

19 ✓

CONTRIBUTI
DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI MILANO-MERATE
a cura del Direttore
Prof. FRANCESCO ZAGAR

NUOVA SERIE

N. 150

E. PROVERBIO

LA DÉTERMINATION THÉORIQUE
ET EXPÉRIMENTALE DES RETARDS
DANS LA COMPARAISON
DES SIGNAUX HORAIRE

Extrait des *Annales Françaises de Chronométrie*,
Tome XIV (1960) fascicule 1

MILANO
1959

9

LA DÉTERMINATION THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE DES RETARDS DANS LA COMPARAISON DES SIGNAUX HORAIRES

par

Edoardo PROVERBIO

Observatoire Astronomique de Brera-Milan

RÉSUMÉ - On étudie les retards systématiques des appareils utilisés à l'Observatoire Astronomique de Brera en comparant des signaux horaires et des signaux locaux. Les dispositifs considérés sont :

- a) Chronographes enregistreurs,
- b) Chronomètre électronique,
- c) Dispositif oscillographique.

Pour chaque appareil on calcule successivement les retards absolus, relatifs aux signaux locaux (carrés) et aux signaux horaires modulés, en considérant comme négligeable le retard dû au début du signal (temps de montée du signal même).

On compare enfin ces retards avec la précision intrinsèque de chaque méthode.

SUMMARY - The characteristics and systematical time delays for the equipments :

- a) Recorder chronograph,
- b) Electronic chronometer,
- c) Oscillographic indicator,

utilised at Brera Observatory for the comparison of time signals are studied. After, for each equipment, the absolute time delays for square local pulses and for full-wave rectifier radio signals are calculated, and the time delay for beginning of the signal is neglected.

At last the time delays with the intrinsic precision of every method are compared.

ZUSAMMENFASSUNG - Es werden die systematischen Verspätungen der auf der Sternwarte Brera (Mailand) benützten Apparate zur Vergleichung der lokalen und auswärtigen Zeitzeichen untersucht. Die in Betracht gezogenen Geräte sind :

- a) Registrierchronographen,

- b) Elektronische Chronometer,
- c) Oszillographische Geräte.

Für jeden Apparat wird die absolute Verspätung relativ zu den lokalen Zeichen (auf quadratischer Welle) und den modulierten Zeitzeichen berechnet ; die Verspätung betreffend den Anfang des Signals (Zeit der Steigung des Signals) wird vernachlässigt.

Zum Schluss werden diese Verspätungen mit der inneren Genauigkeit jeder Methode verglichen.

I. - INTRODUCTION

Le problème de la comparaison des signaux de temps, notamment des signaux horaires, donne lieu à de nombreuses recherches de caractère astronomique et géophysique de haute précision. La précision qu'on demande dans les services horaires a comme limite supérieure le millième de seconde, tandis que pour des recherches particulières, relatives à des comparaisons entre signaux horaires, on demande une précision de 10^{-4} et 10^{-5} s. La connaissance et l'étude des retards et des erreurs intrinsèques propres aux différents dispositifs de mesure, et aux différents types de signaux employés apparaissent ainsi comme particulièrement importantes.

L'analyse des dispositifs d'enregistrement et de comparaison, employés dans le Service de l'Heure de l'Observatoire Astronomique de Brera - Milan, a pour but de mettre en évidence d'éventuelles erreurs systématiques incompatibles avec la précision de ces dispositifs.

L'enregistrement des signaux de temps est actuellement exécuté en employant les appareils suivants :

- a) enregistreurs électromécaniques (chronographes modernes à relais),
- b) enregistreurs électroniques (chronomètres électroniques),
- c) enregistreurs oscillographiques.

Pour chacun de ces types d'enregistreurs il faut, pour un excellent fonctionnement, un type particulier de signal, qui doit être dérivé soit du signal horaire, modulé généralement à 1 KHz environ, à la sortie du récepteur (T.S.F.), soit du signal local de comparaison, exprimable par une fonction à degrés. Cela exige qu'en particulier le signal horaire, à la sortie du récepteur, soit transformé au moyen de redresseurs, amplificateurs et normalisateurs, pour le rendre propre au fonctionnement du dispositif qu'on a choisi pour l'enregistrement. Cette transformation est le premier élément qui cause, selon la façon dont elle est réalisée, des retards plus ou moins grands et plus ou moins constants. Le deuxième élément est constitué par l'inertie de l'enregistreur lui-même.

Lorsqu'on parle de retards, il est indispensable de préciser, surtout dans le cas de l'enregistrement, l'origine à laquelle ces retards sont rapportés. On pourrait théoriquement les rapporter au début du

signal, soit horaire soit local, si ce début avait un temps de montée nul. Mais ce front n'est pratiquement jamais négligeable, surtout dans le domaine des signaux horaires à ondes longues ; même en négligeant le véritable temps de montée, il existerait, dans le cas de signaux modulés un temps de montée intrinsèque, donné par :

$$t = \frac{T}{2f} \arcsin \frac{e}{E},$$

dont e est la tension du signal au temps t et E la tension maximum du signal, qui, pour les modulations de 1 KHz, atteint $0,25 \cdot 10^{-3}$ s.

Conventionnellement on recommande de considérer comme début du signal le point de sa courbe de montée qui correspond à 50 % de l'amplitude maximum du signal, point qui représenterait le niveau de plus grande stabilité [1]. Cette recommandation n'est toutefois valable que dans le cas où l'amplitude et le temps de montée du signal restent sensiblement constants : elle a donc, dans la pratique, une valeur statistique d'un certain poids sur un grand nombre de signaux. En outre, dans la pratique, la détermination du front de montée, si l'on ne veut pas avoir recours à des analyseurs compliqués, n'est définissable que par des dispositifs oscillographiques. Dans les autres cas, étant donné l'existence des retards, la connaissance à priori, au moins approximative, du temps de montée, serait nécessaire, puisqu'on peut facilement mesurer l'intensité de chaque signal. Pour cela il est donc souhaitable que les stations horaires émettant des signaux à onde porteuse communiquent au moins l'ordre de grandeur des temps de montée relatifs aux différentes transmissions.

En indiquant par e_R le retard total d'un signal pendant l'enregistrement, on peut écrire :

$$e_R = e'_R + e''_R,$$

dont e'_R représente la composante systématique dépendant de la forme et des transformations auxquelles le signal a été soumis, et e''_R les retards véritables d'enregistrement. Mais, dans certains cas, e''_R dépend de e'_R (par exemple, dans les enregistreurs électromécaniques) : il est par conséquent plus avantageux d'obtenir le retard e_R que les valeurs particulières de e'_R et e''_R .

II. - LES RETARDS A L'ENREGISTREMENT DES SIGNAUX DE TEMPS SUR ENREGISTREURS ÉLECTROMÉCANIQUES

Ainsi qu'on l'a vu, la détermination des retards réels du type e'_R n'est possible qu'en connaissant la forme de la courbe de montée des différents signaux. Dans le cas de signaux horaires, à la sortie du récepteur, cette forme peut être représentée avec une bonne approximation par la fonction :

$$e = E_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

$$E_0 = E \sin^n \omega_1 t, \quad n \text{ pair}, \quad 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2\omega_1},$$

où E représente la tension maximum du signal atteinte à l'instant $t = \frac{\pi}{2\omega_1}$, correspondant au temps de montée du signal, et ω la pulsation de la fréquence acoustique. Pour des signaux modulés à l'émission (type WWV), on peut admettre généralement $n = 0$, $E_0 = E$.

En admettant que la forme du début des signaux horaires soit donnée par la fonction (1), il est nécessaire d'étudier les modifications successives des signaux eux-mêmes, car, selon ce qu'on a déjà dit, les retards à l'enregistrement diffèrent substantiellement en fonction précisément de ces dernières.

1. - LES RETARDS DES CIRCUITS D'AMPLIFICATION

Les méthodes fondées sur l'emploi de chronographes enregistreurs demeurant, pour un excellent fonctionnement de ces derniers, des signaux du type à onde carrée ou des signaux pulsés d'une certaine tension. Dans le passé, ces signaux étaient obtenus indirectement des signaux horaires par l'intermédiaire de dispositifs à relais, souvent ingénieux, comme celui que P. Vocca a utilisé [2]. F. Moreau et J. Verbaandert [3] furent parmi les premiers à avoir résolu le problème moyennant l'utilisation de circuits à thyratrons, à inertie presque nulle ; ces circuits ont été employés par la suite avec de bons résultats [4].

Actuellement, on préfère toutefois utiliser directement les signaux à fréquence acoustique sortant du récepteur, convenablement redressés et amplifiés [5], parce que les chronographes modernes à bande et surtout à cylindre, du type Belin, permettent de séparer et de distinguer assez facilement les signaux horaires, même au cas d'un rapport S/N relativement petit, avec l'avantage de maintenir assez fidèle la représentation du début du signal qu'on a à la sortie de l'amplificateur [6].

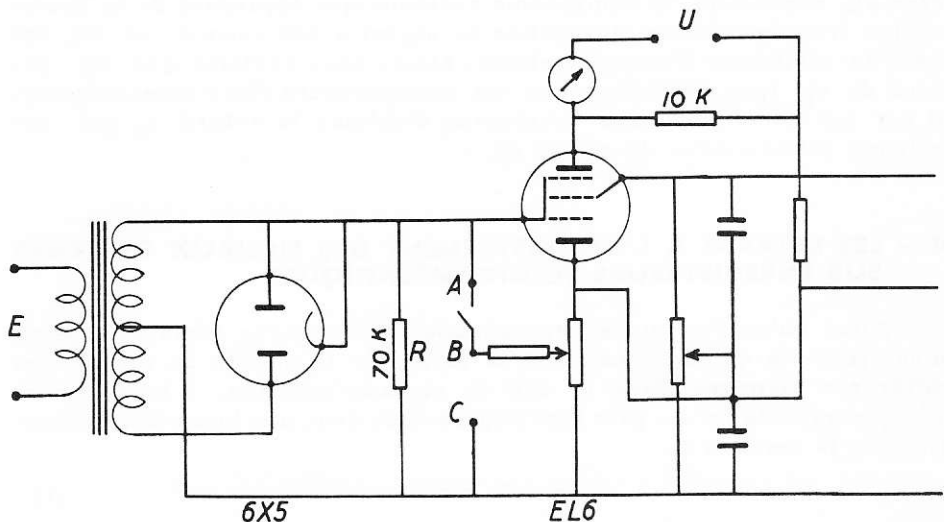


Fig. 1

Le redresseur-amplificateur de signaux horaires qui fait partie du dispositif d'enregistrement sur chronographe réalisé à l'Observatoire de Brera (fig. 1) est constitué par un simple redresseur à deux demi-ondes et par une lampe amplificatrice ; l'élément le plus important pour ce qui concerne l'éventuel déphasage du signal horaire dans la période transitoire, qui est la plus intéressante, y est constitué par le transformateur d'entrée. Il est donc intéressant de voir l'effet que ce transformateur produit sur le début du signal. Pendant cet examen nous envisagerons seulement une moitié du circuit équivalent qui produit le redressement d'une seule demi-onde.

Comme on peut facilement le démontrer [7], pourvu que la résistance du transformateur soit petite et abstraction faite de toute hypothèse sur des phénomènes d'hystérésis et de variation de perméabilité, il existe entre la tension d'entrée e_1 et celle de sortie e_2 d'un transformateur la relation :

$$e_2 = - k_1 e_1, \quad (\text{inversion delle tensioni in a.c.})$$

k étant égal au rapport des spires secondaire/primaire. Cela étant, du circuit équivalent on déduit que le régime de courant du secondaire du transformateur est représenté par l'intégrale générale de l'équation différentielle :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_2}{dt^2} (L_1 L_2 - M^2) + \frac{d i_2}{dt} (L_2 r_1 + L_1 r_2) + i_2 (r_1 r_2 + \frac{dr_2}{dt} M) = & \quad (2) \\ = - \frac{de_2}{dt} \cdot (M + L_1 k) - k e_1 r_1 . & \end{aligned}$$

L'intégrale générale de cette équation, dans laquelle r , L , M représentent la résistance, l'inductance et la mutuelle inductance du primaire et du circuit de sortie, nous permet d'étudier la période transitoire de ce courant et de déduire les variations du début du signal pendant cette période.

Une première simplification peut être introduite dans l'équation (2) en admettant que la résistance r_2 du secondaire et de la charge, constituée dans notre cas par la résistance R et par la résistance intérieure de la double diode, négligeable par rapport à R , reste constante. Cela étant, et dans le cas de signaux de temps modulés ($E = E_0$, $\nu = 1$ KHz), l'intégrale générale de l'équation (2) est du type :

$$i_2 = C_1 e^{x_1 t} + C_2 e^{x_2 t} + C \sin(\omega t - D), \quad (3)$$

C_1 et C_2 étant des constantes d'intégration et x_1 , x_2 les racines de l'équation caractéristique de l'équation (2).

Les constantes caractéristiques de la fonction (3) pour le transformateur employé dans l'amplificateur de l'Observatoire de Brera ont été calculées pour les deux cas $R = 0$, et $R = 7 \cdot 10^4$ (pour des signaux de 1 KHz et 15 V de tension).

Les grandeurs électriques du transformateur étant :

$$\begin{aligned} r_1 = 290 \Omega, & \quad L_1 = 5,0 \text{ H}, & \quad k = 1, \\ r_2 = 357 \Omega, & \quad L_2 = 2,2 \text{ H}, & \quad M = 3,0 \text{ H}, \end{aligned}$$

les fonctions relatives à ces deux cas sont respectivement (en unités de 10^{-3} A) :

$$i_1 = + 14,9 e^{-0,18 \cdot 10^3 t} + 4,45 e^{-4,67 \cdot 10^3 t} + 19,7 \sin(\omega t - 0,44 \pi)$$

$$i_2 = + 0,0079 e^{-0,01 \cdot 10^5 t} + 0,0031 e^{-7,0 \cdot 10^5 t} + 0,34 \sin(\omega t - 0,01 \pi)$$

Les diagrammes de la figure 2 montrent l'allure de l'intégrale générale (3) dans les deux cas. On peut remarquer que pour une résistance R assez élevée, le circuit redresseur n'altère pas sensiblement la forme des signaux. Au contraire, pour R de l'ordre de r_2 , les termes exponentiels de la période transitoire peuvent causer des retards de quelques unités de 10^{-4} s.

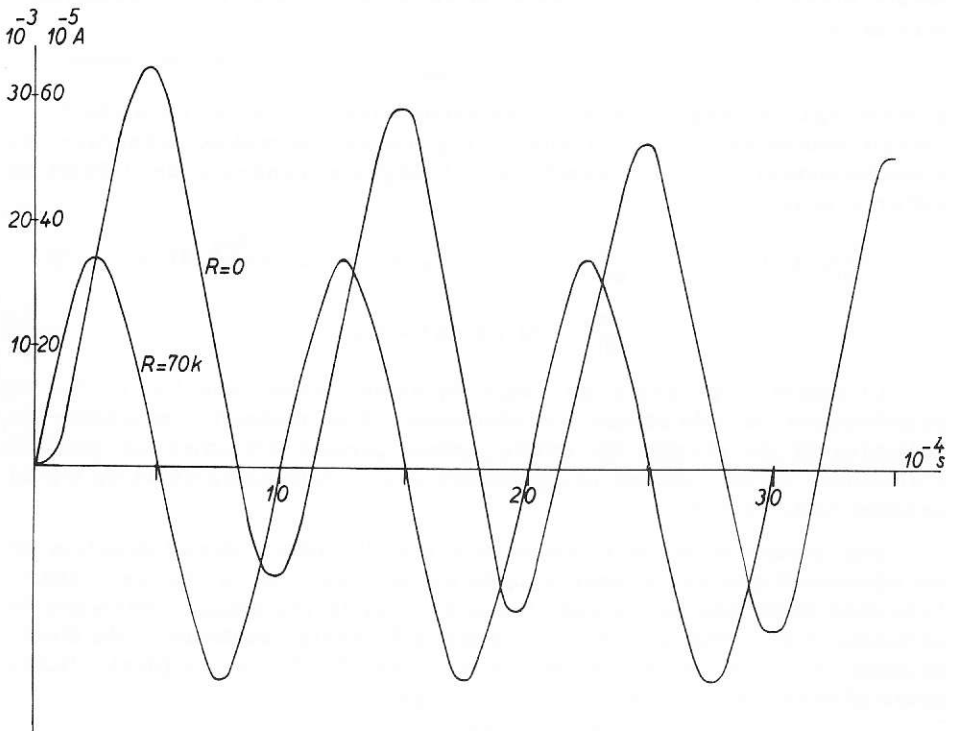


Fig. 2

2. - MESURE DES RETARDS DES RELAIS CHRONOGRAPHIQUES

La détermination des retards des dispositifs d'enregistrement fondés sur le principe des relais télégraphiques ou téléphoniques a toujours eu la plus grande importance dans le problème de l'enregistrement. Bien avant la réussite des signaux radiotélégraphiques [8], et surtout à l'époque de la deuxième Opération Mondiale des Longitudes [9], la connaissance de ces retards prenait une importance assez grande pour une exacte réduction des observations. A présent, par l'introduction de

méthodes d'enregistrement de grande précision, l'emploi de chronographes, qui d'ailleurs est encore largement utilisé dans les observations astronomiques, est subordonné à une étude détaillée et indispensable de l'inertie e''_p , et de ses variations.

Les deux chronographes employés à l'Observatoire de Brera ont leurs pointes directement jointes à des relais sensibles, selon le principe des transducteurs électroacoustiques. De cette manière, la partie mobile de ces relais, constituée par la bobine, fixée par des dispositifs élastiques qui lui permettent une brève excursion le long du noyau même, commande directement les styles. La force F qui sollicite la bobine, proportionnelle à l'induction magnétique $B = \mu H$, est donnée par la relation :

$$F = \mu H i l = B i l \quad (4)$$

où l représente la longueur totale des spires normales au champ magnétique, i l'intensité du courant et μ la perméabilité magnétique du noyau.

L'intensité i du courant qui parcourt la bobine met un certain temps avant de parvenir à un régime constant, à cause de la force contre-électromotrice d'induction qui apparaît dans la bobine à l'arrivée de chaque signal (local ou signal radio amplifié). Théoriquement, avec des signaux à onde carrée, on sait que i tend asymptotiquement vers une valeur constante, selon la formule :

$$i = \frac{E}{r} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{L}}), \quad (5)$$

où r représente la résistance totale du circuit.

Ce phénomène, joint à la présence de forces d'inertie mécanique ou de frottement, est la cause des retards en question.

On peut facilement exécuter la détermination théorique de ces retards lorsqu'on connaît, outre les caractéristiques du circuit, la grandeur F_0 de l'inertie de la pointe. La formule (4) nous permet alors d'obtenir le courant minimum i_0 nécessaire pour vaincre l'inertie F_0 (courant de fonctionnement) ; la relation :

$$t_0 = \frac{L}{r} \log \left(\frac{E}{E - r i_0} \right), \quad (5')$$

déduite de (5), permet d'obtenir, pour une tension donnée, la mesure du retard t_0 à la limite du seuil de fonctionnement.

La détermination théorique de l'inertie des pointes du Chronographe fondamental de l'Observatoire de Brera a été bornée à la troisième pointe, sur laquelle on enregistre généralement les signaux des horloges à quartz Q_1 et Q_2 ; elle a été exécutée en mesurant directement l'intensité minimum de courant i_0 nécessaire pour remuer la pointe. La mesure de cette intensité a donné les résultats suivants :

$$i_1 = 8,2 \pm 0,1 \text{ mA}, \quad i_2 = 3,8 \pm 0,1 \text{ mA},$$

le premier relatif à des mesures exécutées avec bande paraffinée immobile, le second avec bande paraffinée en mouvement, c'est-à-dire

dans les conditions normales d'utilisation. Le tableau I donne les valeurs calculées des retards t_1 , t_2 , relatifs aux deux valeurs i_1 , i_2 en fonction de la tension E du signal.

Tableau I

E	t_1	t_2
10 V	∞	$4,2 \cdot 10^{-4}$ s
20	$11,5 \cdot 10^{-4}$ s	1,1
30	2,0	0,8
40	1,2	0,5
50	0,9	0,4
60	0,7	0,3
70	0,6	0,3
80	0,5	0,2

Puisque dans le cas présent, pour des tensions moyennes de 40 - 50 V, r_{i_0} est petit par rapport à E, l'inertie absolue des pointes restantes peut être considérée, pour des signaux de cette tension comme proportionnelle à L/r ; elle est donc facilement réalisable en utilisant les coefficients de proportionnalité qui se trouvent dans la dernière colonne du tableau II, dans laquelle on a donné aussi les valeurs L et R relatives à chaque pointe.

Tableau II

Pointes	L	R	$10^{-4} \frac{L}{r}$
1	0.47 H	2250 Ω	1.09
2	0.17	1700	0.51
3	0.44	2300	1.00
4	0.50	2450	1.03

Les retards de tableau I, relatifs à des signaux à onde carrée, à temps de montée négligeable (quelques μ s), ne sont valables que pour des signaux locaux générés par des contacts mécaniques ou par des impulsions de tension obtenues électroniquement. Dans le cas de signaux modulés, la formule (5) n'est plus valable. La nouvelle relation doit être obtenue à partir de l'équation bien connue :

$$\underline{e} - L \frac{di}{dt} = ri \quad (6)$$

dans laquelle la f.e.m. \underline{e} est donnée par la fonction (1), si le signal est pris à la sortie du récepteur, ou par une expression du type :

$$e = \frac{2}{\pi} E_0 \left[1 + \sum (-1)^{\frac{n}{2}+1} \frac{2}{n^2 - 1} \cos n \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right], \text{ n pair} \quad (7)$$

caractéristique des ondes pulsées, si le signal est au contraire pris à la sortie de l'amplificateur, la valeur de r devant être obtenue à partir du circuit équivalent.

Dans le cas d'un signal modulé à 1 KHz, l'équation (6) s'intègre immédiatement, en donnant la solution bien connue :

$$i = \pm \frac{E_0}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \sin \varphi e^{-\frac{r}{L}t} + \frac{E_0}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \sin (\omega t - \varphi) \quad (8)$$

Tandis que si l'on considère un signal du type (7), comme il arrive dans la pratique, l'intégrale générale de l'équation (6) prend la forme :

$$i = C e^{-\frac{r}{L}t} + \frac{2 E_0}{r N} + \sum \left[a_n \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + b_n \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad n \text{ pair}, \quad (8')$$

où,

$$a_n = \left[(-1)^{\frac{n}{2}+1} \frac{2}{n^2-1} \right] \frac{2 n L \omega}{\omega^2 n^2 L^2 + r^2} \cdot \frac{E_0}{\pi},$$

$$b_n = \left[(-1)^{\frac{n}{2}+1} \frac{2}{n^2-1} \right] \frac{2 r}{\omega^2 n^2 L^2 + r^2} \cdot \frac{E_0}{\pi},$$

$$C = - \left[\frac{2 E_0}{\pi r} + \sum (-1)^{\frac{n}{2}} a_n \right].$$

Pour des signaux de 50 V à la sortie de l'amplificateur (bobine chronographique insérée), modulés à 1 KHz (correspondant à des signaux à la sortie du récepteur), on a calculé les constantes de la fonction (8'), dans laquelle r représente la résistance du circuit équivalent, relativement à la troisième pointe du chronographe en question. Avec ces constantes, la fonction (8') devient :

$$i = - 14,2 e^{-4,2 \cdot 10^3 t} + 17,2 + 3,0 \cos 2 \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + 1,1 \sin 2 \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

à des termes inférieurs à 0,3 mA près.

Le diagramme de la période transitoire du signal représenté par la fonction précédente est reproduit dans la figure 3.

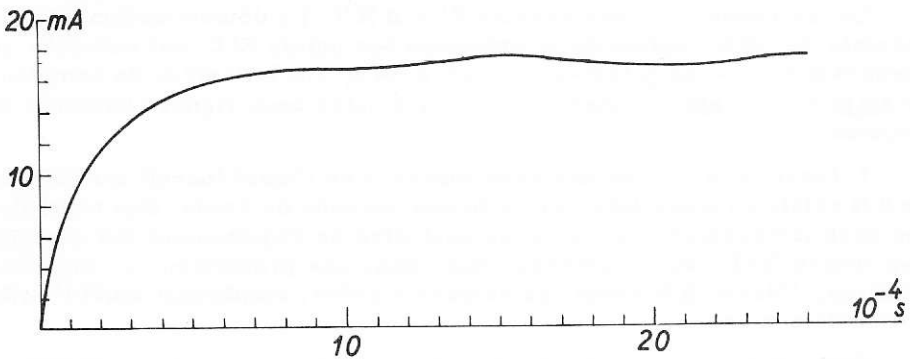


Fig. 3

Puisque, ainsi que l'on a vu, dans le cas normal de R élevé, le système redresseur ne modifie pas sensiblement le début du signal, et en admettant que le système amplificateur soit exempt de distorsions,

les seuls retards peuvent être déduits du diagramme précédent. En connaissant l'intensité $i_0 = 3,8 \text{ mA}$ du courant au seuil de fonctionnement du chronographe, on en déduit que le retard vrai est de $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, tandis que le temps de montée est de l'ordre de 1 ms . Avec des signaux très faibles ($E_0 = 15 \text{ V}$) le retard augmente nettement, tout en restant inférieur à 1 ms .

II

3. - LE CHRONOMÈTRE ÉLECTRONIQUE

Le chronomètre électronique est un dispositif de précision théoriquement illimitée. La limite à cette précision est donnée surtout par les erreurs e_p caractéristiques des circuits accessoires. Ces dispositifs sont essentiellement représentés par le dispositif normalisateur des signaux horaires d'une part, et de l'autre, par le retardateur de temps à prédétermination auquel on envoie les signaux locaux.

Ce dernier circuit, comme le chronomètre, est basé sur l'emploi des tubes compteurs décimaux EIT Philips.

L'erreur relative E_0 de ces deux dispositifs peut être écrite, à des termes d'ordre supérieur près.

$$E_0 = \pm \frac{\Delta T}{T} \pm \frac{\Delta N}{N} ,$$

N indiquant le nombre d'unités du comptage (de 1 à 10^4), et T la période des unités. Puisque la valeur du premier terme, dépendant de la stabilité de la fréquence f de l'oscillateur à quartz qui fournit les signaux de durée connue, est en général inférieure à celle du second (dans notre cas, on a obtenu par des mesures expérimentales $\Delta T/T = 10^{-5}$), on peut écrire pour l'erreur relative E_0 :

$$E_0 = \frac{\Delta N}{N} .$$

On en déduit l'erreur absolue $E_1 = \Delta N/f$. La détermination expérimentale de ΔN , indice de la précision des unités EIT, est exécutée en mesurant en double (c'est-à-dire en échangeant à l'entrée du compteur le start avec le stop) l'intervalle compris entre deux signaux horaires de seconde.

L'écart de la somme des deux mesures de l'unité fournit les valeurs de ΔN relatives à des intervalles de une seconde de durée. Ces contrôles ont paru intéressants car, à cause peut-être de l'ajustement des circuits des unités EIT, on a remarqué que, pour une proportion remarquable d'unités, l'écart ΔN prend des valeurs élevées, empêchant ainsi l'utilisation de ces unités.

Pour utiliser convenablement le chronomètre électronique, il faut en effet que l'on ait :

$$\Delta N = \pm 1, \text{ d'où } E_1 = \pm 0,1 \text{ ms.}$$

Quant au retard du circuit normalisateur, il est fonction de la fréquence et de l'intensité du signal d'entrée. Puisque le seuil de fonc-

tionnement du normalisateur est de 1 - 3 V, on trouve que pour des signaux horaires modulés à 1 KHz, d'intensité supérieure à 3 V, et donc, dans la pratique, pour la totalité des signaux utilisés, le retard théorique maximum, attribuable au temps de montée intrinsèque, est de 0,25 ms, égal à un quart de longueur d'onde. A ce dernier il faut en outre ajouter le retard du dispositif (constante de temps), en général du même ordre de grandeur que le précédent.

La détermination expérimentale des retards du normalisateur en question a été effectuée dans le laboratoire de la Maison Telettra, constructrice du normalisateur lui-même, et a donné comme résultat un retard total de 0,4 ms pour des signaux 1 KHz.

4. - ERREURS SYSTÉMATIQUES DU DISPOSITIF OSCILLOGRAPHIQUE

On sait que les méthodes oscillographiques sont celles qui peuvent fournir les meilleurs résultats du point de vue de la précision, et celles qu'on doit sans doute préférer dans le cas de signaux modulés, car elles reproduisent très fidèlement la forme du signal en permettant d'employer convenablement la précision élevée de ce dernier.

Parmi les différents systèmes employés pour la comparaison, on a utilisé à l'Observatoire de Brera, la méthode de la représentation sur une simple trace de la somme des deux signaux à comparer, obtenue par un circuit additionneur. Les erreurs systématiques qui peuvent altérer les résultats des mesures sont données dans ce cas par :

- a) l'altération du front de montée du signal causée par la bande passante du circuit additionneur et de l'oscilloscope ; ce retard, dépendant de la bande passante du dispositif, est en général négligeable : dans notre cas il est égal à 13 μ s ;
- b) les retards (positifs ou négatifs), bien plus importants, dus à la connaissance inexacte de la période de la base de temps et à la non-linéarité de celle-ci.

Dans le premier cas, en désignant par t_1 et t_2 , les instants de début des deux signaux à comparer, et par Δt l'écart entre la durée théorique t et la durée effective de la b.t., l'erreur e'_R sera donnée par :

$$e'_R = \frac{\Delta t}{t} (t_2 - t_1).$$

Or, si l'on admet que, même avec des oscilloscopes de fidélité moyenne, le temps de montée de la b.t. est approximativement une fonction parabolique de l'intervalle s parcouru, on peut écrire :

$$s = a t^n,$$

$$0 \leq s \leq 1 \text{ quand } t \leq 1,$$

on obtient $a = 1$.

Le cas $n = 1$ correspond à la parfaite linéarité, tandis qu'avec $n \leq 1$ on a respectivement des accélérations positives et négatives.

L'erreur e'_R peut être alors représentée par la fonction :

$$e'_R = (x + y)^{\frac{1}{n}} - x^{\frac{1}{n}} - y,$$

où $x = t_1^n$, $y = t_2^n - t_1^n$. L'erreur maximum e'_{Rm} est donc :

$$e'_{Rm} = n^{\frac{n}{n-1}} (1 - n)$$

Pour l'appareil oscillographique construit à l'Observatoire de Brera, d'après des travaux précédents, dont on a tiré aussi ces dernières conclusions [10], on a obtenu $e'_{Rm} = -0,04$ fois la durée de la b.t. D'où l'on déduit que pour une b.t. de 2 ms de durée, l'erreur maximum due à la non-linéarité est $-0,8 \cdot 10^{-4} s$.

5. - CONCLUSIONS

Les résultats obtenus pour les retards d'enregistrement des signaux horaires ont été déduits en supposant qu'à la sortie du récepteur ces signaux étaient représentés par des trains d'ondes modulés à 1 KHz, c'est-à-dire en négligeant le temps de montée du signal. Ils sont donc valables, à la rigueur, uniquement pour des signaux du type WWV, modulés à l'émission.

Pour des signaux modulés à la réception, étant donné le peu de connaissance de la forme du début et de ses modifications, ces conclusions ont une valeur simplement qualitative.

Le tableau III résume, en unités de $10^{-4} s$, les valeurs des retards maxima e_R pour les trois dispositifs examinés, en considérant séparément les signaux à ondes carrées et les signaux modulés à 1 KHz. Pour ce qui concerne le dispositif chronographique les retards maxima ont été calculés relativement à des signaux de 15 V, car les enregistrements avec des signaux faibles, inférieurs à cette limite, sont négligés.

Tableau III

	Signaux onde carrée	Signaux modulés	Précision du dispositif
Chronographe enregistreur	+ 4	+ 10	20
Chronomètre électronique	± 1	+ 4	1
Dispositif oscillographique	- 0,8	- 0,8	0,4

La dernière colonne du tableau porte comme référence les valeurs des précisions maxima intrinsèques des différents dispositifs.

La précision intrinsèque ou de lecture du chronographe enregistreur est celle qu'on attribue aux échelles décimales de lecture munies de

vernier, employées pour le dépouillement des enregistrements. Pour le dispositif oscillographique elle a été au contraire obtenue en admettant une incertitude moyenne de 2 mm pour la lecture sur l'écran oscillographique, et en effectuant les mesures visuellement.

La comparaison entre ces dernières valeurs montre que pour le chronographe enregistreur les retards calculés sont inférieurs à la précision du dispositif : pour un nombre peu élevé de comparaisons, ils devraient être, par conséquent, du même ordre que les erreurs moyennes. Au contraire, pour ce qui concerne le dispositif oscillographique, et surtout dans les mesures effectuées avec le chronomètre électronique, ils doivent être pris en considération dans le cas de comparaisons entre les signaux locaux et les signaux horaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. Decaux, IGY Instruction Manual, III, 151, 1957
- [2] P. Vocca, Atti R. Accad. Sci. Torino, LXI, 325, 1926
- [3] F. Moreau, J. Verbaandert, BAB, II, 61, 1953
- [4] B. Cester, A. Kranic, Mem. S.A.It., XXVI, 3, 1955
- [5] C. Mazzon, Ric. Sci. 27, 2727, 1957
- [6] E. Proverbio, Mem. S.A.It., XXVIII, 221, 1957
- [7] P. Janet, Leçons d'Electrotechnique Génér., Paris, II, 207, 1904
- [8] G. Silva, Mem. S.A.It., II, 380, 1921
- [9] F. Moreau, J. Verbaandert, BAB, I, 155, 1932
- [10] F. Brando, E. Proverbio, Mem. Ist. Lomb. Sc. e Lett, 93, 399, 1959