

Master Lumière et Mesures Extrêmes

Signal et Bruits : travaux pratiques

Détection par effet mirage Mesures photothermiques

1 Introduction

La méthode de détection par effet mirage fait partie de méthodes expérimentales désignées sous le terme générique de photothermiques. Ces méthodes consistent à créer, puis à détecter, des variations temporelles de température. L'échauffement modulé ou pulsé est produit, le plus souvent par absorption d'un flux lumineux. Le signal obtenu est fonction des phénomènes physiques liés à la création et au transport de la chaleur et bien sûr du mode de détection utilisé. Apparues depuis quelques décennies, les méthodes photothermiques se sont peu à peu affirmées dans des domaines spécifiques : la spectroscopie d'échantillons inaccessibles aux méthodes optiques traditionnelles (échantillons diffusant, opaques ou encore très faiblement absorbants), la mesure des propriétés thermiques qui débouchent aujourd'hui sur les multiples applications offertes par le contrôle non destructif.

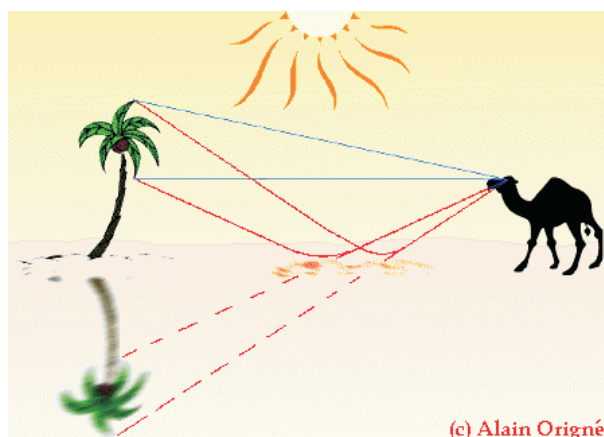


FIGURE 1 – Illustration de l'effet mirage.

Le laboratoire d'Optique Physique de *L'École Supérieure de Physique Chimie Industrielles (ESPCI)* a pris très tôt une part active à leur développement. Sa contribution la plus remarquable fut la mise au point, en 1979, de la méthode de détection par effet mirage. Un faisceau lumineux sonde traverse le gradient de température produit dans un fluide au voisinage immédiat de l'échantillon (ou dans l'échantillon lui-même). A ce gradient est associé un gradient d'indice de réfraction qui induit une déviation du faisceau sonde. La déviation est mesurée par

une photodiode à effet latéral. Il est ainsi possible de mesurer de faible gradient de température jusqu'à 0.1° C/cm . Sa grande sensibilité, allée à la souplesse de sa mise en œuvre, font que cette technique connaît de nombreuses applications tant spectroscopiques que thermiques.

Dans cette manipulation, nous étudierons le principe de la détection mirage en régime modulé. Nous évaluerons la sensibilité du banc optique et nous envisagerons ensuite deux applications :

- La mesure de la diffusivité thermique d'un milieu épais et transparent
- La détermination du profil d'une surface

2 Bases théoriques

Considérons le système physique décrit sur la figure 2 : un échantillon absorbant (s) déposé sur un substrat (b) transparent et éclairé uniformément par un flux modulé à la fréquence f

$$\Phi = \Phi_0 [1 + \cos(2\pi ft)] \quad (1)$$

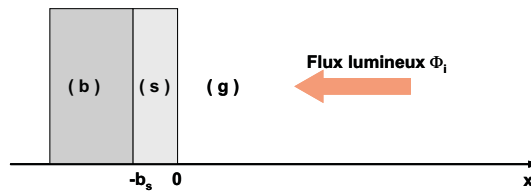


FIGURE 2 – Géométrie du système : (s) échantillon solide absorbant ; (b) milieu arrière solide, transparent ; (g) fluide transparent ; ϕ_i flux lumineux excitateur.

Tout ou une partie du flux est converti en chaleur, l'élévation de la température locale donne naissance à deux processus physiques : La diffusion de la chaleur dans le milieu et les milieux adjacents, une dilatation local du milieu qui se traduit par des déformations thermo-élastiques dans les solides et par des variations de pression dans les fluides. Bien que ces processus soient couplés et réagissent l'un sur l'autre, on montre que la distribution des variations de température T dans l'ensemble du système est donnée avec une bonne approximation par la solution de l'équation de diffusion de la chaleur qui, à une dimension, s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{h}{k} \quad (2)$$

avec

- k : la conductivité thermique
- D : la diffusivité thermique définie par $k/\rho C_p$ (ρ : masse spécifique, C_p : chaleur massique à pression constante)
- h : la densité de puissance thermique qui constitue le terme source et qui existe uniquement dans (s) ; (g) et (b) étant supposés transparents au flux excitateur (voir la figure.2)

En régime harmonique, la solution de cette équation dans le fluide (g) a la forme d'une onde amortie appelée "onde thermique" :

$$T(x, t) = T_s \exp\left(-\frac{x}{\mu_g}\right) \cos\left(2\pi ft - \frac{x}{\mu_g}\right) \quad (3)$$

La propagation et l'amortissement exponentiel sont contrôlés par la même grandeur μ_g appelée longueur de diffusion thermique et définie par $\mu_g = \sqrt{D/\pi f}$.

μ_g caractérise l'étendue des variations de température dans le milieu. Par exemple pour $f=1$ Hz

$$\begin{aligned} \mu_g &= 2,6 \text{ mm dans l'air} \\ \mu_g &= 0,22 \text{ mm dans l'eau} \end{aligned}$$

T_s la température de surface de l'échantillon (s), permet la caractérisation de celui-ci. En effet, T_s dépend d'une part des propriétés optiques de (s) : coefficient d'absorption, réflectivité, et d'autre part, des propriétés thermiques de (s), (b), et (g). Son expression s'obtient par l'application des conditions aux limites (continuité des températures et des flux) aux deux interfaces (s, b) et (s,g).

Remarquons qu'à la propagation amortie de l'onde thermique dans le fluide (g) est associé un gradient périodique de température qui induit un gradient d'indice de réfraction, orienté normalement à la surface de l'échantillon ; c'est le phénomène qu'exploite la méthode mirage.

3 Principe de la détection par effet mirage

Sa mise en œuvre expérimentale la plus fréquente est présentée Figure 3. Un faisceau laser (laser sonde) traverse le fluide au voisinage de la surface de l'échantillon. Le gradient d'indice dévie le faisceau. La déviation θ , proportionnelle à la température de la surface de l'échantillon, est mesurée par une photodiode à quadrants.

θ s'exprime à partir de l'équation du rayon de courbure du faisceau lumineux

$$\frac{1}{R} = -\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (4)$$

Dans le cas de faibles déviations et du modèle unidimensionnel envisagé ici, on aboutit à :

$$\theta = \frac{L}{n} \frac{\partial n}{\partial x} = \frac{L}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

L étant la longueur d'interaction du faisceau avec le gradient

La détection mirage est ainsi directement sensible au gradient de température soit au flux de chaleur régnant dans la zone traversée par le faisceau sonde. En utilisant l'expression 3 des variations de température en régime harmonique, on obtient :

$$\theta = \frac{L}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \cdot T_s \cdot \frac{\sqrt{2}}{\mu_g} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\mu_g}\right) \cdot \cos\left(2\pi ft - \frac{x}{\mu_g} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (6)$$

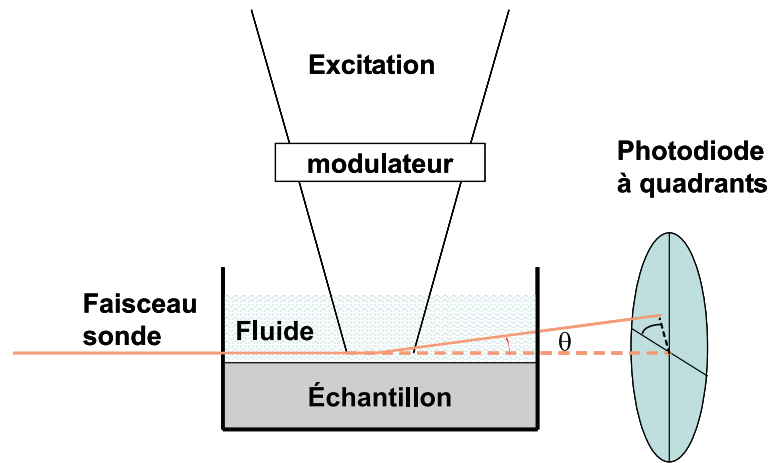


FIGURE 3 – Effet mirage : le faisceau sonde est dévié par le gradient d'indice induit dans le fluide au voisinage de la surface chauffée. La déviation est détectée par une photodiode à quadrants.

θ est proportionnel à la température de surface et dépend bien sûr de la diffusion de la chaleur dans le fluide (g) : son amplitude décroît de manière exponentielle et sa phase linéairement avec la distance à la surface chauffante. Remarquons que pour une variation de température T_s donnée, la sensibilité de la détection dépend des propriétés du fluide par le facteur :

$$S_g = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \frac{1}{\sqrt{D_g}} \quad (7)$$

Comme le montre le tableau ci-dessous, ce facteur varie fortement entre un gaz et un liquide

	$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T}$ (K^{-1})	D_g ($m^2 \cdot s^{-1}$)	S_g ($K^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^{1/2}$)
Air	-10^{-6}	$2,2 \times 10^{-5}$	$-2,1 \times 10^{-4}$
Eau	$-5,3 \times 10^{-5}$	$1,46 \times 10^{-7}$	$-0,14$
CCL4	$-4,5 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{-8}$	$-1,6$

L'utilisation d'un liquide plutôt que de l'air comme milieu défecteur permet une exaltation de la sensibilité allant jusqu'à trois ordres de grandeur. Cette propriété est la raison du succès

de la méthode dans le domaine des films minces semi-conducteurs où elle constitue actuellement l'unique moyen de mesure des faibles absorptions. Par ailleurs, le caractère local de la détection permet une analyse fine de la répartition spatiale du gradient de température dans le milieu sondé. La mesure de l'amplitude ou de la phase du signal en fonction de la distance à la source donne accès, d'après la relation 6, à la longueur de diffusion thermique. On dispose ainsi d'une méthode simple et précise de détermination de la diffusivité thermique d'un milieu épais.

4 Montage expérimental

4.1 Matériel disponible

- laser HeNe de puissance de sortie environ 1 mW
- Lampe halogène 60 W
- Éléments optiques : lentilles et miroirs
- Modulateur mécanique.
- Photodiode à quatre quadrants (nous utilisons deux quadrants seulement).
- Oscilloscope
- Détection synchrone
- Cuvette contenant de l'huile de paraffine.
- Platine μ contrôle (translation et rotation)
- Contrôleur du modulateur mécanique
- Une boîte en plexiglass.

Le banc optique est représenté sur la figure ??.

Le faisceau sonde est issu d'un laser He-Ne délivrant une puissance d'environ 1 mW, et focalisé au niveau de l'échantillon par une lentille de 15 cm de focale. Au passage au niveau du gradient thermique, le faisceau laser est dévié, cette déviation est mesurée à l'aide d'un capteur de position constitué par une cellule photovoltaïque à quatre quadrants, dont deux seulement sont utilisés. La cellule est soumise à une polarisation inverse qui assure un fonctionnement en mode photorésistif. Un filtre interférentiel est placé devant le capteur afin d'éliminer la lumière parasite provenant de l'excitation et diffusée par le montage. Les signaux électriques issus des deux voies de la cellule sont ensuite envoyés sur l'entrée différentielle d'un amplificateur à détection synchrone dont la fréquence de référence est fournie par le contrôleur du modulateur

mécanique qui permet de moduler le flux issu de la lampe halogène.

L'emploi d'une procédure différentielle a pour avantage d'assurer une bonne réjection du bruit d'intensité du laser à la fréquence de travail. En effet, les signaux de tensions délivrés par les deux voies A et B peuvent se décomposer de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V_A &= V_{0A} [1 + b_i(t)] + v \cos 2\pi ft + B_p(t) + B_{eA}(t) \\ V_B &= V_{0B} [1 + b_i(t)] - v \cos 2\pi ft + B_p(t) + B_{eB}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

- V_{0A} et V_{0B} représentent les composantes constantes de chacune des voies,
- $V_{0A}b_i(t)$: le bruit d'intensité du laser sonde, proportionnel au flux reçu par chaque diode, b_i peut être de l'ordre de quelques pour cents.
- $v \cos 2\pi ft$: le signal de déviation à mesurer
- $B_p(t)$: le bruit associé aux fluctuations de la direction du faisceau sonde. Ces fluctuations ont plusieurs origines : les vibrations mécaniques, dont le filtrage est bien assuré en utilisant un banc de mesure adapté, les courants d'air qui entraînent des fluctuations d'indice de réfraction sur la partie du trajet du faisceau sonde se trouvant à "l'air libre", Le bruit de pointé propre au laser qui est très important à basse fréquence puisqu'il varie comme l'inverse de celle-ci.
- $B_e(t)$: les bruits d'origine électronique qui sont essentiellement le bruit de granulation des photodétecteurs et le bruit thermique de leur résistance de charge.

Le bruit d'intensité sera autant mieux éliminé lors de la différence $V_A - V_B$ si l'on prend soin, avant chaque mesure, d'équilibrer les composantes continues V_{0A} et V_{0B} visualisées sur les deux voies d'un oscilloscope.

Afin d'effectuer ce réglage ainsi qu'un positionnement correct de l'échantillon par rapport au faisceau sonde, on dispose des déplacements fins suivants : translation horizontale du capteur de position, translations horizontale et verticale, et rotation autour d'un axe vertical du porte-échantillon.

Les autres éléments, laser et lentille, sont rigidement fixés.

5 Manipulation

Pour créer le gradient de température au niveau de la surface de l'échantillon, on utilise une lampe halogène de 60 W dont le flux est focalisé sur l'échantillon et modulé par un modulateur mécanique à des fréquences situés entre 10 Hz- 20 Hz (**ATTENTION la fréquence correspondante affichée au niveau du contrôleur est de 100 Hz -200 Hz, facteur de réduction égal à 10**). Les signaux récupérés sur les deux voies de sortie de la photodiode à cadran sont envoyés vers l'entrée de la détection synchrone et en parallèle sur les deux voies d'un oscilloscope qui permettra de contrôler le bon équilibrage des composantes.

5.1 Détermination de la sensibilité du banc mirage

A fréquence donnée, sans échantillon, on réalisera des enregistrements du bruit à la sortie de la détection synchrone pour trois valeurs de la constante de temps. Ce bruit correspond au plus petit angle de déviation détectable. On déterminera cet angle après avoir effectué un étalonnage du banc exprimé en radian/volt. Pour cela on simulera une déviation en déplaçant latéralement le capteur de position d'une distance assez faible afin de rester dans le domaine de réponse linéaire et on mesurera sur l'oscilloscope la variation de tension entre les diodes du fait de ce déplacement.

5.2 Mesure de la diffusivité thermique de l'huile de paraffine

L'huile est contenue dans une cuve dont les quatre faces sont polies. Une plaque d'un matériau très absorbant (bakélite) est immergée dans la cuve. La surface de la plaque éclairée par la source blanche modulée constitue un plan chauffant à partir duquel se propage une onde thermique dans le liquide ainsi que dans la plaque elle-même.

On effectue un réglage soigneux du parallélisme du faisceau sonde avec la surface chauffée et on visualisera sur l'oscilloscope le fort signal de déviation obtenue. On tracera ensuite l'évolution de la phase et du logarithme népérien de l'amplitude du signal en fonction de la distance du faisceau à la surface. Pour cela, on mesurera le signal de sortie de la détection synchrone pour une valeur quelconque de la phase de la référence et pour cette valeur déphasée de 90° . Ces deux mesures donnent $V \sin \phi$ et $V \cos \phi$ d'où l'on déduit l'amplitude V du signal et la $tg\phi$ où ϕ est, est à un angle près fixé pour une configuration expérimentale donnée, la phase du signal de déviation. De chacun de ces graphes, on déduira une valeur de la diffusivité thermique de l'huile de paraffine.

5.3 Mise en évidence de défauts de surface

On dispose d'une pièce métallique présentant des "marches". Placer cette pièce dans l'huile, les marches étant horizontales. Régler au mieux le parallélisme du faisceau sonde et de cette pièce. Mesurer l'amplitude et la phase du signal photothermique. Déplacer l'échantillon et recommencer la mesure. On obtient ainsi le profil de la surface étudiée.