

TP1-

Conductivité thermique :
Thermographie infrarouge et approximation de
l'ailette

Contents

1. Objectifs :	5
2. Introduction:	5
3. Description de l'équipement :	6
4. Variables et unités utilisées :	7
5. Coefficients et caractéristiques des échantillons :	7
6. Consignes de sécurité :	8
7. Principes de base	8
a. Thermographie infrarouge	8
b. Modèle théorique : Approximation de l'ailette	8
c. Résolution approchée (ailette infinie).....	9
d. Résolution « exacte » du régime permanent.....	10
8. Procédure expérimentale :	11
a. Mise en place de l'expérience	11
b. Acquisition des données et observations	11
c. Obtention de la conductivité thermique des matériaux	11
d. Acquisition des profils de température	13
e. Exploitation des courbes expérimentales	Error! Bookmark not defined.
9. Résultats :	Error! Bookmark not defined.

1. Objectifs :

- Etudier le transfert de chaleur par conduction dans différents métaux
- Mettre en évidence l'apparition d'un régime permanent
- Faire des mesures comparatives de conductivités thermiques de différents métaux
- Déterminer le coefficient d'échange thermique par convection naturel avec l'air

2. Introduction :

Au travers de ce TP, nous vous proposons une version moderne d'une expérience simple réalisée au XVIII^e siècle par le scientifique britannique d'origine néerlandaise Jan Ingenhousz. Ce dernier avait repris une idée de Franklin en visite en France en 1780 qui lui avait cédé ses idées ainsi que tout le matériel qu'il avait collecté en vue de l'expérience.

Jan Ingenhousz (Figure) a recouvert de paraffine des tiges de matériaux différents mais de longueur et diamètre identiques. Les tiges maintenues parallèles entre elles grâce à des blocs de bois, sont plongées simultanément dans un bain d'huile chaude (Figure). Le scientifique observa le déplacement du front de fusion de paraffine et constata que la vitesse du déplacement dépendait du matériau. Il réalisa douze expériences avec sept métaux différents. Il rangea les matériaux ensuite dans le sens de conductivité décroissante : argent, cuivre, or, étain, fer, acier et plomb.



Figure 1 : Jan Ingenhousz

Aucune mesure de conductivité au sens actuel (loi de Fourier) n'a été faite au cours des expérimentations de Ingenhousz. Il faut attendre le début du XIX^e siècle avec physicien et mathématicien Joseph Fourier pour avoir une première détermination expérimentale de la conductivité thermique. Entre 1807 et 1811, il a conduit des expériences et développé des techniques mathématiques qui l'ont amené à faire une première estimation de cette grandeur physique.

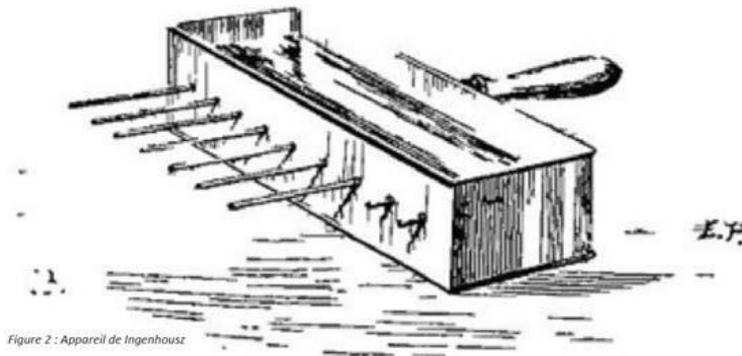


Figure 2 : Appareil de Ingenhouz

Figure 2 : Montage expérimental de Jan Ingenhouz

3. Description de l'équipement :

Nous vous proposons à la manière d'Ingenhouz de plonger quatre tiges métalliques cylindriques de matériaux différents, mais de longueur et diamètre identiques dans un bain d'eau thermostatée.

La modernité de cette expérimentation réside dans l'utilisation d'une caméra thermique infrarouge permettant d'observer en temps réel la propagation de chaleur. On a alors accès aux profils de température de chaque barre au cours du temps, ce qui nous permet de comparer des conductivités.

Comme J. H. Lambert l'a constaté en 1776, nous allons observer l'établissement d'un régime permanent et allons étudier l'évolution de la température dans chaque tige.

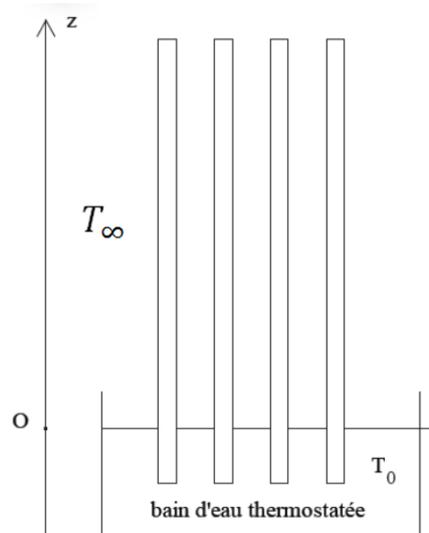


Figure 3 : Schéma du principe du montage expérimental

Pour réaliser ce TP, vous disposerez d'un montage expérimental tel que présenté dans la figure 3 lequel est relié à un bain thermostaté en circuit fermé.

La liste du matériel disponible est exposée par la suite :

- Quatre tiges métalliques, recouvertes de scotch noir, de $L = 1\text{ m}$ et $D = 12\text{ mm}$
- Une enceinte de conduction thermique
- Un bain thermostaté
- Caméra infrarouge
- Une planche de bois de 30 cm de longueur
- Un chronomètre (éventuellement)

4. Variables et unités utilisées :

Symbole	Quantité mathématique/physique	Unité
λ	Conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
h	Coefficient d'échange thermique	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
q^{cv}	Densité flux de chaleur par unité de surface	W.m^{-2}
T	Température (dépend de la hauteur et du temps)	$^{\circ}\text{C}$
T_{∞}	Température ambiante	$^{\circ}\text{C}$
R	Rayon de la tige cylindrique	mm
ρ	Masse volumique de matériau	kg/mm^3
c	Capacité thermique massique du matériau	$\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
D	Coefficient de diffusivité thermique spécifique	m^2/s
δ	Longueur caractéristique de l'ailette (distance caractéristique de variation de température)	[1]

5. Coefficients et caractéristiques des échantillons :

	Tige 1	Tige 2	Tige 3	Tige 4	Barre
Matériau	Cuivre	Acier	Laiton	Aluminium	Bois
L [mm]	1000	1000	1000	1000	300
\varnothing [mm]	12	12	12	12	--

6. Consignes de sécurité :

	Ne pas toucher le bain thermostaté après nous activation. Risque de brûlures !
	Ne pas toucher la base des tiges une fois le circuit activé. Risque de brûlures !
	La caméra thermique infrarouge dispose d'un laser. Ne pas diriger le faisceau vers des personnes !

7. Principes de base

a. Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique permettant l'observation sans contact de la température d'un corps dans le domaine infrarouge.

Pour faire de la thermographie infrarouge, les tiges sont recouvertes avec du scotch noir, afin de travailler avec un matériau qui a une émissivité de l'ordre de 0.9. On va supposer que le scotch est en équilibre thermique local avec la tige à tout instant. À l'aide de la caméra thermique, nous allons donc avoir accès à la température de surface de chaque tige.

Rappel rapide : tout corps à une température donnée émet un rayonnement électromagnétique caractéristique de la nature du matériau et de sa température. La caméra thermique mesure le rayonnement infrarouge émis par un corps qu'elle convertit en température grâce à des algorithmes (constante de Wien, courbe de Planck, loi de Boltzmann...) et grâce à la connaissance d'autres paramètres (émissivité, température d'environnement...).

b. Modèle théorique : Approximation de l'ailette

Pour établir l'équation de propagation de la chaleur dans les tiges, il faut d'abord faire un certain nombre d'hypothèses théoriques.

On suppose le problème unidimensionnel, c'est-à-dire que l'on va supposer que la température n'est qu'une fonction de deux variables :

$$T(\mathbf{M}, T) = T(z, t)$$

z : altitude au point M considéré.

Cette approximation est connue sous l'approximation de l'ailette.

On modélise les échanges air/tige à l'aide de la loi de refroidissement de Newton, et on suppose que le coefficient h de Newton est le même pour toutes les tiges : la densité flux de chaleur par unité de surface est alors donné par :

$$q^{cv} = h(T(z, t) - T_{\infty})$$

T_{∞} : température de l'air ambiant

h : coefficient d'échange thermique.

En appliquant le premier principe de la thermodynamique (équation bilan d'énergie) à une tranche infinitésimale de tige d'épaisseur dz pendant un temps dt , on obtient l'équation suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \frac{2h}{R\rho c} \theta \quad (1)$$

$$\text{avec } \theta(z, t) = T(z, t) - T_{\infty}$$

R : rayon de la tige cylindrique

ρ : masse volumique du matériau

c : capacité thermique massique du matériau

$D = \frac{\lambda}{\rho c}$: coefficient de diffusivité thermique spécifique du matériau étudié

λ : conductivité thermique

En régime permanent :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - m^2 \theta = 0 \quad (2)$$

$$\text{Avec } m = \sqrt{\frac{2h}{R\lambda}}$$

c. Résolution approchée (ailette infinie)

Pour résoudre simplement l'équation (2), on peut faire l'hypothèse supplémentaire que la longueur L des tiges est grande devant la distance caractéristique de variation de la température (approximation de l'ailette infinie). Cette hypothèse conduit à :

$$T(L, t) = T_{\infty}$$

Par ailleurs on a :

$$T(0,t) = T_0$$

La solution de l'équation (2), vérifiant les conditions aux limites précédentes est :

$$T(z,t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty)e^{-mz} \quad (3)$$

La grandeur $\delta = \frac{1}{m} = \sqrt{\frac{R\lambda}{2h}}$ est la longueur caractéristique de l'ailette (distance caractéristique de variation de la température). Elle dépend de λ et h .

d. Résolution « exacte » du régime permanent

Si on ne veut pas faire l'hypothèse supplémentaire d'ailette infinie, on peut remplacer la condition aux limites $T(L, T) = T_\infty$, par une relation de continuité du flux thermique en $z = L$ et on obtient en résolvant l'équation (2) :

$$T(z,t) = T_\infty + \frac{T_0 - T_\infty}{1 + \frac{1 - h/m\lambda}{1 + h/m\lambda} e^{-2Lm}} e^{-mz} + \frac{1 - h/m\lambda}{1 + h/m\lambda} e^{-2Lm} e^{mz} \quad (4)$$

En conclusion :

✓ Les deux modèles ne diffèrent sensiblement qu'en haut de la tige et que pour des matériaux très bons conducteurs de chaleur (par exemple, le cuivre).

✓ Les deux modèles ne diffèrent au plus que de 5 % pour une longueur de tige de 90 cm.

✓ Si on étudie les profils de température dans la moitié inférieure des tiges, le modèle «approché» diffère du modèle «exact» à moins de 1 % près, même pour le cuivre !

Il semble donc tout à fait justifié, d'approcher les profils de température dans les différentes tiges par des courbes exponentielles pour analyser les résultats expérimentaux.

Remarque : si on prend une longueur de tige de 50 cm, l'écart relatif entre les deux modèles pour le cuivre en haut de la tige atteint 16 %.

8. Procédure expérimentale :

a. Mise en place de l'expérience

Positionner la caméra infrarouge sur un trépied à une distance adéquate des tiges en fonction de sa résolution. On veillera à positionner la caméra bien droite car cela simplifie le traitement de données ultérieur.

Il faut trouver un bon compromis entre obtenir un profil sur une grande longueur de la tige et obtenir un profil de bonne qualité vis-à-vis de la résolution de la caméra. Lorsque la caméra est trop loin des tiges, la résolution n'est pas suffisante pour obtenir un profil de température de bonne qualité. On se placera, dans ce TP, à une distance d'environ 2m, même si on ne peut pas visualiser toute la longueur de la tige (*on se concentrera sur la moitié inférieure*). N'oubliez pas à faire la mise au point avec la molette

La petite planche de bois, dont la longueur est parfaitement connue (30 cm) permet de faire des mesures quantitatives. Pour bien voir cet étalon sur les images thermographiques, on peut au préalable imprégner le bout de bois avec de l'eau froide pour bien le visualiser avec la caméra infrarouge. Si cela est nécessaire, ne pas hésiter à refroidir à nouveau cette petite planche au cours des expériences.

Avant de mettre en place le bain thermostaté, prendre une image avec la caméra thermique avec les tiges à température ambiante.

Mettre en place le bain thermostaté et choisir une puissance pour laquelle la température de l'eau soit de l'ordre de 60°C environ (*~130°C sur la molette*). Ne pas dépasser 70°C afin d'éviter des risques de brûlures et de générer trop d'évaporation de l'eau dans le bain thermostaté. Attendre que la température du bain soit à peu près stable (à l'extinction de la lumière rouge) avant de mettre en marche la circulation d'eau.

b. Acquisition des données et observations

On peut dès lors mettre en marche la circulation d'eau dans le kit de conduction thermique. Pour cela, mettre en marche l'alimentation qui alimente la pompe. Acquérir des images thermographiques à différents instants pendant 30 minutes - *au moins une image toute le 2,5 minutes.*

c. Obtention de la conductivité thermique des matériaux

On mesure la température ambiante T_{∞} à l'aide de la caméra thermique, en prenant par exemple une moyenne des mesures des températures sur les tiges avant la mise

en circulation de l'eau chaude. Comparer cette valeur avec la valeur mesurée par un thermocouple type k

La mesure de température ambiante est entachée d'erreurs : elle peut varier au cours de l'expérience (à cause notamment de la présence du bain thermostaté et de vapeur d'eau dont la température est plus élevée que celle de la salle de manipulations). Elle peut aussi varier le long de la tige (on peut envisager que la température de l'air ambiant en bas de la tige est un peu plus élevée que la température de l'air en haut de la tige).

C'est l'incertitude sur la mesure de la température ambiante qui semble essentiellement à l'origine de l'incertitude sur les mesures de conductivités dans le cadre du modèle adopté. Pour minimiser l'influence de la température ambiante sur l'incertitude des mesures, il est intéressant de choisir une température du bain thermostaté assez élevée.

d. Importation des images par logiciel FLIR Tools

1. Chercher le logiciel *FLIR Tools* dans la barre de recherche et l'ouvrir.
2. Le logiciel demande un nom d'utilisateur et un mot de passe. Entrer :

Nom d'utilisateur : tplag111@yopmail.fr

Mot de passe : TP@lag111

3. Brancher la caméra thermique à l'ordinateur via le cordon USB et importer toutes les photos dans un dossier que créer au préalable.
4. Sur le logiciel cliquer en haut à gauche sur  et y importer le dossier contenant les photos infrarouges.

Les photos étant maintenant chargées, il est possible d'en extraire les profils de température.

5. Sur chaque photo infrarouge il faudra calibrer la distance à l'aide de la barre en bois. Pour ce faire double-cliquer sur la photo à ouvrir ; à gauche de la fenêtre choisir l'icône  pour ajouter une mesure ligne. On peut alors ajouter la ligne le long de la barre en bois. Calibrer la distance de la barre (0,3m) en cliquant une fois sur la ligne > clic-droit > *Paramètres locaux* > cliquer *Utiliser les paramètres locaux* > Entrer la valeur > OK
Rentrer aussi la température atmosphérique dans les paramètres à droite de la fenêtre (cliquer sur afficher si toutes les infos ne sont pas présentes), elle est obtenue en déplaçant le point de mesure hors du montage expérimental, la valeur s'affiche dans la partie *Mesures* (voir Figure).

- 6.1. Si on souhaite obtenir le profil de température le long de la tige il suffit de créer une ligne de mesure le long de la ligne comme pour la barre en bois.
- 6.2. Si on souhaite obtenir une valeur de température locale, il suffit d'ajouter un point de mesure à droite de la fenêtre (Figure).
7. Une fois les points de mesure sélectionnés, il faut exporter les données dans un tableur. Pour ce faire, cliquer sur la photo pour laquelle on souhaite extraire les données à traiter. Cliquer droit > *Exporter au format CSV* > Sélectionner *Exporter : Mesures* > Cliquer *Inclure les paramètres objet* > *Mesures : Tout sélectionner* ou choisir uniquement les points de mesure pertinents > *Exporter* > Renommer et déterminer le chemin > *Enregistrer*.

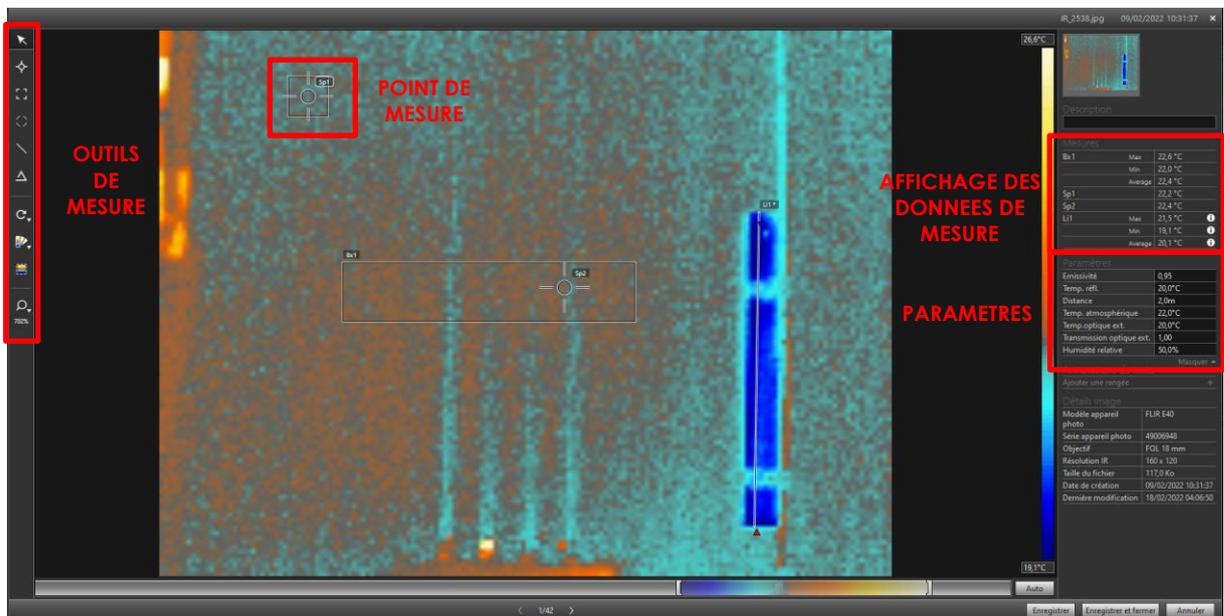


Figure 4 : Capture du logiciel FLIR Tools

e. Acquisition des profils de température

On utilise le logiciel *FLIR Tools* pour extraire de profils de température dans chaque tige en fonction de la position z . Pour cela, il faut calibrer la distance à l'aide de la petite planche de bois de longueur connue.

- i. Visualiser sur un graphe l'évolution de la température en fonction de la position z pour les quatre tiges en régime permanent.

- ii. Pour exploiter les courbes expérimentales, nous pouvons utiliser la résolution approchée d'une ailette infinie donnée par l'équation (3). *Dans un premier temps, réécrivez l'équation sous la forme linéaire suivante :*

$$f(z) = a + bz$$

$$\text{Avec } a = \ln(T_0 - T_\infty) \text{ et } b = -m.$$

- iii. Faites une régression linéaire pour chaque courbe. Connaissant la conductivité thermique de la barre de cuivre ($\lambda_{cu} = 386 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$), et en utilisant les résultats des régressions linéaires, on se propose de déterminer la conductivité thermique des autres matériaux constituant les autres tiges.
- iv. Remplissez le tableau suivant pour déterminer la conductivité thermique de chaque tige.

Tige n°	a	b (m ⁻¹)	T ₀ (°C)	m (m ⁻¹)	δ (m)	δ ² /δ _{cu} ²	λ (W.m ⁻¹ K ⁻¹)
1(Cu)							386
2							
3							
4							

- v. Identifiez les métaux constituant chaque tige
- vi. On peut aussi en déduire la valeur numérique du coefficient d'échange thermique par convection h en partant de la donnée constructive de la conductivité thermique du cuivre. Est-ce que l'ordre de grandeur de la valeur obtenue est bon ? Donner l'ordre de grandeur de l'erreur relative de la valeur de h obtenue.
- vii. Est-ce que l'approximation de l'ailette infinie utilisée dans ce TP est pertinente ? Argumenter.
- viii. Tracer l'évolution de la température dans un point de chaque tige en fonction de la température. Donner le temps d'équilibre pour chaque tige.