

2.7 Interféromètre de Mach-Zehnder

Note historique. Ludwig Zehnder (1891) puis Ludwig Mach (1892), fils d'Ernst Mach, proposent ce montage à deux bras séparés, où les faisceaux ne reviennent pas sur eux-mêmes. Il est aujourd'hui très utilisé en optique intégrée (modulateurs) et en optique quantique.

2.7.1 Principe

Interféromètre à **division d'amplitude** à deux ondes : une première séparatrice S_1 divise le faisceau en deux bras, qui suivent des chemins distincts avant d'être recombinaés par une seconde séparatrice S_2 . Contrairement au Michelson, chaque faisceau traverse l'appareil une seule fois, sans retour sur lui-même, et la recombinaison donne **deux sorties**.

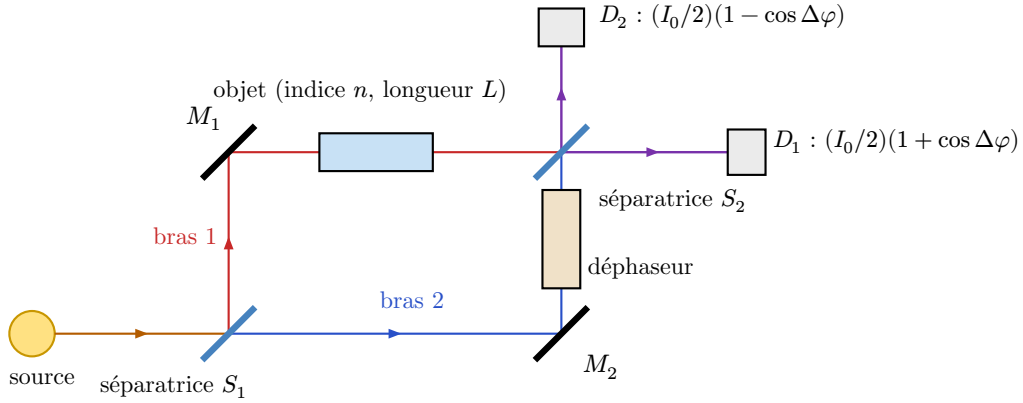


Fig. 20. – Interféromètre de Mach-Zehnder : les deux bras sont séparés dans l'espace, ce qui permet de placer un objet dans un seul d'entre eux. Les deux sorties D_1 et D_2 sont complémentaires.

2.7.2 Deux sorties complémentaires

Avec des séparatrices idéales 50/50, de coefficients $t = 1/\sqrt{2}$ en transmission et $r = j/\sqrt{2}$ en réflexion, et des phases φ_1 et φ_2 acquises dans les bras, les amplitudes aux deux sorties sont

$$E_1 = E_0 r t (e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2}), \quad E_2 = E_0 (r^2 e^{j\varphi_1} + t^2 e^{j\varphi_2}) = \left(\frac{E_0}{2} \right) (e^{j\varphi_2} - e^{j\varphi_1}). \quad (26)$$

Avec $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\delta/\lambda$:

Sorties du Mach-Zehnder

$$I_1 = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \Delta\varphi), \quad I_2 = \frac{I_0}{2} (1 - \cos \Delta\varphi), \quad I_1 + I_2 = I_0 \quad (27)$$

L'énergie qui manque sur une sortie apparaît sur l'autre : les deux systèmes de franges sont en opposition.

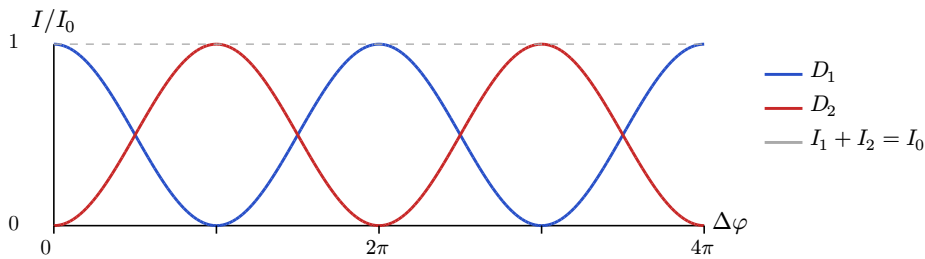


Fig. 21. – Éclairements des deux sorties en fonction du déphasage : leur somme reste égale à I_0 .

2.7.3 Pourquoi un Mach-Zehnder plutôt qu'un Michelson ?

Michelson

Mach-Zehnder

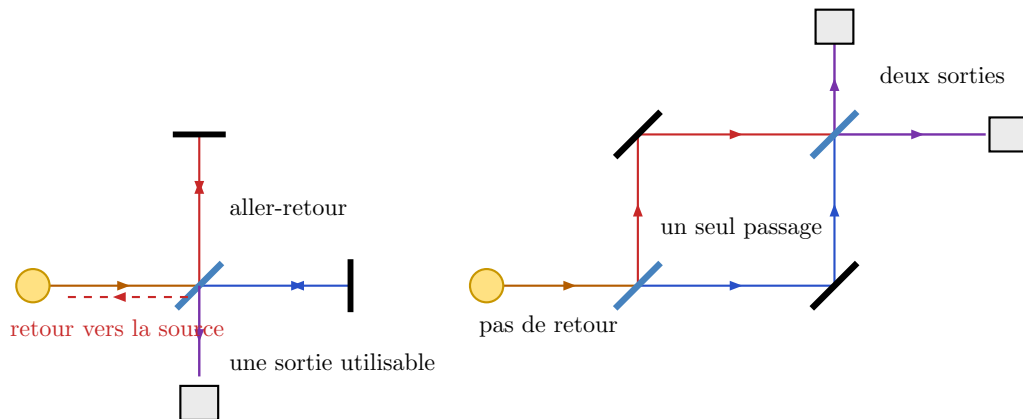


Fig. 22. – Du Michelson au Mach-Zehnder : en séparant les bras et en ajoutant une seconde séparatrice, on supprime le retour vers la source et on gagne une seconde sortie.

Critère	Michelson	Mach-Zehnder
Parcours	chaque bras est parcouru deux fois, à l'aller et au retour	chaque bras est parcouru une seule fois
Sorties	une seule utilisable : l'autre retourne vers la source	deux sorties accessibles, complémentaires
Retour vers la source	une partie de la lumière revient dans le laser et le perturbe	aucune lumière ne revient vers la source
Accès aux bras	bras proches de la séparatrice, faisceaux aller et retour superposés	bras séparés : on place un objet dans un seul, traversé une seule fois
Compensation	compensatrice nécessaire en lumière blanche	chaque faisceau traverse chaque séparatrice une fois : compensation naturelle
Réglage	simple, un seul élément semi-réfléchissant	plus encombrant, quatre éléments à régler

2.7.4 Applications

Indice d'un milieu transparent. Avec un objet de longueur L dans un bras, $\Delta\varphi = 2\pi(n-1)L/\lambda$: on compte $N = (n-1)L/\lambda$ franges qui défilent. Pour $L = 10$ cm d'air ($n-1 \simeq 2,7 \cdot 10^{-4}$) et $\lambda = 633$ nm, on trouve $N \simeq 43$ franges quand on vide la cellule. Il sert aussi à visualiser les variations de densité dans les écoulements de gaz et les ondes de choc.

Modulateur optique. En optique intégrée, un déphasage proportionnel à la tension, par effet électro-optique (niobate de lithium), est appliqué dans un bras, et $I = I_0 \cos^2(\pi V/(2V_\pi))$: le Mach-Zehnder module la lumière des fibres optiques de télécommunications.

Optique quantique. Un photon unique est détecté en D_1 ou en D_2 avec les probabilités $\cos^2(\Delta\varphi/2)$ et $\sin^2(\Delta\varphi/2)$; si l'on retire S_2 , on connaît le chemin suivi et les franges disparaissent.

En résumé : le Mach-Zehnder est un Michelson « déplié » : chaque faisceau passe une fois, et l'on gagne deux sorties complémentaires, l'absence de retour vers la source et un accès séparé à chaque bras.

Pour aller plus loin. P. Hariharan, *Optical Interferometry*, Academic Press ; M. Born et E. Wolf, *Principles of Optics*, Cambridge University Press ; L. Zehnder, *Zeitschrift für Instrumentenkunde* (1891).