

# Vitesse du son dans l'air, ALI et effet Doppler

Ce TP est constitué de trois parties distinctes, dont l'objectif final est de mettre en œuvre une chaîne de mesure de la vitesse d'un chariot mobile par le biais de l'effet Doppler sur les ondes acoustiques.

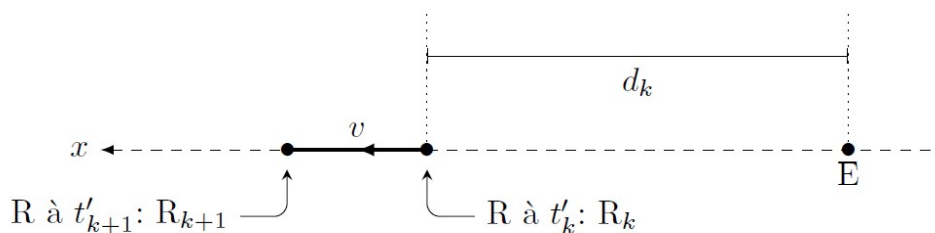
Compétence	En détail	++	+	-	--
Analyser	Proposer un protocole de mesure d'une longueur d'onde acoustique, minimisant les incertitudes.				
Réaliser	Déterminer la fonction de transfert d'un montage amplificateur inverseur.				
Réaliser	Mettre en œuvre un circuit avec ALI sur une breadboard et vérifier son fonctionnement.				
Analyser	Élaborer un protocole de détection synchrone pour mesurer une différence de fréquences.				
Valider	Analyser <u>tous</u> les résultats ou observations, de manière critique.				
Valider	Évaluer une incertitude de type B et composer les incertitudes (quotient).				
Valider	Comparer deux valeurs (écart normalisé).				

## I Travail à effectuer avant la séance de TP : modélisation de l'effet Doppler (inspiré de Ecrit Centrale PC 2025)

On étudie un point  $E$  qui émet périodiquement un signal aux instants  $t_k = kT_e$ , où  $T_e$  est la période d'émission et  $k \in \mathbb{N}$ . Ce signal se propage avec la célérité  $c$  puis est reçu au point  $R$  qui est en mouvement rectiligne à la vitesse  $\vec{v} = v\vec{e}_x$  ( $v > 0$ ) et s'éloigne ainsi de  $E$  (figure 1).

L'effet Doppler consiste dans le fait que la fréquence de l'onde reçue,  $f_r$  (période  $T_r$ ), diffère de la fréquence de l'onde émise  $f_e = \frac{1}{T_e}$  :  $f_r \neq f_e$ .

L'objectif de cette partie est de déterminer la relation entre  $f_r$  et  $f_e$ .



**Figure 1** – Réception d'un signal périodique par un récepteur en éloignement longitudinal

On note  $t'_k$  et  $t'_{k+1}$  les instants de réception des signaux émis aux instants  $t_k$  et  $t_{k+1}$  et on note  $d_k$  la distance  $R_k E$  à l'instant  $t'_k$ .

1. Exprimer les distances  $d_k = R_k E$  et  $d_{k+1} = R_{k+1} E$  en fonction de  $c$ ,  $t_k$ ,  $t_{k+1}$ ,  $t'_k$  et  $t'_{k+1}$ . En déduire l'expression de  $t'_{k+1} - t'_k$  en fonction de  $c$ ,  $v$  et  $T_e$ .
2. Justifier que la réception des signaux par  $R$  est périodique et exprimer la fréquence  $f_r$  de l'onde reçue en fonction de  $c$ ,  $v$  et  $f_e$ .

**Remarque :** Dans le cas où le récepteur se rapproche de l'émetteur, le raisonnement effectué ci-dessus reste vrai en prenant  $v < 0$ .

**Remarque :** On s'est ici restreint à l'effet Doppler longitudinal : déplacement de la cible et propagation de l'onde se font selon le même axe ( $Ox$ ).

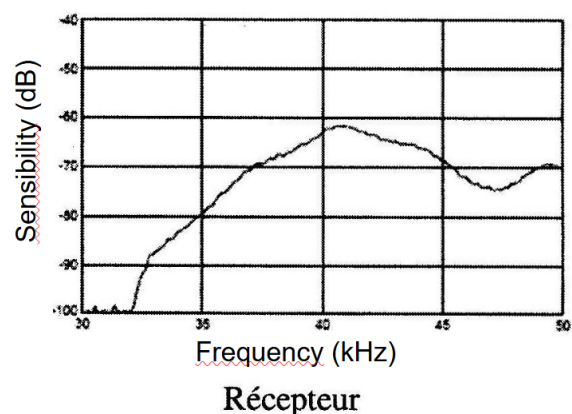
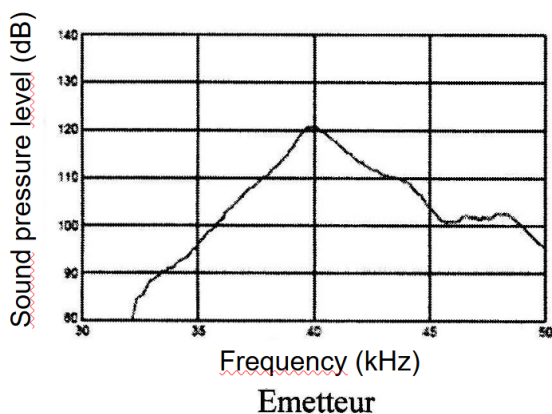
## II Vitesse de propagation des ultrasons dans l'air (1 h)

L'objectif de cette partie est de déterminer la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore (US) dans l'air.

Matériel à disposition, en plus du matériel usuel d'électronique : 1 émetteur US avec son bloc d'alimentation, 2 récepteurs US, un support gradué pour placer et déplacer l'émetteur et les récepteurs, un thermomètre (au fond de la salle).

### II.1 Réglage de l'émetteur à ultrasons

Les émetteurs et récepteurs ultrasonores usuels sont constitués d'un cristal de quartz, qui est un matériau piézoélectrique (= il se déforme mécaniquement sous l'effet d'une tension électrique, et réciproquement). Les diagrammes suivants donnent, en fonction de la fréquence, la pression acoustique de l'onde émise (pour une tension d'alimentation de référence) et la sensibilité du récepteur.



- D'après les courbes fournies, quelle fréquence d'émission devrait conduire au signal reçu le plus intense ?
- Sur le bloc d'alimentation de l'émetteur ultrasonore, choisir une alimentation par une tension sinusoïdale émise en continu (ne pas choisir le mode "impulsions ultrasonores").
- Placer un récepteur en face de l'émetteur et observer à l'oscilloscope le signal reçu.
- Ajuster la fréquence de l'émetteur pour que la réponse du récepteur soit la meilleure possible. Noter la valeur de cette fréquence et **ne plus la modifier**.

## II.2 Mesure de la longueur d'onde acoustique

- Placer les deux récepteurs l'un à côté de l'autre, face à l'émetteur. Déplacer l'un des récepteurs par rapport à l'autre très lentement. Qu'observe-t-on sur les signaux reçus ? Expliquer votre observation.
- Proposer alors un (ou plusieurs) protocole(s) de mesure de la longueur d'onde acoustique. *Différents protocoles sont possibles. Essayer d'en proposer plusieurs et de chercher celui qui permettra de minimiser l'incertitude sur la longueur d'onde.*

**Appeler le professeur pour discuter de l'observation expérimentale et de vos propositions de protocole.**

- Mettre en œuvre le protocole proposé pour mesurer la longueur d'onde acoustique.

## II.3 Détermination de la vitesse des ultrasons dans l'air

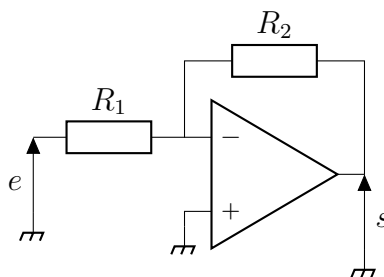
- Dédurre des deux parties précédentes la valeur expérimentale de la vitesse de l'onde ultrasonore dans l'air.
- Comparer avec la valeur théorique fournie par le modèle du gaz parfait pour l'air :  $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$  avec  $\gamma = 1.4$  (modèle du GP diatomique),  $M = 29 \text{ g/mol}$  la masse molaire de l'air,  $T$  la température de la pièce et  $R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

## III Montage amplificateur inverseur (1 h)

Dans la dernière partie, nous allons mettre en œuvre une chaîne complète de mesure de la vitesse d'un chariot mobile par effet Doppler. Le souci est que l'onde acoustique reçue par le récepteur piézoélectrique a une amplitude bien plus faible que l'onde émise initialement. L'objectif de cette partie est alors de réaliser un montage amplificateur inverseur, qui nous permettra d'augmenter l'amplitude du signal reçu.

Matériel à disposition, en plus du matériel usuel d'électronique : Amplificateur linéaire intégré (ALI) TL081, ensemble de résistances.

Schéma du montage amplificateur inverseur :



### III.1 Modélisation : détermination de la fonction de transfert

On considère le modèle de l'ALI idéal.

- Justifier que l'ALI fonctionne en régime linéaire.
- Déterminer la fonction de transfert de ce montage et justifier le nom de ce montage : amplificateur inverseur.

## III.2 Expérimental

### a Choix des composants

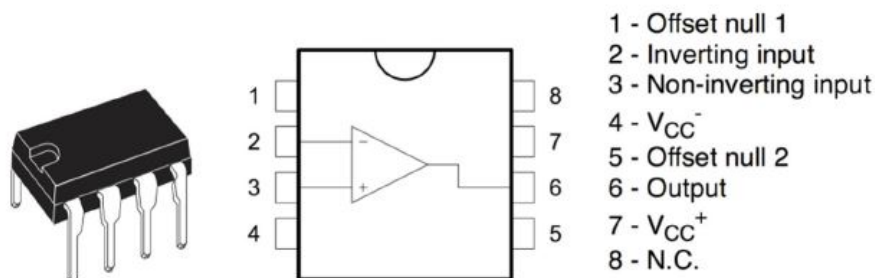
On souhaite réaliser un amplificateur avec un gain de l'ordre de 50.

- Parmi les résistances à votre disposition, choisir les deux résistances que vous allez utiliser dans votre montage.

### b Mise en œuvre du montage

L'ALI utilisé ici se présente sous la forme d'un boîtier enfichable à 8 broches, numérotées de 1 à 8 (en partant de la marque évidée, et en tournant dans le sens direct quand on regarde le boîtier du dessus).

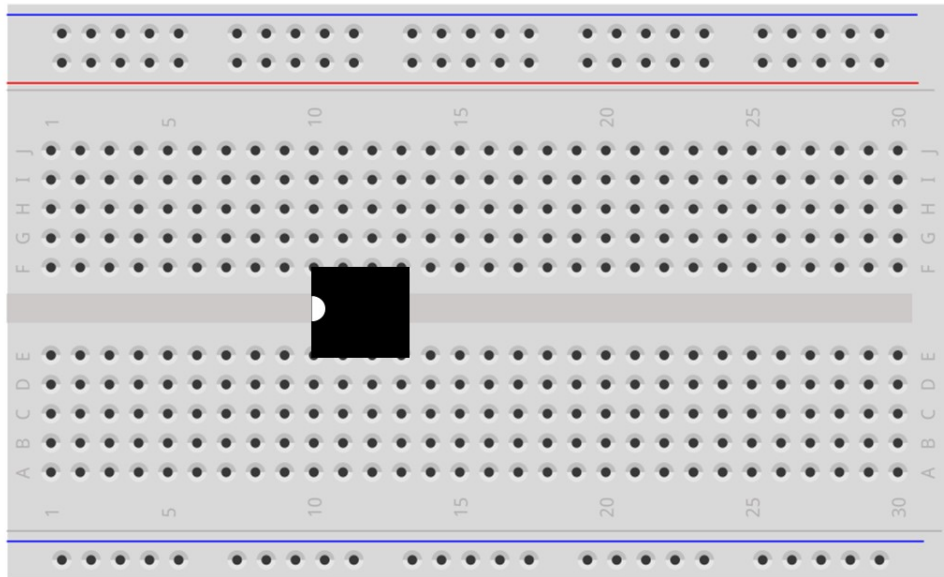
**Remarque :** D'autres modèles d'ALI peuvent avoir une toute autre configuration. On vous précisera toujours les branchements du composant que vous avez.



Les broches 2 et 3 sont respectivement les entrées inverseuse  $V_-$  et non-inverseuse  $V_+$  de l'ALI. La broche 6 est la sortie. La broche 8 n'est pas connectée. Les broches 1 et 5 ne seront pas utilisées ici. Leur rôle est de pouvoir régler un éventuel décalage de la tension de sortie.

**L'ALI est un composant actif : il doit être alimenté en  $\pm 15V$  pour fonctionner. ATTENTION : toute erreur de branchement des tensions d'alimentation 7 et 4 entraîne la destruction immédiate de l'ALI...**

- Enficher l'ALI sur la plaquette LAB (= la breadboard).
- Pour ce premier TP avec une breadboard à cabler dans son intégralité, nous allons prendre le temps de faire un schéma des branchements. Compléter le schéma ci-dessous, en plaçant les résistances  $R_1$  et  $R_2$ , le GBF et les deux voies de l'oscilloscope.



- Réaliser le montage.

#### c Vérification du fonctionnement correct du montage

- Envoyer sur le montage un signal alternatif sinusoïdal d'amplitude et de fréquence "convenables".
- Vérifier que le déphasage a bien la valeur attendue.
- Mesurer le gain et estimer l'incertitude-type associée à cette mesure. Comparer avec la valeur attendue d'après le modèle.
- Faire varier la fréquence "raisonnablement" et vérifier que le gain reste constant.

**Conserver ce montage pour la suite.**

## IV Capteur de vitesse (= cinémomètre) à effet Doppler (1 h 45)

Le but de cette partie est de mesurer la vitesse d'un chariot mobile. Cela illustre le principe du radar à effet Doppler qui sert à mesurer la vitesse d'un véhicule.

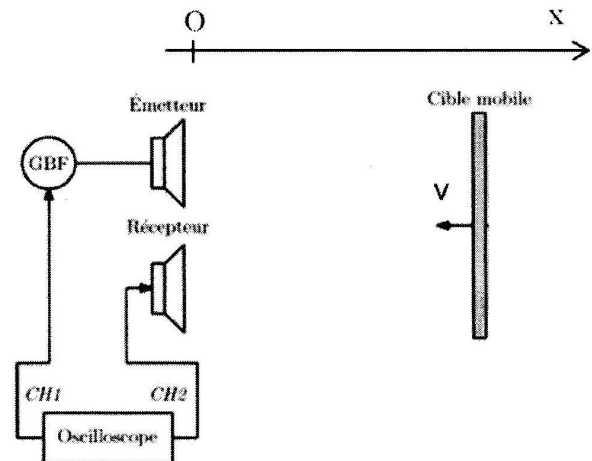
Les cinémomètres de la gendarmerie émettent des ondes électromagnétiques de fréquence 24,125 GHz se propageant à la vitesse de la lumière  $c_{\text{lum}} = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ . Pour des raisons de commodité, nous utiliserons dans ce TP des ondes ultrasonores se propageant à la vitesse du son dans l'air. L'effet Doppler se rencontre en effet avec tout type d'ondes.

Matériel à disposition, en plus du matériel usuel d'électronique : Matériel de la partie III, banc moteur contenant le chariot mobile, un émetteur et un récepteur ultrasonore placés côte à côte (il est indiqué "récepteur" sur les deux éléments, mais vous pouvez utiliser l'un des deux en émetteur), une plaque à monter sur le chariot mobile, un système de fourche optique, un multiplieur, ensemble de condensateurs.

## IV.1 Modélisation : effet Doppler

Le radar est constitué d'un émetteur et d'un récepteur ultrasonores fixes, côte à côte.

L'onde émise, de fréquence  $f_e$  connue, se propage à la vitesse  $c$  jusqu'à une cible qui se déplace par rapport au radar à la vitesse  $\vec{v} = v\vec{e}_x$ , se réfléchit sur la cible, puis se propage à la vitesse  $c$  vers le récepteur. Dans le cas où la cible s'éloigne du radar, on a  $v > 0$  et si elle se rapproche du radar, on a  $v < 0$ .



Sur le même principe qu'en partie I, on admet qu'une étude théorique permet de montrer que si  $|v| \ll c$ , alors l'écart en fréquences  $\delta f = f_e - f_r$  vérifie :

$$\frac{\delta f}{f_e} = 2 \frac{v}{c}$$

### Estimation préalable de $\delta f$

La mesure de  $\delta f$  permet de déterminer la vitesse  $v$  de déplacement de la cible. On se propose ici de mesurer des vitesses de déplacement de l'ordre de 10 cm/s.

- Evaluer le  $\delta f$  correspondant. Pensez vous qu'on puisse utiliser un oscilloscope pour réaliser la mesure de  $\delta f$  ?

## IV.2 Réalisation expérimentale du capteur de vitesse

Le calcul précédent ayant montré la difficulté d'une mesure directe de cet écart de fréquences, nous allons mettre en œuvre une méthode de détection synchrone pour obtenir directement un signal à la fréquence  $\delta f$ , et donc mesurer cette fréquence  $\delta f$  avec une bonne précision, même avec des signaux initiaux faibles et/ou bruités.

### a Mise en place du banc moteur et réglage de l'émetteur ultrasonore

- Le moteur permettant de déplacer le chariot mobile sur le banc d'essai a déjà été monté. Vérifier son bon fonctionnement.
- Alimenter directement via un GBF l'émetteur ultrasonore, via un signal sinusoïdal d'amplitude  $3 V_{pp}$ . Régler la fréquence pour optimiser l'amplitude du signal reçu.

### b Amplification du signal reçu

- Envoyer le signal du récepteur ultrasonore sur l'amplificateur inverseur.

### c Détection synchrone

- Proposer un protocole pour obtenir un signal  $u(t)$  à la fréquence  $\delta f = f_e - f_r$  à partir du signal de l'émetteur ultrasonore et du signal amplifié du récepteur. *Votre protocole devra*

*être complet, c'est-à-dire contenir le schéma du circuit électrique nécessaire et les valeurs des composants électroniques.*

- Mettre en œuvre ce protocole et observer le signal  $u(t)$  sur la voie 1 de l'oscilloscope (aucun signal sur la voie 2). Ajuster correctement la base de temps : pour cela, se souvenir de l'ordre de grandeur de  $\delta f$  attendu.

### IV.3 Analyse du capteur de vitesse réalisé

#### a Capteur à effet Doppler

- Déplacer le chariot mobile à différentes vitesses et commenter le lien entre vitesse et fréquence de  $u(t)$ .
- Effectuer un enregistrement à une vitesse donnée et déterminer la vitesse  $v_D$  de déplacement du chariot. On prendra la vitesse de propagation du son déterminée en partie II du TP. On estimera l'incertitude sur la vitesse mesurée.

#### b Comparaison avec un autre capteur de vitesse

Afin de vérifier la vitesse  $v_D$  mesurée par le capteur à effet Doppler, nous allons réaliser un second capteur de vitesse (vitesse  $v_f$ ), et comparer les deux vitesses. Ce second capteur utilise deux fourches optiques.

Une fourche optique est un système constitué d'un émetteur infrarouge (LED) et d'un récepteur infrarouge (photodiode). La tension aux bornes de la photodiode varie selon que l'onde électromagnétique passe ou est bloquée.

- Alimenter le système de fourche optique par une tension de 15 V et la masse (pas de -15 V).
- Vérifier le fonctionnement du capteur à fourche optique.
- Effectuer alors un enregistrement de la tension aux bornes de la photodiode lorsque le chariot est en déplacement à la même vitesse que précédemment. Déterminer la vitesse  $v_f$  du chariot mobile. On estimera une incertitude sur cette vitesse  $v_f$ .
- Comparer les deux valeurs de vitesse  $v_D$  et  $v_f$  et conclure sur leur compatibilité ou leur incompatibilité.