

Vous avez dit : «phasemètre»

par Bruno VELAY
Lycée Rodin, 75000 Paris

On ne peut restreindre l'analyse des signaux électriques et électroniques à celle de leurs amplitudes parce que l'emploi des voltmètres est usuel. Trop négligée, parce que délicate à réaliser (par exemple par la méthode de Lissajous) l'analyse de la phase d'un signal est pourtant nécessaire pour bien comprendre la stabilité du système étudié.

Cette analyse devient tout à fait simple avec un phasemètre. Après cette présentation, on pourra consulter les deux propositions de réalisation publiées ci-dessous.

1. PHASE ET DIFFÉRENCE DE PHASE

La phase est l'argument des fonctions harmoniques élémentaires employées pour décrire tout signal périodique (au sens des séries de Fourier).

par exemple : $u = U_m \cos \varphi(t)$

dans le cas particulier d'un signal de fréquence fixée, on a :

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0 = 2 \pi f t + \varphi_0 = 2 \pi \frac{t}{T} + \varphi_0$$

φ_0 est la phase à l'origine des temps, ω la pulsation, f la fréquence et T la tension du signal.

La comparaison de phase s'envisage dans le cas des signaux de même fréquence : soit l'exemple classique du RLC série.

$$U_{RLC} = U_m \cos(\omega t + \varphi_0) = U_m \cos \varphi_u(t)$$

$$i = \frac{U_m}{Z} \cos \omega t = I_m \cos \varphi_i(t)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{u/i} = \varphi_u(t) - \varphi_i(t) = \varphi_0 - 0 = \varphi_0$$

$\Delta\varphi$ correspond à la différence de phase entre la tension U_{RLC} et l'intensité : par exemple $\frac{\pi}{2} \geq \Delta\varphi \geq 0$ si $f < f_0$ (fréquence de résonance).

L'emploi du phasemètre va permettre l'étude aisée de telles différences de phase parce qu'elles sont constantes dans le temps.

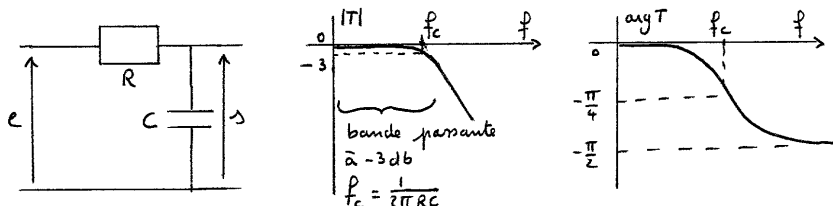
La comparaison de phase présente aussi de l'intérêt lorsque les signaux n'ont pas exactement la même fréquence : soit l'accord sur une fréquence donnée d'un récepteur radio FM à PLL (phase lock loop = boucle à verrouillage de phase). Cela correspond de fait à un asservissement sur la fréquence de la porteuse de l'émetteur.

Le procédé consiste à minimiser la différence de phase instantanée entre le signal reçu et le signal de commande élaboré par la boucle, qui ne sont a priori que de fréquences proches pendant le réglage. Ces fréquences ne seront égales (et le resteront) qu'après verrouillage stable de la boucle [1a], [4c].

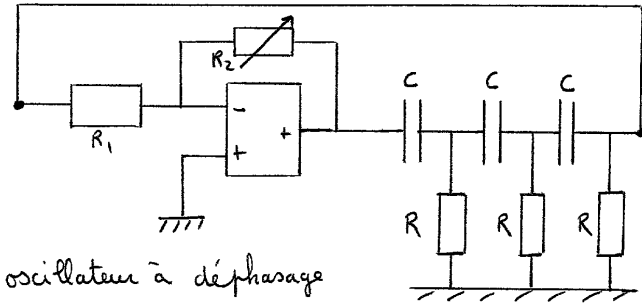
L'influence d'un système électronique sur le signal s'étudie à l'aide de sa fonction de transfert T :

$$T(j\omega) = \frac{U_{\text{sortie}}}{U_{\text{entrée}}} = \frac{s(t)}{e(t)}$$

La dépendance en fréquence est exprimée par les deux courbes de Bode $|T|$ et $\arg T$ en fonction de f (ou $\log$ de f) [1b]. Ainsi, pour une fréquence supérieure à sa fréquence de coupure f_c , un filtre passe-bas atténuera le signal d'entrée en amplitude mais en plus le déphasera [4a].



De même, l'obtention d'un oscillateur sinusoïdal se fait en créant une boucle de réaction positive. Dans l'exemple, la chaîne de réaction impose un déphasage de π ($e^{j\pi} = -1$). Il faut donc un gain de chaîne directe qui soit négatif et réinjecter le signal sur l'entrée inverseuse pour obtenir l'instabilité [1c], [4b], [7a].



2. PHASEMÈTRE

Principe :

Une chaîne électronique élabore une tension dont la valeur moyenne est proportionnelle à la différence de phase entre le signal de référence et le signal étudié.

La méthode choisie pour l'élaboration est soit analogique, soit numérique.

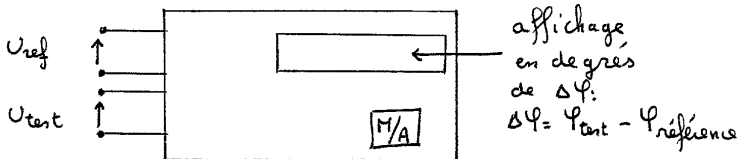
De même la mesure de cette tension (et son affichage) est soit analogique, soit numérique.

Ce n'est pas parce que l'on lit un nombre que l'appareil est «tout» numérique.

Mode d'emploi :

On branche, on lit !

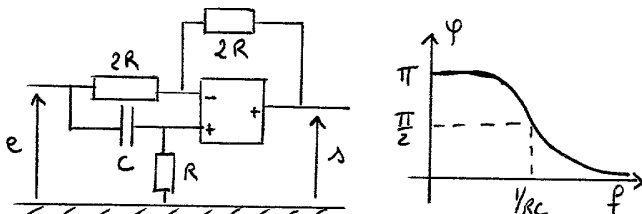
Les masses des deux prises coaxiales d'entrée sont soit communes (reliées en interne), soit distinctes (entrées différentielles) ce qui est plus pratique.



Usage et test :

- déphasage dans les circuits RLC,
- courbes de Bode,

- montage déphaseur [2], [3a]
(permuter R et C pour obtenir $-\pi < \varphi < 0$).



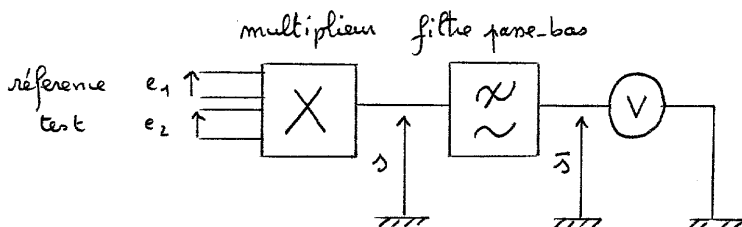
$$T = \frac{1+jRC}{1-jRC} \quad |T| = 1 \quad \varphi = -2 \operatorname{arctg} RC\omega$$

3. PRINCIPE D'UN PHASEMÈTRE ANALOGIQUE [3a]

On utilise un multiplieur analogique (par exemple AD 534 chez Analog Device) [7b] :

si $e_1 = E_1 \cos \omega t$ et $e_2 = E_2 \cos (\omega t + \varphi_0)$

$$\text{alors } s = \frac{E_1 E_2}{10} \cos \omega t \cos (\omega t + \varphi_0) = \frac{E_1 E_2}{10} \frac{1}{2} \left[\cos (2 \omega t + \varphi_0) + \cos \varphi_0 \right]$$



Un filtrage passe-bas permet de récupérer uniquement la valeur moyenne $\bar{s} = \frac{E_1 E_2}{20} \cos \varphi_0$

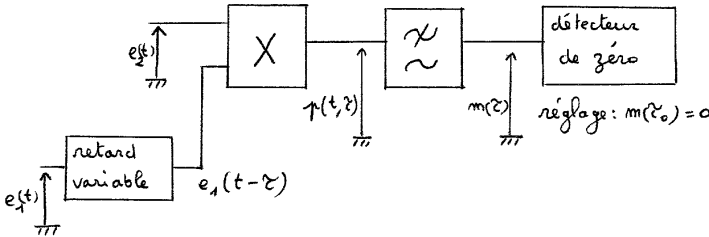
on emploie par exemple un RC du premier ordre (cf 1.) avec $R = 1\text{M}\Omega$, $C = 1 \mu\text{F}$ et $f_c \leq 1 \text{ Hz}$.

Il suffit ensuite d'étalonner en imposant successivement le même signal e_1 puis e_2 aux deux entrées d'où les lectures de $s_1 = \frac{E_1^2}{20}$ et $s_2 = \frac{E_2^2}{20}$

on aura :

$$\cos \varphi_0 = \frac{\bar{s}}{\sqrt{s_1 s_2}} = \cos \Delta \varphi$$

Ce principe peut être amélioré pour mesurer $\Delta \varphi$ lorsque les signaux fluctuent en amplitude : [5], [7c].



$$p(t) = \frac{E_1 E_2}{10} \cos(\omega t + \varphi_0) \cos[\omega(t - \tau)]$$

$$m(t) = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{E_1 E_2}{20} \cos(\varphi_0 + \omega \tau)$$

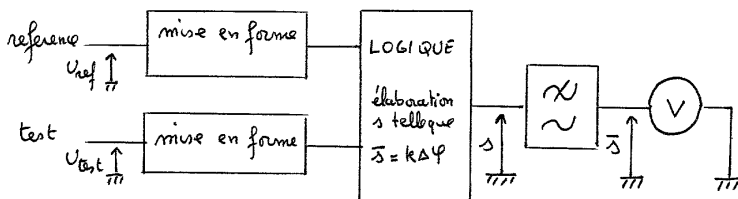
Le réglage de la ligne à retard permet d'obtenir $m(\tau_0) = 0$

d'où :

$$\varphi_0 + \omega \tau_0 = (2k + 1) \frac{\pi}{2} \quad k \in \mathbb{Z}$$

On s'affranchit ainsi du coefficient en facteur et donc des amplitudes, avec une bonne sensibilité.

4. PRINCIPE D'UN PHASEMÈTRE NUMÉRIQUE [3b], [4d], [6], [8], [9]



Entrée :

La mise en forme élabore des signaux de commande de la logique soit sous forme de signaux carrés (écrétage et comparateur à seuil) soit sous forme d'impulsions.

Le critère de choix des A.O. employés est leur taux de variation de tension de sortie («vitesse de balayage» ou «slew rate») S.R.

Exemples :	A.O. :	741	TL 081	LM 339	LM 318
	S.R. (V/μs) :	0,5	13	17	60

Ce facteur limitera la gamme de fréquences pour lesquelles la mesure sera possible.

Étage logique :

Il élabore un signal carré de rapport cyclique tel que la valeur moyenne de l'amplitude soit proportionnelle à $\Delta\phi$.

Il peut employer par exemple des portes logiques (dont «ou exclusif») des bascules RS (set/reset ~ marche/arrêt) [7d].

Prise de moyenne : par filtrage passe-bas

Sortie :

Mesure de $\bar{S}$, correction d'échelle par choix de calibre pour que la tension affichée corresponde à la valeur de $\Delta\phi$ (en degré par ex.). Le voltmètre peut bien sûr être lui-même numérique.

5. RÉFÉRENCES

- [1] Manneville / Esquieu Électronique BTS Dunod
 - a - tome 2 p. 31, 74 PLL.
 - b - tome 1 p. 37 fonction de transfert, courbes de Bode.
 - c - tome 2 p.9, 38, 104 réaction positive.
- [2] Lumbroso problèmes résolus d'électronique Dunod Ch. 2.
- [3] B.U.P. n° 688 supplément Bac de technicien
 - a - bac F2 p. 23.
 - b - bac F2 p. 13.
- [4] Horowitz/Hill Art of Electronics Cambridge University Press (2^d édition).
 - a - Ch. 1 RC.
 - b - Ch. 5 oscillateurs.
 - c - Ch. 9 PLL.
 - d - Ch. 9 détecteurs de phase.
- [5] Tran Tien Lang électronique des systèmes de mesures (1^{ère} édition) Masson p. 121.
- [6] Revue : Le haut parleur n° 1777 juin 90 p. 107 phasemètre à porte «ou exclusif».
- [7] Physique appliquée TF₂ Nathan
 - a- Ch. 11 p. 202 réaction.
 - b- Ch. 4 p. 85 multiplieur.
 - c- Ch. 2 p. 40 ligne à retard.
 - d- Ch. 5 p. 102 bascule RS.
- [8] Ph. JULIARD, J.-M. MILLET Principe et réalisation d'un phasemètre. B.U.P. n° 742, ci-après.
- [9] G. LAVERTU Phasemètre pour travaux pratiques. B.U.P. n° 742, ci-après.

Exemple de prix : phasemètre numérique à entrées différentielles
Datelec : $\approx 2\,500\text{ F}$.