

Calorimétrie laser : mesure de fortes puissances laser

M. SOSCIA

Laboratoire National d'Essais

Résumé

Depuis 1988 le LNE participe au programme Eurolaser EU 194 du projet EUREKA pour la caractérisation des lasers CO₂ continus de très fortes puissances : ≥ 10 kW. Dans le cadre de ce programme le LNE a réalisé des mesures de fortes puissances en continu à l'aide de calorimètres laser développés avec le soutien du BNM. Nous présentons ici les principes de fonctionnement de ces calorimètres laser : techniques d'absorption totale des faisceaux, système de refroidissement, étalonnage et instrumentation.

Abstract

Since 1988 LNE takes parts in EU 194 Eurolaser program of EUREKA project for the characterisation of very high power (≥ 10 kW) CW CO₂ Lasers. In this program LNE realized high power measurements in CW mode with laser calorimeters designed with the support of BNM. We present here the operating principles of these laser calorimeters : total absorption of the beam, cooling system, calibration and instrumentation.

1. Participation du LNE au projet Eureka

1.1. Les programmes Eurolaser

Depuis plusieurs années le développement des applications des lasers de puissance à l'usage des matériaux est tel qu'il donne lieu aujourd'hui à de nombreux programmes de collaboration au niveau

européen. Ces programmes Eurolaser qui s'intègrent dans les grands projets EUREKA et BRITE auxquels participent dix neuf pays européens, s'intéressent d'une part au développement de sources laser de très fortes puissances moyennes et d'autre part au développement des applications avec les sources existantes : soudage, découpe, perçage, traitement de surface, marquage... Ces projets de développement concernent :

- les lasers CO₂ (10.6 μ m) de très fortes puissances allant jusqu'à 25 kW en continu. Ce sont actuellement les lasers de puissance les plus stables et les plus industrialisés ;
- les lasers YAG (1.064 μ m) continus et impulsionnels de puissances moyennes allant jusqu'à 5 kW. Les lasers YAG sont actuellement industrialisés jusqu'à 1.2 kW ; ils sont moins stables et moins puissants que les lasers CO₂, mais ils ont l'avantage d'être mieux focalisables (dans le rapport des longueurs d'onde) et d'être transportables par fibres optiques contrairement aux lasers CO₂ qui nécessitent un transport par miroirs refroidis ;
- les lasers excimères impulsionnels de grandes puissances moyennes jusqu'à quelques kilowatts dont le grand intérêt est leur focalisabilité importante du fait de leur longueur d'onde dans l'U.V.

Pour chaque type de source laser il existe plusieurs programmes Eurolaser lancés à l'initiative des pays de la Communauté les plus industrialisés. Ainsi pour les lasers CO₂ il existe dans le cadre du projet EUREKA, six programmes Eurolaser :

Laboratoire National d'Essais, 5, rue Enrico-Fermi, ZA Trappes-Elancourt, 78190 Trappes.

- « le programme anglais » EU 183 pour le développement d'un module laser 25 kW ;
- « le programme bavarois » EU 155 auquel participent la RFA, l'Autriche et la Suisse et qui s'intéresse aux applications ;
- « le programme italien » EU 180 pour le développement d'un module laser 10 kW ;
- « le programme français » EU 194 auquel participent tous les chefs de file et qui s'intéresse aux applications des lasers de puissances supérieures à 10 kW ;
- le programme EU 204 spécifique au traitement de surface auquel participent l'Italie et la RFA ;
- « le programme allemand » EU 214 pour le développement d'un module laser de puissance ≥ 20 kW.

1.2. Participation du LNE au programme Eurolaser EU 194

Depuis 1988 le Laboratoire National d'Essais participe au programme Eurolaser EU 194 pour la caractérisation des lasers CO₂ de puissances supérieures à 10 kW en continu. Les deux principaux paramètres de faisceau à caractériser sont la structure de mode ou la distribution d'éclairement $E(\text{kW}/\text{cm}^2)$ et la puissance moyenne $P(W)$. Dans le cadre de ce programme le LNE a effectué des mesures de très fortes puissances laser sur les principaux sites européens équipés dans ce domaine :

- ETCA (France) en 1988 : laser UTRC 22 kW ;
- SI (Norvège) en 1989 : laser UTRC 12 kW ;
- RTM (Italie) en 1989 : laser AFCO 17 kW ;
- ILT (RFA) en 1990 : laser UTRC 22 kW.

Pour ces mesures nous avons utilisé successivement quatre calorimètres laser refroidis à eau « sous la peau » :

- un calorimètre étalon à absorbeur cône optimisé en temps de réponse (5s) ;
- un calorimètre étalon à absorbeur cylindrique optimisé pour supporter les forts éclaircements en continu ($\geq 20 \text{ kW}/\text{cm}^2$) ;
- deux calorimètres industriels adaptés aux besoins des utilisateurs.

La maîtrise des processus d'usinage nécessite une bonne connaissance de la puissance moyenne du faisceau, et de ce fait nos partenaires européens ont tenté de développer leur propre système de mesure. Ainsi les Italiens (RTM) ont étudié et réalisé un calorimètre non refroidi qui n'est pas auto-étalonnable, qui présente un temps de réponse relativement long (5 mn) et dont la dynamique de mesure semble limitée. Les Allemands (ILT) ont récemment développé un système refroidi composé d'un miroir parabolique réfléchissant couplé à une cavité absorbante ; ce système non auto-étalonnable utilise la valeur théorique de la capacité thermique volumique de l'eau pour sa calibration.

La synthèse des mesures effectuées avec les diffé-

rents calorimètres développés : français (LNE), allemand (ILT), italien (RTM), ainsi qu'avec ceux intégrés aux quatre lasers américains caractérisés (UTRC et AFCO), fait apparaître une dispersion relative des mesures égale à 30 %. Cette dispersion importante montre qu'il est nécessaire d'uniformiser les moyens de mesure pour comparer les paramètres d'usinage utilisés sur les différents sites. L'appareil qui pourra être utilisé devra présenter un ensemble de caractéristiques et de performances minimales que l'on peut résumer à :

- une capacité d'absorption d'une puissance continue de 25 kW conjuguée à des éclaircements incidents $\geq 20 \text{ kW}/\text{cm}^2$;
- un temps de réponse inférieur à 10 secondes ;
- une précision relative des mesures $\leq \pm 3 \%$;
- une stabilité suffisante pour une reproductibilité meilleure que 1 % ;
- une compacité géométrique suffisante ;
- une souplesse d'utilisation qui permette de passer sans aménagement d'un faisceau incident de diamètre 80 mm utilisé en sortie de laser à un faisceau divergent ($\leq 10^\circ$) issu d'une tête de focalisation.

2. Les calorimètres laser du LNE

Les calorimètres laser utilisés pour notre participation au programme Eurolaser EU 194 ont été étudiés et développés dans le cadre de notre agrément Bureau National de Métrologie. Associés à un laser CO₂ radiofréquence 3 kW, ils constituent les moyens de notre chaîne d'étalonnage agréée par le BNM pour la métrologie des fortes puissances laser.

2.1. Principe de fonctionnement

Ces calorimètres laser utilisent un piège optique conçu pour absorber totalement le faisceau incident et supporter les éclaircements continus importants associés ($\geq 1 \text{ kW}/\text{cm}^2$). Ces pièges optiques sont refroidis avec de l'eau « sous la peau » comme les optiques laser de très fortes puissances à travers une faible épaisseur de cuivre de quelques millimètres. Ainsi pour un débit de refroidissement Q on mesure une élévation de température δT de l'eau à la sortie du système qui résulte de l'absorption totale de la puissance optique P (fig. 1). L'énergie évacuée par unité de temps qui représente la puissance absorbée est proportionnelle au produit des deux paramètres mesurés Q et δT . Le coefficient de proportionnalité traduit une valeur expérimentale de la capacité thermique volumique de l'eau : C_{exp} .

$$P = C_{\text{exp}} \cdot Q \cdot \delta T$$

En fait c'est principalement le piège optique qui va

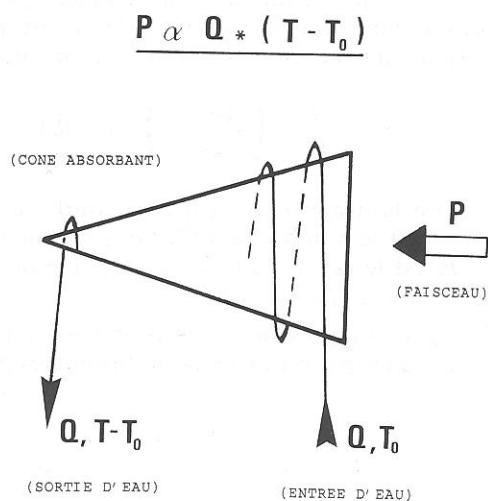


FIG. 1. — Principe de fonctionnement d'un calorimètre laser.

différencier deux calorimètres laser utilisés pour des mesures de fortes puissances moyennes. La définition du piège optique se fait en fonction des paramètres de faisceau rencontrés :

- diamètre et divergence du faisceau : $\varnothing \leq 80$ mm, θ de 0° à 20° ;
- puissance continue à absorber : 1 à 25 kW ;
- éclaircissements incidents : jusqu'à 20 kW/cm² après tête de soudage.

C'est l'éclaircissement qui est le paramètre prépondérant pour concevoir le piège optique. On distingue deux domaines d'éclaircissement :

- les éclaircissements continus faibles ou moyens ≤ 5 kW/cm², pour lesquels on peut recevoir directement le faisceau incident sur des revêtements très absorbants qui doivent cependant présenter une haute tenue à la température : certains dépôts de graphite par exemple ;
- les éclaircissements importants ≥ 5 kW/cm², pour lesquels il est nécessaire de défocaliser le faisceau incident avant de l'absorber grâce à une optique réfléchissante de mise en forme

Ainsi nous utilisons deux types de piège optique :

- le piège optique cône à revêtement absorbant pour les éclaircissements continus faibles et moyens (≤ 5 kW/cm²) ;
- le piège optique cylindrique à gradient d'absorption pour les éclaircissements continus importants (≥ 5 kW/cm²).

2.2. Calorimètre à piège cône à revêtement absorbant

Dans nos calorimètres à absorbeur cône le piégeage de la lumière a lieu par réflexions successives sur un revêtement absorbant à caractère diffusant. Le coefficient d'absorption global de ce piège sera fonction de l'angle au sommet du cône $2\theta_s$ et des caractéristiques locales de son revêtement : son coef-

ficient de réflexion local R et son caractère à diffuser la lumière que l'on pourra traduire par un angle solide de diffusion $2\theta_d$.

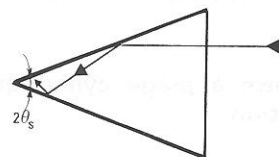
Dans le cas d'un cône à revêtement spéculaire (figure 2), un faisceau incident parallèle à l'axe de symétrie subit un nombre entier de réflexions égal à la partie entière de $\pi/2\theta_s$, avant de ressortir du cône. Dans ce cas le coefficient d'absorption global : A_g , correspondant aux réflexions successives est donné par la relation :

$$A_g = 1 - R^{\text{ent.}(\pi/2\theta_s)}$$

(« ent. » exprime la partie entière).

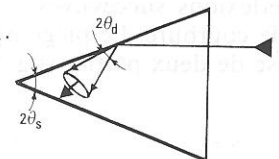
Dans le cas d'un revêtement à caractère diffusant (fig. 2) on peut évaluer facilement un coefficient

CONE A REVETEMENT SPECULAIRE



$$(A_g = 1 - R^{\text{ent.}(\pi/2\theta_s)})$$

CONE A REVETEMENT DIFFUSANT



$$(A_g = 1 - R^{\text{ent.}(\pi/2\theta_s + \theta_d)})$$

FIG. 2. — Le piège optique cône à revêtement absorbant. d'absorption global minimum. Pour le cas défavorable d'une indicatrice de diffusion que l'on représentera par un angle solide $2\theta_d$ dans lequel la lumière réfléchi sera répartie uniformément, les rayons lumineux les plus extrêmes vers l'extérieur du cône subissent un nombre de réflexions égal à la partie entière de $\pi/(2\theta_s + \theta_d)$. Dans ce cas le coefficient d'absorption global minimum est donné par la relation :

$$A_g = 1 - R^{\text{ent.}(\pi/2\theta_s + \theta_d)}$$

Finalement le coefficient d'absorption global A_g pour un piège cône ($2\theta_s$) à revêtement absorbant ($1 - R$) et à caractère diffusant ($2\theta_d$) peut être évalué à partir de la relation simple :

$$1 - R^{\text{ent.}(\pi/2\theta_s + \theta_d)} \leq A_g \leq 1 - R^{\text{ent.}(\pi/2\theta_s)}$$

D'un point de vue technologique le piège cône d'angle au sommet égal à 30° est réalisé en cuivre avec une hélice externe usinée dans la masse et directement refroidi sous la peau à travers 2,5 mm de matière. Le revêtement absorbant est constitué d'un dépôt de

graphite obtenu par pulvérisation d'une solution colloïdale étuvée. Des mesures d'émissivité donnent pour le graphite un coefficient d'absorption moyen de 90 % pour le YAG (1.064 μm) et de 71 % pour le CO₂ (10.6 μm). Avec $2\theta_s = 2\theta_a = 30^\circ$, on peut évaluer dans quelles limites se situe le coefficient d'absorption global d'un tel piège pour le CO₂ :

$$99.3\% \leq A_g \leq 99.99\%$$

Nous choisissons pour nos mesures un coefficient d'absorption global égal à 0,995 en propageant une incertitude supplémentaire de $\pm 0.5\%$. Nous vérifierons prochainement cette hypothèse en utilisant un détecteur à sphère intégrante pour tenter de mesurer des pertes optiques. A partir des mesures de fortes puissances que nous avons effectuées sur différents types de laser nous pouvons évaluer les limites de cette technologie à une puissance moyenne de 10 kW conjuguée à un éclairement maximal de 5 kW/cm².

1.3. Calorimètre à piège cylindrique à gradient d'absorption

Dans un calorimètre à absorbeur cylindrique et à gradient d'absorption le piégeage de la lumière a lieu après un effet de défocalisation du fait de la courbure du cylindre. On peut observer cet effet de défocalisation sur les réflexions successives d'un laser HeNe dans le plan de courbure. Le piège optique cylindrique se compose de deux parties (fig. 3) :

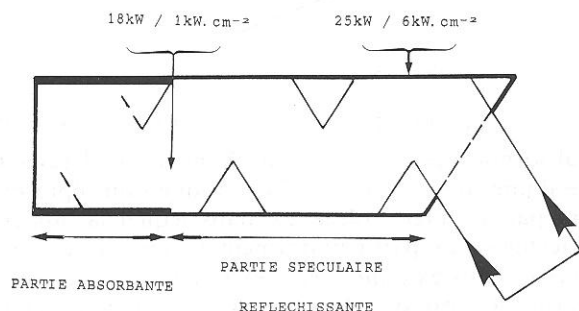


FIG. 3. — Le piège optique cylindrique à gradient d'absorption.

- une partie spéculaire réfléchissante qui permet d'une part d'éviter les pertes par rétro-diffusion à l'entrée du système et d'autre part de défocaliser le faisceau incident après plusieurs réflexions successives de façon à réduire les éclaircissements importants associés ;
- une partie absorbante qui présente une haute tenue à la température et qui piègera sans subir de détérioration le faisceau défocalisé auquel seront associés des éclaircissements faibles : 1 kW/cm².

Si l'on étudie les réflexions successives d'un faisceau incident cylindrique dans le plan de courbure du

cylindre on montre que les lieux géométriques où les rayons lumineux se focalisent : les caustiques par réflexion sont représentés par la relation suivante :

$$r^2 = \frac{R^2}{4n^2} + \left(\frac{4n^2 - 1}{4n^2} \right) \cdot y^2 (R_0)$$

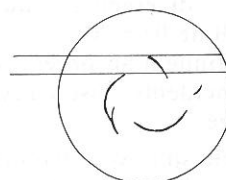
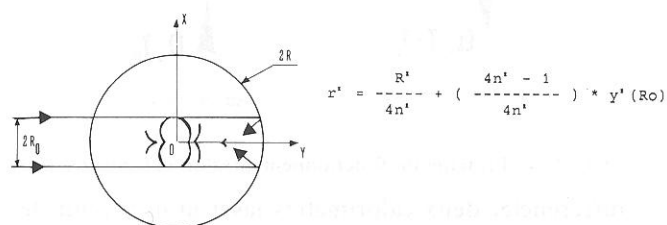
où : r est la distance au centre de courbure

n : est le nombre de réflexions spéculaires

R_0 est le rayon du faisceau et y une ordonnée :

$$-R_0 \leq y(R_0) \leq +R_0.$$

La figure 4 représente l'extension des cinq premières caustiques par réflexion pour différentes positions



INFLUENCE DE LA POSITION DU FAISCEAU

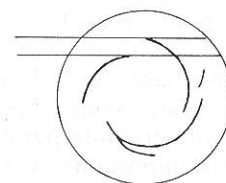


FIG. 4. — Extension des caustiques par réflexion dans un cylindre.

du faisceau incident. On peut noter que l'extension des caustiques est limitée par les rayons extrêmes du faisceau incident et que l'on évite les focalisations proches de la surface tant que les rayons lumineux incidents sont suffisamment éloignés d'un plan tangent au cylindre. Dans le cas d'un faisceau incident présentant une distribution uniforme d'éclairement E on montre qu'après N réflexions spéculaires on obtient un éclairement uniforme résultant égal à E/G , où G est un grossissement qui s'exprime en fonction de N :

$$G = 2N - 1$$

En utilisant le fait que l'angle d'incidence d'un

rayon lumineux par rapport à la surface du cylindre se conserve au cours de sa propagation, on montre que le coefficient d'absorption après N réflexions d'un faisceau étendu peut s'exprimer simplement à partir de la relation :

$$A = 1 - \langle R^N(\theta) \rangle$$

où $\langle R^N(\theta) \rangle$ est la valeur moyenne du coefficient de réflexion local à la puissance N pris sur l'incidence θ associée à chacun des rayons lumineux du faisceau incident. Pour un revêtement métallique avec un coefficient de réflexion local moyen de 0.9 variant peu suivant l'incidence des rayons du faisceau, douze réflexions spéculaires successives seraient nécessaires pour obtenir un coefficient d'absorption global égal à 0,998. Pour éviter des dimensions importantes relatives à une douzaine de réflexions successives on dispose après quelques réflexions spéculaires une partie fortement absorbante qui piègera la lumière sans être détériorée.

D'un point de vue technologique l'absorbeur cylindrique en cuivre est usiné dans la masse et refroidi sur sa face externe à travers 3 mm de matière. Sa face interne est rendue spéculaire à 10.6 μm par un polissage mécanique suivi d'un polissage électrolytique. Un dépôt électrolytique de Nickel permet de s'affranchir des problèmes d'oxydation du cuivre avec la température. On réalise la partie absorbante en déposant du graphite sur un profil géométrique permettant un piégeage par un effet de cône local. Pour ce type d'absorbeur nous avons mesuré des puissances résiduelles transmises qui conduisent à un coefficient d'absorption global de 0.997. En pratique ces résidus sont renvoyés sur la partie absorbante à l'aide d'un miroir réfléchissant situé au fond du cylindre. Les limites de cette technologie, très élevées, ne peuvent actuellement être testées faute de sources laser suffisamment puissantes. Compte tenu des mesures déjà effectuées on peut estimer une capacité de mesure d'une puissance moyenne de 50 kW conjuguée à un éclairage incident de 20 kW/cm². En outre il est prévisible que cette technologie soit extensible à des mesures de puissance de quelques centaines de kilowatts en continu.

2.4. Système de refroidissement et temps de réponse

Ces calorimètres à absorbeur cône et cylindrique sont refroidis sous la peau à l'aide d'un écoulement d'eau de forme hélicoïdal à section rectangulaire. Le flux de chaleur résultant de l'absorption de la puissance optique incidente est évacué par un processus d'échange par convection forcée entre l'absorbeur et l'eau qui lèche sa surface. Le coefficient d'échange associé à ce processus sera optimum pour un écoulement d'eau dit « turbulent ». Dans ce ré-

gime ce coefficient peut être approché par la relation simple :

$$h = \frac{k(f)}{D} \cdot R_e \cdot P_r \cdot S_i$$

où : h est le coefficient d'échange en kW/m²·°C
 $K(f)$ la conductivité thermique de l'eau en kW/m·°C
 D le diamètre hydraulique en m. Pour une section rectangulaire : $D = 4L \cdot l / (L + l)$
 R_e, P_r, S_i sont des nombres sans dimensions caractéristiques de l'écoulement, respectivement appelés nombre de Reynolds ($\geq 10\,000$ en turbulent), nombre de Prandtl et nombre de Stanton (= 0.001).

A partir de la relation précédente on peut obtenir une expression intéressante de h en fonction de la vitesse de l'écoulement :

$$h = 0.001 \cdot (v \cdot C)_f$$

où : $C(f)$ est la capacité thermique volumique de l'eau. En pratique pour un écoulement à section rectangulaire : 5 mm · 40 mm et un débit de 10 l/mn, on obtient un coefficient d'échange de 4 kW/m²·°C, ce qui permet d'évacuer les flux de chaleur résultant avec des élévations de température moyennes de quelques degrés. Il faut noter que les pertes de charges dynamiques associées à l'écoulement turbulent devront être suffisamment faibles, pour s'assurer d'un bon fonctionnement d'un point de vue pratique. Ces pertes de charges dynamiques peuvent être évaluées à partir de la relation :

$$\delta P = \frac{\Gamma \cdot \beta v^2}{D \cdot 2}$$

où β et Γ sont respectivement la masse volumique de l'eau et Γ un facteur de forme donné par la relation :
 $\Gamma = \sqrt{(D/2R)} \cdot (0.29 + 0.304 \cdot (R_e (D/2R)^2)^{-0.25})$.

Ainsi pour l'écoulement précédent on obtient des pertes de charge linéaires de 0.1 bar/m ce qui conduit à une perte de charge inférieure à 1 bar pour une hélice de quelques mètres, donc à des conditions hydrauliques tout à fait acceptables expérimentalement.

Le temps de réponse est un paramètre très important pour les utilisateurs. Pour un calorimètre ce temps de réponse est représentatif de transferts thermiques. On peut l'explicitier à l'aide d'un modèle simple qui décrit l'évolution temporelle de la température moyenne de l'absorbeur (T_a) et de l'eau de refroidissement (T_f). Le système suivant décrit l'évolution de ces températures moyennes :

$$\text{Pour l'absorbeur : } C \cdot V \cdot \frac{dT_a}{dt} = -h \cdot S \cdot (T_a - T_f) + P$$

Pour l'eau :

$$(C \cdot V)_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h \cdot S \cdot (T_a - T_f) - (C \cdot Q)_f \cdot (T_f - T_0)$$

avec comme condition initiale à $t = 0$: $T_a = T_f = T_0$.
L'expression : $h \cdot S \cdot (T_a - T_f)$, représente le flux de chaleur transmis à l'eau par l'absorbeur et : $(C \cdot Q)_f \cdot (T_f - T_0)$, le flux de chaleur évacué à l'extérieur du système. L'évolution de la température moyenne de l'eau s'écrit :

$$T_f = T_0 + \frac{P}{(C \cdot Q)_f} + c \cdot \exp(-t/\tau) + c' \cdot \exp(-t/\tau')$$

où :

- $\tau = 1000 e/v$, est le temps associé au transfert de chaleur de l'absorbeur à l'eau, qui s'exprime en fonction de l'épaisseur e de l'absorbeur et de la vitesse v de l'écoulement de l'ordre du mètre par seconde ; on obtient un temps caractéristique : $\tau = 1s$.
- $\tau' = L/v$, est le temps associé à l'évacuation du flux de chaleur par l'eau de refroidissement. La longueur L représente ici la distance entre la sortie du système et le point chaud le plus éloigné de celle-ci. La distance L peut varier de quelques centimètres dans le cas d'un cône où le faisceau incident est situé au fond de celui-ci, à quelques mètres dans le cas d'un cylindre à gradient d'absorption où le faisceau incident est situé à l'entrée de celui-ci. On obtient alors des temps caractéristiques variant de 0.01s pour un cône à 10s pour un long cylindre.

Ces temps caractéristiques sont tout à fait représentatifs des temps de réponse observés expérimentalement.

2.5. Étalonage et instrumentation

Ces calorimètres sont auto-étalonnables par substitution électrique. On dissipe par effet Joule une puissance électrique bien connue au niveau des absorbeurs de façon à reproduire le mieux possible les effets thermiques résultant de l'absorption du faisceau incident. Pour une puissance électrique dissipée P_e on mesure l'élévation de température δT de l'eau à la sortie du système correspondant à un débit de refroidissement Q : figure 5. Les résultats montrent que le produit $\delta T \cdot Q$ est proportionnel à la puissance électrique dissipée. Le coefficient de proportionnalité C_e est représentatif de la capacité thermique volumique de l'eau : $C_e = 0.0705 \text{ kW}/(1/\text{mn}) \cdot ^\circ\text{C}$ (la valeur théorique étant égale à $0.0695 \text{ kW}/(1/\text{mn}) \cdot ^\circ\text{C}$). Quantitativement pour une puissance dissipée de 1 kW et un refroidissement de 10 l/mn on obtient une élévation de température de l'eau à la sortie du système égale à : $1.41 ^\circ\text{C}$ (avec un débit de 1 l/mn on obtiendrait $14.1 ^\circ\text{C}$). Expérimentalement il n'est pas nécessaire de passer par des mesures absolues de température et de débit pour étalonner le système et mesurer

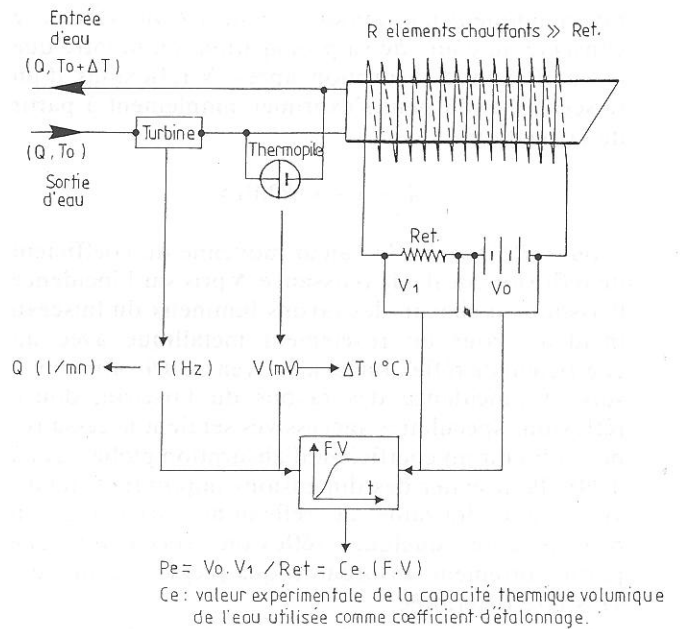


FIG. 5. — Étalonage électrique d'un calorimètre laser.

une puissance. En fait il suffit de mesurer des quantités représentatives de ces grandeurs et d'utiliser pour cela des capteurs qui présenteront une réponse linéaire lorsque la valeur de ces grandeurs variera, de façon à garder un coefficient de proportionnalité constant.

Traditionnellement les mesures de température dans les fluides en mouvement sont réalisées à l'aide de sondes à résistance de Platine. Ainsi deux sondes à résistance de Platine étalonnées en température, placées respectivement à l'entrée et à la sortie du système permettent de mesurer l'élévation de température de l'eau. Nous avons remplacé ces sondes par une thermopile spécialement développée à cet effet qui délivre des tensions électriques continues facilement exploitables ($320 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) et qui présente un temps de réponse plus court : qqs 0.1 s, au lieu de qqs 1 s pour une technologie similaire. Pour la mesure de débit nous utilisons une turbine à hélice de tungstène de haute qualité étalonnée par le constructeur avec une incertitude relative inférieure à $\pm 0.25 \%$ et présentant une réponse non linéaire inférieure à 0.1 % sur sa gamme d'utilisation. Cette turbine délivre un signal électrique sinusoïdal dans une bande de fréquences de 10 Hz à 1 kHz. Les signaux électriques continus et sinusoïdaux sont respectivement exploités par un voltmètre et un fréquencemètre et les mesures effectuées sont transmises à un ordinateur via bus IEEE.

L'étalonnage du système consiste à mesurer expérimentalement le coefficient de proportionnalité : $C_e = P_e / V \cdot F$. L'incertitude relative associée à la mesure de ce coefficient se déduit d'une relation simple qui résulte de la loi de composition des variances :

$$\frac{\delta C_e}{C_e} = \pm \left(\left(\frac{\delta C_e}{C_e} \right)_{\text{fluct.}}^2 + \left(\frac{\delta P_e}{P_e} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta F}{F} \right)^2 \right)^{1/2}$$

Avec : $(\delta C_e / C_e)_{\text{fluct.}}$, fluctuations relatives observées

sur la mesure de C_e directement liées aux fluctuations de débit.

$\delta P_e/P_e = 1\%$, incertitude relative associée à la mesure de la puissance électrique dissipée
 $\delta V/V = 0.5\%$, incertitude relative associée à la mesure de la tension électrique continue qui inclut la non-linéarité de la réponse de la thermopile en fonction de la température mesurée

$\delta F/F = 0.5\%$, incertitude relative associée à la mesure de la fréquence qui inclut la non-linéarité de la réponse de la turbine en fonction du débit

En l'absence de fluctuations on obtient :
 $\delta C_e/C_e = \pm 1.25\%$. Pour des fluctuations observées de l'ordre de $\pm 1.5\%$, on obtiendrait :
 $\delta C_e/C_e = \pm 2\%$.

La puissance optique mesurée se déduit de la relation : $P = C_e \cdot F \cdot V$, avec l'expression de l'incertitude associée :

$$\delta P/P = \pm \left((\delta P/P)_{\text{fluct.}}^2 + (\delta A/A)^2 + (\delta C_e/C_e)^2 + (\delta V/V)^2 + (\delta F/F)^2 \right)^{1/2}$$

Avec : $(\delta P/P)_{\text{fluct.}}$, fluctuations relatives observées sur la mesure de P directement liées aux fluctuations de débits.

$\delta A/A = \pm 0.5\%$, l'incertitude liée à la connaissance exacte du coefficient d'absorption.

En l'absence de fluctuations on obtient : $\delta P/P = \pm 1.5\%$. Pour des fluctuations observées de l'ordre de $\pm 1.5\%$, on obtiendrait : $\delta P/P = \pm 2.75\%$.

3. Conclusion : besoins des utilisateurs et perspectives

Nous sommes actuellement capables d'effectuer des mesures de fortes puissances jusqu'à 30 kW en continu avec une bonne précision : de $\pm 2\%$ à $\pm 3\%$. Cependant les besoins des utilisateurs dans le domaine de la caractérisation des lasers de puissance dépassent aujourd'hui largement le seul critère de la précision associée à la mesure. Un paramètre comme

la puissance moyenne doit pouvoir être caractérisé en tout point d'une machine à laser : en sortie de laser, suivant un transport de faisceau par miroirs, après une tête de focalisation. Des mesures doivent donc pouvoir être effectuées suivant des axes horizontaux et verticaux et pour des faisceaux cylindriques ou divergents et de dimensions géométriques variées. Ce type de mesure implique de disposer de systèmes de caractérisation compacts ou suffisamment intégrables et de grande souplesse d'utilisation. Ces critères de fonctionnalité deviennent aujourd'hui aussi importants que les performances métrologiques de l'instrument de mesure utilisé. Outre ces besoins il devient nécessaire de pouvoir caractériser les processus « en cours d'usinage » ; sans parler déjà de mesures en temps réel, il faut pouvoir interférer le moins possible avec le faisceau ce qui laisse présager par exemple le développement d'une instrumentation complémentaire de prélèvement. Pour répondre à ces besoins étendus qui concernent des systèmes de caractérisation précis, rapides, compacts et d'une grande facilité d'utilisation, nous étudions et développons actuellement avec le soutien du BNM des étalons de transfert utilisables sur laser multikilowatts CO₂ (1 à 30 kW) et YAG (100 W à 5 kW). Grâce à ces nouveaux étalons, nous tenterons prochainement d'intégrer le programme Eurolaser YAG en proposant des mesures multipoints précises et suffisamment rapides.

Bibliographie

- [1] BORN Max and WOLF Emil. — « Principle of Optics ». Pergamon Press, 6^e Édition, 1980.
- [2] JACOB Max, WILEY John and SONS. — « Heat Transfert ». Inc, New York, 1953.
- [3] KREITH F. — « Transmission de la chaleur et thermodynamique ». Masson et Cie, 1967.
- [4] KAKAÇ S. and YENER Y. — « Heat Conduction », h.p.c. Second Edition, 1985.
- [5] COMOLET R. — « Mécanique expérimentale des fluides ». Tome II, 2^e Édition, Masson 1976.
- [6] SOSCIA M., LIEVRE M. — « Métrologie des fortes puissances laser ». 4^e C.I.S.F.F.E.L. Cannes 1988.
- [7] CULOMA A., CHABLAT J., SOSCIA M. and LIEVRE M. — « High power laser beam diagnostic : an application to the etca 25 kW CO₂ Laser ». Optical Science and Engineering. Hambourg 1988.
- [8] QUENZER A. — « Programme Eurolaser ». Horizons de l'optique, Paris 1989.