

3.2 Réseau de diffraction (division du front d'onde)

Note historique. Le premier réseau est dû à David Rittenhouse (1785), qui tend des cheveux entre deux vis. Joseph Fraunhofer réalise en 1821 des réseaux de fils fins et mesure avec eux les longueurs d'onde des raies solaires. Dans les années 1880, Henry Rowland grave des réseaux d'une qualité inégalée et invente le réseau concave.

3.2.1 Principe

Un réseau est formé de N fentes (ou traits) identiques, équidistantes du pas a , éclairées par une onde plane. Chaque fente diffracte la lumière et joue le rôle d'une source secondaire : c'est une division du front d'onde en N ondes. À l'infini, dans la direction θ pour une incidence θ_i , deux fentes voisines diffèrent en marche de $\delta = a(\sin \theta - \sin \theta_i)$, soit en phase de $\varphi = 2\pi\delta/\lambda$. Les N ondes sont en phase quand $\delta = p\lambda$, avec p entier.

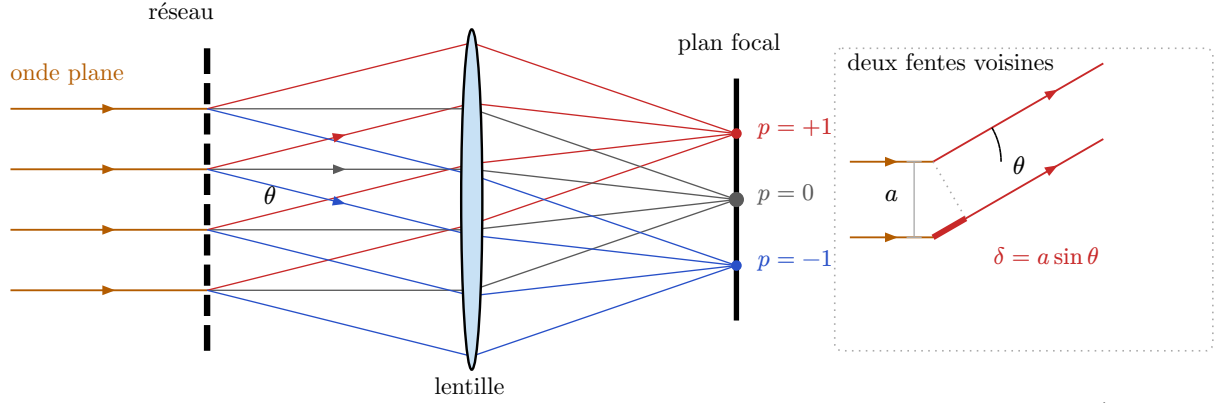


Fig. 27. – Réseau éclairé par une onde plane : les ordres $p = 0, \pm 1$ sont focalisés par une lentille. À droite, la différence de marche $\delta = a \sin \theta$ entre deux fentes voisines (angle exagéré).

Formule des réseaux

$$a(\sin \theta_p - \sin \theta_i) = p\lambda \quad (34)$$

Le nombre d'ordres est limité par $|\sin \theta_p| \leq 1$. Ordre de grandeur : un réseau de 600 traits/mm ($a = 1,67 \mu\text{m}$), éclairé à incidence normale par la raie du sodium ($\lambda = 589 \text{ nm}$), diffracte à $\theta_1 = 20,7^\circ$ et possède les ordres $p = -2$ à $+2$.

3.2.2 Intensité diffractée

La somme des N ondes, de même amplitude et déphasées de φ de fente en fente, est une série géométrique $\sum_{k=0}^{N-1} e^{jk\varphi} = (1 - e^{jN\varphi})/(1 - e^{j\varphi})$, d'où l'éclairement, avec I_1 celui d'une seule fente :

$$I = I_1 \left(\frac{\sin(N\varphi/2)}{\sin(\varphi/2)} \right)^2. \quad (35)$$

Les maxima principaux, de valeur $N^2 I_1$, sont aux ordres $\varphi = 2\pi p$. Entre deux d'entre eux, il y a $N - 1$ zéros et $N - 2$ maxima secondaires faibles. Le premier zéro suivant un maximum est à $N\varphi/2 = \pi$, d'où une largeur angulaire $\Delta\theta \simeq \lambda/(Na \cos \theta)$: plus N est grand, plus les pics sont fins.

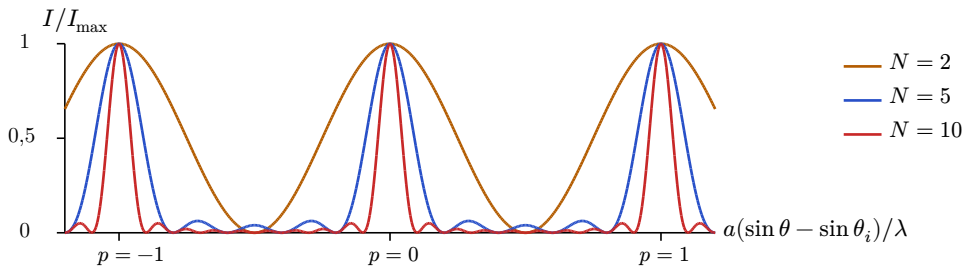


Fig. 28. – Intensité diffractée par N fentes, normalisée : les pics se resserrent quand N augmente.

3.2.3 Dispersion et pouvoir de résolution

La dispersion angulaire vaut $d\theta/d\lambda = p/(a \cos \theta)$. Deux longueurs d'onde λ et $\lambda + \delta\lambda$ sont séparées (critère de Rayleigh) quand le maximum de l'une tombe sur le premier zéro de l'autre, soit $(d\theta/d\lambda)\delta\lambda = \lambda/(Na \cos \theta)$.

Pouvoir de résolution

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = pN \quad (36)$$

Pour le doublet du sodium, $\lambda/\delta\lambda \simeq 1000$: au premier ordre, $N = 1000$ traits, soit 0,6 mm de réseau à 600 traits/mm, suffisent. Un réseau de 25 mm contient $N = 15\,000$ traits : $\lambda/\delta\lambda = 1,5 \cdot 10^4$.

3.2.4 Limite de taille

Avec $L = Na$ la largeur éclairée, $pN = L(\sin\theta - \sin\theta_i)/\lambda \leq 2L/\lambda$: la résolution ne dépend que de la taille du réseau, pas de son pas. Pour $L = 10$ cm et $\lambda = 500$ nm, $\lambda/\delta\lambda \leq 4 \cdot 10^5$. Au-delà, il faudrait un réseau plus grand, très difficile à graver, ou des mosaïques de réseaux. Un Fabry-Pérot de 5 mm d'épaisseur atteint déjà $6 \cdot 10^5$: pour les très hautes résolutions, les interféromètres prennent le relais.

3.2.5 Types de réseaux

Type	Principe	Usage
Transmission	fentes ou traits opaques sur une lame de verre	travaux pratiques, 100 à 1000 traits/mm
Gravé, en réflexion	traits gravés au diamant sur une surface métallisée	spectromètres, monochromateurs
Blazé	traits en dents de scie qui concentrent la lumière dans un ordre	rendement jusqu'à 80 %
Holographique	franges de deux faisceaux laser enregistrées dans une résine	peu de lumière parasite, ultraviolet
Échelle	grand pas, ordres élevés ($p \sim 10$ à 100)	très haute résolution en astronomie

Prix. Un réseau de laboratoire de 25 mm $\times$ 25 mm, à 600 traits/mm, coûte environ 100 à 200 € ; il est copié à partir d'un réseau maître, bien plus cher à graver. Les lames de réseau en plastique pour les travaux pratiques ne coûtent que quelques euros.

3.2.6 Réseaux dans la vie courante

Les pistes d'un CD (pas 1,6 μm), d'un DVD (0,74 μm) et d'un Blu-ray (0,32 μm) forment un réseau en réflexion : les irisations de leur tranche en sont la signature. À incidence normale, $a = \lambda/\sin\theta_1$. Avec un laser de 633 nm, un CD diffracte à $\theta_1 \simeq 23^\circ$ et un DVD à 59° , ce qui permet de mesurer leur pas avec un pointeur laser. Pour le Blu-ray, a est inférieur à λ : il ne diffracte pas la lumière visible. Les plumes et les ailes de papillon donnent des irisations de même nature.

3.2.7 Du réseau au cristal

Un cristal est un réseau à trois dimensions : des plans atomiques, espacés de d , réfléchissent partiellement les rayons X, et les ondes réfléchies sont en phase si

$$2d \sin\theta = p\lambda \quad (\text{loi de Bragg}). \quad (37)$$

Max von Laue observe la diffraction des rayons X par un cristal en 1912, puis W. H. et W. L. Bragg en déduisent la structure de cristaux (1913). Il faut $\lambda \lesssim 2d$, soit des rayons X pour d de l'ordre de 0,1 à 0,3 nm.

Pour aller plus loin. J.-P. Pérez, *Optique : fondements et applications*, Dunod ; E. Hecht, *Optique*, Pearson ; C. Palmer et E. Loewen, *Diffraction Grating Handbook*, Newport.