

Mesure de vitesses et de célérités

I. INTRODUCTION.

Pour l'illustration expérimentale du cours de 1^{re}, on est amené à réaliser un certain nombre d'expériences comportant des mesures de vitesses et de célérités :

- vitesse d'un corps en fonction de la hauteur de chute,
- vitesse des pendules pesant, élastique et de torsion au passage par la position d'équilibre,
- célérité d'un ébranlement dans un ressort, dans une corde,
- célérité du son,
- célérité d'une onde électromagnétique.

A part la mesure de la célérité d'une onde électromagnétique, décrite par M. MOREAU dans le B.U.P. n° 617 (Propagation et réflexion d'une onde électromagnétique. Impédance caractéristique), toutes les autres mesures peuvent être réalisées par chronométrage direct.

Dans le cas d'un mouvement uniforme, il suffit de montrer que le temps de parcours est proportionnel à la distance, mais pour un mouvement varié il est exclu d'établir la loi horaire et d'en déduire la vitesse. On doit mesurer la durée pour un parcours « suffisamment petit » pour trouver la vitesse. Cela implique un certain nombre de performances pour le chronomètre et son système de déclenchement. Un matériel répondant à ces exigences est décrit dans cet article.

II. LE MATERIEL.

1) Le chronomètre.

a) CAHIER DES CHARGES.

Dans la chute libre, le temps mis pour parcourir une distance de 3 cm après 50 cm de chute est de l'ordre de 10 ms. Pour la célérité du son, la distance de mesure est limitée à 1 ou 2 m ; d'où des durées de 3 à 6 ms.

La précision des résultats sera satisfaisante si le chronomètre peut mesurer au dix-millième de seconde ; on aura alors des résultats avec deux chiffres significatifs.

La base de temps du chronomètre n'a pas besoin d'être stabilisée par un quartz, une stabilité de 0,5 % est suffisante et permet une économie substantielle sur le prix de revient de l'appareil.

b) RÉALISATION.

Le chronomètre, ainsi que les accessoires décrits plus loin, sont réalisés presque exclusivement à l'aide de circuits intégrés parce que de tels montages ont l'avantage de ne pas nécessiter de mise au point. Les circuits utilisés sont de technologie TTL pour des raisons de disponibilité, des circuits C MOS qui peuvent fonctionner sans stabilisation de l'alimentation et consomment très peu seraient préférables.

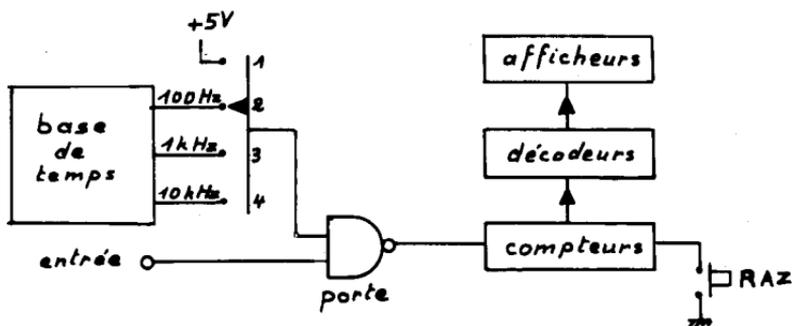


Fig. 1. — Chronomètre.

La porte utilise une fonction ET NON d'un circuit 7400, les compteurs (7490), décodeurs (7447) et afficheurs ont été suffisamment décrits pour qu'il ne soit pas nécessaire de fournir un schéma détaillé. On utilise seulement trois afficheurs pour se limiter à un nombre de chiffres raisonnable. La capacité de mesure va alors de 0,1 ms (résolution) à 9,99 s. La position n° 1 du contacteur de la base de temps transforme le chronomètre en compteur d'impulsions. Cette fonction pourra servir un jour et il vaut mieux l'installer tout de suite.

L'horloge est réalisée à l'aide d'un circuit intégré 555 monté en multivibrateur (NE 555, MC 1455, LM 555,...).

La période du signal disponible sur la borne 3 est donnée par la relation : $T = 0,693 (R_A + 2 R_B) \cdot C$. On peut être amené à modifier la résistance de 10 k Ω pour atteindre la fréquence de 10 kHz, cela dépend de la valeur réelle de la capacité de C.

La stabilité de cette horloge dépend surtout de celle de sa tension d'alimentation. Le chronomètre est alimenté à travers un

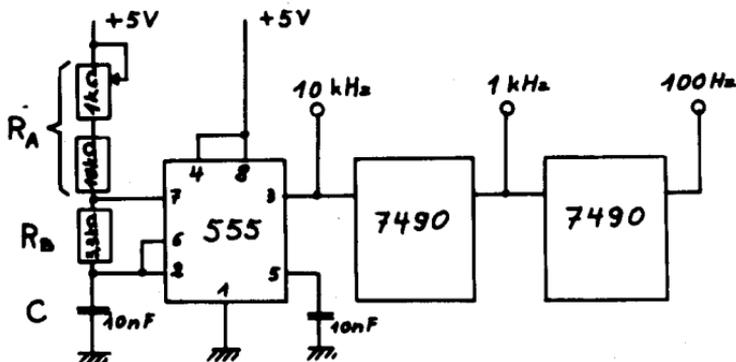


Fig. 2. — Base de temps du chronomètre.

régulateur intégré (7805) et l'horloge est placée aussi loin que possible du transformateur d'alimentation et des compteurs. Le condensateur de 10 nF relié à la borne 5 sert d'antiparasitage.

En l'absence de fréquencemètre, on fait le réglage en comparant la sortie 100 Hz à la fréquence du secteur sur un oscillographe bicourbe.

Le prix de revient de ce chronomètre, y compris le coffret et l'alimentation, est inférieur à 300 F.

2) Les capteurs.

a) BARRIÈRES PHOTOÉLECTRIQUES.

Le schéma d'un montage, qui fonctionne de manière irréprochable depuis plus de 4 ans, est proposé par M. Michel DROUI dans le B.U.P. n° 568 (déclenchement optique d'un chronomètre numérique).

Les barrières sont réalisées à l'aide d'une plaque d'altuglas de 6 mm, découpée en forme de U. Aux extrémités des branches sont fixés : un émetteur de lumière (ampoule basse tension, diode infrarouge) d'un côté et l'élément photosensible (photodiode, phototransistor) de l'autre. L'espace libre entre les branches est de 5 cm. Un phototransistor (TIL 78 par exemple) associé à un circuit intégré 555 mène à une réalisation un peu plus économique.

La résistance de 2,2 k Ω peut être modifiée dans de très larges limites pour adapter la sensibilité à la luminosité de l'ampoule et au type de phototransistor. Le phototransistor est moins rapide qu'une photodiode mais son temps de commutation reste inférieur à 10 μ s, ce qui suffit amplement ici.

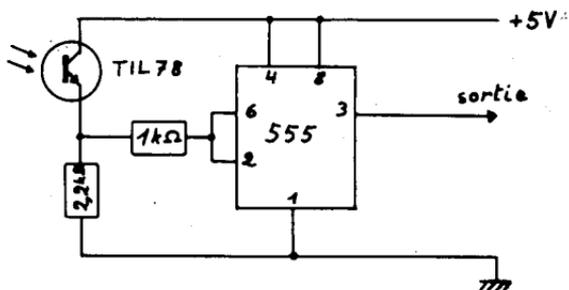


Fig. 3. — Détecteur photoélectrique.

Les barrières photoélectriques sont alimentées à partir de la logique de commande par des cordons munis de fiches DIN à 5 broches (2 pour l'ampoule, 3 pour le détecteur) ou à 3 broches si l'ampoule est alimentée en continu sous 5 V.

b) MICROPHONES.

Ne disposant pas de microphones, ces capteurs ont été remplacés par de petits haut-parleurs pour récepteur radio de poche. La tension qu'ils fournissent est de quelques mV et doit être amplifiée jusqu'à 5 V au moins pour déclencher le chronomètre. Chaque amplificateur utilise deux circuits intégrés 741.

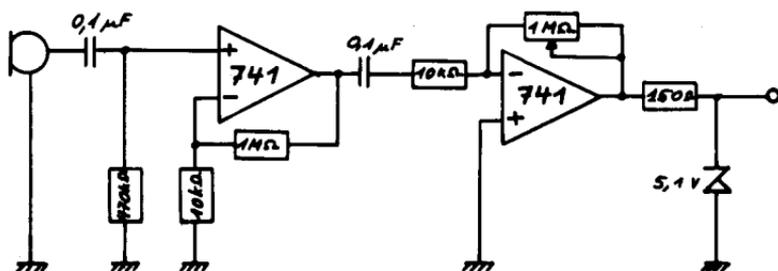


Fig. 4. — Amplificateur de microphone.

Le premier étage a un gain de l'ordre de 100 et une impédance d'entrée de 470 kΩ. Cette entrée est adaptée à un microphone piézo-électrique. Si on utilise un microphone dynamique ou un haut-parleur, on peut supprimer le condensateur et la résistance sur l'entrée +.

Le deuxième étage a un gain variable de 0 à 100. La diode zener limite la tension de sortie à un domaine compatible avec les circuits TTL.

Avec un microphone piézo-électrique, on a intérêt à diminuer les gains des deux étages en augmentant les résistances de 10 k Ω .

Les tensions + 15 V et - 15 V nécessaires au fonctionnement des amplificateurs opérationnels sont fournies par l'alimentation pour pH-mètre du C.E.M.S.

3) Logique de commande.

Pour mesurer une vitesse, il suffit de mesurer la durée d'occultation d'une barrière photoélectrique par un cache fixé à l'objet en mouvement. La sortie de la barrière sera donc directement reliée au chronomètre.

Pour mesurer une célérité, le passage de l'ébranlement devant le 1^{er} capteur doit déclencher le chronomètre, et son passage devant le 2^{me} capteur doit l'arrêter. De plus, les réflexions ultérieures de l'ébranlement doivent être sans effet.

Voir à ce sujet la solution proposée dans le B.U.P. n° 617 par MM. DURAND et BILLI : Détermination de la célérité d'un ébranlement longitudinal ou transversal.

Le montage retenu ici est suffisamment simple pour qu'un chronogramme suffise pour en expliciter le fonctionnement.

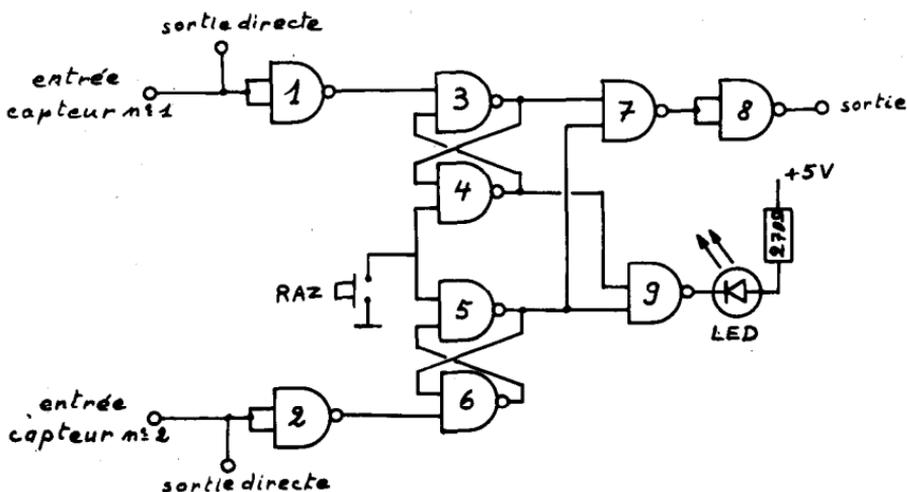


Fig. 5. — Logique de commande du chronomètre.

L'ensemble est réalisé avec trois circuits intégrés 7400. Le voyant (LED) indique que le montage est correctement remis à zéro ; il est pratiquement indispensable.

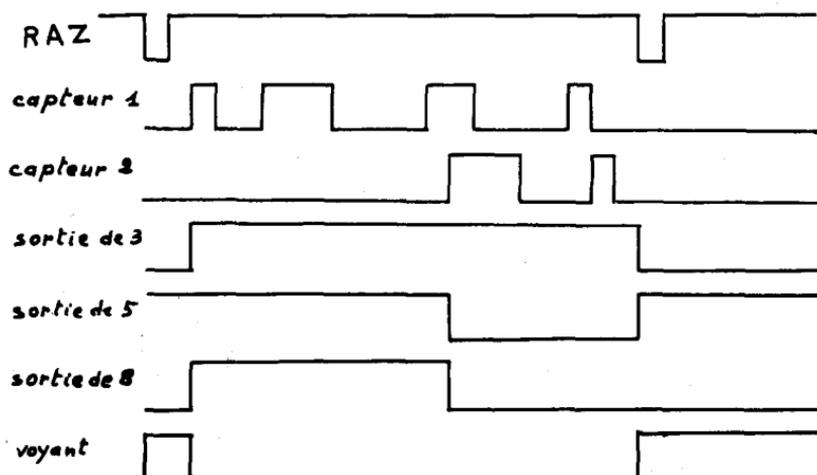


Fig. 6. — Fonctionnement de la logique de commande.

La logique de commande est placée dans un coffret séparé et comporte sa propre alimentation et celle des barrières photoélectriques.

III. EXPERIENCES.

1) Chute libre.

On fait tomber un objet (un cylindre en fer de 3 cm de hauteur dans notre cas) à travers une barrière photoélectrique et on mesure la durée d'occultation. Au départ, le cylindre est suspendu à un fil que l'on brûle : ses génératrices restent alors bien verticales pendant la chute.

(Un chronomètre électronique avec barrière photoélectrique, fourni par le C.E.M.S., a donné des résultats absolument fantaisistes dans cette expérience).

2) Pendule pesant.

Le même cylindre est attaché à une tige horizontale par une suspension bifilaire. Il oscille alors dans un plan. La barrière photoélectrique mesure la durée d'occultation au passage par la verticale. L'élongation angulaire initiale est lue sur un rapporteur.

3) Pendule de torsion.

L'extrémité de l'équipage mobile porte un cache de 1 cm de large qui occulte la barrière placée à la position d'équilibre. On

constate une dispersion assez importante des mesures qui semble due aux oscillations parasites. Il faudrait disposer d'un appareil plus rigide pour pouvoir tendre correctement les fils de torsion.

4) Pendule élastique.

Dans cette expérience, il est préférable de ne pas utiliser le pendule élastique usuel, constitué d'une masse suspendue à un ressort, pour deux raisons :

- il est difficile d'obtenir un mouvement de translation bien rectiligne à cause des oscillations parasites,
- « au terme d'énergie potentielle $\frac{1}{2} kx^2$ s'ajoute un terme d'énergie potentielle de pesanteur » (voir commentaires A 1.5. Troisième exemple : le pendule élastique).

Comme on ne s'intéresse pas, en classe de première, à la nature du mouvement de ce pendule mais seulement à l'énergie mécanique, il n'est pas nécessaire d'observer le mouvement complet. Il suffit de mesurer la vitesse acquise par une masse qui a été lancée par un ressort.

La masse est donc un chariot sur banc à air. Le ressort étalonné, suffisamment souple et léger, est suspendu verticalement à une potence placée au bout du banc. Il est relié au chariot par un fil passant sur une poulie fixée au bas de la potence de manière que le brin relié au chariot soit parallèle au banc et que celui relié au ressort soit vertical.

On repère la position initiale du chariot où le ressort commence à être tendu, puis on tire d'une longueur connue et lache sans vitesse initiale. On mesure la vitesse, après le passage par la position initiale, par occultation d'une barrière photoélectrique. Le ressort est alors détendu et le mouvement uniforme.

Si on ne possède pas un ressort assez souple, on peut utiliser un dynamomètre à cadran (EUROSAP) placé au bout du banc.

La même expérience est réalisable avec une table à coussin d'air. Le lacher du mobile doit être tel que son mouvement se fasse sans oscillations autour du centre d'inertie.

5) Ebranlement dans un ressort.

Le dispositif est semblable à celui décrit par MM. DURAND et BILLI dans le B.U.P. n° 61. Les caches sont de petits morceaux de ruban adhésif opaques fixés, près du ressort, sur les fils de suspension. Les barrières photoélectriques sont reliées à la logique de commande du chronomètre. On comprime trois spires

et attend l'amortissement des oscillations du ressort, puis on approche les barrières aussi près que possible de deux caches. Après remise à zéro de la logique et du chronomètre, on lâche les spires.

Le principe est le même dans le cas d'un ébranlement transversal dans une corde.

6) Célérité du son.

Les deux microphones sont placés à un mètre l'un de l'autre et reliés à la logique de commande. Après remise à zéro, on émet un bruit à l'aide d'une claquette faite de deux planchettes en se plaçant dans l'alignement des microphones et assez loin (2 m au moins) à cause de l'amortissement du son. Le résultat peut différer notablement de 3 ms quand les micros ne sont pas identiques ; il suffit qu'il soit reproductible. On écarte alors le micro le plus éloigné d'un mètre encore et recommence la mesure. La durée mesurée augmente bien de 3 ms environ.

Le réglage des gains des amplificateurs dépend du bruit ambiant et de l'acoustique de la salle. L'expérience n'est donc pas transportable, sans une nouvelle mise au point, de la salle de préparation à la salle de cours.

La claquette doit être manœuvrée avec conviction pour obtenir un ébranlement à front raide.

Dans les expériences présentées à ce jour devant une classe (mesures de vitesses), la précision des résultats est toujours meilleure que 3 %. Au laboratoire, où on dispose de tout le temps nécessaire pour opérer soigneusement, on atteint une précision voisine de 1 %.

7) Résultats.

Lors de la mesure de la célérité du son, on observe une dispersion des mesures de l'ordre de 10 %, probablement parce que le front de l'onde émise par la claquette est mal défini.

Les essais de mesure de la célérité d'un ébranlement à la surface de l'eau, par établissement d'un contact entre l'eau et une électrode affleurant à sa surface ou par déviation de la lumière au passage de la vague, n'ont pas encore conduit à des résultats convaincants.

Achilles GROSSE,
(Lycée Technique Lislet-Geoffroy,
Saint-Denis - Réunion).
