figure 3.4 : Affichage des valeurs de la température dans le LCD.....	36
Figure 3.5 : Interface de PLX-DAQ et Excel	38
Figure 3.6 : Mesure des températures - Fil cylindrique plein en cuivre -	39

Figure 3.7 : Mesure des températures - Fil cylindrique plein en acier39
Figure 3.8 : Variation de la température le long du fil en cuivre pour des temps fixés 41
Figure 3.8 : Variation de la température le long du fil en acier pour des temps fixés..... 41

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Conductivités thermiques de quelques matériaux [5]5
Tableau 1.2 : Exemple de dimensions caractéristiques de quelques corps [8] 17
Tableau 2.1 : Comparaison entre capteurs de température [10]..... 20
Tableau 2.2 : Avantages et inconvénients des capteurs de température [10]..... 20
Tableau 3.1 : Mesure des températures – Fil en cuivre..... 40
Tableau 3.2 : Mesure des températures – Fil en acier 40

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
a	Diffusivité thermique	m ² /s
Bi	Nombre de Biot	
C _p	Chaleur spécifique	J/kg.°C
e	Epaisseur	m
Fo	Nombre de Fourier	
H	Hauteur	m
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W/m ² .°C
I	Intensité du courant électrique	A
L	Longueur	m
ℓ	Largeur	m
lc	Dimension caractéristique du milieu	m
Q	Quantité de chaleur	J
r	Rayon	m
S	Surface	m ²
T	Température	°C ou K
t	Temps	s
U	Tension électrique	V
V	Volume	m ³
Symboles grecs		
λ	Conductivité thermique	W/m.°C
ρ	Masse volumique	kg/m ³
τ	Constante de temps	s
Φ	Flux thermique	W
φ	Source de chaleur volumique	W/m ³
φ	Flux thermique surfacique	W/m ²

Introduction générale

Le transfert thermique est un échange d'énergie entre deux corps de températures différentes. Le phénomène de transfert de chaleur joue un rôle très important dans notre vie quotidienne aussi dans des situations industrielles. Les phénomènes du transfert de chaleur sont très importants dans beaucoup de domaines industriels comme les ailettes qui trouvent leurs places dans un champ très vaste et extrêmement variées. On peut aussi citer, par exemple, les échangeurs thermiques, le refroidissement des composantes électroniques, etc.

La chaleur peut être transmise par conduction, convection ou rayonnement. Bien que les trois modes puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant. Par exemple, la chaleur est principalement transmise par conduction à travers les murs en brique d'une maison ; l'eau dans une casserole placée sur une cuisinière est surtout chauffée par convection ; la terre reçoit sa chaleur du soleil en grande partie par rayonnement. Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques [1].

La conduction permet un transfert de chaleur efficace à travers les solides opaques. Lorsque l'on chauffe l'une des extrémités d'une barre métallique, la chaleur se transmet par conduction à l'autre extrémité plus froide. Le mécanisme exact de la conduction dans les solides n'est toujours pas totalement élucidé, mais découle surtout du mouvement des électrons libres dans le corps enclenché dès que s'y établit une différence de température. Ainsi, les bons conducteurs de chaleur sont en général de bons conducteurs électriques [1]. En 1822, le mathématicien Français Joseph Fourier donna une définition mathématique précise de la conduction. D'après la loi de Fourier, le flux à laquelle la chaleur est conduite dans un corps par unité de section est proportionnel à l'opposé du gradient de la température du corps. Le facteur de proportionnalité est la conductibilité thermique du matériau. Des métaux comme l'or, l'argent et le cuivre ont une conductibilité thermique importante (ils conduisent facilement la chaleur) alors que des matériaux comme le verre et l'amiante ont une conductibilité thermique beaucoup plus faible ; ces derniers sont des isolants. Dans de nombreuses applications industrielles, il est nécessaire de connaître la vitesse de propagation de la chaleur dans un solide pour une différence de température donnée. On fait alors appel à des techniques de calculs mathématiques sophistiqués souvent effectués au moyen d'ordinateurs [1].

Le but de notre travail est de réaliser une maquette didactique pour la mesure de la température dans un solide pour mieux comprendre de phénomène de conduction thermique tout en utilisant une carte Arduino qui offre une accessibilité et facilité d'utilisation dans des

milliers de projets avec des applications différentes.

Notre mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur le phénomène de la conduction thermique.
- Le deuxième chapitre présente les éléments de réalisation de la maquette didactique basée sur la plate-forme Arduino.
- Le troisième chapitre est consacré à la réalisation de la maquette ainsi que les résultats.

À la fin, une conclusion générale relatant les principaux résultats de ce travail sera présentée.

Chapitre 1 :
Phénomène de la conduction
thermique

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités liées au phénomène de la conduction thermique ; à cet effet, les équations qui régissent la conduction dans des parois plane et cylindrique en régime stationnaire sans source interne de chaleur seront relatées. Puis, nous allons aborder la conduction pour ces géométries avec source interne de chaleur. Enfin, des notions sur la conduction instationnaire seront évoquées.

1.2. Définition de la conduction thermique [2]

La conduction est le phénomène de transmission de chaleur résultant de l'interaction entre des particules énergétiques et des particules moins énergétiques au sein d'une substance. La conduction peut se manifester dans les solides, les liquides et les gaz. Dans les liquides et les gaz, la conduction est due aux collisions entre les molécules animées d'un mouvement chaotique. En ce qui concerne les solides, la conduction est due à la propagation des vibrations des atomes dans le réseau atomique ainsi qu'au déplacement des électrons libres. Par exemple, une boisson gazeuse se réchauffe car la chaleur de l'air environnant lui est transmise par conduction à travers la paroi du contenant.

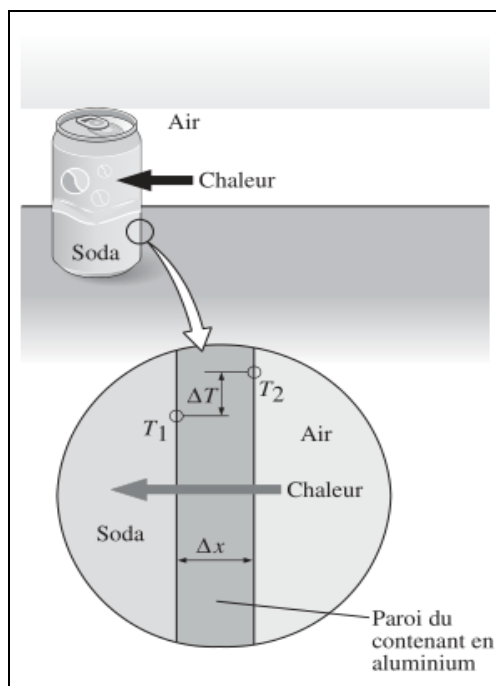


Figure 1.1 : Transfert de chaleur à travers la paroi par conduction [2]

1.3. Loi de Fourier [3]

En 1822 Jean-Baptiste Joseph Fourier publie son traité analytique de la chaleur dans lequel il énonce la loi relative à la diffusion thermique exprimée par l'équation (1.1) (il y introduit également les fameuses séries qui portent désormais son nom pour résoudre l'équation de la chaleur).

$$\vec{\phi} = -\lambda \cdot \vec{\text{grad}}T \quad (1.1)$$

Où λ est une constante positive appelée **conductivité thermique**. Cette dernière loi traduit le fait que le courant thermique est perpendiculaire aux isothermes, et est dirigé des parties chaudes vers les parties froides. Plus le gradient de température est important, plus le courant thermique l'est aussi.

La conductivité thermique est caractéristique du milieu dans le lequel s'effectue le transfert thermique. Plus la conductivité thermique est importante moins le milieu résiste au transfert thermique.

Le flux thermique est donné par [4] :

$$\Phi = \frac{\lambda \cdot S}{e} (T_1 - T_2) \quad (1.2)$$

Où en général :

$$\Phi = \lambda \cdot S \frac{dT}{dx} \quad (1.3)$$

Pour écrire l'équation de la conduction de la chaleur sous une forme mathématique, nous devons adopter un signe conventionnel selon le sens du flux thermique (par exemple : $T_1 > T_2$, $T_1 \rightarrow T_2$ ou $T_1 < T_2$, $T_2 \rightarrow T_1$) [4].

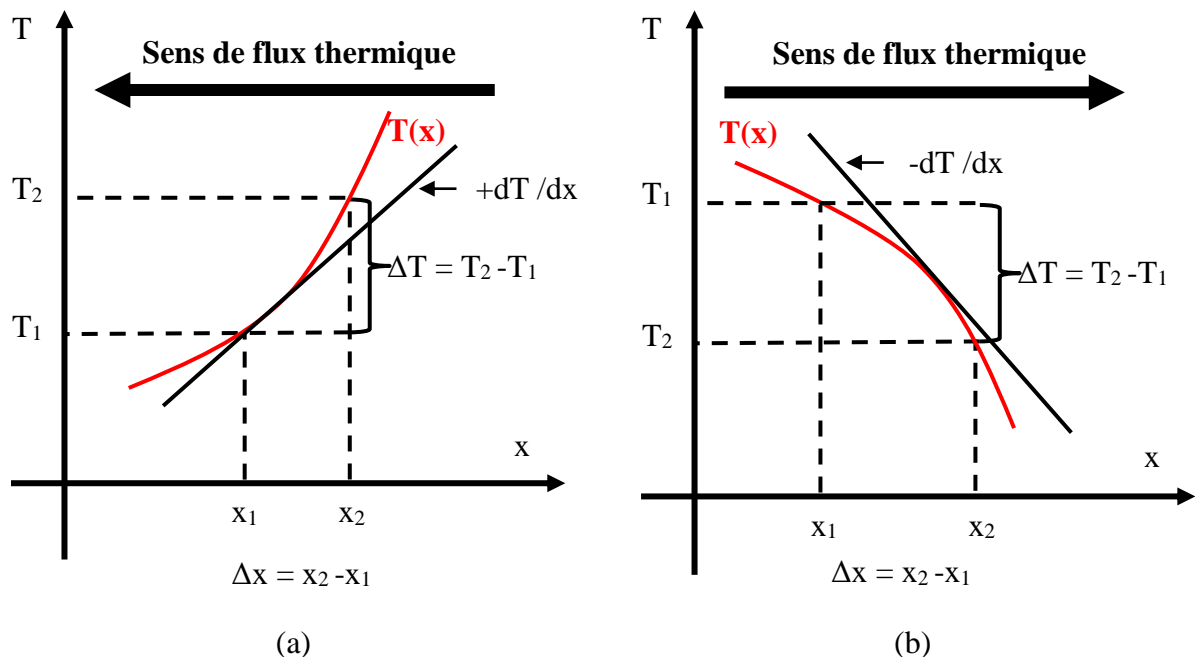


Figure 1.2 : Interprétation mathématique de la densité de flux thermique [4]

Comme le deuxième principe de la thermodynamique implique nécessairement que la chaleur s'écoule des points les plus chauds vers les points les plus froids, le flux thermique serait donc positif lorsque le gradient de température (dT/dx) est négatif car $T_1 > T_2$ [4].

- On remarque de la figure (Figure 1.2-b) que : $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} = -\frac{dT}{dx}$; $T_1 > T_2$, pour que le flux soit positif, l'équation de la puissance thermique s'écrit avec un signe négatif : $\Phi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx}$.
- $\frac{dT}{dx}$: le gradient de la température.

1.4. Conductivité thermique [5]

La conductivité ou conductibilité thermique est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces ont des températures différentes. C'est aussi une des caractéristiques physico-chimiques du matériau. Notée par λ la conductivité thermique dépend à la fois de la nature du matériau et de la température. Le tableau qui suit donne quelques valeurs de la conductivité thermique :

Matériau	λ [W/m.°C]	Matériau	λ [W/m.°C]
Argent	419	Eau	0,60
Cuivre	386	Plâtre	0,48
Aluminium	204	Amiante	0,13
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Bois (feuilli-résineux)	0,12-0,23	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Brique terre cuite	1,1	Polystyrène extrudé	0,027
Verre	1,5	Air	0,026
Laiton (Cu 70% - Zn 30%)	99	Cuivre à 99,9%	386

Tableau 1.1 : Conductivités thermiques de quelques matériaux [5]

1.5. Transfert de chaleur par conduction en régime permanent [6]

1.5.1. Equation de la chaleur [6]

Dans sa forme monodimensionnelle, elle décrit le transfert de chaleur unidirectionnel à travers un mur plan :

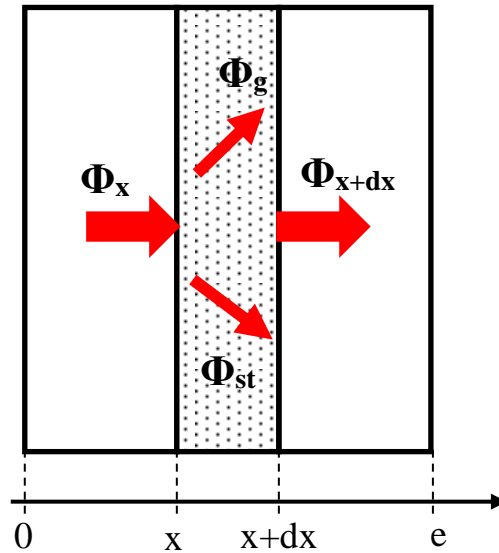


Figure 1.3 : Bilan thermique sur un système élémentaire [6]

Considérons un système d'épaisseur dx dans la direction x et de section d'aire S normalement à la direction Ox . Le bilan d'énergie de ce système s'écrit :

$$\Phi_x + \Phi_g = \Phi_{x+dx} + \Phi_{st} \quad (1.4)$$

Avec : $\Phi_x = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x$; $\Phi_{x+dx} = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx}$; $\Phi_g = \phi S dx$ et $\Phi_{st} = \rho C_p S dx \frac{\partial T}{\partial t}$.

En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie et en divisant par dx , nous obtenons :

$$\frac{\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} - \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x}{dx} + \phi S = \rho C_p S \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.5)$$

Soit :

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \phi S = \rho C_p S \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.6)$$

1.5.1.1. Equation de la chaleur en coordonnées cartésiennes

Dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.7)$$

Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas :

- Si le milieu est isotrope : $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$.

- S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système : $\phi = 0$.
- Si le milieu est homogène, λ n'est fonction que de T.

Les hypothèses permettent d'écrire :

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.8)$$

- Si de plus λ est constant (écart modéré de température ou varie peu avec la température), nous obtenons l'équation de Poisson :

$$a \cdot \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.9)$$

Le rapport $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$ est appelé la diffusivité thermique ($m^2 \cdot s^{-1}$) qui caractérise la vitesse de propagation d'un flux de chaleur à travers un matériau.

- En régime permanent, nous obtenons :

$$\nabla^2 T = 0 \quad (1.10)$$

1.5.1.2. Equation de la chaleur en coordonnées cylindriques

L'équation générale de la conduction thermique en coordonnées cylindriques peut être obtenue à partir d'un bilan énergétique d'un élément de volume en coordonnées cylindriques et à l'aide de l'opérateur de Laplace ; soit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\phi}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.11)$$

Dans le cas d'un problème à symétrie cylindrique où la température ne dépend que de r et de t, l'équation (1.11) peut s'écrire sous forme simplifiée :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\phi}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.12)$$

1.5.1.3. Equation de la chaleur en coordonnées sphériques

En coordonnées sphériques, nous obtenons :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rT) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\phi}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.13)$$

1.5.2. Conduction dans une paroi plane [6]

1.5.2.1. Mur simple

On se placera dans le cas où le transfert de chaleur est unidirectionnel et où il n'y a pas de génération ni de stockage d'énergie.

On considère un mur d'épaisseur e , de conductivité thermique λ et de grandes dimensions transversales dont les faces extrêmes sont à des températures T_1 et T_2 .

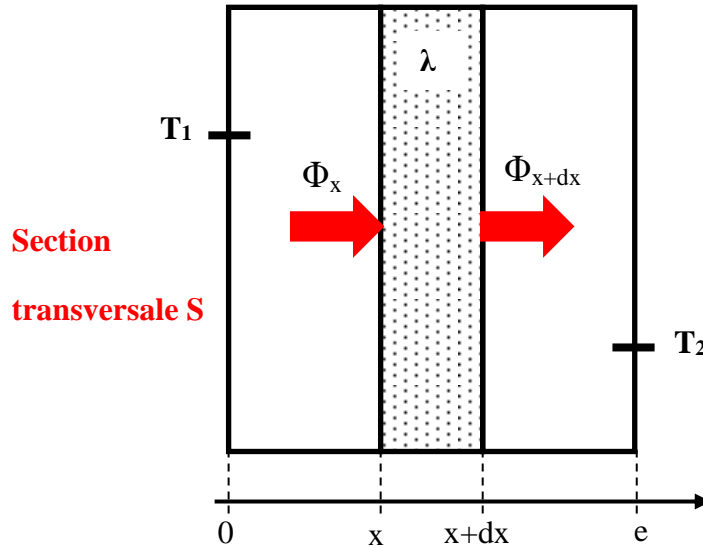


Figure 1.4 : Bilan thermique élémentaire sur un mur simple [6]

En effectuant un bilan thermique sur le système constitué par la tranche de mur comprise entre les abscisses x et $x + dx$, il vient :

$$\Phi_x = \Phi_{x+dx} \Rightarrow -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_x = -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} \quad (1.14)$$

D'où : $\frac{dT}{dx} = A$ et $T(x) = A x + B$

Avec les conditions aux limites :

$$\begin{aligned} T(x=0) &= T_1 \Rightarrow B = T_1 \\ T(x=e) &= T_2 \Rightarrow A = \frac{T_2 - T_1}{e} \end{aligned}$$

Donc :

$$T = \frac{(T_2 - T_1)}{e} x + T_1 \quad (1.15)$$

Le profil de température est donc linéaire. La densité de flux de chaleur traversant le mur s'en déduit par la relation :

$$\Phi = \frac{\lambda S}{e} (T_1 - T_2) \quad (1.16)$$

Cette dernière équation peut également se mettre sous la forme :

$$\Phi = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{th}} = \frac{e}{\lambda S} \tag{1.17}$$

Cette équation est analogue à la loi d’Ohm en électricité qui définit l’intensité du courant comme le rapport de la différence du potentiel électrique sur la résistance électrique. La température apparaît ainsi comme un potentiel thermique et le terme $\frac{e}{\lambda S}$ apparaît comme la résistance thermique d’un mur plan d’épaisseur e , de conductivité thermique λ et de surface latérale S . On se ramène donc au schéma équivalent représenté sur la figure qui suit :

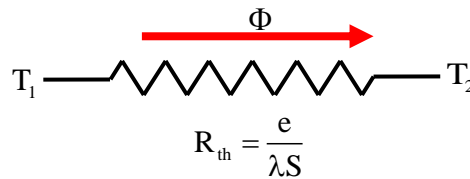


Figure 1.5 : Schéma électrique équivalent d’un mur simple [6]

1.5.2.2. Mur multicouche [6]

✓ Murs en série

C’est le cas des murs réels (schématisé sur la figure 1.6) constitués de plusieurs couches de matériaux différents et où on ne connaît que les températures T_{f1} et T_{f2} des fluides en contact avec les deux faces du mur de surface latérale S .

En régime permanent, le flux de chaleur se conserve lors de la traversée du mur et s’écrit :

$$\Phi = \frac{\lambda_1 \cdot S}{e_1} (T_{f1} - T_2) = \frac{\lambda_2 \cdot S}{e_2} (T_2 - T_3) = \frac{\lambda_3 \cdot S}{e_3} (T_3 - T_4) = \frac{\lambda_4 \cdot S}{e_4} (T_4 - T_{f2}) \tag{1.18}$$

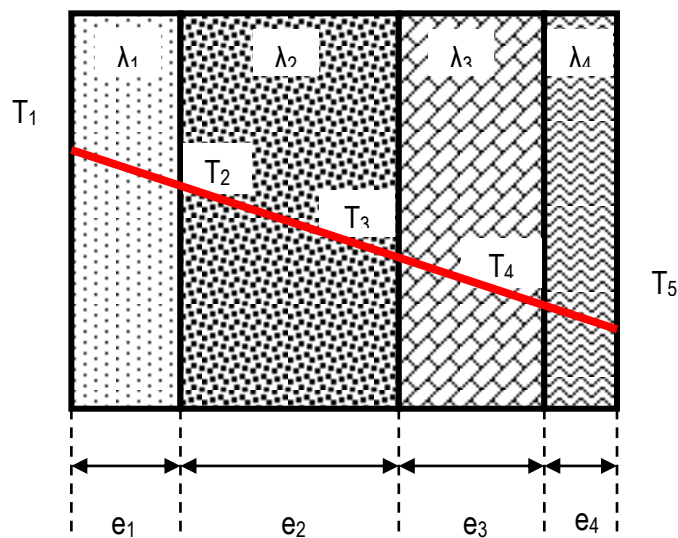


Figure 1.6 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouche [6]

On a considéré que les contacts entre les couches de différentes natures étaient parfaits et qu'il n'existait pas de discontinuité de température aux interfaces. En réalité, compte-tenu de la rugosité des surfaces, une microcouche d'air existe entre les creux des surfaces en regard qui contribue à la création d'une résistance thermique (l'air est un isolant) appelée résistance thermique de contact.

La formule précédente s'écrit alors :

$$\Phi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{e_1}{\lambda_1 \cdot S} + \frac{e_2}{\lambda_2 \cdot S} + \frac{e_3}{\lambda_3 \cdot S} + \frac{e_4}{\lambda_4 \cdot S}} \quad (1.19)$$

$R_{th1} \quad R_{th2} \quad R_{th3} \quad R_{th4}$

Le schéma électrique équivalent est représenté sur la figure suivante :

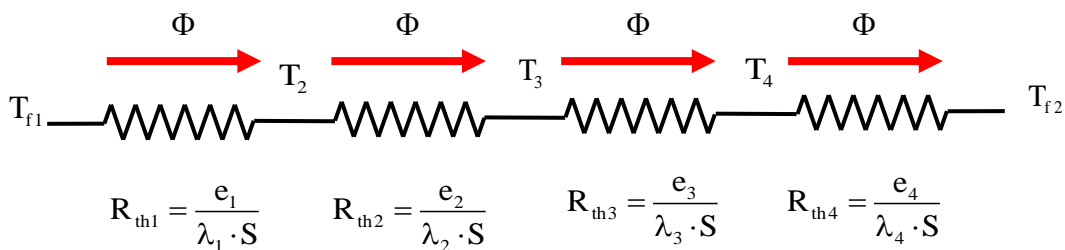


Figure 1.7 : Schéma électrique équivalent d'un mur multicouche [6]

✓ **Murs en parallèle [7]**

Dans beaucoup de cas, on peut continuer à combiner les équations relatives à la théorie unidimensionnelle et faire appel à l'analogie électrique avec une combinaison de résistances en parallèle.

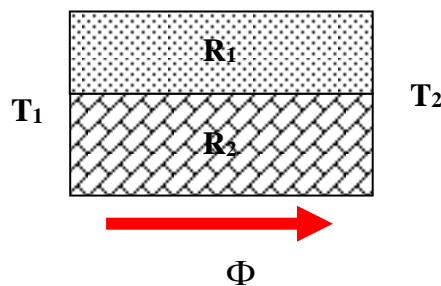


Figure 1.8 : Murs en parallèle [7]

Il s'agit de deux murs superposés ; on peut écrire :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th1}} + \frac{T_1 - T_2}{R_{th2}} = T_1 - T_2 \left(\frac{1}{R_{th1}} + \frac{1}{R_{th2}} \right) = \frac{T_1 - T_2}{R_{th(tot)}} \quad (1.20)$$

Comme pour les résistances électriques, on tire donc dans ce cas : $\frac{1}{R_{th(tot)}} = \frac{1}{R_{th1}} + \frac{1}{R_{th2}}$.

On peut parfaitement généraliser cette relation obtenue pour 2 murs à un nombre quelconque de murs :

$$\frac{1}{R_{th(tot)}} = \sum_i \frac{1}{R_{thi}} \quad (1.21)$$

1.5.3. Cylindre creux long (tube) [6]

1.5.3.1. Cylindre creux simple

On considère un cylindre creux de conductivité thermique λ , 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 (figure 1.9). On suppose que le gradient longitudinal de température est négligeable devant le gradient radial.

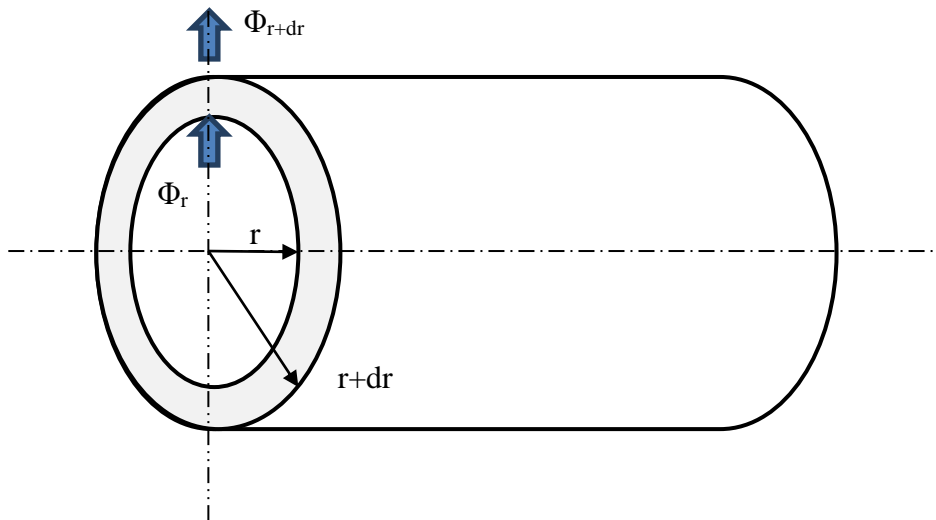


Figure 1.9 : Schéma des transferts dans un cylindre creux [6]

Effectuons le bilan thermique du système constitué par la partie de cylindre comprise entre les rayons r et $r + dr$:

$$\Phi_r = \Phi_{r+dr} \quad (1.22)$$

Avec :

$$\left. \begin{aligned} \Phi_r &= -\lambda 2\pi r L \left(\frac{dT}{dr} \right)_r \\ \Phi_{r+dr} &= -\lambda 2\pi (r+dr) L \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r+dr} \end{aligned} \right\} \Rightarrow -\lambda 2\pi r L \left(\frac{dT}{dr} \right)_r = -\lambda 2\pi (r+dr) L \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r+dr}$$

$$D'où : r \frac{dT}{dr} = C$$

Avec les conditions aux limites : $T(r_1) = T_1$ et $T(r_2) = T_2$

$$D'o\grave{u} : \frac{T(r) - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Et par application de la relation $\Phi = -\lambda L 2\pi r \frac{dT}{dr}$, on obtient :

$$\Phi = 2\pi\lambda L \frac{(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1.23)$$

Cette relation peut aussi \^etre mise sous la forme :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad (1.24)$$

$$\text{Avec : } R_{th} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda L}.$$

Le sch\ema \e9lectrique \e9quivalent peut \^etre repr\esent\e9 par la figure qui suit :

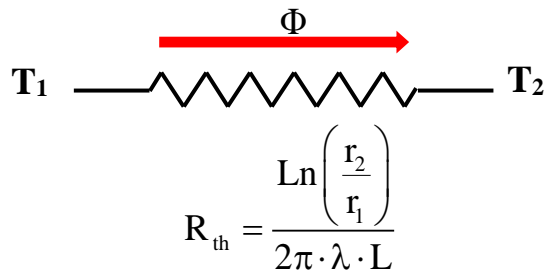


Figure 1.10 : Sch\ema \e9lectrique \e9quivalent d'un cylindre creux [6]

1.5.3.2. Cylindre creux multicouche

C'est le cas pratique d'un tube recouvert d'une ou plusieurs couches de mat\erieux diff\erents et o\`u l'on ne conna\^it que les temp\eratures T_{f1} et T_{f2} des fluides en contact avec les faces interne et externe du cylindre ; h_1 et h_2 sont les coefficients de transfert de chaleur par convection entre les fluides et les faces internes et externes (figure 1.11).

En r\egime permanent, le flux de chaleur Φ se conserve lors de la travers\ee des diff\erentes couches et s'\e9crit :

$$\begin{aligned} \Phi &= h_1 \cdot \underbrace{2\pi \cdot r_1 \cdot L}_{S_1} (T_{f1} - T_1) = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_1 \cdot L}} = \frac{(T_2 - T_3)}{\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \cdot \lambda_2 \cdot L}} \\ &= h_2 \cdot \underbrace{2\pi \cdot r_3 \cdot L}_{S_3} (T_3 - T_{f2}) \end{aligned} \quad (1.25)$$

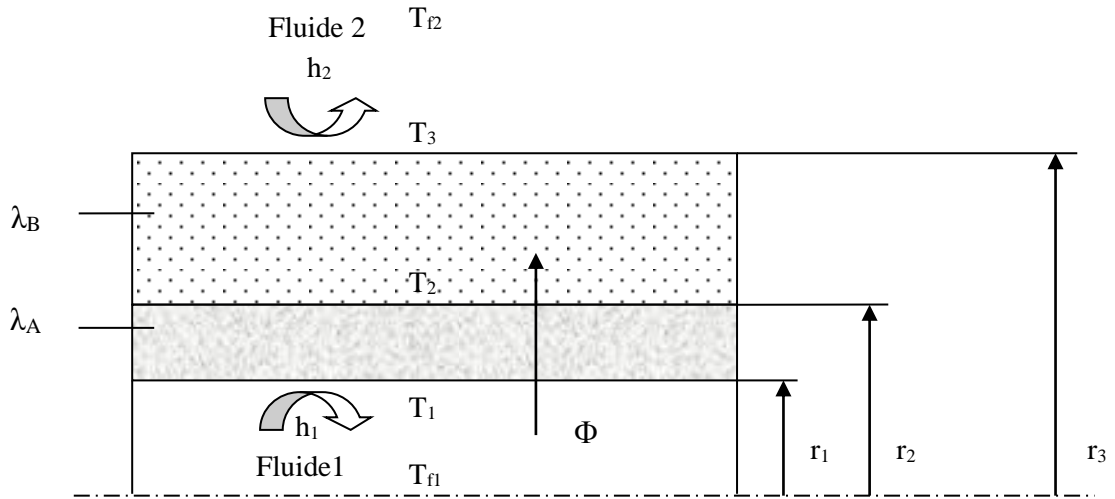


Figure 1.11 : Schéma des transferts dans un cylindre creux multicouche [6]

Donc, on a :

$$\Phi = \frac{(T_{f1} - T_{f2})}{\underbrace{\frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1 \cdot L}}_{R_{th1}} + \underbrace{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_1 \cdot L}}_{R_{th2}} + \underbrace{\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \cdot \lambda_2 \cdot L}}_{R_{th3}} + \underbrace{\frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3 \cdot L}}_{R_{th4}}} \quad (1.26)$$

Ce qui peut être représenté par le schéma électrique équivalent de la figure qui suit :

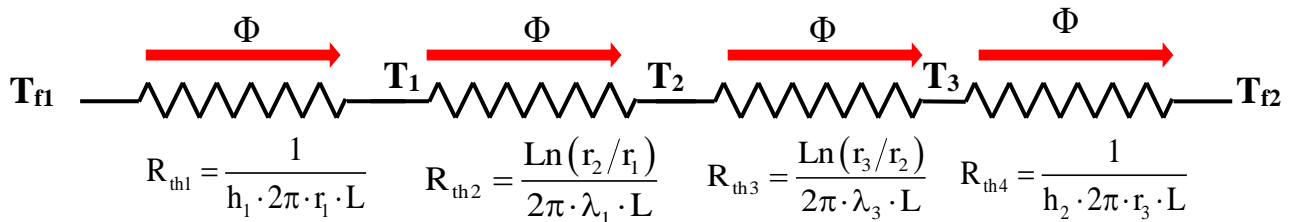


Figure 1.12 : Schéma électrique équivalent d'un cylindre creux multicouche [6]

1.6. Conduction vive [8]

Ce phénomène peut être présenté dans les différents cas suivants :

- Fil conducteur traversé par un courant électrique.
- Plaque chauffante ; une source de chaleur par unité de volume uniforme.
- Réacteur nucléaire.

Cette chaleur dégagée de la source peut être uniforme ou non uniforme (liée au temps, à l'espace, etc.).

1.6.1. Cas d'une plaque plane [8]

L'équation générale de la conduction de la chaleur en régime permanent (stationnaire) avec source de chaleur (conduction vive) se réduit donc à l'équation de Poisson :

$$\Delta T + \frac{\phi}{\lambda} = 0 \quad (1.27)$$

Ou encore :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\phi}{\lambda} = 0 \quad (1.28)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx} \right) = -\frac{\phi}{\lambda}$$

1^{er} intégrale : $\left(\frac{dT}{dx} \right) = -\frac{\phi}{\lambda} x + A$

2^{ème} intégrale :

$$T(x) = -\frac{\phi}{2\lambda} x^2 + Ax + B \quad (1.29)$$

Remarque

On remarque que l'allure de $T(x)$ est parabolique contrairement à l'allure linéaire dans le cas d'une conduction morte ($\phi = 0$).

Les constantes d'intégration A et B sont calculées à partir des conditions aux limites (conditions de Dirichlet c.-à-d. des températures imposées).

Pour : $T(x=0) = T_{P1} \Rightarrow B = T_{P1}$

Pour : $T(x=e) = T_{P2} \Rightarrow A = \frac{(T_{P2} - T_{P1})}{e} + \frac{\phi \cdot e}{2\lambda}$

Donc :

$$T(x) = \frac{\phi}{2\lambda} (ex - x^2) + \frac{(T_{P2} - T_{P1})}{e} x + T_{P1} \quad (1.30)$$

D'après l'allure de $T(x)$ qui est parabolique, on peut avoir une valeur de température maximale ou minimale suivant qu'on a une source de chaleur ($\phi > 0$ chauffage) ou un puit de chaleur ($\phi < 0$ refroidissement).

La température est maximale pour la position tel que :

$$x_{\max} = \frac{e}{2} - \frac{1}{\phi \cdot e} (T_{P1} - T_{P2}) \quad (1.31)$$

Le flux thermique Φ_x traversant la plaque est :

$$\Phi_x = -\lambda \cdot S \frac{dT}{dx} = -\lambda \cdot S \left[\frac{\phi}{2\lambda} (e^{-2x}) + \frac{(T_{P2} - T_{P1})}{e} \right] \quad (1.32)$$

Ou encore :

$$\Phi_x = \phi \cdot S \cdot x - S \left[\frac{\phi \cdot S \cdot e}{2} + \frac{\lambda \cdot S}{e} (T_{P2} - T_{P1}) \right] \quad (1.33)$$

On remarque que le flux de chaleur varie linéairement avec « x ».

1.6.2. Cas d'un cylindre plein avec source interne de chaleur [8]

On suppose que $\phi = \text{constante}$, le régime est permanent et que le transfert de chaleur est radial. L'équation de Poisson de la chaleur s'écrira alors :

$$\Delta T + \frac{\phi}{\lambda} = 0$$

Puisque le transfert de chaleur est radial, alors le Laplacien en coordonnées cylindriques s'écrit :

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} = -\frac{\phi}{\lambda} \quad (1.34)$$

Pour résoudre cette dernière équation, on utilise le changement de variable suivant : $z = \frac{dT}{dr}$;

on obtient l'équation différentielle du premier ordre suivante :

$$\frac{dz}{dr} + \frac{z}{r} = -\frac{\phi}{\lambda} \quad (1.35)$$

Cette dernière est une équation différentielle du premier ordre mais à coefficients variables.

Pour la résoudre, on utilise alors la méthode de superposition des solutions : $z = z_h + z_p$.

Où z_h représente la solution de l'équation homogène (sans second membre).

$$\frac{dz}{dr} + \frac{z}{r} = 0 \quad (1.36)$$

En séparant les variables, l'équation précédente peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{dz}{z} = -\frac{dr}{r} \quad (1.37)$$

En intégrant, on obtient : $z_h = \frac{A}{r}$.

Où A est une constante strictement positive. Pour déterminer la solution particulière z_p , on utilise la méthode de variation de la constante d'intégration, c.-à-d. on pose : $A = A(r)$.

Donc : $z_p = \frac{A(r)}{r}$.

$$\frac{dz_p}{dr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{dA}{dr} - \frac{A(r)}{r^2} \quad (1.38)$$

Par substitution des équations x et y dans z, on obtient :

$$\left(\frac{A'(r)}{r} - \frac{A(r)}{r^2} \right) + \frac{A(r)}{r^2} = -\frac{\phi}{\lambda} \quad (1.39)$$

En séparant les variables, on trouve :

$$dA(r) = -\frac{\phi}{\lambda} \cdot r \cdot dr \quad (1.40)$$

Par intégration, on a :

$$A(r) = -\frac{\phi}{2\lambda} \cdot r^2 + B \quad (1.41)$$

Donc, la solution particulière devient :

$$z_p = \frac{A(r)}{r} = \frac{\left(-\frac{\phi}{2\lambda} r^2 + B \right)}{r} = -\frac{\phi}{2\lambda} r + \frac{B}{r} \quad (1.42)$$

La superposition des solutions homogènes et particulière, nous donne :

$$z = z_h + z_p = \underbrace{\frac{A}{r} + \frac{B}{r}}_{C/r} - \frac{\phi}{2\lambda} r = \frac{C}{r} - \frac{\phi}{2\lambda} r \quad (1.43)$$

$$\text{Or : } z = \frac{dT}{dr} = \frac{C}{r} - \frac{\phi}{2\lambda} r$$

Donc :

$$T(r) = C \cdot \ln(r) - \frac{\phi}{4\lambda} r^2 + D \quad (1.44)$$

Où C et D sont deux constantes à déterminer par les conditions aux limites.

- Au centre du cylindre (pour $r = 0$), la température doit être finie $\Rightarrow C = 0$.
- Pour : $r = R$ (où R rayon extérieur du cylindre), $T = T_2 \Rightarrow D = T_2 + \frac{\phi}{4\lambda} \cdot R^2$

Le profil radial de température s'écrit alors :

$$T(r) = T_2 + \frac{\phi}{4\lambda} (R^2 - r^2) \quad (1.45)$$

La température au centre du cylindre s'obtient en substituant dans la dernière équation :

$$T(r=0) = T_{\max} = T_2 + \frac{\phi}{4\lambda} R^2 \quad (1.46)$$

Le profil radial de température s'écrira donc en fonction de T_{\max} comme suit :

$$T(r) = T_{\max} - \frac{\phi}{4\lambda} r^2 \quad (1.47)$$

1.7. Conduction unidirectionnelle en régime variable sans changement d'état et avec une température uniforme [8]

On va étudier le transfert de chaleur vers un milieu à température uniforme, ce qui est a priori contradictoire car il est nécessaire qu'il y ait un gradient thermique pour qu'il se produise un transfert de chaleur. Cette approximation du milieu à température uniforme peut néanmoins être justifiée dans certains cas. Soit, par exemple, la trempe d'un solide métallique qui consiste à immerger ce dernier initialement à la température T_i dans un bain à température T_f maintenue constante. Si l'on suppose que la température à l'intérieur du solide est uniforme, ce qui sera d'autant plus vrai que sa dimension est petite et sa conductivité thermique élevée, on peut écrire le bilan thermique entre deux instants t et $t + dt$:

$$-h.S.(T - T_f) = \rho.V.C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1.48)$$

D'où :

$$\frac{T - T_f}{T_i - T_f} = \exp\left(-\frac{h.S}{\rho.V.C_p} \cdot t\right) \quad (1.49)$$

On remarque que le groupement $\frac{\rho.V.C_p}{h.S}$ est homogène à un temps, on l'appellera τ la constante de temps du système :

$$\tau = \frac{\rho.V.C_p}{h.S} \quad (1.50)$$

Cette grandeur est fondamentale dans la mesure où elle donne l'ordre de grandeur de temps du phénomène physique, on a en effet :

$$\frac{T - T_f}{T_i - T_f} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.51)$$

Il est toujours intéressant en physique de présenter les résultats sous forme adimensionnelle ; à cet effet, deux nombres adimensionnels sont particulièrement important en régime variable :

- Le nombre de Biot :

$$\text{Nombre de Biot} = \frac{\text{Résistance thermique interne (Conduction)}}{\text{Résistance thermique externe (Convection)}} = \frac{\frac{l_c}{\lambda.S}}{\frac{1}{h.S}} \quad (1.52)$$

Où l_c est la dimension caractéristique du milieu ; soit : $l_c = \frac{\text{Volume du corps}}{\text{Surface d'échange}}$.

Le tableau qui suit donne des dimensions caractéristiques pour des géométries différentes.

Forme géométrique du corps	Dimension caractéristique l_c
Plaque d'épaisseur « $2.e$ »	e
Cylindre long de rayon « r »	$r / 2$
Sphère de rayon « r »	$r / 3$
Cube d'arrête « \bar{a} »	$\bar{a} / 6$

Tableau 1.2 : Exemple de dimensions caractéristiques de quelques corps [8]

Remarque importante : l'hypothèse d'uniformité de la température est justifiée lorsque $Bi < 0.1$ (le corps est dit alors mince), alors $T = T(t)$. Si $Bi > 0.1$, le corps est dit épais, alors $T = T(x, t)$

- Le nombre de Fourier :

$$Fo = \frac{D_{th}.t}{l_c^2} \quad (1.53)$$

Le nombre de Fourier caractérise la pénétration de la chaleur en régime variable.

La définition de ces deux nombres permet d'écrire l'expression de la température sous la forme :

$$\frac{T - T_f}{T_i - T_f} = \exp(-Bi.Fo) \quad (1.54)$$

La connaissance du produit des nombres de Biot et de Fourier permet de déterminer l'évolution de la température. On considère généralement qu'un système tel que $Bi < 0.1$ peut être considéré comme étant à température uniforme ; le critère $Bi < 0.1$ est appelé le critère d'accommodation thermique.

Chapitre 2 :

**Éléments de réalisation de la
maquette**

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons évoquer les éléments qui interviennent dans la réalisation de la maquette didactique ainsi que leurs principes de fonctionnement ; à savoir : les capteurs de température, la carte Arduino, la source de chaleur, la plaque d'essais et l'écran d'affichage.

2.2. Capteurs de température [9]

Jusqu'à l'invention du thermoscope de Galilée, les hommes étaient incapables de quantifier les températures. Les thermomètres virent bientôt le jour, et avec eux les unités comme le degré Celsius et le Kelvin. Par la suite, les techniques automatisées voyant le jour, il fallut trouver le moyen de traduire les températures en signaux analogiques compréhensibles par des machines ; les sondes de température sont des capteurs permettant de transformer l'effet du réchauffement ou du refroidissement sur leurs composants en signal électrique.

2.2.1. Principaux types de capteurs de température [10]

Comme toutes les technologies, les capteurs de température ont considérablement évolué au fil des années. Aujourd'hui, trois principaux types sont utilisés dans l'ensemble du secteur ; à savoir :

✓ **Thermocouples** : Un thermocouple utilise deux fils métalliques pour produire une tension relative à la température présente dans la jonction entre eux. Il existe de nombreux types spécialisés de thermocouples ; ils peuvent combiner différents métaux pour mesurer plusieurs caractéristiques et plages de température et produire des étalonnages spécialisés.

✓ **Détecteurs de température à résistance (Resistance Temperature Detectors)** : Un capteur RTD mesure la température en fonction des variations de résistance à l'intérieur d'une résistance métallique. Les RTD les plus populaires, appelés capteurs PT 100, utilisent du platine et ont une résistance de 100 Ω à 0 °C.

✓ **Thermistances** : Une thermistance est comme un RTD, mais elle contient une résistance en céramique ou polymère au lieu du métal.

Le tableau qui suit donne une comparaison entre ces trois principaux types de capteurs.

Type de capteur	Thermistance	RTD	Thermocouple
Plage de température (standard)	de -100 à 325 °C	de -200 à 650 °C	de 200 à 1750 °C
Précision (standard)	de 0,05 à 1,5 °C	de 0,1 à 1 °C	de 0,5 à 5 °C
Stabilité à long terme à 100 °C	0,2 °C/an	0,05 °C/an	Variable

Linéarité	Exponentielle	Relativ. linéaire	Non linéaire
Puissance requise	Tension ou courant constants	Tension ou courant constants	Autoalimenté
Temps de réponse	Rapide 0,12 à 10 s	Généralement lent 1 à 50 s	Rapide 0,10 à 10 s
Sensibilité au bruit électrique	Rarement sensible Résistance élevée uniquement	Rarement sensible	Compensation de soudure froide/sensible
Coût	Faible à modéré	Haut	Bas

Tableau 2.1 : Comparaison entre capteurs de température [10]

L'adéquation de chaque type de capteur dépend de son application. Il est donc impossible de dire quel est le meilleur type en général. Les principaux avantages et inconvénients de chaque capteur sont résumés dans le tableau qui suit.

Type de capteur	Avantages	Inconvénients
Thermocouple	Plage de température Autoalimenté Pas de chauffage autonome Robuste	Compensation de soudure froide Précision Stabilité Rallonges TC
RTD	Précision Stabilité Linéarité	Erreur de résistance du câble Temps de réponse Résistance aux vibrations Taille
Thermistance	Sensibilité Précision Coût Robuste Joint hermétique Montage en surface	Non-linéarité Chauffage autonome Plages étroites

Tableau 2.2 : Avantages et inconvénients des capteurs de température [10]

2.2.2. Cas d'utilisation standards pour les capteurs de température [10]

De nombreuses applications peuvent être assurées par plusieurs types de capteurs ; à savoir :

✓ **Thermocouples :** Les thermocouples sont les capteurs de température les plus couramment utilisés dans l'industrie ; cela peut être dû à de nombreuses raisons :

- **Résistance aux vibrations :** Tout d'abord, les thermocouples sont le type de capteur le plus robuste. Leur conception est simple, ce qui rend les thermocouples résistants aux vibrations.

- **Faible coût** : Deuxièmement, les thermocouples étant peu coûteux, ils constituent la meilleure option lorsque plusieurs capteurs sont nécessaires dans la même application. Certaines applications en utilisaient des centaines, voire des milliers, en même temps. Le profilage thermique dans l'industrie automobile est un exemple.

- **Températures les plus élevées** : Les thermocouples sont les seuls capteurs de contact capables de mesurer des températures élevées. Toute température supérieure à 650 °C doit être mesurée par une sonde de thermocouple.

- **Réponse rapide** : Enfin, lorsqu'une réponse rapide est nécessaire, un thermocouple à jonction exposée fournit le retour le plus rapide aux changements de température.

✓ **RTD** : Les RTD offrent également plusieurs fonctionnalités et avantages uniques ; à savoir :

- **Températures élevées** : Les RTD sont adaptés lorsque la précision est requise à des températures élevées car ils peuvent mesurer jusqu'à 650 °C. Cette plage est beaucoup plus élevée que les thermistances.

- **Immunité au bruit électrique** : Outre une bonne précision, les RTD offrent une immunité élevée au bruit électrique. Les PT 100 sont la meilleure option pour les applications dans les environnements d'automatisation industrielle où l'on retrouve les moteurs, les générateurs et autres équipements de haute tension.

- **Moins affecté par l'environnement** : Enfin, si l'application se trouve dans un environnement difficile, le boîtier de protection d'un élément du RTD offre une bonne immunité à la plupart des problèmes environnementaux notamment par rapport aux thermocouples.

✓ **Thermistances** : Les thermistances présentent la meilleure option pour les mesures inférieures à 150 °C.

- **Meilleure sensibilité** : Premièrement, les thermistances offrent les meilleures performances sur cette plage même mieux que les sondes RTD ; deuxièmement, parce qu'elles offrent la meilleure sensibilité.

- **Faible coût** : D'un autre côté, les thermistances sont 2 ou 3 fois moins chères que les RTD et c'est la raison principale pour laquelle les thermistances sont utilisées dans les appareils ménagers courants, les chauffe-eau, etc.

Pour notre projet, nous avons opté pour les capteurs de température LM 35 et PT 100 qui sont adaptés à la mesure via une carte Arduino.

2.2.3. Capteur de température LM 35 [11]

Les séries de LM 35 sont des capteurs de température à circuit intégré avec précision, c'est-à-dire une tension de sortie linéairement proportionnelle à la température centigrade. Le dispositif LM 35 est avantageux par rapport aux autres capteurs de température linéaires calibrés en Kelvin, tant que l'utilisateur n'est pas tenu de soustraire une tension constante, et large de la sortie mise à l'échelle pour obtenir un centigrade pratique.

Le dispositif LM 35 ne nécessite aucun calibrage externe pour fournir des précisions typiques de $\pm 1/4$ °C à la température ambiante et de $\pm 3/4$ °C sur une pleine plage de température de -55 °C à 150 °C. Une sortie linéaire et à faible impédance, le LM 35 procède un étalonnage précis qui facilite la lecture pour les circuits de commande.



Figure 2.1 : Capteur de température LM 35 [11]

2.2.4. Capteur de température PT 100 [12]

Pour une mesure de température précise, rien ne bat une sonde RTD en platine. Les RTD sont des capteurs qui contiennent une résistance qui change en fonction de la température comme une sorte de thermistance.

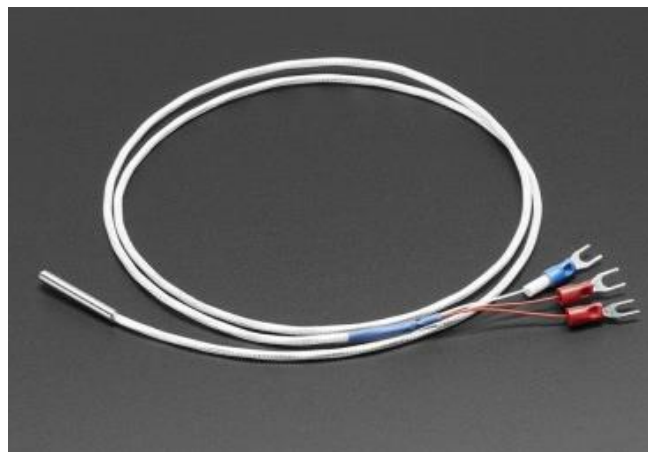


Figure 2.2 : Capteur de température PT 100 [13]

Dans ce capteur, la résistance est une petite bande de platine qui mesure 100 Ω à 0 °C, d'où le nom PT 100. Comparé à la plupart des thermistances PTC/NTC, la PT en RTD est plus stable

et plus précise, mais aussi plus chère. Les capteurs PT 100 ont été utilisés durant des années dans les laboratoires et l'industrie et elles ont fait leurs preuves. Ce capteur PT 100 de haute température est équipé d'un blindage en acier inoxydable qui peut supporter jusqu'à 550 °C.

2.2.4.1. Caractéristiques de la PT 100

- Basée sur une mesure de résistance.
- Le matériau de la résistance est du platine avec une résistance de 100 Ω à 0 °C.
- La platine a un facteur de résistance croissant avec la température.
- Le facteur de variation est de 0,385 $\Omega/^\circ\text{C}$ en nominal.
- Bonne stabilité et précision par rapport aux thermocouples, capteurs de température en silicone ou thermistances.

Chaque sonde est vendue avec un câble 3 conducteurs, 2 fils sont connectés de chaque côté de la résistance et le troisième est câblé à l'extrémité de la PT 100. Si votre ampli RTD supporte le câblage 3 fils, il va mesurer la tension de 3 fils pour la déduire de la valeur lue et ainsi annuler la perte en ligne. Il est possible de le faire fonctionner en 2 fils également.

2.2.4.2. Module amplificateur pour sonde PT 100 [14]

Les sondes PT 100 nécessitent l'utilisation d'un amplificateur avec compensation afin de mesurer la faible variation de leur résistance interne. Grâce au module 3328, on pourra utiliser des sondes PT 100 (non livrées) à 2, 3 ou 4 fils (sélection par pont de soudure) grâce au circuit amplificateur MAX31865 qu'il intègre.

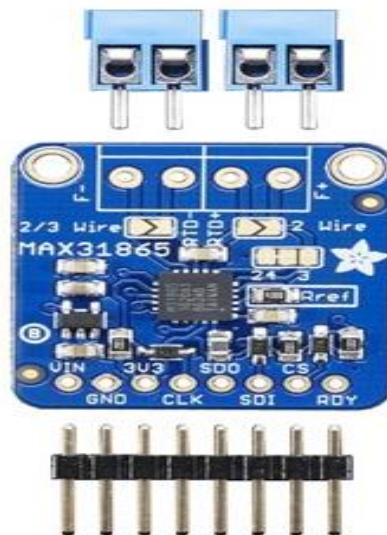


Figure 2.3 : Amplificateur pour PT 100 [14]

Le module est livré avec 2 borniers à vis 2 plots (pour y connecté votre sonde PT 100) ainsi qu'avec un connecteur mâle 1 x 8 contacts à souder par vos soins (pour l'alimenter et le

connecter à votre microcontrôleur). Le module intègre également un étage de régulation 3,3 V ainsi qu'un circuit d'adaptation de niveau, ce qui vous permettra d'interfacer ce dernier avec un Arduino ou tout autres microcontrôleurs (non inclus).

2.3. Carte Arduino [15]

2.3.1. Histoire d'Arduino [15]

La technologie Arduino a commencé comme une idée en 2003 par Hernando Barragán pour simplifier le microcontrôleur de timbre BASIC et réduire les coûts pour les étudiants non ingénieurs d'acheter une telle technologie à l'Institut de Conception Interactive à Ivrea en Italie. Un microcontrôleur est une petite carte d'ordinateur qui peut être programmée pour exécuter certaines fonctions. À l'époque, les microcontrôleurs de tampon BASIC coûtaient 100 \$ et plus ; Arduino a certainement réduit les coûts tout en maintenant la capacité d'exécuter diverses fonctions et la facilité de programmation de ces fonctions.

Supervisé par Massimo Banzi et Casey Reas, Barragán a travaillé dans le langage informatique appelé Processing pour créer l'environnement IDE (environnement et programme de codage officiel d'Arduino). Il a tripoté la technologie de la plate-forme de câblage pour créer le matériel appelé ATmega168, le premier microcontrôleur Arduino.

Plus tard en 2003, Massimo Banzi, David Mellis et David Cuartielles ont ajouté la prise en charge du câblage à leur carte microcontrôleur, nommée ATmega8, et ils ont retravaillé le code source du câblage en le nommant Arduino. Ensemble, les trois avec Tom Igoe et Gianluca Martino ont continué à développer les technologies Arduino. En 2013, 700 000 cartes de microcontrôleur ont été vendues par le seul fournisseur de la ville de New York Adafruit Industries.

Après quelques problèmes avec l'établissement de la marque pour Arduino, qui ont entraîné une scission dans l'entreprise pendant quelques années, Arduino est maintenant une entreprise unique qui s'est engagée dans le développement de matériel et de logiciels utilisables par la personne moyenne ou amateur, mais aussi flexible suffisamment pour intéresser l'ingénieur professionnel.

2.3.2. Avantages de la carte Arduino [16]

Il existe de nombreux microcontrôleurs et plates-formes disponibles : Parallax Basic Stamp, le BX-24 de Netmedia, Phidgets, le Handyboard du MIT qui offrent des fonctionnalités similaires à celles de la plate-forme Arduino. Tous ces outils prennent les détails désordonnés de la programmation des microcontrôleurs et les regroupent dans un package facile à utiliser. L'outil Arduino simplifie également le processus de travail avec des

microcontrôleurs mais offre les avantages suivants :

- **Peu coûteux** : Les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses par rapport aux autres plates-formes de microcontrôleurs. La version la moins chère du module Arduino peut être assemblée à la main, et même les modules Arduino préassemblés coûtent moins de 50 \$.

- **Multiplateforme** : Le logiciel Arduino (IDE) fonctionne sur les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes de microcontrôleur sont limités à Windows.

- **Environnement de programmation simple et clair** : Le logiciel Arduino (IDE) est facile à utiliser pour les débutants mais suffisamment flexible pour que les utilisateurs avancés puissent également en profiter. Pour les enseignants, il est idéalement basé sur l'environnement de programmation Processing, de sorte que les étudiants qui apprennent à programmer dans cet environnement seront familiarisés avec le fonctionnement de l'IDE Arduino.

- **Logiciel open source et extensible** : Le logiciel Arduino est publié en tant qu'outils open source disponibles pour extension par des programmeurs expérimentés. Le langage peut être étendu via des bibliothèques C++, et les personnes souhaitant comprendre les détails techniques peuvent faire le saut d'Arduino au langage de programmation AVR-C sur lequel il est basé.

- **Matériel open source et extensible** : Les plans des cartes Arduino sont publiés sous une licence « Creative Commons » de sorte que les concepteurs de circuits expérimentés peuvent créer leur propre version du module en l'étendant et en l'améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent créer la version de la maquette du module afin de comprendre son fonctionnement et d'économiser de l'argent.

2.3.3. Types de la carte Arduino® [17]

Il y a quatre types de cartes Arduino® :

- Les cartes officielles qui sont fabriquées en Italie par le fabricant officiel Smart Projects ; on retrouve par exemple la carte Arduino Nano, Uno, Mega, etc.
- Les cartes compatibles qui ne sont pas fabriquées par Smart Projects mais qui sont totalement compatibles avec les Arduino® officielles comme les Genuino vendues à l'extérieur des Etats Unis d'Amérique.
- Les cartes fabriquées par diverses entreprises et commercialisées sous un nom différent (Freeduino, Boarduino, Educaduino, ...).
- Les cartes clones fabriquées moins officiellement dont il faut généralement se méfier.

2.3.4. Constitution d'une carte Arduino® [17]

Une carte Arduino® est essentiellement composée des éléments suivants :

- **Circuit imprimé** : C'est une plaque, généralement faite à base d'époxy ou de fibre de verre, sur laquelle sont soudés plusieurs composants électroniques reliés entre eux par un circuit électrique.

- **Microcontrôleur** : C'est une sorte d'ordinateur minuscule comprenant mémoire vive, mémoire morte, processeur et entrées/sorties ; c'est celui-ci que l'on programme. Une fois le programme créé, on le lui envoie. Quand il le reçoit, il le stocke dans sa mémoire puis l'exécute. Le microcontrôleur fonctionne avec une alimentation de 5 V.

- **Circuit d'alimentation** : La carte peut être alimentée en 5 V par le port USB mais aussi par une alimentation externe. Il suffit d'une tension continue comprise impérativement entre 7 et 12 V et un régulateur interne se charge de réduire la tension à 5 V. On distingue aussi sur la carte les différentes broches d'alimentation :

- 5 V : tension régulée par la carte.
- 3,3 V : tension régulée par la carte.
- V_{in} : tension issue de l'alimentation externe de 7 ou 12 V.
- GND : mise à la terre.

- **Connectique** : La carte est extensible ; selon les projets à réaliser, il faut connecter des modules ou des montages sur la carte Arduino®. Plusieurs broches de connexion sont disponibles sur la carte et il y a un brochage à respecter. En général, à part les broches d'alimentation, il y a les broches numériques et les broches analogiques.

○ Broches analogiques : Les entrées analogiques permettent de convertir une tension analogique V_e de 0 à 5 V en une valeur numérique d'une résolution de 10 bits.

○ Broches numériques ou digitales : Ce sont les broches (0 ou 1) ou « tout ou rien ».

Elles offrent en sortie du 5 V et acceptent en entrée du 5 V sur le même principe. Les broches numériques et analogiques peuvent être utilisées en entrées et en sorties.

La figure qui suit montre les emplacements numérotés des éléments essentiels de la carte Arduino® UNO que nous utilisons pour ce travail. Le microcontrôleur (1), en (2) le port USB pour l'alimentation et la communication avec l'ordinateur, en (3) le port pour brancher une alimentation externe, les broches numériques (4), les broches analogiques (5) et les broches d'alimentation (6), enfin, en (7) et (8) se trouvent deux LED témoins : l'une s'allume quand la carte est mise sous tension, et l'autre clignote ou reste allumée selon le programme chargé dans la carte.

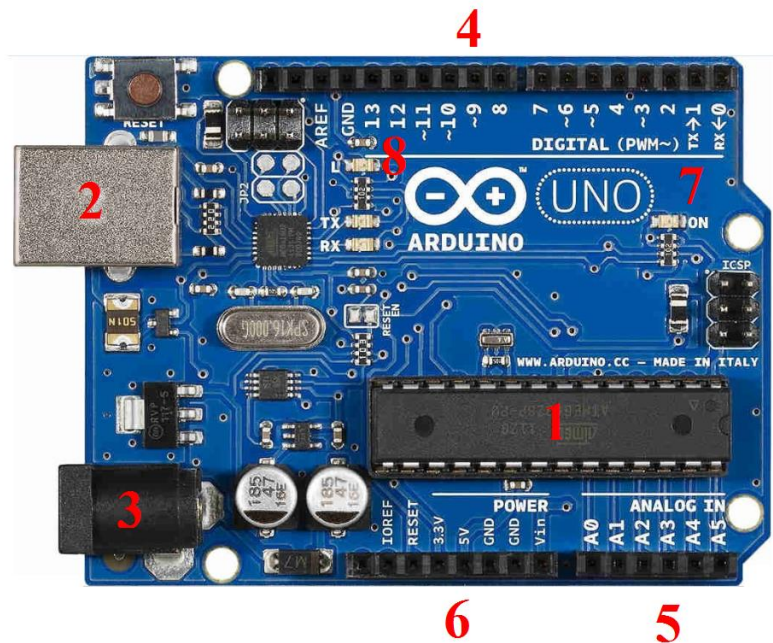


Figure 2.4 : Carte Arduino® UNO [18]

Pour commander une Arduino sur PC, on installe le logiciel du même nom Arduino IDE (version 1.8.5 dans notre cas) qui est une application Java et qui a l'interface montrée dans la figure qui suit.



Figure 2.5 : Vue d'ensemble du logiciel Arduino [18]

Le logiciel Arduino a pour fonctions principales de :

- pouvoir écrire et compiler des programmes pour la carte Arduino ;
- se connecter avec la carte Arduino pour y transférer les programmes ;
- communiquer avec la carte Arduino.

L'interface du logiciel contient aussi une barre d'outils, une barre des boutons pour vérifier et compiler (télé-verser) ainsi que l'espace de travail comme montré par la figure suivante.

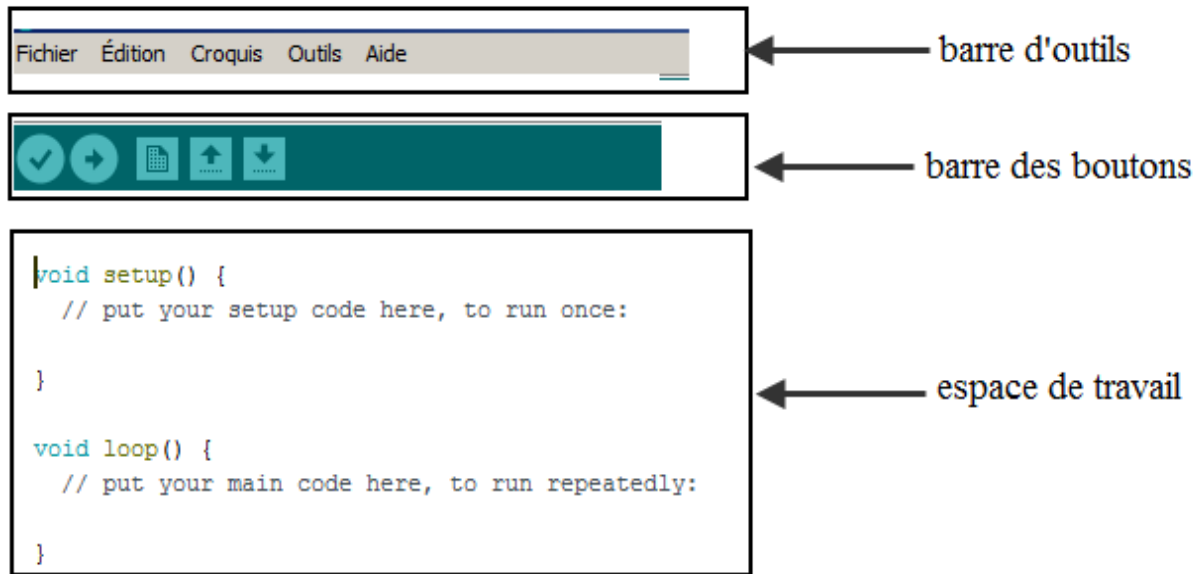


Figure 2.6 : Interface du logiciel Arduino [18]

Cet espace de développement intégré (EDI) dédié au langage Arduino et à la programmation des cartes Arduino comporte :

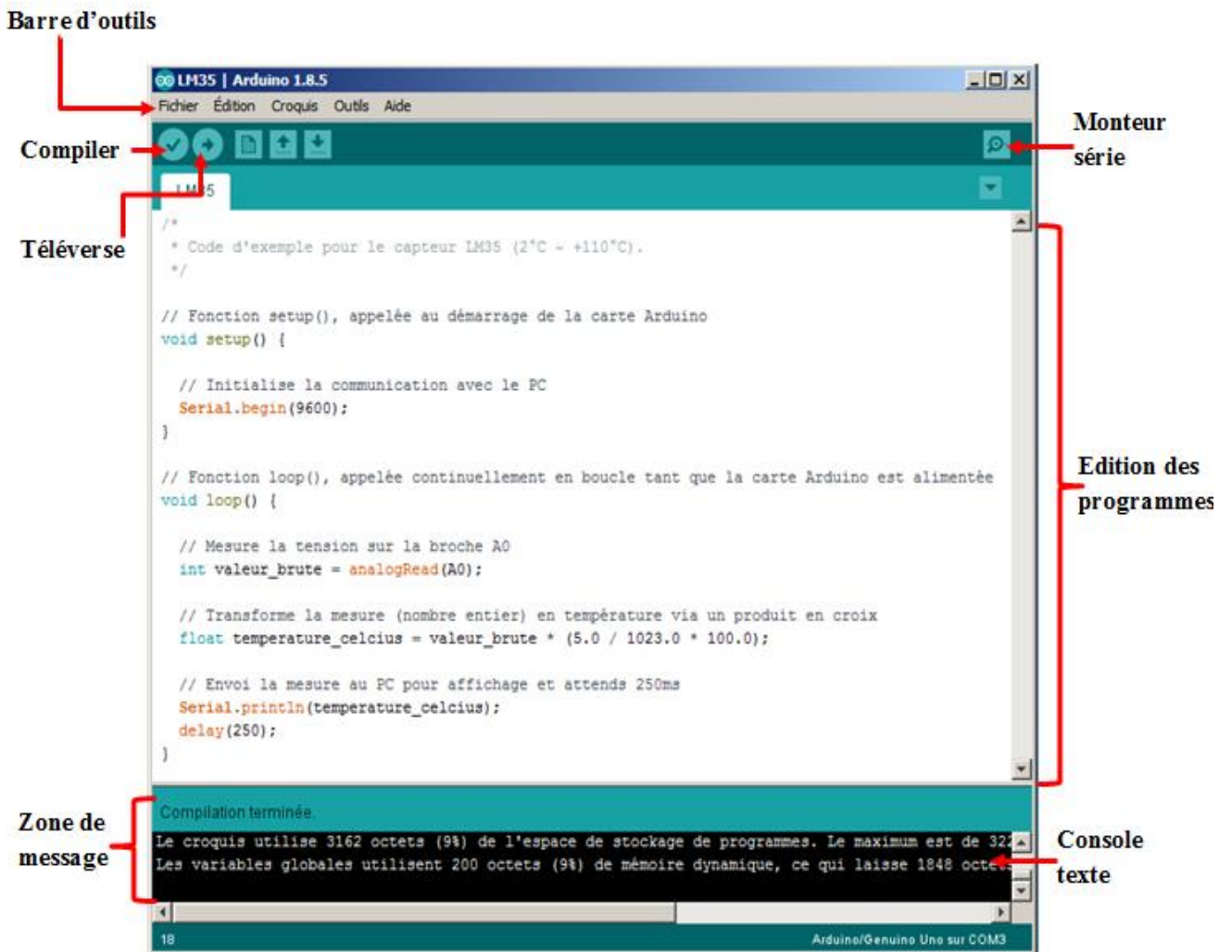


Figure 2.7 : Vue d'ensemble de l'espace de travail du logiciel Arduino [18]

- Une **barre d'outils** comme pour tout logiciel une interface graphique (GUI).
- Une **barre des boutons** qui donne un accès direct aux fonctions essentielles du logiciel (Compiler, Télé-verser).
- Un **monteur série** qui affiche sur l'ordinateur l'état de variables, de résultats ou de conversions analogique-numérique.
- Un **éditeur** (Edition des programmes) pour écrire le code de programme avec onglets de navigation.
- Une **zone de message** qui affiche et indique l'état des actions en cours.
- Une **console texte** qui affiche les messages concernant le résultat de la compilation du programme.

2.4. Source de chaleur [19]

Comme source de chaleur, on utilise un fer à souder ayant une puissance de 40 W.



Figure 2.8 : Source de chaleur [20]

Un **fer à souder** est un outil qui permet de réaliser des soudures ; il s'appelle fer puisque son élément principal est la pièce métallique qui confère une température suffisante à des pièces destinées à être assemblées par une brasure.

Note : le terme "fer à souder" est impropre, puisqu'il sert en fait à réaliser une opération de brasage. Il devrait plus justement être appelé "fer à braser".

Un fer à souder est constitués de trois éléments principaux :

- La panne qui est fabriquée en métal conduisant bien la chaleur. Les pannes en cuivre se corrodent assez rapidement ; on préfère les pannes dites « longue durée » faites d'alliage en couches. Il existe des pannes de différentes formes en fonction des travaux à réaliser. En électronique, on utilisera une panne fine pour les composants les plus petits (CMS : Composants Montés en Surface).

- Le système de chauffe, brûleur à gaz (butane ou propane) ou une résistance électrique.
- La poignée, isolante électriquement et thermiquement.

2.5. Plaque d'essais [21]

Une plaque d'essais est un outil pédagogique indispensable pour découvrir l'électronique. Son principal avantage est de permettre de réaliser des montages rapidement sans souder les composants ; il est donc possible de réutiliser les composants.

Elle est composée d'un plastique isolant avec des rangées verticales de 5 contacts et 4 lignes horizontales pour l'alimentation. Les lignes rouges pour relier les composants au « + » et les lignes bleues pour le « - ». Les composants sont plantés dans les trous de diamètre 0,8 mm. Il ne faut pas essayer de planter des composants ayant des connexions de diamètre supérieur.

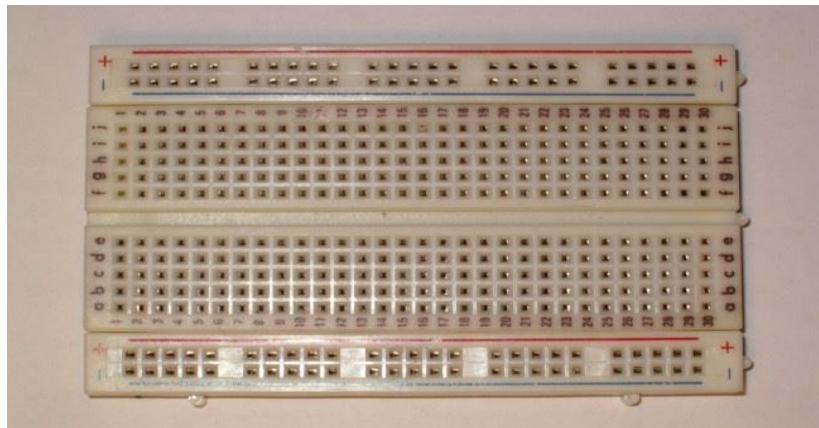


Figure 2.9 : Plaque d'essais [21]

La plaque d'essai utilise des barrettes métalliques isolées les unes des autres pour mettre en contact les composants sans que l'on ait besoin de les souder. Elle permet de placer les composants mais reste insuffisante pour la totalité des liaisons électriques. Il est donc nécessaire d'utiliser des fils électriques volants en complément. Ces derniers sont réalisés avec du fil électrique isolé que l'on dénude aux extrémités. Il est pratique d'avoir du fil monobrin et du fil multibrin. Le fil monobrin est rigide, donc pratique pour les liaisons permanentes. Le fil multibrin est souple, donc plus pratique pour les modifications lors de l'étude.

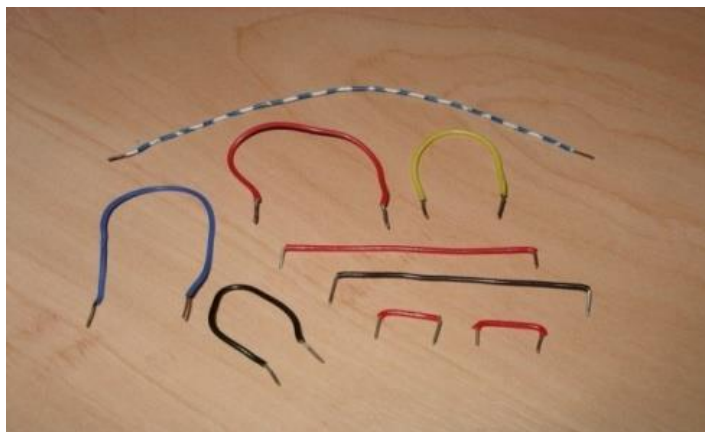


Figure 2.10 : Fils de connexion [21]

2.6. Ecran d'affichage [22]

✓ **Un écran LCD** : Un écran LCD (Liquid Crystal Display) ou affichage à cristaux liquides en Français est un dispositif qui permet d'afficher des caractères tout en consommant assez peu d'électricité ; c'est pourquoi on le retrouve dans de nombreux projets électroniques et sur tous types d'appareils.



Figure 2.11 : Ecran d'affichage [22]

✓ **Un module I2C** : Un I2C (Inter-Integrated Circuit) est un bus informatique conçu pour les applications de domotique et d'électronique domestique ; il permet de relier facilement un microprocesseur et différents circuits tout en réduisant le nombre de lignes nécessaires à seulement deux lignes : SDA (Serial Data) et SCL (Serial Clock).

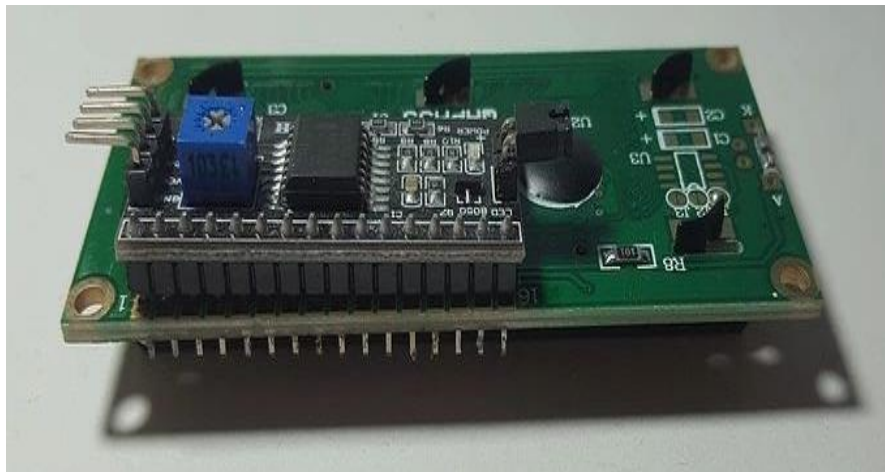


Figure 2.12 : Module I2C [22]

✓ **Montage de l'écran LCD et du module I2C** : Le montage est représenté sur la figure qui suit :

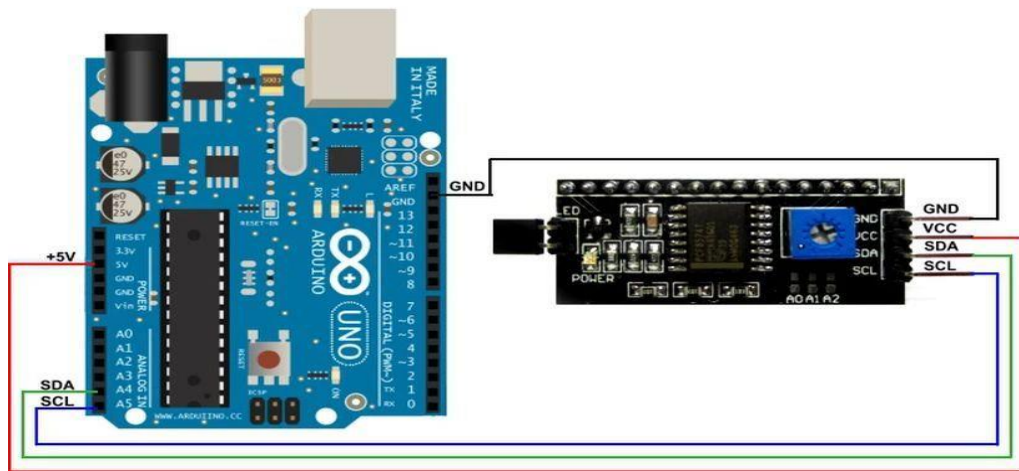


Figure 2.13 : Montage LCD-I2C-Arduino [22]

Chapitre 3 :

Résultats et discussion

3.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à la mise en œuvre de la maquette didactique tout en effectuant les tâches relatives à la mesure de la température en temps réel et l'affichage du signal temporel de la température à l'aide d'une interface développée sous Excel. Aussi, pour simplifier la conception du prototype de la maquette didactique la réalisation comprend deux parties : une partie hardware et une partie software.

3.2. Partie hardware

3.2.1. Système à étudier

Pour rester dans le cadre des petits bancs d'essais didactiques pour le transfert de chaleur par conduction, on a opté pour un fil cylindrique plein de diamètre (2.5 mm) exposé ou relié à une source de chaleur. Aussi, nous allons considérer deux types de matériaux ; à savoir : le cuivre et l'acier.

3.2.2. Câblage

Le montage se compose d'un fil cylindrique, d'une carte Arduino UNO, des capteurs de température LM 35, d'une sonde de température PT 100 et trois résistances servant à stabiliser le signal reçu par l'Arduino à travers ses trois ports analogiques A0, A1 et A2.

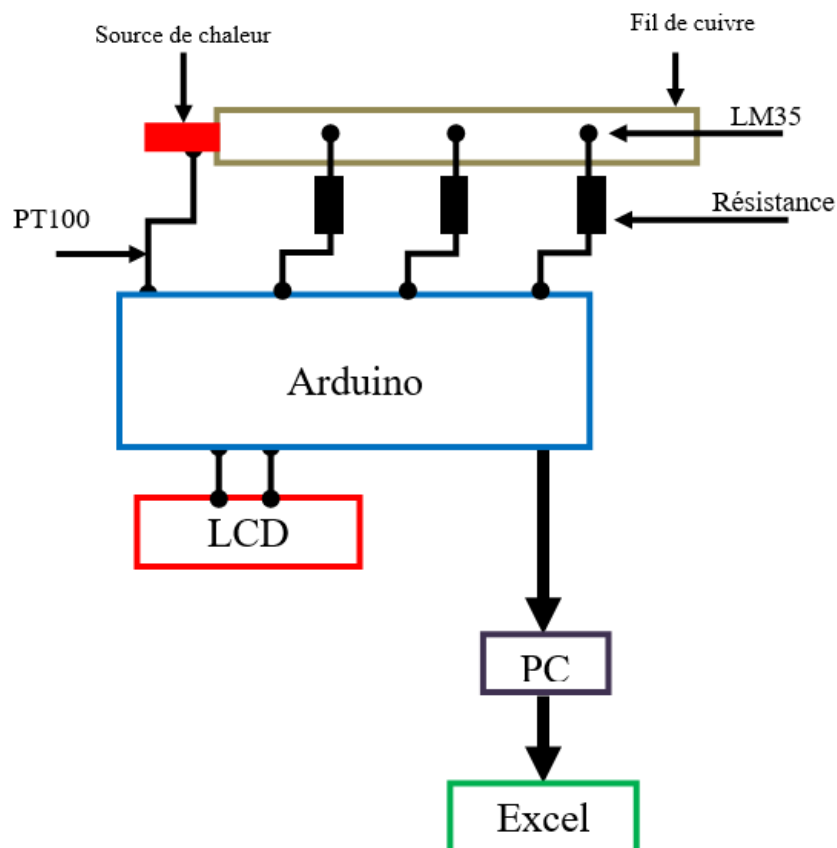


Figure 3.1 : Schéma de câblage de la maquette

Ce montage permet de capter et d'afficher la température le long du fil avec un pas de 5 cm. Pour récupérer le signal, l'Arduino est connecté directement un PC par l'USB qui garantit l'échange de l'information entre l'Arduino et le PC ainsi que l'alimentation de l'ensemble Arduino-capteurs.

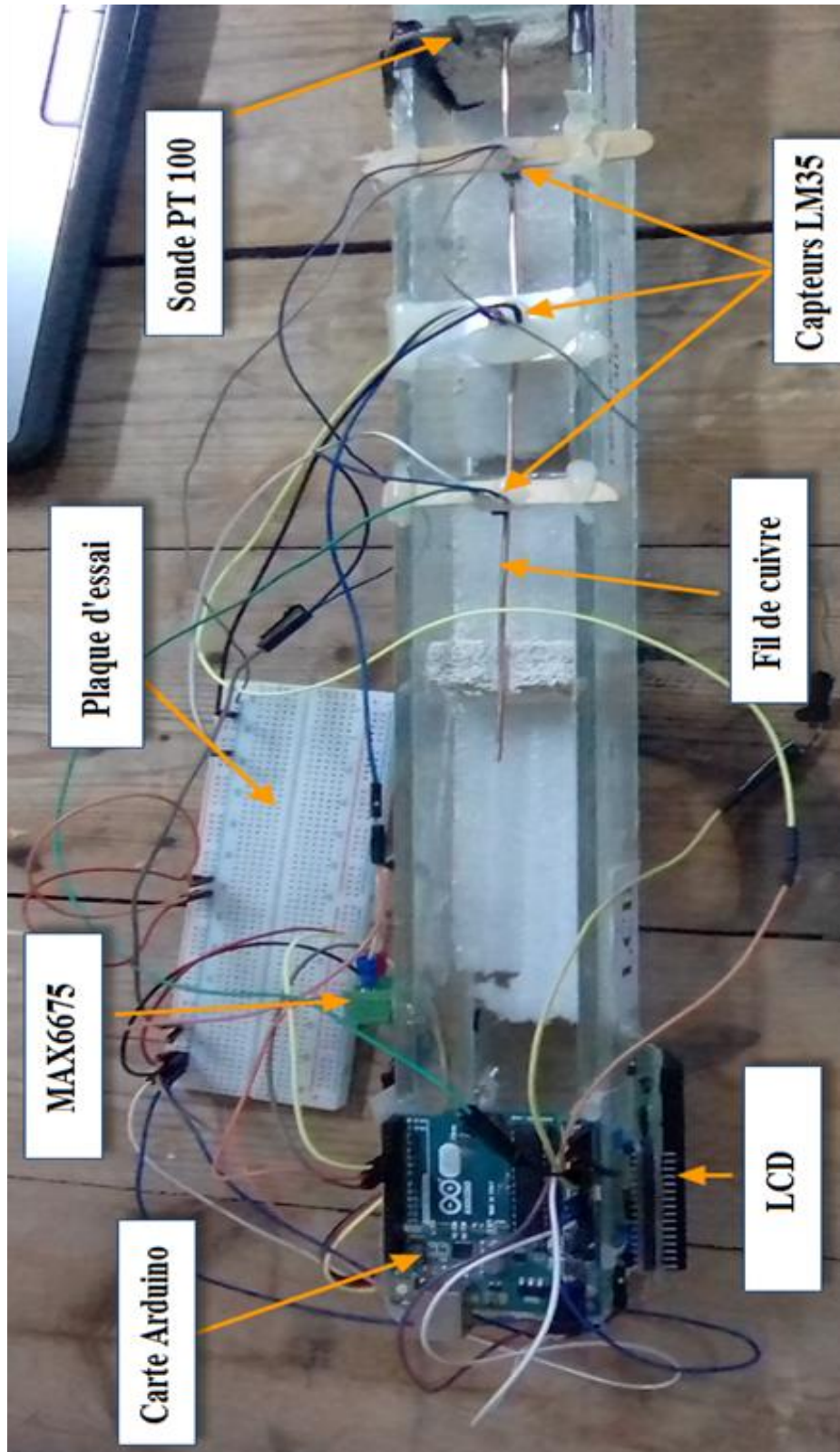


Figure 3.2 : Montage complet de la maquette

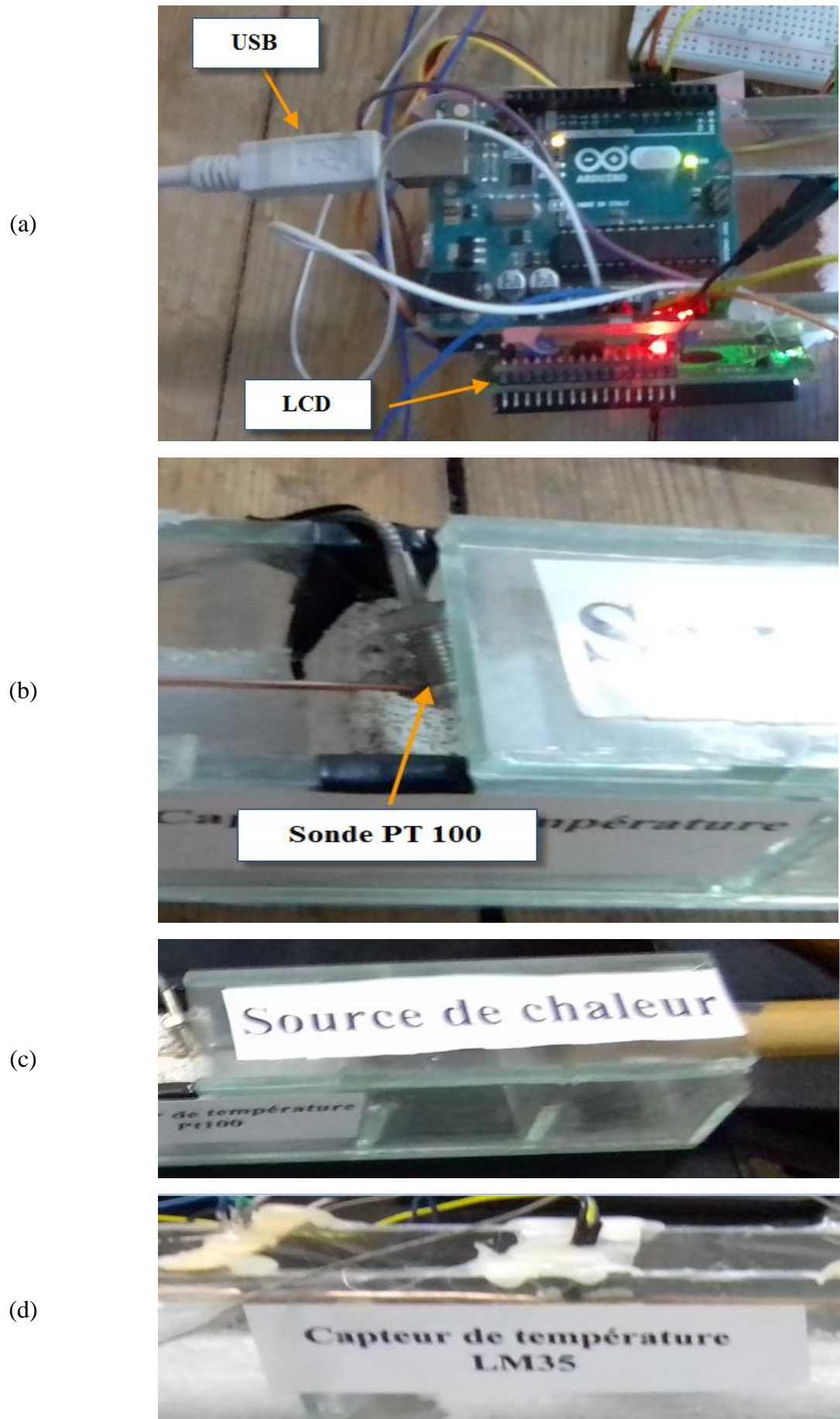


Figure 3.3 : Composants de la maquette

Pour afficher les valeurs captées de la température, un affichage numérique LCD est utilisé, la figure qui suit représente l’affichage de la température pour les trois capteurs LM 35. La valeur de la température de chaque capteur est affichée tous les (06) secondes.



Figure 3.4 : Affichage des valeurs de la température dans le LCD

3.3. Partie software

Deux logiciels ont été exploités afin de réaliser la partie software, l’un est celui de l’Arduino IDE qui est utilisé pour introduire les instructions exécutées par l’Arduino. L’autre permet d’établir la communication entre l’Arduino UNO et le PC ; l’utilisation de l’interface PLX-DAQ transfère les données dans un fichier Excel.

Le code software utilisé est le suivant :

```
#include <Wire.h>
#include <max6675.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
intthermoDO = 4;
intthermoCS = 5;
intthermoCLK = 6;
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
intvccPin = 3;
intgndPin = 2;
uint8_t degree[8] = { 140,146,146,140,128,128,128,128};
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("CLEARDATA"));
  Serial.println(F("LABEL, Temps, Ts, T1, T2, T3"));
  pinMode(vccPin, OUTPUT); digitalWrite(vccPin, HIGH);
  pinMode(gndPin, OUTPUT); digitalWrite(gndPin, LOW);
```

```
lcd.backlight();
lcd.begin();
delay(500);
}
void loop() {
intValeur=analogRead(A0);
int Valeur1=analogRead(A1);
int Valeur2=analogRead(A2);
intVout=Valeur*5.0/1023*1000;
int Vout1=Valeur1*5.0/1023*1000;
int Vout2=Valeur2*5.0/1023*1000;
inttemp=Vout/10;
int temp1=Vout1/10;
int temp2=Vout2/10;
Serial.print("DATA,TIME,");
Serial.print(temp);
Serial.print(F(", "));
Serial.print(temp1);
Serial.print(F(", "));
Serial.print(temp2);
Serial.print(F(", "));
Serial.println(thermocouple.readCelsius());
delay(2000);
lcd.setCursor(1,0);
lcd.print("T1 :");
lcd.print(temp);
lcd.setCursor(9,0);
lcd.print("T2 :");
lcd.print(temp1);
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("T3 :");
lcd.print(temp2);
delay(2000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(1,0);
lcd.print("P=40W");
lcd.setCursor(8,0);
lcd.print("t : ");
lcd.print(millis()/1000);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Tso : ");
lcd.print(thermocouple.readCelsius());
#if ARDUINO >= 100
lcd.write((byte)0);
```



```
#else
lcd.print(0, BYTE);
#endif
lcd.print("C ");
#if ARDUINO >= 100
lcd.write((byte)0);
#else
lcd.print(0, BYTE);
#endif
delay(2000);
lcd.clear();
}
```

L'interface Parallax Data Acquisition tool [PLX-DAQ] (figure 3.5) est une macro pour Excel mise au point par la société Parallax pour permettre aux microcontrôleurs qu'elle commercialise d'envoyer des données vers Excel. Ce logiciel est gratuit, et ça fonctionne avec n'importe quel microcontrôleur capable de communiquer via le port série.

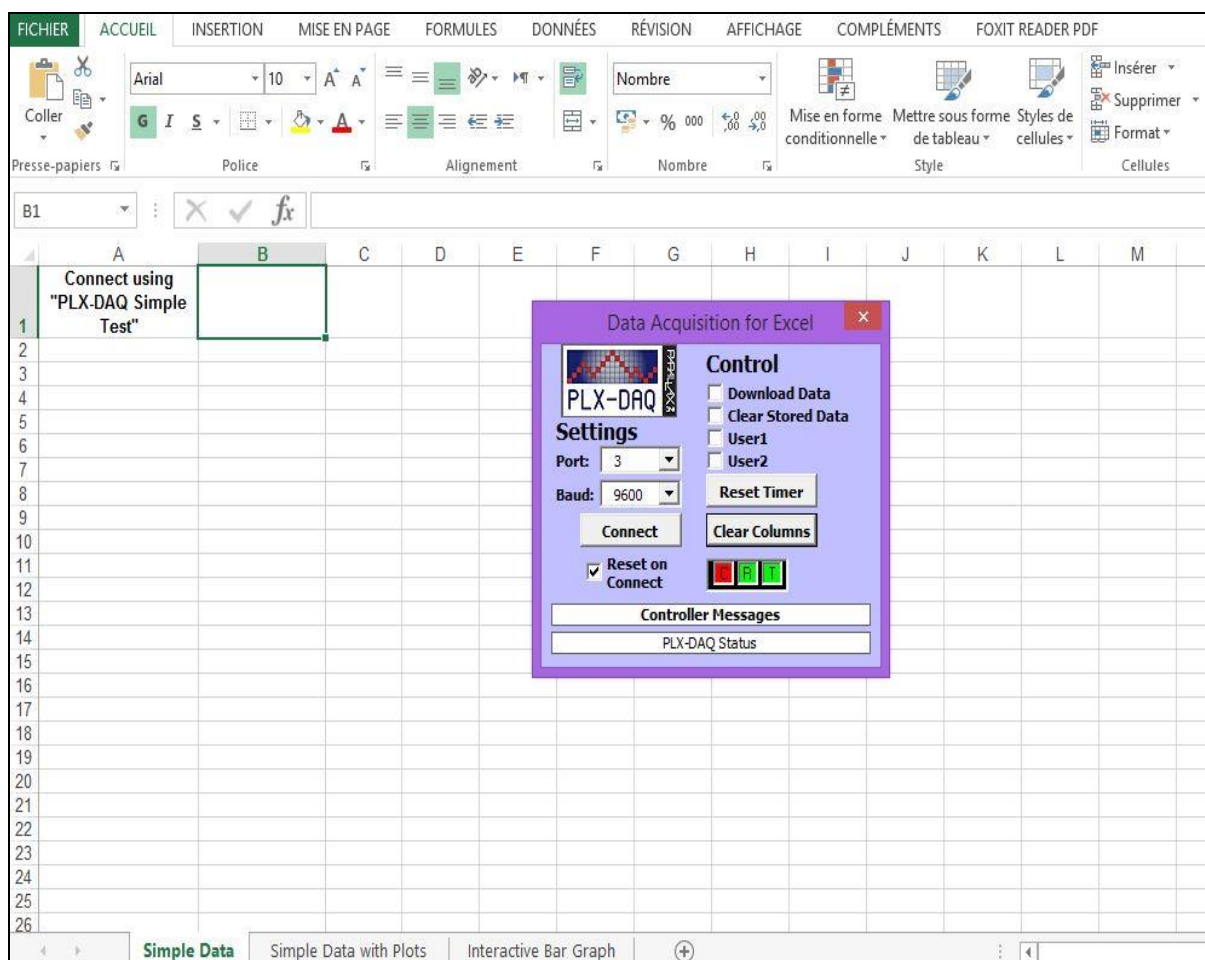


Figure 3.5 : Interface de PLX-DAQ et Excel

3.4. Résultats obtenus

Les figures qui suivent relatent respectivement la mesure des températures le long des fils en cuivre et en acier.

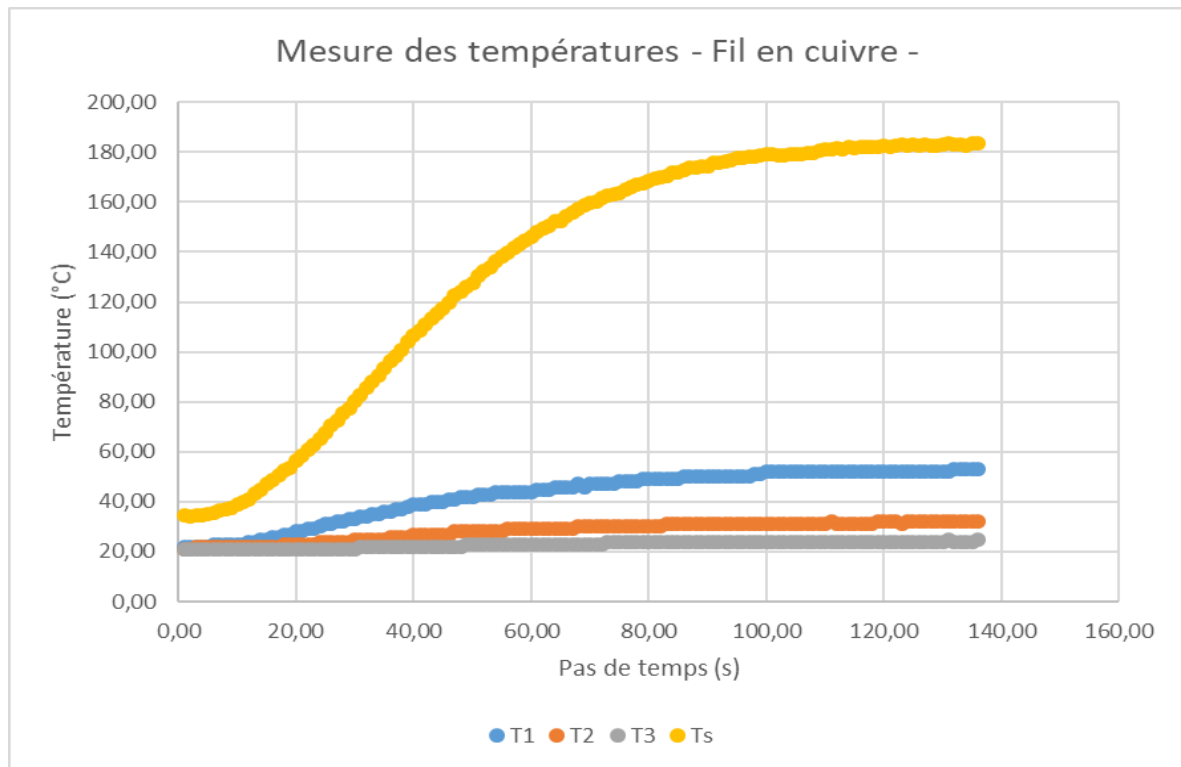


Figure 3.6 : Mesure des températures - Fil cylindrique plein en cuivre -

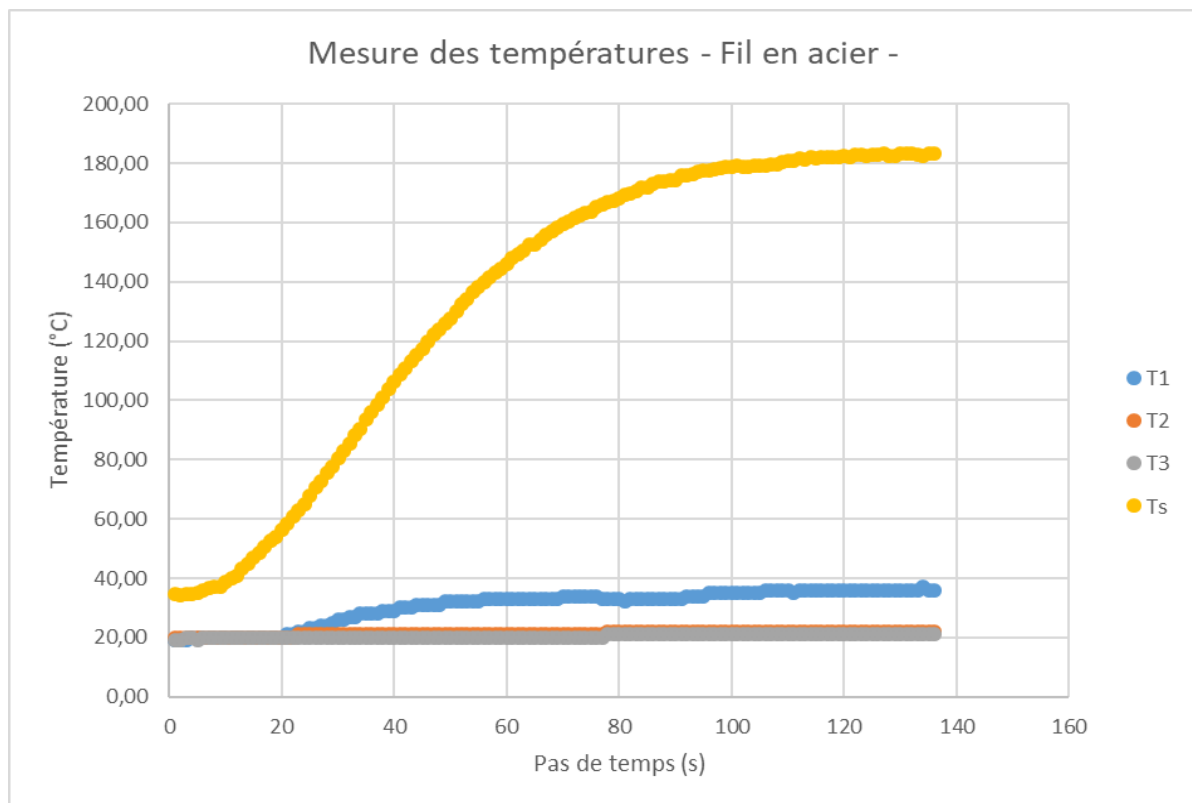


Figure 3.7 : Mesure des températures - Fil cylindrique plein en acier -

Notons que la puissance électrique imposée par la source de chaleur (fer à souder) est fixée à 40 W. Le pas de temps est de (06) secondes pour chaque mesure de température ; donc, un horizon de (140) pas correspond à une durée d'environ (14) minutes. Le premier point de mesure qui correspond à la température (T_1) se trouve à une distance de 5 cm de la source de chaleur. Pour les figures 3.6 et 3.7, on remarque que la température augmente le long des fils en cuivre et en acier. Pour le fil en cuivre, l'augmentation est remarquable. Ceci implique que la diffusivité est grande pour le cuivre ; d'où, une conductivité thermique importante pour le cuivre.

Pas de temps [s]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_s [°C]
0	22,00	21	21	34,5
10	23,00	22	21	38,75
20	28,00	23	21	56,25
30	33,00	25	21	80,5
40	39,00	27	22	106,5
50	42,00	28	23	127,5
60	44,00	29	23	146,25
70	47,00	30	23	159,5
80	49,00	30	24	168,25
90	50,00	31	24	174,5
100	52,00	31	24	179
110	52,00	31	24	181
120	52,00	32	24	182,5
130	52,00	32	24	183,25

Tableau 3.1 : Mesure des températures – Fil en cuivre

Pas de temps [s]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_s [°C]
0	19,00	20	19	34,5
10	20,00	20	20	38,75
20	20,00	20	20	56,25
30	26,00	21	20	80,5
40	29,00	21	20	106,5
50	32,00	21	20	127,5
60	33,00	21	20	146,25
70	34,00	21	20	159,5
80	33,00	22	21	168,25
90	33,00	22	21	174,5
100	35,00	22	21	179
110	36,00	22	21	181
120	36,00	22	21	182,5
130	36,00	22	21	183,25

Tableau 3.2 : Mesure des températures – Fil en acier

Les variations de la température le long des fils en cuivre et en acier pour des temps donnés sont représentées respectivement sur les figure 3.8 et 3.9.

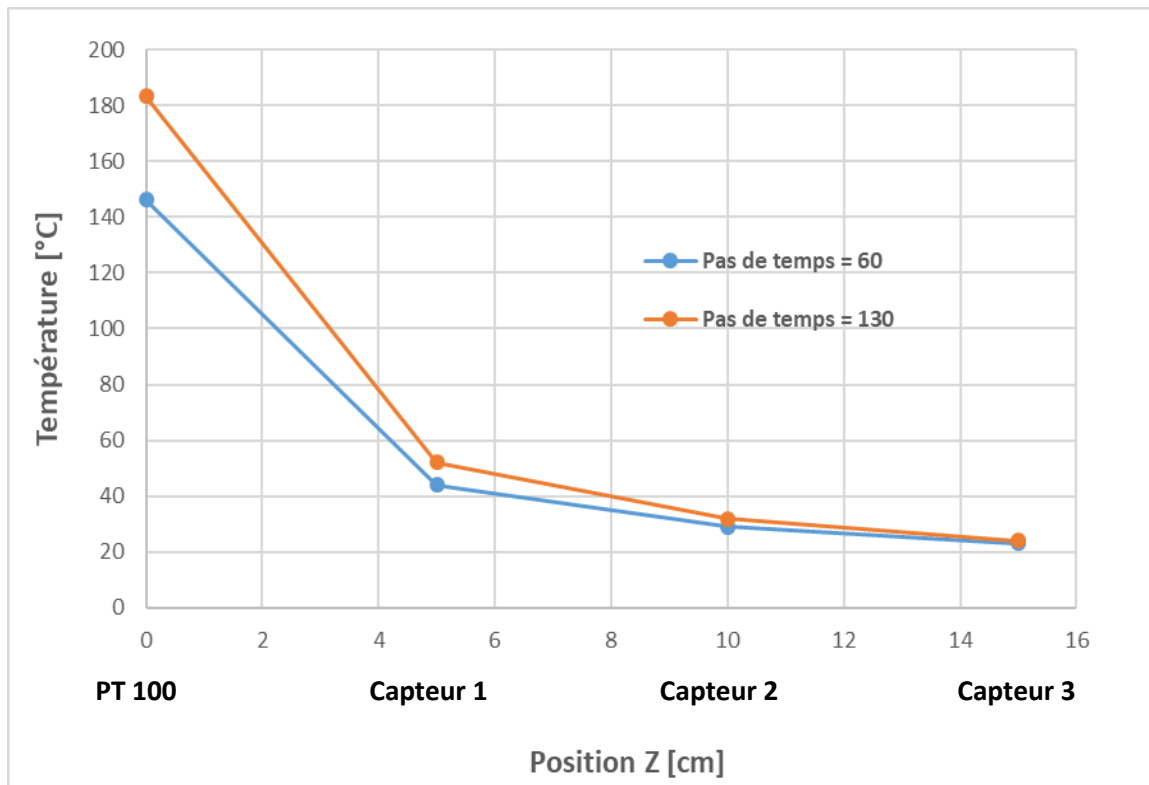


Figure 3.8 : Variation de la température le long du fil en cuivre pour des temps fixés

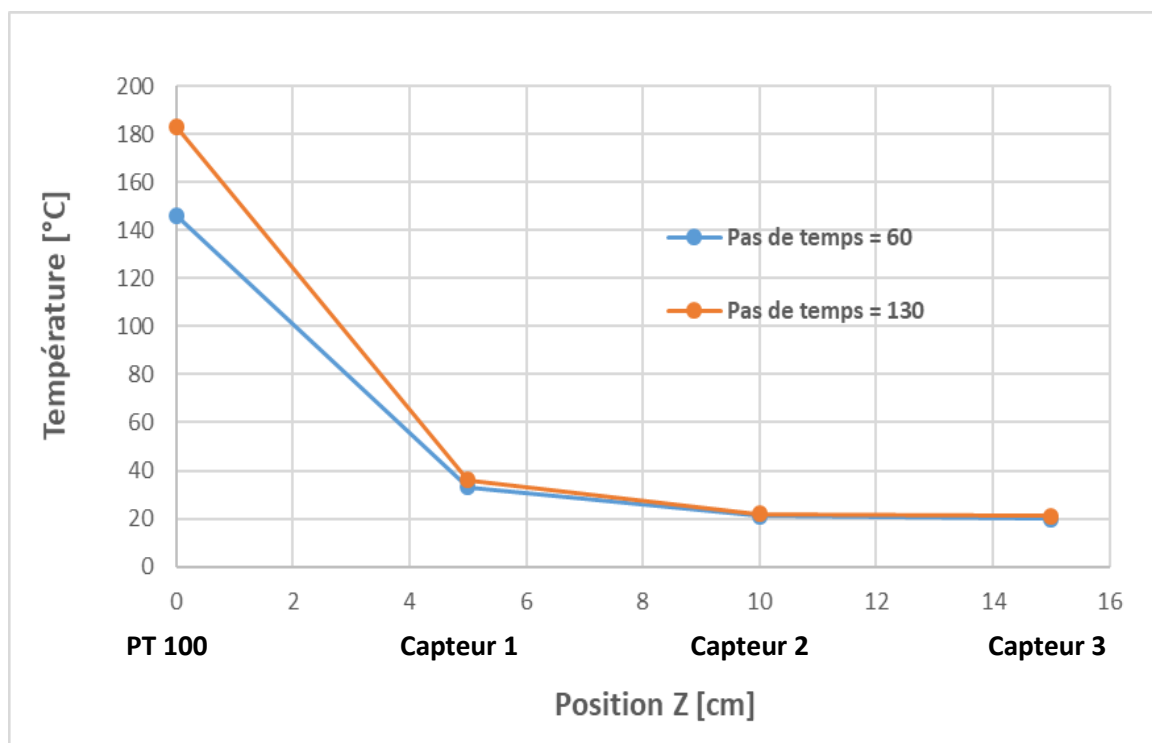


Figure 3.9 : Variation de la température le long du fil en acier pour des temps fixés

Pour ces dernières figures, nous remarquons pour le fil en cuivre que la température du capteur central (T_2) commence par augmenter après dans le temps. Par contre, pour le fil en acier la température (T_2) est toujours égale à la température ambiante. Ceci met en évidence que la diffusivité du cuivre est importante par rapport à celle de l'acier. Autrement dit, la conductivité thermique du cuivre est importante par rapport à celle de l'acier.

Conclusion générale

À travers le travail présenté dans ce mémoire, nous avons réalisé une maquette didactique pour mesurer la température en vue de comprendre le phénomène de la conduction thermique. À cet effet, nous avons utilisé des capteurs de température et une carte microcontrôleur Arduino. Les signaux collectés sont envoyés à un PC en utilisant l'application Excel pour une analyse plus approfondie des mesures thermiques.

La maquette didactique conçue permet la mesure de la température pour différents matériaux et dans différents points ainsi qu'une lecture en temps réel. Pour le présent travail, on a mesuré la température dans un fil cylindrique plein dans le temps et dans l'espace. Aussi, la réalisation d'une telle maquette ne nécessite pas de grands moyens matériels mais juste des composants électroniques qu'on peut se procurer aisément dans le commerce.

Nous avons utilisé deux matériaux différents ; à savoir : le cuivre et l'acier. Les résultats que nous avons obtenus confirment que la température augmente dans le temps, et ce pour différents points. Aussi, le cuivre se caractérise par une diffusivité thermique ou une conductivité importante par rapport à l'acier.

Enfin, nous espérons que ce travail sera d'une aide appréciable dans le domaine du transfert de chaleur. Reste à étudier différentes géométries et confronter les mesures à des solutions analytiques. Aussi, on doit disposer d'une source à puissance variable pour avoir des flux thermiques imposés différents.

**Liste des références
bibliographiques**

- [1] Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation, 2008.
- [2] **Yunus A. Çengel, Michael A. Boles**, « Thermodynamique une approche pragmatique » 2^{ème} édition Traduction et adaptation Française Marcel Lacroix, 2014.
- [3] https://femto-physique.fr/physique_statistique/transfert-thermique.php
- [4] **Mustapha Bordjane**, « Modes de transfert thermique (Cours & Exercices corrigés) », Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017, Page 5.
- [5] **Arimahtsangy Elinah**, « Installation et essai de l'appareil de mesure pour la conduction radiale », Mémoire de Licence, Sciences Techniques en Génie Industriel, Université d'Antananarivo, 2014.
- [6] **Yves Jannot**, « Cours transferts thermiques 2^{ème} année », Ecole des Mines Nancy, 2012, page 12-17.
- [7] **Nicolas Errien**, « Cours thermique LP eco-construction », Université du Maine, Faculté des Sciences, Département de Physique.
- [8] **Tayeb Ouksel**, « Cours Transfert Thermique », Université Larbi Ben M'hidi – Oum El Bouaghi, 2016.
- [9] <https://www.techno-science.net/definition/3716.html>
- [10] <https://www.omega.fr/prodinfo/sondes-temperature.html>
- [11] **Bourourou Zakarya, LAMA Abderrazzak**, « Réalisation d'un thermomètre à LEDs », Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, 2015.
- [12] <https://shop.mchobby.be/fr/temperature/1294-sonde-temperature-pt100-3-fils-1m3232100012943-adafruit.html>
- [13] <https://arduino103.blogspot.com/2018/01/les-senseurs-rtd-pt1000-amplificateur.html>
- [14] <https://www.lextronic.fr/module-amplificateur-pour-sonde-pt100-55738.html>
- [15] **Ryan Turner**, « Arduino programming the ultimate beginner's guide to learn arduino programming step by step », 2019.
- [16] <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [17] **Randriamampianina Fenohasina**, « Conception d'un appareil d'analyse thermique simple et différentielle à l'aide de la plate-forme Arduino® », Mémoire de Master en Génie des Procédés Chimiques et Industriels, Université d'Antananarivo, 2017.
- [18] **Azzouz Aymen, Khiter Ahmed Mustapha**, « Etude et réalisation d'une maquette didactique pour analyse vibratoire des machines tournantes en mesure spectrale », Mémoire de Master en Maintenance Industrielle, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2020.
- [19] <https://www.techno-science.net/definition/1780.html>

[20] <https://www.amazon.fr/FTVOGUE-%C3%A9Lectrique-Chauffage-Indicateur-Puissance/dp/B07VCY8PGF>

[21] <http://perso.iut-nimes.fr/fgiamarchi/wp-content/uploads/2011/02/Plaque-dessai.pdf>

[22] https://www.tutoriel-arduino.com/lcd_i2c_arduino/

ملخص:

في هذا المشروع، قمنا بصنع نموذج تعليمي لقياس درجة الحرارة من أجل فهم ظاهرة التوصيل الحراري. لهذا الغرض، اختبرنا اثنين من المواد ذات طبيعة مختلفة. أيضا، استخدمنا أجهزة استشعار درجة الحرارة ولوحة التحكم الدقيقة أردوينو حيث يتم إرسال الإشارات التي تم جمعها إلى جهاز كمبيوتر باستخدام التطبيق إكسال لمزيد من التحليل للقياسات الحرارية.

الكلمات المفتاحية: التوصيل الحراري، درجة الحرارة، أردوينو، عامل التوصيل الحراري، مستشعر درجة الحرارة.

RÉSUMÉ :

Dans ce projet, nous avons réalisé une maquette didactique pour mesurer la température en vue de comprendre le phénomène de la conduction thermique. À cet effet, nous avons testé deux matériaux de nature différente. Aussi, nous avons utilisé des capteurs de température et une carte microcontrôleur Arduino où les signaux collectés sont envoyés à un PC en utilisant l'application Excel pour une analyse plus approfondie des mesures thermiques.

Mots clés : Conduction thermique, Température, Arduino, Conductivité thermique, Capteur.

ABSTRACT:

In this project, we made a didactic model to measure temperature in order to understand the phenomenon of thermal conduction. For this purpose, we tested two materials of different nature. Also, we used temperature sensors and an Arduino microcontroller board where the collected signals are sent to a PC using the Excel application for further analysis of thermal measurements.

Keywords: Thermal conduction, Temperature, Arduino, Thermal conductivity, Sensor.