

TP n°21 Propriétés générales des ondes: Etude expérimentale de l'effet Doppler

OBJECTIFS DU TP: étudier l'effet Doppler pour des ondes ultrasonores.

INTRODUCTION: L'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde (onde mécanique, acoustique, électromagnétique, etc.) entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. L'effet Doppler se manifeste par exemple pour les ondes sonores dans la perception de la hauteur du son d'un moteur de voiture, ou de la sirène d'un véhicule d'urgence. Le son est différent selon que l'on est dans le véhicule (l'émetteur est immobile par rapport au récepteur), que le véhicule se rapproche du récepteur (le son est plus aigu) ou qu'il s'éloigne (le son est plus grave).

Cet effet est utilisé en acoustique pour mesurer des vitesses : Radar auto, Sonar sous-marin, Doppler sanguin,... En astronomie l'effet Doppler relativiste appliqué à l'onde EM permet de mesurer la vitesse radiale des étoiles, galaxies, nuages de gaz, etc. (décalage vers le rouge ou le bleu des raies spectrales).

1 Résultats théoriques

1.1 Récepteur et/ou émetteur mobiles

Supposons que l'émetteur et le récepteur se déplacent sur une même droite:



Figure 1: Emetteur et récepteur mobiles

et considérons le référentiel R_m du milieu dans lequel se propage l'onde (par exemple l'atmosphère pour une onde sonore). On note c la célérité de l'onde dans ce référentiel. Appelons V_E et V_R les vitesses algébriques de l'émetteur (source) et du récepteur par rapport au

référentiel R_m .

Par convention, les vitesses seront comptées comme positives dans la direction de propagation du signal (de l'émetteur vers le récepteur). Ainsi une vitesse V_E positive et V_R négative correspondra à un rapprochement entre source et récepteur.

Si f_E est la fréquence de l'onde émise par l'émetteur mesurée dans son référentiel et f_R la fréquence de l'onde reçue par le récepteur mesurée dans son référentiel alors ces fréquences sont liées par la relation:

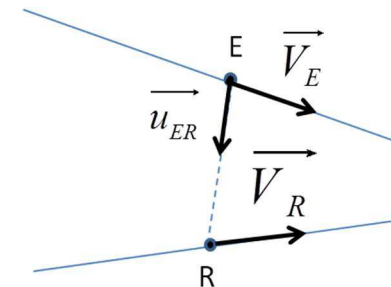
$$f_R = \frac{c - V_R}{c - V_E} f_E = \frac{1 - \frac{V_R}{c}}{1 - \frac{V_E}{c}} f_E \quad (1)$$

De nombreuses analogies permettent de retrouver rapidement ce résultat.

- **Simplification** dans le cas $V \ll c$:

$$\frac{f_R - f_E}{f_E} = \frac{\Delta f}{f_E} \approx \frac{V_E - V_R}{c}$$

- **Généralisation** pour des vitesses d'orientations quelconques de l'émetteur et du récepteur:



$$f_R = \frac{c - \vec{V}_R \cdot \vec{e}_{ER}}{c - \vec{V}_E \cdot \vec{e}_{ER}} f_E =$$

$$1 - \frac{\vec{V}_R \cdot \vec{e}_{ER}}{c} f_E$$

$$1 - \frac{\vec{V}_E \cdot \vec{e}_{ER}}{c}$$

On remarque que seules les composantes des vitesses dans la direction u_{ER} sont prises en compte.

1.2 Emetteur et Récepteur fixes et Cible en mouvement



Dans ce cas, la cible (écran) joue à la fois le rôle de récepteur et d'émetteur il suffit donc de reprendre la relation (1) et de calculer en deux temps la fréquence mesurée par le récepteur. On obtient alors la relation suivante :

$$f_R = \frac{c - V}{c + V} f_E$$

Simplification dans le cas où $V \ll c$:

$$\frac{f_E - f_R}{f_E} = \frac{\Delta f}{f_E} \approx \frac{2V}{c}$$

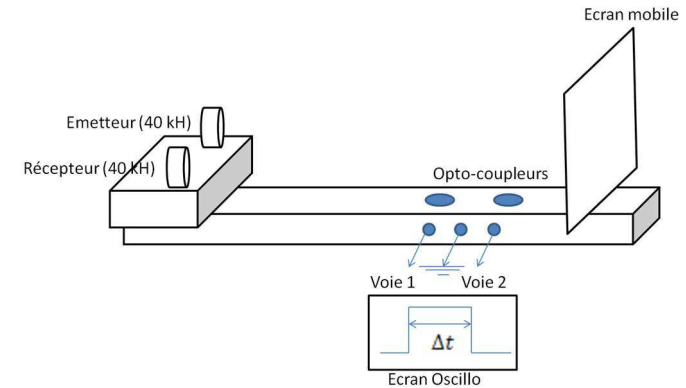
2 Mise en oeuvre pratique

2.1 Présentation du Matériel

En plus du matériel classique d'acquisition de la salle de TP, vous avez à votre disposition pour cette expérience le matériel spécifique suivant:

- un banc plastique sur lequel vous pouvez déplacer un écran à la main,
- un boîtier avec un émetteur et un récepteur d'ondes ultrasonores constitués d'une céramique piézoélectrique fonctionnant à $40kHz$,
- deux capteurs optiques sensibles au passage de l'écran mobile, alimentés par une pile 9V (penser à éteindre le dispositif en fin d'expérience),

- divers boîtiers électroniques : multiplieur, sommateur, passe bas et haut



2.2 Expérience

Le but de cette partie est de vérifier expérimentalement l'effet Doppler. Pour cela vous devez mettre en œuvre une expérience avec le matériel à disposition et effectuer des mesures de façon à confirmer expérimentalement la relation donnant le lien entre la fréquence d'émission et la fréquence de réception décrit dans la partie théorique.

Il est attendu:

- Une discussion rapide et argumentée sur le **choix de la fréquence de travail pour l'émetteur ultra-sonore**.
- Un **tracé expérimental** de qualité permettant de valider la relation décrivant l'effet Doppler.
- Une **mesure de la vitesse** du son avec discussion de la précision obtenue.
- Une explication précise du rôle joué dans la détection du signal par les circuits électroniques
- Une explication du principe du Radar.

ANNEXES:

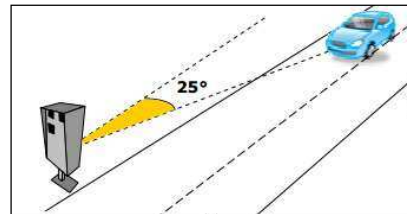
1 Cristal piézoélectrique

Un cristal est dit piézoélectrique si lorsqu'il est soumis à une tension électrique, il subit une déformation. Cette déformation est à l'origine de la formation des ondes acoustiques. En soumettant un cristal piézoélectrique à une tension électrique variable, on réalise l'émetteur. Le même cristal piézoélectrique soumis à une contrainte mécanique (pression) va voir apparaître entre deux de ses faces une tension électrique. La mesure de cette tension électrique permet d'enregistrer l'onde ultrasonore. On a alors un récepteur. Emetteur et récepteur sont identiques mais utilisés de façon contraire.

2 Exemples d'utilisation de l'effet Doppler

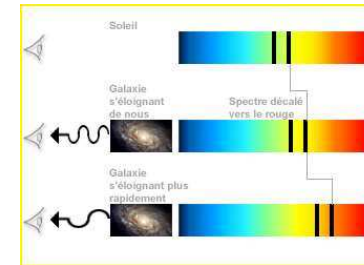
2.1 Ondes électromagnétiques

RADARS ROUTIER Pour que les mesures réalisées par les radars (fixes ou mobiles) soient exactes, ceux-ci doivent être réglés à 25° par rapport à l'axe du déplacement (arrêtés du 7 janvier 1991 et 31 décembre 2001).



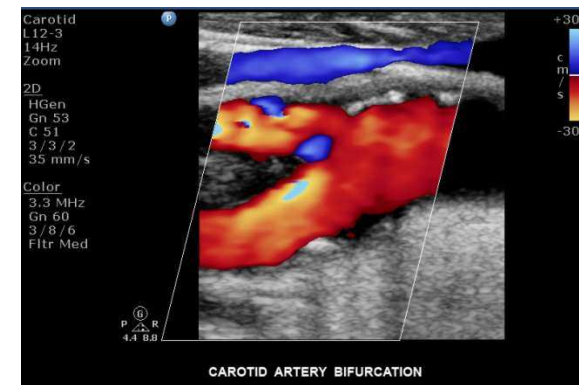
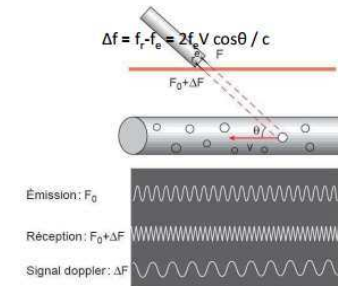
DÉCALAGE VERS LE ROUGE (REDSHIFT) DU SPECTRE DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE ÉMIS PAR LES GALAXIES ÉLOIGNÉES, PREUVE QU'ELLES S'ÉLOIGNENT DE LA NÔTRE.

En 1929, le physicien Edwin Hubble a relevé le spectre de la lumière issue d'autres galaxies dont la distance d à la Terre était connue. Il a reconnu la signature spectrale d'éléments chimiques connus, mais décalée vers le rouge. En mesurant ce décalage, il en a déduit la vitesse radiale d'éloignement de ces galaxies. La théorie exacte fait appel à la relativité générale d'Einstein et les mesures confirment l'expansion de l'univers (loi de Hubble: $v_{rad} = H \cdot d$, avec H constante de Hubble).



2.2 Ondes sonores

L'échographie Doppler permet de mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans un vaisseau:



Sur l'échographie d'une carotide ci-dessus, les zones bleues correspondent à un écoulement vers l'observateur, les zones rouges à un écoulement dans le sens opposé. On peut ainsi repérer des anomalies dues à la présence de sténoses (plaques qui bouchent les vaisseaux, augmentent localement la vitesse moyenne de l'écoulement, et provoquent des turbulences avec des inversions du champ des vitesses).