

11. L'ETALONNAGE des appareils de mesure

(Suite voir N° 1503)

Il ne saurait être question de traiter du laboratoire de l'amateur sans évoquer le problème de l'étalonnage ou de la calibration des appareils qui le composent. La précision des mesures en dépend et rien ne serait plus stupide que de prétendre faire des évaluations de performances, de contrôle de bon fonctionnement, voire même un simple dépannage avec un appareil de mesure largement hors de ses tolérances nominales : les conclusions que l'on pourrait en tirer risqueraient fort d'être totalement erronées.

L'opération qui permet de vérifier l'exactitude des indications d'un instrument par comparaison avec un étalon et/ou l'établissement éventuel des graduations correspondantes, a pour nom l'étalonnage (Petit Larousse). Cette opération requiert donc la présence d'éléments précis et stables servant de référence que sont les étalons ou les calibres (dans ce cas on désigne l'opération correspondante sous le nom de calibration).

Il existe des étalons pour chacune des grandeurs électriques courantes (tension, fréquence, résistance, capacité, inductance, etc.). La plupart de ces instruments est assez onéreuse, surtout si l'on s'attache à une très grande précision ; seuls les laboratoires spécialisés sont ainsi équipés.

Le laboratoire d'amateur se contentera de références moins précises pour ses besoins courants. Ces étalons d'amateur seront relativement faciles à constituer à partir de propriétés physiques connues de la matière : effet électrochimique pour les piles, effet Zener sur les semi-conducteurs ou résonance piezo-électrique d'un cristal de quartz. On se limitera, d'ailleurs aux mesures de tension et de fréquence, les autres mesures se déduisant des premières.

La calibration par comparaison avec des appareils de mesure de précision réputée tels que voltmètres ou fréquencemètres digitaux sera effectuée chaque fois que l'on en aura les moyens. Cette méthode a l'avantage de donner des indications précises sur une large plage de valeurs et permet ainsi de contrôler, par exemple, une linéarité d'échelle.

A propos des appareils digitaux, il convient d'ouvrir une parenthèse pour dissiper un malentendu fréquent : un voltmètre digital est un appareil qui donne, en général, et s'il est bien calibré, une précision supérieure à celle d'un bon appareil à aiguille mais, quel que soit son attrait, il ne saurait le remplacer dans bien des applications notamment lorsque le signal mesuré a des variations relativement rapides car la constante d'intégration d'un

appareil digital est relativement longue. Par contre si le paramètre mesuré est quasi invariant, comme cela est le cas des sources stabilisées, on peut faire appel très largement à la technique digitale, surtout en calibration.

L'étalonnage devra naturellement être réalisé une première fois après avoir construit l'appareil de mesure. Il sera répété avec une périodicité variant, suivant le type d'appareil et la fréquence de son utilisation, de 6 mois à 1 an au plus.

Cette dernière opération de contrôle systématique est nécessaire à la maintenance des appareils de mesure afin de permettre de conserver, dans le temps toutes leurs qualités opérationnelles.

Nous sommes certains que nombre de lecteurs ignorent tout des qualités de précision qu'ils doivent attendre de leurs appareils de mesure et les causes de détérioration de ces qualités. Ils ne se préoccupent donc guère de tenter d'y apporter un remède par une vérification et une correction périodiques.

Pendant une résistance finit par varier, un condensateur change de valeur, un oscillateur dérive, des fuites électriques peuvent apparaître, des chocs ou des vibrations peuvent avoir détruit un réglage, les effets des variations de température ou d'humidité, etc. peuvent faire évoluer

lentement mais sûrement la précision, voire la stabilité des appareils même non utilisés, quelle que soit leur origine et aussi élaborés fussent-ils.

C'est pour permettre à nos lecteurs de vérifier l'ampleur de cette dégradation sournoise et d'y remédier efficacement que nous avons conçu cet article, car si le phénomène de vieillissement peut apporter de la qualité au bon vin, il est à combattre systématiquement sur les équipements électroniques...

COMMENT ETALONNER

D'une façon générale, on peut classer les appareils de mesure en deux catégories :

La catégorie 1 comprend les mesureurs qui sont les appareils les plus répandus tels que les multimètres, voltmètres, ampèremètres, oscilloscopes. Ils sont utilisés pour quantifier une valeur de tension, de courant, de fréquence, de distorsion, etc.

La catégorie 2 comprend les générateurs qui ont, à l'inverse des premiers, un comportement actif : ils fournissent un signal électrique d'amplitude et de forme appropriées. Ce sont les générateurs BF, HF, les sources de tension continue, etc.

On pourrait même ajouter une troisième catégorie comprenant certains composants passifs :

résistances, condensateurs, inductances ainsi que les accessoires des appareils cités dans les catégories 1 et 2.

L'opération d'étalonnage peut se faire suivant plusieurs techniques :

Pour les appareils de la première catégorie, il est nécessaire de disposer d'une source de tension, courant, fréquence... **précise et stable** ou simplement stable si l'on pilote la valeur de la source en la mesurant, en permanence au moyen d'un mesureur précis, en même temps que l'on mesure la grandeur caractéristique avec l'appareil à étalonner (méthode de comparaison).

Les appareils de la seconde catégorie font appel, pour leurs étalonnages à un ou plusieurs mesureurs de précision, suivant le nombre de paramètres à contrôler. On peut également, comme précédemment, procéder par comparaison avec un autre générateur **précis** en utilisant un mesureur stable, mais pas forcément étalonné.

La classe de précision qui indique, le plus souvent en pourcentage, la marge d'erreur maximale que l'on peut tolérer sur un appareil particulier, est un paramètre essentiel qu'il est impératif de connaître préalablement à toute opération.

Il conviendra de choisir l'appareil de référence ou l'étalon d'une classe supérieure à celle de l'appareil à étalonner afin d'atteindre la précision nominale de ce dernier : le rapport de 1 à 10 est souhaitable. Soit, par exemple, à étalonner un générateur sortant une tension de $1\text{ V} \pm 10\%$: on choisira un voltmètre étalonné à $\pm 1\%$ pour

vérifier la précision de ce générateur.

Pour des précisions moyennes, ou très bonnes, cette précaution est indispensable. Mais il se peut que la disposition d'appareils ou d'étalons très précis ne soit pas facile à obtenir. Dans ce cas, on pourra se contenter d'un rapport de 1 à 5, ou de 1 à 2.

Dans le cas où l'on estime que la mesure d'un paramètre n'est pas très critique, s'agissant d'appareils courants, on pourra se contenter d'un appareil de référence de même classe que celle de l'équipement à étalonner.

Enfin, il faut savoir que l'ajustement ou l'évaluation de l'erreur par l'opérateur introduisent toujours une erreur d'appréciation, parfois non négligeable, dont il est bon de tenir compte.

Pour avoir un panorama complet des méthodes d'étalonnage préconisées ou références retenues, on consultera le tableau de la figure 1 qui résume, à peu près, le contenu de cet article.

LES TENSIONS CONTINUES

Ce chapitre intéresse les appareils mesureurs (voltmètres, multimètres, oscilloscopes...) autant que les générateurs (tensions de référence, sources stabilisées).

La méthode à utiliser consiste à comparer les indications données par le mesureur, ou la tension fournie par le générateur avec une source étalon bien connue (pile ou zener). La précision obtenue sera évidemment plus ou moins grande selon l'étalon et le processus d'étalonnage choisis.

Rappelons qu'il est capital d'associer à un appareil le bon étalon qui convient et de ne pas rechercher une précision illusoire qui ne correspondrait pas à la classe de l'appareil à étalonner.

L'étalonnage en tension continue est particulièrement important car d'autres paramètres peuvent être obtenus à partir de cette catégorie d'appareils : mesure de courant, mesure de tensions crête, mesure de résistances. La précision des multimètres est meilleure sur la gamme continue de sorte que l'on devra doubler de soin pour procéder à leur étalonnage sur cette fonction.

S'il s'agit d'un voltmètre à aiguille (cadre mobile), on s'assurera, avant toute opération, que le **zéro mécanique** de l'appareil est parfait. Pour cela on le mettra dans la position préconisée par le constructeur (généralement à plat sur une table), puis l'on réglera ce zéro en prenant soin de passer de part et d'autre de la graduation nulle. On agitera légèrement l'appareil dans le sens transversal pour s'assurer que l'aiguille revient bien à zéro sur sa position d'équilibre. L'observation se fera dans les meilleures conditions d'éclairage en s'aidant, s'il existe, du miroir antiparallaxe.

Les voltmètres électroniques seront, de plus, réglés en zéro électrique (entrée en court-circuit) après stabilisation.

Pour les générateurs de tension continue, il est préconisé de les mettre sous tension au moins 15 minutes avant de procéder à leur étalonnage afin de permettre aux circuits de se stabiliser après la montée en température. Si ces générateurs sont munis de volt-

mètres à cadre mobile, on procédera à un étalonnage séparé de ces appareils puis un contrôle global de fonctionnement.

L'étalonnage d'un voltmètre se fera en disposant ce dernier aux bornes de la source étalon en choisissant la sensibilité adéquate.

On déterminera la précision admissible pour le voltmètre en multipliant le pourcentage indiqué par le constructeur par la valeur de la tension pour une pleine déviation sur l'échelle considérée.

Par exemple, une tension à pleine échelle de 1,5 V donnera, avec une précision de $\pm 1\%$, une variation de 1,495 à 1,515 V soit $\pm 15\text{ mV}$. En utilisant une pile étalon au mercure de 1,345 V, on devra obtenir sur le voltmètre une lecture de $1,345\text{ V} \pm 15\text{ mV}$ soit de 1,33 à 1,36 V pour un étalonnage correct. Dans le cas où l'on observerait une différence supérieure à cette marge, il serait nécessaire de renvoyer l'appareil chez son constructeur pour nouvelle calibration (cette opération est à déconseiller à l'amateur).

Les opérations ci-dessus décrites ne concernent qu'une gamme. Pour élargir cet horizon, on fera appel à une alimentation très stable donnant une tension suffisamment élevée et à un jeu de résistances à 0,5 % ou mieux, montées en diviseur. Le schéma est celui de la figure 2.

Si le choix de la tension d'alimentation et de la valeur des résistances est judicieux, on obtiendra une annulation de courant entre le point A et la pile étalon (déviaton nulle d'un microampèremètre qui n'a nul

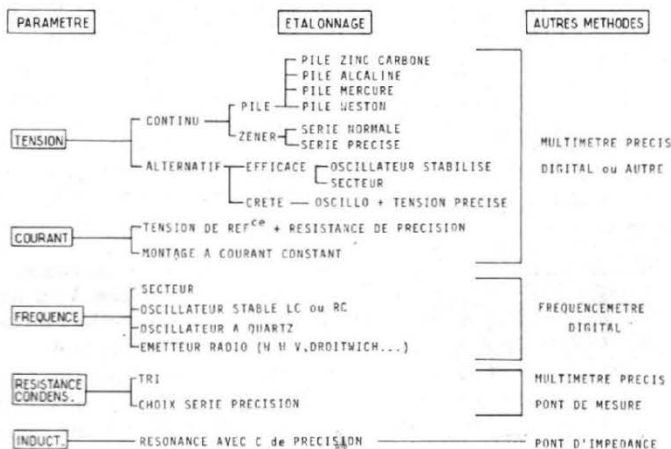


Fig. 1

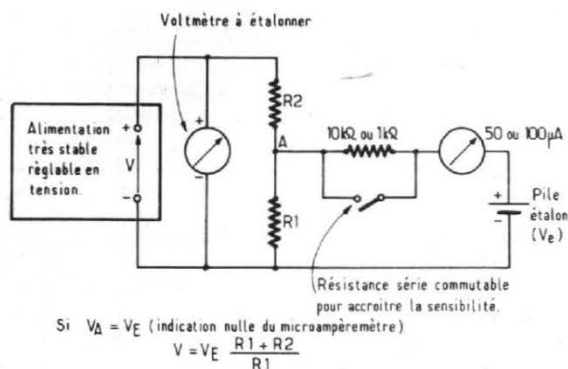


Fig. 2. — Montage à effectuer lorsque la tension de référence doit être supérieure à la tension de la pile étalon.

besoin d'être calibré). On figu-
lera l'équilibre ($V_A = V_E$) en
réglant la tension d'alimentation
pour un courant nul. On aura
alors : $V = V_E (R1 + R2)/R1$.
Ainsi, en utilisant une pile étalon
de 1,345 V, $R1 = 1\ 000\ \Omega$, on
aura $V = 13,45\ V$ avec $R2 = 9\ k\Omega$
et $V = 134,5\ V$ avec $R2 = 90\ k\Omega$.

Cette méthode de comparaison
est celle qui sera retenue pour
l'étalonnage des générateurs.
Dans ce cas, l'appareil à étalonner
est la source de tension continue.
Le diviseur à résistances peut être
remplacé par un potentiomètre
très linéaire à démultiplicateur
(type BOURNS KNOBPOT de
10 k Ω ou 100 k Ω).

LES PILES ÉTALON

Les étalons de tension continue
les plus connus sont constitués
par des piles. On a constaté que le
processus électrochimique produi-
sait, sur une pile **d'un type
donné**, une tension bien détermi-
née; on peut donc se servir de
cette propriété pour avoir une
référence précise. Il existe de
nombreux types de piles : nous
n'en retiendrons que quatre.

Les piles les plus courantes
sont du type carbone-zinc. Les
mesures que nous avons faites
montrent que, **pour une marque
donnée**, il n'existait pas de gran-
des différences entre deux élé-
ments neufs de même modèle.

C'est ainsi que nous avons
obtenu les résultats suivants pour
un courant débité inférieur ou
égal à 100 μA , à 20 °C :

Wonder TOP = 1,55 \pm 0,01 V
Mazda Plus = 1,62 \pm 0,01 V
Hellesens Motor = 1,53 \pm 0,01 V

Bien entendu, ces valeurs ne
sont pas garanties par les cons-
tructeurs. Elles correspondent à
une technologie adoptée à une
époque donnée (janvier 1975), et
en cas de changements impor-
tants dans les méthodes de fabri-
cation et surtout dans le condi-
tionnement de l'électrolyte et du
dépolarisant, il pourrait advenir
que les tensions citées soient
remises en question...

Une meilleure stabilité en fon-
ction du débit peut être obtenue au
moyen de piles alcalino-manga-
nèse. Ces éléments ont en effet
une résistance interne nettement
plus faible et vieillissent moins
vite que les piles carbone-zinc.
Nous avons noté sur des piles
bâton R6 Mazda neuves des ten-
sions de 1,518 \pm 0,03 V.

Une stabilité comparable a pu
être obtenue avec des piles au
mercure analogues à celles que
l'on met dans les appareils photo
pour l'alimentation de la cellule
(Mallory). C'est ainsi que l'on
obtient une tension de 1,345
 \pm 0,005 V.

Toutes ces piles sont suffisantes
pour vérifier l'étalonnage
d'appareils dont la précision
nominale est de 1%. Pour des
appareils plus précis, notamment
pour les voltmètre ou multimètre
digitaux, il faut recourir à une
véritable pile étalon telle que la
pile Weston dont la tension à
20 °C est de 1,0186 V \pm 0,5 \cdot 10⁻⁶.
Mais on peut se douter que cette
pile est assez onéreuse et ne peut
donc être acquise que par les labo-
ratoires spécialisés dans la calibra-
tion.

La conservation des piles éta-
lon doit se faire dans des condi-
tions de température ($\leq 20\ ^\circ C$) et
d'humidité constantes. Pour un
usage de calibration il n'est pas
recommandé d'utiliser les piles
carbone-zinc plus de 6 mois et les
alcalino-manganèse et mercure
plus d'un an. On pourra, toutefois
récupérer les éléments périmés
pour la définition d'une tension
très précise, à d'autres fins telles
que l'alimentation d'un montage
d'essai, d'un récepteur radio,
d'une caméra, etc. On aura donc
intérêt à choisir des modèles récu-
pérables pour ces utilisations et à
s'approvisionner dans un magasin
à grand débit.

On notera que le courant d'utili-
sation d'une pile étalon devra

être réduit au maximum afin de
ne pas modifier la valeur de la
tension. Le courant requis pour
faire dévier un voltmètre de
20 k Ω/V est au maximum de
50 μA ; il ne doit pas être main-
tenu trop longtemps, particulière-
ment sur les piles carbone-zinc.
Si l'on en a la possibilité, on fera
certifier la valeur de la tension de
la pile par une mesure au moyen
d'un voltmètre digital récemment
calibré, peu avant d'utiliser cette
pile pour un étalonnage.

LES DIODES ZENER

Les précautions à prendre pour
une utilisation rationnelle des
piles étalon sont assez contra-
ignantes. On peut se passer de
piles en les remplaçant par une
source de tension stabilisée au
moyen de diodes zener.

Rappelons en rapidement le
principe de fonctionnement.

La figure 3a représente le mon-
tage typique d'une telle régula-
tion de tension. La diode zener
est, comme on le sait une diode
spéciale montée en inverse et par-
courue par un courant i_z .

Si l'on examine la courbe de la
figure 3b, on peut distinguer 3
régions de fonctionnement. Dans
la région A (sens direct), on a une
tension U négative. Le comporte-
ment de la diode est classique et le
courant est (à peu près) propor-
tionnel à la tension. Dans le sens
inverse, la région B fait apparaître
une très faible variation de cour-
ant si la tension U augmente.

Au-delà d'un seuil, variant sui-
vant le type de la diode, on abou-
tit à la région C où le courant i_z
augmente **très rapidement**. C'est
dans cette région (dite d'avalanche)
que l'on fixera le point de fonc-
tionnement, car pour une
variation importante de U ou de
 i_z , la tension V_z variera très peu
et pourra donc être utilisée comme
une référence.

Pour bien montrer l'intérêt de
ce montage, il convient de consi-
dérer deux cas de variations :
celle de la tension U, non stabili-
sée et celle de la charge exté-
rieure.

Dans le premier cas, sans
charge extérieure, on tracera sur
le graphique la droite de pente 1/r
dont les points d'intersection sur
les axes sont U et U/r (voir
figure 3b). Si la tension U ne varie
pas le point de fonctionnement M
sera défini par la tension V_z et le
courant i_z .

Une variation de U entraîne
une translation de la droite et l'on
obtient les ordonnées $U \pm \Delta U$.
La construction géométrique
indique que la variation $\pm \Delta V_z$
correspondante est très réduite.

Dans le second cas, on suppose
U constant et l'on fait varier la
charge extérieure en disposant
une résistance R aux bornes de la
diode zener.

Les schémas de la figure 3c
indiquent l'équivalence à laquelle
on peut faire appel pour résoudre
algébriquement le problème.

Soient V et i la tension de réf-
érence et le courant traversant la
résistance R de façon que $V = Ri$.
Le schéma équivalent du circuit
de la diode zener correspond à
une tension constante V_z en série
avec une résistance interne r_z ,
valeur caractéristique de la diode.

En l'absence de R on a $V = V_z$.
Dans le cas d'une charge R on
aura :

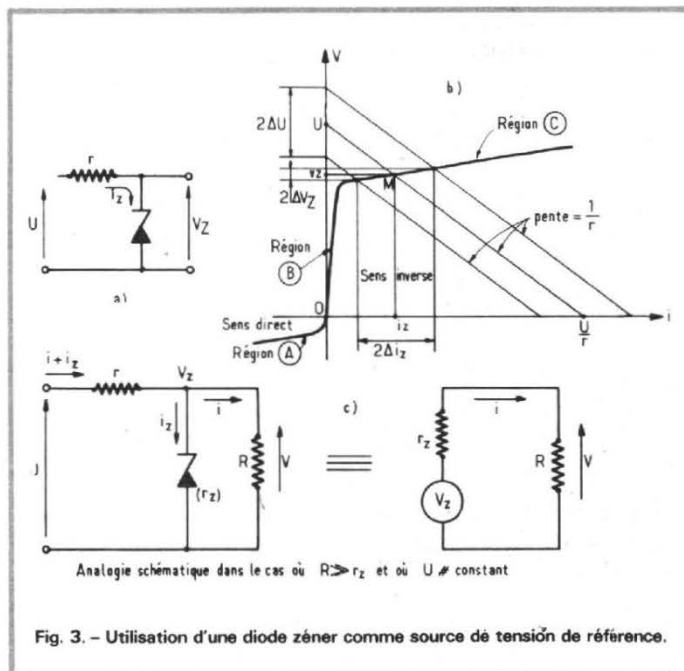
$$V = V_z \frac{R}{R + r_z}$$

$$= V_z \frac{1}{1 + \frac{r_z}{R}}$$

On voit donc que la tension V
différera de la tension V_z d'une
quantité proportionnelle au rap-
port des résistances r_z et R.

D'une façon générale, r_z est
assez faible (de quelques ohms à
100 Ω); R correspondant à la
résistance interne d'un voltmètre
est élevée (plus de 10 k Ω/V) de
sorte que la variation de tension
de référence sera très faible.

Ainsi, par exemple, si $r_z = 20\ \Omega$



et $R = 200 \text{ k}\Omega$ (20 $\text{k}\Omega/\text{V}$ sur sensibilité de 10 V), on aura :

$$\frac{r_z}{R} = 1/1000e$$

$$\text{et } V = V_z - 0,1 \%$$

Les constructeurs de semi-conducteurs offrent un très large choix de diodes zener aux utilisateurs. Les modèles peuvent se classer en deux groupes : les diodes de régulation utilisées le plus souvent dans les alimentations stabilisées et les diodes de référence de tension destinées à fournir une tension très stable en fonction des écarts de température. Si l'on tient compte du fait qu'une diode zener dissipe, en fonctionnement, une puissance égale à $V_z \times i_z$, on appréciera ce dernier avantage.

Une bonne source de référence comportera deux cellules de stabilisation : l'une équipée d'une diode de régulation qui maintiendra sensiblement constante la tension à l'entrée, la seconde faisant appel à une diode plus précise compensée en température.

La figure 4 représente une source de ce type. La tension non régulée de 17 V est obtenue après redressement par pont de diodes, d'une tension de 12 V eff. fournie par un transformateur 220 V/12 V 0,5 A. Un condensateur de 500 μF assure le filtrage. La première cellule comporte une résistance de 150 Ω et une diode BZX 85C12 (Sescosem) de 1,3 W

à 25°C ($V_z = 11,4$ à 12,7 V à 20 mA). La seconde cellule abaisse la tension à 6,2 V. Elle comprend une résistance de 270 Ω et une diode de référence de tension 1N829 (Sescosem, $V_z = 6,2 \text{ V} \pm 5 \%$, $r_z = 15 \Omega$, coefficient de température 0,0005 % par °C). Le fournisseur ne donne pas la tension de référence avec une très grande précision (les séries de haute précision sont plus onéreuses), aussi faudra-t-il mesurer cette valeur au moyen d'un voltmètre digital très précis (0,1 % ou mieux) une fois pour toutes, on inscrira ensuite la tension de référence sur le boîtier de l'appareil... En principe et dans des conditions normales d'utilisation, cette tension restera stable à mieux que 5 mV.

L'un des inconvénients des sources de référence à piles ou à diodes zener est que la valeur de la tension est unique ; par ailleurs, le branchement aux bornes de cette référence d'une charge dont les caractéristiques peuvent être mal connues, peut entraîner des écarts qu'il est difficile de chiffrer.

L'appareil de la figure 5 est prévu pour pallier ces inconvénients. Il comporte une source de tension de référence équipée de 2 diodes 1N829 montées en série (tension stabilisée vers 12,4 V) aux bornes desquelles sont disposés un potentiomètre 10 tours bobiné de précision et une résistance ajustable (bobinée de 5 $\text{k}\Omega$).

La valeur du potentiomètre est exactement de 10 $\text{k}\Omega$. Le courant est réglé par l'ajustable à 1 mA, de sorte que la tension est de 10 V aux bornes du potentiomètre : on réglera cette tension avec un voltmètre très précis.

Si l'on fait varier la position du curseur, on fait apparaître une tension exactement proportionnelle à la résistance comprise entre ce curseur et la masse. Un circuit intégré linéaire $\mu\text{A} 741$ monté en suiveur de tension reçoit cette tension et la transmet fidèlement à la sortie (gain = 1 ± 10^{-4}). Comme la résistance d'entrée est voisine de 10 M Ω , et la résistance de sortie est de quelques dizaines d'ohms, on comprend l'intérêt de ce montage qui permet de faire des calibrations précises sans perturbations sur la source avec une charge de sortie qui peut descendre jusqu'à 1 000 Ω . Le réglage de la tension de sortie de 0 à 10 V se fait en lisant directement le démultipliateur du potentiomètre de précision.

Pour parfaire le fonctionnement de ce montage, on a disposé une alimentation de $\pm 15 \text{ V}$ préalablement stabilisée pour alimenter le circuit intégré et la cellule de référence. On pourrait encore améliorer le système en disposant un inverseur pour obtenir des tensions négatives (0 à -10 V) à partir de la tension de -15 V ; il est nécessaire, dans ce cas,

d'inverser également le sens des diodes.

LES TENSIONS ALTERNATIVES

Les appareils mesureurs ou générateurs de tension alternative sont plutôt répandus dans le domaine des audiofréquences et un peu au-delà. On ne traitera pas le cas d'appareils faisant appel à des fréquences supérieures à 100 kHz.

La constitution d'un standard de tension alternative peut s'imaginer à partir de la tension du secteur préalablement stabilisée par un dispositif à fer saturé, et débarrassée de ses harmoniques et perturbations par un filtrage soigné. La précision obtenue peut difficilement dépasser 1 %, ce qui est tout de même fort honorable. Nous estimons toutefois qu'il est assez onéreux et encombrant de constituer un banc de calibration de ce type et nous préconisons plutôt l'utilisation d'un oscillateur à tension de sortie stabilisée, d'autant que l'on peut constituer, du même coup, une référence de fréquence.

Nous renvoyons le lecteur aux descriptions que nous avons faites de générateurs stabilisés BF à pont de Wien, comme le générateur à 5 fréquences (H.P. N° 1482, p. 224), l'oscillateur expérimental (N° 1486, p. 187) et le générateur

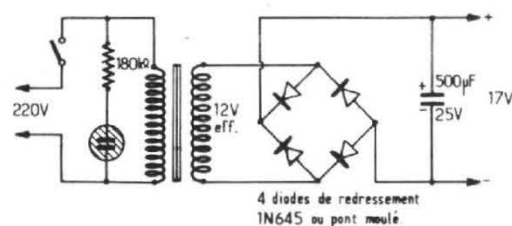
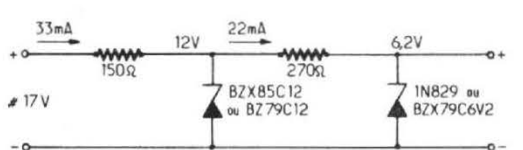


Fig. 4. - Source de tension de référence à double cellule zener.

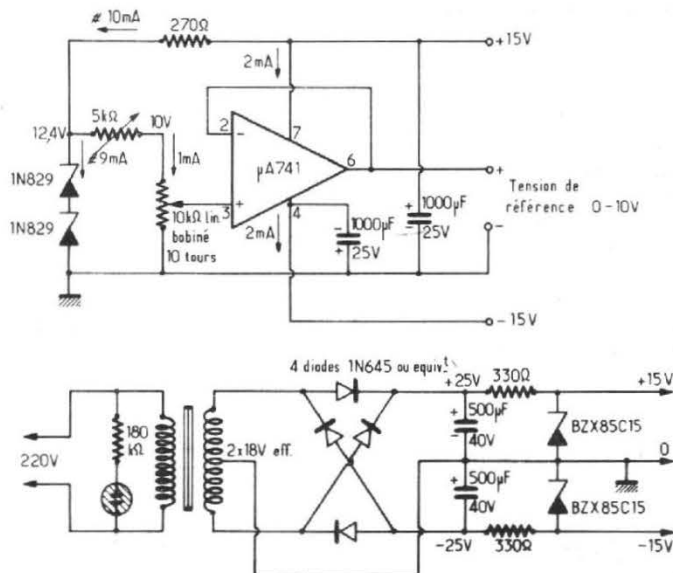


Fig. 5. - Source de tension de référence réglable entre 0 et 10 V à faible résistance de sortie.

BF (N° 1486 p. 189 et la suite). La stabilité que l'on peut espérer sur la tension fournie par ces montages est meilleure que 10^{-3} , surtout si l'on stabilise la ou les tensions d'alimentation.

On peut régler la tension de la source de référence à une valeur préalablement choisie. Pour obtenir un bon étalonnage de cette valeur, la meilleure solution consiste à la mesurer au moyen d'un oscilloscope étalonné en courant continu en déviation verticale (il est évidemment nécessaire d'utiliser un appareil passant le continu), ou d'un voltmètre alternatif précis ce qui n'est pas facile à obtenir.

Pour la méthode oscilloscopique, on rappellera que la tension efficace d'un signal sinusoïdal est liée à sa tension crête à crête par la relation :

$$V_{\text{eff.}} = \frac{V_{\text{crête à crête}}}{2\sqrt{2}}$$

$$= 0,3536 V_{\text{crête à crête}}$$

On ne peut guère espérer, par ces méthodes obtenir mieux que 2% sur la valeur efficace. Comme pour le continu, des précisions supérieures seront obtenues en employant des voltmètres alternatifs digitaux.

La valeur crête d'une tension de forme quelconque (triangulaire, carrée, à impulsions, etc.) se mesure avec un oscilloscope étalonné en continu. La précision sera de 3 à 5%.

LES COURANTS CONTINUS OU ALTERNATIFS

L'étalonnage des mesureurs de courant peut se faire de plusieurs façons. Le plus simple est de disposer, en série, l'appareil à étalonner et l'appareil de référence dans un circuit alimenté par une source stable débitant sur une charge de valeur constante. Nous n'insistons pas sur cette méthode assez évidente.

Une autre méthode consiste à faire circuler le courant à mesurer dans une résistance étalon et de

mesurer la tension aux bornes de la résistance au moyen d'un voltmètre précis à grande résistance interne. C'est une simple application de la loi d'Ohm $V = RI$ d'où $I = V/R$.

Ces méthodes s'appliquent indifféremment aux courants continus et alternatifs à basse fréquence.

Les précisions sont liées à celles des appareils de référence. Nous préférons la première méthode surtout pour les courants faibles car la stabilité et la précision d'un microampèremètre ou d'un milliampèremètre sont en général meilleures que celles d'un voltmètre.

On peut aussi faire circuler un courant programmé à partir d'un générateur à courant constant. Cette méthode assez précise, nécessite un équipement onéreux et n'est citée que pour mémoire.

L'utilisation d'instruments digitaux facilite grandement les opérations d'étalonnage.

LES FRÉQUENCES

Les fréquences des signaux utilisés par l'amateur électronicien vont de quelques Hertz à plusieurs centaines de MHz. En conséquence, suivant la valeur de la fréquence, les méthodes à utiliser peuvent être fort différentes. Nous ne prétendons pas donner toutes celles qu'il est possible d'utiliser mais les plus faciles à mettre en œuvre, pour couvrir les cas les plus courants.

Il existe deux façons de procéder : ou bien mesurer la fréquence par un compteur digital, toujours très précis mais onéreux, ou bien générer soi-même une source de référence que l'on comparera à la source à étalonner (méthode des battements). Comme la première méthode est assez évidente, nous n'insisterons pas sur sa mise en œuvre et nous ne nous attacherons qu'à la seconde, beaucoup plus à la portée des amateurs.

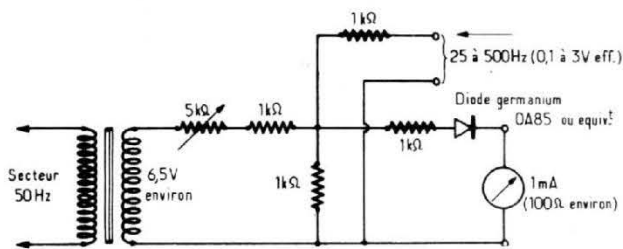


Fig. 6. - Dispositif d'étalonnage en fréquence utilisant le secteur 50 Hz.

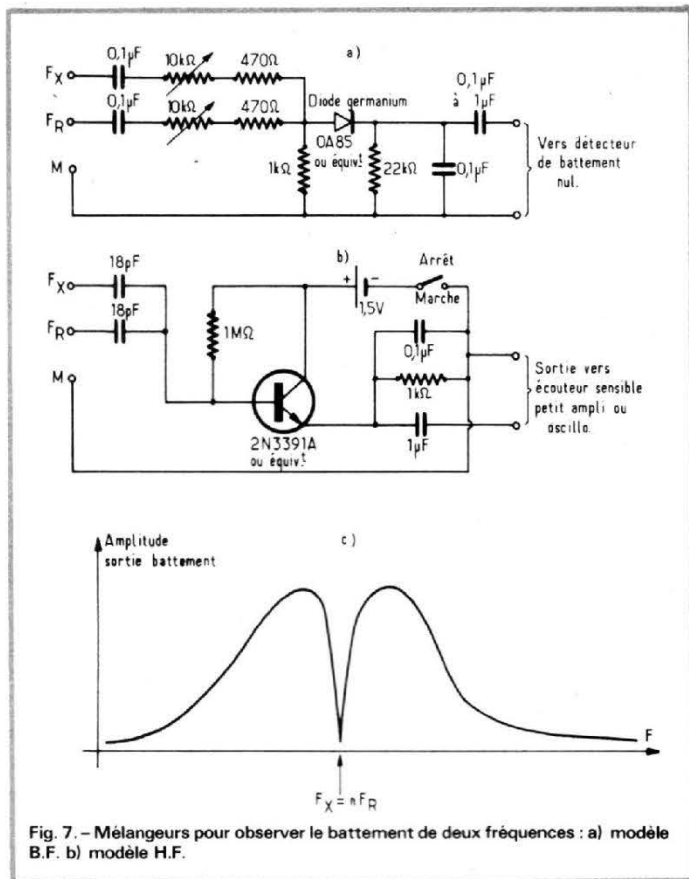


Fig. 7. - Mélangeurs pour observer le battement de deux fréquences : a) modèle B.F. b) modèle H.F.

UTILISATION DU SECTEUR

La fréquence du réseau de distribution d'énergie électrique est assez stable et peut servir de référence pour l'étalonnage d'un générateur BF par exemple.

A l'occasion de la description d'un générateur BF, nous avons indiqué une méthode d'étalonnage du cadran de cet appareil en utilisant le secteur (voir le H.P. N° 1486, p. 186 et 187). Nous en rappelons le principe sur le schéma de la figure 6.

On utilise un petit transformateur fournissant une tension voisine de 6,5 V eff. au secondaire. On réalise un mélange de cette tension avec celle qui provient de la source à étalonner (0,1 à 3 V eff. entre 25 et 500 Hz). Chaque fois qu'une relation harmonique est établie entre le secteur et la source, l'appareil de mesure indique un battement très caractéristique. L'article cité indique également le moyen d'élargir l'étalonnage aux autres gammes. Le lecteur intéressé pourra s'y reporter.

L'utilisation d'un générateur stable RC ou LC préalablement

étalonné permet, par comparaison, d'établir un battement que l'on peut déceler à l'oscilloscope ou au son. C'est ainsi que nous avons représenté sur la figure 7 des dispositifs mélangeurs autorisant cette performance.

En 7a, le système comporte un mélange passif sur une résistance de 1 kΩ, suivi d'une détection et d'un filtrage sommaire. On obtient avec ce montage un excellent fonctionnement jusqu'à plus de 1 MHz.

Le dispositif de mélange à transistor de la figure 7b est destiné aux fréquences plus élevées. On pourra l'utiliser jusqu'aux VHF. Il est recommandé de faire suivre le montage d'un petit amplificateur BF pour alimenter un casque.

L'allure de la tension de battement est représentée sur la figure 7c. L'amplitude croît très sensiblement lorsqu'on se rapproche du battement nul, pour s'annuler brusquement à la valeur exacte de ce battement.

Citons également la méthode bien connue de l'observation des figures de Lissajous obtenues sur l'écran d'un oscilloscope, qui fait apparaître des cercles, ellipses ou figures plus complexes lorsqu'une relation harmonique

existe entre les signaux envoyés sur les plaques horizontales et verticales.

La méthode oscilloscopique est précise et non ambiguë lorsque les signaux sont dans une relation harmonique d'ordre 1,2 ou 3. Elle devient difficile à exploiter au-delà et pour des fréquences élevées (> 100 kHz).

La construction d'un oscillateur de référence stable en fréquence entre 100 kHz et 10 MHz est assez facile en faisant appel à un quartz. Des oscillateurs de ce type ont été souvent décrits dans la presse spécialisée. Ils sont simples à réaliser, donnant une précision remarquable et ont une dérive négligeable. Nous en citons trois exemples sur la figure 8.

En 8a, on réalise un oscillateur à 100 kHz au moyen d'un FET alimenté par une pile de 4,5 V. Le prélèvement du signal s'effectue par un petit transformateur driver récupéré sur un récepteur à transistors. Le primaire sert d'inductance de charge pour le FET, le secondaire abaisse l'impédance et isole le circuit d'utilisation.

Le montage 8b utilise deux transistors montés en cascade. Le premier est du type base à la masse et le second émetteur follower. Le quartz de 100 kHz et sa capacité d'ajustement en série sont placés entre les émetteurs. Pour un fonctionnement correct, riche en harmoniques, il est nécessaire que les transistors aient un gain élevé. L'alimentation est, comme dans le cas précédent, assurée par une pile de 4,5 V ou 6 V et la sortie s'opère sur l'émetteur du second transistor à travers un condensateur de 10 nF.

Le troisième montage en 8c est très classique. Il n'utilise qu'un seul transistor dont la base et l'émetteur sont couplés par l'intermédiaire d'un diviseur capacitif. Le quartz est disposé entre base et masse. Le collecteur est réuni à la tension d'alimentation. Ce montage convient particulièrement bien aux oscillateurs à fréquence élevée (plus de 1 MHz). La seule précaution à prendre est de diminuer les valeurs des condensateurs du diviseur si l'on augmente la fréquence (le rapport des capacités doit être conservé).

Les oscillateurs à quartz donnent des précisions qui atteignent facilement 10^{-5} ou 10^{-6} , sans stabilisation de température. Au-delà,

il est nécessaire de disposer le cristal dans une enceinte thermostatée pour atteindre 10^{-7} et mieux.

Si l'on dispose d'un bon récepteur de radiodiffusion, on peut assez facilement réaliser un étalonnage d'oscillateur LC ou caler un oscillateur à quartz par comparaison, en réalisant un battement avec un émetteur de fréquence connue. Le plus utilisé est l'émetteur britannique de Droitwich, sur les grandes ondes, qui fonctionne sur $200 \text{ kHz} \pm 10^{-10}$. La précision remarquable de cet émetteur et le fait que sa fréquence porteuse soit une fréquence « ronde » le rendent très utile aux laboratoires européens qui disposent d'un récepteur accordé sur cette fréquence. Il existe également des fréquences étalon de valeur plus élevée (5, 10, 15 MHz...) envoyées par les émetteurs américains WWV qui ne peuvent être reçues que par des récepteurs professionnels.

Plus simplement, l'amateur pourra réaliser un battement

entre un oscillateur et un récepteur en approchant simplement le premier du second et à la condition que la fréquence de l'oscillateur soit voisine de celle d'un émetteur connu sur laquelle est accordé le récepteur. Un S-mètre favorise grandement le réglage fin au battement nul.

Avec un peu d'adresse cette dernière méthode est valable jusqu'aux VHF. La seule précaution à prendre est d'éviter de confondre le battement direct avec l'image de l'émission disposée de la valeur de la fréquence intermédiaire (ou de deux fois cette valeur). Il est donc nécessaire de savoir si l'oscillateur local est au-dessus ou en-dessous de l'émission.

LES COMPOSANTS PASSIFS

On classe dans cette catégorie les résistances, les condensateurs et les inductances de précision.

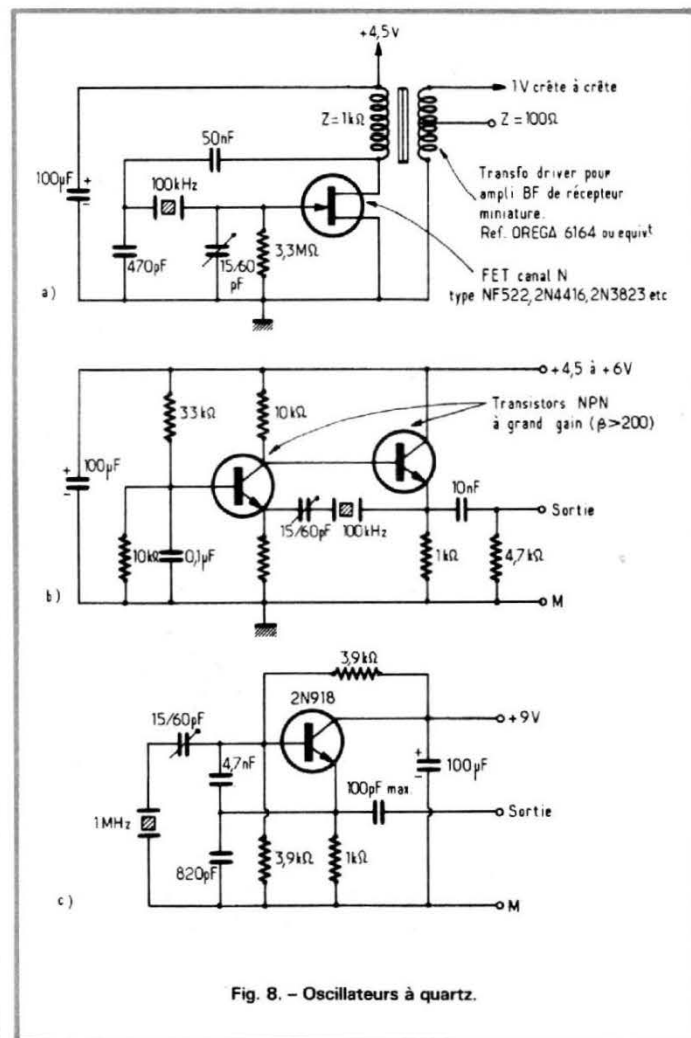


Fig. 8. - Oscillateurs à quartz.

Ces éléments sont plutôt des accessoires d'autres appareils et sont utilisés comme tels à l'occasion de mesures ou de calibrations.

Ce sont des éléments fixes qui ne peuvent être ajustés, mais il sera bon de vérifier périodiquement leur valeur afin de profiter au mieux de leur utilisation.

Les résistances à couche métallique sont les seuls éléments susceptibles de conserver leur valeur dans le temps. Il sera bon de disposer d'un jeu de ces résistances de valeurs déterminées par exemple 10, 100, 1 000 ohms, 10, 100 kΩ, 1 MΩ à 0,5 % ou mieux à 0,1 %. La possession d'un potentiomètre de précision 10 tours et de son démultiplicateur est souhaitable. On choisira une valeur de 1 000 ohms ou 10 kΩ.

Certains amateurs, cependant, n'ont pas les moyens d'acquérir des éléments de précision. Ils se contenteront de valeurs choisies dans la série 1 % qui est tout de même très accessible. Ils pourront, s'ils en ont la possibilité, trier les valeurs les plus précises d'un lot, au moyen d'un pont de Wheatstone ou d'un ohmmètre précis. L'utilisation d'un ohmmètre à aiguille ne permet guère de descendre en dessous de 2 %.

Nous conseillons vivement de réunir les éléments précis dans des boîtes de résistances spéciales telles que celles que nous avons décrites dans le H.P. (N° 1454, p. 232 et la suite) avec des bornes de branchement évitant l'inconvénient de la soudure pour l'utilisation.

Les conducteurs seront choisis dans une série à 1 %. Il est difficile de définir un assortiment idéal de valeurs. Il est sans doute suffisant de se limiter à une gamme comprise entre 100 pF et 100 000 pF.

Là aussi la disposition des composants en boîte avec commutation des valeurs est préconisée. Le contrôle de la valeur ne peut être effectué qu'au moyen d'un pont de mesure précis genre pont de Sauty.

Pour les inductances il n'est pas nécessaire d'en posséder une grande quantité car leur utilisation n'est pas fréquente. Il serait cependant utile de disposer d'un groupe de 4 valeurs soit : 100 μH (sur mandrin à air), 1 mH, 10 mH, 100 mH sur pots ferrite.

Il sort du cadre de cet article de donner des indications sur la

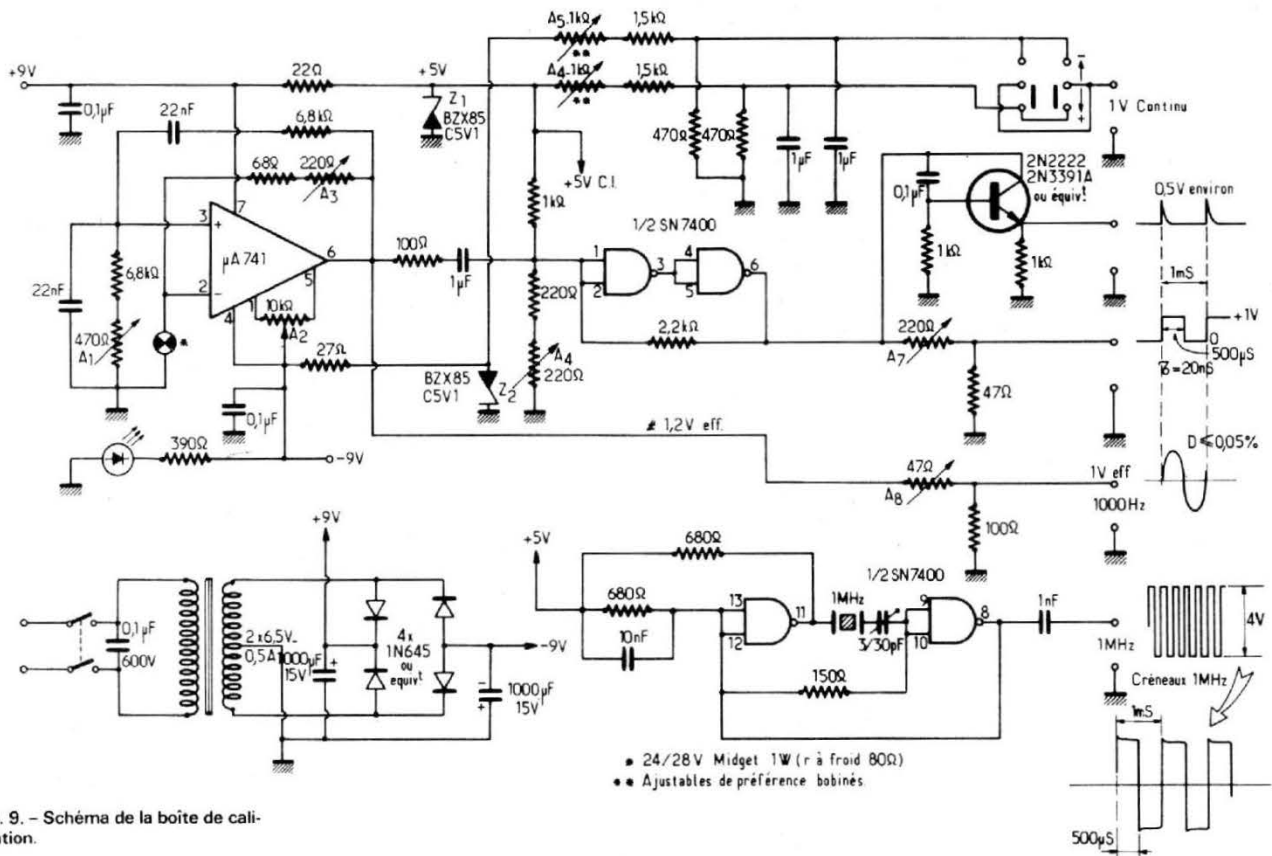


Fig. 9. - Schéma de la boîte de calibration.

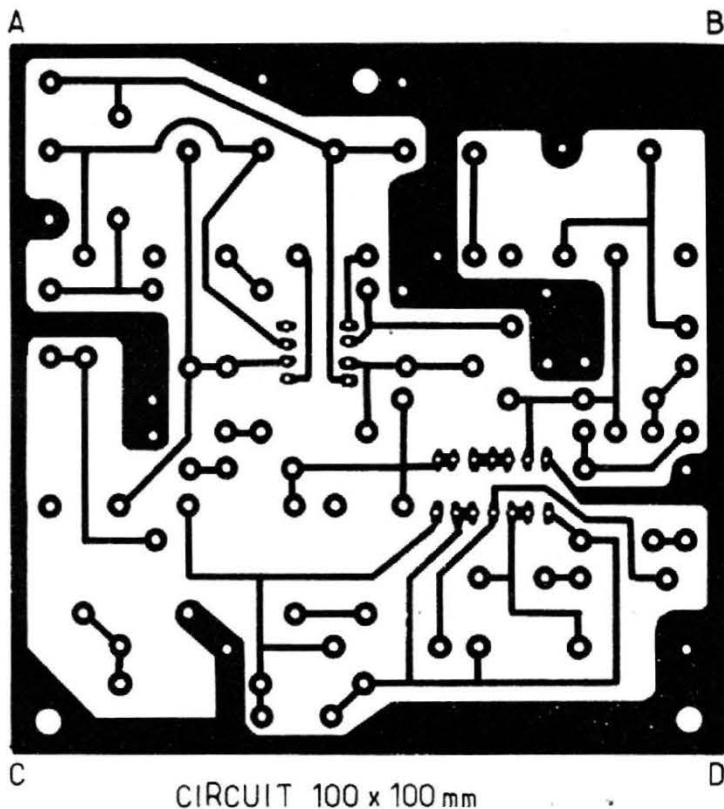


Fig. 10. - Carte imprimée côté cuivre.

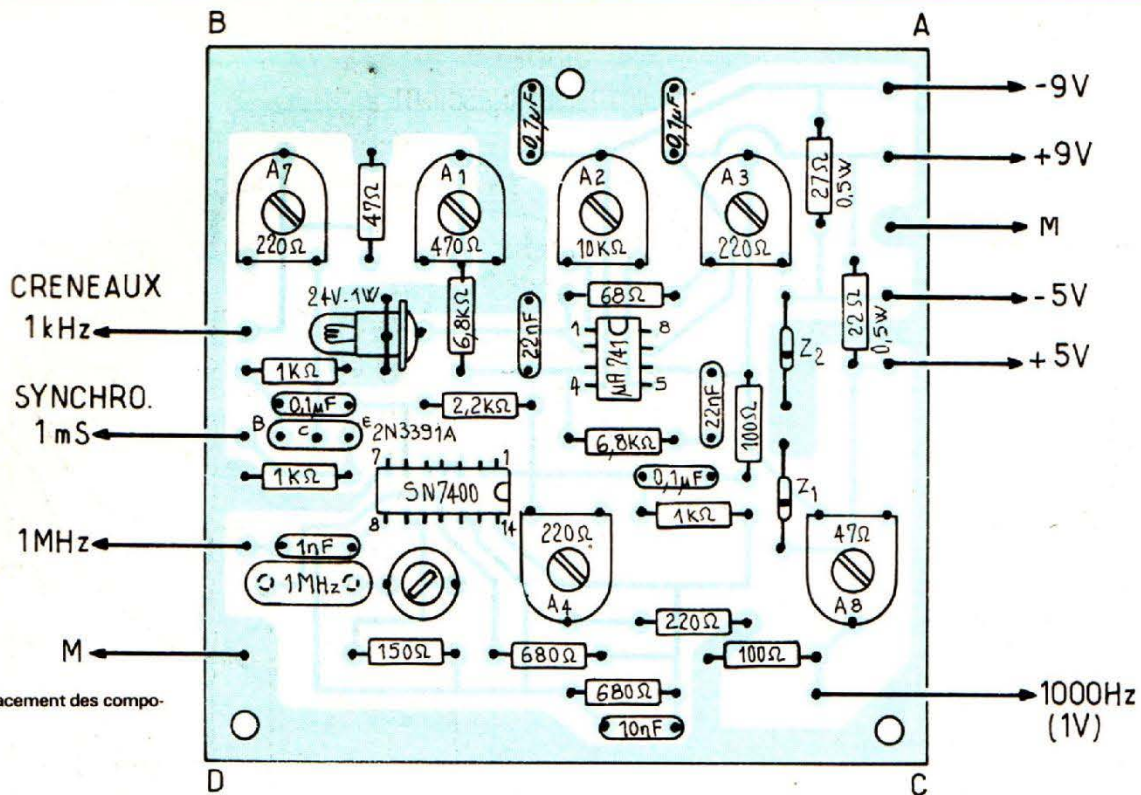


Fig. 11. - Emplacement des composants.

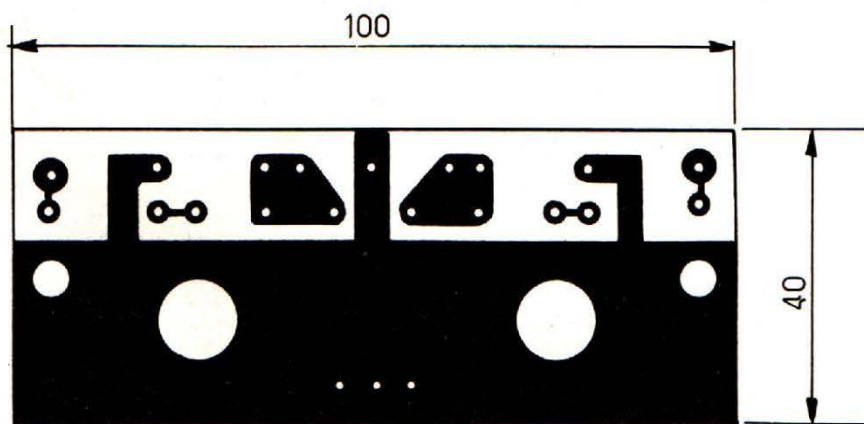
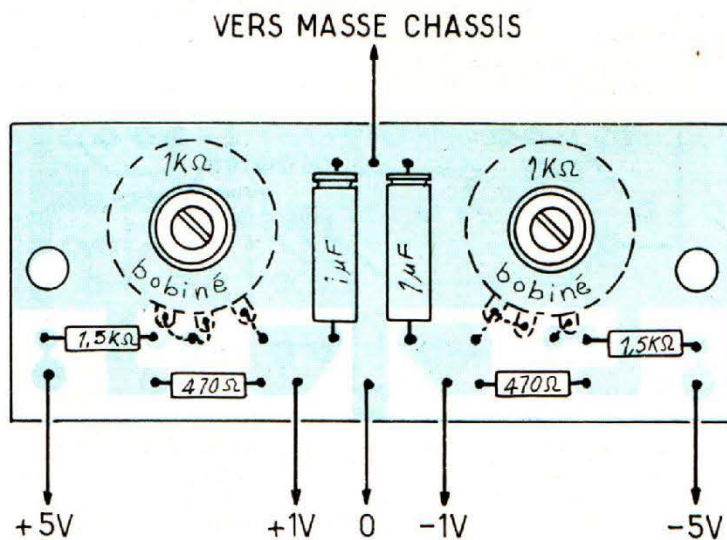


Fig. 12. - Plaque support des potentiomètres d'ajustement des tensions continues.



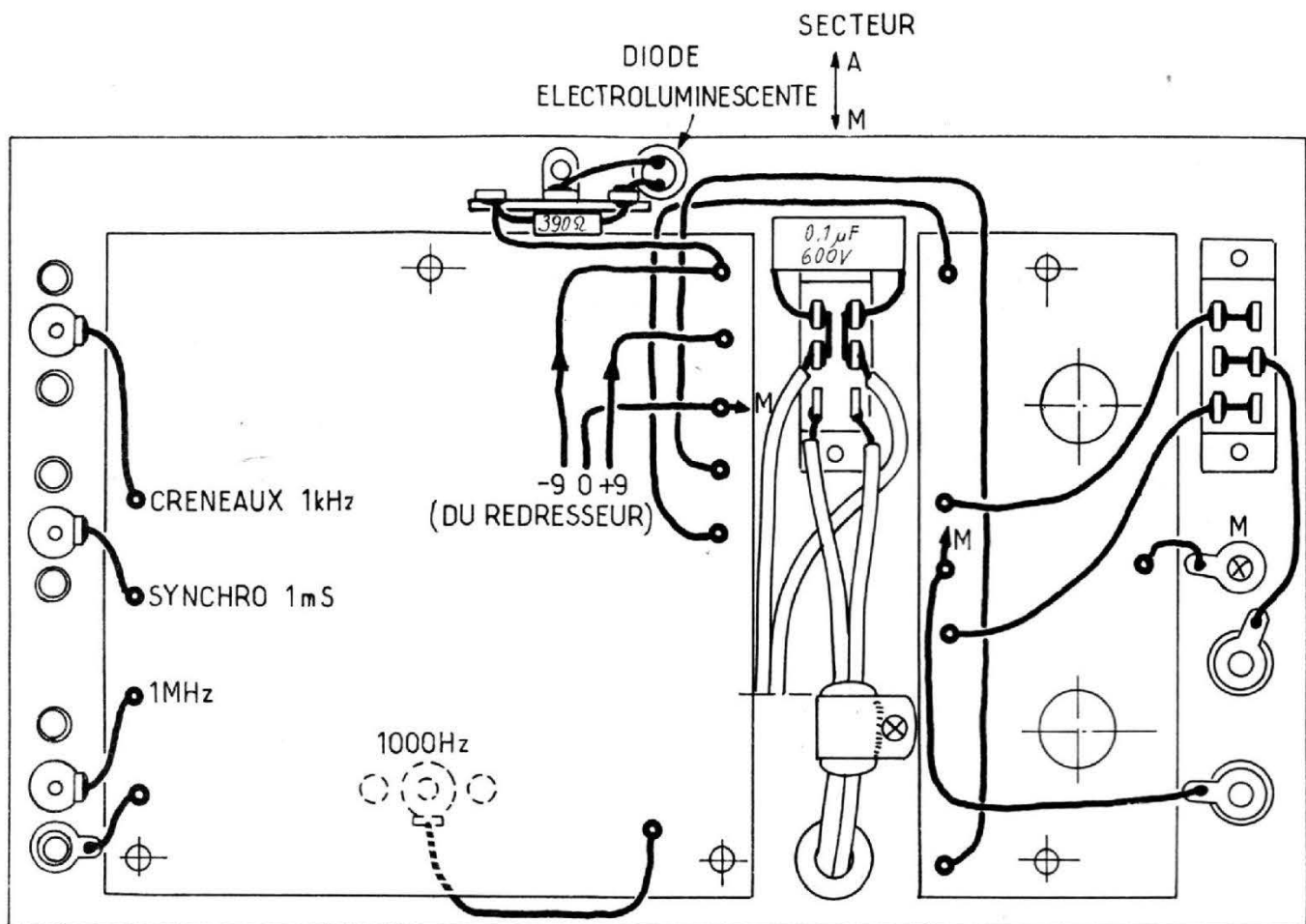


Fig. 13. - Câblage du coffret.

façon de réaliser des inductances. Si l'on n'a pas déjà fait ce genre de travail sur des éléments standard, il est inutile de tenter de réaliser des éléments de précision ayant une faible capacité répartie.

La mesure des inductances se fera, de préférence, au pont d'impédance à une fréquence aussi basse que possible, ou éventuellement en utilisant un générateur et un condensateur étalon. A la résonance la valeur de l'inductance sera :

$$L \text{ (en mH)} = \frac{253.10^2}{f^2 \text{ (en kHz)} \times C \text{ (en nF)}}$$

On prendra la précaution de coupler le générateur au circuit résonnant avec le condensateur le plus faible possible (le 1/50^e ou le 1/100^e de la valeur du condensateur étalon) et l'on mesurera la résonance avec un voltmètre alternatif à haute impédance d'entrée, à travers 100 kΩ en série.

UNE BOITE DE CALIBRATION « UNIVERSELLE »

On peut réunir dans un même coffret les principales références dont on a besoin pour assurer les vérifications périodiques d'appareils courants tels que multimètres, oscilloscopes, générateurs HF et BF, distorsionmètres...

Le schéma de la boîte de calibration que nous proposons aux lecteurs est représenté sur la figure 9.

Le circuit intégré $\mu A741$ est monté en oscillateur BF à tension et fréquence stabilisées. C'est l'un des générateurs à pont de Wien que nous avons déjà décrit. Le circuit RC série (6,8 kΩ, 22 nF) est monté entre la sortie et l'entrée (+). Celle-ci est reliée à la masse par 6,8 kΩ et 470 Ω (ajustable) avec 22 nF en parallèle, ce qui procure une réaction positive. La contre-réaction, assurée par

220 Ω (ajustable) en série avec 68 Ω entre la sortie et l'entrée (-) est automatiquement réglée par l'ampoule 24 V, 1 W de façon à se situer à la limite de l'accrochage. A ce point de fonctionnement correspond une tension de sortie de 1,2 V eff. et une distorsion très faible du signal (valeur typique 0,05 %).

Le potentiomètre de 10 kΩ assure l'équilibrage en continu (tension continue nulle sur la sortie 6 du circuit).

La sortie est réunie à un atténuateur ajustable A8 (100 ohms) qui permet d'obtenir exactement 1 V eff. à 1 000 Hz (réglage de fréquence par A1).

La tension d'oscillation à 1 kHz est envoyée sur une bascule de Schmitt (1/2 circuit intégré SN 7400) à travers une résistance et un condensateur d'isolement. La sortie est un créneau dont la symétrie peut être ajustée par A4.

Un dispositif à transistor permet de générer une synchronisation de 1 ms pour un usage exté-

rieur (oscilloscope). Le fonctionnement est le suivant le créneau de sortie est appliqué en positif sur le collecteur du transistor et en même temps est dérivé sur sa base, ce qui permet de retrouver une impulsion courte sur son émetteur. L'impulsion dérivée négative correspondant au retour du créneau est automatiquement éliminée par la coupure de l'alimentation collecteur et surtout la polarisation inverse de la jonction base-émetteur.

L'autre partie du circuit intégré SN 7400 est montée en oscillateur à quartz de 1 MHz dont la fréquence, très précise, peut être ajustée par le condensateur 3-30 pF, en utilisant un fréquence-mètre digital ou le battement avec un émetteur radio.

L'alimentation de l'appareil comprend un transformateur de 2 x 6,5 V eff. (0,5 A) à point milieu, un redresseur en pont fournissant les tensions symétriques de ± 9 V et un filtrage par deux condensateurs de 1 000 μF.

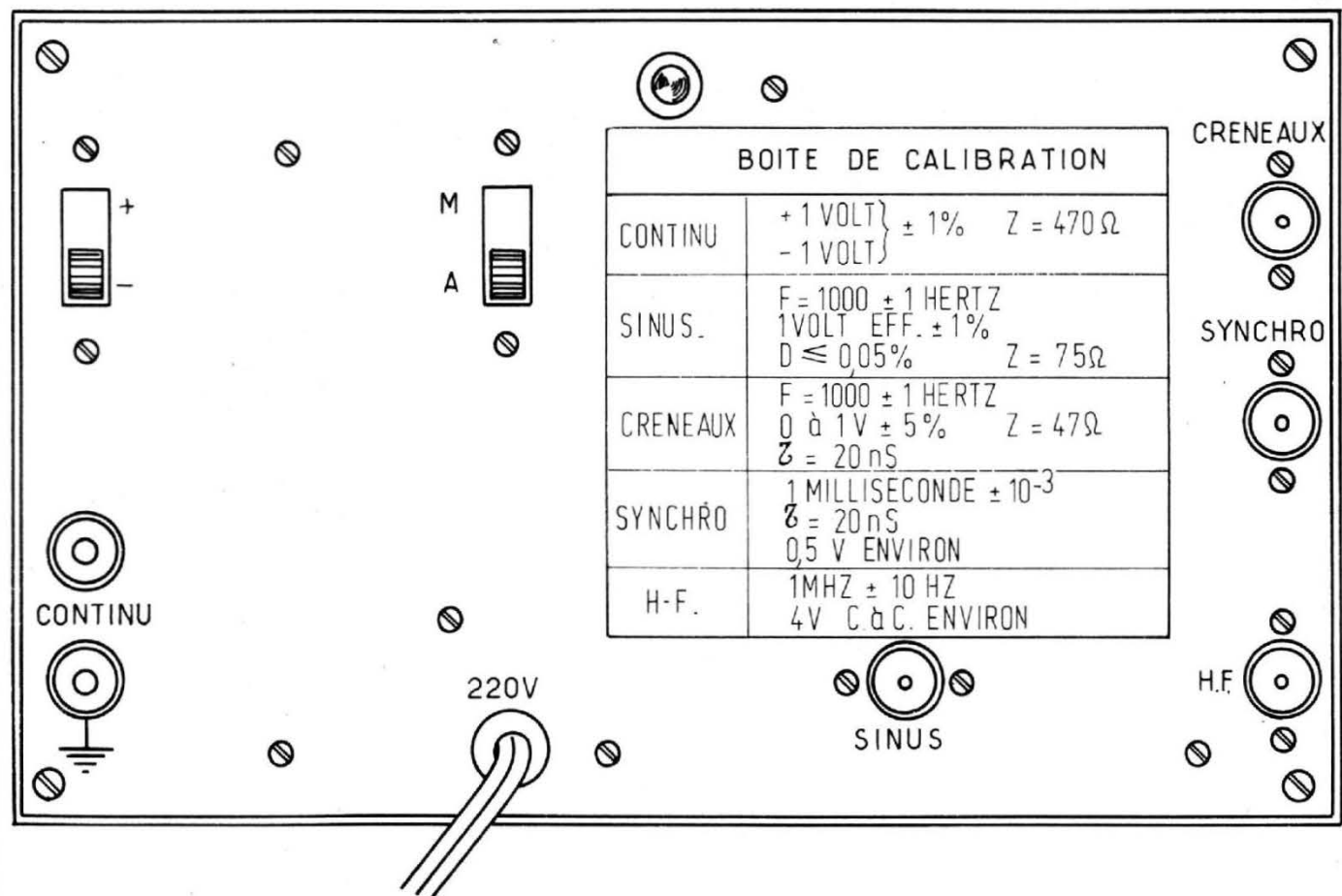


Fig. 14. - Face avant de la boîte de calibration.

Le circuit intégré linéaire utilise ces tensions symétriques pour son fonctionnement.

On utilise deux diodes zener pour obtenir des tensions de ± 5 V. La tension + 5 V alimente le SN 7400. Les deux tensions + et - 5 V sont utilisées pour obtenir une tension continue de + ou - 1 V exactement au moyen d'atténuateurs ajustables. Les condensateurs de $1 \mu\text{F}$ en parallèle sur les résistances de 470Ω sont destinés à éliminer les résidus de HF ou de BF. Un inverseur permet de choisir la polarité de la tension continue.

On trouvera sur les figures 10 à 14 tous les détails permettant la construction de cet appareil.

Le tableau ci-contre résume les différents réglages qu'il convient d'exécuter.

(*) au besoin, changer la valeur de $6,8 \text{ k}\Omega$ en série pour obtenir un réglage bien centré sur A1.

Les principales applications de cet appareil sont :

tensions continues : vérification

RÉFÉ-RENCE	VALEUR	ORIGINE	OPÉRATION
A1	470Ω	R.T.C.réf.411033 (AD)	Réglage de la fréquence à $1 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ (*)
A2	$10 \text{ k}\Omega$	R.T.C.réf.411033 (AD)	Réglage d'annulation de la tension continue en sortie 1000 Hz
A3	220Ω	R.T.C.réf.411033 (AD)	Réglage de l'amplitude de l'oscillateur ($1,2 \text{ Veff. en 6}$)
A4	220Ω	R.T.C.réf.411033 (AD)	Réglage de la symétrie du créneau de 1 kHz
A5 et A6	$1 \text{ k}\Omega$	minibob M.C.B.	Réglage des tensions continues à +1 V et -1 V
A7	220Ω	R.T.C.réf.411033 (AD)	Réglage de l'amplitude du créneau 1 kHz à +1 V
A8	47Ω	R.T.C.réf.411033 (AD)	Réglage de l'amplitude du signal sinus. à 1 V eff.
C ajustable	3 à 30 pF	R.T.C. ou équivalent	Réglage de la fréquence de l'oscillateur 1 MHz

de l'étalonnage des voltmètres et oscilloscopes passant le continu, éventuellement des microampèremètres et milliampèremètres.

tension sinusoïdale 1 kHz : vérification des générateurs BF (tension et fréquence), des voltmètres alternatifs, des distorsiomètres.

créneaux 1 kHz : étalonnage de la base de temps des oscilloscopes et de leur calibration verticale, examen de la réponse impulsionnelle des circuits, réglage des sondes d'oscilloscope (à compensation), contrôle sur ampli Hi-Fi.

synchro : réglage de la base de temps (1 ms) des oscilloscopes, synchronisation pour l'examen de phénomènes liés aux créneaux ou à la tension sinus de l'appareil.

H.F. 1 MHz : source de 1 MHz précise à utiliser pour la calibration des générateurs HF (nombreux harmoniques), réglage de la base de temps (500 ns ou $1 \mu\text{s}$) des oscilloscopes.

(à suivre)

J.C.