Brève histoire des réseaux de diffraction

Yvon Georgelin[1] (ypgeorgelin@free.fr) et **James Lequeux**[2] (james.lequeux@obspm.fr)
(1) Observatoire de Marseille / LAM, 38 rue Frédéric Joliot-Curie, 13013 Marseille
(2) Observatoire de Paris (PSL-Sorbonne Université), 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

Chacun sait qu'après quelques essais précurseurs de Thomas Young, Fraunhofer a inventé les réseaux de diffraction et décrit leurs propriétés, y compris le *blaze*. Ceci lui a permis, pour la première fois, de mesurer des longueurs d'onde avec précision. Mais la réalisation des réseaux, leur utilisation et leur évolution ont été lentes malgré leurs avantages, jusqu'à ce qu'ils se substituent généralement aux prismes il y a une centaine d'années.

Notre histoire se termine par deux applications récentes et spectaculaires.

Young, Fraunhofer et la diffraction

On attribue généralement la découverte de la diffraction à Francesco Maria Grimaldi (1618-1663). Mais ce sont Thomas Young (1773-1829) puis Joseph von Fraunhofer (1787-1826) qui ont fait les premières expériences importantes sur la diffraction et découvert les propriétés des réseaux.

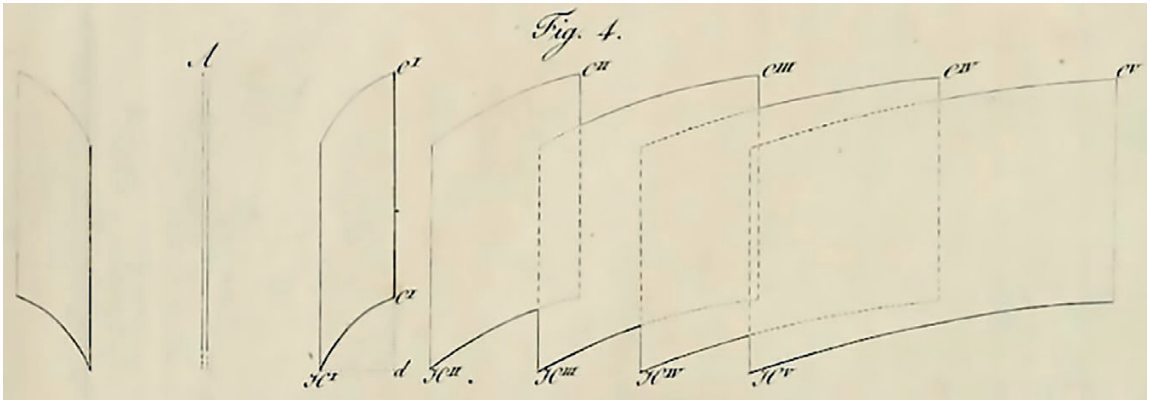
Dans la *Bakerian lecture* de 1802 de Young [1], on trouve p. 36 le texte suivant, quelque peu obscur comme la plupart de ses écrits (notre traduction) :

« ...Parmi les micromètres exquis de Mr Coventry, ceux qui sont faits de lignes parallèles tracées sur du verre, à la distance d'un cinq centième de pouce, sont les plus commodes. Chacune de ces lignes apparait au microscope comme composée de deux ou plusieurs lignes plus fines, exactement parallèles et distantes l'une de l'autre d'un peu plus d'un vingtième de la distance entre les lignes adjacentes. J'ai placé un de ces micromètres de manière à ce qu'il réfléchisse la lumière du soleil sous un angle de 4,5°, et je l'ai fixé de telle sorte que je puisse mesurer sa position angulaire lorsque je le faisais tourner autour d'une de ces lignes servant d'axe ; j'ai trouvé que la couleur rouge la plus brillante était obtenue pour des inclinaisons de 10°1/4, 20°3/4, 32° et 45°, dont les sinus sont en proportion comme les nombres 1, 2, 3 et 4. Pour les autres angles, lorsque la lumière du soleil se réfléchissait sur la surface, la couleur obtenue disparaissait ; la couleur était la même pour des inclinaisons égales de chaque côté. Cette expérience fournit une excellente confirmation de la théorie [ondulatoire]. »

Une vingtaine d'années plus tard, Fraunhofer a effectué des expériences beaucoup plus systématiques. Il réalisait des réseaux par transmission en tendant des fils entre deux tiges filetées parallèles, ou plus tard en gravant avec un diamant des traits équidistants sur une plaque de verre grâce à une machine qu'il avait spécialement conçue, mais dont il ne reste aucune description. Il fabriquait aussi des réseaux par réflexion en gravant des traits parallèles sur une plaque de verre recouverte d'une feuille d'or. Il éclairait ces réseaux par la lumière du Soleil envoyée avec un héliostat sur une fente d'entrée parallèle aux traits, et explorait la lumière qui en était issue avec un théodolite mesurant les angles.

Fraunhofer a décrit de façon exacte et détaillée les propriétés des ordres successifs de la lumière diffractée (fig. 1), où il a retrouvé les raies solaires qu'il avait découvertes avec ses premiers spectroscopes à prisme [2]. Il a montré par exemple que la dispersion augmente d'un facteur 2 en passant du premier au deuxième ordre, etc.

Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr ou https://doi.org/10.1051/refdp/202479026



1. Dessin de Fraunhofer : spectre fourni par un réseau, d'après [2], version allemande. Pour ce faire, il disposait devant la lunette de visée, perpendiculairement à la fente d'entrée et aux traits du réseau, un prisme qui lui permettait de séparer partiellement les différents ordres : c'est la première utilisation d'une dispersion croisée. Ainsi, il a dessiné l'ordre 0 (*A*), les deux ordres 1 de chaque côté, et à droite les ordres de 2 à 5.

Au cours de ses expériences, Fraunhofer a observé que des réseaux dont les traits ont été gravés asymétriquement concentrent d'un côté la lumière diffusée (voir [3], p. 353). Il s'agit de la première mention du *blaze* des réseaux, une propriété qui n'a été mise en service que vers 1935, d'abord pour des réseaux gravés sur une couche d'aluminium déposée sur du verre. Elle a débouché en 1949 sur les premiers réseaux *blazés* de George R. Harrison (1898-1979) [4], à petit nombre de traits au millimètre, dont le profil était très soigné. Il les utilisait en incidence quasi normale, et les nomma « échelle ». On appelle souvent « échelette » les réseaux classiques blazés à grand nombre de traits au millimètre.

La théorie des réseaux

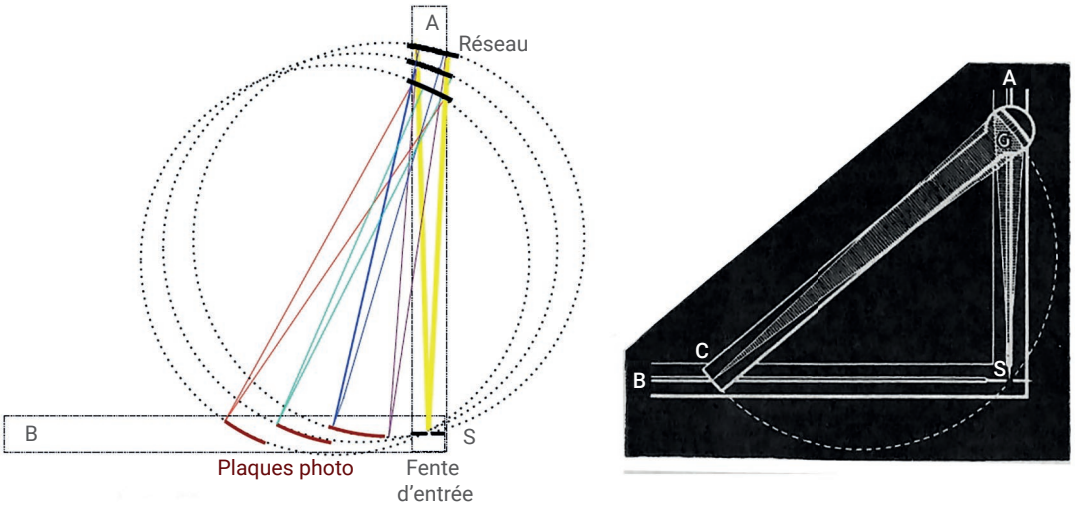
Fraunhofer a parfaitement compris que l'optique des réseaux fait intervenir à la fois la diffraction et les interférences. Dans son article de 1823 [3], il donne une équation qui relie à la longueur d'onde la position des raies dans les spectres formés par un réseau éclairé en incidence normale, dont il dit, p. 358 de la version allemande (notre traduction) : « *J'ai écrit cette équation exacte d'après les principes sur les interférences publiés dès 1802 par le Dr Thomas Young, et qui ont été par la suite traités pour la première fois avec l'attention qu'ils méritent par Arago et Fresnel.* » Connaissant le pas de son réseau, il a déterminé la longueur d'onde de six raies du spectre solaire, d'abord en 1821 [2] puis, de nouveau, en 1823 [3]. C'est la première fois que des longueurs d'onde optiques ont été mesurées avec une bonne précision ; mais Thomas Young en avait déjà donné des ordres de grandeur dès 1801 à partir de ses expériences d'interférence à deux ouvertures, et remarqué que les longueurs d'onde augmentent du bleu au rouge.

Young et Jacques Babinet (1794-1872) ont tous deux bien compris l'optique des réseaux, et ont chacun publié à ce sujet en 1829. Le texte de Young [5] est assez obscur et il ne donne aucun résultat, mais on y voit qu'il a manqué de peu la découverte des réseaux. Celui de Babinet [6] est plus pédagogique. Pas une seule fois il n'utilise le terme de diffraction : l'expression « réseau de diffraction » viendra beaucoup plus tard. Babinet fait une constatation intéressante : « *La longueur d'une ondulation lumineuse [...] offre un étalon invariable de mesure.* » Il conclut que le mètre pourrait être défini à partir de la longueur d'onde d'une raie spectrale, ce qui sera effectivement réalisé en 1960, de façon d'ailleurs provisoire puisque le mètre est rattaché depuis 1975 à la vitesse de la lumière.

Le développement des réseaux en France

Des réseaux ont été gravés dans les années 1840 par Joseph Saxton (1799-1873) aux USA, puis à partir de 1850 en Allemagne par Friedrich Nobert (1806-1881) : voir [7]. C'est Eleuthère Mascart (1837-1908) qui a fait, lorsqu'il était professeur au lycée de Metz, les premières mesures vraiment précises de longueurs d'onde en utilisant un réseau de Nobert. Il a découvert par hasard une propriété des réseaux qui n'avait pas été repérée auparavant : il existe pour chaque longueur d'onde un minimum de déviation, qui est obtenu lorsque le plan du réseau par transmission est bissecteur de l'angle que forme le rayon incident avec le rayon diffracté. Il suffit donc de rechercher le minimum de déviation pour la raie dont on veut mesurer la longueur d'onde et, en faisant la mesure avec un goniomètre à droite puis à gauche en tournant le réseau, on obtient le double de l'angle recherché. On peut aussi faire cette mesure par réflexion. La lecture de l'article de Mascart [8] permet d'apprécier ses remarquables qualités d'expérimentateur. L'utilisation du réseau au minimum de déviation fera longtemps école et ne sera détrônée au début du XX^{e} siècle que par son utilisation en auto-collimation [9] (voir plus loin).

>>>



2. Le montage gigantesque de Rowland pour son réseau concave (1882). Le réseau et la plaque photo, également concave et de même courbure, étaient montés sur un bras articulé dont les extrémités coulissaient dans deux glissières perpendiculaires, si bien que la fente d'entrée, le réseau et la plaque photo restaient sur le cercle de focalisation. La poutre BS était graduée en longueurs d'onde. Seul le premier ordre est représenté ici. Le cercle de focalisation avait 6,5 m de diamètre et les plaques photo courbes mesuraient 50 × 5 cm. La figure de droite est tirée du livre de Edser (1918), *Light for students*, Macmillan.

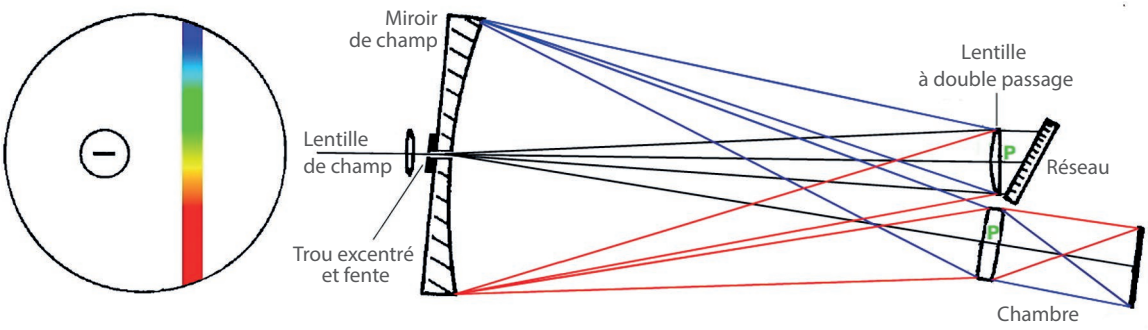
>>>

Mascart a ainsi mesuré la longueur d'onde d'un certain nombre de raies importantes dans le visible et l'ultraviolet, qu'il a donnée en valeur relative, car pour obtenir la valeur absolue « *il faudrait comparer au mètre étalon les micromètres dont on fera usage* [pour déterminer le pas du réseau], *un travail considérable.* » Comme sa détermination de la longueur d'onde de la raie D_2 du sodium lui paraissait incertaine, il a adopté celle de Fraunhofer, 5888 Å, et en a déduit la longueur d'onde de la raie D_1, 5894,3 Å. Cette valeur de 1864 figure en tête du tableau des *Primary Standards*, système basé justement sur la raie D_1 : un choix malheureux qui ancra provisoirement un standard primaire sur un standard secondaire, lui-même incertain. Heureusement, la situation sera progressivement rétablie grâce à d'autres mesures, en particulier à la fin du siècle avec les étalons Pérot-Fabry.

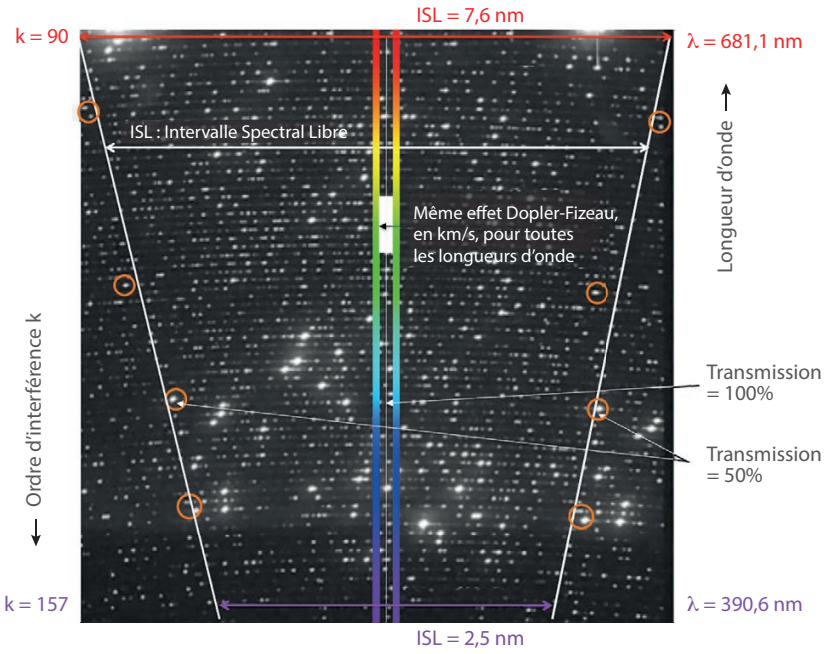
Les réseaux de Rowland

Les temps vont bientôt changer : dans le domaine des réseaux, la France va céder sa place dominante. Déjà Lord Rayleigh avait fabriqué en Angleterre en 1872 les premières répliques de réseaux, et Lewis Rutherfurd (1816-1892) avait gravé à la même époque aux États-Unis les meilleurs réseaux par réflexion du temps [7]. Puis vinrent les réseaux d'Henry Rowland (1848-1901), toujours aux USA, lesquels finiront par remplacer, très progressivement d'ailleurs, les prismes dans la plupart de leurs utilisations spectroscopiques. Rowland a inventé le réseau concave (fig. 2), avec lequel il a mesuré la longueur d'onde de près de 20 000 raies solaires [10]. Ce réseau a l'avantage d'éviter collimateur et caméra et est donc idéal pour l'ultraviolet et l'infrarouge. Il présente cependant l'inconvénient que les différents ordres se chevauchent, du moins dans le montage initial.

Néanmoins, les réseaux plans ont survécu à l'invention du réseau concave. L'année même où Rowland présenta ses réseaux concaves, deux chimistes de Cambridge, George D. Liveing (1827-1924) et James Dewar (1842-1923), eurent l'idée d'utiliser un réseau plan de Rutherfurd en auto-collimation.



3. Principe du spectrographe à pupille blanche de Baranne. La lentille de champ forme une pupille P (image du miroir du télescope), en vert, près du réseau. Celui-ci, en auto-collimation, forme un spectre réfléchi par le miroir de champ sphérique sur la chambre, dont l'objectif est conjugué du réseau et en conséquence est situé sur une autre pupille P. La fente d'entrée est située dans un trou excentré du miroir de champ, de façon à ce que le spectre se projette en dehors de ce trou (à gauche). Un prisme (non représenté) peut produire une dispersion croisée. D'après [12].



4. Un réseau échelle produit de nombreux spectres d'ordres d'interférence élevés k. La dispersion croisée permet de les séparer, comme sur cette figure qui correspond aux caractéristiques du réseau d'ELODIE (voir la figure 5). La longueur d'onde centrale λ de chaque ordre k est telle que kλ = constante. Les lignes obliques sont celles où l'on retrouve un motif spectral d'un ordre sur l'ordre suivant (cercles orangés). Pour elles, la transmission est la moitié de celle au centre du spectre, l'autre moitié se retrouvant dans le spectre suivant. Les deux lignes verticales colorées symbolisent l'effet d'une différence de vitesse radiale de la source, qui est une simple translation horizontale de tous les spectres. La source doit être ponctuelle, en général l'extrémité d'une fibre optique.

De son côté, aussi à Cambridge, William de Wiveleslie Abney (1843-1920) se servit en 1886 pour l'infrarouge d'un réseau plan monté entre deux miroirs concaves, excellente disposition dans laquelle les aberrations d'inclinaison et la coma du miroir collimateur et du miroir de chambre se compensent [11]. Ce montage est très utilisé aujourd'hui sous le nom de Czerny-Turner.

Un montage plus récent dit « à pupille blanche » (1965), mis au point par André Baranne (1931-2021), de l'observatoire de Marseille, est représenté sur la figure 3, p. 28 [12]. Le réseau plan est en auto-collimation. Cette disposition permet d'utiliser un réseau assez petit quelle que soit la dispersion, et évite toute obstruction du faisceau. De nombreux spectrographes destinés à l'astronomie sont construits selon ce principe.

En 1910-1912, Albert Eagle puis Horace Clark Richards (1868-1945) montèrent les réseaux concaves en auto-collimation, ce qui permet de les utiliser jusqu'au cinquième ordre.

Les réseaux échelle

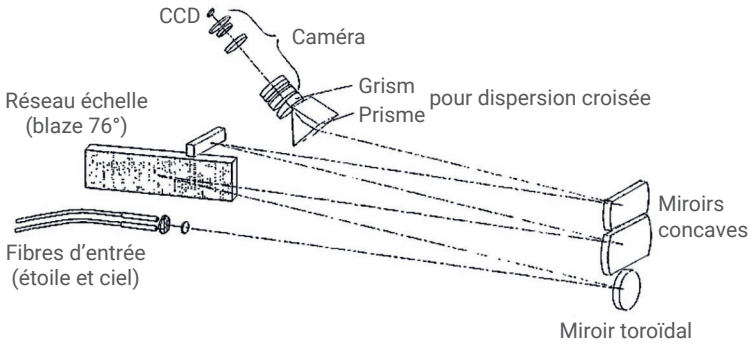
Albert Michelson (1852-1931) a imaginé en 1898 le réseau échelle [13], qui est aujourd'hui très employé quand on désire à la fois une grande résolution et une vaste étendue spectrale. Il a d'abord pensé à un réseau par réflexion, mais des difficultés techniques ont fait qu'il ne l'a pas construit. Michelson a même imaginé un réseau échelle par réflexion concave, qui aurait permis de se passer d'objectif.

Il a alors fait réaliser un réseau échelle par transmission, constitué de 20 plaques de verre *flint* de 18 mm d'épaisseur, superposées et de largeur décroissant de 22 à 2 mm. L'ordre d'interférence était d'environ 20 000 et la résolution de 300 000, ce qui lui permit de voir aisément l'effet Zeeman sur les raies D du sodium, etc. Cependant, malgré la dispersion croisée, le domaine spectral visible à l'œil était très limité, ce qui fait que ce montage n'a pas eu d'avenir malgré sa nouveauté.

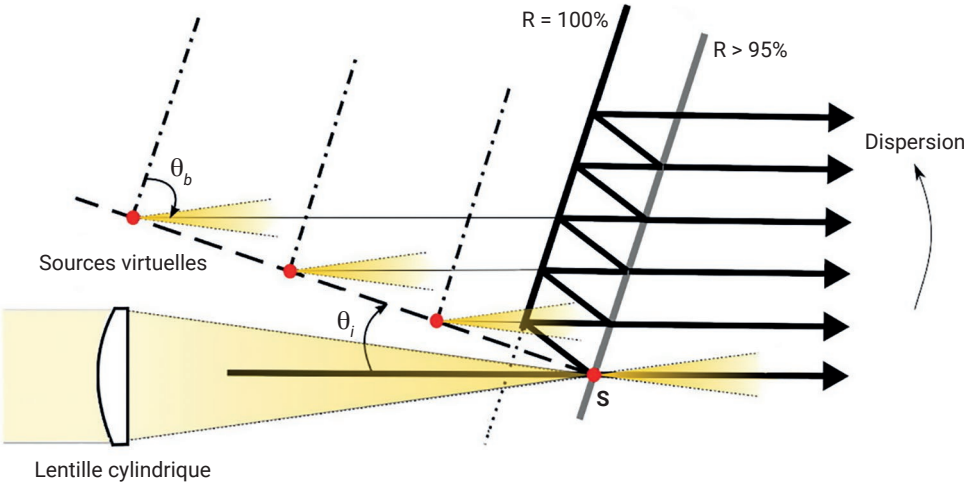
On en est donc revenu au réseau échelle par réflexion, fait d'une série de traits équidistants d'environ 0,05 mm, blazé de telle manière que les facettes réfléchissantes soient inclinées d'environ 75° sur le plan du réseau. La lumière d'un faisceau parallèle provenant d'une source ponctuelle est envoyée perpendiculairement aux facettes et les interférences entre les faisceaux réfléchis produisent des spectres dont l'ordre avoisine généralement la centaine. Une dispersion croisée est indispensable pour les séparer, comme le montre la figure 4.

Depuis 1966, notre pays a reconquis sa place dans la fabrication des réseaux grâce à la firme HORIBA-Jobin & Yvon, qui a en particulier inventé en 1985 le réseau holographique plan ou concave.

>>>



5. Schéma du spectrographe ELODIE. Le réseau échelle (408 × 102 mm) de 31 traits/mm, angle de blaze 76°, permet d'obtenir le spectre de l'étoile de 390,6 à 681,1 nm, distribué sur 67 ordres (fig. 4). Ces ordres sont séparés par la dispersion croisée fournie par un ensemble prisme-Grism (réseau gravé sur un prisme). La résolution maximale est d'environ 100 000. Le détecteur est un CCD 1024x1024. La vitesse radiale de l'étoile est mesurée par corrélation numérique avec un spectre standard : en effet, un décalage Doppler produit le même décalage linéaire dans tous les ordres. Une variation périodique de cette vitesse radiale peut être produite par un compagnon orbitant autour de l'étoile, qui est une planète si sa masse est plus faible que 10 fois celle de Jupiter. D'après [14].



6. Principe du réseau VIPA. Les réflexions successives entre deux plans parallèles, l'un entièrement réfléchissant et l'autre légèrement semi-transparent, produisent des images virtuelles de la source linéaire **S**. L'intervalle entre les deux plans peut être de l'air ou un solide transparent. Les interférences entre ces sources virtuelles sont équivalentes à celles produites par un réseau échelle. La dispersion angulaire est proportionnelle à $\tan\theta_b = \cot\theta_i$. Pour $\theta_i = 4°$, ce facteur est d'environ 21,4 pour un VIPA solide de silice fondue, contre 7,5 pour un réseau échelle d'angle de blaze 75°. Cependant θ_i ne peut être réduit davantage, car ceci produirait une obstruction du faisceau incident. (D'après [15]).

1• T. Young, "The Bakerian Lecture. On the Theory of Light and Colours". *Philosophical Transactions* **92** (1802) 12-48 ; voir https://cutt.ly/BakerianLecture_pdf

2• J. Fraunhofer, (Nouvelle modification de la lumière par l'influence réciproque et la diffraction des rayons, avec l'examen des lois de cette modification), *Denkschriften der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu München* **8** (1821) 1-76 ; Traduction française dans les *Œuvres complètes* de Fraunhofer publiées en 1888 ; voir https://cutt.ly/Fraunhofer

3• J. Fraunhofer, (Bref compte rendu des résultats d'expériences récentes, sur les lois de la lumière, et la théorie de celles-ci), *Annalen der Physik* **8** (1823) 337-378 ; Traduction en anglais dans l'*Edinburgh Journal of Science,* vol. **7** (1827), en deux parties : https://cutt.ly/EJOSV7_1 et https://cutt.ly/EJOSV7_2

4• G.R. Harrison, "Development and design of echelle gratings and spectrographs", *Journal of the Optical Society of America*, **39** (1949) 413-426 & 522-528.

5• T. Young, « Théorie des couleurs observées dans les expériences de Fraunhofer », *Annales de Chimie et de Physique* **40** (1829) 178-183 ; https://cutt.ly/Theorie-des-couleurs

6• J. Babinet, « Sur les couleurs des réseaux », *Annales de Chimie et de Physique* **40** (1829) 166-177, figures après la p. 224 ; https://cutt.ly/couleurs-des-reseaux

7• J.C.D. Brand, *Lines of Light, the Sources of Dispersive Spectroscopy, 1800-1930*, Boca Raton, Taylor & Francis (1995). Le chapitre 3 qui nous intéresse est accessible par Google Books ; https://cutt.ly/Lines-of-Light

8• E. Mascart, *Recherches sur le spectre solaire ultra-violet et sur la détermination des longueurs d'ondes*, Paris, Thunot (1864) ; https://cutt.ly/spectre-solaire. Aussi *Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 1re série, tome 1, pp. 219-262 sans les figures (voir à partir de la p. 239) ; https://cutt.ly/spectre-solaire-2

9• A. Eagle, "On a new mounting for a concave grating". *Astrophysical Journal*, **31** (1910) 120-142 ; https://cutt.ly/concave-grating

10• H. Rowland, "Preliminary Notice of the Results accomplished in the Manufacture and Theory of Gratings for Optical Purposes", *The Observatory*, **5** (1882) 224-228 ; https://cutt.ly/articles-adsabs

11• W. de W. Abney, "The Solar Spectrum, from λ 7150 to λ 10,000", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **177** (1886) 457-469 ; www.jstor.org/stable/109490

12• A. Baranne, « Un nouveau montage spectrographique », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **260** (1965) 3283-3286 ; https://cutt.ly/montage-spectrographique

13• A.A. Michelson, "The echelon spectroscope", *Astrophysical Journal*, **8** (1898) 37-47 ; https://cutt.ly/articles-adsabs-2 . Voir aussi A.A. Michelson, « Sur le spectroscope à échelons », *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, **8** (1899) 305-313 ; https://cutt.ly/jphystap-pdf (payant).

14• A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor *et al.*, "ELODIE: a spectrograph for accurate radial velocity measurements", *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, **119** (1996) 373-390 ; https://cutt.ly/adsabs-harvard-3

15• G. Bourdarot *et al.*, "Nano-VIPA : a miniaturized high-resolution spectrometer, for the monitoring of young stars from a 6U cubesat", *Proceedings of SPIE* (2016) 10562, 105622D-2 ; https://cutt.ly/spie-digital-library

>>>

Deux applications récentes

La première que nous mentionnerons est le spectrographe ELODIE, conçu par André Baranne [14] (fig. 5). Attaché au télescope de 1,93 m de diamètre de l'Observatoire de Haute-Provence, il a permis à Michel Mayor et Didier Queloz (lequel a réalisé l'informatique complexe du système) de découvrir en 1995 la première planète en dehors du système solaire. Ils ont obtenu pour cette découverte le prix Nobel de physique en 2019. Ce spectrographe utilise un grand réseau échelle produit par Milton Roy, dans un montage à pupille blanche.

La deuxième application est le réseau VIPA (Virtual Imaging Phased Array), inventé en 1996 par le Japonais Masataka Shirasaki, de la firme Fujitsu. La figure 6 en montre le principe. La résolution, qui est proportionnelle à la dispersion, peut atteindre des valeurs très élevées, 200 000 par exemple. Le réseau VIPA est actuellement aux essais pour l'astronomie, monté au télescope du Mont Palomar par le groupe de l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble. Les petites dimensions du réseau le rendent très favorable aux applications spatiales : par exemple, il serait possible de loger un télescope de 20 cm de diamètre et un spectromètre VIPA en dispersion croisée de résolution 50 000, avec son détecteur CCD et toute l'électronique, dans un *cubesat* 12U de 30 × 20 × 20 cm (12 fois le volume élémentaire U de 10 × 10 × 10 cm) [15].