Mesure des profils de la température électronique par diffusion thomson avec un seul tir laser : application au tokamak T. F. R.

J. Lasalle, P. Platz

► To cite this version:

J. Lasalle, P. Platz. Mesure des profils de la température électronique par diffusion thomson avec un seul tir laser : application au tokamak T. F. R.. *Revue de Physique Appliquée*, 1977, 12 (8), pp.1181-1185. 10.1051/rphysap:019770012080118100 . jpa-00244296

HAL Id: jpa-00244296

<https://hal.science/jpa-00244296>

Submitted on 1 Jan 1977

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
0.644 — 6.570

MESURE DES PROFILS DE LA TEMPÉRATURE ÉLECTRONIQUE PAR DIFFUSION THOMSON AVEC UN SEUL TIR LASER : APPLICATION AU TOKAMAK T. F. R. (*)

J. LASALLE et P. PLATZ

Département de physique du plasma et de la fusion contrôlée
Association EURATOM-CEA sur la fusion
Centre d'Etudes Nucléaires, Boîte Postale n° 6, 92260 Fontenay-aux-Roses, France

(Reçu le 30 décembre 1976, accepté le 6 mai 1977)

Résumé. — La méthode utilisée jusqu'à maintenant pour mesurer un profil de température électronique $T_e(r)$ dans un Tokamak nécessitait l'emploi d'un spectromètre multicanal, ne permettant d'acquérir T_e qu'en une seule position radiale à chaque tir. On a développé un nouveau type de spectromètre à deux canaux seulement, compact, peu coûteux, de conception simple et d'utilisation souple. Il est possible de ce fait, en utilisant une dizaine d'appareils, de mesurer un profil $T_e(r)$ en dix points du plasma pour un même tir laser, au cours d'une même décharge.

Abstract. — The most straightforward and widely used way, up to now, to measure an electron temperature profile $T_e(r)$ in a Tokamak was a shot by shot method using a multichannel spectrometer giving a single point of the $T_e(r)$ profile per shot. We have developed a two-channel, compact and inexpensive spectrometer.

The simplicity of its design and operation allows the simultaneous use of many instruments for the measurement of the full $T_e(r)$ profile with a single laser and Tokamak shot.

1. Introduction. — Le faisceau d'un laser à rubis (600 MW, 15 ns à mi-hauteur, longueur d'onde = 694,3 nm) est diffusé par les électrons du plasma à la température T_e , de l'ordre de quelques keV dans les Tokamaks (1 keV = 10^7 degrés Kelvin). On analyse le spectre des photons diffusés à 90° (fraction 10^{-14} des photons incidents), en provenance du laser (Fig. 1).

FIG. 1. — *Diffusion Thomson.* La lumière du faisceau laser diffusée par les électrons du plasma donne une image de l'intersection faisceau-plasma sur les entrées des guides de lumière reliés aux spectromètres.

[Thomson scattering. The scattered light is focused on the fiber-optic bundles.]

Le spectre diffusé est élargi par effet Doppler, sa largeur est proportionnelle à $\sqrt{T_e}$. L'image du faisceau est découpée en segments élémentaires (2 cm de longueur dans le plasma) reliés aux fentes d'entrée des spectromètres par des guides de lumière à fibres optiques.

Le système classique de détection comprend un seul spectromètre à réseau plan couplé directement à l'image du faisceau laser sans guide de lumière (distance focale de l'appareil de 30 à 100 cm). La tête de lecture est constituée d'un ensemble de fibres optiques distribuées en dix canaux, répartissant le spectre sur dix photomultiplicateurs. Ceux-ci sont connectés à un système d'acquisition des données couplé à un ordinateur. Ce dispositif fournit l'information désirée en un seul point de l'espace et du temps à chaque décharge du Tokamak. Pour tirer un meilleur parti de ces décharges, il faudrait obtenir simultanément toutes les informations relatives à une dizaine de points du plasma convenablement répartis dans l'espace. Nous avons donc tout d'abord simplifié la méthode de mesure et l'appareil mesurant T_e localement. On utilise ensuite simultanément plusieurs appareils de ce type pour obtenir des profils $T_e(r)$ en un seul tir du laser (Fig. 1).

2. Mesure de température par la méthode des deux canaux [1]. — Soit $S(T_e, \lambda)$ le spectre des photons diffusés à 90° tenant compte des corrections relativistes (Fig. 2) pour différentes valeurs de T_e [2]. On détermine

(*) Communication présentée au Congrès National de Physique des Plasmas, Paris, 6-10 décembre 1976.

FIG. 2. — Le spectre diffusé. Répartition spectrale des photons diffusés en fonction de la température : choix des bandes spectrales. a) Basses températures. b) Hautes températures.

[The scattered spectrum. Spectra of scattered light for different values of the temperature T_e : selection of spectral channels. a) Low temperature range. b) High temperature range.]

deux bandes spectrales notées I et II telles que le rapport R des intensités détectées dans I et II soit une fonction sensible de la température T_e . Le choix des deux bandes spectrales dérive des considérations suivantes :

La partie du spectre étudié a été choisie dans l'aile $\lambda < \lambda_{\text{laser}}$ car la sensibilité spectrale des photocathodes diminue rapidement aux longueurs d'ondes $\lambda > \lambda_{\text{laser}}$. Soit I_1 et I_2 les intensités détectées dans I et II, leur rapport $R(T_e)$ sera une fonction sensible de T_e si :

$$\frac{\Delta I_1}{\Delta T_e} \cdot \frac{\Delta I_2}{\Delta T_e} < 0.$$

Par conséquent la bande spectrale séparant les deux canaux correspond au domaine d'intersection des courbes $S(T_e, \lambda)$ pour une gamme de températures donnée (Fig. 2a, 2b).

L'appareil devra en outre rejeter les deux principales sources de rayonnement parasite : la raie H_α (656,3 nm)

émise par le plasma et la raie laser (694,3 nm) diffusée par les fenêtres et les parois de la chambre à vide. Pour les températures mesurées ($T_e > 0,3$ keV), on remarquera que la raie H_α peut se situer entre les deux canaux (Fig. 2a, 2b).

Aux basses températures, le spectre diffusé se resserre (Fig. 2a), la longueur d'onde de coupure basse du canal I doit être choisie pour éviter un niveau trop important de lumière émise par le plasma.

Compte tenu de ces considérations, nous avons défini deux choix de bandes spectrales I et II correspondant à deux gammes de températures :

1° Basses températures : $0,3 \text{ keV} < T_e < 1,4 \text{ keV}$.

Canal I $600 < \lambda \text{ (nm)} < 650$

Canal II $662 < \lambda \text{ (nm)} < 680$ (Fig. 2a).

2° Hautes températures : $1,4 \text{ keV} < T_e < 6 \text{ keV}$.

Canal I $530 < \lambda \text{ (nm)} < 620$

Canal II $662 < \lambda \text{ (nm)} < 680$ (Fig. 2b).

3. Caractéristiques du spectromètre à deux canaux : (Fig. 3). — L'image du faisceau laser est formée sur

Guide optique à fibres

FIG. 3. — Principe du spectromètre. L'extrémité du guide de lumière tient lieu de fente d'entrée. Le spectre est formé sur le masque sélecteur. Les lentilles de champ forment l'image du réseau sur les photomultiplicateurs.

[The spectrum analyzer. The entrance slit is at the end of the fiber-optic bundle. The spectrum is focused on the light mask. Field lenses image the grating on the photocathodes of the photomultipliers.]

l'extrémité d'un guide de lumière à fibres optiques de section $10 \times 2 \text{ mm}^2$, l'autre extrémité constitue la fente d'entrée d'un spectromètre. La longueur du guide est 1,50 m, sa transmission est de l'ordre de 50 % dans le visible. Le guide de lumière éclaire par l'intermédiaire d'un miroir plan un réseau holographique concave (Jobin-Yvon) de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, de 1 200 traits par millimètre, de 20 cm de rayon de courbure (Fig. 3). Le réseau forme le spectre sur un masque interchangeable à deux ouvertures, séparant les bandes I et II. Des lentilles de champ placées derrière ces ouvertures forment l'image du réseau sur les détecteurs. Ceux-ci sont

des photomultiplicateurs 56 TVP (Radiotechnique Compelec) à réponse spectrale « S 20 » sélectionnés pour un rendement quantique élevé : $\rho > 3,5 \%$ à 700 nm. Leur choix est motivé par la valeur élevée du gain : $G = 10^8$ à 2 100 V, une bonne stabilité au cours du temps et une grande surface utile des photocathodes (15 cm^2). Le choix du réseau holographique est dû en partie au faible taux de lumière parasite qu'il induit (très inférieur à celui observé avec les réseaux gravés), ce qui permet un taux de réjection de la lumière parasite à λ Laser supérieur à 2 000. Enfin, les masques sélecteurs sont interchangeables par glissement dans l'appareil, ce qui rend le changement de gamme de température simple et rapide.

Le spectromètre a une étendue de $0,7 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ sr}$ avec une transmission de 5 % (incluant les guides optiques). Son intérêt réside dans sa simplicité, son encombrement réduit (Fig. 3), sa souplesse d'utilisation. Ces raisons nous ont amenés à la réalisation d'une dizaine d'appareils dans le but de mesurer simultanément la température en dix points différents du profil de température électronique.

4. Etalonnage et contrôle du spectromètre. — On éclaire l'entrée du guide de lumière avec une source monochromatique (Fig. 4). On forme l'image de la

FIG. 4. — *Etalonnage des spectromètres.* Une source monochromatique éclaire l'entrée du guide de lumière relié au spectromètre. On mesure le courant détecté sur les photomultiplicateurs par unité de puissance incidente (diode) en fonction de la longueur d'onde (voir Fig. 5).

[Calibration of the spectrum analyzer. The fiber-optic bundle is illuminated by monochromatic light. The detected intensity per unit of incident power is measured as a function of the wavelength.]

fente de sortie du monochromateur sur une extrémité du guide de lumière après réflexion sur une lame de verre. La partie transmise est détectée par une diode qui mesure la puissance lumineuse incidente (référence). On fait varier la longueur d'onde λ de la source et on mesure le courant anodique des photomultiplicateurs $A(\lambda)$ par unité de puissance incidente sur le guide. La sensibilité spectrale de l'appareil $A(\lambda)$ est donnée en figure 5. On calcule l'intensité détectée dans chaque canal en faisant le produit de convolution du spectre diffusé $S(T_e, \lambda)$ (Fig. 2) par la sensibilité spectrale $A(\lambda)$ (Fig. 5) :

$$I_{1,2} = \int_{1,2} S(T_e, \lambda) \cdot A_{1,2}(\lambda) d\lambda.$$

(a)

(b)

FIG. 5. — *Sensibilité $A(\lambda)$ des spectromètres.* 100 unités = $500 \mu\text{A}/\mu\text{W}$. Courant anodique du photomultiplicateur par unité de puissance lumineuse monochromatique à l'entrée du guide de lumière. a) Basses températures ; b) Hautes températures.

[Spectrum analyzer sensitivity $A(\lambda)$. Full scale : $500 \mu\text{A}/\mu\text{W}$. Ratio of detected intensity on incident monochromatic power ($\mu\text{A}/\mu\text{W}$). a) Low temperature range. b) High temperature range.]

Le rapport $R(T_e) = I_1(T_e)/I_2(T_e)$ permet la détermination de T_e (Fig. 6). La sensibilité de la mesure est donnée par la valeur de dR/dT_e .

FIG. 6. — *Rapport des intensités détectées : I_1/I_2 .* La sensibilité dR/dT_e détermine l'étendue de la gamme des températures mesurées.

[Ratio of detected intensities I_1/I_2 . The range of temperatures is roughly determined from the value of the sensitivity dR/dT_e .]

D'une manière analogue, on calcule le rapport R_0 correspondant au spectre connu $E_0(\lambda)$ d'une lampe étalon à ruban de tungstène. La valeur expérimentale R_0 (exp) relevée avant chaque série de mesures sur Tokamak permet de corriger ces dernières pour d'éventuelles dérives du gain des photomultiplicateurs ou des amplificateurs.

5. **Chronologie et acquisition des données (Fig. 7).** — Ce sujet a été traité en détail par ailleurs : [3, 4]. L'acqui-

FIG. 7. — Acquisition des données.
[Data acquisition system.]

sition utilisée est la même que celle qui a été conçue pour l'appareil classique à dix canaux. Nous n'en donnerons qu'un simple schéma de principe (Fig. 7). L'acquisition est ouverte durant 130 ns pendant lesquelles on intègre la lumière laser diffusée (pulsée) et la lumière parasite émise par le plasma (continue) : figure 7, position a. Dix microsecondes plus tard, on intègre seulement la lumière parasite du plasma dans une nouvelle porte de 130 ns pour la soustraire : figure 7, position b. A chaque tir laser, on utilise donc deux mémoires par détecteur soit quatre par spectromètre. Après multiplexage, ces informations sont converties en mots de 12 bits (conversion analogique/digitale) et mémorisées pour être prises en compte par l'ordinateur qui calcule $T_e(r)$. Un opérateur peut également lire directement les valeurs mesurées (affichage digital et imprimante) pour contrôler le bon fonctionnement de la chaîne. Les mesures de $T_e(r)$ sont obtenues immédiatement après chaque décharge.

6. **Profils de $T_e(r)$, résultats obtenus sur T. F. R. (Fig. 8).** — A titre d'exemple on donne un profil en cinq points réalisé avec quatre spectromètres à deux canaux mesurant T_e aux rayons : 4 cm, 7 cm, 10 cm et 13 cm, et le spectromètre multicanal classique au rayon : 0 cm. Les deux premiers appareils ($r = 4$ et 7 cm) sont équipés du masque : *Hautes températures*, les deux autres ($r = 10$ et 13 cm) du masque : *Basses températures*. Les barres d'erreurs sont calculées à partir de la statistique des photons détectés (typiquement 70 à 400 photoélectrons), qui est la cause princi-

FIG. 8. — Un profil $T_e(r)$ type en un seul tir laser.
[Typical $T_e(r)$ profile from a single laser shot.]

pale de l'incertitude de mesure. L'erreur typique obtenue est de l'ordre de 10 %, comme pour l'appareil multicanal classique.

Cette erreur a été comparée à la dispersion des points expérimentaux obtenus par accumulation des résultats d'une soixantaine de décharges Tokamak (Fig. 9). La dispersion des points, outre l'erreur due à la statistique

FIG. 9. — Accumulation des résultats pour une série de décharges à 200 kA. La dispersion des points inclut : l'erreur statistique des photons détectés (barres d'erreurs) ; les défauts de reproductibilité du plasma.

[Compilation of about sixty T_e profiles for a succession of 200 kA Tokamak shots. The observed dispersion includes : Photon statistics (error bars), plasma parameter variations from shot to shot.]

des photons (barres d'erreurs), fait intervenir des défauts de reproductibilité du plasma d'une décharge à l'autre.

7. Conclusion. — Les spectromètres à deux canaux utilisés sur T. F. R. ont fait preuve d'une bonne fiabilité et permettent une mesure de T_e aussi précise que le système multicanal classique. On prévoit d'en multiplier le nombre (de 4 à 8) et d'en améliorer l'étendue et la transmission (nouveau réseau) dans le but d'explorer des régions de densité plus faible (à précision égale) ou d'améliorer la précision des mesures (précision dépendant essentiellement de la statistique des photons détectés). D'autre part, un appareil de ce type pour la

mesure des températures plus basses : 20 à 300 eV est à l'étude (étude de la phase d'initialisation de la décharge, et T_e au bord du plasma).

Les profils de T_e obtenus à l'aide de plusieurs tirs (ancienne méthode) sont différents de ceux obtenus en un seul tir. En effet, des études récentes ont montré que les grandeurs macroscopiques stationnaires qui caractérisent le plasma sont soumises à des phénomènes de relaxation, or les profils obtenus à raison d'un point par tir (ancienne méthode) ne peuvent rendre compte de ces phénomènes. Les profils de T_e en un seul tir par contre permettent une analyse fine des phénomènes de relaxation qui doivent désormais être pris en compte dans le calcul des bilans énergétiques.

Bibliographie

- [1] LASALLE, J. et PLATZ, P., *Opt. Commun.* **17** (1976) 3, 325.
 - [2] MATTIOLI, M., PAPOULAR, R., *Plasma Phys.* **17** (1974) 165.
 - [3] CHARET, M., DUMAY, L., DE MICHELIS, C., PLATZ, P., EUR-CEA FC 759 (1975).
 - [4] BOURON, A., CHARET, M., MIOT, J. P., TOSOLINI, Y., DPh. PFC/Note Technique n° 1148.
-