

39 ✓

CONTRIBUTI
DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI MILANO-MERATE

a cura del Direttore
Prof. FRANCESCO ZAGAR

NUOVA SERIE

N. 198

E. PROVERBIO

RECHERCHES
DANS LE CHAMP DE LA MÉTROLOGIE
DU TEMPS

Extrait du Bulletin annuel de la société suisse de chronométrie
vol. IV-1962

Recherches dans le champ de la métrologie du temps

Communication de M. Edoardo Proverbio, Observatoire astronomique de Brera-Milano

1. — Dans le cadre des problèmes liés à la détermination et à l'utilisation du temps, considéré comme état physique ou comme grandeur, le problème relatif à la comparaison du temps occupe une place particulièrement importante.

En tenant toujours compte des buts pour lesquels les mesures de comparaison sont effectuées, nous pouvons classer ces mesures selon les différents niveaux de qualité exigés.

C'est ainsi que, sur le plan technique, dans les secteurs de la radiotechnique, des télécommunications et dans certains autres secteurs de la physique atomique, on demande actuellement une précision dans la mesure des intervalles de temps ou de fréquence de l'ordre de $1 \cdot 10^{-8}$.

Sur le plan scientifique, dans le champ des recherches liées à la détermination de l'unité astronomique du temps, à l'étude de la rotation terrestre et aux questions qui s'y rattachent, sans compter l'état actuel de la technique de l'observation des satellites artificiels, on demande une précision supérieure à 10^{-4} s, soit de l'ordre de $1 \cdot 10^{-9}$.

La précision absolue demandée dans les comparaisons de temps par des signaux horaires et des fréquences contrôlées par des étalons atomiques de fréquence tend vers la limite de $1 \cdot 10^{-11}$.

A ces différents niveaux de précision correspondent, au fur et à mesure, différentes méthodes de comparaison, basées sur l'emploi de signaux de temps et en particulier de signaux horaires, soit sur les fréquences qui doivent nécessairement satisfaire aux limites de précision imposées.

Il est d'autre part naturel que la base de n'importe quelle opération de comparaison présuppose des critères et des instruments de mesure tels qu'il ne se produise aucune erreur systématique et accidentelle supérieure au niveau de précision demandé. Actuellement la conservation du temps est confiée à des horloges à quartz qui, contrôlées par des horloges atomiques, peuvent fournir des précisions relatives de l'ordre de $1 \cdot 10^{-10}$, ce qui est donc la limite supérieure de la précision requise dans des comparaisons de fréquence et des signaux de temps dans le champ de la métrologie primaire du temps.

COMPARAISON DE FRÉQUENCES ET DE SIGNAUX
LOCAUX

2. — En comparaisons directes, des mesures de fréquence de grande précision peuvent être effectuées avec des mesures de variations de phase en employant des systèmes oscilloscopiques ou à enregistrement continu.

Vu que la rapidité et la précision des mesures sont directement proportionnelles à la valeur de la fréquence nominale utilisée dans les comparaisons, la fréquence des oscillateurs étalons, dans le cas d'oscillateurs à basse fréquence, peut être avantageusement multipliée, d'éventuels déphasages à caractères systématiques n'ayant aucun effet sur ces mesures. Au contraire, ces déphasages revêtent une très grande importance dans la comparaison de signaux horaires, et surtout dans le cas de la détermination du temps entendu comme état physique. Les méthodes de comparaison des signaux horaires demandent l'examen très rigoureux des retards et des erreurs accidentelles dont sont sujets ces mêmes signaux. Dans le cas de comparaisons de signaux locaux, ces retards doivent être recherchés dans les dispositifs employés pour la formation et la comparaison des signaux mêmes.

Les méthodes actuellement employées pour la formation de signaux de temps à la seconde, sont basées sur l'usage de diviseurs de fréquence électroniques ou mécaniques, ces derniers demandant des étages de diviseurs électroniques intermédiaires.

TABLEAU I

Type de diviseur	Élément diviseur	$\bar{\varepsilon}$	ε_m
Diviseur mécanique	Moteur synchrone 50 Hz, contacts photoélectriques	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
	Moteur synchrone 1 kHz, contacts photoélectriques	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
Diviseur électronique	E 1 T	$\pm 1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
	Z 70 U	$\pm 1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Dans le Tableau I sont indiquées les valeurs maximales ε_m et les valeurs moyennes $\bar{\varepsilon}$ des écarts ε accidentels relatifs à un seul signal à la seconde, caractéristiques de certains diviseurs de fréquence et calculés sur une période de temps de plusieurs minutes.

Les moteurs synchrones de 50 Hz, encore très employés comme diviseurs de fréquence de 50 Hz à 1 Hz, présentent, comme on voit, d'importantes erreurs. Si l'on considère que des mesures effectuées en d'autres occasions avec des contacts mécaniques (*I*) ont fourni des valeurs de $\bar{\varepsilon}$ comprises entre $2 \cdot 10^{-4}$ et $3 \cdot 10^{-4}$, on peut en déduire que la cause principale de ces changements devrait être recherchée dans les fluctuations des vitesses de rotation du rotor beaucoup plus que dans les contacts.

Une considération de grande importance concerne ensuite l'étude de la variation périodique de l'écart ε .

Dans le Tableau II, les valeurs moyennes ε_t de la

$$\text{fonction } \varepsilon_t = \varepsilon(t), \quad \varepsilon(t) = \frac{\sum_{\Delta t=10}^{180} \varepsilon \Delta t}{\Delta t},$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sum_{\Delta t=10}^{180} \varepsilon \Delta t}{\Delta t}$$

ont été calculées à intervalles de temps de 10 s jusqu'à

TABLEAU II

Δt	E 1 T Z 70 U	Moteur synchrone 1 kHz	Moteur synchrone 50 Hz
10 s	+ $2 \cdot 10^{-5}$	— $2 \cdot 10^{-5}$	— $3 \cdot 10^{-5}$
20	+ 2	— 6	± 0
30	+ 1	— 2	+ 1
40	+ 1	+ 2	— 5
50	+ 1	+ 4	+ 3
60	+ 1	+ 6	— 2
70	+ 1	+ 5	+ 2
80	± 0	+ 5	— 3
90	± 0	+ 3	— 1
100	± 0	+ 3	+ 2
110	± 0	+ 1	+ 5
120	± 0	± 0	+ 2
130	± 0	+ 1	— 4
140	— 1	± 0	+ 1
150	— 1	— 2	— 3
160	— 1	— 3	+ 2
170	— 1	— 5	— 7
180	— 1	— 5	+ 4

un maximum de 3 mm. L'allure et la grandeur de ces valeurs démontrent l'existence de variations à périodes relativement longues pour les signaux à la seconde obtenus électroniquement, mais ne portant pas préjudice à l'ordre de grandeur de l'erreur $\bar{\epsilon}$. Les contacts photoélectriques des moteurs synchrones à 1 kHz présentent eux aussi une allure périodique susceptible cependant d'introduire des erreurs sensibles dans les mesures. Dans le cas enfin des moteurs à 50 Hz, les fluctuations résultantes très brèves de l'ordre de quelques secondes sont aussi grandes.

COMPARAISONS DE SIGNAUX HORAIRES ET FRÉQUENCES ÉTALONS

3. — Les variations accidentelles et systématiques des instruments employés pour la comparaison du temps sont généralement fonction des paramètres qui caractérisent les grandeurs à mesurer, dans le cas de signaux de temps : le front de montée et l'intensité du signal. Pour les signaux locaux, ces paramètres paraissent d'une grande stabilité et par conséquent la précision des mesures, une fois effectués les nécessaires tarages des instruments, coïncide avec la sensibilité du dispositif de mesure, soit environ $1 \cdot 10^{-3}$ s pour le chronographe à bande, tandis que pour les dispositifs à compteur et oscilloscopiques elle arrive facilement à des valeurs extrêmement basses.

TABLEAU III

Indicatifs	IBF	FYA ₃	MSF
MHz	5,000	7,428	5,000
T.U.	07 15	08 55	20 50
Δ_m	13,2	10,6	13,8
Juillet	+ 0,9	— 1,0	— 0,8
Août	+ 0,2	+ 0,1	+ 1,0
Septembre	— 1,7	+ 0,8	+ 1,7
Octobre	— 1,0	— 1,9	— 0,6
Novembre	— 0,4	+ 0,5	— 0,5
Décembre	+ 1,1	+ 1,6	— 0,9
$\bar{\epsilon}_m$	0,9	1,0	0,8

TABLEAU IV

Indicatifs	IBF	IBF	MSF	DMR ₂₇	DIZ
MHz	5,000	5,000	5,000	6,075	4,525
T.U.	07 15	11 05	20 55	11 00	17 55
δ_m	0,80	0,88	0,86	2,81	3,37
Janvier	+ 0,5	+ 0,6	+ 1,2	- 0,6	+ 0,2
Février	+ 0,2	- 0,1	+ 0,1	- 0,3	+ 0,1
Mars	- 0,1	+ 0,2	+ 0,2	- 0,3	- 0,2
Avril	- 0,2	- 0,1	\pm 0,0	+ 0,1	- 0,1
Mai	+ 0,1	- 0,1	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,4
Juin	- 0,6	\pm 0,0	- 0,1	+ 0,2	+ 0,7
Juillet	+ 0,4	+ 0,2	+ 0,2	- 0,1	+ 0,2
Août	+ 0,2	+ 0,9	+ 0,2	\pm 0,0	\pm 0,0
Septembre	+ 0,3	+ 0,4	- 0,2	- 0,2	- 0,5
Octobre	- 0,2	\pm 0,0	\pm 0,0	\pm 0,0	- 0,3
Novembre	- 0,2	- 0,5	- 0,3	+ 0,2	- 0,2
Décembre	- 0,7	- 0,8	- 0,7	+ 0,2	+ 0,1

Pour des comparaisons effectuées entre des signaux locaux et des signaux horaires transmis sur ondes courtes et longues, les conditions de stabilité précédemment posées ne sont plus respectées. Il en résulte par conséquent que la précision des dispositifs de mesure diminue considérablement.

Des mesures effectuées à l'Observatoire de Brera au cours de la réception de signaux horaires à l'oscillographe, ont démontré qu'avec ce dispositif on peut effectuer des comparaisons de signaux horaires avec une précision de l'ordre de 10 microsecondes (qui correspond à la stabilité actuelle des signaux locaux de référence). Par contre, la précision du chronomètre électronique est de beaucoup inférieure, en excluant, a priori, celle fournie par les chronographes à bande, qui est encore environ 10 fois plus petite.

Dans le Tableau III sont données, pour trois stations, les valeurs moyennes annuelles pondérées Δ_m des différences des mesures de réception des signaux horaires effectuées en employant en même temps le compteur électronique au dix-millième de seconde ainsi que le dispositif oscillographique (2), et les écarts entre les moyennes

*Prestazioni orologio
elettronico*

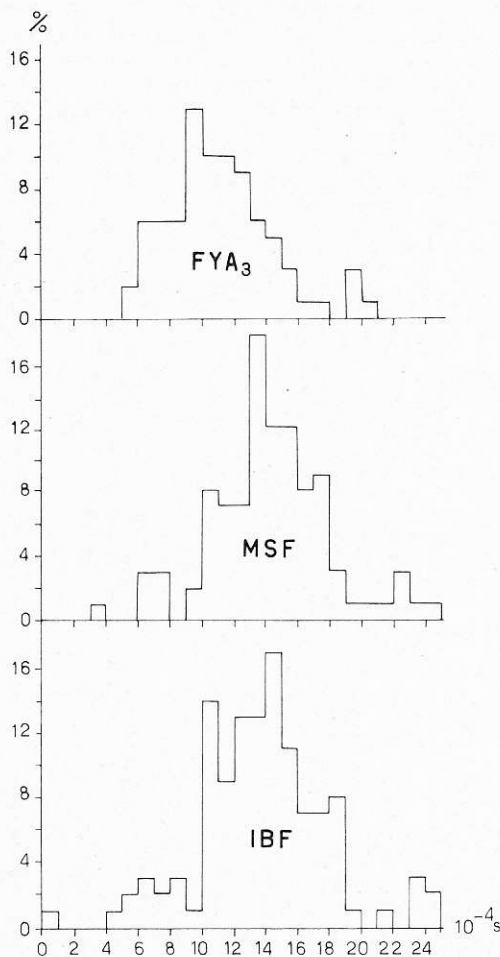


Fig. 1. Histogramme de la distribution pour cent, des écarts de réception des signaux horaires entre méthodes oscillographiques et avec chronomètre électronique.

annuelles Δ_m et les moyennes mensuelles relatives au deuxième semestre 1960, exprimées en unités valant $1 \cdot 10^{-4}$ s.

La moyenne absolue ε_m de ces écarts est du même ordre de grandeur ; on peut donc considérer que l'approximation des mesures effectuées avec le compteur électronique sur la durée d'un mois est en général égale à $1 \cdot 10^{-4}$ s environ.

Sur les durées plus brèves, cette dernière s'élève encore considérablement et l'analyse des histogrammes de la figure 1, par lesquels il résulte que la dispersion moyenne est beaucoup plus grande que les écarts mensuels calculés dans le Tableau III, permet d'évaluer pour l'approximation externe des mesures d'une réception, une valeur moyenne de quelque unité pour 10^{-4} s.

Ces résultats, certainement peu satisfaisants, doivent être attribués essentiellement aux dispositifs de normalisation des signaux horaires qui constituent le trait d'union entre le récepteur et le compteur électronique. Ces dispositifs sont, en effet, très sensibles aux variations du front de montée, et surtout à l'intensité du signal horaire à normaliser ainsi qu'aux nombreux bruits et interférences propres aux réceptions horaires.

Ils déterminent, par conséquent, des déphasages importants en fonction du changement de ces paramètres. La réduction de ces erreurs est possible, comme on l'a déjà fait dans certains observatoires, à condition d'employer des précautions particulières qui, de toute façon, n'éliminent pas ces inconvénients.

4. — Un dernier élément à considérer est l'influence du récepteur sur la stabilité à longue période des signaux horaires. L'examen de ce phénomène a été fait en comparant les valeurs des différences de temps, mesurées oscillographiquement, des signaux horaires relevés en AF et en IF.

Le Tableau IV recueille pour certaines stations horaires les valeurs moyennes annuelles pondérées δ_m de ces différences, dans le sens AF — IF, aussi bien que les écarts δ_i entre ces valeurs et celles moyennes mensuelles, exprimées en unité de $1 \cdot 10^{-4}$ s (+). Ces dernières valeurs mettent en évidence le bon accord interne entre les stations IBF et MSF qui émettent des signaux étalons.

Au contraire, l'allure des valeurs δ_i pour les stations DMR et DIZ s'éloigne de beaucoup de celle des deux premières stations. Cet éloignement ne peut être justifié que par un changement des retards propres au récepteur, conséquence des différentes distorsions et atténuations dont sont sujets les deux types de signaux durant la propagation. La différence maximale sur une même période entre les écarts des deux groupes de stations est de l'ordre de $1 \cdot 10^{-4}$ s, tandis que, entre les stations de l'un des deux groupes, elle s'abaisse à environ $0,5 \cdot 10^{-4}$ s.

Il en résulte que dans les comparaisons oscillographiques effectuées en IF, l'erreur maximale qui est introduite par le récepteur peut être considérée de beaucoup inférieure à $50 \mu\text{s}$.

Mettre en évidence l'accord avec les dates relevées avec la mesure directe des retards (24)

CONCLUSIONS

5. — L'analyse des techniques actuellement employées pour la comparaison des signaux horaires et de fréquences met en évidence la supériorité des méthodes oscillographiques. En ce qui concerne les comparaisons des fréquences, les erreurs provenant des instruments peuvent être considérées actuellement négligeables en employant des fréquences de comparaison appropriées.

Dans le Tableau V, on a récapitulé les résultats des analyses précédentes, relatifs à des comparaisons de

(+) La différence entre les valeurs δ_m des stations émettant signaux étalons et les autres, est donnée par les différents points de référence employés dans les comparaisons oscillographiques en AF.

TABLEAU V

Comparaison de fréquences et de signaux de temps locaux

	Signaux de temps 1 Hz	Fréquences
Chronomètre électronique	$\sim 10 \mu s$	$\sim 1 \cdot 10^{-9}$
Oscillographe	$< 10 \mu s$	$< 1 \cdot 10^{-11}$

caractère local. Les limites des erreurs sont dues particulièrement au type des instruments employés, tant pour la formation que pour les comparaisons vraies et propres.

La précision maximale indiquée pour les comparaisons de fréquence avec chronomètre est celle qu'on obtient en employant des compteurs électroniques utilisant au plus huit unités de comptage. Dans les mesures effectuées en employant des signaux horaires ou des fréquences étalons transmises par radio, aux incertitudes des instruments s'ajoutent celles dues aux autres fluctuations, souvent très importantes, imputables à des phénomènes de propagation dépendant des distances entre les stations d'émission et de réception.

Les données expérimentales dont nous disposons actuellement mettent en évidence des variations diurnes allant jusqu'à 0,5 ms (3) dans les transmissions transocéaniques des signaux horaires dans le champ des ondes courtes. Ces variations sont par contre inférieures à 0,1 ms en employant des *porteuses* dans les transmissions VLF (4), comme celles effectuées par les stations NBA (18 kHz) et GBR (16 kHz). Ces fluctuations, en particulier en ce qui concerne les signaux horaires, se réduisent cependant considérablement sur des liaisons entre les stations européennes ou bien sur des parcours encore plus courts. Dans ce dernier cas, des transmissions horaires, dans le champ des ondes très courtes et des micro-ondes, permettraient d'atteindre des précisions très élevées dans les comparaisons des temps atomiques.

Dans le Tableau VI on a indiqué les précisions moyennes actuellement fournies par les équipements en service à l'Observatoire de Brera, ainsi que celles caractéristiques des transmissions de signaux horaires et des fréquences étalons par effet de la propagation.

Les données relatives à la propagation dans le champ des ondes très courtes des signaux horaires étalons, sont le résultat de récentes expériences, conduites par l'Institut électronique national G. Ferraris, sur des longueurs d'onde décimétrique.

TABLEAU VI

Comparaison de signaux horaires et de fréquences étalons

	Signaux horaires			Fréquences étalons	
	Erreurs instrumentales	Erreurs dues à la propagation		Erreurs instrumentales	Erreurs dues à la propagation
		ondes courtes	ondes très courtes		ondes longues
Oscillographe	$\sim 250 \mu s$	$\leq 500 \mu s$	$100 \div 200 \mu s$	—	—
Chronomètre	$\leq 10 \mu s$	$\leq 500 \mu s$	$100 \div 200 \mu s$	$< 1 \mu s$	$< 100 \mu s$

Ces résultats sont très instructifs. Ils démontrent que pour une liaison du type transatlantique ou tout au moins sur longue distance, l'emploi de fréquences dans le champ des VLF permet, en employant des enregistreurs continus de phase sur des périodes de 24 heures, d'introduire des erreurs dans les comparaisons de temps et de fréquence inférieures à $1 \cdot 10^{-10}$. Par ailleurs, des liaisons directes ou indirectes sur des ondes décimétriques ou métriques permettent d'atteindre un ordre de précision à peine inférieur. Ce dernier critère pourrait être employé avec avantage par certains laboratoires européens intéressés à la synchronisation mondiale des temps atomiques et aux transmissions de ces temps sur des distances moyennes.

6-10

BIBLIOGRAPHIE

- (1) PROVERBIO E., Boll. Geod. e Sc. Affini, XVIII, 305, 1959.
- (2) BRANDO F. — PROVERBIO E., Rend. Istit. Lombardo Sc. e Lettere, Vol. 93, 399, 1959.
- (3) BOELLA M., EGIDI C., Alta Frequenza, XXIV, 309, 1955.
- (4) BONANOMI J., HERMINJARD J., Ann. Franç. de Chron., XVI, 121, 1961.

(Manuscrit reçu le 8 juin 1962)

Imprimé en Suisse