
BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Un fréquencesmètre très simple à la portée de toutes les écoles

par Zibukira MASUHUKO

Département de Physique, Université Catholique de Louvain,
Chemin du Cyclotron 2, B-1348 Louvain-La-Neuve

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous décrivons un fréquencesmètre électronique très simple, basé sur la charge et la décharge d'un condensateur sous l'action des impulsions générées par le signal à mesurer. Il mesure des fréquences comprises entre 10 Hz et 100 kHz en quatre gammes. Après avoir analysé le schéma de montage, nous décrivons la façon dont nous avons fait l'étalonnage et comparons notre appareil avec un appareil professionnel. Nous parlons ensuite brièvement de l'extension jusqu'à 60 MHz et terminons par quelques utilisations pour le cours de Physique.

1. INTRODUCTION

Dans le cours de physique, on a souvent besoin de connaître la fréquence des signaux. C'est le cas notamment lors de l'étude expérimentale des courants alternatifs et de l'acoustique. Pourtant, il n'y a que peu de laboratoires d'enseignement des sciences qui disposent d'un fréquencesmètre. Cet instrument est normalement «trop coûteux». Le problème du manque de matériel didactique se pose évidemment avec une acuité encore beaucoup plus grande dans les écoles du Tiers-Monde, mais dans l'un et l'autre cas, on peut résoudre ce problème d'une manière simple, satisfaisante et instructive.

A l'époque où l'on ne disposait pas encore des moyens électroniques actuels, certains manuels de physique proposaient des solutions indirectes. L'une d'elles était basée sur l'utilisation de résonateurs [1, 2] : un ensemble de lames vibrantes était excité par un électroaimant, parcouru par le courant dont on voulait connaître la fréquence f . Les lames étant de même constitution, mais de longueurs inégales, l'une d'elles vibrerait plus fortement. On a également exploité des effets chimiques [3], en faisant passer le courant par un stilet, qu'on déplaçait sur du papier imbibé de ferrocyanure de potassium. Une des alternances colorait le papier en bleu. C'est un chronomètre, quand la fréquence est connue, mais la mesure peut être inversée, en comptant le nombre de marques pour un déplacement de durée connue. Ces dispositifs étaient peu précis et limités.

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Nous proposons ci-après un montage de conception très simple et de réalisation facile [4]. Il permet des mesures assez précises des fréquences, sur une gamme étendue. La lecture peut se faire de manière digitale ou analogique.

2. ANALYSE DU SCHÉMA DE MONTAGE

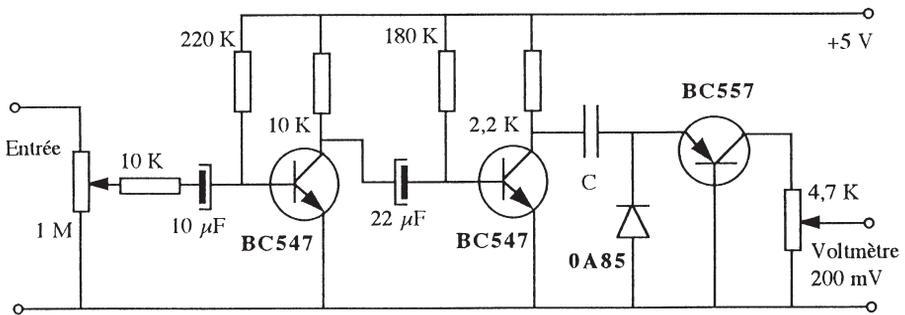


Figure 1 : Fréquencemètre très simple

Le schéma du montage est donné par la figure 1. Son fonctionnement est simplement basé sur la charge et la décharge d'un condensateur. Le condensateur C se charge sous une tension U , grâce à une des impulsions du signal d'entrée. Dès que l'impulsion cesse, il se décharge. L'impulsion suivante le recharge et le cycle se répète aussi longtemps que le signal est présent à l'entrée. Si $f = 1/T$ est la fréquence du signal d'entrée et si $Q = CU$ est la charge acquise par le condensateur pour chacune des impulsions, le courant de charge moyen est :

$$I = Q/T = C U f.$$

Pour C et U constants, le courant de charge moyen I est proportionnel à la fréquence du signal d'entrée. Ce courant I parcourt un galvanomètre qui est étalonné en unités de fréquence. Un commutateur à 4 positions (non représenté sur la figure) permettra de sélectionner la valeur de C qui détermine l'échelle voulue :

C :	100 nF	10 nF	1 nF	100 pF
f :	0 - 100 Hz	0 - 1 kHz	0 - 10 kHz	0 - 100 kHz

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Le circuit de charge du condensateur C se compose de la résistance de collecteur du second transistor et de la jonction base-émetteur du dernier transistor, tandis que le circuit de décharge comprend le second transistor (devenu conducteur) et la diode. L'impédance du circuit de décharge est donc basse et le condensateur se décharge rapidement. Le dernier transistor, monté en base commune, amplifie le courant de charge. Sa résistance de collecteur (potentiomètre) est parcourue par un courant proportionnel au courant de base moyen, lui-même proportionnel à la fréquence du signal d'entrée. La tension aux bornes de cette résistance est elle-même proportionnelle à la fréquence du signal.

Les deux premiers transistors constituent un amplificateur de tension permettant la mesure même des signaux très faibles. Les valeurs des résistances de polarisation des transistors ont été calculées, en fonction des gains en courant de ces transistors, pour saturer ces derniers. Les tensions de collecteur au repos sont donc pratiquement nulles. Les signaux d'entrée, sinusoïdaux, triangulaires ou rectangulaires, produisent tous des signaux rectangulaires aux collecteurs des transistors. Les montages amplificateurs utilisés ici sont les plus simples possibles: en effet, le but étant de saturer à coup sûr les transistors, nous ne devons pas nous préoccuper de la stabilisation du gain en courant. Nous n'avons qu'à stabiliser la tension d'alimentation.

3. ÉTALONNAGE

Pour l'étalonnage, nous avons utilisé un petit transformateur abaisseur de tension branché sur le réseau électrique (50 Hz), le commutateur étant sur l'échelle de 0 à 100 Hz. Nous avons ajusté la résistance de $4,7 \text{ k}\Omega$ jusqu'à ce que le millivoltmètre indique 50. Cet étalonnage est automatiquement valable pour toutes les autres échelles si les condensateurs utilisés ont des valeurs bien précises.

Le réseau électrique étant absent dans presque toutes les écoles du Tiers-Monde, nous avons testé d'autres moyens, tout aussi efficaces. Il s'agit des horloges stabilisées aux quartz piézo-électriques. Ces derniers se comportent comme des circuits oscillants ayant un facteur de qualité très élevé, avec une fréquence propre très précise et très stable. Ils stabilisent donc la fréquence des oscillateurs qui les utilisent. Ils sont récupérables sur certains vieux téléviseurs de norme PAL (4433,618 kHz et 8867,238 kHz). Une horloge pilotée par un tel quartz et suivi d'un diviseur de fréquence (par mille) fournit des impulsions d'une fréquence de 4,43 ou 8,87 kHz, utilisables pour l'étalonnage du fréquencemètre, sur l'échelle de 0 à 10 kHz.

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

La précision de notre fréquencemètre dépendra essentiellement de celle du voltmètre utilisé. Nous avons utilisé un voltmètre digital sur l'échelle de 2,000 V. La résolution est alors du centième de la valeur maximale de chacune des échelles (1 Hz sur l'échelle de 10 à 100 Hz, 10 Hz sur celle de 10 Hz à 1 kHz, etc.). La consommation du montage correspond à environ 3 mA sous une tension de 9 V.

4. COMPARAISON AVEC UN APPAREIL PROFESSIONNEL

Notre appareil a été comparé à un fréquencemètre professionnel, le Kemex MS-9140. Le graphique de la figure 2 donne le résultat de cette comparaison, valable pour chacune des échelles. La coïncidence est parfaite pour des tensions inférieures à 120 mV. Au-delà, le condensateur C n'arrive plus à se décharger complètement entre deux impulsions successives. Comme la limite supérieure prévue pour chaque échelle est de 100 mV, les mesures seront correctes entre 10 Hz et 120 kHz. Pour des fréquences inférieures à 10 Hz, les indications ne sont pas assez stables.

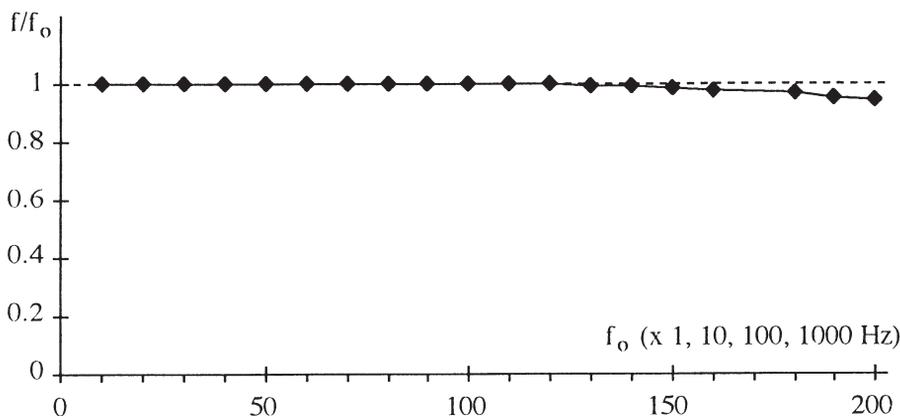


Figure 2 : Rapport des fréquences f mesurées avec notre fréquencemètre aux fréquences de référence f_0 de l'appareil Kemex MS-9140, pour 4 échelles différentes.

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

5. POSSIBILITÉ D'EXTENSION JUSQU'À 60 MHz

L'appareil précédent a pu être utilisé pour mesurer jusqu'à 60 MHz [4]. Cela s'est fait grâce au circuit intégré compteur, le CMOS 4017, utilisé comme diviseur de fréquence. Trois circuits ont été montés l'un à la suite de l'autre, comme pour le compteur, mais sans diodes lumineuses. Le premier étage utilise un 74HC4017 capable de traiter des signaux jusqu'à 60 MHz, tandis que les deux étages suivants pourront utiliser des CD4017 ordinaires dont la fréquence est limitée à 12 MHz. Chaque circuit divise la fréquence par 10. L'ensemble des 3 compteurs divise donc la fréquence par 1000. Ainsi, un signal de 60 MHz est traité comme celui de 60 kHz par l'appareil de la figure 1.

On veillera à alimenter le 74HC4017 sous une tension ne dépassant pas 6 V. On utilisera par exemple une pile de 9 V suivie d'un stabilisateur de tension 78L05.

6. UTILISATIONS POUR LE COURS DE PHYSIQUE

Cet appareil s'utilisera lors des travaux pratiques où la connaissance de la fréquence est nécessaire. Nous ne donnons que quelques exemples.

6.1. Généralisation de la loi d'ohm en courant alternatif

L'étude de la loi d'Ohm généralisée est décrite dans la plupart des manuels d'électricité [5]. Tous les circuits où interviennent des résistances, des condensateurs et des bobines pourront être étudiés expérimentalement et les différentes lois seront dégagées par la mesure de la tension efficace U , du courant efficace I et du déphasage ϕ , ainsi que leur dépendance de la pulsation $\omega = 2\pi\nu$. Le concept de résistance R est remplacé par celui d'impédance Z . Le cas spécial de la résonance électrique sera souligné et les applications pratiques (radiotransmissions, filtres, etc.) seront mises en relief. Les variations de la courbe de résonance en fonction de la valeur de la résistance seront également étudiées. Pour un circuit où les éléments R , L et C sont placés en série, on obtient les relations suivantes :

$$I = \frac{U}{Z}, \quad Z^2 = R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2 \quad \text{et} \quad \operatorname{tg}\phi = \frac{1}{R} \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)$$

La bobine met l'intensité en retard sur la tension (inertie), mais à la résonance, ce retard est exactement compensé par les effets de la capacité ($\omega^2 = 1/LC$). Le déphasage est nul et l'impédance prend en même temps sa valeur minimale, $Z = R$. Le déphasage pourra être mesuré à l'aide du phasemètre. Des schémas très simples existent [4,6] et d'autres ont été publiés dans le BUP [7,8,9].

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

6.2. Étude des filtres électriques

Le comportement des différents types de filtres (passe-bas, passe-haut, passe-bande, rejeteurs de bandes) pourra être étudié également, en les alimentant par le générateur de basses fréquences. Le signal de sortie sera observé en fonction de la fréquence du signal d'entrée ou des paramètres du circuit. Des diagrammes pourront être tracés et les résultats seront comparés aux prévisions théoriques.

6.3. Utilisation en acoustique

Le même appareil interviendra pour des expériences d'acoustique dont certaines ont été décrites dans la référence 4, pages 97-112 : l'étude des caractéristiques du son (hauteur), de la relation de dispersion du son dans différents milieux, des battements, de l'effet Doppler, etc. La mesure de la fréquence rendra ces expériences plus passionnantes.

REMERCIEMENTS

L'auteur exprime sa profonde reconnaissance au professeur Auguste MEESSEN du Laboratoire de Didactique de la physique de l'UCL ainsi qu'au professeur Georges CARDINAL des facultés NDP de Namur, pour leurs précieux conseils.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. FAUCHER : «*Physique 1^{ère} CDE*», Hatier, Paris, page XXX, (1966).
- [2] M. JOYAL : «*Cours de Physique III ; Électricité*», Masson et Cie, Paris, page 386, (1962).
- [3] A. DESSART et J. JODOGNE : «*Cours de Physique Tome III*», DeBoeck, Bruxelles, page 273, (1944).
- [4] Z. MASUHUKO : «*Conception et réalisation de montages électroniques pour l'enseignement de la physique dans les pays du Tiers-Monde*», Thèse de Doctorat, UCL, Louvain-La-Neuve, (1996).
- [5] A. DELARUELLE et A.-I. CIAES : «*Éléments de physique 3*», Wesmael-Charlier, Namur, (1974).
- [6] J.-P. VAN DER MERWE : «*Phasemeters and their use in the undergraduate physics laboratory*», Am. J. Phys. n° 53, page 1089, (1985).
- [7] Ph. JULIARD, J.-M. MILLET : «*Principe et réalisation d'un phasemètre*», BUP n° 742, page 417, (1992).
- [8] B. VELAY : «*Vous avez dit : "phasemètre"*», BUP n° 742, page 409, (1992).
- [9] G. LAVERTU : «*Phasemètre pour travaux pratiques*», BUP n° 742, page 425, (1992).