

Mesure d'épaisseur de films liquides par absorption de rayons X*

Measurement of liquid film thickness by X-ray absorption

Jean-Noël Solesio**

Pour étudier l'évolution des vagues se propageant à la surface libre d'un film liquide s'écoulant sur un plan incliné, il est nécessaire de déterminer l'épaisseur locale instantanée de ce film. Pour cela nous avons mis au point une méthode de mesure utilisant l'absorption des rayons X.

Principe de la mesure

Rappelons brièvement le principe de l'absorption d'un faisceau collimaté monochromatique de rayons X (Fig. 1). Soit I_0 l'intensité du faisceau incident, I l'intensité du faisceau émergent, h l'épaisseur traversée, μ le coefficient d'absorption linéaire du milieu traversé.

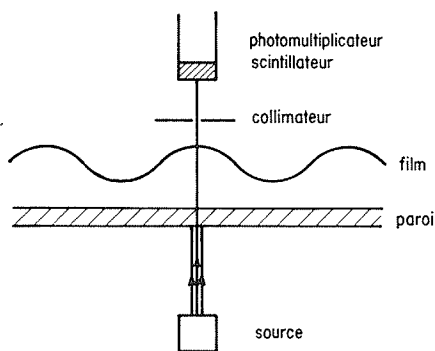


Figure 1. — Principe de l'absorption.

(*) Ce texte est une version améliorée d'une communication au Colloque Européen de Mécanique de Nancy n. 90 (juillet 1977).

(**) Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble. Service des transferts thermiques.

Ces quatre grandeurs sont liées par la relation :

$$I = I_0 \exp(-\mu h)$$

d'où on déduit :

$$h = -\frac{1}{\mu} \text{Log} \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

Il suffit donc, si on connaît I_0 et μ , de déterminer à tout instant la valeur de I pour avoir la variation en fonction du temps de l'épaisseur h .

Un certain nombre de problèmes apparaissent dès qu'on aborde la mesure elle-même.

1) Le faisceau de rayons X émis par un tube n'est pas monochromatique, mais présente un spectre d'émission continu. Cette non-monochromaticité a des effets importants. En effet, le coefficient d'absorption varie rapidement avec la longueur d'onde comme le montre le tableau 1,

λ (Å)	1	1,41	1,9	2,5
μ (cm ⁻¹)	2,98	6,07	12,6	25,1

et l'équation (1) qui permettrait de déterminer h n'est plus vraie.

2) L'intensité I_0 supposée constante ne l'est pas, mais varie avec le temps (Fig. 2). En effet, la THT du générateur est produite à partir du secteur et n'est pas parfaitement stabilisée. Il reste donc une fluctuation de période 50 Hz. Pour des fréquences de phénomène physique de l'ordre de 50 Hz il est nécessaire d'en tenir compte, c'est-à-dire qu'il faut à tout instant comparer le faisceau émergent au faisceau incident.

3) L'intensité varie également avec la puissance instantanée disponible, par exemple au cours de la mise en route d'autres matériels.

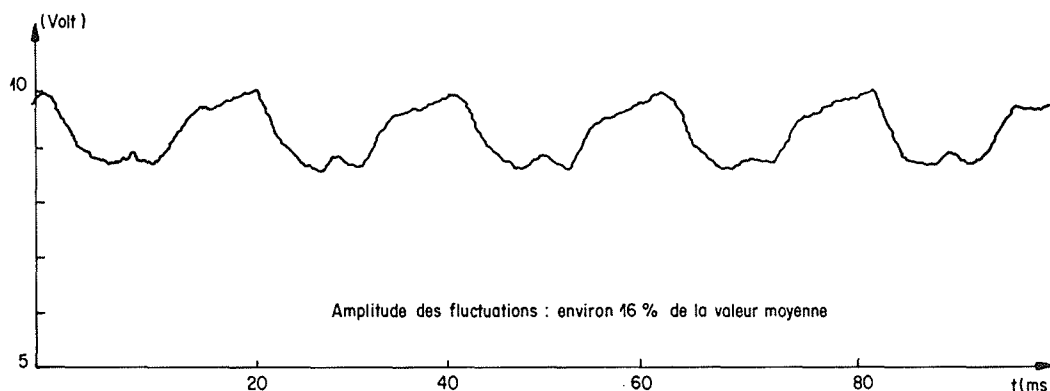


Figure 2. — Variations de l'intensité du faisceau de rayons X en fonction du temps. L'ordonnée correspond à la tension en sortie de la chaîne de détection.

Réalisation pratique

La première remarque nous amène à définir expérimentalement un coefficient d'absorption apparent qu'on considérera comme constant si les variations d'épaisseur en fonction du temps sont faibles par rapport à la valeur moyenne.

En régime transitoire l'équation d'absorption s'écrit :

$$I(t) = I_0(t) \exp[-\mu_{\text{app}} h(t)]$$

La deuxième remarque nous indique qu'il est nécessaire de mesurer simultanément à la fréquence d'échantillonnage choisie $I_0(t)$ et $I(t)$. Pour cela il faudrait pouvoir disposer d'un système analogue aux miroirs semi-transparents utilisés en lumière visible. Comme nous n'avons trouvé aucun moyen satisfaisant, nous avons dû procéder de façon séquentielle.

La troisième remarque nous conduit à utiliser un faisceau de référence issu du même tube (Fig. 3). En effet, les perturbations apportées au faisceau de mesure par les variations de puissance instantanée pourraient être attribuées au phénomène physique que l'on désire mesurer.

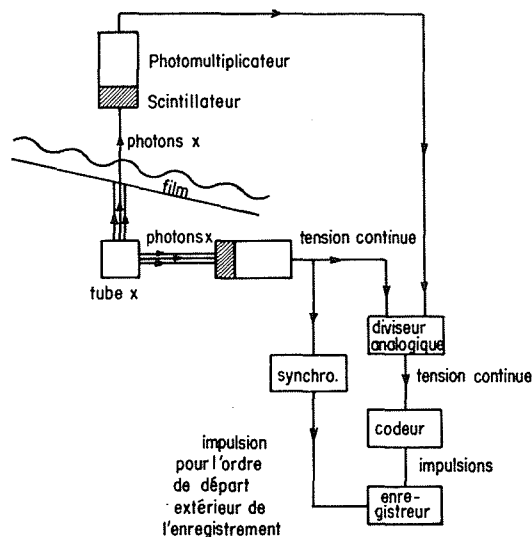


Figure 3. — Montage.

Soit $I'(t)$ la valeur instantanée du faisceau de référence. Dans un premier temps (indice 1) nous mesurons $I_{01}(t)/I'_1(t)$ où $I_0(t)$ est l'intensité du faisceau ayant traversé la plaque seule. Dans un deuxième temps (indice 2) nous mesurons $I_2(t)/I'_2(t)$ où $I(t)$ est l'intensité du faisceau ayant traversé la plaque et le film liquide.

L'épaisseur $h(t)$ se déduit de la relation suivante :

$$I_2(t)/I'_2(t) = I_{02}(t)/I'_2(t) \exp[-\mu_{\text{app}} h(t)]$$

La méthode proposée consiste à assurer l'identité suivante :

$$I_{01}(t)/I'_1(t) \equiv I_{02}(t)/I'_2(t) \quad \forall t$$

Pour que cette relation soit vérifiée, il est nécessaire que les enregistrements de $I_{01}(t)/I'_1(t)$ et de $I_{02}(t)/I'_2(t)$ soient synchronisés.

On peut alors écrire $h(t)$ sous la forme :

$$h(t) = -\frac{1}{\mu_{\text{app}}} \text{Log} \frac{I_2(t)/I'_2(t)}{I_{01}(t)/I'_1(t)}$$

L'ensemble des remarques précédentes nous a conduit au montage de la figure 3.

Les deux faisceaux utilisés sont captés, l'un (faisceau de référence) en sortie du tube, l'autre (faisceau de mesure) après absorption par deux photomultiplicateurs munis de scintillateurs d'iodure de sodium. Ces P.M. transforment l'intensité des faisceaux en tension continue.

Les deux tensions obtenues sont alors envoyées sur un diviseur analogique dont le temps de réponse est inférieur à la microseconde. Le quotient de ces deux tensions est dirigé sur un codeur analogique numérique dont le rôle est de transformer la tension continue en trains d'impulsions dont le nombre est proportionnel à la valeur instantanée de la tension.

Le signal numérique obtenu est enregistré sur la mémoire vive d'un analyseur statistique de type "Histogramat S".

La synchronisation des deux enregistrements successifs, c'est-à-dire $I_{01}(t)/I'_1(t)$ et $I_2(t)/I'_2(t)$ se fait sur le faisceau de référence. Lorsque les deux signaux sont enregistrés, nous effectuons la division point par point

des deux enregistrements. On obtient ainsi la courbe $f(t)$ définie par :

$$f(t) = \frac{\Delta}{I_{01}(t)/I_1'(t)} = \exp[-\mu_{app} h(t)]$$

Mesure statique et dynamique d'une épaisseur constante de métal

Nous avons tout d'abord cherché à déterminer quelles étaient les possibilités de cette méthode pour la mesure d'une épaisseur constante. Le matériau utilisé était de l'aluminium, sous forme de feuilles d'épaisseur $8,5 \mu\text{m}$. La figure 4 représente la fonction $f(t)$.

Sachant que dans le domaine des longueurs d'onde qui nous intéresse ($0,8 \text{ \AA}$ à 2 \AA) les coefficients d'absorption linéaire de l'aluminium et de l'eau sont tels que

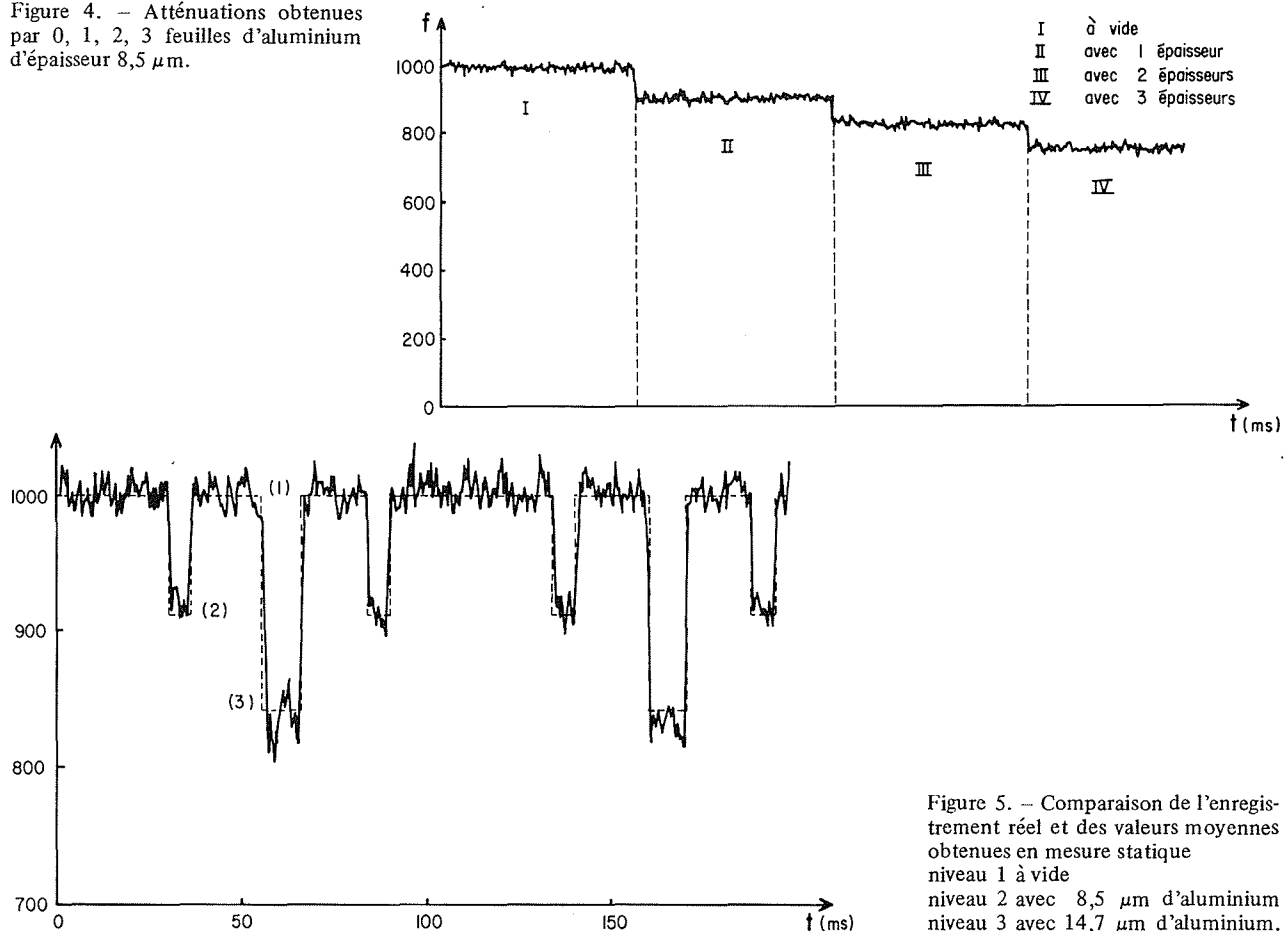
$$\mu_{al} = 12,6 \mu_{eau}$$

il est possible de convertir l'épaisseur d'aluminium en épaisseur d'eau équivalente. On obtient ainsi pour $8,5 \mu\text{m}$ d'aluminium $0,1 \text{ mm}$ d'eau, valeurs qui correspondent aux écarts entre les différents niveaux de la figure 4.

Nous avons également cherché à tester la réponse en dynamique du système de mesure.

Nous disposons pour cela d'un moteur à vitesse variable entraînant un disque sur lequel sont collés

Figure 4. — Atténuations obtenues par 0, 1, 2, 3 feuilles d'aluminium d'épaisseur $8,5 \mu\text{m}$.



3 rubans de papier d'aluminium, deux d'épaisseur $8,5 \mu\text{m}$, un d'épaisseur $14,7 \mu\text{m}$.

Les rubans d'aluminium coupent périodiquement le faisceau de rayons X. L'enregistrement obtenu va donc être en forme de crêneau, les paliers correspondant à l'absence (niveau 1) et à la présence (niveau 2 et 3) du ruban.

La figure 5 montre les résultats obtenus pour une vitesse de rotation du disque de 600 tours par minute.

Nous avons superposé à la courbe réelle la courbe théorique obtenue pour les niveaux (1), (2) et (3). On remarque que l'accord entre les deux courbes est assez bon.

En considérant l'échelle des temps, on peut estimer que le temps de réponse de l'appareillage est inférieur à la milliseconde donc que l'on peut mesurer des phénomènes de fréquence supérieure à 1000 Hz dans la mesure où leur amplitude est supérieure à la résolution de la méthode.

Conclusion

Les étalonnages statique et dynamique de la méthode de mesure d'épaisseur par absorption de rayons X sont satisfaisants et montrent qu'il est possible d'utiliser cette méthode pour mesurer l'épaisseur locale instantanée d'un film liquide.

Figure 5. — Comparaison de l'enregistrement réel et des valeurs moyennes obtenues en mesure statique
niveau 1 à vide
niveau 2 avec $8,5 \mu\text{m}$ d'aluminium
niveau 3 avec $14,7 \mu\text{m}$ d'aluminium.