

Manip 1/2 : Mesure célérité son dans l'air en propagation libre

Référence : TP Série 1 Acoustique + Physique expérimentale, Fruchart, p527 pour le fonctionnement des transducteurs piézoélectriques

La célérité du son est donnée par $c_s = 1/\sqrt{\rho\chi_s}$, où ρ est la masse volumique du milieu et χ_s sa compressibilité adiabatique. Pour l'air sec, dans les conditions usuelles (20°C, 1 bar) : $c_s = 343 \text{ m.s}^{-1}$. La célérité dépend de la température : dans l'approximation des gaz parfaits on a $c_s = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}$. L'influence de l'humidité de l'air est quant à elle très faible car ρ et χ_s ont des variations qui se compensent (cf. Handbook à "Sound velocity"). Ci-dessous un tableau de valeur de la vitesse du son sec en fonction de la température.

θ en °C	c en m/s
0	331,5
+5	334,5
+10	337,5
+15	340,5
+20	343,4
+25	346,3
+30	349,2

FIGURE 1 – Vitesse du son dans l'air sec en fonction de la température (source Wikipédia et Handbook)

La valeur de référence : $c = 331.6 + 0.6\theta \text{ m/s}$ avec $[\theta]=^\circ\text{C}$

Un matériau piézoélectrique se déforme sous l'effet d'un champ électrique. Le matériau est le siège de l'effet réciproque : sous l'effet d'une contrainte, il apparaît des charges électriques à la surface du matériau. Ces matériaux sont donc beaucoup utilisés comme émetteurs/récepteurs ultrasonores.

Soit il est sous forme d'un seul cristal bien ordonné (monocristal), mais c'est cher. Plus souvent, on utilise des céramiques : des matériaux solides faits de petits cristaux (cristallites) orientés artificiellement. Pour qu'elles soient efficaces en piézoélectricité, on oriente les dipôles électriques internes des cristallites en appliquant un champ électrique à chaud. Car À haute température, les dipôles internes sont mobiles et donc le champ électrique les aligne dans une direction privilégiée.

Après le chauffage et l'orientation, ils sont frittés. Frittage = procédé où l'on chauffe sans fondre, puis comprime le matériau pour qu'il devienne solide, compact et cohérent. Pendant le refroidissement, on maintient une pression pour bloquer les cristallites dans leur orientation choisie

Maintenant chaque cristallite produit une petite déformation lorsqu'un champ électrique est appliqué. Grâce à l'alignement global, leurs effets s'additionnent : la céramique entière se déforme de manière efficace (et réciproquement pour la génération de charges)

Résumé : On oriente les cristaux à chaud avec un champ électrique, puis on les fritte (comprime) en refroidissant pour verrouiller cette orientation, ce qui permet une déformation cohérente et amplifiée du matériau sous champ électrique.

Protocole :

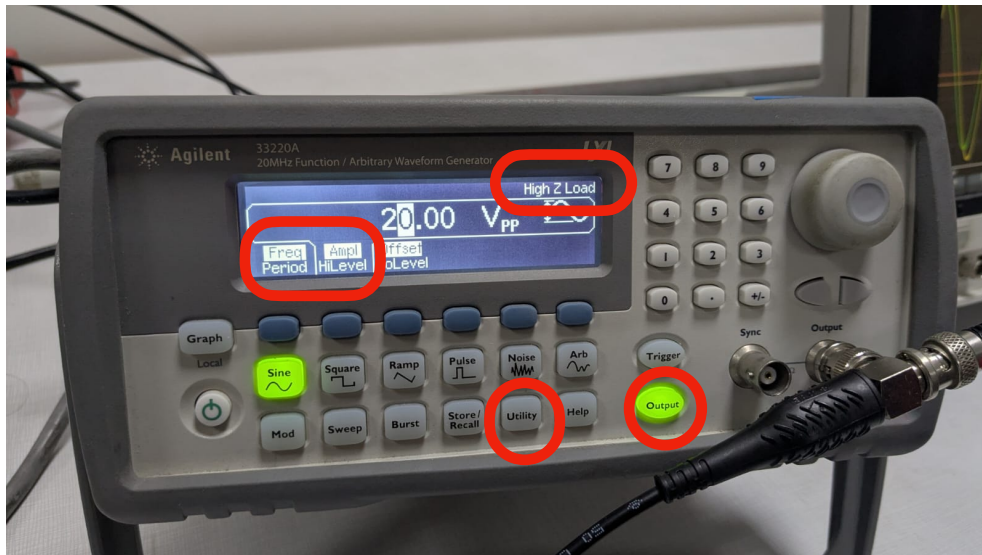
- GBF + câble BNC-2 bananes vers émetteur ultrason. C'est un céramique piézoélectrique qui fonctionne à une fréquence proche de 40 kHz.
- Récepteur ultrason + câble BNC-2 bananes vers oscilloscope.

Pour le GBF : Choisir amplitude grande (10 Vpp par exemple) sinon il n'y aura pas de signal dans les piézo.

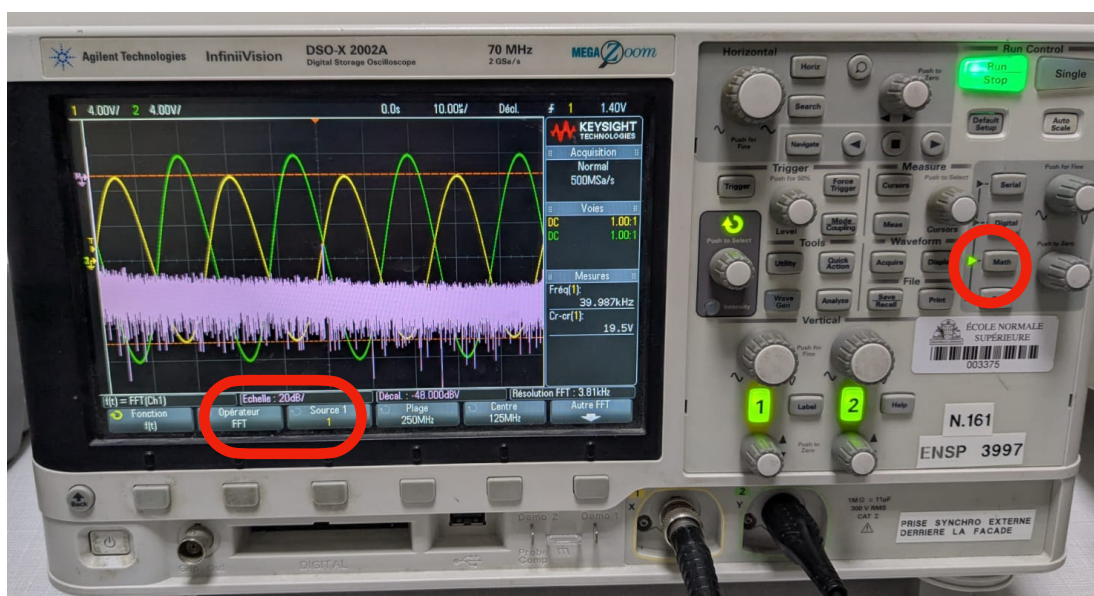
Par "utility", choisir "output setup" puis "High Z" au lieu de l'impédance 50 Ohm. Car le piézo a une grande impédance. Dans ce cas, le Vpp devient 20 automatiquement. Ne pas oublier d'appuyer sur output pour exécuter le signal.

Attention : Les piézo ne résonnent pas forcément exactement à la même fréquence donc faut choisir une paire de piézo qui sont accordés en fréquence.

Pour cela on branche l'émetteur et le récepteur à l'oscilloscope. On trouve que le récepteur donne un signal à 40 kHz et diminue (même disparaît) quand on $>$ ou $<$.



Par l'oscilloscope, j'appuie sur "math" puis je choisis FFT puis la source 1 ou 2. Par les curseurs de maths j'adapte le signal FFT.



Attention : pour la FFT, je dois d'abord choisir la fenêtre. J'appuie sur "Autre FFT" puis "fenêtre" puis "Rectangulaire" pour avoir un sinus cardinal autour de mon pic, ou le mieux est "Hanning" qui est plutôt une fenêtre courbe pour ne pas avoir des bords stricts du rectangulaire.

Attention : pour la FFT, je dois donner beaucoup de signal. Donc là avec 4 périodes c'est de la merde et la majorité de la FFT sera du bruit.

Puisque je prends un temps court, donc la plage de fréquence est grande (ici 250 MHz) ce qui est énorme. Il faut que la plage soit du même ordre de grandeur que le pic cherché. En plus c'est marqué centre 125MHz donc le pic que je vois c'est pas celui à 40kHz. Ce dernier se trouve vraiment à gauche (proche du 0)



Là on a bien le bon pic à 40kHz qui apparaît. Je peux appuyer sur centre et bouger la FFT pour centrer le pic.

Pour vérifier que le pic est à 40 kHz, j'appuie sur "curseur" puis "unité = freq" et pour la source du curseur je choisis "maths" et pas 1 ou 2.

Le cercle bleu indique mon zéro (que je choisis par curseur maths). Par l'échelle en bas cela veut dire que chaque graduation en dessous du zéro = -20 dB.

Alors, les pics secondaires sont à des dB très négatifs comparé au pic maximal qui est positif.

Est-ce que les pics secondaires sont des harmoniques dues au piezo ?

Ils peuvent être dues au traitement d'image (Shannon) et quand on change la fréquence on voit des pics qui peuvent être fantômes.

Par la FFT à la source 1, on trouve que les pics sont là, donc ils peuvent être probablement lié au GBF qui n'envoie pas une sinusoïdale parfaite.

La Mesure de la vitesse de phase :

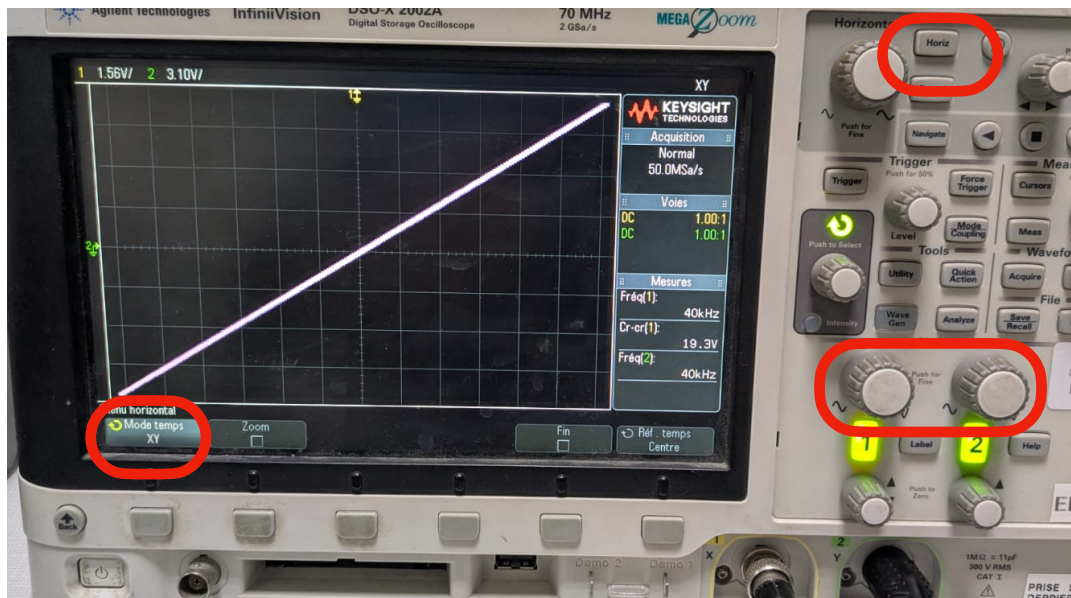
- Soit en fixant l'émetteur sur une position (ici 16cm) et on bouge le récepteur jusqu'à avoir les 2 signaux en phase donc les 2 sinus un sur l'autre (à 22,35cm). On bouge le récepteur et on compte le nombre de fois on obtient cette situation "en phase" (donc on compte le nombre de périodes). On fait 10 périodes et le récepteur se trouve à 31.2cm. Donc une distance totale de 8.85cm pour $10 \times 2\pi$. Une longueur d'onde c'est alors cette distance totale divisée par 10 : $\lambda = \frac{x_2 - x_1}{10} = 8.85 \text{ mm}$

Par $\Delta x = 1 \text{ mm}$, $\Delta \lambda = \lambda \frac{\Delta x}{x} = 0.1 \text{ mm}$

$c_{\text{son}} = \nu \lambda = 39.9 \times 10^3 \times 8.85 \times 10^{-3} = 353.12 \text{ m/s}$ et $\Delta c = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 4 \text{ m/s}$

OU

- Appuyer sur "horiz" puis choisir "mode temps XY". On aura une ellipse. Par les curseurs de 1 et 2 normaux (en bas) on peut augmenter la taille de l'ellipse. On bouge le récepteur jusqu'à ce que l'ellipse soit une ligne droite diagonale et là, les 2 signaux en phase. Je trouve aussi 22.35cm. Après 10 périodes je trouve 31.3cm.



Là c'était la vitesse de phase car on envoyait une onde sinusoïdale monochromatique.

Pour mesurer **la vitesse de groupe** il faut avoir un paquet d'ondes avec plusieurs freq.

On produit des trains d'ondes avec un générateur qui permet cette fonction (par exemple le GX 320) en choisissant la fonction Burst.

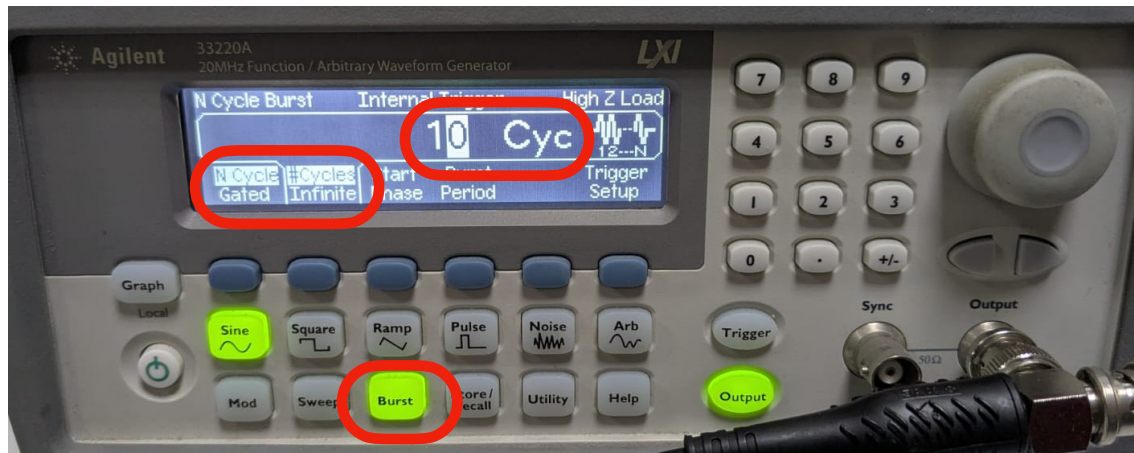
Train court = bonne précision temporelle (bonne localisation du front d'onde) mais peu d'énergie, donc faible détection.

Train long = plus d'énergie, mais le front d'onde est moins net → flou dans le temps de vol. Il faut un juste milieu.

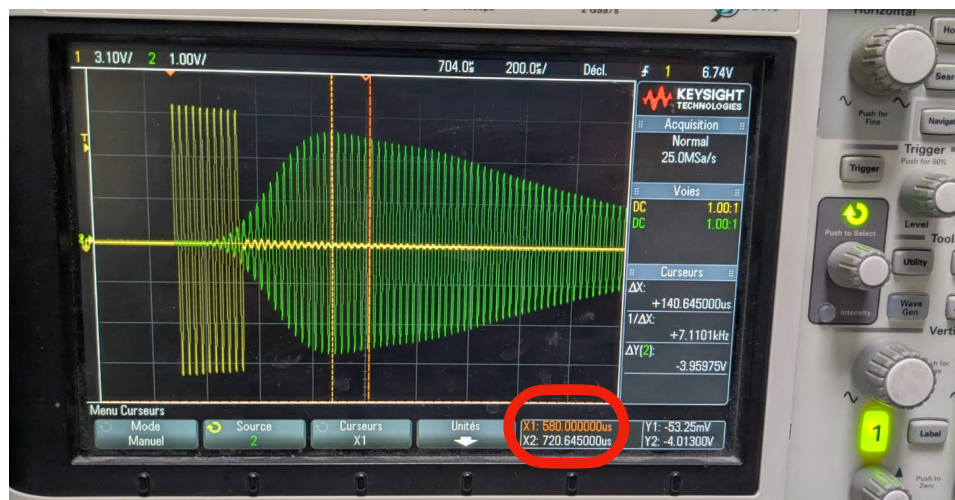
On peut penser qu'un train d'ondes très court a un spectre fréquentiel large qui va étaler le signal ce qui entraîne une dispersion (vitesse différente selon la fréquence).

Mais en pratique l'ensemble émetteur + récepteur impose sa bande passante très étroite (il filtre fortement autour de 40 kHz) et de plus le tuyau est trop court donc même s'il y a une légère dispersion, le signal n'est pas notablement étalé.

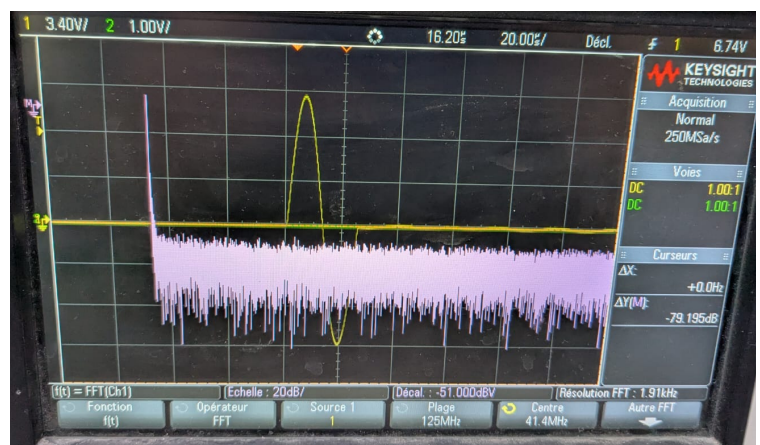
- Par GBF je choisis "Burst" puis "N cycle". On augmente N on trouve que l'amplitude du burst augmente mais pas Δt (pas de dispersion) donc on continue à augmenter et à un moment donné, t commence à changer et amplitude atteint le max donc on s'arrête là et c'est 10 donc "# cycles = 10".



- Par oscillo, j'adapte par les curseurs. Par curseur je choisis "unité" puis "temps". Je prends le temps de mon maximum du burst et la position du récepteur sur le support.



- Dans le signal 1 sur oscillo on voit qu'après les 10 cycles il y a des petites oscillations faibles. Ils ne sont pas dû à une réflexion sur le piezo récepteur car même si on met notre main entre émetteur et récepteur ils sont là. Ils sont peut être dû à la phase transition après arrêt du signal GBF. Car pour envoyer un pulse c'est une sinusoïdale + porte rectangulaire pour couper 1 periode. Si on applique FFT au signal 1 on voit un sinus cardinal.



Là à 17.6cm, le temps est 578 μs . On bouge le récepteur jusqu'à 22.2cm et là $t=720\mu s$

Donc l'enveloppe a une vitesse de $c = \frac{(22.2 - 17.6) \times 10^{-2}}{(720 - 578) \times 10^{-6}} = 323.94 \text{ m/s}$

Je bouge le curseur de 10 μs et c'est presque même position donc c'est mon incertitude de temps.



Pourquoi une enveloppe en forme de cloche ?



Tu n'envoies pas une onde sinusoïdale infinie, mais un train d'ondes :

- Ce train contient un **nombre fini de cycles** (ex : 10 cycles à 40 kHz).
- Un signal fini dans le temps = signal **non monochromatique** → il contient un **spectre** de fréquences centrées autour de $f_0 = 40 \text{ kHz}$, avec une **petite largeur spectrale**.



Ce qui se propage réellement :

C'est une **superposition d'ondes sinusoïdales proches** ($40 \text{ kHz} \pm \text{quelques kHz}$), donc le signal reçu est une :

modulation d'amplitude d'une sinusoïde → d'où l'apparition d'une **enveloppe**.



Pourquoi une forme de cloche ?

- Ton train d'onde est **brusquement lancé puis arrêté**, donc son spectre est **symétrique et centré** sur la fréquence porteuse.
- L'interférence des composantes crée une **forme constructive au centre** → l'amplitude maximale est au centre du train → **forme gaussienne ou \sin^2 enveloppée**.
- Cette forme est **préservée partiellement** à la réception (modulo dispersion et réponse du capteur).



Que veut dire « modulo dispersion et réponse du capteur** » ?

1. Dispersion :

- Dans certains milieux (ex : solides, tuyaux), **les différentes fréquences d'un même signal ne se propagent pas à la même vitesse**.
- Résultat : l'enveloppe (forme du paquet d'onde) **s'élargit ou se déforme**.
- Dans l'air, c'est très faible → donc ici ce n'est **pas la cause principale**.

2. Réponse du capteur (ou transducteur) :

- Ton capteur **ne réagit pas de façon parfaite** à toutes les fréquences.
- Il a une **bande passante** étroite autour de 40 kHz.
- Si ton train contient un peu de 38, 42 kHz... il **atténue ces composantes** → la forme **change légèrement**, devient plus lisse ou moins symétrique.



Résumé visuel :

Ton signal est de la forme :

$$\text{Signal reçu} \approx A(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \phi)$$

Avec $A(t)$ qui ressemble à une cloche (gaussienne, \sin^2 ou autre forme symétrique).



En pratique :

- L'enveloppe verte que tu vois représente **l'énergie** du train.
- Le **maximum** de cette enveloppe est généralement un bon repère pour mesurer le **temps de vol**.
- Si le milieu est dispersif (ce n'est pas trop le cas dans l'air), l'enveloppe se déforme encore plus → c'est la **vitesse de groupe** qui transporte l'enveloppe.

Manip 2/2 : Effet Doppler

Référence : poly TP - Série 2 - Ondes

On cherche à mettre en évidence l'effet Doppler. Pour cela, on utilise deux transducteurs piezoélectriques montés sur un banc à défilement : l'un est posé sur pied fixe et excité par un GBF (c'est l'émetteur) et l'autre est monté sur le support mobile du banc et se déplace à vitesse constante et fixée, vers l'avant ou l'arrière (c'est le récepteur).

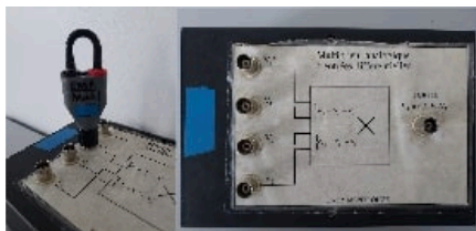
- Les 2 transducteurs face à face, immobiles et proches l'un de l'autre
- Régler la hauteur de chacun des deux
- Adapter la fréquence d'excitation de manière à recevoir le signal le plus fort possible (autour de 40 kHz) mais peut varier de quelques centaines de Hertz.
- On met en route le défilement du banc à vitesse v_{rec} . Si le récepteur s'éloigne de l'émetteur, la fréquence f_{rec} perçue par le récepteur varie selon :

$$f_{rec} = f_{em} \left(1 - \frac{v_{rec}}{c_{son}} \right)$$

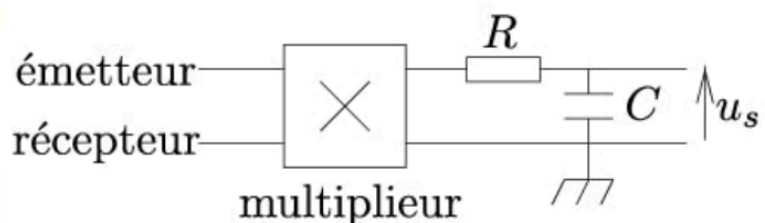
- Il faut mesurer avec précision la faible vitesse du récepteur par un chrono
- La différence de fréquence est de l'ordre du Hz de sorte qu'une mesure directe de la fréquence ne sera pas assez précise pour distinguer la différence ...

On propose alors de réaliser une détection synchrone.

- Le signal reçu de fréquence f_{rec} est multiplié au signal émis f_{em} par multiplieur
- On alimente le multiplieur sous +15V/-15 V
- Le multiplieur possède quatre entrées V_1^+ V_1^- V_2^+ V_2^- de sorte que le signal de sortie est $(V_1^+ - V_1^-) \times (V_2^+ - V_2^-)$. On annule V_1^- et V_2^- en y branchant un T muni d'un cavalier
- On obtient alors un signal modulé dont une décomposition en série de Fourier permet de se convaincre qu'il contient deux fréquences : $f_{rec} + f_{em} \approx 2f_{em} = 80\text{kHz}$ et $\Delta f \approx 1\text{ Hz}$
- Un filtrage passe-bas effectué par un circuit RC en sortie du multiplieur permet de ne récupérer que le signal de basse fréquence Δf
- Mesure avec la FFT de l'oscillo
- On peut aussi avoir une 2e mesure en changeant le sens de défilement, et le signe dans la formule de l'effet Doppler



Branchement du multiplieur



Montage pour la détection synchrone

Demonstration Doppler :

A $t = 0$: 1er bip sonore de la voiture. L'observateur l'entend à $t_1 = \frac{D}{v_{\text{onde}}}$ à distance D .

A $t = T_E$: 2nd bip. La voiture s'est rapprochée de $d = v_{\text{voit}} T_E$.

Donc observateur se trouve à $D - d$

Alors l'observateur l'entend à $t_2 = T_E + \frac{D - d}{v_{\text{onde}}}$

Donc la période reçue par l'observateur est :

$$T_R = t_2 - t_1 = T_E - \frac{d}{v_{\text{onde}}} = T_E - \frac{v_{\text{voit}} T_E}{v_{\text{onde}}} = T_E \left(1 - \frac{v_{\text{voit}}}{v_{\text{onde}}} \right) = T_E \left(\frac{v_{\text{onde}} - v_{\text{voit}}}{v_{\text{onde}}} \right)$$

Par $T = \frac{1}{f}$

$$f_R = f_E \left(\frac{v_{\text{onde}}}{v_{\text{onde}} - v_{\text{voit}}} \right)$$

Si voiture s'éloigne de $d = v_{\text{voit}} T_E$ donc observateur se trouve à $D + d$ et donc

$$T_R = t_2 - t_1 = T_E + \frac{d}{v_{\text{onde}}}$$