

## EFFET DOPPLER – VELOCIMETRIE

### 1. Objectifs

Il s'agit de mesurer des vitesses de déplacement d'un disque en rotation allant du mm/s au cm/s en utilisant l'effet Doppler, c'est-à-dire la modification de la fréquence lumineuse diffusée par un objet due à la vitesse de cet objet. Dans deux montages, nous allons mesurer les battements dus à la petite différence de fréquence entre une onde de référence et l'onde diffusée par le disque en rotation. La fréquence de ces battements nous permettra de calculer la vitesse du disque.

### 2. Introduction

Lorsqu'une source monochromatique de fréquence  $\nu$  et un récepteur sont en mouvement relatif avec une vitesse radiale  $\vec{u}$  (c'est à la composante de la vitesse selon la direction joignant la source au détecteur) faible devant la vitesse  $c$  de la lumière, la fréquence reçue par le détecteur est décalée de  $\Delta\nu = \nu u/c$ .

Remarque :  $u$  et  $\Delta\nu$  peuvent être positifs (si source et récepteur se rapprochent) ou négatifs (s'ils s'éloignent).

Exemple : le disque en rotation est éclairé par un faisceau laser de longueur d'onde  $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$  en un point P placé à la distance  $R=10 \text{ mm}$  de l'axe. Il tourne à la fréquence  $N=1,0 \text{ tour/s}$ . Les points éclairés se déplacent à la vitesse  $V=2\pi RN$  dans une direction faisant un angle  $\theta=80^\circ$  avec le faisceau incident. Voir figure 1.

- Calculer la vitesse radiale  $u$ .
- Calculer en kHz la variation de fréquence  $\Delta\nu$  de la lumière reçue.

### 3. Composition de deux fréquences voisines – Battements

#### 3.1 Simulation

Ouvrir le fichier **Battements.xls**. On compose deux vibrations de fréquences voisines (choisir par exemple  $N_1=0,2 \text{ Hz}$  et  $N_2=0,22 \text{ Hz}$ ) et d'amplitudes voisines (par exemple  $a_1=10$  et  $a_2=8$ ). Lancer l'animation.

Observer l'amplitude de la superposition des deux ondes : elle varie de  $|a_1-a_2|$  lorsque les

ondes sont en opposition de phase à  $a_1+a_2$  lorsqu'elles sont en phase. Cette variation est périodique de fréquence  $\Delta N = |N_1 - N_2|$ .

On dit que l'amplitude de l'onde résultante bat à la fréquence  $\Delta N$ .

- Avec la simulation, mesurer la période des battements. En déduire la fréquence de battement.

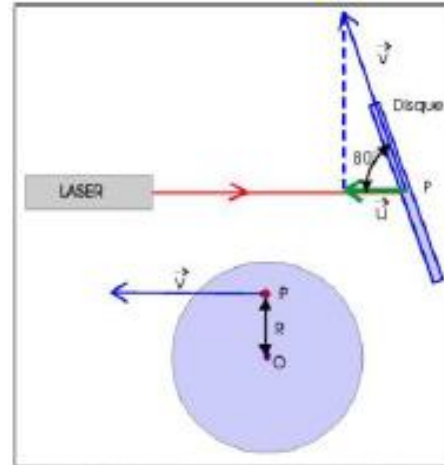


Figure 1 : Disque (vue de dessus et vue de face)

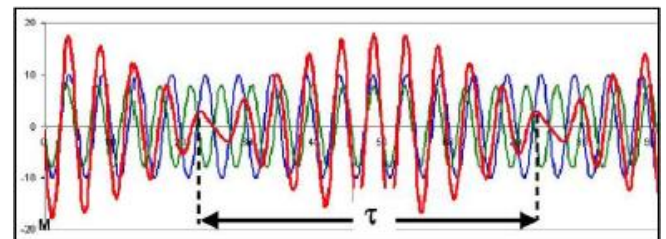


Figure 2 : Battements de deux fréquences voisines

#### 3.2 Montage de Michelson

Nous allons utiliser le montage de Michelson pour faire interférer l'onde de fréquence  $\nu$  émise par un laser He-Ne et l'onde de fréquence voisine  $\nu+\Delta\nu$  émise par le disque en rotation.

Réaliser le montage de la figure 3. Régler la vitesse de rotation du disque à environ 1 tour en 10s ( $N=0,1 \text{ tours/s}$ ).

La lumière rétrodiffusée par le point P en mouvement, de fréquence  $\nu+\Delta\nu$ , doit pouvoir interférer avec la lumière réfléchiée par le miroir M.

La carte électronique capte les battements et renvoie une tension de fréquence  $\Delta\nu$  et d'amplitude proportionnelle à l'amplitude des battements.

$L_1$  sert à collecter la lumière diffusée par P et en faire un faisceau parallèle.

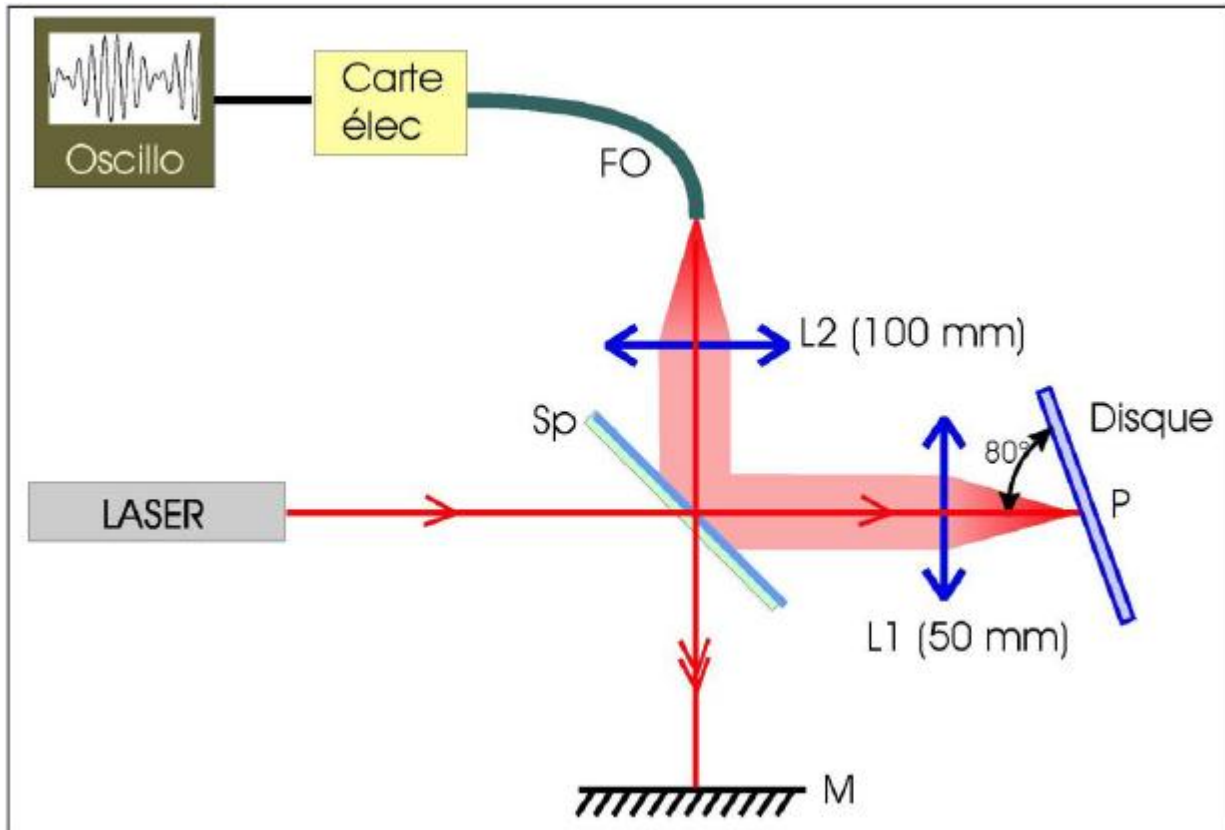


Figure 3 : Montage interférométrique de Michelson

- Visualiser le signal à l'oscilloscope (l'exemple de l'introduction donne l'ordre de grandeur de  $\Delta v$ . En déduire la base de temps.)
- Faire plusieurs mesures de  $\Delta v$  dans les mêmes conditions. Calculer et noter la fréquence moyenne ainsi que la distance R du point de mesure par rapport à l'axe du moteur.

#### Montrer votre montage.

#### 3.3 Montage par rétro-injection (self-mixing)

Dans ce montage (voir figure 4), l'onde de fréquence  $\nu + \Delta\nu$  rétrodiffusée par P est directement injectée dans la cavité du laser à l'aide de  $L_1$ . Elle interfère alors avec l'onde de fréquence  $\nu$  dans la cavité.

Une partie du faisceau est prélevée par la lame séparatrice (noter son changement d'orientation par rapport au montage de Michelson). Cette partie contient le signal de battement à mesurer.

- Réaliser le montage de la figure 4.
- Noter la fréquence du signal obtenu.

- Faire plusieurs mesures dans les mêmes conditions. Calculer la fréquence moyenne.

#### Montrer votre montage.

#### 4. Interprétation et exploitation

##### 4.1 Composition de deux vibrations

On représente les deux vibrations par :

- $S_1 = ae^{i\omega t}$
- $S_2 = be^{i(\omega + \Delta\omega)t}$

avec  $\omega = 2\pi\nu$  et  $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$ .

A et b sont les amplitudes des deux ondes qui interfèrent ;  $a^2$  et  $b^2$  sont leurs intensités.

- Déterminer l'amplitude complexe de la superposition des deux ondes.
- En déduire que l'intensité lumineuse résultant de l'interférence est :  $I = a^2 + b^2 + 2ab \cos(\Delta\omega t)$ .
- Quelles opérations doit assurer l'électronique pour obtenir un signal électrique de tension U proportionnelle à  $\cos(\Delta\omega t)$  ? Justifier votre réponse.

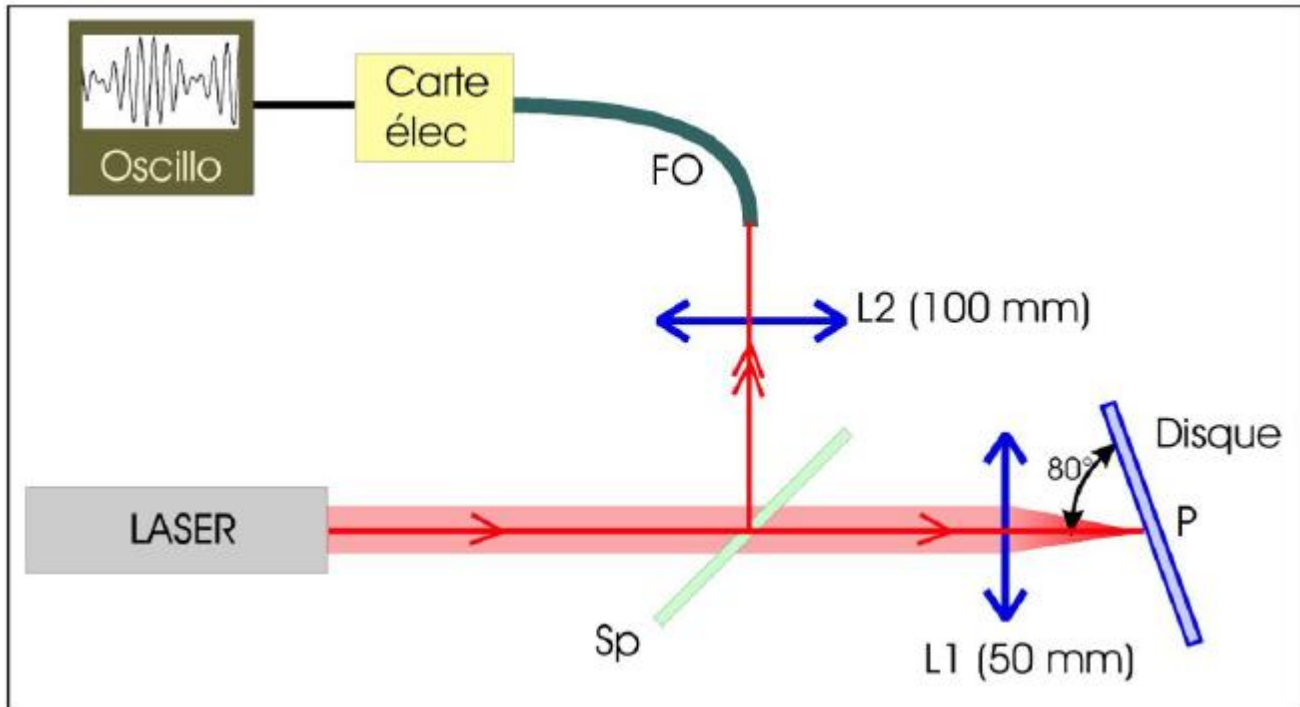


Figure 4 : Montage par self-mixing

#### 4.2 Calcul de la vitesse du disque

Nous allons commencer par relier le  $\Delta\nu$  mesuré à la vitesse radiale du disque. Il s'agit de voir que l'effet Doppler intervient deux fois : lorsque le point P reçoit la lumière du laser, il s'en rapproche. La fréquence reçue est augmentée de  $vu/c$ . Puis le point P réémet la lumière en se rapprochant du capteur : le capteur voit une fréquence augmentée à nouveau.

- Montrer que la variation globale de fréquence est  $\Delta\nu=2vu/c$ .
- A partir de vos mesures de  $\Delta\nu$ , en déduire la vitesse radiale  $u$ , puis la vitesse  $V$  de déplacement au point P en supposant l'angle  $\theta$  égal à  $80^\circ$ .
- En déduire la vitesse de rotation du disque en tours/s en tenant compte de la valeur de  $R$  que vous avez mesurée (si vous ne l'avez pas mesurée, prenez  $R=10$  mm).
- Que se passe-t-il si  $\theta=100^\circ$  avec  $\vec{u}$  dans la direction du faisceau incident ?

Remarques : 1)  $v$  est beaucoup plus grand que  $\Delta\nu$ .

On peut admettre que  $\frac{\Delta(v+\Delta\nu)}{v+\Delta\nu} = \frac{\Delta\nu}{v}$ .

2) Le phénomène de rétro-injection, qui perturbe le spectre et la puissance d'émission des lasers, est souvent considéré comme un parasite, notamment pour les télécommunications. Mais il a aujourd'hui de nombreuses applications :

mesures de vitesses, de débits, de déplacements, souris optiques ...



Figure 5 : Montage de Michelson

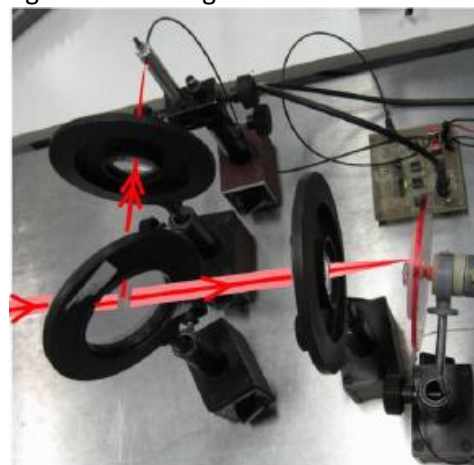


Figure 6 : Montage de self-mixing

NOMS : .....

DATE :

.....

.....

**FEUILLE A RENDRE EN FIN DE SEANCE**

§	Travail à faire	A noter sur place	A noter à l'écrit
2	Introduction		____ / 2
3.1	Simulation	____ / 2	
3.2	Montage de Michelson	____ / 4	
3.3	Montage de rétro-injection	____ / 3	
4.1	Battements	Démonstration	____ / 2
		Opérations électroniques	____ / 2
4.2	Vitesse	Expression de $\Delta v$	____ / 1
		Calcul de u et V	____ / 3
		Cas où $\theta=100^\circ$	____ / 1

**TOTAL : \_\_\_\_\_ / 20****Les comptes-rendus sont à rendre une semaine après le TP, le même jour de la semaine.****Un jour de retard : -2 points****Deux jours de retard : note / 2****Au-delà : points sur place / 2**