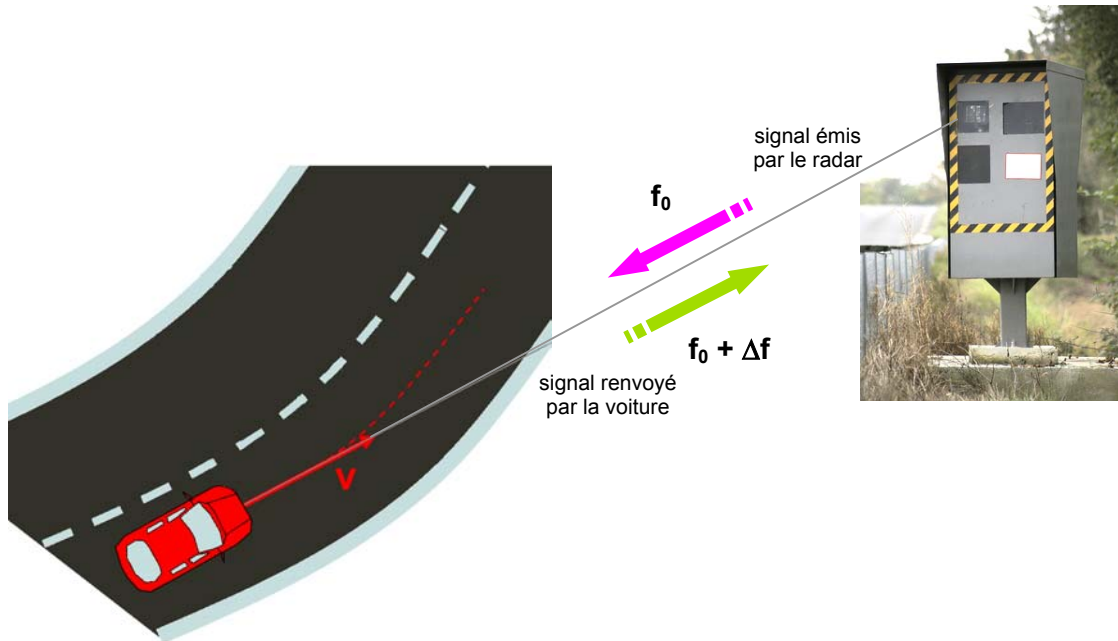


# L'effet Doppler

On se propose de mettre en évidence quelques applications concrètes du phénomène physique découvert par le physicien Christian Andreas Doppler ( 1803-1853) qu'on appelle : **effet Doppler**.

Cet effet se manifeste lorsqu'on envoie une onde sinusoïdale de fréquence  $f_0$  sur une cible en mouvement animée d'une vitesse  $v$  dans l'axe de l'émission :



L'onde se réfléchit alors sur la cible et revient vers l'émetteur avec une fréquence  $f$  légèrement différente de  $f_0$  :

- $f = f_0 + \Delta f$  si la cible se rapproche de l'émetteur
  - $f = f_0 - \Delta f$  si la cible s'éloigne de l'émetteur
- } avec  $\Delta f = 2.v.f_0/c$

**Conclusion** : l'effet Doppler est lié à la vitesse  $v$  de la cible sur laquelle se réfléchit l'onde.

**Remarque** : l'effet Doppler se manifeste aussi si la source elle-même est mobile par rapport à un observateur fixe (exemple : signal sonore de l'ambulance ou des pompiers, lumière des étoiles ...)

## Activité 1 : choix de la fréquence de travail $f_0$

Pour que la cible puisse être détectée, il faut que ses dimensions soient grandes devant la longueur d'onde  $\lambda$  du signal, ce qui nous donne deux familles de systèmes de radars :

- ceux qui travaillent avec des ultrasons (de 20 kHz à 10MHz selon l'application)
- ceux qui travaillent avec des ondes électromagnétiques dans les hyperfréquences (à 9,9 GHz en France)

Dans les trois cas pratiques suivants, calculer la longueur d'onde correspondant au signal :

	A-ultrasons	B-ultrasons	C-hyperfréquences
<b>fréquence</b>	$f_0 = 40 \text{ kHz}$	$f_0 = 2 \text{ MHz}$	$f_0 = 9,9 \text{ GHz}$
<b>vitesse de propagation</b>	$c \approx 340 \text{ m/s}$	$c \approx 340 \text{ m/s}$	$c = 300000 \text{ km/s}$
<b>applications</b>	alarmes, détection d'intrus	échographie médicale	mesure de vitesse de véhicules

Conclure sur l'adéquation entre la fréquence de travail  $f_0$  et la taille de la cible.

**Activité 2 : évaluation de la fréquence Doppler  $\Delta f$** 

Pour chacun des 3 scénarios suivants, caractériser la variation de fréquence  $\Delta f$  liée au mouvement :

⇒ **Situation A** : la cible du détecteur d'intrus à ultrasons est une personne se déplaçant à 1 km/h

⇒ **Situation B** : la cible du détecteur est la surface du muscle cardiaque dont la position s'écrit :

$$x(t) = a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t) \quad \text{avec} \quad a = 3 \text{ mm} \quad \text{et} \quad F = 1 \text{ Hz (60 battements/minute)}$$

⇒ **Situation C** : la cible du détecteur est une voiture roulant à la vitesse constante de 50 km/h

Dans quelle bande de fréquence tombe la variation de fréquence  $\Delta f$  due à l'effet Doppler ?

**- Activités avec les transducteurs à ultrasons 40 kHz -**

On utilise pour commencer les transducteur piézoélectriques à ultrasons Murata fonctionnant à 40 kHz.



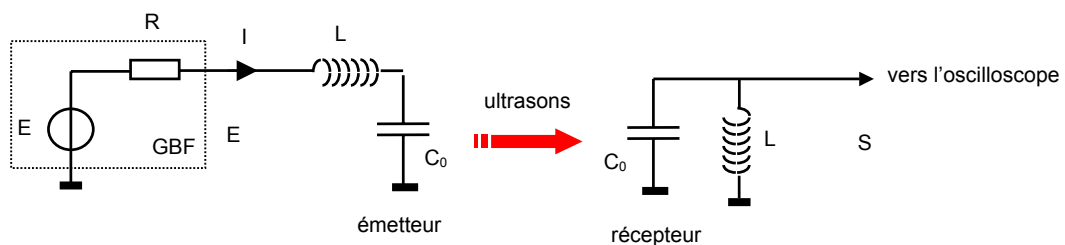
L'effet piézoélectrique étant réversible, l'émetteur et le récepteur ont une constitution identique.

**Activité 3 : mise en œuvre des transducteurs**

A partir des données du fabricant (voir **Annexe 1**) déterminer :

- la valeur typique de la capacité  $C_0$  équivalente à un transducteur
- sur la courbe d'impédance : la fréquence de résonance  $f_0$  et la bande passante B
- l'angle  $\theta_0$  du faisceau rayonné à  $-3\text{dB}$  (courbe Beam Angle)

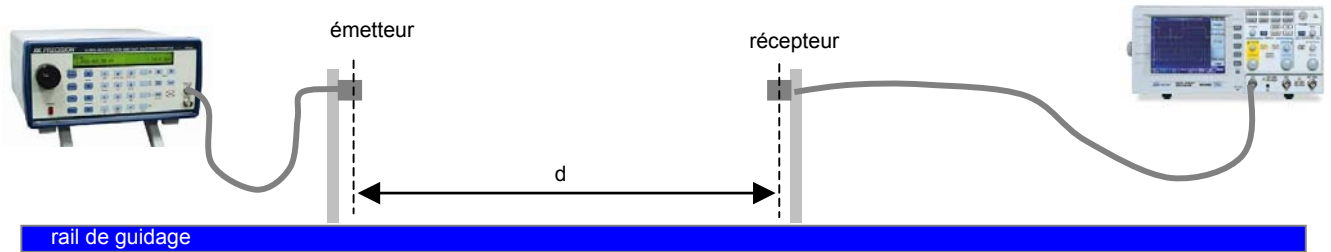
Pour optimiser l'émission et la réception, on associe aux transducteurs les composants suivants :



Pour l'émetteur, écrire l'expression de l'impédance complexe  $\underline{Z}(j\omega)$  du circuit  $R, L, C_0$ . Quelle condition doit vérifier l'inductance  $L$  pour que le courant  $I$  dans l'émetteur soit maximal ? Comment s'écrit alors ce courant  $I_{\max}$  ?

La valeur  $L = 5,6 \text{ mH}$  choisie vous semble-elle convenable, compte tenu de la dispersion annoncée par le fabricant sur la fréquence de résonance  $f_0$  ?

Placer les transducteurs sur leur rail de guidage et réaliser le montage suivant :



Le générateur fournit en sortie sa tension maximale (10Vcc) et les deux transducteurs sont distants d'une distance d'environ  $d \approx 50$  à 80 cm. On évitera, bien-sûr, de placer des obstacles dans le faisceau durant la mesure.

Relever la courbe de réponse de l'ensemble émetteur-récepteur dans toute la bande utile autour de 40 kHz. Que peut-on dire de cette courbe de réponse ?

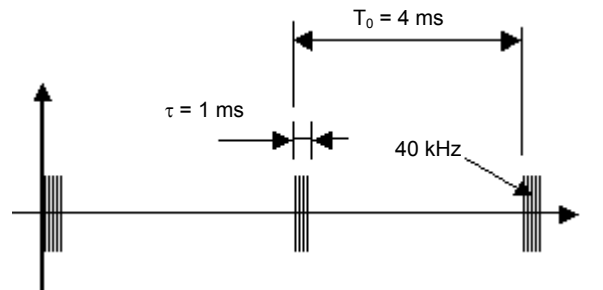
#### Activité 4 : mesure de la vitesse de propagation $c$ des ultrasons dans l'air

Avec le même montage que précédemment, on se place à fréquence fixe, voisine de 40 kHz. Lorsqu'on déplace un des transducteurs, le déphasage entre les courbes varie. Pour un déplacement égal à la longueur d'onde  $\lambda$ , le déphasage aura varié de  $2\pi$ .

Mesurer la distance  $D$  correspondant à un nombre entier  $N$  de longueurs d'ondes et en déduire la valeur de  $\lambda$ , puis de  $c$ . Comparer la valeur trouvée à la valeur de la vitesse standard du son dans l'air (343m/s à 20°C, 350m/s à 30°C).

#### Activité 5 : émission en rafales

On attaque maintenant l'émetteur avec des salves de sinusoïdes à 40 kHz, de durée  $\tau = 1$  ms et de fréquence de récurrence 250 Hz.



Pour générer les salves, on mettra le GBF en mode Burst. Une fois les réglages effectués, il doit afficher :

Burst mode	Cont	Ton :	1ms
40,000.00 Hz	Off	4 ms	+18 dBm

Relever l'oscillogramme du signal émis et du signal reçu et en déduire le retard lié à la propagation des ultrasons dans l'air. Mesurer la distance entre les deux transducteurs et en déduire une deuxième détermination  $c'$  de la vitesse du son.

Augmenter la période de répétition à  $T_0 = 20$  ms, coucher les deux transducteurs côte à côte sur la table et mesurer la distance table-plafond (le signal réfléchi est alors très faible, mais la mesure est possible)

#### Activité 6 : atténuation des ultrasons en fonction de la distance

Pour différentes valeurs de la distance  $d$ , relever l'amplitude  $S$  du signal reçu et tracer la courbe  $A=S/E = f(d)$ .

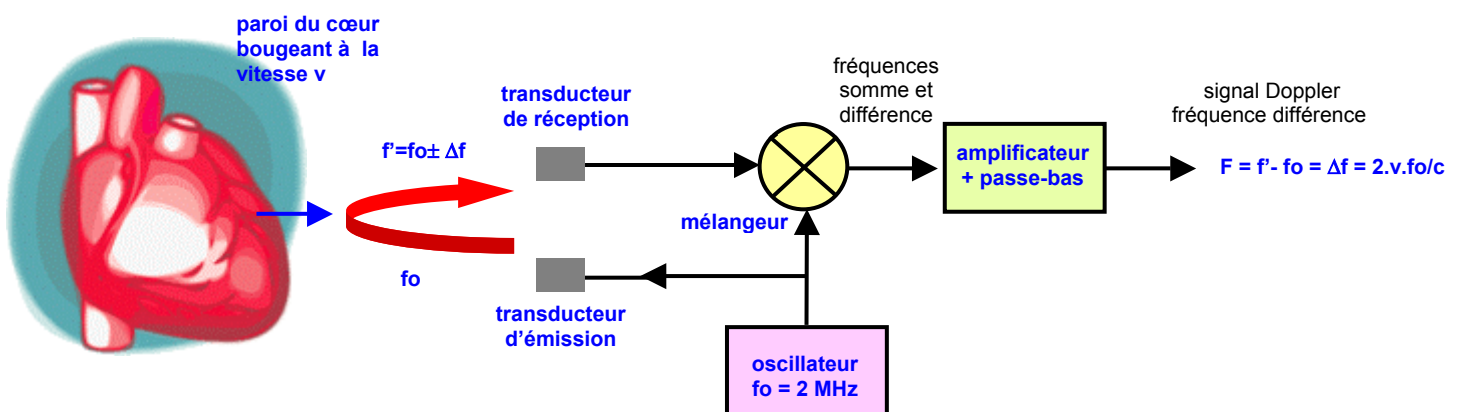
**Question à résoudre :** cette courbe répond-elle à l'équation  $A = K/d$  ou plutôt à  $A = K/d^2$  ? Pour lever le doute, tracer les deux courbes  $A = f(1/d)$  et  $A = f(1/d^2)$  et conclure quant à la loi de variation du niveau reçu en fonction de la distance.

## - Activités avec le capteur Doppler 2 MHz -

On utilise maintenant le capteur Doppler 2 MHz Tomypod ou Easydop selon les revendeurs (voir **Annexe 2**).



Le schéma fonctionnel de ce dispositif à ultrasons est le suivant :

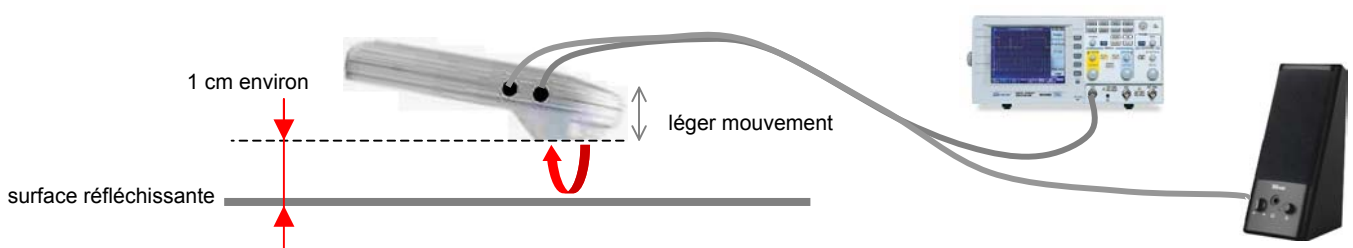


Fonctionnement :

- le mélangeur multiplie le signal émis (fréquence  $f_0$ ) avec le signal reçu (fréquence  $f'$ )
- le filtre passe-bas garde la composante à fréquence différence
- le signal de sortie est donc un signal à la fréquence Doppler  $\Delta f = 2.v.fo/c$
- sa fréquence  $\Delta f$  varie donc comme la vitesse  $v$  de la cible
- ce qui veut dire que la fréquence de sortie monte et descend au même rythme que le mouvement cardiaque

### Activité 7 : mise en évidence qualitative de l'effet Doppler

Relier le Tomypod à un haut-parleur et à l'oscilloscope. Approcher la zone circulaire derrière laquelle se trouve le transducteur piézoélectrique à 1 cm d'une surface dure (en évitant les chocs).

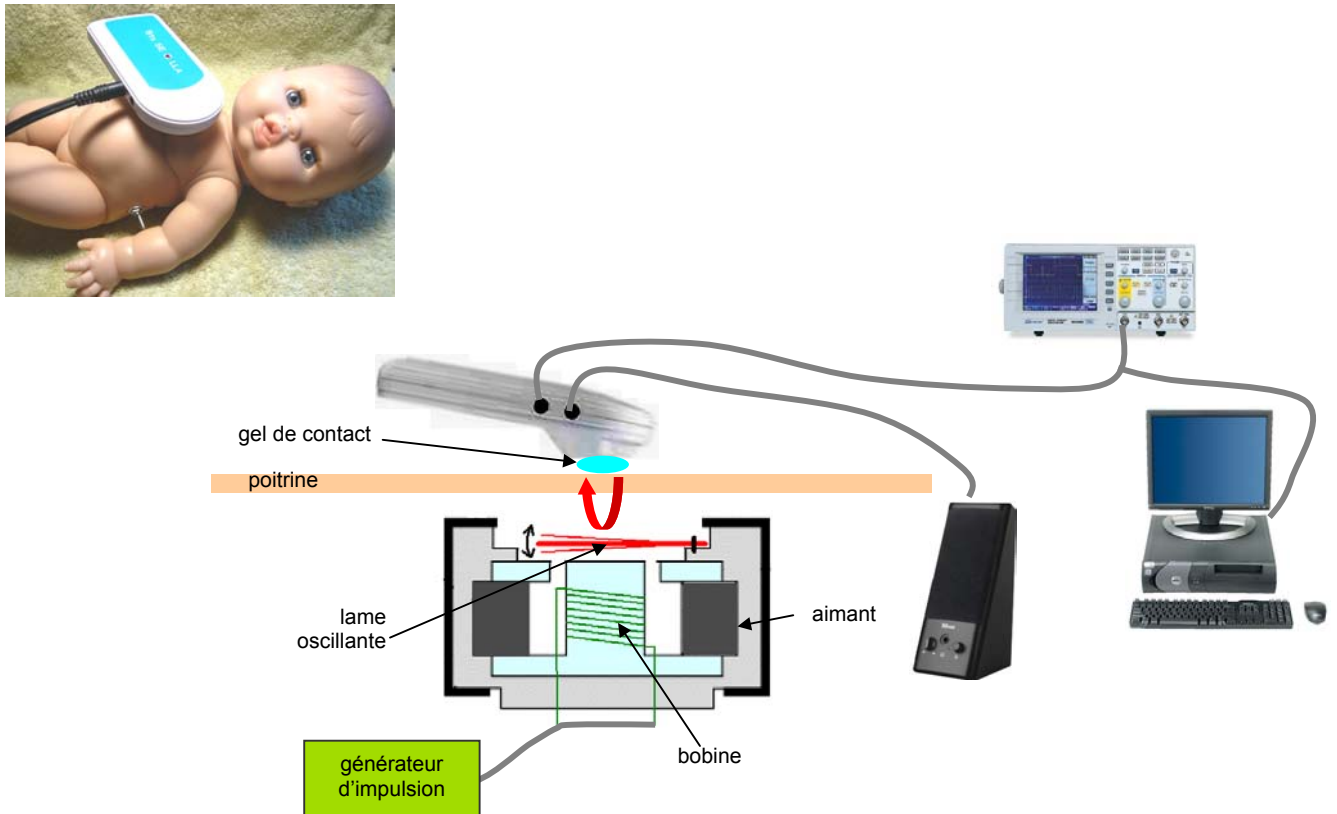


Vérifier qualitativement que la fréquence du signal de sortie varie en fonction de la vitesse de déplacement du Tomypod par rapport à la surface. Estimer la portée de ce détecteur Doppler à ultrasons dans l'air.

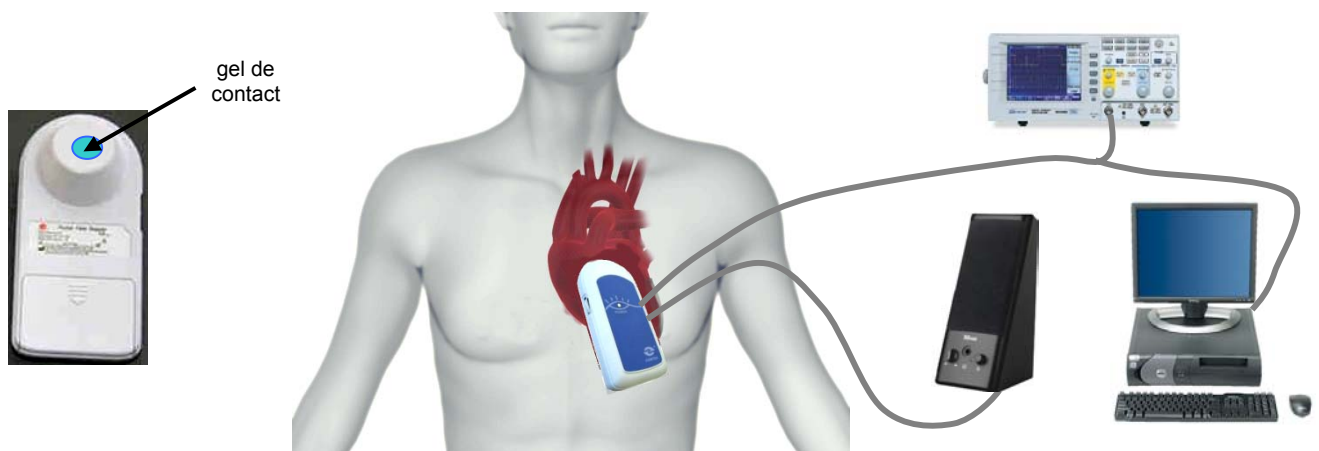
### Activité 8 : relevé du signal cardiaque

La cible mobile est maintenant la paroi du cœur qui génère un signal Doppler bien audible. Les mesures sont d'abord faites sur Lucie, poupon équipé d'un cœur mécanique (lame oscillante), puis sur un cœur réel.

La lame en matériau ferromagnétique bouge légèrement sous l'action de la variation du champ magnétique  $B$  créé par un aimant permanent (champ  $B_0$  fixe) et une bobine alimentée par un signal impulsionnel (champ  $B$  variable).



Placer un peu de gel de contact (taille d'une noisette) sur la partie active du Tomypod pour faciliter le passage des ultrasons entre le transducteur et la paroi de la poitrine (matière plastique ou peau).



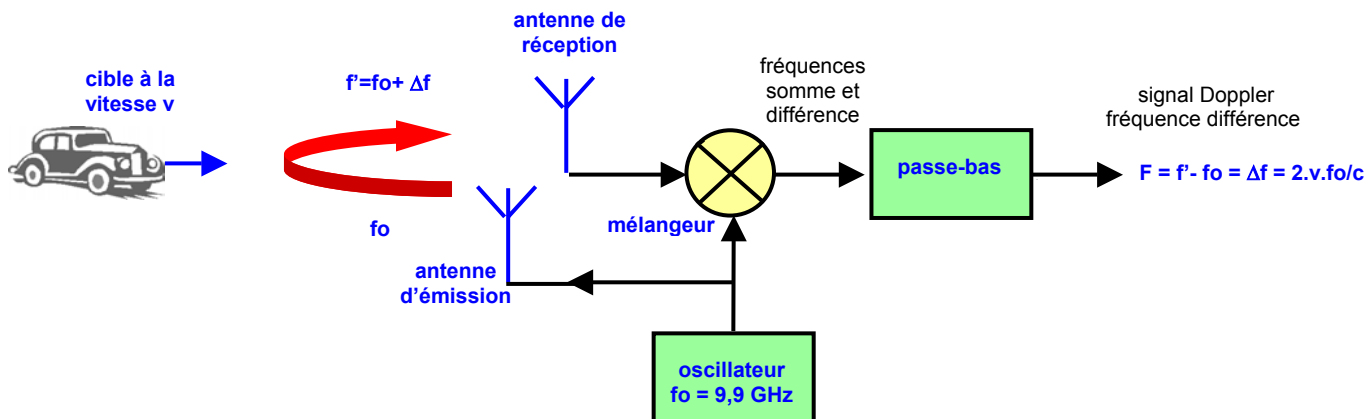
Pour les deux situations proposées :

- placer le capteur sur la poitrine, en face du cœur, et chercher l'endroit qui donne le meilleur signal Doppler
- enregistrer l'oscillogramme du signal Doppler et en déduire la fréquence cardiaque
- enregistrer le signal Doppler du cœur au format mp3 sur le PC

**- Activités avec le module Doppler hyperfréquence -**

Le dispositif utilisé est un radar Doppler hyperfréquence MDU1030 (voir **Annexe 3**) destiné à détecter une intrusion dans un local protégé.

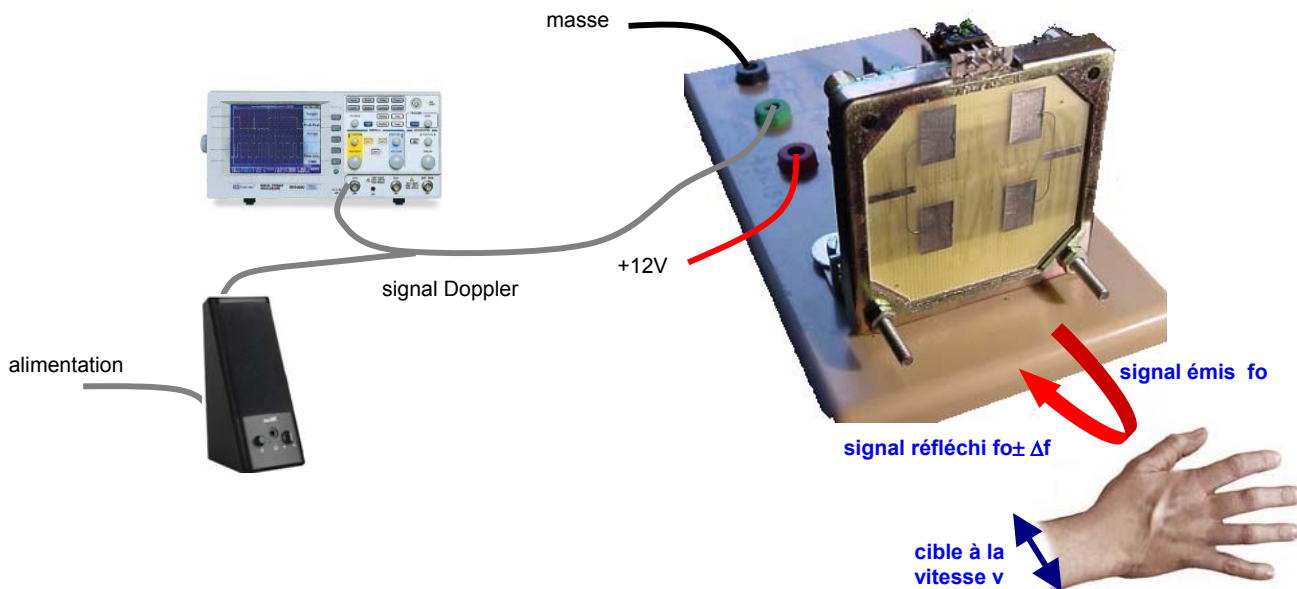
Sa structure interne est, sur le plan fonctionnel, comparable à celle du détecteur Doppler à ultrasons :



Il produit en sortie un signal dont la fréquence F augmente avec la vitesse v de la cible (être humain, véhicule...).

**Activité 9 : mise en évidence qualitative de l'effet Doppler**

On alimente la maquette en 12V et on relie la sortie à une enceinte amplifiée et à l'oscilloscope.



En approchant et retirant vivement la main du radar selon l'axe d'émission, observer à l'oscilloscope et à l'oreille le signal Doppler. Enregistrer l'oscillogramme correspondant à un aller-retour de la main. A quel moment la vitesse est-elle maximale ?

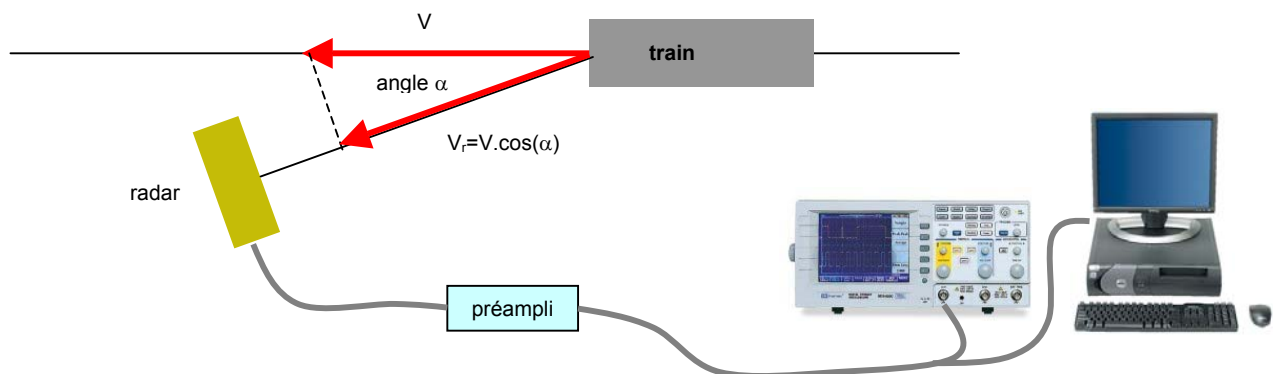
A partir de l'oscillogramme, déterminer la valeur de cette vitesse maximale  $V_{max}$ .

**Activité 10 : mesure de la vitesse d'un mobile**

Le mobile qui va servir de cible pour cette mesure le circuit de train électrique Jouef HJ1000. Le module Doppler hyperfréquence est placé à proximité de la voie et mesure la vitesse du train à son passage.



En réalité, la vitesse mesurée par un radar Doppler est la vitesse radiale  $V_r$  dans l'axe de l'émission, et pas la vitesse réelle  $V$  car le radar fait toujours un angle  $\alpha$  avec la direction du mobile.



Le radar Doppler hyperfréquence fournit un signal d'amplitude assez faible. Il est donc associé à un préamplificateur dont le schéma est donnée en **Annexe 4**. A partir des données fournies, évaluer son amplification  $A_0$  dans sa bande passante et les différentes fréquences de coupure.

**NB :** pour les radars routiers, la procédure réglementaire d'utilisation des radars automatiques, fixes ou mobiles, impose un placement de ceux-ci à  $25^\circ$  par rapport à l'axe de la route.

Le radar étant placé sur le circuit ferroviaire avec l'angle convenable ( $\alpha = 25^\circ$ ), faire circuler le train équipé de ses wagons et analyser le signal Doppler fourni par le module à l'aide d'Audiotester ( $f_e = 8$  kHz, mono, affichage de la FFT entre 1 et 100 Hz).

Saisir au vol le spectre au passage du train, repérer la raie Doppler, mesurer sa fréquence et en déduire les valeurs numériques des vitesses  $V_r$  et  $V$  du train.

Sachant que la longueur du circuit est de  $L = 2,75$  m, déterminer la vitesse  $V'$  du train en mesurant le temps mis pour parcourir 2 ou 3 tours. Un chronomètre est disponible en ligne sur <http://www.chronometre-en-ligne.com>. Comparer les résultats obtenus.

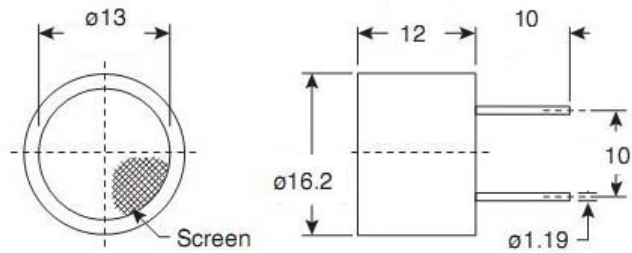
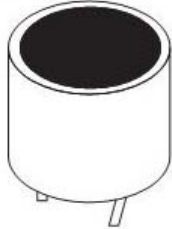
Si on néglige l'influence de l'angle  $\alpha$ , la vitesse est-elle surestimée ou sous-estimée ? Estimer en % l'erreur commise sur la vitesse.

**Conclusion :** à quoi doit veiller le gendarme lorsqu'il positionne son radar hyperfréquence au bord de la route ?

**NB :** ne pas oublier de reconfigurer Audiotester en mode normal, soit :  $f_e = 44,1$  kHz, stéréo, affichage du spectre entre 20 Hz et 20 kHz.

## Annexe 1 : transducteur à ultrasons Murata 40 kHz

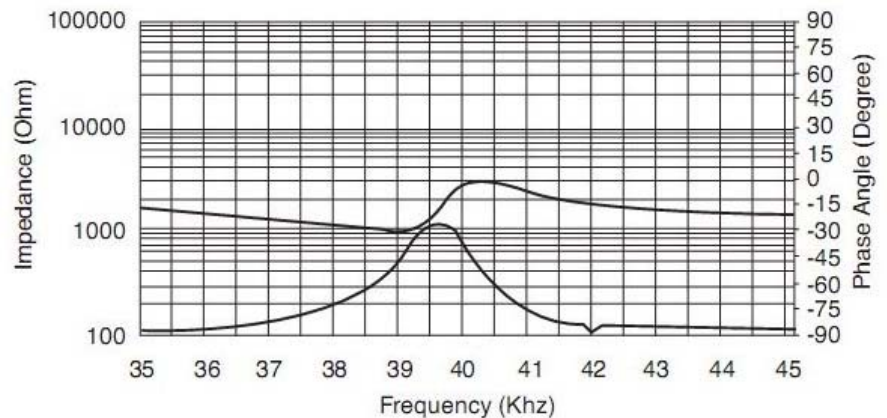
## Ultrasonic Transducer



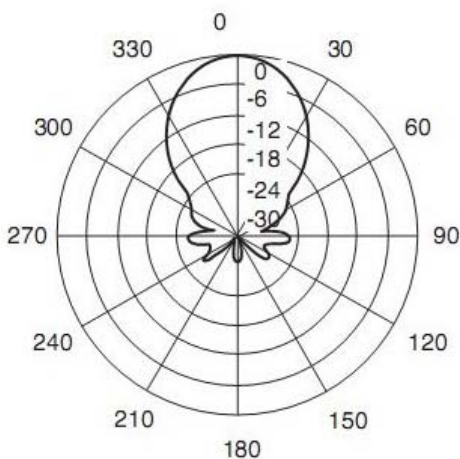
Dimensions: mm

## Impedance/Phase Angle vs. Frequency

Tested under 1Vrms Oscillation Level

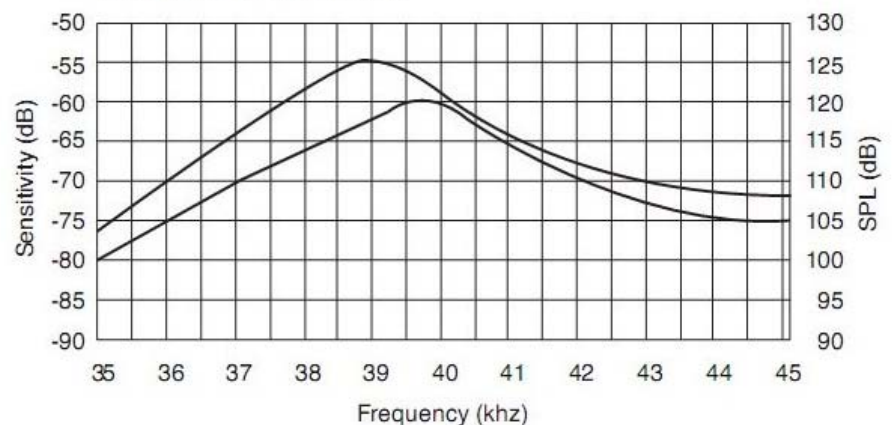


Beam Angle: Tested at 40.0KHz frequency



## Sensitivity/Sound Pressure Level

Tested under 10Vrms @30cm



## Electrical Specifications:

- Center frequency ( $f_0$ ): 40.0KHz  $\pm$  1.0KHz
- Nominal impedance: 1,000 $\Omega$
- Sound pressure level @  $f_0$ : 117dB
- Sensitivity @  $f_0$ : -53dB (0dB = 1V/ $\mu$  bar)
- Echo sensitivity @  $f_0$ : -45dB (0dB re 50 bursts sine wave of 20 volts peak-peak; 100cm reflection target)
- Bandwidth -6dB: 2KHz
- Ringing: 1.2mS (max.)
- Beam angle -6dB: 55°
- Capacitance @ 1KHz: 2,400pF  $\pm$  20%
- Max. driving voltage: 20Vrms (cont.)

## Mechanical Specifications:

- Operating temperature: -30°C ~ +85°C
- Storage temperature: -40°C ~ +85°C



Murata Manufacturing Co., Ltd.



## Annexe 2 : détecteur Doppler à ultrasons TOMYPOD

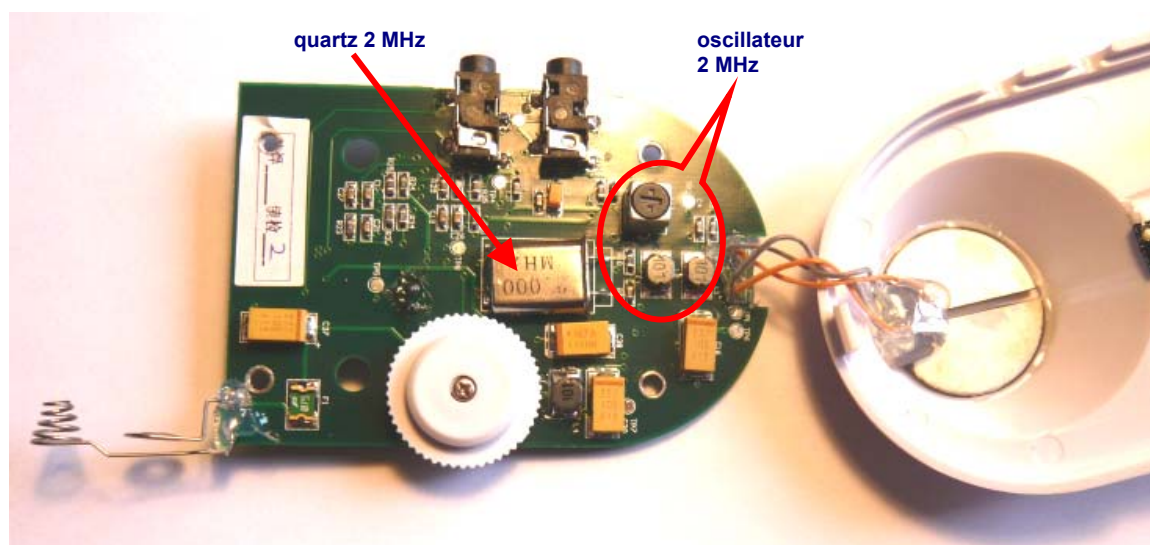
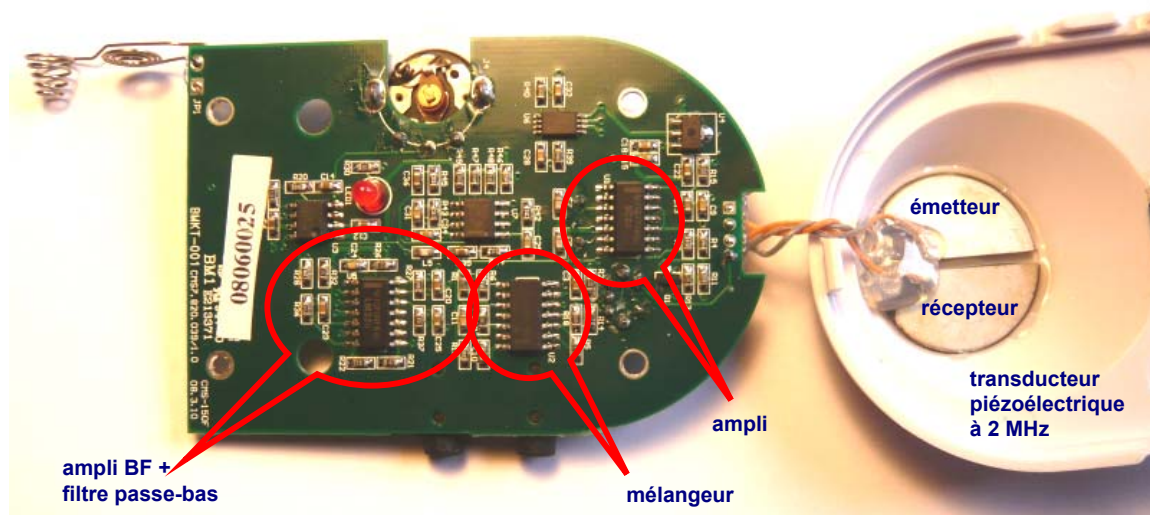
### Spécifications techniques :

- type : Doppler fœtal TOMYPOD ou EASYDOP (selon les revendeurs)
- fréquence :  $2.0\text{MHz} \pm 10\%$
- environnement :  $+5^{\circ}\text{C}$  à  $+40^{\circ}\text{C}$  - Humidité  $\leq 80\%$
- alimentation : 2 piles 1,5 v AAA
- dimensions : 110 mm x 55 mm x 16,8 mm
- poids : 80 g avec piles
- accessoires : écouteurs individuels, câble de connexion audio, gel conducteur

### DUPONT MEDICAL

BP 19 - ZAC de Ban la Dame - 92 rue du train à fil 54390 FROUARD (France)

[www.dupont-medical.com](http://www.dupont-medical.com)



### Annexe 3 : détecteur Doppler à hyperfréquences MDU1030

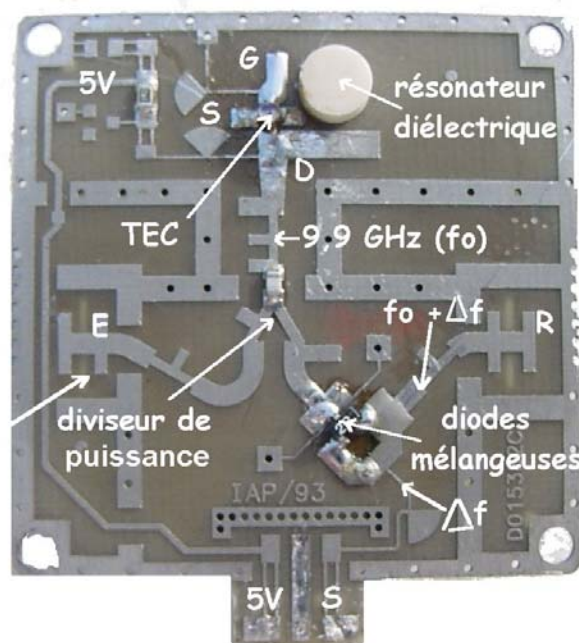
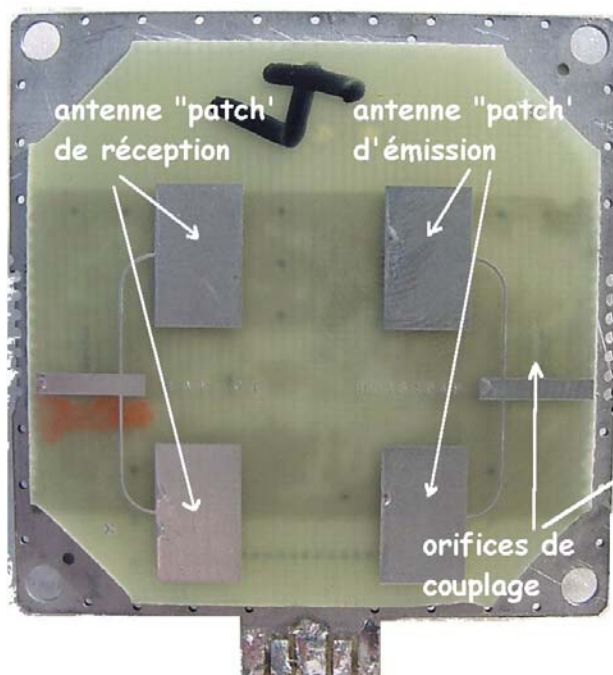


Livré en boîtier métallique blindé, le MDU1030 exploite la fréquence normalisée des 9,9 GHz (bande X).

Il utilise un oscillateur à FET, stabilisé par un résonateur diélectrique, offrant une très grande fiabilité et stabilité en température.

Le signal BF généré en sortie devra être appliqué à un étage d'amplification 70 dB doté d'une bande passante de 3 à 80 Hz pour être exploité.

puissance rayonnée: 13 dBm  
 consommation : 40 mA en émission continue  
 sensibilité en réception : -86 dBm  
 angle de détection:  $36^\circ \times 72^\circ$   
 portée maximale: 20 m  
 dimensions: 54 x 54 x 14,5 mm  
 alimentation: +5V



On retrouve dans ce module la structure classique d'un radar Doppler :

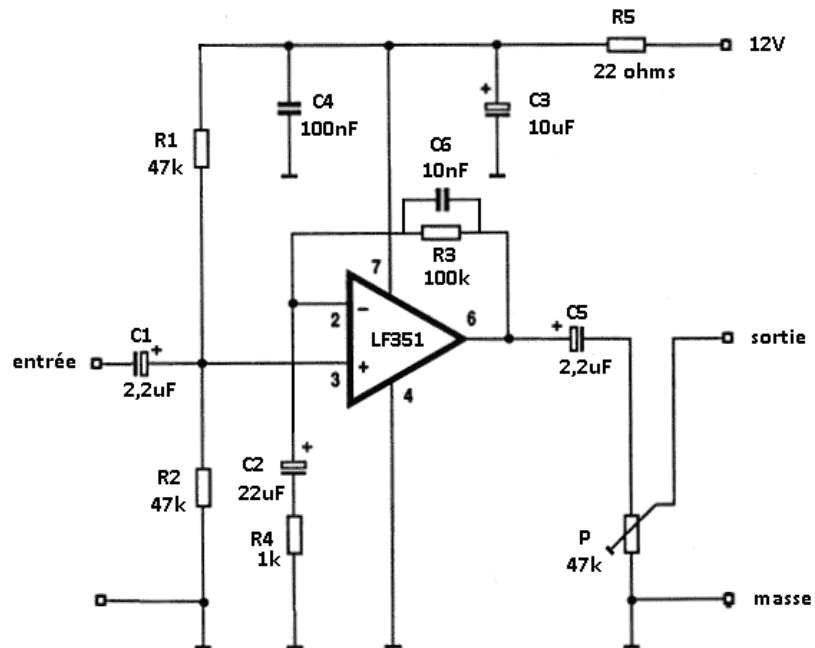
- un oscillateur à 9,9GHz produit le signal à la fréquence d'émission
- un diviseur de puissance envoie une partie du signal vers l'antenne et l'autre vers le mélangeur
- deux antennes « patch » imprimées transforment le signal électrique en onde électromagnétique
- deux antennes « patch » identiques transforment l'onde électromagnétique reçue en signal électrique
- le signal reçu est multiplié par signal émis par un mélangeur à 2 diodes
- le signal à la fréquence Doppler  $\Delta f$  est disponible sur la sortie S du module

Module vendu en particulier par :

**LEXTRONIC** 36/40 Rue du Gal de Gaulle 94510 La Queue en Brie

[www.lextronic.fr](http://www.lextronic.fr)

## Annexe 4 : préamplificateur pour radar Doppler



Les composants introduisent les coupures suivantes :

- filtre passe-haut FH1 : C1 et R1//R2
- filtre passe-haut FH2 : C2 et R4
- filtre passe-haut FH3 : C5 et P
- filtre passe-bas FB4 : C6 et R3

Dans la bande passante C1, C2 et C5 peuvent être considérés comme des court-circuits, et C6 comme un circuit ouvert.



# ► L'effet Doppler : réponses

Rédacteur :

Binôme :

Date :

## Activité 1 : choix de la fréquence de travail $f_0$

Longueur d'onde correspondant au signal :

	A-ultrasons	B-ultrasons	C-hyperfréquences
<b>fréquence</b>	$f_0 = 40 \text{ kHz}$	$f_0 = 2 \text{ MHz}$	$f_0 = 9,9 \text{ GHz}$
<b>vitesse de propagation</b>	$c = 340 \text{ m/s}$	$c = 340 \text{ m/s}$	$c = 300000 \text{ km/s}$
<b>longueur d'onde</b>	$\lambda =$	$\lambda =$	$\lambda =$
<b>applications</b>	alarmes, détection d'intrus	échographie médicale	mesure de vitesse de véhicules
<b>taille de la cible d (ordre de grandeur)</b>	$d =$	$d =$	$d =$
$\lambda \ll d$	<input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> oui	<input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> oui	<input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> oui

## Activité 2 : évaluation de la fréquence Doppler $\Delta f$

⇒ **Situation A** : la cible du détecteur d'intrus à ultrasons est une personne se déplaçant à 1 km/h

$$\Delta f = 2 \cdot v \cdot f_0 / c = \dots\dots\dots$$

⇒ **Situation B** : la cible du détecteur est la surface du muscle cardiaque dont la position s'écrit :

$$x(t) = a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t) \quad \text{avec} \quad a = 3 \text{ mm} \quad \text{et} \quad F = 1 \text{ Hz (60 battements/minute)}$$

$$v(t) = \dots\dots\dots$$

$$\Delta f(t) = 2 \cdot v(t) \cdot f_0 / c = \dots\dots\dots$$

La fréquence Doppler varie entre ..... Hz et ..... Hz

⇒ **Situation C** : la cible du détecteur est une voiture roulant à la vitesse constante de 50 km/h

$$\Delta f = 2 \cdot v \cdot f_0 / c = \dots\dots\dots$$

La variation de fréquence  $\Delta f$  due à l'effet Doppler tombe dans la bande (mettre une croix dans la bonne case) :

	audio	ultrasons (20kHz-2 MHz)	radio (1MHz-1GHz)	hyperfréquences
<b>Situation A</b>				
<b>Situation B</b>				
<b>Situation C</b>				

**-Activités avec les transducteurs à ultrasons 40 kHz-**

**Activité 3 : mise en œuvre des transducteurs** (joindre l'Annexe 1 pour les constructions graphiques)

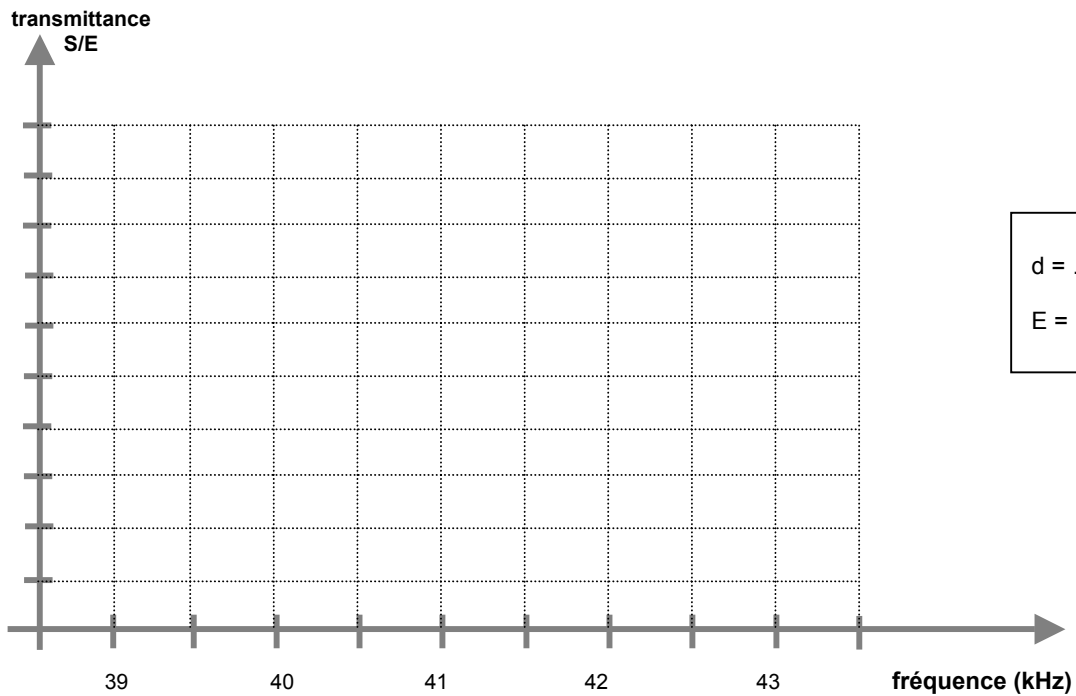
- capacité équivalente à un transducteur  $C_0 = \dots\dots\dots$
- fréquence de résonance  $f_0 = \dots\dots\dots$  bande passante  $B = \dots\dots\dots$
- angle du faisceau rayonné à  $-3\text{dB}$  :  $\theta_0 = \dots\dots\dots$

Composants associés aux transducteurs :

- pour l'émetteur, impédance complexe du circuit  $R,L,C_0$  :  $Z(j\omega) = \dots\dots\dots$
- le courant  $I$  dans l'émetteur est maximal si le module de  $Z(j\omega)$  est :  maximal  minimal
- cette condition est réalisée si :  $\dots\dots\dots$
- soit  $L = \dots\dots\dots$
- le courant maximal s'écrit alors  $I_{\text{max}} = \dots\dots\dots$
- la valeur  $L = 5,6 \text{ mH}$  choisie me semble convenable :  non  oui

**Courbe de réponse de l'ensemble émetteur-récepteur autour de 40 kHz :**

fréquence														
sortie S														
S/E														



Commentaire :  $\dots\dots\dots$   
 $\dots\dots\dots$

**Activité 4 : mesure de la vitesse de propagation c des ultrasons dans l'air**

Pour N = ..... longueurs d'onde, on doit opérer un déplacement de D = ..... cm. On en déduit :

- la longueur d'onde  $\lambda = \dots\dots\dots$
- la célérité du son dans l'air :  $c = \dots\dots\dots$

Commentaire : .....

**Activité 5 : émission en rafales**

⇒ **Oscillogramme des signaux émis et reçus** : > voir courbe n° .....

- retard lié à la propagation des ultrasons dans l'air :  $\tau = \dots\dots\dots$
- distance entre les deux transducteurs :  $d = \dots\dots\dots$
- deuxième détermination de la vitesse du son :  $c' = \dots\dots\dots$

Mesure la distance table-plafond H :

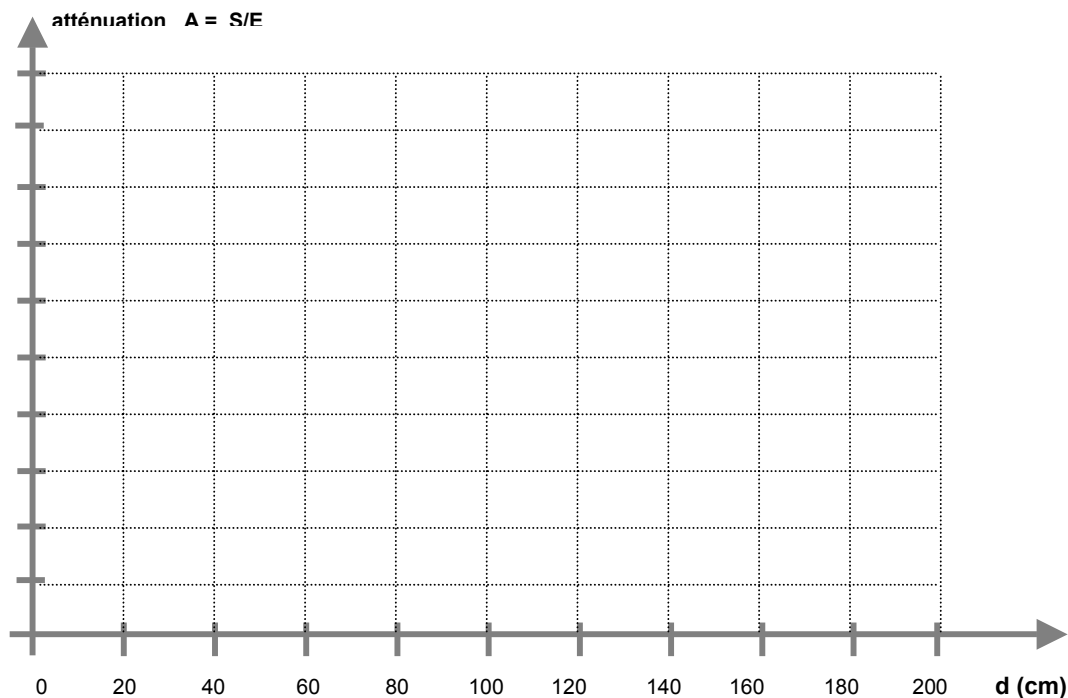
⇒ **Oscillogramme des signaux émis et reçus** : > voir courbe n° .....

- retard lié à la propagation des ultrasons dans l'air :  $\tau = \dots\dots\dots$
- distance parcourue par les ultrasons:  $d = \dots\dots\dots$  distance table -plafond :  $H = \dots\dots\dots$

Commentaire : .....

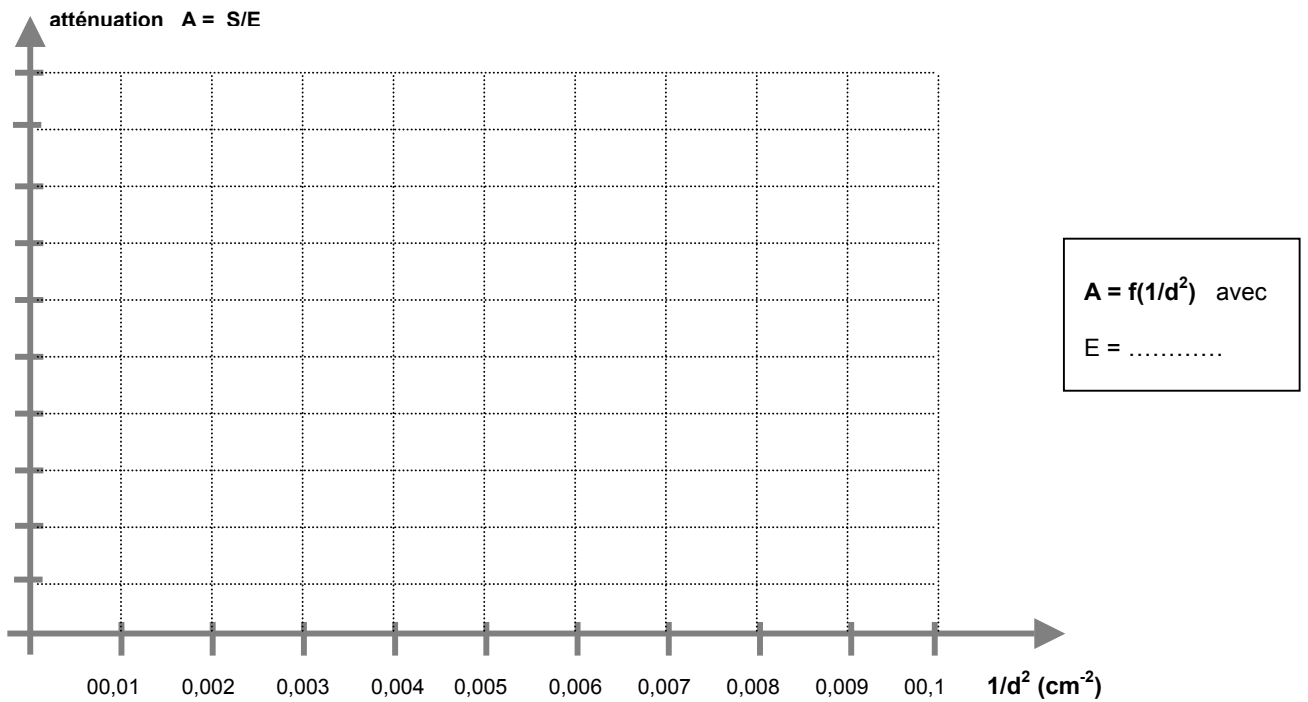
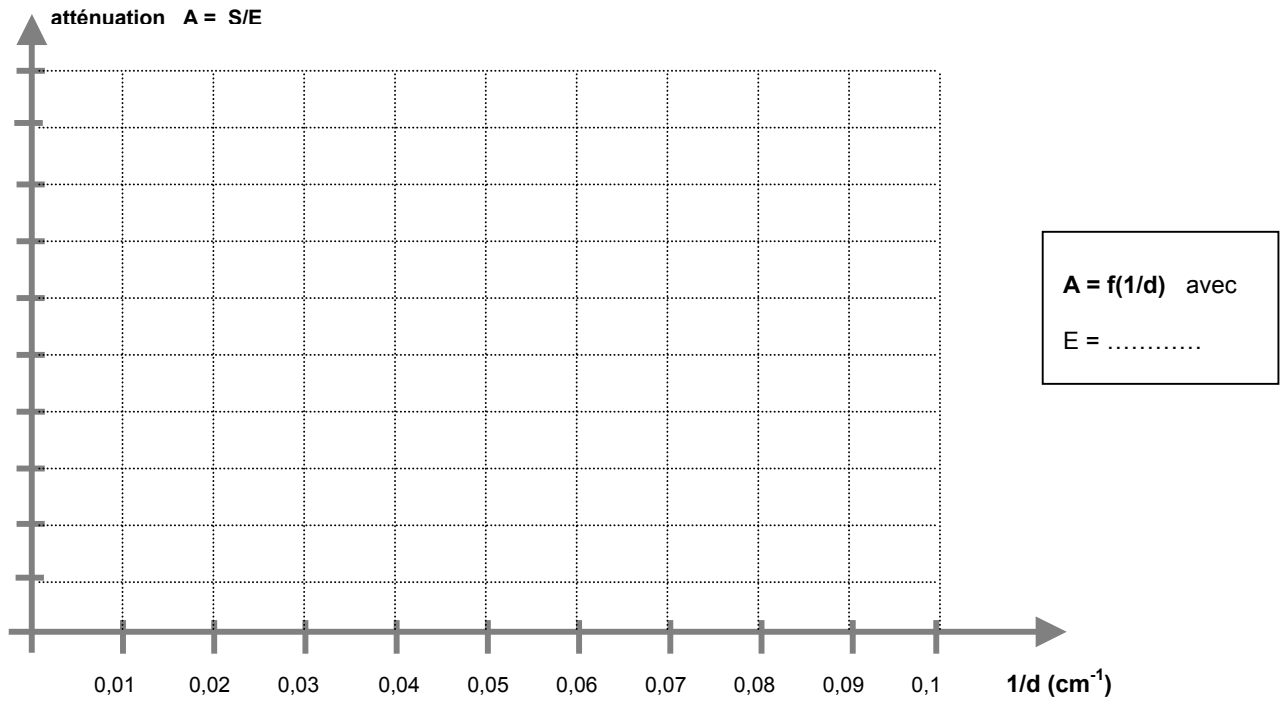
**Activité 6 : atténuation des ultrasons en fonction de la distance**

distance d																			
1/d																			
1/d <sup>2</sup>																			
sortie S																			
A = S/E																			



**A = f(d)** avec  
E = .....

Loi de variation de A en fonction de la distance :



**Conclusion :**

La courbe qui se rapproche le plus d'une droite est :   $A = f(1/d)$       $A = f(1/d^2)$

J'en déduis que le niveau du signal reçu :

diminue avec la distance et son amplitude décroît proportionnellement à  $1/d$  :  $A = K/d$

diminue avec la distance et son amplitude décroît proportionnellement à  $1/d^2$  :  $A = K/d^2$

avec  $K = \dots\dots\dots$

**- Activités avec le capteur Doppler 2 MHz-****Activité 7 : mesure de la vitesse d'un objet**

Le détecteur Doppler à ultrasons est sensible à la distance où se trouve la cible :  oui  non

Le détecteur Doppler à ultrasons est sensible aux variations de la distance où se trouve la cible :  oui  non

Sa portée dans l'air est de l'ordre de ..... cm.

**NB :** dans l'eau (ou dans le corps humain), les ultrasons se propagent beaucoup plus facilement que dans l'air.

**Activité 8 : relevé du signal cardiaque**

⇒ **Oscillogramme du signal Doppler cardiaque (poupon) :** > voir courbe n° .....

- période du signal :  $T = \dots\dots\dots$
- rythme cardiaque .....battements/s, soit .....battements/min

⇒ **Oscillogramme du signal Doppler cardiaque (cœur réel) :** > voir courbe n° .....

- période du signal :  $T = \dots\dots\dots$
- rythme cardiaque .....battements/s, soit .....battements/min

Commentaire : .....  
.....

**- Activités avec le module Doppler hyperfréquence-****Activité 9 : mise en évidence de l'effet Doppler**

⇒ **Oscillogramme du signal Doppler :** > voir courbe n° .....

- le moment où la vitesse est maximale est précisé sur l'oscillogramme
- période du signal :  $T = \dots\dots\dots$
- fréquence Doppler maximale  $\Delta f_{\max} = \dots\dots\dots$
- vitesse maximale de la main :  $V_{\max} = \dots\dots\dots$

**Activité 10 : mesure de la vitesse d'un mobile**

**Caractérisation du préamplificateur :**

- amplification  $A_0 = \dots\dots\dots$
- filtre passe-haut FH1 :  $f_{c1} = \dots\dots\dots$
- filtre passe-haut FH2 :  $f_{c2} = \dots\dots\dots$
- filtre passe-haut FH3 :  $f_{c3} = \dots\dots\dots$
- filtre passe-bas FB4 :  $f_{c4} = \dots\dots\dots$

**Conclusion :** le préamplificateur a une amplification de ..... dB entre ..... Hz et ..... Hz.



⇒ **Oscillogramme du signal Doppler** : > voir courbe n° .....

⇒ **Spectre du signal Doppler** : > voir courbe n° .....

- fréquence Doppler au passage du train :  $\Delta f = \dots\dots\dots$
- vitesse radiale  $V_r = \dots\dots\dots$
- vitesse réelle  $V = \dots\dots\dots$
- temps mis pour parcourir  $N = \dots\dots\dots$  tours :  $T = \dots\dots\dots$
- vitesse calculée par chronométrage :  $V' = \dots\dots\dots$
- si on néglige l'angle  $\alpha$ , la vitesse sera :  sous-estimée       surestimée
- l'erreur relative commise sera de :  $\Delta V/V = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$  %

Commentaire : .....

.....