

3.7 Échelon de Michelson

Note historique. Albert Michelson décrit en 1898 son échelon : une pile de lames de verre de même épaisseur, décalées en escalier, qui disperse la lumière avec un pouvoir de résolution très élevé et sert à étudier la structure fine des raies spectrales.

3.7.1 Principe

L'échelon de Michelson est un **réseau par transmission** dont les « traits » sont des marches de verre. On empile N lames de verre identiques d'épaisseur t (de l'ordre du centimètre), chacune décalée de s (de l'ordre du millimètre) par rapport à la précédente. Une onde plane qui traverse l'ensemble est divisée en N ondes par les marches, comme pour un réseau, mais deux marches voisines diffèrent du chemin $(n-1)t$ dans le verre.

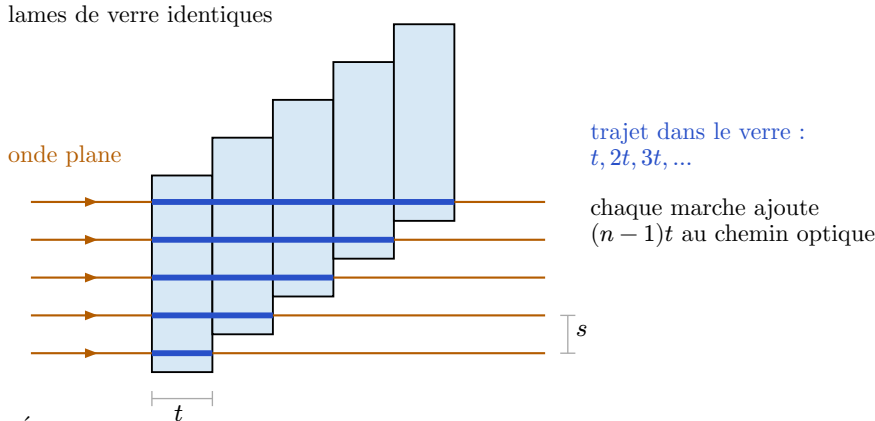


Fig. 32. – Échelon de Michelson (5 lames dessinées, de nombreuses lames en pratique) : à la hauteur de la j -ième marche, le rayon traverse j lames, soit jt de verre.

3.7.2 Maxima de l'éclairement

Pour une onde diffractée dans la direction θ , comptée positivement du côté des marches les moins épaisses, la différence de marche entre deux marches voisines est

$$\Delta = (n-1)t + s \sin \theta. \quad (46)$$

Les maxima sont aux angles tels que $\Delta = p\lambda$. Comme $(n-1)t$ est très grand devant λ , l'ordre p est énorme : pour $t = 1$ cm, $n = 1,5$ et $\lambda = 500$ nm, $p \simeq (n-1)t/\lambda = 10^4$.

L'éclairement est celui d'un réseau de N fentes, multiplié par l'enveloppe de diffraction d'une marche de largeur s :

$$I = I_1 \left(\frac{\sin(\pi s \theta / \lambda)}{\pi s \theta / \lambda} \right)^2 \left(\frac{\sin(N \pi \Delta / \lambda)}{N \sin(\pi \Delta / \lambda)} \right)^2. \quad (47)$$

L'enveloppe a la même largeur angulaire λ/s que l'écart entre deux ordres consécutifs : la lumière se concentre sur **un ou deux ordres seulement**.

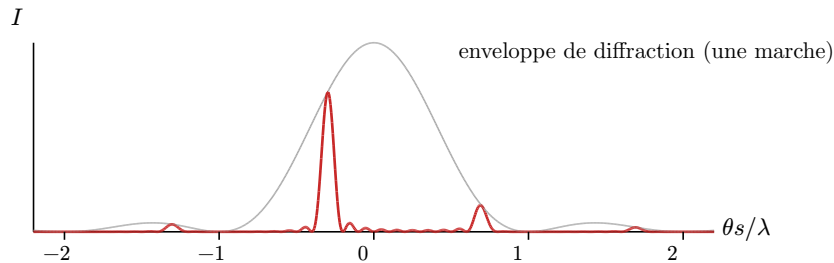


Fig. 33. – Éclairement de l'échelon en fonction de $\theta s / \lambda$ (ici $N = 10$) : seuls quelques ordres tombent sous l'enveloppe de diffraction.

3.7.3 Pouvoir de résolution et intervalle spectral libre

Au voisinage de $\theta = 0$, p varie comme $(n-1)t/\lambda$, d'où la dispersion $d\theta/d\lambda \simeq p/s$ et un pouvoir de résolution comme pour tout réseau : $\lambda/\delta\lambda = pN$. Les ordres sont très proches en longueur d'onde, d'où un intervalle spectral libre très petit :

Échelon de Michelson

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = pN \simeq N(n-1)\frac{t}{\lambda}, \quad \Delta\lambda_{\text{ISL}} \simeq \frac{\lambda^2}{(n-1)t} \quad (48)$$

Pour $N = 20$, $t = 1$ cm, $n = 1,5$ et $\lambda = 500$ nm : $\lambda/\delta\lambda \simeq 2 \cdot 10^5$, soit $\delta\lambda \simeq 2,5$ pm, et $\Delta\lambda_{\text{ISL}} \simeq 0,05$ nm. À $s = 1$ mm, la dispersion vaut environ 10 mrad/nm.

Pour être exact, n doit être remplacé par l'indice de groupe, ce qui change ces valeurs d'environ 10 %. L'ordre de grandeur est suffisant ici.

Exemple : effet Zeeman. Dans un champ de 1 T, les composantes d'une raie du visible à 500 nm sont écartées de $\Delta\nu \simeq 14$ GHz, soit $\Delta\lambda = \lambda^2 \Delta\nu / c \simeq 0,012$ nm. C'est bien plus que $\delta\lambda$ et moins que $\Delta\lambda_{\text{ISL}}$: l'échelon sépare ces composantes sans recouvrement d'ordres.

3.7.4 Comparaison avec le réseau et le Fabry-Perot

Instrument	Ordre p	Pouvoir de résolution	Intervalle spectral libre
Réseau (25 mm, 600 traits/mm)	~ 1	$1,5 \cdot 10^4$	toute la gamme visible
Échelon ($N = 20$, $t = 1$ cm)	$\sim 10^4$	$\sim 2 \cdot 10^5$	$\sim 0,05$ nm
Fabry-Perot ($e = 5$ mm, finesse 30)	$\sim 2 \cdot 10^4$	$\sim 6 \cdot 10^5$	$\sim 0,025$ nm

L'échelon comble l'écart entre les réseaux, très peu résolus mais d'intervalle spectral libre immense, et les Fabry-Perot, très résolus. Comme son intervalle spectral libre est étroit, on le fait précéder d'un monochromateur (prisme, réseau) qui sélectionne une petite plage de longueurs d'onde. Sa version en réflexion donne le réseau **échelle**, utilisé en astronomie.

Limites. Les lames doivent être identiques et très soigneusement taillées en épaisseur, et l'échelon ne fonctionne que sur une plage étroite de longueurs d'onde : il a été largement remplacé par le Fabry-Perot, plus simple à régler.

En résumé : l'échelon de Michelson est un réseau en escalier dont deux marches voisines diffèrent de $(n - 1)t$: à ordre énorme ($p \sim 10^4$) et à N marches, il atteint $\lambda/\delta\lambda = pN \sim 2 \cdot 10^5$ avec un intervalle spectral libre de l'ordre de 0,05 nm, ce qui le réserve à l'étude de structures fines de raies isolées.

Pour aller plus loin. A. A. Michelson, *Astrophysical Journal* 8, 37 (1898) ; P. Hariharan, *Optical Interferometry*, Academic Press.