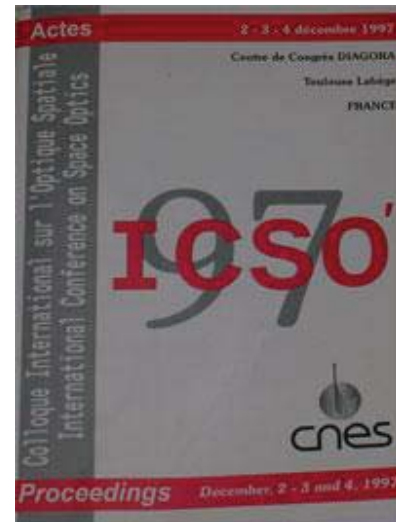


International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Réseaux holographiques à 6000 t/mm pour l'expérience fuse de spectroscopie à haute résolution dans l'ultraviolet lointain

*Robert Grange, Véronique Dauer, Michel Saisse,
Jean Flamand, et al.*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 1057020 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326626

RESEAUX HOLOGRAPHIQUES A 6000 T/MM POUR L'EXPERIENCE FUSE DE SPECTROSCOPIE A HAUTE RESOLUTION DANS L'ULTRAVIOLET LOINTAIN

Robert Grange, Véronique Dauer, Michel Saïsse, Michel Nevière, Jean Flamand, Francis Bonnemason

Laboratoire d'Astronomie Spatiale (L.A.S.), B.P. 8, 13376 MARSEILLE cedex 12
Laboratoire d'Optique Electromagnétique (L.O.E.), (URA CNRS 843), Domaine universitaire de Saint-Jérôme, 13397 MARSEILLE cedex 20
Instrument S.A. division Jobin-Yvon, 16-18, rue du canal, 91165 LONGJUMEAU

RESUME - Dans le cadre de l'expérience de spectroscopie ultraviolette FUSE de la NASA, le Laboratoire d'Astronomie Spatiale a eu en charge l'étude et la fourniture des six réseaux de vol du spectrographe. Cette expérience est dédiée à l'étude du domaine 900-1200 Å avec une surface collectrice équivalente de 100 cm² et un pouvoir de résolution spectrale de 30 000. Ces exigences ont conduit à réaliser des réseaux de dimensions imposantes conjugués à une densité de traits extrême (6000 traits/mm). Les aberrations optiques, facteur limitant la résolution, ont été corrigées par une nouvelle solution d'enregistrement holographique proposée par le LAS. Nous décrivons les caractéristiques et les performances (résolution, efficacité, lumière diffuse) de ces réseaux holographiques réalisés par la société Jobin-Yvon. Une amélioration de l'efficacité est encore possible en modifiant le profil quasi sinusoïdal de ces réseaux par usinage ionique (effet de blaze).

ABSTRACT - In the context of the NASA FUSE mission, LAS was in charge of designing and testing the six flight gratings. The FUSE experiment is dedicated to the spectroscopic study of the 900-1200Å range with a 100 cm² equivalent surface and a resolution power of 30 000. These constraints yield to especially challenging gratings with a very high groove density (6000g/mm). The aberrations have been corrected using a new recording geometry proposed by LAS. We describe the optical performances (resolution, efficiency, stray light) of the gratings fabricated by Jobin-Yvon company. Efficiency improvement is still possible using ion-etching technique to modify the groove profile.

1 - INTRODUCTION

L'expérience FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) qui doit être lancée à l'automne 98 par la NASA, a pour mission d'étudier la bande UV 900-1200 Å avec une résolution spectrale de 30 000 en vue de répondre à un certain nombre de questions fondamentales liées à l'origine de l'univers. Cette fenêtre spectrale est particulièrement riche en raies provenant du milieu interstellaire à partir duquel les étoiles et les planètes se forment. Cependant ce domaine de longueurs d'onde reste largement inexploré en raison principalement des difficultés techniques liées à la faible réflectivité des matériaux et à la modeste efficacité quantique des détecteurs. FUSE se devait d'étudier cette bande spectrale avec une sensibilité bien supérieure à Copernicus qui a été dans les années 70 la dernière mission d'importance à obtenir des spectres d'étoiles proches et brillantes.

Bien que des progrès sensibles aient été réalisés dans l'efficacité des revêtements des surfaces, l'étude de la chambre spectroscopique s'est rapidement orientée vers un montage de Rowland qui focalise et disperse le spectre avec un seul réseau concave. Pour un tel spectrographe embarqué dont

la dimension est nécessairement limitée, la résolution et le pouvoir collecteur demandés conduisent à pousser à la fois la densité de traits et l'ouverture numérique du réseau aux limites des technologies actuelles. Le problème de la correction des aberrations se pose alors de façon aiguë et deux approches peuvent être envisagées. L'approche mécanique qui consiste à graver des traits droits et parallèles sur des surfaces déformées ou l'approche holographique qui permet d'introduire des aberrations à l'enregistrement.

Dans cet article, nous présentons les nouvelles solutions holographiques étudiées pour FUSE, solutions qui apportent une grande simplification du support et permettent d'envisager une optique très ouverte (F/4.5). La faisabilité de ce type d'enregistrement mettant en œuvre un nouveau laser UV et une résine photosensible spécifique a été démontrée grâce à une action R&T du CNES dès 1993. Après avoir présenté les solutions holographiques novatrices de FUSE, nous exposerons les performances des réseaux de vol en terme de résolution, d'efficacité et de lumière diffuse.

2 - SCHEMA OPTIQUE DE L'INSTRUMENT FUSE ET CORRECTION HOLOGRAPHIQUE

2.1 - Schéma optique de l'instrument FUSE

Le schéma de principe de l'expérience FUSE est présenté Fig. 1. Afin de maximiser le pouvoir collecteur de l'instrument et de partager le domaine spectral, quatre chambres spectroscopiques identiques produisent leur spectres respectifs sur deux détecteurs à comptage de photons dont l'amplification est réalisée par des galettes de micro-canaux et la lecture par ligne à retard. Les quatre fentes d'entrée du spectrographe sont alimentées par quatre miroirs paraboliques hors axe de 390 par 350 mm. Sur chaque détecteur les cercles de Rowland sont décalés de 5mm pour éviter la confusion des spectres.

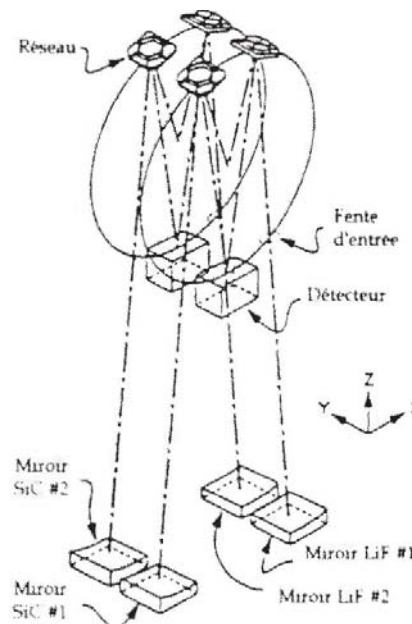


Fig. 1 : Schéma de principe de l'expérience FUSE [Gree 95]

2.2 - Correction holographique

Dans son principe, les aberrations introduites à l'enregistrement de l'hologramme dans la résine photosensible permettent de compenser celles qui apparaissent à la lecture de l'hologramme, c'est-à-dire à l'utilisation du réseau. Depuis l'avènement du laser et les premiers enregistrements

d'onde d'utilisation. Cela nous a conduit à construire dans une des installations à vide du LAS un spectrographe prototype de même dimension (Fig. 4) que celui de vol pour lequel il fallait résoudre deux problèmes bien distincts.

Premièrement, la production de raies spectrales dont la largeur soit bien inférieure à l'écart de 0.03 \AA correspondant au pouvoir de résolution de 30 000. Nous avons convergé vers l'utilisation d'une lampe à circulation de gaz de type Damany sans fenêtre dont la particularité est de fonctionner à très basse pression (10^{-2} Torr), réduisant ainsi l'élargissement par effet collisionnel. Avec l'équipe du Grand Spectrographe de Meudon, nous avons mesuré avec cette source des élargissements typiques de $10 \mu\text{m}$ sur des raies de l'hydrogène moléculaire [Roñc 94] qui présente un peigne de raies très dense dans le domaine spectral de FUSE.

Deuxièmement, il nous fallait acquérir un détecteur dans l'UV lointain dont la résolution soit compatible avec les $20 \mu\text{m}$ de largeur à mi-hauteur de la réponse optique impulsionnelle. Des tests peu probants avec un photomultiplicateur équipé d'une fente de $10 \mu\text{m}$ nous avaient convaincus d'acquérir un détecteur bidimensionnel à comptage de photons. Grâce au soutien du CNES, nous nous sommes équipés d'un détecteur prototype développé pour FUSE par une équipe de Berkeley [Sieg 94]. Dans son principe, l'amplification du photo-électron par trois galettes de micro-canaux produit un nuage électronique dont les coordonnées du barycentre sont calculées par une ligne à retard pour l'axe X (sens du spectre) et par une répartition de charge pour l'axe Y. Le système de comptage en aval est capable de discerner l'arrivée de plusieurs milliers de photons par seconde. La largeur à mi-hauteur de l'élément de résolution de ces détecteurs à comptage de photons est de $20 \mu\text{m}$ pour l'axe X et de $35 \mu\text{m}$ pour l'axe Y. Les performances de notre détecteur prototype sont identiques à celui de vol ; il diffère cependant par un champ moitié ($65 \times 10 \text{ mm}^2$) et non courbe et par l'absence de photocathode qui permet sa manipulation à la pression atmosphérique.

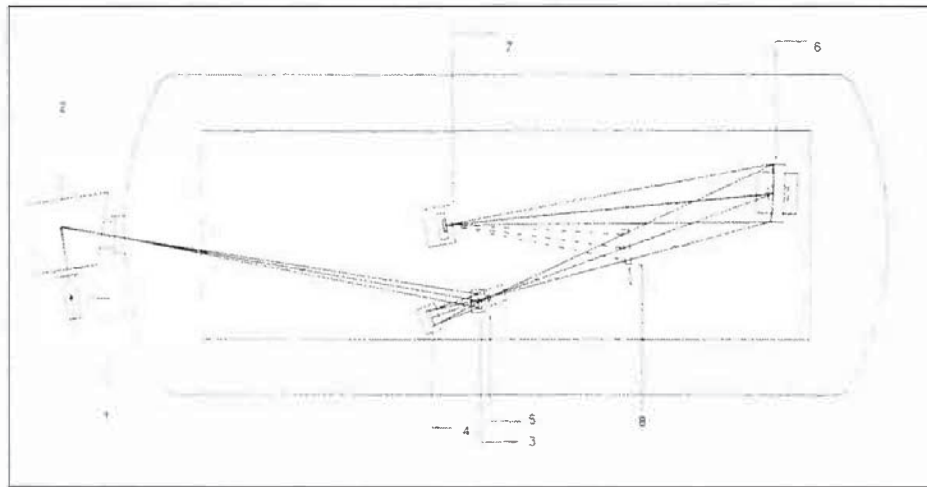


Fig. 4 : Montage utilisé pour la résolution et l'efficacité

- 1: lampe de type Damany 2: monochromateur 3: miroir plan avec un trou central
4: miroir elliptique sur l'axe 5: trou d'entrée 6: réseau sphérique
7: détecteur 8: miroir sphérique pour les mesures d'efficacité

Pour le canal le plus UV(SiC), les tests de résolution ont consisté à faire l'image d'un doublet de raies dont l'écartement de 31 m\AA permettait de vérifier directement le pouvoir de résolution. La Fig. 5 montre l'image d'un tel doublet : la courbure caractéristique des images est due au résidu de coma sagittale. Grâce à notre détecteur bidimensionnel, les images peuvent être redressées a posteriori. Dans notre cas, les images de la Fig. 6. sont obtenues après application d'une carte de distorsion de forme parabolique. La mesure de la largeur RMS de l'image se fait alors avec une meilleure

dérives thermiques de l'électronique qui était, dans notre montage, un des facteurs limitant la résolution.



Fig. 8 : Doublet obtenu avec la raie 1067 Å avant et après redressement

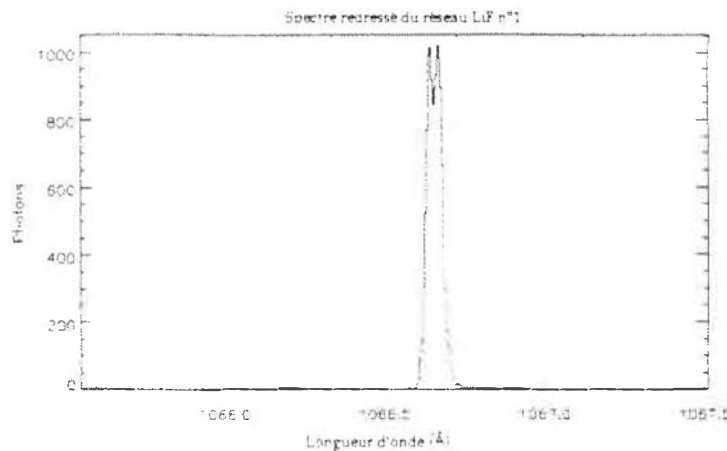


Fig. 9 : Résolution du doublet précédent

3.2 - Optimisation et mesure de l'efficacité des réseaux

Les réseaux holographiques, dont le profil est quasi-sinusoïdal, ne présentent pas la dissymétrie nécessaire pour concentrer le maximum de l'énergie diffractée dans un seul ordre à l'instar des réseaux "blazés". Cependant des calculs électromagnétiques rigoureux [Nevi 74], [Peti 80] montrent que l'on peut maximiser l'énergie diffractée dans l'ordre 1 sur tout un domaine de longueurs d'onde en jouant sur la profondeur de modulation. Pour chaque canal, une série de calculs faits avec le support du Laboratoire d'Optique Electromagnétique ont permis de choisir une telle profondeur de modulation. Pour le canal SiC, la simulation a été faite en supposant le profil sinusoïdal et le réseau recouvert de SiC-CVD. Elle a montré qu'une modulation de 300 Å était optimale (Fig. 10). Pour le canal LiF, on montre qu'une modulation de 350 Å optimise l'efficacité dans le domaine 980-1195 Å.

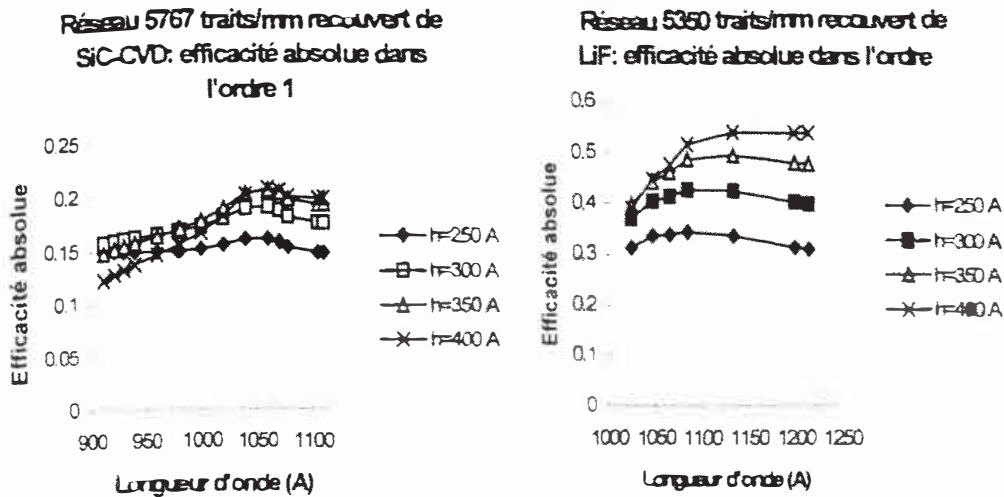


Fig. 10 : Simulations d'efficacité pour les réseaux de type SiC et LiF

Chaque réseau a été enregistré par Jobin-Yvon en tenant compte de l'optimisation de la profondeur de modulation puis a été recouvert de platine. Désirant mesurer l'efficacité moyennée sur toute la pupille de ces réseaux, nous avons utilisé le montage décrit pour le test de résolution en lui ajoutant un monochromateur pour sélectionner les longueurs d'onde et un miroir pour collecter le flux incident (Fig. 4). Notre détecteur à comptage de photons permet également une mesure de flux intégré sur une image relativement étalée pour s'affranchir des variations locales du gain. Dans notre montage, le flux incident est réfléchi par un miroir concave recouvert de platine dont nous avons mesuré préalablement la réflectivité dans tout le domaine. D'autre part, la réflectivité du traitement appliqué au réseau est connue par la mesure de ses échantillons témoins. Il est alors possible d'en déduire l'efficacité relative ainsi que l'efficacité absolue.

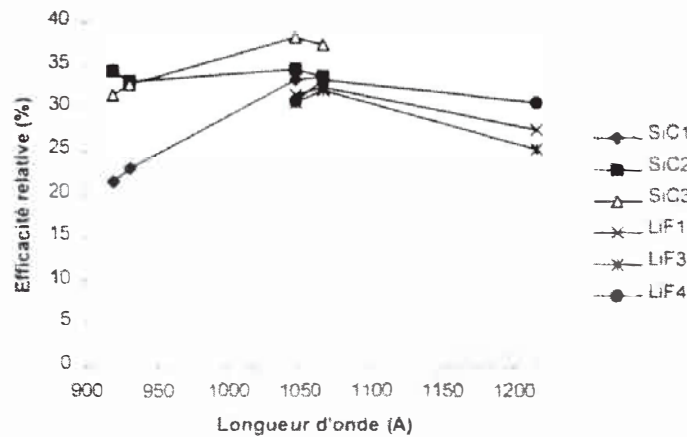


Fig. 11 : Mesures de l'efficacité des réseaux FUSE

Afin de vérifier à quelle modulation a été effectivement enregistré chaque réseau, nous avons mené à bien des simulations des mesures précédentes (Fig. 10). Pour les réseaux de type SiC, on voit par exemple que le réseau SiC1 présentait vraisemblablement une modulation trop forte qui explique sa faible réflectivité à 919 Å. Tenant compte de ces résultats, les deux réseaux suivants ont été enregistrés avec des modulations plus faibles et ont permis d'atteindre une efficacité de 38 % à 1048 Å proche de la valeur théorique (45 %). Il est à remarquer que des progrès sensibles ont ainsi été effectués depuis le réseau prototype qui atteignait seulement 22% à la même longueur d'onde. Pour les réseaux de type LiF, la Fig. 12 montre que la modulation des trois réseaux était proche de la valeur optimale. Cependant, par rapport au canal SiC, l'écart entre les mesures et les valeurs théoriques est globalement plus grand.

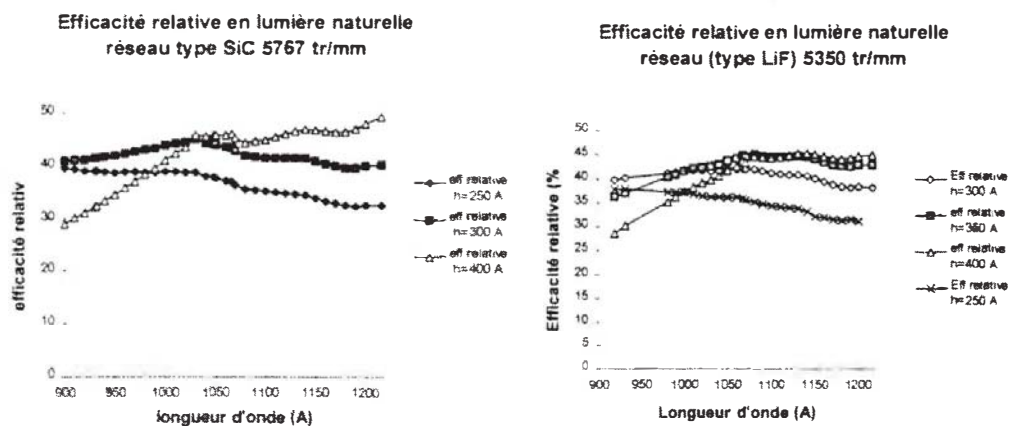


Fig. 12 : Simulations des mesures faites au LAS

3.3 - Lumière diffuse

La plupart des raies observées par l'instrument FUSE le seront en absorption sur un continuum. En conséquence, les performances du spectrographe seront directement affectées par la diffusion des réseaux qui diminue la profondeur de la raie étudiée. Expérimentalement, il est très difficile de simuler dans ce domaine de longueurs d'onde une raie en absorption en utilisant par exemple une cellule à absorption: le confinement du gaz absorbant ne peut pas être assuré par un matériau optiquement transparent. Pour caractériser chaque réseau en lumière diffuse, nous avons décidé d'isoler la raie en émission 1048 Å de l'argon et d'obtenir une image de cette raie avec typiquement 10^6 photons (Fig. 13). Une image du bruit de fond du détecteur de même durée a été soustraite à l'image de lumière diffuse. Le profil de diffusion dans la direction spectrale (Fig. 14) a été obtenu en sommant sur la hauteur du spectre les comptages contenus dans des intervalles de 1 Å. On peut remarquer (Fig. 13) un certain nombre de raies qui n'ont pas été éliminées par le monochromateur (notamment la raie 1067 Å de l'argon). Elles sont responsables des pics observés sur le profil de diffusion (Fig. 14).

La spécification du taux de lumière diffuse impose d'avoir à 10 Å du centre de la raie 1048 Å une intensité 10^5 fois plus faible. Grâce à leur enregistrement holographique exempt d'erreurs périodiques, les six réseaux de vol ont atteint cette spécification contraignante.

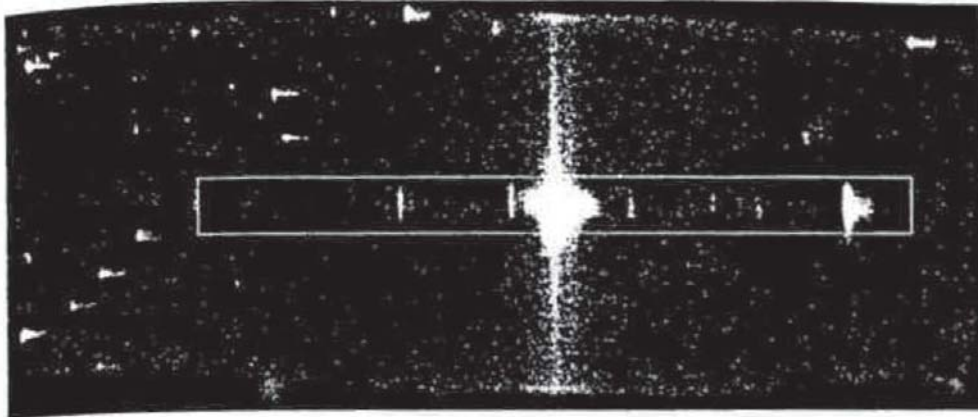


Fig. 13 : Les raies 1048 Å et 1066 Å de l'argon après dispersion par le réseau SiC 3 et rectangle utilisé pour l'étude de la lumière diffuse

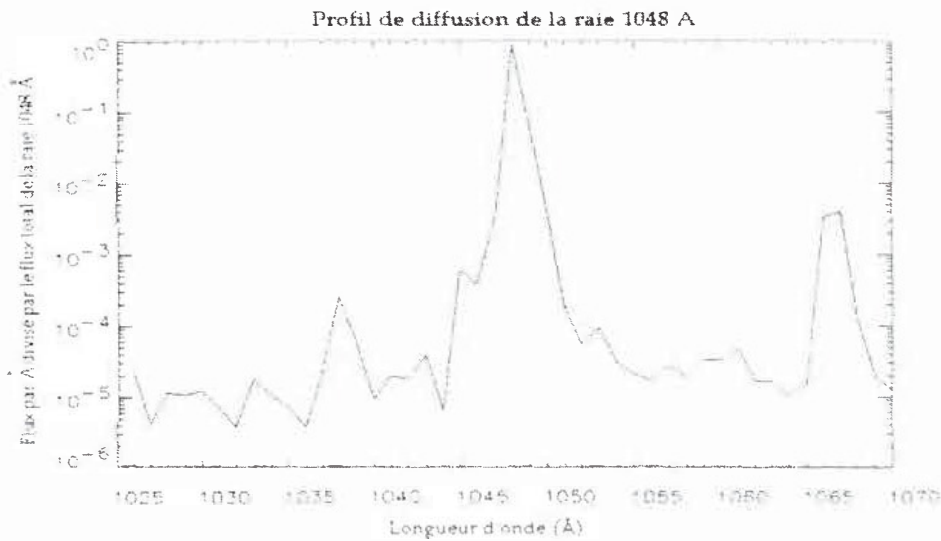


Fig. 14 : Profil de diffusion de la raie 1048 Å de l'argon

4 - CONCLUSION

Nous avons montré que les six réseaux de vol ont atteint les performances exigeantes de l'expérience FUSE. La correction holographique des aberrations a permis d'atteindre le pouvoir de résolution de 30 000 avec une optique très ouverte. Le taux de lumière diffusée, point fort des réseaux holographiques, est toujours resté très faible. Malgré le profil sinusoïdal des réseaux holographiques, une optimisation soignée de la profondeur de modulation nous a permis d'atteindre une efficacité très élevée pour cette densité de traits et ce domaine de longueurs d'onde. Une amélioration de l'efficacité est encore possible en modifiant ce profil par usinage ionique (effet de blaze). Cependant, la difficulté réside à la fois dans la grande dimension et la très haute densité de traits des réseaux FUSE. Cette étude fait l'objet actuellement d'une action R&T du CNES entre le LAS et Jobin-Yvon. Des premiers résultats très encourageants faits sur des échantillons montrent une dissymétrie du profil ayant permis d'obtenir une efficacité de 47% à 1048 Å.

BIBLIOGRAPHIE

- [Gree 95] J. Green, « The Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer : the restructured mission », *Center for Astrophysical Sciences. The Johns Hopkins University. NASA, Contract NAS5 31248*, p.36 (January 1995)
- [Labe 69] A. Labeyrie, J. Flamand : « Spectroscopic performance of holographically made diffraction gratings », *Optic. Comm.* vol.1, 5-8 (1969)
- [Cord 70] J. Cordelle, J. Flamand, G. Pieuchard, A. Labeyrie : « Aberration-corrected concave gratings made holographically », *Optical Instruments and Techniques*, J. Home Dikson, ed. (Oriel, Newcastle upon Tyne, UK, 1970), pp. 117-124
- [Chri 87] M. P. Chrisp : « Aberration-corrected holographic gratings and their mountings », *Applied Optics and Optical Engineering*, R. R. Shannon and J. C. Wyant, eds. (Academic, London, 1987), Vol. 10, pp. 391-454
- [Hutl 82] M. C. Hutley : « Diffraction gratings », *Techniques of Physics* : 6, N.H. March and H. N. Dalglish, eds. (Academic, London, 1982), chap. 7, p. 215
- [Gran 92] R. Grange : « Aberration-reduced holographic spherical gratings for Rowland circle spectrographs », *Appl. Opt.* **31**, 3744-3749 (1992)
- [Gran 93] R. Grange : « Holographic spherical gratings : a new family of quasi-stigmatic designs for the Rowland circle mounting », *Appl. Opt.* Vol.32, n°25, 4875-4880 (1993)
- [Cham 96] S. Chambord, R. Grange, J. Flamand, M. Saisse, J. L. Reynaud : « Holographic gratings for the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer : development, imaging and efficiency tests of two prototypes », *Appl. Opt.* **35**, 3653-3661 (1996)
- [Ronc 94] J.-Y. Roncin et F. Launay : « Atlas of the vacuum ultraviolet emission spectrum of molecular hydrogen », *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, monographie n°4, (1994)
- [Sieg 94] O.H.W. Siegmund, J.Hull, R. Raffanti, M. Gummin, J. Stock, D. Marsh : « Delay line microchannel plate detectors for the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Satellite », *Space Optics 1994 : Earth observation and Astronomy*, M.G. Cerruti-Maori and P. Roussel, eds., *Proc. SPIE* 2209, 388-399 (1994)
- [Nevi 74] M. Nevière, P. Vincent, R. Petit : « Sur la théorie du réseau conducteur et ses applications à l'optique », *Nouv. Rev. Opt.* **5**, 65-77 (1974)
- [Peti 80] R. Petit : « Electromagnetic theory of gratings », *Springer-Verlag*, p.101 (1980)