

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.				
Valider	Comparer deux valeurs (écart relatif, écart normalisé).				

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

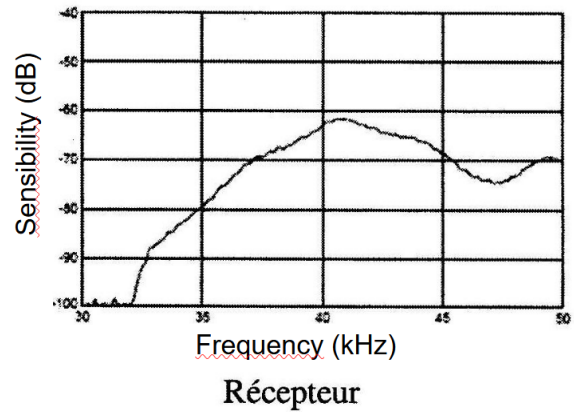
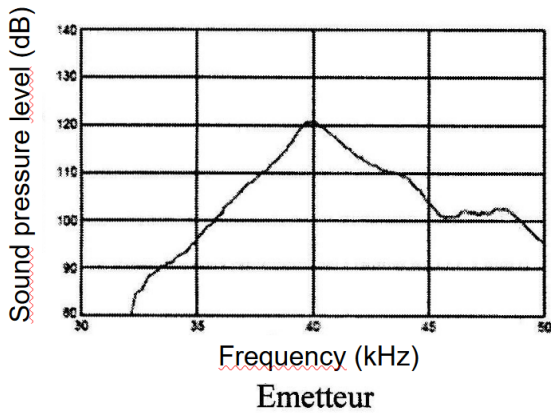
L'objectif de cette partie est de déterminer la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore (US) dans l'air.

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.

I.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 meilleur possible. Noter la valeur de cette fréquence et **ne plus la modifier**.

I.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.

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

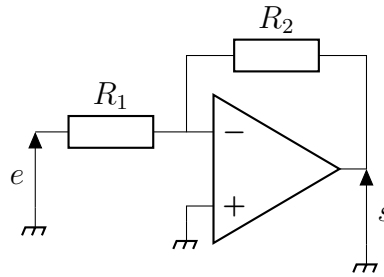
- Dédurre des deux parties précédentes la valeur expérimentale de la vitesse de l'onde ultrasonore dans l'air.
- Comparer avec la valeur théorique fournie par le modèle du gaz parfait pour l'air : $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ avec $\gamma = 1.4$ (modèle du GP diatomique), $M = 29 \text{ g/mol}$ la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

II 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 :



II.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.

II.2 Expérimental

a Choix des composants

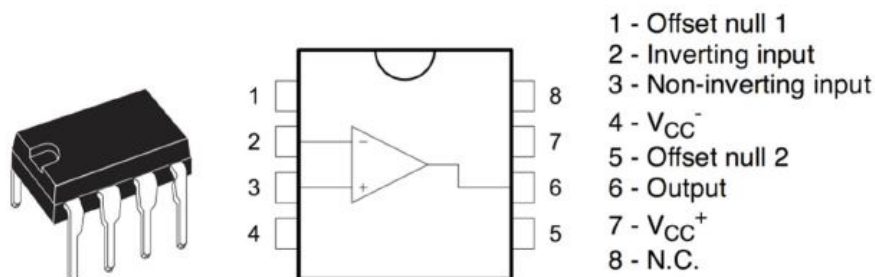
On souhaite réaliser un amplificateur avec un gain de l'ordre de 50.

- 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).

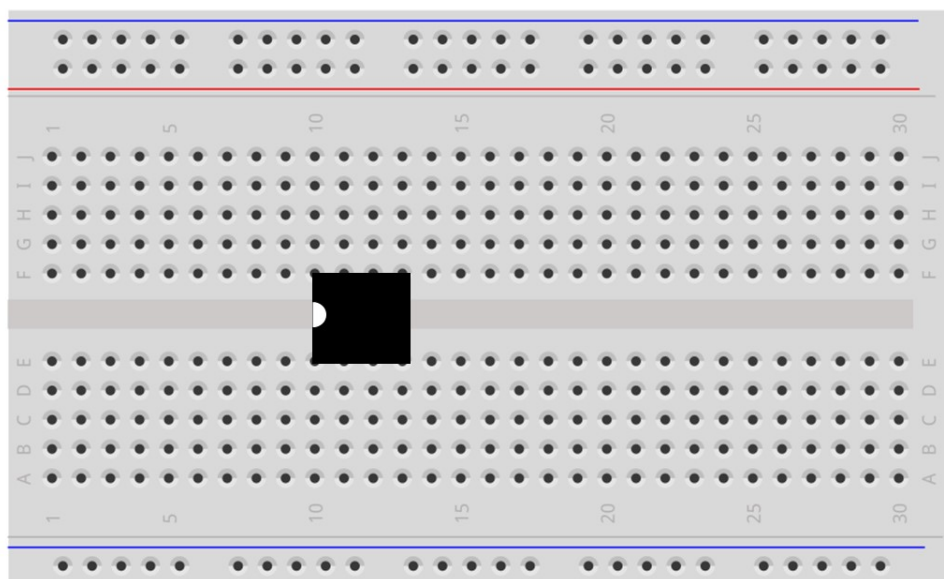
Remarque : D'autres modèles d'ALI peuvent avoir une toute autre configuration. On vous précisera toujours les branchements du composant que vous avez.



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 gain et le déphasage ont bien les valeurs attendues.
- Faire varier la fréquence "raisonnablement" et vérifier que le gain reste constant.

Conserver ce montage pour la suite.

III 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 $c_{lum} = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Pour des raisons de commodité

nous utiliserons 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.

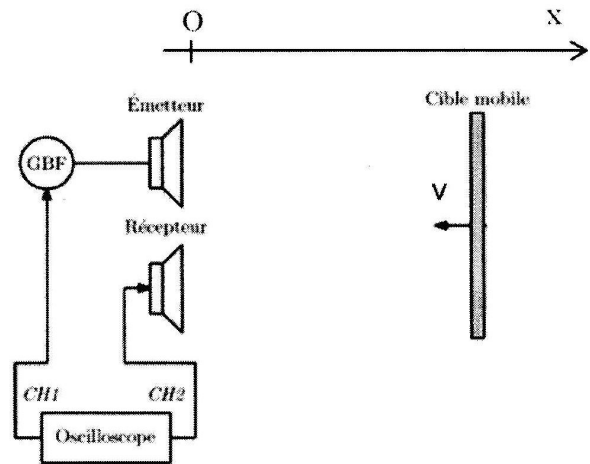
Matériel à disposition, en plus du matériel usuel d'électronique : Matériel de la partie II, banc moteur contenant le chariot mobile, un émetteur et un récepteur ultrasonore placés côte à côte (la lettre "R" est indiquée sur les deux éléments, mais vous pouvez utiliser l'un des deux en émetteur), une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

III.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 (période T_e), se propage à la vitesse c jusqu'à une cible qui s'approche du radar à la vitesse \vec{v} , se réfléchit sur la cible, puis se propage à la vitesse c vers le récepteur.

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



On se restreint ici à l'effet Doppler longitudinal : déplacement de la cible et propagation de l'onde se font selon le même axe (Ox) ; la vitesse d'approche de la cible est notée $\vec{v} = -v\vec{e}_x$ avec $v > 0$ lorsque la cible se rapproche (on pourra étudier un éloignement de la cible en prenant $v < 0$ dans le résultat final). La vitesse de propagation des ondes est notée $c > 0$ pour les deux sens de propagation.

Une étude théorique (cf. annexe en fin du TP) permet de montrer que si $v \ll c$, alors l'écart en fréquences $\delta f = f_r - f_e$ vérifie :

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

Estimation préalable de δf

La mesure de δf 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 δf correspondant. Pensez vous qu'on puisse utiliser un oscilloscope pour réaliser la mesure de δf ?

III.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 δf , et donc mesurer cette fréquence δf avec une bonne précision, même avec des signaux initiaux faibles et/ou parasites.

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 $\delta f = f_r - f_e$ à partir du signal de l'émetteur ultrasonore et du signal amplifié du récepteur. *Votre protocole devra être complet, c'est-à-dire contenir les schémas des circuits électriques nécessaires 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 δf attendu.

III.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 I 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.

c Bonus : mesure simultanée de la vitesse par les deux capteurs

Un biais expérimental peut être que la vitesse n'est pas exactement la même d'un essai à l'autre, même si on n'a pas modifié le curseur sur le banc moteur. L'objectif de cette dernière sous-partie facultative est donc de réaliser, lors d'un même essai, à la fois la mesure de la vitesse v_D par effet Doppler et la vitesse v_f avec les fourches optiques.

On utilisera pour ce faire le mode SINGLE de l'oscilloscope. Dans ce mode, l'oscilloscope attend que le signal dépasse le seuil fixé par le déclenchement (trigger) pour commencer l'acquisition.

- Régler la base de temps sur l'oscilloscope pour pouvoir observer convenablement les deux signaux utiles (tension $u(t)$ et tension aux bornes de la photodiode).
- Régler le déclenchement pour démarrer l'acquisition au moment où le signal de la photodiode passe de 0 V à 15 v. On choisira un déclenchement de l'acquisition à gauche de l'affichage de l'oscilloscope.
- Réaliser l'acquisition en mode SINGLE. En déduire les vitesses v_D et v_f et les comparer.

Annexe : modélisation de l'effet Doppler

Cette annexe est rédigée sous la forme d'une série de questions. La correction de ces questions est présente à la fin de l'annexe. Vous pouvez passer quelques minutes à chercher la réponse à ces questions, mais n'y consacrez pas plus de 15 min, car ce n'est pas explicitement au programme de PC.

On reprend les notations de la partie III.1. On raisonne sur des impulsions, espacées de T_e , émises par l'émetteur. La première impulsion est émise à $t = 0$, la seconde à $t = T_e$.

On note t_1 et t_2 les instants où les deux impulsions atteignent chacune la cible mobile.

1. Exprimer $t_2 - t_1$ en fonction de T_e , v et c .

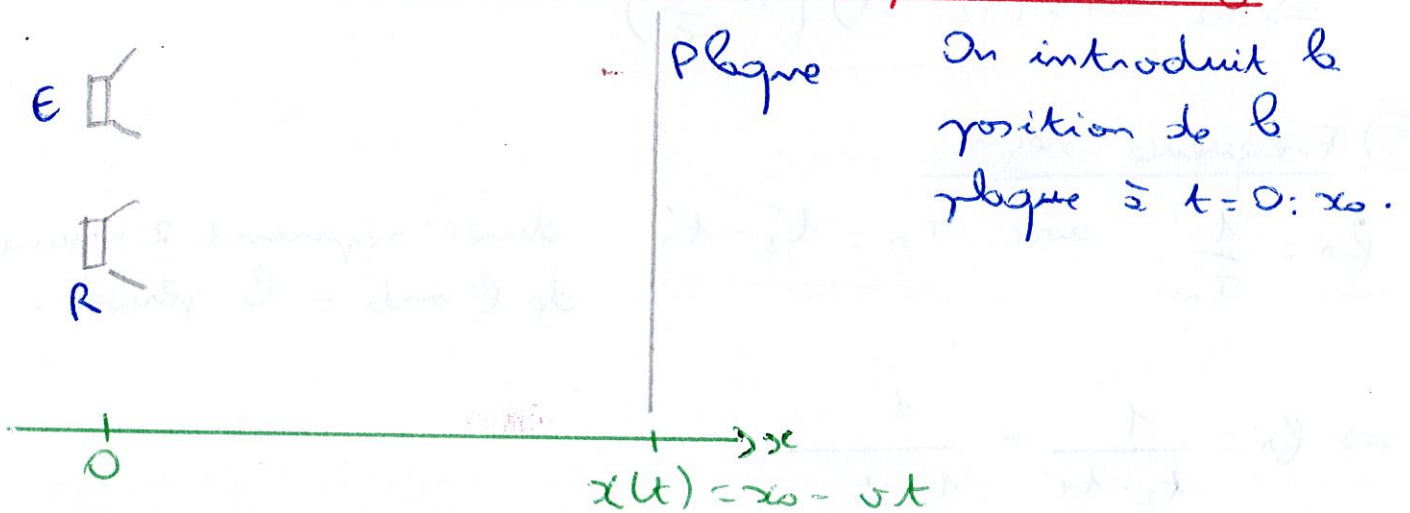
On note t'_1 et t'_2 les instants où les deux impulsions sont revenues au récepteur.

2. Exprimer $t'_2 - t'_1$ en fonction de $t_2 - t_1$, v et c .
3. En déduire la fréquence f_r des impulsions reçues en fonction de f_e , v et c .

4. Montrer que si $v \ll c$, alors $\delta f = f_r - f_e$ vérifie : $\frac{\delta f}{f_e} \simeq 2\frac{v}{c}$.

CORRIGÉ - TP Effet Doppler

I-A) Établissement de la fréquence reçue f_R



① Phase E \rightarrow Plaque:

• À t_1 , la 1^{ère} impulsion a parcouru la distance ct_1 , et elle arrive au niveau de la plaque située en $x_0 - vt_1$:
$$ct_1 = x_0 - vt_1 \Rightarrow t_1 = \frac{x_0}{c+v}$$

• À t_2 , la 2^{ème} impulsion a parcouru $c(t_2 - T_e)$ et arrive en $x_0 - vt_2$:
$$c(t_2 - T_e) = x_0 - vt_2$$

$$\Rightarrow t_2 = \frac{x_0 + cT_e}{c+v}$$

• Donc:
$$t_2 - t_1 = \frac{cT_e}{c+v} = \frac{T_e}{1 + \frac{v}{c}}$$

② Phase Plaque \rightarrow R:

• De même, à t'_1 , la 1^{ère} impulsion a re-parcouru $x_0 - vt_1$, en une durée $t'_1 - t_1$:
$$c(t'_1 - t_1) = x_0 - vt_1$$

$$\Rightarrow t'_1 = t_1 + \frac{x_0 - vt_1}{c}$$

• De même: $c(t'_2 - t_2) = x_0 - vt_2 \Rightarrow t'_2 = t_2 + \frac{x_0 - vt_2}{c}$

$$\text{Donc: } t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 + \frac{x_2}{c} - \frac{x_1}{c} - \frac{v}{c} (t_2 - t_1)$$

$$\Rightarrow \underline{t'_2 - t'_1 = (t_2 - t_1) \left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

③ Fréquence reçue:

$$\underline{f_n = \frac{1}{T_n}} \quad \text{avec } \underline{T_n = t'_2 - t'_1} : \text{durée séparant 2 maxima de l'onde} = \text{la période.}$$

$$\Rightarrow f_n = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$$

$$= \frac{1}{T_e} \frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} = f_e \times \frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \quad \left(\begin{array}{l} > f_e \text{ si la cible se rapproche} \\ < f_e \text{ si elle s'éloigne} \end{array} \right)$$

④ Développement limité à l'ordre 1 en $\frac{v}{c} \ll 1$:

$$f_n = f_e \times \left(1 + \frac{v}{c}\right) \left(1 + \frac{v}{c}\right) + o\left(\left(\frac{v}{c}\right)^2\right)$$

$$= f_e + 2 \frac{f_e v}{c} + o\left(\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \approx f_e + \frac{2 f_e v}{c}$$

$$\Rightarrow f_n - f_e = \frac{2 f_e v}{c} \quad \Rightarrow \boxed{\frac{f_n - f_e}{f_e} = \frac{\Delta f}{f_e} = \frac{2v}{c}}$$