
 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Mesure de la vitesse d'un objet en chute «libre»

par Gérard LLAPASSET

Lycée climatique et sportif Pierre de Coubertin
66120 Font-Romeu

RÉSUMÉ

Le montage décrit ci-après utilise l'effet Doppler ultrasonore, qui a déjà fait l'objet d'un excellent article dans le BUP n° 798, novembre 1997, suivi d'une conversion fréquence/tension qui permet d'accéder à la vitesse du mobile qui est «libre», je veux dire seulement soumis à la pesanteur et aux forces de frottement de l'air (pas de fil électrique, pas de ficelle, pas de contact avec une solution électrolytique...).

Sachant que la tension $U(t)$ (VA sur la figure 1) est proportionnelle à la vitesse du mobile, voici, afin de résumer davantage cet article, le résultat que j'obtiens.

Le résultat numérique que l'on déduit, est, lui aussi, tout à fait intéressant (voir suite).

Ce montage peut compléter l'équipement en CBL (mesure de distance) qu'ont certains collègues en relation avec les calculatrices TI82/92 ou autres ; il permet aussi de montrer une application de l'effet Doppler en option première S.

On distingue deux grandes parties dans ce montage : l'obtention d'une fréquence proportionnelle à la vitesse puis un convertisseur fréquence/tension ; on enregistre cette dernière à l'ordinateur.

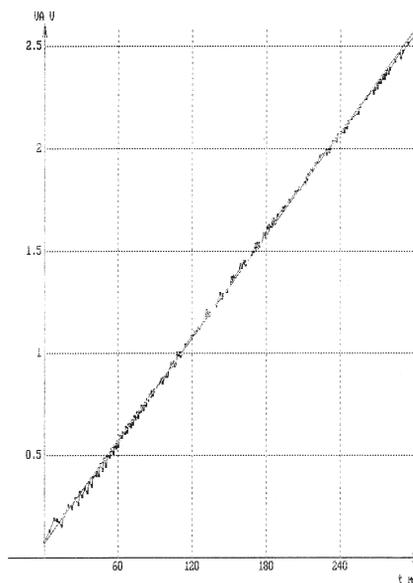


Figure 1

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

1. LA CONVERSION «VITESSE/FRÉQUENCE»

Il y a peu de choses à rajouter à l'article de MM. A. DEIBER et O. KEMPF (BUP n° 798, novembre 1997).

1.1. Le mobile

Tout d'abord, l'émetteur et le récepteur à ultrasons sont placés côte à côte, et ce dernier reçoit l'onde réfléchie par le mobile, qui de ce fait, ne devra pas être trop petit. En ce qui me concerne, j'utilise comme mobile, une plaque carrée de 15 cm d'arête et de 4 cm d'épaisseur en chêne. Cette plaque comporte un cylindre en fer cloué en son milieu et sur le dessus pour un largage par électroaimant (voir figure 2).

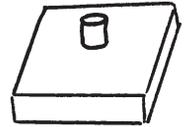


Figure 2 : Mobile.

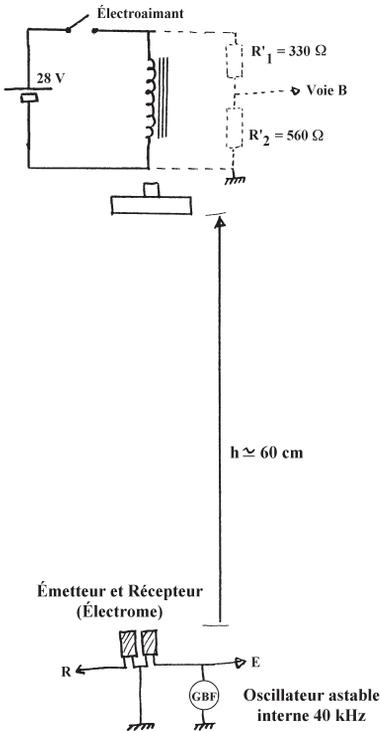


Figure 3

L'électroaimant est constitué par une bobine 1000 spires et un noyau de fer doux d'un transformateur démontable. Étant peu puissant, il est alimenté par un générateur 25 V qu'il ne faut pas laisser trop longtemps branché par crainte de surchauffe. D'où le circuit très simple de la figure 3.

On remarque, en pointillés, un dispositif qui permet le déclenchement, par seuil, de l'ordinateur.

Par effet auto-inductif, après l'ouverture du circuit, un courant transitoire passe dans les résistors R'_1 et R'_2 et, la tension diminue aux bornes de R'_2 pendant un court instant.

1.2. L'effet Doppler

On démontre, dans le cas d'une réflexion de l'onde US sur le mobile (le trajet de l'onde étant parallèle au déplacement du mobile), avec un récepteur et un émetteur fixes (côte à côte), que la variation de fréquence Doppler $|F_e - F_r| = f$, est donnée par

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

$f = 2 * v * F_e / c$. Ceci avec une approximation du genre $(1 + \epsilon)^n \approx 1 + n * \epsilon$, où $\epsilon = v/c$, ce qui est légitime, la chute étant inférieure à 1 m.

1.3. L'obtention de f

En multipliant le signal émis (F_e) par le signal reçu (F_r) après amplification, on obtient un signal dont le spectre en fréquence contient $F_e + F_r$ et $|F_e - F_r|$ que l'on tirera avec un très simple circuit passe-bas réalisé par un RC (voir figure 5).

Jusqu'ici, aucun changement par rapport à l'excellent article déjà cité. La difficulté se fait jour en voulant exploiter un signal dont la fréquence f varie avec la vitesse du mobile (voir figure 4).

En effet en appelant t_{i+1} et t_i les dates de passage à zéro du signal de sortie du filtre passe-bas, la vitesse sera donnée par $1 / (t_{i+1} - t_i) = 2 * F_e * v / c$ (voir l'article cité, le coefficient 2, provenant du fait qu'ici, le récepteur est fixe et reçoit l'onde réfléchie).

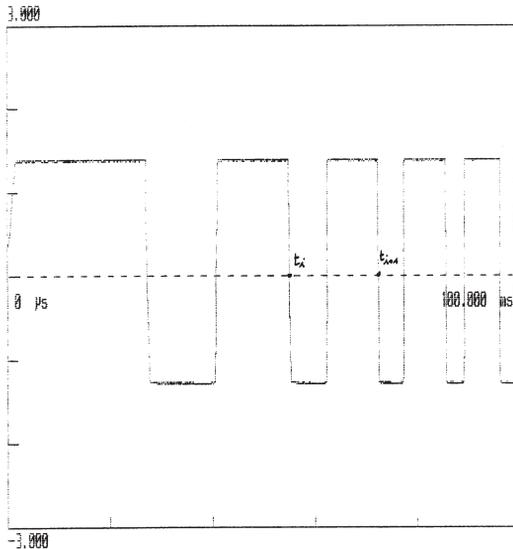


Figure 4 : U_{BM} représenté par un mouvement peu rapide : on voit les problèmes posés par la lecture des t_i (même si après amplification de l'AO2 le signal est «carré», et le fait que la vitesse ne sera connue que de façon discontinue.

On comprend alors que la détermination des dates t_i ne sera pas simple et que de plus, quelque soit l'artifice utilisé par la suite (ce sera le cas aussi du présent montage), cette vitesse ainsi calculée ne pourra donner que des valeurs discontinues (ondulations très visibles au début du tracé de $U(t)$).

2. LE CONVERTISSEUR «FRÉQUENCE/TENSION»

Après avoir fait de nombreuses tentatives avec des montages «classiques» qui se sont avérés insuffisants, souvent par un temps de réponse trop long,

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

je me suis tourné vers les circuits intégrés réalisant cette fonction.

C'est par catalogue que j'ai commandé le circuit intégré LM2917 de National Semi-Conductor (50 F). La documentation de ce CI fait état de plusieurs montages dont je me suis inspiré.

Il faudra retenir que C_2 et R_{10} modifient la pente de la droite $U = U(f)$, R_{10} peut donc être ajustable, et C_3 évite une ondulation trop importante de la tension U . Cependant, il ne faut pas choisir C_3 trop grand car on augmente ainsi le temps de réponse (...«so a compromise between ripple, response time, and linearity must be chosen carefully» dit la documentation). Ceci m'a aussi engagé à réaliser des chutes de l'ordre de 60 cm plutôt que d'une trentaine de cm.

Pour aborder le convertisseur fréquence/tension, il vaut mieux disposer d'un signal «carré», d'où le deuxième AO monté en inverseur qui amplifie à saturation la tension provenant du filtre passe-bas.

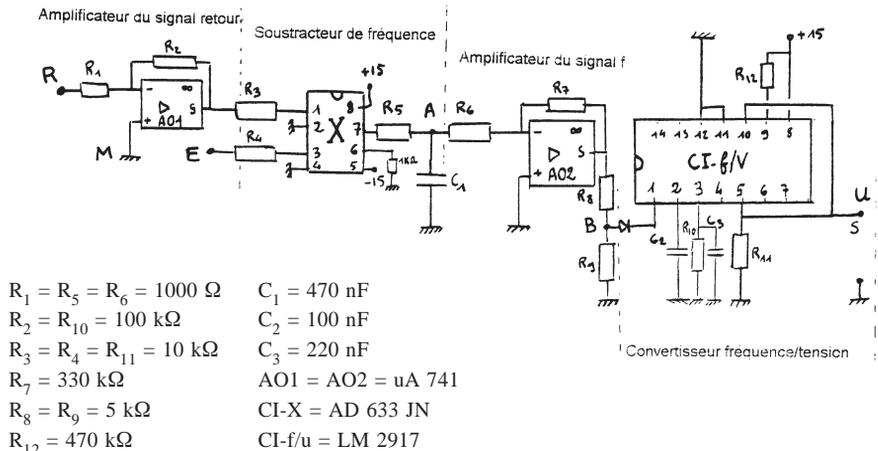


Figure 5

3. ÉTALONNAGE DU CONVERTISSEUR

On envoie, en B, un signal carré de fréquence réglable f que l'on mesure au fréquencesmètre pour, par exemple 50, 100, 200... 800 Hz et on relève U . Conseil : mesurer

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

U avec l'ensemble ordinateur/logiciel qui servira plus tard. Attention à ne pas saturer la carte d'acquisition de l'ordinateur ! Dans ce cas, régler R_{10} .

Pour une fréquence donnée, U est une constante plus une légère ondulation, l'ordinateur prendra une valeur moyenne.

En ce qui me concerne, avec les valeurs du montage, j'obtiens $f = a * U + b$ avec $a = 271,7 \text{ Hz} / \text{V} \pm 1 \%$. Attention ma carte candibus est réglée entre -10 V et $+10 \text{ V}$.

4. ACQUISITION PENDANT LA CHUTE

J'ai utilisé indifféremment le logiciel Labo et le logiciel Regressi, voici mes réglages avec ce dernier :

Abscisse : temps.

Voies : A et B.

Enregistre : Durée/nombre : 0

0,300 s

$587 \cdot 10^{-6}$ s.

Synchronisation : seuil : voie B

niveau : 0,43 V

Descendant.

5. MESURES - CALCULS

Sauf accident de parcours, l'acquisition est très rapide. On obtient une courbe comme celle de la figure 1.

Au vu de cette courbe, aucun élève, semble-t-il, ne sera tenté de dire autre chose que «U (VA sur la figure) est une fonction affine de t». On passe à : Calcul : régression linéaire et on note le coefficient directeur de la droite.

Compte tenu de la rapidité de l'acquisition, on pourra utilement faire plusieurs mesures et... pourquoi pas, une moyenne des coefficients directeurs, en éliminant les valeurs trop éloignées de cette moyenne et en tenant compte, pour la discussion de la précision de la mesure, des indications du logiciel quant aux informations données en utilisant la fonction «régression linéaire».

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Par exemple, sur six mesures et en éliminant l'une d'elles, j'obtiens un coefficient directeur de la droite $U(t)$ $a' \# 8,354 \text{ V/s} \pm 1 \%$.

Ainsi f est de la forme $f = A * t + B$, $A = a * a'$, avec $A \# 2270 \text{ Hz/s}$. En portant cette valeur dans la relation de la différence de fréquence Doppler :

$$f = 2 * v * F_e / c$$

ou :

$$v = c * f / 2 / F_e$$

en prenant :

$$F_e = 40 \text{ kHz} \pm 0,1 \%$$

et :

$$c = 344 \text{ m/s}$$

(22°C air très sec) on obtient : $v = 0,00430 * f$

Avec mes résultats il vient alors :

$$v = 9,76 * t + cte$$

La courbe $U(t)$ était qualitative, elle est en plus, quantitative. Ce bon résultat (observé de nombreuses fois) justifie, peut-être, que j'ai gardé (contre toute logique physicienne) un nombre trop important de chiffres significatifs dans la détermination de a et a' .

REMERCIEMENTS

Merci à A. DEIBER et O. KEMPF (BUP n° 798, novembre 1997) ainsi qu'à J. VERGÈS mon proviseur qui ne s'inquiète pas de voir le labo allumé tard après les cours.