

Description d'un dispositif automatique
de mesure précise de temps morts

par P. Bréonce

Bureau International des Poids et Mesures, F-92310 Sèvres

Résumé

L'appareil décrit met en pratique la méthode des deux oscillateurs pour la détermination de temps morts et permet une lecture directe de la valeur mesurée. La précision relative obtenue, pour des temps morts de quelques microsecondes, est de l'ordre de 10^{-3} pour une durée de mesure de quelques dizaines de secondes.

1. Généralités

La méthode des deux oscillateurs [1] permet une mesure rapide et précise des temps morts, cumulatifs ou non, que l'on insère habituellement dans les chaînes de comptage.

La valeur numérique τ du temps mort contrôlé est donnée par la formule

$$\tau = \frac{t}{2} \frac{n_1 + n_2 - \bar{n}}{n_1 n_2}, \quad (1)$$

où t est la durée de la mesure, n_1 et n_2 sont les nombres d'impulsions fournies par chacun des oscillateurs pendant le temps t , et \bar{n} est le nombre d'impulsions ayant franchi le circuit de temps mort. (Des restrictions expérimentales sont indiquées après l'équation (3)).

Bien qu'il soit facile de calculer τ , on a pensé qu'il serait commode de pouvoir lire directement sa valeur sur un compteur grâce à un générateur relativement simple.

2. Principe de la mesure

En formant, à l'aide de circuits convenables, la quantité $N = n_1 + n_2 - \bar{n}$ et en enregistrant N sur un compteur, on peut obtenir

une lecture directe de la valeur de τ . La formule (1) s'écrit alors

$$\tau = \frac{t}{2} \frac{N}{n_1 n_2} .$$

Remarque - A partir d'ici, pour des raisons de commodité et de clarté, les équations sont exprimées aux valeurs numériques.

Si l'on veut que N représente la valeur numérique de τ en nanosecondes, on doit avoir:

$$\frac{t}{2 n_1 n_2} = 10^{-9} ,$$

ou encore

$$n_1 n_2 = \frac{10^9 t}{2} . \quad (2)$$

Soient ν_1 et ν_2 les fréquences des deux oscillateurs. Puisque

$$n_1 = \nu_1 t \quad \text{et} \quad n_2 = \nu_2 t ,$$

l'expression (2) devient

$$\nu_1 \nu_2 = \frac{10^9}{2 t} . \quad (3)$$

Rappelons la condition [1] que $\max(\nu_1, \nu_2) < 1/(2\tau)$. Si, comme c'est le cas pour l'appareil décrit, les fréquences ν_1 et ν_2 sont respectivement le résultat d'une division de fréquences originales F_1 et F_2 par des nombres entiers d_1 et d_2 , on a

$$\nu_1 = \frac{F_1}{d_1} \quad \text{et} \quad \nu_2 = \frac{F_2}{d_2} .$$

En portant ces valeurs de ν_1 et ν_2 dans (3), on obtient

$$d_1 d_2 = 2 \times 10^{-9} F_1 F_2 t . \quad (4)$$

Dans le cas présent, les fréquences F_1 et F_2 sont produites par des oscillateurs à quartz et ont pour valeur

$$F_1 = (10^6 \pm 1) \text{ Hz}; \quad F_2 = (0,98 \times 10^6 \pm 1) \text{ Hz}.$$

Portons ces valeurs de F_1 et F_2 dans (4). Il apparaît alors que d_1 et d_2 doivent satisfaire à la relation

$$d_1 d_2 = 1\,960 t . \quad (5)$$

Cette condition est nécessaire, mais pas suffisante, pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil (voir p. 3: choix des couples).

Note - Notre choix de F_1 et F_2 s'explique comme suit. Si F_1 est utilisé comme pilote de la base de temps, la valeur de 10^6 Hz est commode si l'on désire que la durée de mesure t soit un nombre entier de secondes. La valeur de F_2 doit être telle que le coefficient de t dans l'expression (5) soit également entier.

Exemple - Si l'on se fixe un temps de mesure, par exemple $t = 20$ s, $d_1 \times d_2 = 39\ 200$. La liste des couples (d_1, d_2) correspondants est représentée sur le tableau 1, où sont éliminés ceux qui conduisent à des fréquences ν_1 ou ν_2 trop élevées pour le temps mort à mesurer [1].

Tableau 1 - Liste des couples (d_1, d_2) tels que $d_1 \times d_2 = 39\ 200$, pour $\tau \leq 5$ μ s

<u>d_1 (ou d_2)</u>	<u>d_2 (ou d_1)</u>
10	3 920
14	2 800*
16	2 450
20	1 960
25	1 568
28	1 400*
32	1 225*
35	1 120*
40	980
49	800*
50	784
56	700*
70	560*
80	490
98	400*
100	392
112	350*
140	280*
160	245
175	224
196	200

L'astérisque désigne les couples recommandés.

Choix des couples

Il ne faut pas perdre de vue les restrictions établies dans [2]. On écarte les couples qui produisent des fréquences ν_1 et ν_2 dont le rapport est "trop simple". Si l'on choisit $d_1 = 40$ et $d_2 = 980$, alors $\nu_1/\nu_2 = 25$. Il est prévisible que la mesure ne peut se faire,

et l'expérience le confirme. Par contre, en choisissant par exemple le couple (56; 700), on a $v_1/v_2 = 12,755$ l... et la mesure se déroule normalement.

Sur le tableau 1, on a marqué d'un astérisque une partie des couples utilisables. Les couples obtenus en permutant d_1 et d_2 n'ont pas été notés.

Remarque - Comme on est libre dans le choix de t , il est possible de dresser d'autres listes et d'obtenir un grand nombre de couples. En fait, après un choix judicieux, il n'y a plus de raison de changer.

3. Description de l'appareil

a) Principe. Le schéma de principe du dispositif est représenté sur la figure 1.

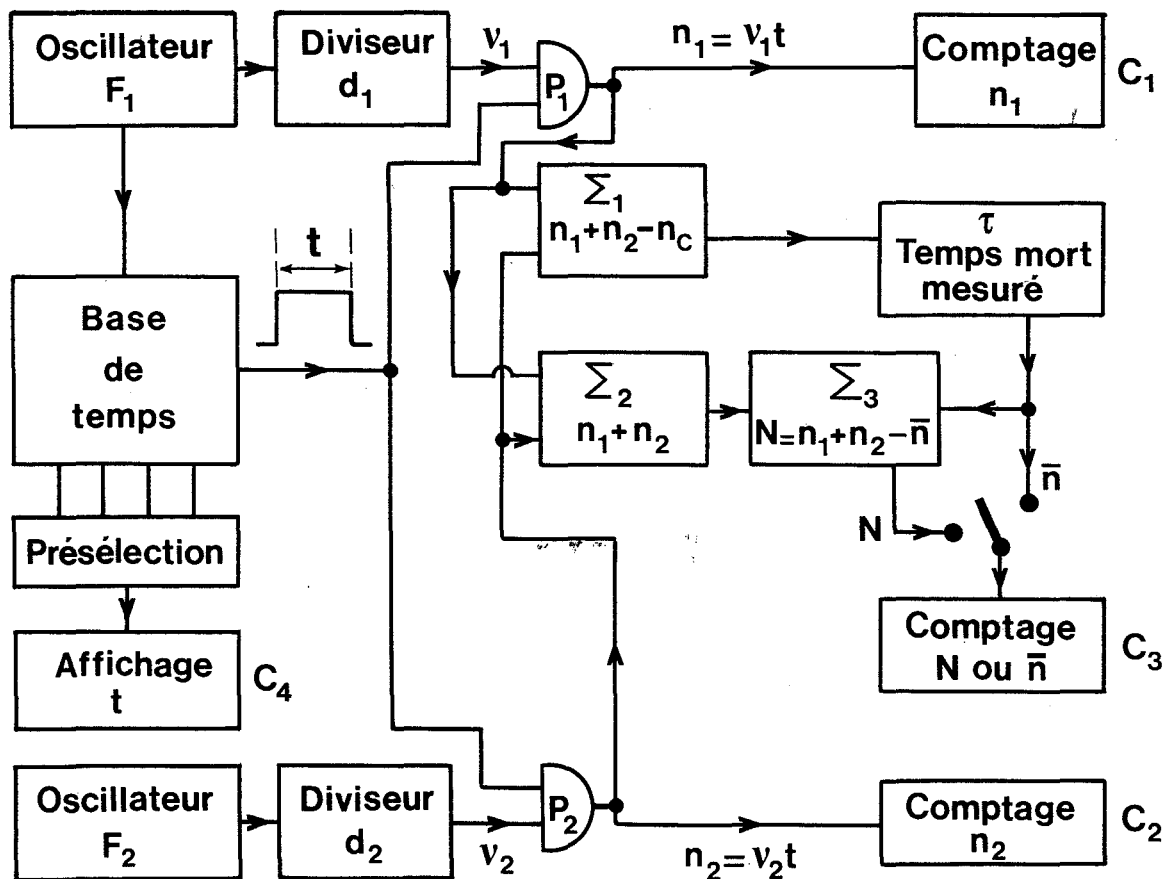


Figure 1 - Schéma de principe du dispositif de mesure des temps morts

On y retrouve les deux oscillateurs qui produisent les fréquences F_1 et F_2 . F_1 sert de pilote à une base de temps. Le temps de mesure t est déterminé par présélection d'un nombre entier de secondes.

Les oscillateurs F_1 et F_2 sont suivis des diviseurs d_1 et d_2 . Chacun de ces diviseurs peut prendre les valeurs entières comprises entre 1 et 9 999. Après division, on dispose des fréquences ν_1 et ν_2 , transmises aux compteurs, ainsi qu'aux circuits Σ_1 et Σ_2 , pendant le temps t , ceci par l'intermédiaire des portes P_1 et P_2 .

Le circuit Σ_1 superpose les impulsions de fréquences ν_1 et ν_2 , mais la série ainsi obtenue est affectée de pertes par coïncidences, n_c , qui sont dues à la largeur non nulle des impulsions sommées. Cette somme, $n_1 + n_2 - n_c$, est appliquée à l'entrée du dispositif de temps mort à mesurer. Généralement, ces pertes n_c ne modifient pas le résultat de la mesure [3].

Le circuit Σ_2 réalise exactement la somme $n_1 + n_2$. Au prix d'une légère modification de l'une des deux séries, on évite toute perte par coïncidence. Ce détail sera examiné plus tard (voir p. 8 et 9).

La série $n_1 + n_2$, issue de Σ_2 , est appliquée au circuit Σ_3 qui reçoit, d'autre part, la série \bar{n} des impulsions ayant franchi le temps mort. A la sortie de Σ_3 , la somme $N = n_1 + n_2 - \bar{n}$ est rigoureusement exacte. Si d_1 , d_2 et t vérifient la relation (5), N représente la valeur numérique de τ , exprimée en nanosecondes. La lecture de N se fait sur l'affichage du compteur C_3 , qui peut également enregistrer \bar{n} .

D'autre part, les compteurs C_1 , C_2 et C_4 enregistrent et affichent respectivement n_1 , n_2 et t . Ainsi, on dispose à tout moment des quatre valeurs numériques permettant de calculer τ suivant (1). Le choix des diviseurs d_1 et d_2 est dans ce cas plus libre. Il suffit de respecter la condition $\max(\nu_1, \nu_2) < 1/(2\tau)$ et il faut que le rapport ν_1/ν_2 ne soit pas simple [2].

b) Réalisation. La figure 2 représente la face avant du dispositif. Le schéma est celui de la figure 3; les quatre modules qui constituent l'appareil sont séparés par des traits mixtes et repérés A, A', B et C.

Avant de décrire le fonctionnement de chacun de ces modules, il est utile de faire quelques remarques:

- Bien que représentés sur le schéma, les compteurs C_1 à C_4 ne font pas partie des modules mais sont montés, avec leurs affichages, sur le panneau avant.

- On retrouve les éléments de la figure 1 sous la même désignation.
- Les éléments numérotés le sont de 1 à n sur chaque module.
- Les associations de portes, telles que 1 et 2 du module C, servent à former une impulsion brève, synchrone d'une transition 0-1 à l'entrée. La durée de cette impulsion, généralement comprise entre 20 et 100 ns, est fonction de la valeur de la capacité.

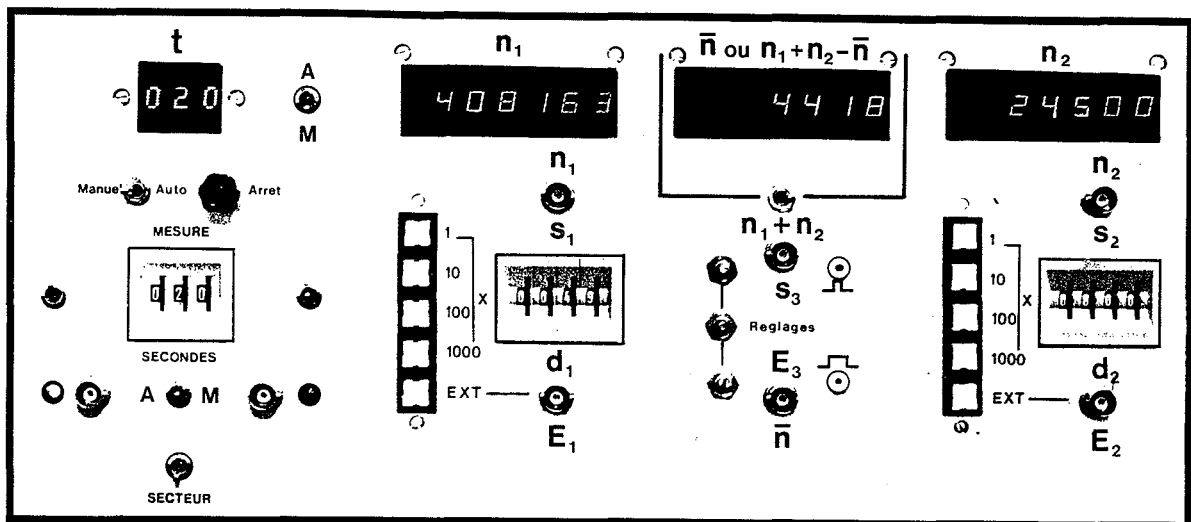


Figure 2 - Face avant du dispositif de mesure des temps morts

c) Fonctionnement

- Module A - Oscillateur F_1 et diviseur d_1 . L'oscillateur, constitué par les portes 1 à 3 et le transistor T_3 , est d'un modèle courant. Comme il sert de pilote à la base de temps (circuit B), il est muni d'un ajustage de sa fréquence.

On remarque une entrée E_1 , sur laquelle on peut appliquer un signal extérieur, et une première division (10^0 à 10^3), indépendante de d_1 . Ces détails trouvent leur utilité dans des applications autres que celle qui nous intéresse ici.

Le diviseur fonctionne sur le principe de la présélection d'un nombre égal à d_1 et de la remise à zéro du compteur lorsque celui-ci a enregistré d_1 impulsions. On obtient à la sortie de la porte 9 une série d'impulsions de fréquence $\nu_1 = F_1/d_1$. Ces impulsions sont transmises par l'intermédiaire du monostable M_1 vers le compteur C_1 et vers le module C, ceci pendant le temps t choisi sur la base de temps. En dehors de ce temps t , M_1 est inhibé (porte 9 du circuit B). C'est donc M_1 qui joue le rôle de la porte P_1 de la figure 1.

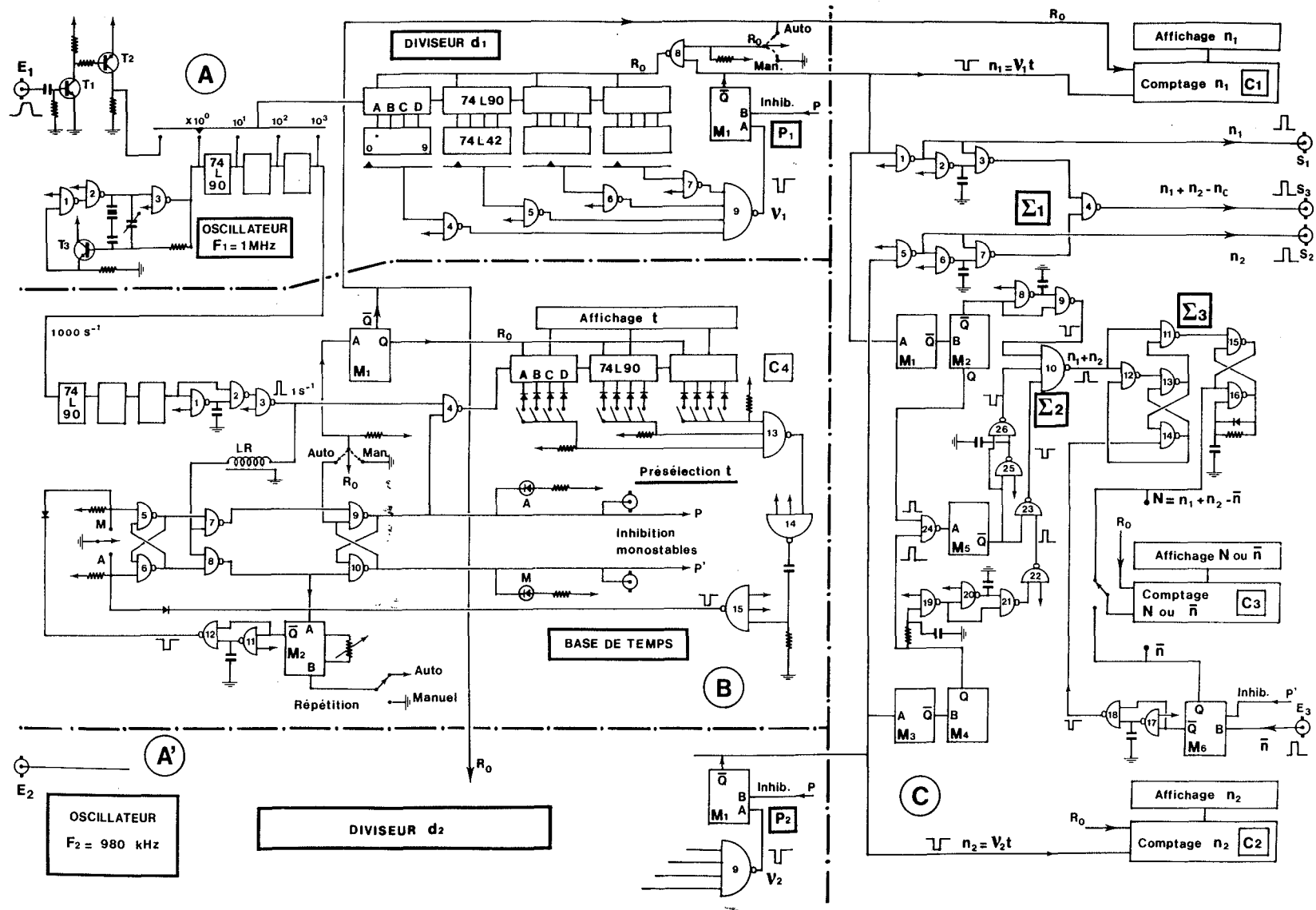


Figure 3 - Schéma complet du dispositif de mesure des temps morts.

Tous les monostables M_1, M_2, \dots , sont du type SN74121. Les portes ET sont du type SN74LS00, ou 74LS10 ou 74LS20.

- Module A' - Oscillateur F_2 et diviseur d_2 . Il est strictement identique au module A, sauf en ce qui concerne la fréquence (980 kHz au lieu de 1 MHz). Le signal de fréquence ν_2 est transmis au compteur C_2 et au circuit C, pendant le temps t .

- Module B - Base de temps. La base de temps permet de choisir le temps de mesure t par présélection sur le compteur C_4 , où t est un nombre entier de secondes. Le signal de fréquence 1 000 Hz, issu du module A, est divisé par 1 000 à l'aide de trois décades 74 L 90. On obtient à la sortie de la porte 3 une série continue d'impulsions de fréquence 1 Hz.

Le fonctionnement, très simple, est le suivant. Après présélection du temps de mesure choisi, soit t secondes, sur le compteur C_4 , on actionne le bistable "Arrêt-Marche" (portes 5 et 6) en établissant manuellement le contact M. Ceci a pour effet d'ouvrir la porte 7. Lorsqu'une impulsion franchit cette porte, le bistable (9,10) est actionné et la porte 4 est ouverte. C'est grâce au retard LR, légèrement supérieur à la durée de l'impulsion, que celle-ci n'est pas comptée par C_4 . Lorsque les t impulsions suivantes sont enregistrées, c'est-à-dire lorsque la présélection est atteinte, le comptage est interrompu par commande du bistable (5,6) sur l'entrée de la porte 6. L'impulsion suivante franchit LR, puis la porte 8 et sollicite le monostable M_2 par son entrée A. Deux cas sont possibles:

- L'inverseur "Auto-Manuel" est en position "Manuel": il ne se passe rien. Pour procéder à une nouvelle mesure, il faut actionner manuellement le bistable (5,6).

- L'inverseur est en position "Auto": M_2 génère un créneau de durée réglable entre 1 et 10 secondes, durée au bout de laquelle une nouvelle mesure est commandée. A cet instant, M_1 génère un signal de remise à zéro (R_0) destiné aux divers compteurs et éventuellement aux diviseurs. La lecture du résultat d'une mesure doit se faire pendant le temps d'arrêt.

Note - Si le nombre zéro est présélectionné sur le compteur C_4 , on dispose en permanence des signaux sur les différentes sorties.

- Module C - Ce module supporte les circuits Σ_1 , Σ_2 et Σ_3 .

Le circuit Σ_1 est constitué par la porte 4 qui superpose les deux séries n_1 et n_2 , après mise en forme. La série obtenue en sortie, soit $n_1 + n_2 - n_c$, est appliquée à l'entrée du temps mort à mesurer.

Le circuit Σ_2 , dont le rôle est de fournir une série $n_1 + n_2$ sans pertes, est constitué par les monostables M_1 à M_5 , les portes 8 à 10 et les portes 19 à 26.

Le principe consiste à détecter les coïncidences entre deux impulsions des séries n_1 et n_2 et à remplacer l'une de ces impulsions par une autre, générée avec suffisamment de retard pour qu'elle ne risque pas d'être confondue avec celle qui reste.

Dans le cas présent, on a choisi arbitrairement de ne pas perturber la série n_1 . C'est donc la série n_2 qui est affectée par l'artifice introduit en cas de coïncidence. Les impulsions de la série n_1 sont retardées par le monostable M_1 et mises en forme par M_2 . Celles de la série n_2 sont retardées par M_3 et mises en forme par M_4 . On verra plus tard (p. 10) l'utilité des retards introduits par M_1 et M_3 , retards que l'on rend égaux, autant que possible. La durée des impulsions mises en forme par M_2 et M_4 détermine l'intervalle minimal qui peut exister entre deux impulsions des deux séries sans qu'elles soient considérées comme coïncidentes. En effet, lorsque ces impulsions mises en forme sont séparées par un intervalle de temps inférieur à cette durée, on observe un signal à la sortie de la porte 24 et le monostable M_5 est actionné; ceci a pour effet de fermer la porte 23 et d'empêcher l'impulsion de la série n_2 d'atteindre l'entrée de la porte 10. Elle est remplacée par une impulsion générée à la fin du fonctionnement de M_5 (portes 25 et 26). Cette impulsion et celle de la série n_1 franchissent la porte 10 et sont suffisamment distantes pour n'être pas confondues. La figure 4 illustre trois situations possibles. Dans deux des cas il y a coïncidence et l'impulsion effacée en Y23 est remplacée par une impulsion en Y26. Dans le troisième cas, l'impulsion en Y23 n'est pas effacée et on ne forme pas d'impulsion de remplacement en Y26. Donc, s'il n'y a pas coïncidence, les impulsions de chaque série franchissent la porte 10 sans modification de leur position relative dans le temps.

Sur la dernière ligne de la figure 4, on suppose que les impulsions n_1 et n_2 sont sommées sur un circuit Σ_x semblable à Σ_1 . Il apparaît que dans le cas de la figure on n'aurait obtenu que quatre impulsions au lieu des six que l'on obtient en Σ_2 .

Le circuit Σ_3 utilise la somme $n_1 + n_2$ obtenue comme il vient d'être dit, pour fournir le nombre $N = n_1 + n_2 - \bar{n}$. Ce circuit Σ_3 est constitué par les portes 11 à 16. Le fonctionnement en est le suivant: chaque fois qu'une impulsion de la série issue de Σ_1 a franchi le dispositif de temps mort, on observe une impulsion \bar{n} sur l'entrée E_3 . Les impulsions issues de la porte 10, soit $n_1 + n_2$, franchissent normalement la porte 11. Quand une impulsion \bar{n} se présente en E_3 , elle actionne M_6 et ensuite le bistable (13,14). Ceci a pour effet de fermer la porte 11 et d'ouvrir la porte 12. La première des impulsions de la série $n_1 + n_2$ qui survient ne franchit donc pas la porte 11, mais par la porte 12 elle replace le bistable (13,14) dans son état initial et la porte 11 est à nouveau ouverte. De cette façon, on observe bien en sortie de la porte 11 la série $N = n_1 + n_2 - \bar{n}$. Les impulsions de cette série sont allongées par le monostable (15,16).

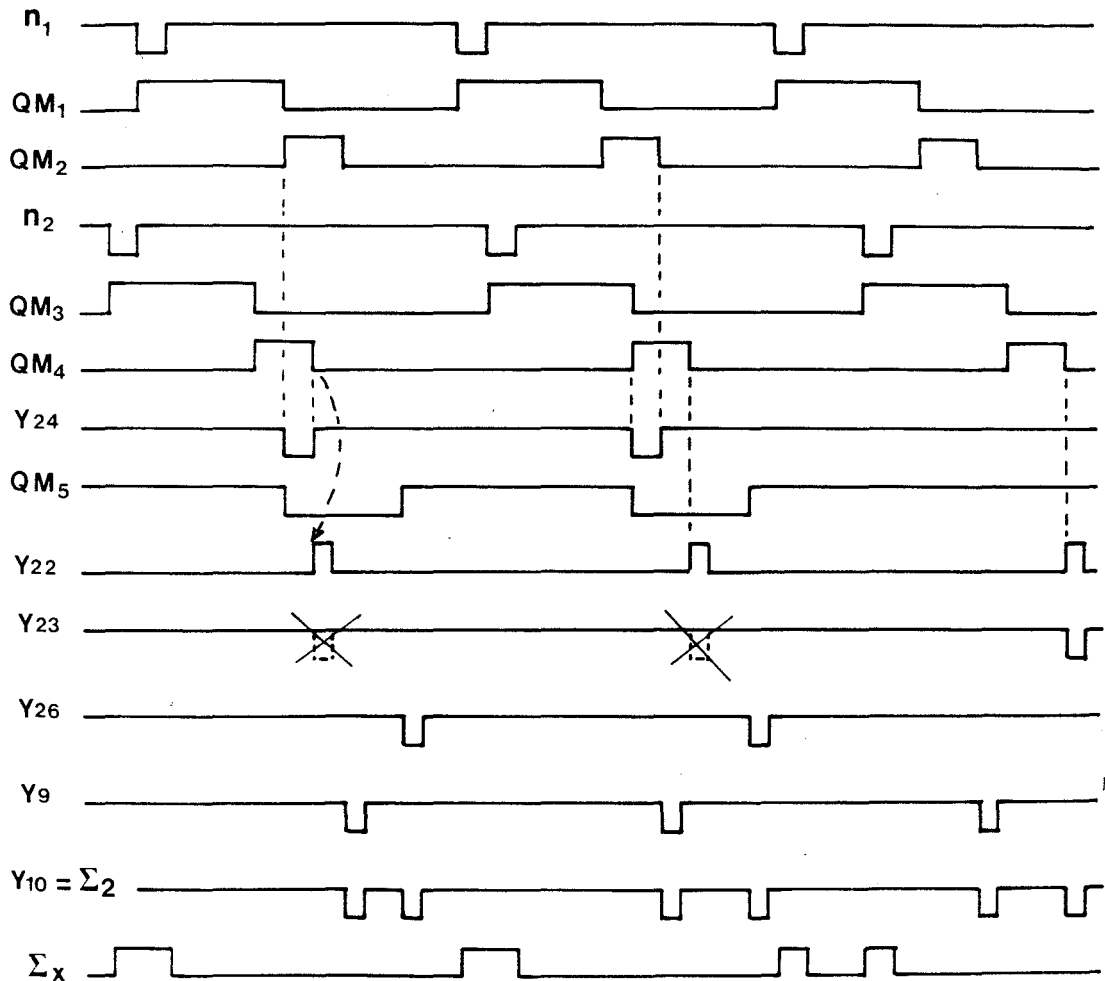


Figure 4 - Signaux obtenus en divers points du circuit Σ_2 .

Les repères se rapportent aux éléments du module C de la figure 3.
Exemple: QM_1 = sortie Q du monostable M_1 ; Y_{22} = sortie de la porte 22.

Remarques

- Grâce au retard introduit par les monostables M_1 et M_3 , l'impulsion de la série $n_1 + n_2$ qui suit une impulsion \bar{n} ne se présente pas au hasard à l'entrée du bistable (13, 14). Les deux sont étroitement corréliées et un ajustement correct des retards produits par M_1 , M_3 et M_6 garantit un fonctionnement tout à fait sûr du bistable: ses entrées sont sollicitées alternativement et on ménage un intervalle de temps toujours suffisant entre deux sollicitations.
- On peut contrôler le bon fonctionnement du circuit Σ_2 en comptant N avec $\bar{n} = 0$; on vérifie alors que $N = n_1 + n_2$.
- Le fonctionnement du circuit Σ_3 se vérifie en comptant N sur le compteur C_4 , en même temps que \bar{n} sur un compteur indépendant de l'appareil.

4. Mesure du temps mort d'un circuit

Afin de définir des conditions favorables d'utilisation de l'appareil en service, nous avons procédé à des séries de mesures sur un circuit de temps mort. Ce circuit avait été préalablement mesuré par une méthode directe (générateur à double impulsion) et on avait obtenu pour τ la valeur de $(4,42 \pm 0,01) \mu\text{s}$.

Pour chacun des couples repérés sur le tableau 1, il a été procédé à trois séries de douze mesures. Les résultats condensés sont portés sur le tableau 2.

- On a porté dans la colonne A les couples de diviseurs utilisés.

- Dans la colonne B, sont notées les valeurs des rapports v_1/v_2 obtenus avec ces couples de diviseurs, pour les fréquences $F_1 = 10^6$ Hz et $F_2 = 0,98 \times 10^6$ Hz supposées exactes. Quand la valeur notée est suivie de points (...), cela signifie que le résultat comporte plus de quatre décimales.

- Dans les colonnes C, D et E, chaque valeur τ inscrite est le résultat de la moyenne de 12 mesures de 20 secondes.

- Dans la colonne F, on a porté la moyenne $\bar{\tau}$ des 36 valeurs obtenues pour chaque couple de diviseurs.

Enfin, on a noté au bas de la colonne F $\bar{\bar{\tau}}$, moyenne des 9 valeurs $\bar{\tau}$ conservées.

La valeur obtenue pour le couple (32;1225) a été écartée. Le rapport v_1/v_2 correspondant, soit 39,062 5, est sans doute trop simple.

Les mesures portées sur le tableau 2 ont été réparties volontairement sur deux jours consécutifs. Mentionnons que l'appareil, construit il y a deux ans, nous a permis de suivre divers circuits de temps mort pendant plusieurs mois. Les dérives observées ne dépassent guère 5ns pour une valeur de τ de l'ordre de 5 μs .

Le tableau 2 indique que certains couples sont apparemment plus favorables que d'autres. Ainsi, nous avons retenu les couples (49;800) et (98;400). Finalement, nous utilisons le premier, tant que les temps morts à mesurer ont une valeur inférieure à 24 μs .

Notre expérience portant sur des mesures de routine effectuées à l'aide de cet appareil montre que l'on peut obtenir la valeur numérique d'un temps mort avec une exactitude relative de 10^{-3} , pour une durée de mesure n'excédant pas une minute.

Remarque - Un autre dispositif de mesure automatique de temps morts utilisant la même méthode a été construit à Budapest (OMH) [4].

Tableau 2 - Résultats des mesures d'un temps mort.
Les incertitudes sont les écarts-types correspondants.

A		B	C			D	E	F
d ₁	d ₂	v ₁ /v ₂	τ en nanosecondes					
			série n° 1	série n° 2	série n° 3		$\bar{\tau}$	
14	2 800	204,081 6...	4 417,3 ± 0,7	4 417,1 ± 0,6	4 418,9 ± 0,6		4 417,8 ± 0,4	
28	1 400	51,020 4...	4 417,9 ± 1,4	4 416,8 ± 0,8	4 417,9 ± 2,0		4 417,5 ± 0,8	
32	1 225	39,062 5	4 419,0 ± 3,2	4 422,6 ± 6,6	4 429,3 ± 17,0			
35	1 120	32,653 0...	4 420,0 ± 0,4	4 417,7 ± 0,8	4 420,8 ± 1,6		4 419,5 ± 0,6	
49	800	16,659 7...	4 419,0 ± 0,8	4 418,3 ± 0,5	4 418,7 ± 0,6		4 418,7 ± 0,4	
56	700	12,755 1...	4 419,0 ± 1,2	4 417,7 ± 1,6	4 419,4 ± 1,6		4 418,7 ± 0,8	
70	560	8,163 2...	4 421,3 ± 0,6	4 416,8 ± 1,4	4 417,6 ± 1,8		4 418,6 ± 0,8	
98	400	4,164 9...	4 419,1 ± 0,6	4 419,3 ± 0,8	4 419,6 ± 0,5		4 419,3 ± 0,4	
112	350	3,188 7...	4 418,0 ± 0,8	4 419,1 ± 1,3	4 419,6 ± 0,8		4 418,9 ± 0,6	
140	280	2,040 8...	4 418,4 ± 2,2	4 415,5 ± 1,5	4 423,6 ± 4,1		4 419,2 ± 1,7	

$$\bar{\tau} = 4\ 418,7$$

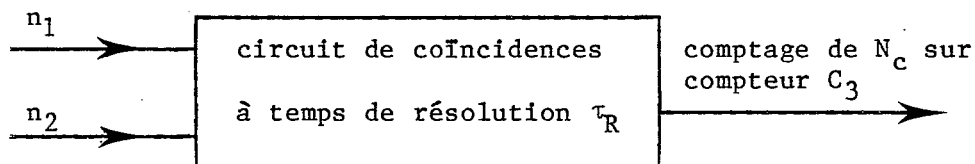
Références

- [1] J.W. Müller: "Une méthode simple pour la mesure précise de temps morts", Rapport BIPM-69/3 (1969)
- [2] E. Carnal, J.-J. Gostely: "Risques d'erreur dans l'utilisation des deux oscillateurs pour la mesure des temps morts dans l'instrumentation nucléaire", Nucl. Instr. and Meth. 158 (1979), 537-544
- [3] J.-J. Gostely, E. Carnal: "La méthode des deux oscillateurs pour la mesure du temps mort dans l'instrumentation nucléaire", Nucl. Instr. and Meth. 150 (1978), 459-464
- [4] J. Vagvölgyi: "High-precision dead-time measurements with double oscillator method", Report OMH-7803 (Budapest, 1978)

(Mars 1981)

Note ajoutée en Octobre 1981:

Mesure automatique du temps de résolution des coïncidences



Si deux oscillateurs non corrélés fournissent, pendant un temps t , n_1 et n_2 impulsions aux entrées d'un circuit de coïncidences à deux voies, de temps de résolution τ_R , le nombre de coïncidences N_c obtenues est tel que

$$N_c = \frac{2 n_1 n_2}{t} \tau_R,$$

d'où

$$\tau_R = \frac{t}{2} \frac{N_c}{n_1 n_2}.$$

On remarquera l'analogie avec (1): $\tau = \frac{t}{2} \frac{n_1 + n_2 - \bar{n}}{n_1 n_2}$. Si l'on veut que N_c représente la valeur de τ_R exprimée en nanosecondes, d_1 , d_2 et t doivent satisfaire aux conditions établies en (5): $d_1 d_2 = 1960 t$. Il suffit donc de compter N_c sur le compteur C_3 en position de comptage \bar{n} pour connaître la valeur de τ_R (en ns).