

# Brève histoire des réseaux de diffraction

Yvon Georgelin<sup>(1)</sup> (ypgeorgelin@free.fr) et James Lequeux<sup>(2)</sup> (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.

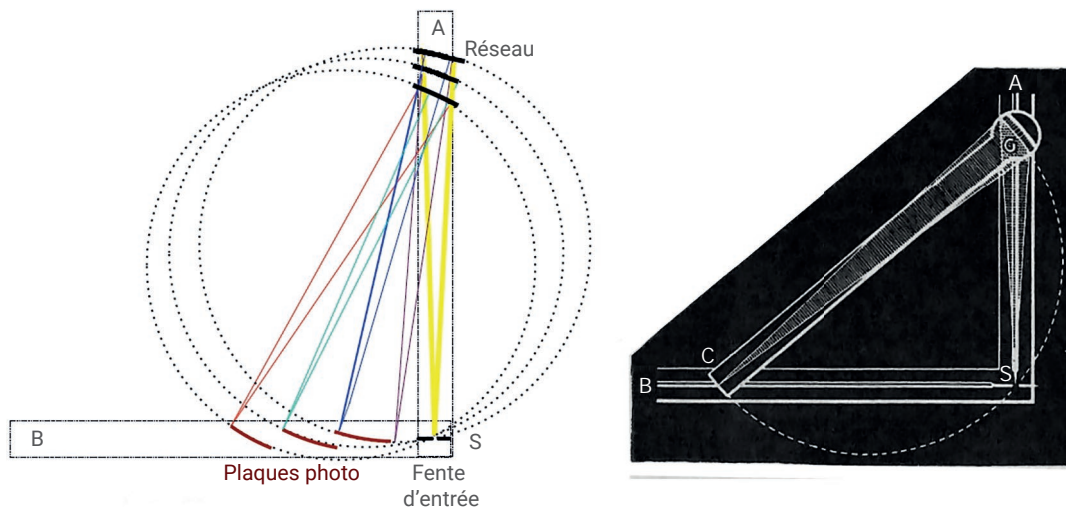
Notre histoire se termine par deux applications récentes et spectaculaires.

## Young, Fraunhofer et la diffraction

La découverte de la diffraction à "RM èR(J M Má\$â†\$M • M D| m J M è G M Ñ R MM QI è J 3 RM M } A|èR f \M i è|3 è MB|3 C è à 5#M M M A|P à M D My"3 ff MQ f"fy M \$ è M y Q f B • 8 R R I " \$ M Q è 3 f i è 3 f M M f \R • M ¥ / \ Q è f M Ì B è R M (4 D à à à M J \ | f { " M D M J M | è 8 M è 6 " f M R \ M | R f | M 3 y • 3 \ R # M M y " 3 f M ] \ f y / M - \ R M A | è " R à B à 5 M M U P à i à è < de ces lignes servant è " f f 3 M f M | f è " 3 M y è | M | { " 3 M \ R • M ' è 3 • M J f M y | Q 3 | F è M N & M 3 D R è 3 J M | \ " - M { " M | è B R \ M " f M | \ | è 3 M f M y è | è J J 3 Q y \ | • è R • f M f " | M J è M 3 D M è y 3 J R I M | 3 J M è R • M • è 3 y M è { " B " M M y \ " | M M | \ " - | • | \ " - | • M J f M y | \ y | 3 • f M f M M J R è " J 3 R è 3 f \ R f M M " b ' Y 3 J J O B M M \ B # N I à V D J à S M J è 3 | è à B † M • M á â † \$ M \ R • M J f M | M B R è " M M " Q 3 R † M R M \ J 3 J M \$ è R f M è J 3 M è R M J • " | M y M P à Y 3 R M M Q Q M J f M R \ Q R | M f / M J B S M è S M à f M | M " R M ' R ì \ " R ( M 8 p 9 \$ M \ R M • | \ " - M y # M á # 3 M U \ | M J 3 f • M M è " • | f M y è R è J J f \$ M M J à | f M | " • M è 3 • f \$ M • f " 3 - è R • \$ M { " J { " M y " M \ f J è M U Q Q 3 M J M M " M f \ J 3 J M J " Q 3 Ò M / B / B M è 3 R M • è 3 • M 3 f y J " y è | • M M f f M | 3 • f M 4 R Y • | M • J è M f 3 \ R 5 N \$ M J è M \ " J \ " \ M 3 • M Q " f M | è R • M J f M è R G N " " è | Q 3 M J f M Q 3 | \ Q • | 3 M y è | è 3 f M è 3 M M & M J è M \ " J " | M • è 3 • M J è M Q Q M i | M \ - R • | ' \$ M " 3 M { " 3 M f \ R • M M è 3 f M M 3 R M J 3 R è 3 f \ R f M | è ( B J \ f M è M M | 3 • M M ' è J 3 ( R f M y è | è J J J f M • | è f M è f " | M " M # N | \$ M U M 3 y | 3 R • M M ' à è | 3 R 3 • M M J f M y | \ y | 3 • f J è M 3 f • è R M F " R M 3 R { " R M R è 3 Q J M R • M \ R Ñ | Q è f 3 \ R M f 3 M f M è M M J è M J " Q 3 | y \ " \$ M f \ R • M J f M y J " f M \ \ Q Q I 8 \ R # " M è \ 3 | 9 # N H 4 Ñ ( # N p 5 \$ M \ Y M 3 J M è M | • | \ " / è " R M M f M J 3 ( R f M è y y è | è 3 • M è " M { " F 3 J M è - è 3 • M \ - | • f M è - M Q 3 | \ f \ y M \ Q Q M \ Q y \ f R M M - 3 R ( • è 3 R M F è R R f f M y J J f f M y • f è M U M y | 3 f Q M 8 B 9 " 3 M \ " M y J " f 3 " | f M J 3 ( R f M è y R " f M | M R M f S E M " • M f M y è y M | 3 3 R Q y f M M { " M J è M < 3 f y 3 è • Q R • M y è | è J J J f M • M " 3 f y M R y J f M M f ' f • Q è Q 3 R { " M # M R M M U M " • " | M B M R M J F " R M M J F è " • | M F " R M y è J 3 f y è 3 • f M M f M R M y è " 3 M y è y M Q 3 R M Q 3 M f 3 " 3 B M Q M \ | \$ M

- 3 R ( • 3 Q M M J è M 3 f • è R R M M • R • è R M M f M M Ñ J f M R • | J 3 ( R f M è D è R • f # M J F è 3 M y è è f M " y R M è J M J f M \$ M \ " M y Q 3 | \ Q • | f M M Q è R 3 | gravant avec ur F aiant des traits t R M è • • | 3 " M ( R | è J | Q R • M f f è M J è M J " Q 3 | M " M 3 \ 3 f 3 è R I • f M f f M | M " R M y J è { découverte de la diffraction à " R M è R ( J M Má \$ â † \$ M • M D | m J M è G M Ñ R M M Q I è J 3 R M M } A | è R f \ M i è | 3 è M B | 3 C è à 5 # M M M A | P à M D M y " 3 f f M Q f " f y M \$ è M y Q f B • 8 R R I " \$ M Q è 3 f i è 3 f M M f \ R • M ¥ / \ Q è f M Ì B è R M ( 4 D à à à M J \ | f { " M D M J M | è 8 M è 6 " f M R \ M | R f | M 3 y • 3 \ R # M M y " 3 f M ] \ f y / M - \ R M A | è " R à B à 5 M M U P à i à è < de ces lignes servant è " f f 3 M f M | f è " 3 M y è | M | { " 3 M \ R • M ' è 3 • M J f M y | Q 3 | F è M N & M 3 D R è 3 J M | \ " - M { " M | è B R \ M " f M | \ | è 3 M f M y è | è J J 3 Q y \ | • è R • f M f " | M J è M 3 D M è y 3 J R I M | 3 J M è R • M • è 3 y M è { " B " M M y \ " | M M | \ " - | • | \ " - | • M J f M y | \ y | 3 • f M f M M J R è " J 3 R è 3 f \ R f M M " b ' Y 3 J J O B M M \ B # N I à V D J à S M J è 3 | è à B † M • M á â † \$ M \ R • M J f M | M B R è " M M " Q 3 R † M R M \ J 3 J M \$ è R f M è J 3 M è R M J • " | M y M P à Y 3 R M M Q Q M J f M R \ Q R | M f / M J B S M è S M à f M | M " R M ' R ì \ " R ( M 8 p 9 \$ M \ R M • | \ " - M y # M á # 3 M U \ | M J 3 f • M M è " • | f M y è R è J J f \$ M M J à | f M | " • M è 3 • f \$ M • f " 3 - è R • \$ M { " J { " M y " M \ f J è M U Q Q 3 M J M M " M f \ J 3 J M J " Q 3 Ò M / B / B M è 3 R M • è 3 • M 3 f y J " y è | • M M f f M | 3 • f M 4 R Y • | M • J è M f 3 \ R 5 N \$ M J è M \ " J \ " \ M 3 • M Q " f M | è R • M J f M è R G N " " è | Q 3 M J f M Q 3 | \ Q • | 3 M y è | è 3 f M è 3 M M & M J è M \ " J " | M • è 3 • M J è M Q Q M i | M \ - R • | ' \$ M " 3 M { " 3 M f \ R • M M è 3 f M M 3 R M J 3 R è 3 f \ R f M | è ( B J \ f M è M M | 3 • M M ' è J 3 ( R f M y è | è J J J f M • | è f M è f " | M " M # N | \$ M U M 3 y | 3 R • M M ' à è | 3 R 3 • M M J f M y | \ y | 3 • f J è M 3 f • è R M F " R M 3 R { " R M R è 3 Q J M R • M \ R Ñ | Q è f 3 \ R M f 3 M f M è M M J è M J " Q 3 | y \ " \$ M f \ R • M J f M y J " f M \ \ Q Q I 8 \ R # " M è \ 3 | 9 # N H 4 Ñ ( # N p 5 \$ M \ Y M 3 J M è M | • | \ " / è " R M M f M J 3 ( R f M è y y è | è 3 • M è " M { " F 3 J M è - è 3 • M \ - | • f M è - M Q 3 | \ f \ y M \ Q Q M \ Q y \ f R M M - 3 R ( • è 3 R M F è R R f f M y J J f f M y • f è M U M y | 3 f Q M 8 B 9 " 3 M \ " M y J " f 3 " | f M J 3 ( R f M è y R " f M | M R M f S E M " • M f M y è y M | 3 3 R Q y f M M { " M J è M < 3 f y 3 è • Q R • M y è | è J J J f M • M " 3 f y M R y J f M M f ' f • Q è Q 3 R { " M # M R M M U M " • " | M B M R M J F " R M M J F è " • | M F " R M y è J 3 f y è 3 • f M M f M R M y è " 3 M y è y M Q 3 R M Q 3 M f 3 " 3 B M Q M \ | \$ M





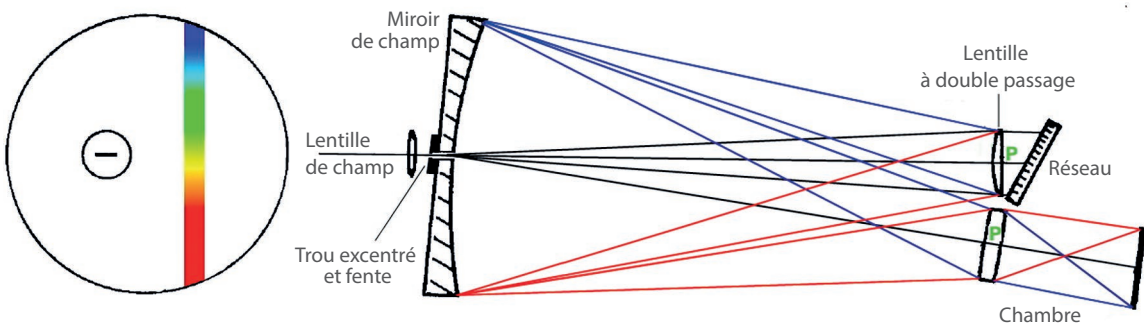
2. Le montage gigantesque de Rowland pour son réseau concave (1882). Le réseau et la plaque photo, également concave et de même courbure, étaient montés sur un bras articulé dont les extrémités coulevaient dans deux glissières perpendiculaires, si bien que la fente d'entrée, le réseau et la plaque photo 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 x 5 cm. La figure de droite est tirée du livre de Edser (1918), *Light for students*, Macmillan.

>>>

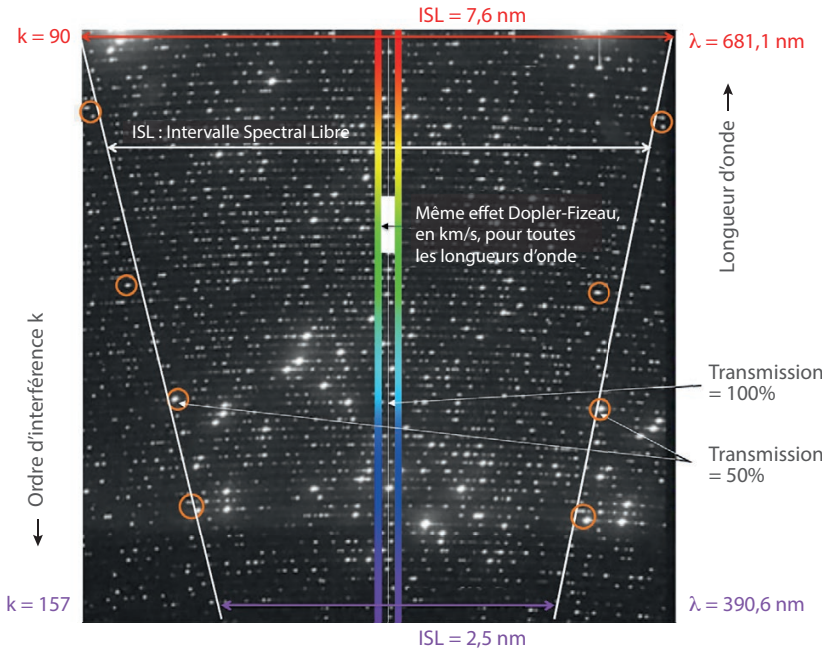
Les réseaux de Rowland

détermination de la longueur d'onde

M - à J " | M M P à à à M N M J è M M Q R M M • y M " " M è " 3 M . è à F è R R 3 J M Q J Q M \ Y M " \ @ J è R . è J è " M | 3 Q M | M > . è R è | f Q M B J J Q f M | f è " 3 M y è | M f Q M I B J R M M " M R è - f \$ M " 3 M è f M D " f • Q R • M f % | M " J è M | à 3 M S M 8 à 9 # M " " 3 f M - 3 R | R M M è Q J f M | ( \$ N B 3 M | ( N \$ # N a 3 Q è J / " | " 3 M { " 3 M è R | è M y | \ - 3 f | R | Q M R è R M 4 P à à à < P à à à 5 M • " N D | " è Q M f M \$ @ è | M " R M f • è R è | M y | 3 Q è 3 | M f " è M " R M f • è R J è f M J f M N M R 3 " | R • M y è B M | M Q F " • 3 J 3 f | M " f \ R è 3 | \$ M J " 3 < Q Q M y J è R | \$ M è 3 R M M | ( | f f 3 - Q R M M " F è \$ J J M f R M I è " • \ < \ J J



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].

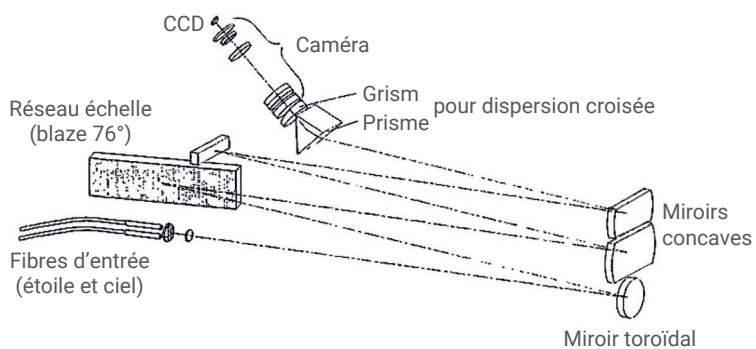


4. Un réseau échelle produit de nombreux spectres d'ordres d'interférence élevés k. La dispersion croisée permet de les séparer, comme sur cette figure qui correspond aux caractéristiques du réseau d'ELODIE (voir la figure 5). La longueur d'onde centrale  $\lambda$  de chaque ordre k est telle que  $k\lambda = \text{constante}$ . 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.

### Les réseaux échelle

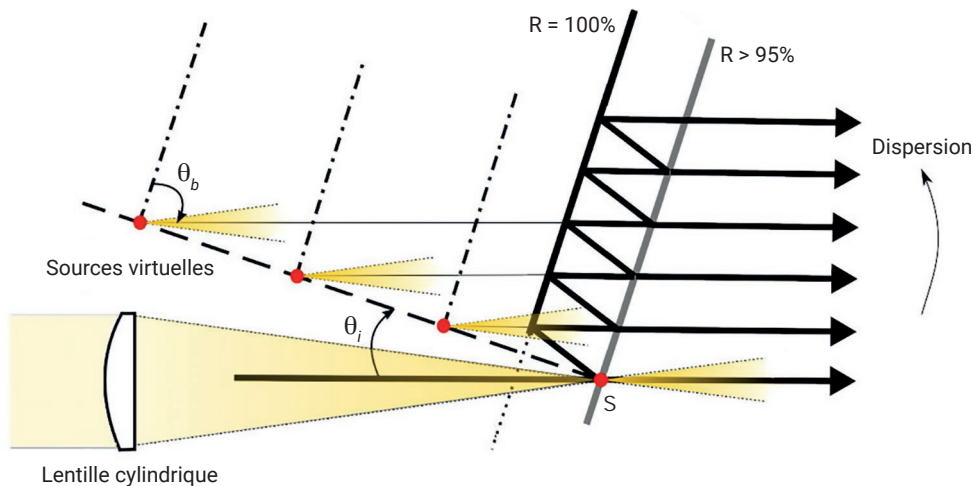
\$ M f \setminus R M \cdot \\$ M \text{ è } f f 3 M \acute{u} M \text{ è } Q \dots

«RM Q\R•è( M y J“fM | R•M y“y3JJ M JèR / NHM4pæãâ5\$M yè|M R | M è|èRR M 4pæàp< JF\ f | -è•\3| M Miè|f 3JJ \$M f R• M f“|M JèM ÑM (“| M à\$M y | f è“M y JèRM f•M RM è“•< \J •• M 3fy\ f3•3\RM y | Q •M F“• | f è“M èff ½My •3•M {“ JJ M { 3fy | f3\R\$M •M -3• M •\“• M \ “M 'è3f è“#M \$ M R\Q | “3M f (|èy/ fM f•3R fM úMJFèf•|\R\ \Rf•|“3•fMf J\RM My|3R 3Y# -RM pæpÝ<pæp\$M J blazM76, pèrèM M y è3 JèM I\|è M Jè|GM ”3 /è| fM C4pèãããpèpè5M Q\R• | R•M J fM | f è“3M R èM R M J f M è“•\< \JJ3Qè•3\R\$M M {“3M y Q M M J f M è“•3J3f |MD“f{“Fè“M 3R{“3 Q M \ | #M



5. Schéma du spectrographe ELODIE. Le réseau échelle (408 x 102 mm) de 31 traits/mm, angle de blaze de 76°, permet d'obtenir le spectre de l'étoile de 390,6 à 681,1 nm, distribué sur 67 ordres (fig. 4). La dispersion croisée est obtenue 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  $\theta_i = 4^\circ$ , 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  $75^\circ$ . Cependant  $\theta_i$  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* 1 (1802) 12-48 ; voir [https://cutt.ly/BakerianLecture\\_pdf](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. 1 (1827), en deux parties : [https://cutt.ly/EJOSV7\\_1](https://cutt.ly/EJOSV7_1) et [https://cutt.ly/EJOSV7\\_2](https://cutt.ly/EJOSV7_2)
- 4• G.R. Harrison, "Development and design of echelle gratings and spectrographs", *Journal of the Optical Society of America*, 1 (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*, 1<sup>re</sup> 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  $\lambda$  7150 to  $\lambda$  10,000", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1 (1886) 457-469 ; [www.jstor.org/stable/109490](http://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 spectroscopie 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*, 1 (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

a è My | Q3 | M { " MR \ " f M Q R •  
 f • M J M f y • | \ ( | è y / M - at \$ M  
 y è | M R | M è | è R R M 8 P á 9 M 4  
 è " M • J f \ y M M P \$ æ à M Q M  
 M J F t f | - è • \ 3 | M M l è " • <  
 3 J M è M y | Q 3 f M ú M i 3 / J M i è  
 " " J \ 1 2 M 4 J { " J M è M | è J 3 f M J  
 \ Q y J 3 M " M f ' f • Q 5 M M  
 P æ æ à M J è M y | Q 3 | M y J è R •  
 f ' f • Q M f \ J è 3 | # M M J f M \ R •  
 • • M \ " - | • M J M y | 3 3 M  
 y / ' f 3 { " M R M ß Y P æ # M M f y  
 " • 3 J 3 f M " R M ( | è R M | f è " M /  
 y è | M i 3 J • \ R M " \ ' \$ M è R f M " R M  
 y " y 3 J J M J è R / # M

a è M " 3 3 Q M è y y J 3 è • 3 \ R M  
 Å M ' M 4 Å 3 | • è J M M Q è ( 3 R ( M '  
 3 R - R • M R M P æ æ à M y è | M  
 i è f è • è G è M / 3 | è f è G 3 \$ M M J è  
 a è M Ñ M ( " | M à M R M Q \ R • | M J  
 | f \ J " • 3 \ R \$ M { " 3 M f • M y | \ y | • 3  
 3 f y | f 3 \ R \$ M y " • M è • • 3 R | M  
 • | f M J - f \$ M ß Y Y M Y Y Y M y  
 | f è " M Å M ' M f • M è " J J  
 f f è 3 f M y \ " | M J F è f • | \ R \ Q 3 :  
 • J f \ y M " M i \ R • M ' è J \ Q è |  
 ( | \ " y M M J F M R f • 3 • " • M M ' J  
 F f • \ y / ' f 3 { " M M B | R \  
 y • 3 • f M 3 Q R f 3 \ R f M " M | f  
 R • M • | f M ' è - \ | è J M è " 3 M è y  
 f y è • 3 è J f N % M y è | M 3 Q y J \$  
 f 3 J M M J \ ( | M " R M • J f \ y  
 3 è Q • | M • M " R M f y • | \ Q • |  
 3 f y | f 3 \ R M | \ 3 f M M |  
 à Y N Y Y Y \$ M è - M f \ R M • • " "  
 J F J • | \ R 3 { " \$ M " è R f M " R M  
 M à \ R \ Y N B Y M Q M 4 P ß M ' \ 3 f M  
 J Q R • è 3 | M k M M M M Y M Q 5 M 8