Étalonnage en luminance spectrale énergétique dans l'ultraviolet à l'aide d'un plasma d'hydrogène

P. Fieffe-Prevost

► To cite this version:

P. Fieffe-Prevost. Étalonnage en luminance spectrale énergétique dans l'ultraviolet à l'aide d'un plasma d'hydrogène. *Revue de Physique Appliquée*, 1977, 12 (9), pp.1243-1246. 10.1051/rphysap:019770012090124300 . jpa-00244305

HAL Id: jpa-00244305

<https://hal.science/jpa-00244305>

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
 6.20 — 78.40 — 52.00

ÉTALONNAGE EN LUMINANCE SPECTRALE ÉNERGÉTIQUE DANS L'ULTRAVIOLET A L'AIDE D'UN PLASMA D'HYDROGÈNE (*)

P. FIEFFE-PREVOST

Institut National de Métrologie, C. N. A. M., 292, rue Saint-Martin, 75141 Paris Cedex 03, France

(Reçu le 30 décembre 1976, accepté le 23 mai 1977)

Résumé. — Nous décrivons les mesures de luminance spectrale énergétique entre 200 et 360 nm à l'aide d'un arc à hydrogène. Nous étudions particulièrement les diagnostics spectroscopiques qui permettent la détermination des paramètres du plasma. A partir de l'analyse des erreurs systématiques, nous déduisons une incertitude totale de $\pm 8 \%$ sur un étalonnage à 200 nm. Enfin, nous donnons une brève description des sources de transfert.

Abstract. — We describe spectral radiance measurements between 200 and 360 nm with a hydrogen arc as a standard source. We give special attention to the diagnostics that allow the determination of plasma parameters. From error analysis, we deduce an overall uncertainty of $\pm 8 \%$ at 200 nm on the calibration. We then review the principal transfer standards.

1. Introduction. — Les besoins de mesure d'énergie rayonnante dans le domaine ultraviolet se sont intensifiés depuis quelques années. Cela est dû, d'une part, à l'amélioration des techniques (techniques du vide, détection, source), d'autre part, au développement des recherches dans le domaine de la physique spatiale, de la physique des plasmas, de la biologie et des sciences de l'environnement. La méthode la plus directe pour mesurer un flux lumineux en unités énergétiques est de le comparer à une source étalon, c'est-à-dire à une source dont l'énergie rayonnée est calculable. Ainsi, on utilise dans le domaine spectral visible comme étalon le corps noir dont la luminance spectrale énergétique est prédite par la loi de Planck. Le maximum d'émission d'un corps noir est donné par la loi de Wien :

$$\lambda_{\max} \times T = 2\,885 \mu\text{mK} . \quad (1)$$

Ainsi, un corps noir ayant une température de 3 000 K (le maximum réalisable), possède son maximum d'émission à $\lambda = 1\,000 \text{ nm}$. A 200 nm la luminance spectrale est de 7×10^4 fois plus faible. Le signal devient alors de l'ordre de grandeur de la lumière diffusée ce qui entraîne que le corps noir n'est pas adapté pour la plupart des applications comme source étalon dans l'ultraviolet. Les nombreuses recherches effectuées principalement dans les laboratoires de métrologie ont permis la mise au point de trois types de sources étalons pour le domaine ultraviolet :

- 1° la méthode des raies saturées [1],
- 2° le rayonnement synchrotron [2],
- 3° l'arc hydrogène [3, 4] dont nous décrivons dans

cet article les derniers développements à l'Institut National de Métrologie (I. N. M.).

2. Principe de l'expérience. — Le plasma d'hydrogène est créé dans un arc stabilisé. Cette source est utilisée depuis de nombreuses années pour les recherches de spectroscopie [5]. Ses principaux avantages sont, d'une part, sa stabilité et sa reproductibilité, d'autre part, la symétrie cylindrique qui permet d'observer le plasma axialement ou radialement. L'hydrogène a été choisi car ses probabilités de transition et ses facteurs de Gaunt sont exactement connus et permettent le calcul du rayonnement émis par le plasma. On utilise comme source étalon le fond continu émis par une colonne de plasma homogène entre 160 et 360 nm. Dans cet intervalle spectral, le plasma est optiquement mince. On a donc :

$$L(\lambda) = \varepsilon_{\lambda}(N_e, T) \times l \quad (2)$$

où :

$L(\lambda)$ est la luminance spectrale énergétique.

$\varepsilon_{\lambda}(N_e, T)$ est le coefficient d'émission du plasma.
 l est sa longueur.

N_e et T sont respectivement la densité électronique et la température.

Le calcul du coefficient d'émission [6] tient compte des phénomènes radiatifs suivants :

(a) $\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{H(P)} + h\nu$	libre-lié	} 93 %
(b) $\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{e}^- + h\nu$	libre-libre	
(c) $\text{H(P)} + \text{e}^- \rightarrow \text{H(q)} + \text{e}^- + h\nu$	libre-libre	} 5 %
(d) $\text{H(P)} + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^- + h\nu$	libre-lié	
(e) $\text{H(P)} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H(q)} + \text{H}^+ + h\nu$	libre-libre	} 2 %
(f) $\text{H(P)} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2^+ + h\nu$	libre-lié	

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

Les importances relatives des différents phénomènes sont calculées pour un plasma ayant une température de 15 000 K entre 160 et 360 nm. Les incertitudes liées au calcul du coefficient d'émission sont estimées à $\pm 2 \%$. Des vérifications expérimentales ont été faites dans le domaine visible et dans le domaine ultra-violet [3, 4]. Aucun écart systématique n'a pu être décelé.

3. Montage expérimental (Fig. 1). — L'arc a un diamètre de 3 mm et une longueur de 32 mm. On utilise un courant de 50 A stabilisé à 10^{-4} et on opère à pres-

FIG. 1. — Montage expérimental. [Experimental set-up.]

sion atmosphérique. Le plasma est observé axialement à ses deux extrémités. A l'une des extrémités, on effectue les mesures dans l'ultraviolet, à l'autre extrémité, on mesure la température et la densité électronique. On a vérifié préalablement que le plasma était symétrique. On focalise le centre du plasma sur la fente d'entrée du monochromateur. L'ouverture des faisceaux est de F/200, afin que la colonne de plasma visée soit la plus homogène possible. Les conditions optiques sont résumées dans le tableau I. Une expérience d'étalon-

TABLEAU I
Conditions expérimentales
[Experimental conditions]

	Visible	UV
Focale	M ₁	M ₂
Miroir	600 mm	600 mm
Grandissement	1	$\frac{1}{3}$
Résolution spatiale	0,1 mm	0,3 mm
Monochromateur	Czerny Turner focale : 0,6 m	Incidence normale focale : 1 m
Résolution	0,5 nm	0,3 nm
Détecteur	Photomultiplicateur IP 28	Photomultiplicateur Solar blind Be.0

nage consiste donc à mesurer simultanément les paramètres N_e et T dans le domaine visible et le signal $S_{UV}(\lambda)$ du plasma dans le domaine UV. Puis, on compare à travers le même dispositif optique $S_{UV}(\lambda)$ au signal de la source à étalonner, soit $S(\lambda)$. La luminance spectrale de la source est donc :

$$L(\lambda) = \varepsilon_\lambda(N_e, T) \times l \times \frac{S(\lambda)}{S_{UV}(\lambda)}. \tag{3}$$

La figure 2 résume le processus. On déduit N_e et T à l'aide de diagnostics spectroscopiques. Pour les

FIG. 2. — Procédure d'étalonnage. [Calibration procedure.]

mesures absolues dans le domaine spectral visible, on utilise comme référence une lampe à ruban de tungstène étalonnée en luminance spectrale à partir d'un corps noir.

4. Diagnostics spectroscopiques et modèle. — 4.1 ETAT D'ÉQUILIBRE DU PLASMA. — Du fait des densités élevées, le plasma est dominé par les processus collisionnels microréversibles qui vont imposer un état proche de l'équilibre thermodynamique local complet (ETLC). On a montré cependant [7] que deux phénomènes liés au niveau fondamental de l'atome peuvent perturber cet équilibre :

- la diffusion des neutres vers le centre de la décharge. Cette diffusion du fondamental est contrôlée par le phénomène d'échange de charge résonnant ;
- la non-microréversibilité des collisions entre les électrons et le fondamental du fait de l'intervalle d'énergie important (proche de l'énergie d'ionisation) qui sépare les premiers états excités du fondamental. Un modèle de plasma réaliste doit donc tenir compte de ces deux effets. Si on suppose que les états excités sont en équilibre avec les électrons (hypothèse de l'ETLP : équilibre thermodynamique local partiel), on peut alors écrire les équations suivantes :

$$N_e = N_i \quad \text{quasi-neutralité} \tag{4}$$

$$P = (N_e + N_i + N_0) kT \quad \text{loi de Dalton} \tag{5}$$

$$\nabla \cdot (N(1) \mathbf{V}(1)) = \left[\frac{\partial N(1)}{\partial t} \right]_{\text{coll.}} \quad \text{équation de conservation du fondamental} \tag{6}$$

$$N_0 = N(1) + \sum_i N(i) \tag{7}$$

$$\frac{N_e N_i}{N(j)} = \frac{2}{g_j} \left[\frac{2 \pi m_e kT}{h^2} \right]^{3/2} \times \exp - \frac{(E_i - E(j) - \Delta E_i)}{kT}$$

loi de Saha modifiée (8)

N_i , N_0 , $N(j)$ sont, respectivement, les densités des protons, des neutres et du niveau j .

E_i , $E(j)$ et ΔE_i sont, respectivement, l'énergie d'ionisation, l'énergie du niveau j et l'abaissement du potentiel d'ionisation.

L'équation (6) peut s'exprimer uniquement en fonction de la température et des densités [7]. On a donc 5 + j inconnues (N_e , N_i , N_0 , $N(1)$, $N(j)$, T) pour 4 + j équations. Il suffit par conséquent d'un diagnostic spectroscopique pour déterminer le système.

4.2 DIAGNOSTICS SPECTROSCOPIQUES DANS LE DOMAINE VISIBLE. — 4.2.1 Mesure de la luminance d'une raie

$$\varepsilon_{jk} = \frac{hc}{4 \pi \lambda} A_{jk} N(j). \quad (9)$$

La parfaite connaissance des probabilités de transition A_{jk} de l'hydrogène permet de déduire $N(j)$ avec, comme seule erreur, l'erreur sur la mesure. Seules les raies H_β ($j = 4$) et H_γ ($j = 5$) peuvent être utilisées. H_α ($j = 3$) est autoabsorbée et les raies issues des transitions supérieures sont noyées dans le fond continu du fait de l'abaissement du potentiel d'ionisation.

4.2.2 Mesure de la luminance spectrale du fond continu. — On mesure le fond continu entre 500 et 600 nm. Le système (2), (4), (5), (6), (7) et (8) permet de déterminer les paramètres du plasma par itérations. Il faut tenir compte dans le calcul du coefficient d'émission du fond continu de l'importance des ailes des raies.

4.2.3 Mesure du profil des raies. — La mesure des élargissements Stark des raies H_β et H_γ permet de déduire directement la densité électronique à partir des travaux récents de Wiese, Kelleher et Paquette [8].

4.2.4 Mesure du rapport de l'intensité du fond continu sur l'intensité d'une raie. — Le rapport $\varepsilon_\lambda/\varepsilon_{jk}$ est proportionnel à $N_e N_i/N(j)$ à condition que les processus (c) et (d) du paragraphe 2 soient négligeables. Cette condition est assez bien réalisée en utilisant le

TABLEAU II
*Résultats expérimentaux
et écarts types sur vingt expériences*
[Experimental results
and standard deviations for 20 runs]

	H_β	H_γ	C_{on}	ΔH_β	ΔH_γ
N_e	1,14	1,10	1,10	1,14	1,02
$\times 10^{-17} \text{ cm}^{-3}$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$	$\pm 0,04$
$T_e(K)$	14 700	14 570	14 600	14 700	14 300

fond continu émis dans le proche UV (300-350 nm). On obtient directement la température électronique du plasma.

4.2.5 Résultats. — Les moyennes des résultats expérimentaux sont reportées dans le tableau II. On constate un bon accord entre toutes les mesures, excepté la mesure du profil de H_γ . La cause de cette différence n'est pas connue.

5. Analyse des principales erreurs systématiques liées à l'étalonnage d'une source. — La luminance spectrale énergétique d'une source est calculée à l'aide de la formule (3). La procédure (Fig. 2) consiste à opérer un transfert d'information du domaine visible au domaine UV. Nous devons donc distinguer deux types d'erreurs :

— les erreurs directes qui agissent directement sur la grandeur à mesurer (par exemple, l'erreur systématique sur la luminance spectrale de la lampe à ruban de tungstène) ;

— les erreurs de transfert qui interviennent dans le passage de la luminance visible (L_{vis}) à la luminance UV (L_{uv}) (par exemple, la longueur du plasma).

A l'inverse des erreurs directes, certaines erreurs de transfert se compensent partiellement. Par exemple, une erreur de 5 % sur la longueur du plasma entraîne une erreur de 1 % sur L_{uv} . Les principales erreurs systématiques sont mentionnées dans le tableau III. En combinant ces erreurs quadratiquement, on arrive à une incertitude totale à 200 nm :

$$\frac{\Delta L_{uv}}{L_{uv}} = \pm 8 \ \%.$$

TABLEAU III
Les erreurs systématiques
[Systematic errors]

Grandeurs	Type d'erreurs	Erreurs	$\frac{\Delta L_\lambda}{L_\lambda}$ $\lambda = 200 \text{ nm}$
L_{ref}	directe	$\pm 2 \ \%$	$\pm 2,5 \ \%$
I	transfert	$\pm 5 \ \%$	$\pm 1 \ \%$
Inhomogénéité radiale	transfert	$\pm 5 \ \%$	$\pm 1 \ \%$
N_e	transfert	$\pm 3 \ \%$	$\pm 7 \ \%$
Absorption	transfert	10^{-3}	10^{-3}
Calcul ε_λ	transfert	—	$\pm 2 \ \%$
Non-linéarité	directe	—	$< 0,1 \ \%$
Diffraction	directe	—	$\pm 1,5 \ \%$

6. Les étalons de transfert. — Les sources de transfert utilisées actuellement sont des lampes à deutérium qui sont commercialisées par la plupart des fabricants.

Ces lampes qui fonctionnent sous un courant continu de 300 mA et sous une tension de 100 V fournissent un spectre continu entre 165 et 360 nm. L'avantage de ces sources est leur faible coût et leur maniabilité. L'inconvénient majeur est le vieillissement qui varie d'une lampe à l'autre et qui nécessite des comparaisons fréquentes par rapport à l'étalon primaire. La figure 3 montre un exemple d'une courbe d'étalonnage. Ces

FIG. 3. — Exemple d'étalonnage d'une lampe à deutérium.
 $L_{300} = 9,46 \mu\text{W} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{str.} \pm 5 \%$.

[Calibration of a D2 lamp.

$$L_{300} = 9.46 \mu\text{W mm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ st}^{-1} \pm 5 \%.]$$

résultats ont été obtenus sans utiliser le système de pompage ce qui limite la longueur d'onde à 200 nm. Cette courbe n'est évidemment valable que pour des utilisations de la source aussi proches que possible de

l'étalonnage par le laboratoire primaire. On étudie actuellement au National Bureau of Standards (N. B. S.) et à l'I. N. M. une nouvelle source de transfert constituée par un arc à argon qui permet de s'affranchir du vieillissement et d'étendre le domaine spectral.

7. Conclusion. — Afin d'améliorer et d'uniformiser les techniques d'étalonnage dans le domaine ultra-violet, l'Institut National de Métrologie poursuit un double objectif :

— Le premier est de rendre l'étalonnage crédible. Pour cela, nous organisons des comparaisons avec tous les laboratoires intéressés. Actuellement, une telle comparaison est en cours avec le National Physical Laboratory (N. P. L.), en Grande-Bretagne. Les résultats seront prochainement publiés. Nous avons également entrepris une expérience de comparaison entre le rayonnement synchrotron fourni par l'anneau de collision d'Orsay (A. C. O. LURE) et l'arc hydrogène. Enfin, nous poursuivons une collaboration scientifique très étroite avec le National Bureau of Standards.

— Le deuxième objectif est de minimiser la perte de précision d'un étalonnage entre le laboratoire primaire et l'utilisateur. Pour cela, il faut que la source de transfert soit la mieux adaptée possible aux besoins de l'utilisateur, que le laboratoire primaire fournisse un mode d'emploi détaillé et, enfin, assure un contrôle régulier.

Remerciements. — Ce travail a été incité par la Direction des Recherches et Moyens d'Essais (D. R. M. E.).

Bibliographie

- [1] BOLDT, G., *Space Sci. Rev.* **11** (1970) 728.
- [2] GROUPE LURE *et al.*, L'utilisation du rayonnement synchrotron en France, *Ann. Phys.* **9** (1975) 1.
- [3] OTT, W. R., FIEFFE-PREVOST, P., WIESE, W. L., *Appl. Opt.* **12** (1973) 1618.
- [4] OTT, W. R., BEHRINGER, K., GIERES G., *Appl. Opt.* **14** (1975) 2121.
- [5] OLSEN, H. N., *J. Quant. Spect. Radiat. Trans.* **3** (1963) 305.
- [6] ROBERTS, J. R., VOIGT, P. A., *J. Res. Nat. Bur. Stand.* **75A** (1971) 291.
- [7] FIEFFE-PREVOST, P., *Phys. of ionized Gases*, Dubrovnik, SPIG (76), (J. Stefan Institute, Ljubljana), 1976.
- [8] WIESE, W. L., KELLEHER, D. E., PAQUETTE, D. R., *Phys. Rev. A* **6** (1972) 1132.