

Mésure de Température et détermination des propriétés thermiques des matériaux

TP1: Utilisation d'une Camera Infrarouge

2024-05-03

L'objectif est de mettre en pratique certaines notions abordées d'un point de vue théorique dans les modules de physique et de mécanique (mécanique du solide déformable, thermodynamique, transferts thermiques, optique ondulatoire). Durant les différentes séances, l'étudiant sera amené à réaliser et interpréter des essais de déformation (traction, flexion, torsion) par extensiométrie mécanique ou électrique, à observer et analyser les changements d'état de la matière (fusion, liquéfaction) ainsi que le rayonnement thermique émis par des matériaux, et enfin à étudier la diffraction de la lumière par un réseau périodique

Attention

Le texte jusqu'à la première question devra avoir été lu et compris avant la séance.

Contexte

Le rayonnement thermique fait partie des *trois modes de transfert thermique*, avec la *conduction* et la *convection*. Au-dessus du zéro absolu, tous les corps qui nous entourent produisent un rayonnement thermique. Le rayonnement infrarouge est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre $0.8\ \mu\text{m}$ et $1000\ \mu\text{m}$; à partir de $125\ \mu\text{m}$, ces ondes se chevauchent avec les ondes radio électriques.

Comme indiqué sur le spectre ci-dessous, la zone d'utilisation de la plupart des caméras IR actuellement sur le marché se situe entre $5\ \mu\text{m}$ - $10\ \mu\text{m}$.

La thermographie infrarouge est un processus de mesure du rayonnement infrarouge qui convertit la puissance détectée en électricité. L'image résultante dépeint et mesure la **puissance rayonnée** par unité de surface, par l'objet observé. Ce procédé de mesure permet la visualisation des différences spatiales de puissance grâce à une image en niveaux de gris, ou en niveaux de couleurs.

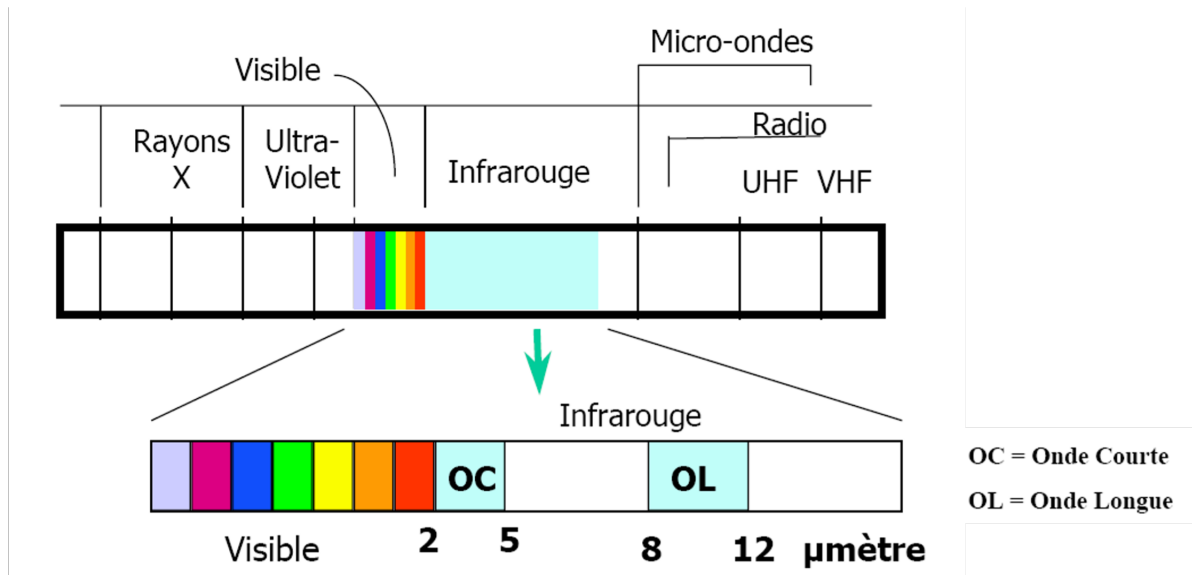


Figure 1: Spectre électromagnétique et longueurs d'onde

Les systèmes de détection infrarouge sont sensibles à la puissance rayonnée par unité de surface, par le corps observé, **dont l'intensité dépend de la température et des caractéristiques de surface de l'objet considéré**. Plus l'objet est chaud, plus le flux de chaleur surfacique émis par la surface est important.

Ce flux de chaleur surfacique émis par la surface (ou puissance rayonnée par unité de surface) est appelé **émittance** (e) du corps observé, et s'exprime en W m^{-2} .

Les caractéristiques de surface sont décrites en termes **d'émissivité** ϵ , ou *"d'aptitude à émettre un rayonnement infrarouge"*. Plus l'émissivité d'une surface est élevée, plus le matériau rayonnera dans l'infrarouge. *L'émissivité est comprise entre 0 et 1 et est sans unité*. Une émissivité de 1 correspond au corps noir, corps au comportement idéal qui absorbe totalement les rayonnements auquel il est soumis et dont l'émittance est maximale à une température donnée.

On peut définir l'émissivité d'un matériau comme le rapport entre la puissance rayonnée par ce matériau et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température. L'émittance e d'un corps réel s'exprime selon la loi de Stefan-Boltzmann :

$$e = \epsilon * \sigma * T^4$$

Où T est la température absolue, et σ la constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

On rappelle que le *coefficient d'absorption* α d'un matériau est égal à son *émissivité*, et que pour un matériau opaque, la *somme des coefficients d'absorption et de réflexion* ρ est égale à 1.

Le rayonnement IR est donc directement lié à la température du corps filmé. Dans le cas des caméras de bonne qualité et étalonnée, on peut mesurer la température. Le procédé de mesure par thermographie infrarouge doit tenir compte de certains facteurs parasites. Les objets situés dans l'environnement de travail subissent une excitation thermique permanente, et génèrent des rayonnements parasites qui interagissent avec le corps considéré.

Les corps alentours possédant une température différente du zéro absolu, ils émettent et réfléchissent des rayons infrarouges non maîtrisés. Les domaines d'application actuels liés à la mesure de température de surface couvrent de nombreuses activités parmi lesquelles on peut citer :

- L'inspection d'installations électriques.
- La recherche de ponts thermiques et de pertes de chaleur.
- La vérification de niveaux de liquide.
- La recherche de fuites de vapeur dans les installations sous pression.
- L'inspection de moteurs électriques, de roulements à billes.
- La recherche de fuites de froid dans les locaux réfrigérés.
- L'étude de la propagation de flammes lors d'une explosion.
- L'étude de la constitution des étoiles.
- L'observation de nuit.
- Les recherches archéologiques.
- De nombreuses autres applications militaires, mécaniques, électroniques, et médicales.

Le TP est composé de quatre parties :

1. la première partie constitue une initiation aux phénomènes thermiques et infrarouges
2. la deuxième partie a pour objet l'étalonnage de la caméra afin de pouvoir s'en servir pour mesurer la température
3. la troisième partie met en application une méthode de mesure de l'émissivité et
4. la quatrième partie permet l'estimation de l'effusivité d'un matériau.

1 Première partie : Initiation aux phénomènes thermiques et infrarouges

💡 But

Dans cette partie, on cherche à mettre en évidence certaines propriétés thermiques intrinsèques au matériau grâce à la thermographie infrarouge. On étudiera, entre autres, l'influence de l'état de surface sur la puissance reçue par le détecteur de la caméra infrarouge, ou encore les propriétés de transparence du verre dans les domaines du visible et de l'infrarouge.

On utilise une plaque subdivisée en 4 zones :

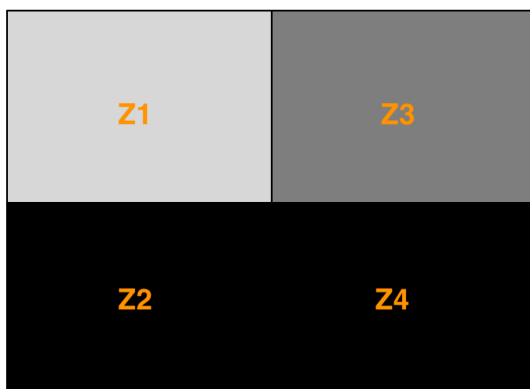


Table 1: Zones

| Zone | Surface (État et traitement) |
|------|------------------------------|
| Z1 | Rugeuse et non peinte |
| Z2 | Rugeuse et peinte |
| Z3 | Polie et non peinte |
| Z4 | Polie et peinte |

Pour information, la peinture noire utilisée a une *émissivité de 0.95* dans la gamme $8\mu\text{m} - 12\mu\text{m}$. Dans un premier temps il faut ouvrir le logiciel TP IR et sélectionner la caméra sur le logiciel.

1. Prenez dans la valise la plaque métallique qui est subdivisée en 4 parties, placez-la sur le banc et centrez-la par rapport à la caméra.
2. Faites la mise au point de la caméra grâce à l'onglet « *Réglages* » (*sélectionner mise au point auto*).
3. Jouez sur l'orientation de la plaque. Attention, l'image est tournée de 90° par rapport à la position de l'objet.

1.1. Qu'observez-vous à l'écran sur chacune des zones ? Comment pouvez-vous l'expliquer ?

4. Prenez deux matériaux différents d'émissivité proche dans la valise tels que la plaque d'aluminium peinte en noire et la mousse isolante et placez-les l'un à côté de l'autre.
5. Faites la mise au point de la caméra.

1.2. Posez simultanément vos mains sur les deux échantillons, quelle sensation ressentez-vous (chaud ou froid) ?

1.3. Parmi les 4 principales propriétés thermiques rappelées en annexe (Conductivité, Diffusivité, Effusivité et Capacité thermique), laquelle est ici mise en jeu ?

1.4. Donnez une définition intuitive basée sur votre observation de cette propriété thermique.

1.5. Retirez vos mains, qu'observez-vous à l'écran ? Quelle est cette fois la propriété thermique mise en jeu ?

6. Placez votre main sous la caméra puis faites la mise au point.
7. Placez ensuite l'échantillon de verre contenu dans la valise entre votre main et la caméra.

1.5. Qu'observez-vous ? Comparez en une phrase les propriétés de transparence du verre dans le domaine du visible et de l'infrarouge.

8. Refaites la même expérience avec le transparent pour rétroprojecteur, puis avec le sac poubelle.

1.7. Qu'observez-vous par rapport à l'expérience précédente ? Quelle conclusion pouvez-vous tirer ?

2 Deuxième partie : Etalonnage de la caméra

But

L'objectif de cette partie du TP est d'étalonner la caméra en température afin de pouvoir l'utiliser en tant que capteur de température. Sans étalonnage, l'information donnée par la caméra est une information en puissance.

Nous considérerons que la mesure issue du capteur est proportionnelle à la température de la cible visée.

1. Sur la page d'accueil du logiciel, cliquez sur le bouton « *Etalonnage simplifié de la caméra* ».
2. Prenez l'échantillon de PVC noir, inséré dans un environnement isolant, muni d'un tapis chauffant et d'un capteur thermocouple.
3. Mettez l'échantillon sur la mousse noire isolante et placez l'ensemble sous la caméra. Faites la mise au point.
4. Branchez les connecteurs du tapis sur le boîtier de pilotage (attention au sens pour le branchement du thermocouple).
5. Sélectionnez, à l'aide de la souris, une zone d'intérêt sur l'image (elle doit être inscrite à l'intérieur de l'échantillon de PVC).
6. Appuyez sur « *Lancer l'expérience* » pour démarrer l'étalonnage et déclencher le chauffage.
7. Appuyez sur le bouton « *Enregistrer* » pour sauvegarder les deux informations « *Température* » et « *Energie* » et refaites la même opération à chaque fois que la température indiquée par le thermocouple s'élève de 2 degrés environ.
8. Arrêtez le relevé lorsque « *Indication énergétique en temps réel* » indique NaN ou que la température mesurée par le thermocouple atteint 50 °C en cliquant sur le bouton « *Arrêter l'expérience* ».

2.1. Exportez les données du tableau sous Excel et tracez la courbe $T = f(Puissance)$ en affichant la régression linéaire et le coefficient de corrélation. Quelles sont les valeurs expérimentales des coefficients d'étalonnage A et B ?

9. Cliquez sur le bouton « QUITTER » pour sortir de l'interface d'étalonnage et revenir à la fenêtre d'accueil du logiciel.

3 Troisième partie : Mesure de l'émissivité de différents revêtements

But

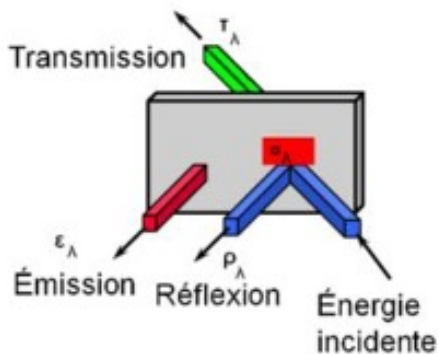
Nous allons appliquer la méthode de détermination de l'émissivité régie par la norme ASTM E1933-99a et qui s'apparente à la méthode suivante : pour des températures relativement peu élevées (jusqu'à 260°C), il est possible de placer sur la cible (le matériau mesuré) une étiquette plastique d'émissivité connue (en règle générale 0.95) et de mesurer ensuite la température du matériau en ayant réglé l'émissivité sur 0,95. Il faut alors mesurer la température du matériau en dehors de l'étiquette et ajuster l'émissivité jusqu'à obtenir la même température.

Il faut utiliser l'onglet « *Mesure d'émissivité* » qui se trouve sur l'interface d'accueil du logiciel du TP.

i INFORMATION COMPLEMENTAIRE : la température réfléchie

A. Présentation :

Le rayonnement arrivant sur un matériau peut être absorbé, réfléchi ou transmis :



La plupart des matériaux sont opaques en infrarouge (c'est-à-dire qu'ils ne se laissent pas traverser par les rayons lumineux) tout en étant réflecteurs. Ils réfléchissent donc une partie des rayonnements qui parviennent de leur environnement et ils absorbent l'autre partie de ces rayonnements. L'environnement "radiatif" est constitué de toute la matière qui émet des rayonnements sur l'objet dont on veut mesurer la température, rayonnements qui sont susceptibles de se réfléchir en partie en direction de la caméra. Pour que la caméra mesure la température réelle de l'objet, **il est important de connaître la température réfléchie (appelée aussi température d'environnement)**. Ceci permet au calculateur de la caméra de compenser le rayonnement réfléchi par l'environnement sur l'objet.

B. Détermination de la température apparente réfléchie :

1. Froissez un grand morceau de papier d'aluminium
2. Défroissez-le puis placez-le sur le banc de TP, sous la caméra (assurez-vous que la feuille d'aluminium est bien dans le champ de vision de la caméra)
3. Fixez l'émissivité à 1 dans les paramètres de la camera
4. Notez la température affichée à l'écran, c'est la température réfléchie
5. Rentrez la température réfléchie mesurée dans les paramètres de la caméra

...

3.1. Déterminez la température réfléchie en suivant les indications fournies ci-dessus et notez sa valeur.

3.2. Pourquoi utilise-t-on du papier aluminium et pourquoi le froisse-t-on ? Expliquez l'intérêt de la mesure de la température réfléchie.

1. Branchez le module émissivité et placez-le sous la caméra. Grâce au régulateur situé sur la façade du boîtier, fixez la température à 50°C.
2. Faites la mise au point sur la plaque métallique du boîtier et remplissez les cases de la partie « *Réglages environnementaux* ».

3.3. Une fois la plaque stabilisée à 50°C, faites une zone d'intérêt sur le scotch d'émissivité connue. Sachant que ce dernier a une émissivité de 0.95, mesurez et notez la température de surface du scotch.

3.4. Placez la zone d'intérêt sur l'acier brut et relevez la température. Pourquoi cette température est-elle différente de 50°C ? Doit-on augmenter ou diminuer la valeur de l'émissivité affichée pour arriver à la température réelle ? Justifiez.

3.5. En utilisant la méthode de détermination de l'émissivité présentée ci-dessus, déterminez l'émissivité des différentes surfaces à 50°C (peinture noire, peinture blanche, acier brut, scotch transparent). Rassemblez les résultats dans un tableau.

4 Quatrième partie : Estimation de l'effusivité thermique d'un matériau isolant inconnu

But

Cette partie se compose des deux sous-parties suivantes :

1. Test de puissance (évaluation de la puissance injectée à la scène thermique visée par la caméra sur un échantillon d'effusivité connue),
2. Estimation de l'effusivité thermique d'un matériau isolant inconnu.

La méthode du Plan Chaud permet d'estimer le paramètre « *Effusivité thermique* ». Elle consiste à imposer un flux de chaleur uniforme et calibré sur la section de l'échantillon. La réponse en température est mesurée au centre du plan de chauffage par un thermocouple. Le comportement asymptotique aux temps longs de ce thermogramme est inversement proportionnel à l'effusivité thermique b et proportionnel à la racine carrée du temps :

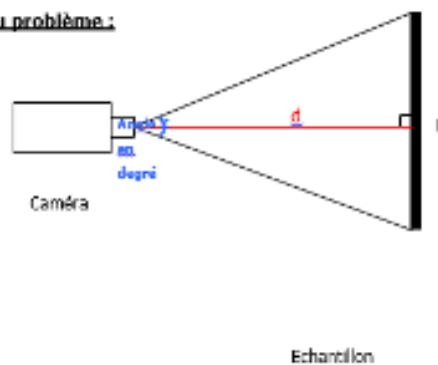
$$\Delta T(t) = \frac{Q \times \sqrt{t}}{S \times b \times \sqrt{\pi}} + cste$$

Où Q est la puissance injectée au système, ΔT l'augmentation de température et S la surface visée par la caméra.

4.1 A. Test de puissance et surface visée par la caméra

Il faut donc dans un premier temps déterminer Q à partir du thermogramme d'un échantillon d'effusivité connue, ainsi que la surface visée par la caméra.

Données du problème :



d : Distance entre l'objet et la caméra. X :
Angle du champ de vision de la caméra.
 L : Longueur visée de l'échantillon.

Champ de vision de la caméra :
25° x 19°, respectivement champ de vision
horizontal et vertical

4.1. En utilisant les lois trigonométriques et le schéma suivant, déterminez la surface de l'échantillon visée par la caméra, après avoir mesuré d avec la règle à disposition.

Sur la page d'accueil du logiciel, cliquez sur le bouton « *Test puissance* ».

2. Branchez le boîtier relais à une prise électrique et les deux lampes halogènes à ce dernier.
3. Placez l'échantillon de bois sous la caméra et vérifiez qu'il est bien centré dans le cadre de la caméra.
4. Faites la mise au point de la caméra sur cet échantillon grâce au bouton « *Réglages caméra* ».
5. Appuyez sur le bouton « *Lancer l'acquisition* » pour activer le chauffage et démarrer l'expérience.

4.2. Qu'observez-vous sur l'image du haut ? Quel phénomène est ici mis en jeu ?

6. Au bout de 35 secondes le chauffage et l'acquisition s'arrêtent, le tableau situé à droite de l'écran se remplit et vous devez observer une courbe typique « *Plan Chaud* » sur le graphique du bas.

4.3. Une fois les valeurs exportées sous Excel, tracez les courbes $\text{Température} = f(t)$ puis $\text{Température} = f(\sqrt{t})$ sur deux graphiques distincts.

4.4. Supprimez, si nécessaire, quelques points de la courbe $\text{Température} = f(\sqrt{t})$ de manière à obtenir un tracé se rapprochant le plus possible d'une droite, puis, à l'aide des outils Excel, affichez sur le graphique l'équation de la courbe de tendance (forme $y = Ax + B$) et le coefficient de corrélation R^2 (on considèrera que $R^2 > 0.98$ est satisfaisant).

4.5. A quoi correspond le coefficient directeur de cette courbe de tendance ?

4.6. Calculez à partir de ce coefficient la puissance injectée au système.

4.2 B. Estimation de l'effusivité thermique d'un matériau isolant inconnu

1. Prenez ensuite un échantillon différent de celui utilisé précédemment, placez-le sous la caméra et vérifiez qu'il est bien centré dans le cadre de la caméra.
2. Faites la mise au point de la caméra sur cet échantillon.
3. Les échantillons n'ayant pas forcément tous la même épaisseur, commencez par déterminer la surface de l'échantillon visée par la caméra.
4. Appuyez sur le bouton « *Lancer l'acquisition* » pour activer le chauffage et démarrer l'expérience.
5. Au bout de 35 secondes le chauffage et l'acquisition s'arrêtent et le tableau situé à droite de l'écran se remplit.

4.7. Une fois les valeurs exportées sous Excel, tracez les courbes Température = $f(t)$ puis Température = $f(\sqrt{t})$ sur deux graphiques distincts.

4.8. Supprimez, si nécessaire, quelques points de la courbe Température = $f(\sqrt{t})$ de manière à obtenir un tracé se rapprochant le plus possible d'une droite, puis, affichez sur le graphique l'équation de la régression linéaire et le coefficient de corrélation R^2 (on considèrera que $R^2 > 0.98$ est satisfaisant)..

4.9. Calculez à partir du coefficient directeur de cette courbe l'effusivité thermique du matériau. Attention à recalculer, si nécessaire, la surface visée.

4.10. Recommencez plusieurs fois l'expérience afin de tester sa reproductibilité et comparez avec la valeur tabulée:

Table 2: Données des matériaux

| Matériau | Effusivité thermique ($J/m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}$) |
|--------------|--|
| Mousse Noire | 75 |
| Liège | 155 |
| Bois | 230 |

RAPPEL

Table 3: Propriétés thermiques des matériaux

| Propriété | Symbole | Unité | Relation | Signification physique |
|-----------------------------|----------|----------------------------|------------------------------------|--|
| Conductivité thermique | α | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | | Caractérise l'aptitude d'un corps à transférer la chaleur. |
| Capacité thermique massique | c | $J.K^{-1}.kg^{-1}$ | | Caractérise la capacité d'un matériau à accumuler ou restituer de l'énergie thermique, quand sa température varie |
| Diffusivité thermique | a | $m^2.s^{-1}$ | $a = \frac{\alpha}{\rho \times c}$ | Détermine l'inertie thermique d'un matériau, sa prédisposition à garder sa température lorsqu'intervient une perturbation. Si la perturbation l'amène vers une nouvelle température d'équilibre, une faible diffusivité représente la "lenteur" avec laquelle ce nouvel équilibre est atteint. |
| Effusivité thermique | b | $J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$ | | Caractérise la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement |