

La mesure à l'aide d'un multimètre

par Patrick NÉEL et Marc PARENTI,
Lycée Thiers, Marseille.

La question que nous nous sommes posée est simple : que mesure-t-on lorsque nous branchons un multimètre dans un circuit ? Nous avons essayé d'y apporter une réponse ; pour cela, nous avons choisi de faire cette étude à partir de 5 appareils dont 4 nous ont été fournis par le centre d'équipement. Nous pensons donc qu'ils équipent la plupart des collections de lycées ; ces appareils sont :

- un voltmètre magnétoélectrique PEKLY,
- un multimètre CDA 25,
- un multimètre électronique PHILIPS 2503,
- un multimètre digital METRIX MX 708,
- un oscilloscope SCHLUMBERGER,

I. LES PARAMETRES

Plusieurs paramètres vont entrer en jeu dans cette étude et il est nécessaire de faire quelques rappels.

A) TOUT D'ABORD, LA CLASSE D'UN APPAREIL.

Sans entrer dans le détail, disons qu'elle est donnée en général à 20°C, l'appareil en position d'utilisation, en l'absence d'influences extérieures (sauf le champ magnétique terrestre et le champ de pesanteur, d'où la position d'utilisation). Pour les appareils de classe 1.5 ou 2.5 que nous utilisons au bout d'une heure d'utilisation, le signal étant sinusoïdal, donnons la définition : « cent fois le quotient de l'erreur absolue de la déviation par la grandeur à mesurer S_{max} correspondant au maximum de l'étendue de mesure de l'appareil ».

Remarque.

La notion de classe n'a aucun sens pour les appareils digitaux ; pour plus de détails, il sera utile de se référer aux articles « les multimètres à affichages numériques » de Charles ANDRÉ ainsi que « la mesure numérique » de la société CHAUVIN-ARNOUX, parus tous deux au B.U.P. n° 562 de février 1974.

PEKLY : classe 2 ; CDA 25 : 2 ; PHILIPS 2503 : 3 ; METRIX :
0.3 % lecture - 0.2 % calibre ; OSCILLO : 5 %.

Exemple de calcul d'erreur sur le digital.

CALIBRE : 2 V

MESURE (par exemple) : 1.5 V

ERREUR	LECTURE	CALIBRE	TOTALE
	1.5 0.3	2 0.2	
	$\frac{\quad}{100}$	$+$ $\frac{\quad}{100}$	$= 8 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

B) RESISTANCE INTERNE (consommation).

Exprimée en Ω/V (exemple : 1 000 Ω/V , calibre 3 V, donnent une résistance interne de 300 Ω) pour les voltmètres, en chute de tension pour les ampèremètres (exemple : chute de tension :

0,3 V, calibre : 100 mA, résistance interne : $\frac{0.3}{0.1} = 3 \text{ ohms}$, par-

fois en voltampères pour les appareils de forte consommation. Ce paramètre sera étudié plus en détail dans la suite de cet article à l'aide d'une manipulation.

PEKLY : 1 000 Ω/V ; CDA 25 : 20 k Ω/V ; PHILIPS 2503 : calibre 3 V : 10 M Ω ; 55 pF - autres : 20 M Ω ; 30 pF; METRIX : 10 M Ω ; 100 pF; OSCILLOSCOPE : 1 M Ω ; 35 pF.

Remarque.

Sur la plupart des appareils électroniques, l'impédance d'entrée ne dépend pas du calibre; sauf sur certains modèles et à certains calibres faibles où le signal ne passe pas par l'atténuateur d'entrée.

C) AMORTISSEMENT.

Dû à des frottements fluides (air...) et surtout sur les ampèremètres aux courants induits dans le support, il peut être péri-

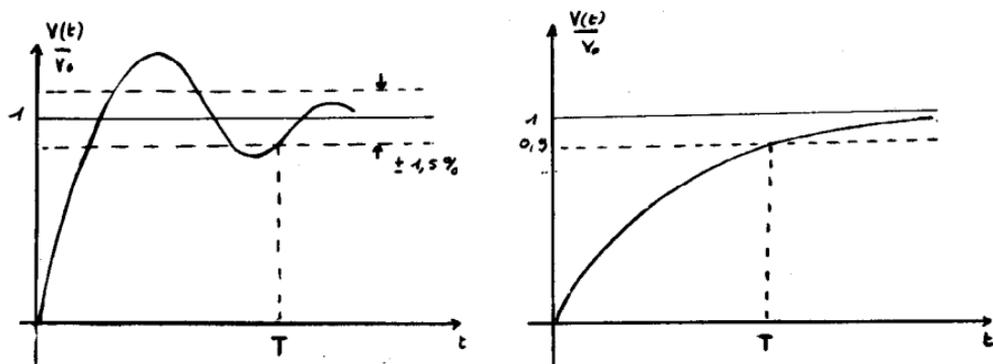


Schéma 1

dique amorti ou apériodique. Ce qui importe est le temps d'amortissement ou « temps de prise de point ». Une des conséquences est que, du temps de prise de point dépend la classe de l'appareil. Nous ne développerons pas ce problème.

D) BANDE PASSANTE.

C'est le domaine de fréquence à l'intérieur duquel les indications de l'appareil restent valables (dans le domaine défini par la classe de l'appareil). Domaine que nous allons étudier plus en détails ; c'est dans ce domaine en effet que l'on peut se poser le plus de questions sur ce que l'on mesure réellement.

PEKLY : 16-1 000 Hz ; CDA 25 : 0 à 50 V : 20 Hz - 50 KHz ; 150 V : 20 Hz - 10 KHz ; PHILIPS : 10 Hz - 30 KHz à 3 % ; 30 KHz - 50 KHz à 5 % ; METRIX 708 : 40 Hz - 20 KHz ; OSCILLOSCOPE SCHLUMBERGER : 5 s/div à 10 ms/div - bande passante à -3 dB : 0-500 KHz.

Formulaire mathématique.

VALEUR MOYENNE :

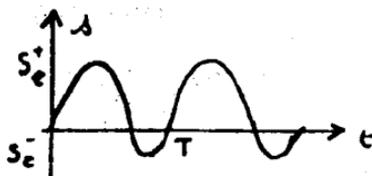
$$S_m = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt$$

VALEUR EFFICACE :

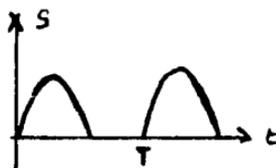
$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt}$$

VALEUR CRÊTE A CRÊTE :

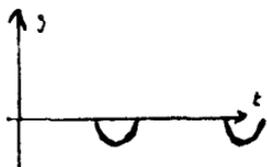
$$S_{cc} = S_{c^+} - S_{c^-}$$



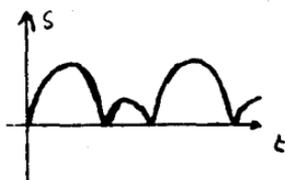
SIGNAL REDRESSÉ :



$$S_{m^+} = \frac{1}{T} \int_0^T s^+(t) dt$$



$$S_{m^-} = \frac{1}{T} \int_0^T s^-(t) dt$$



$$S_{m_{red}} = S_{m^+} - S_{m^-} = \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)| dt$$

Résultats classiques.

	SIGNAL SINUSOÏDAL	SIGNAL CARRÉ	SIGNAL TRIANGULAIRE
VALEUR MOYENNE	0	0	0
VALEUR EFFICACE	$\frac{S_c}{\sqrt{2}}$	S_c	$\frac{S_c}{\sqrt{3}}$
VALEUR MOYENNE DU SIGNAL REDRESSÉ	$\frac{2 S_c}{\pi}$	S_c	$\frac{S_c}{2}$
FACTEUR DE FORME $\frac{S_{eff}}{S_{m_{red}}}$	$\frac{\pi}{2 \sqrt{2}}$	1	$\frac{2}{\sqrt{3}}$

II. LES APPAREILS

1) ELECTRODYNAMIQUES (action d'un courant sur un autre courant).

De forte consommation et de faible bande passante (quelques centaines de hertz). Ils mesurent la valeur efficace quelle que soit la forme du signal ; surtout utilisés en 50 Hz (chers, peu robustes mais très précis), ils ont la même échelle en continu et en alternatif.

2) FERROMAGNETIQUES (aimantation par un courant).

Mêmes remarques que les précédents avec, en prime, une forte hystérésis. Pratiquement utilisés qu'en 50 Hz (appareils de tableau, voiture, etc.) : simples et robustes.

3) THERMOCOUPLE.

Mesure la valeur efficace de tout type de signal. Très bon domaine de fréquence (jusqu'à 30 MHz). Consommation relativement importante (quelques centaines de Ω/V). Prise de point assez lente. Ils sont utilisés en hautes fréquences, mais sont sensibles à la température ambiante.

4) MAGNETOELECTRIQUES A REDRESSEUR (PEKLY - CDA 25) (action d'un champ sur un courant).

Mesurent la valeur moyenne de la tension redressée ; cependant ils sont gradués en VALEUR EFFICACE $\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \right)$ fois la valeur moyenne). Ils ne sont donc normalement utilisables qu'en courant sinusoïdal. La bande passante va de quelques hertz à quelques milliers de hertz. De faible consommation (utilisés aux fréquences musicales pour des circuits de faible puissance).

5) ELECTRONIQUES (PHILIPS).

De même technique que les deux précédents mais avec un amplificateur, ce qui apporte les avantages suivants : ils sont de faible consommation (1 $M\Omega/V$ à 100 $M\Omega/V$), très sensibles et de forte bande passante mais on perd en précision (ces appareils sont, en général, de classe 3). Certains appareils (chers) peuvent être très précis.

6) DIGITAUX (METRIX 708).

Eux aussi de forte impédance d'entrée et de grande bande passante, ils sont de plus autoprotégés des fausses manœuvres.

7) METRIX 744.

Enfin, il existe certains appareils que l'on peut rendre sensibles à la valeur de crête (METRIX 744) ; ou bien, certains appareils sensibles directement à la valeur efficace vraie (RMS : root mean square).

8) OSCILLOSCOPE.

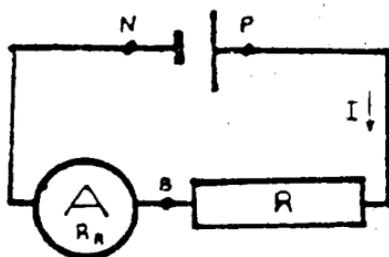
Celui-ci, ne l'oublions pas, est un voltmètre crête à crête, de forte impédance et de large bande passante.

III. LES MESURES

Nous avons fait le tour des paramètres pouvant influencer la mesure. Voyons maintenant plus en détails ce qui se passe

lorsque l'on mesure la tension d'un signal tout d'abord continu avec le problème soulevé par la résistance interne de l'appareil. Prenons pour exemple le tracé d'une caractéristique de dipôle à l'aide du montage longue et courte dérivation.

A) UTILISATION EN AMPEREMETRE.

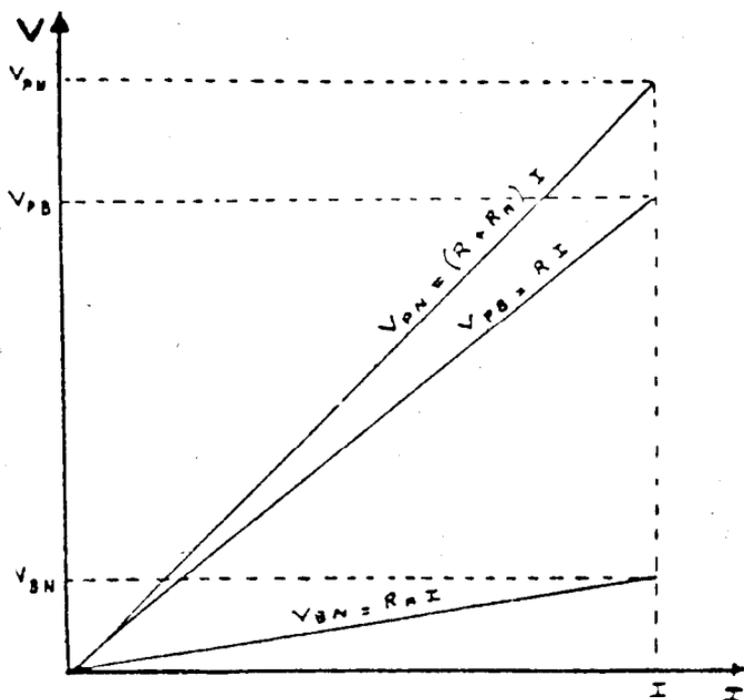


R : résistance du circuit.

R_a : résistance interne de l'ampèremètre.

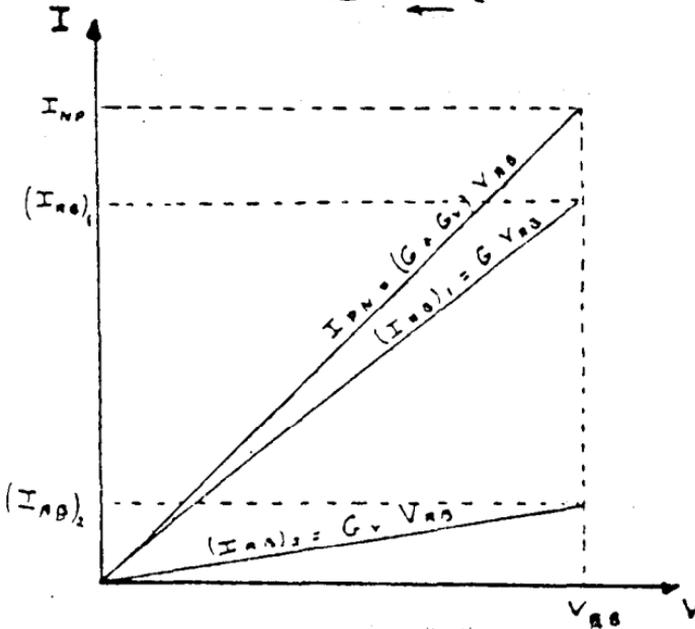
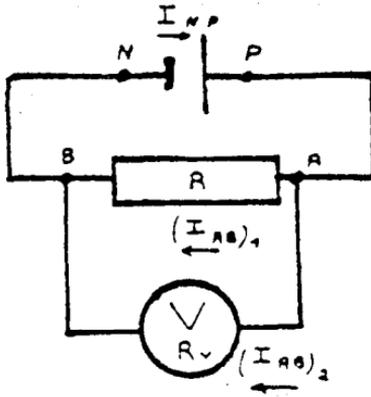
$$V_{PN} = V_{PB} + V_{BN},$$

$$= RI + R_a I.$$



On lit directement, grâce à la caractéristique de l'appareil, la chute de tension aux bornes de l'ampèremètre. A l'inverse, une résistance étalon permet de déterminer R_a .

B) UTILISATION EN VOLTMETRE.



$$G = \frac{I}{R} \text{ conductance du circuit,}$$

$$G_v = \frac{I}{R_v} \text{ conductance du voltmètre.}$$

$$I_{NP} = (I_{AB})_1 + (I_{AB})_2,$$

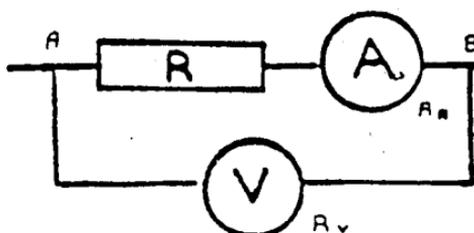
$$I_{NP} = G V_{AB} + G_v V_{AB}.$$

On lit directement à l'aide du graphe, le courant qui traverse le dipôle et qui traverse le voltmètre.

C) MONTAGES - LONGUE ET COURTE DÉRIVATION.

LONGUE DÉRIVATION :

R n'est pas forcément linéaire.



$$R = \frac{V_{lu}}{I_{lu}} - R_a.$$

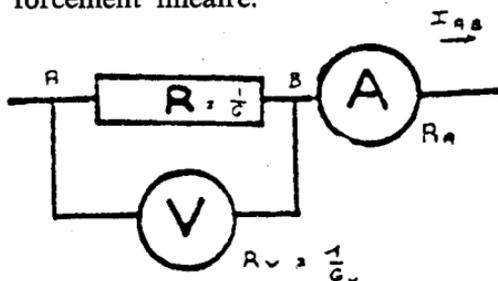
Si R_a est connu, on peut connaître R aux erreurs d'expérience près. Sinon, l'erreur relative systématique par excès est :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_a}{R}.$$

APPLICATION : Diode en inverse. Fortes résistances.

COURTE DÉRIVATION :

R n'est pas forcément linéaire.



$$I_{lu} = G V_{lu} + G_v V_{lu}.$$

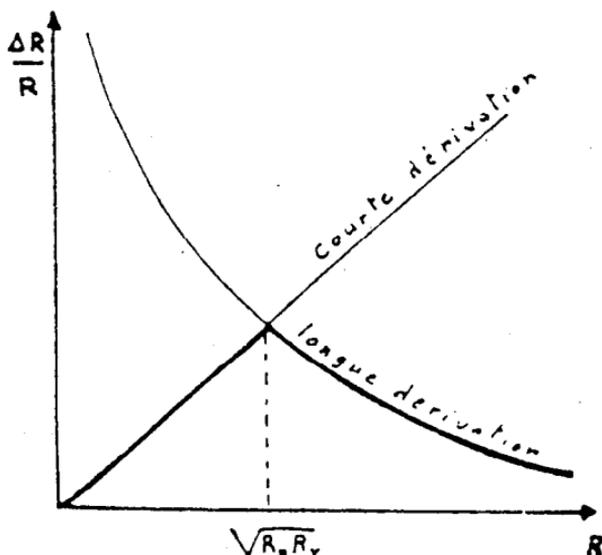
$$\frac{1}{R} = G = \frac{I_{lu} - G_v V_{lu}}{V_{lu}}.$$

$$R = \frac{V_{lu}}{I_{lu}} \left(1 - \frac{R_v I_{lu}}{V_{lu}} \right)^{-1}$$

Si R_v est connu, on peut connaître R aux erreurs d'expérience près. Sinon, l'erreur relative systématique est par défaut :

$$\frac{R}{R_v} = \frac{\Delta R}{R_v}$$

APPLICATION : Diode dans le sens direct. Faibles résistances.



On voit d'après le graphe que l'on a intérêt à prendre le montage longue dérivation pour les grandes résistances et la courte dérivation pour les petites résistances.

L'une ou l'autre aux environs de $R = \sqrt{R_a R_v}$.

On voit aussi que l'étude dépend également du choix des calibres qui sont imposés par les courants et les tensions passant dans le circuit étudié. L'erreur due à la résistance interne des appareils s'ajoute à l'erreur de classe, mais peut être éliminée par la connaissance de R_a et R_v .

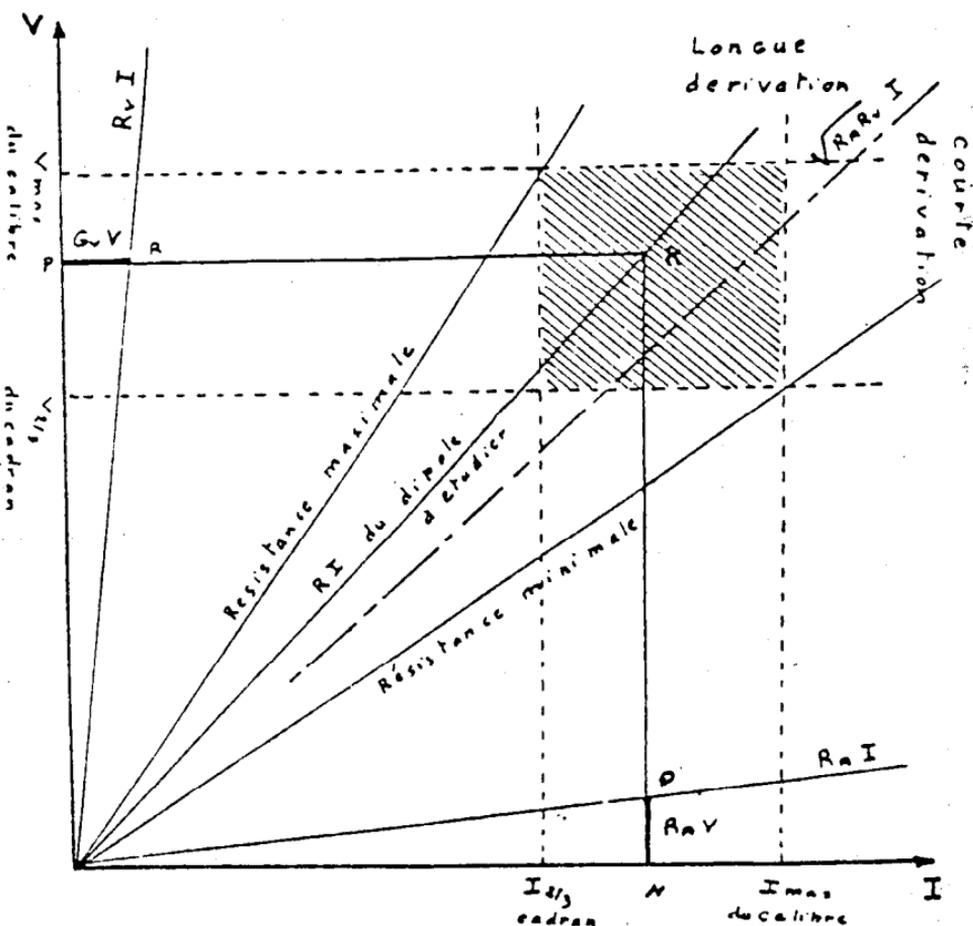
Remarque.

Ce type de montage est indispensable pour l'étude de la caractéristique d'une diode en classe de seconde. En effet, en particulier dans le cas de la caractéristique inverse, ne pas faire le montage longue dérivation revient à tracer la caractéristique du voltmètre, surtout si celui-ci n'est pas électronique (PEKLY, CDA 25).

D) UTILISATION OPTIMALE DU MULTIMETRE.

La zone hachurée délimite le domaine optimal d'utilisation d'un voltmètre et d'un ampèremètre pour des calibres donnés.

On voit que le choix des calibres implique une valeur minimale et une maximale des résistances à étudier.



LONGUE DÉRIVATION :

$$U_{ab} \approx R I_{ab}.$$

Chute de tension dans l'ampèremètre : $U_a = R_a I_{ab}.$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{U_a}{U_{ab}} \approx \frac{R_a}{R} = \frac{Q_N}{Q_K}.$$

COURTE DÉRIVATION :

$$I_{ab} \approx G V_{ab} = \frac{1}{R} V_{ab}.$$

Courant dans le voltmètre : $I_v = G_v V_{ab} = \frac{1}{R_v} V_{ab}$.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{I_v}{I_{ab}} = \frac{R}{R_v} = \frac{R_p}{R_K}$$

Le choix du montage longue ou courte dérivation se fera en fonction de la valeur de la résistance à étudier par rapport à $\sqrt{R_a R_v}$.

Remarque.

La caractéristique $\sqrt{R_a R_v}$ ne coupe pas forcément le domaine d'utilisation. Au-dessus de cette droite, on prend le montage longue dérivation, en dessous la courte dérivation.

**IV) ETUDE EN FONCTION DE LA FREQUENCE
ET DE LA FORME DU SIGNAL**

A) LA FREQUENCE.

Prenons un signal sinusoïdal de valeur 2 V crête à crête.

VALEUR MOYENNE DU SIGNAL REDRESSÉ : 0.636 V

VALEUR EFFICACE : 0.707 V

VALEURS MESURÉES (le signal étant contrôlé à l'oscilloscope) :

	PEKLY	CDA 25	PHILIPS	METRIX
Hertz			Volts	
50	0.69	0.69	0.709	0.704
1 000	0.69	0.69	0.710	0.706
10 000	0.68	0.69	0.710	0.706
20 000	0.67	0.69	0.705	0.704
30 000	0.66	0.68	0.700	0.702
40 000	0.63	0.68	0.685	0.699
50 000	0.63	0.65	0.680	0.704
100 000	0.62	0.64	0.660	0.673
500 000	0.50	0.45	0.00	0.013

Ces valeurs ne sont là qu'à titre indicatif. On peut constater que tous les appareils ont des résultats satisfaisants dans toute leur bande passante et même un peu au-delà vu leur classe (il ne faut pas oublier que nous ne disposons pas d'un étalon de tension, les mesures n'étant donc que comparatives d'un appareil à l'autre). Ils affichent tous la valeur efficace. Il faut remarquer toutefois que l'impédance du voltmètre diminue avec la fréquence et devient de plus en plus capacitive.

B) SIGNAL PERIODIQUE.**Rappels mathématiques : séries de Fourier.**

Tout signal périodique, pour lequel $f(t) = f(t + T)$, peut être représenté par une série de Fourier à condition :

- a) qu'il y ait un nombre fini de discontinuités dans la période T dans le cas où le signal est discontinu (signal carré),
- b) qu'il y ait une valeur moyenne finie pour la période T ,
- c) qu'il y ait un nombre fini de maxima positifs et négatifs.

Lorsque ces conditions dites de DIRICHLET sont satisfaites, la série de FOURIER peut être écrite sous la forme trigonométrique :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^{\infty} a_n \cos n \omega t + b_n \sin n \omega t$$

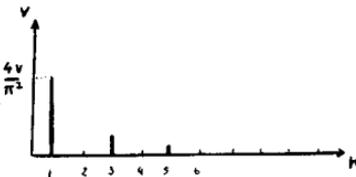
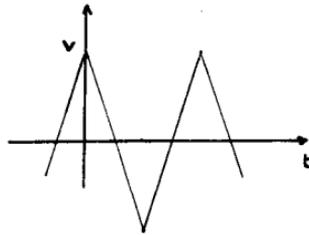
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n \omega t dt$$

$$n \geq 0$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n \omega t dt.$$

$$n \geq 1$$

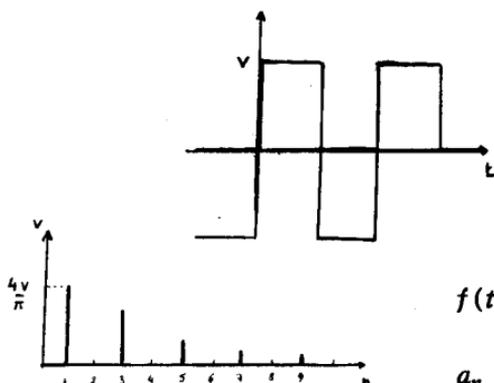
Pour une fonction paire comme la fonction triangle, centrée sur l'origine, elle ne contiendra que des cosinus (symétrie 1/2 onde).



$$f(t) = \sum a_n \cos n \omega t$$

$$a_n = \frac{4V}{\pi^2 n^2} \quad n \text{ impair}$$

Schéma 2



$$f(t) = \sum a_n \sin \omega t$$

$$a_n = \frac{4V}{n\pi} \quad n \text{ impair.}$$

Distorsion du signal.

On mesure en général la valeur efficace d'un signal sinusoïdal, en fait celui-ci peut être déformé ; après passage dans un amplificateur par exemple. Si l'on mesure la tension à l'aide d'un volt-mètre magnétoélectrique, on lira $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ la valeur de la tension

déformée et redressée. On appellera DISTORSION HARMONIQUE la racine du rapport de la somme des carrés des amplitudes des harmoniques sur le carré de l'amplitude du fondamental, c'est-à-dire le rapport de la valeur efficace des harmoniques sur la valeur efficace du fondamental ; ce rapport étant mesuré à l'aide d'un distorsiomètre.

$$D = \sqrt{\frac{\sum_2 S_n^2}{S_1^2}}$$

En réalité, le distorsiomètre mesure :

$$D' = \frac{\text{Val}_{\text{eff}} \text{ des harmoniques}}{\text{Val}_{\text{eff}} \text{ du signal}} = \sqrt{\frac{\sum_2 S_n^2}{S^2}}$$

Soit :

$$D = \frac{D'}{\sqrt{1 - D'^2}}$$

Distorsion d'échelle.

Les redresseurs n'étant pas linéaires, l'échelle des voltmètres magnétoélectriques à redresseur est resserrée au voisinage du zéro.

Dans le cas d'un milliampèremètre utilisé dans un circuit de basse impédance, la résistance propre de l'appareil peut produire des distorsions dans le courant mesuré.

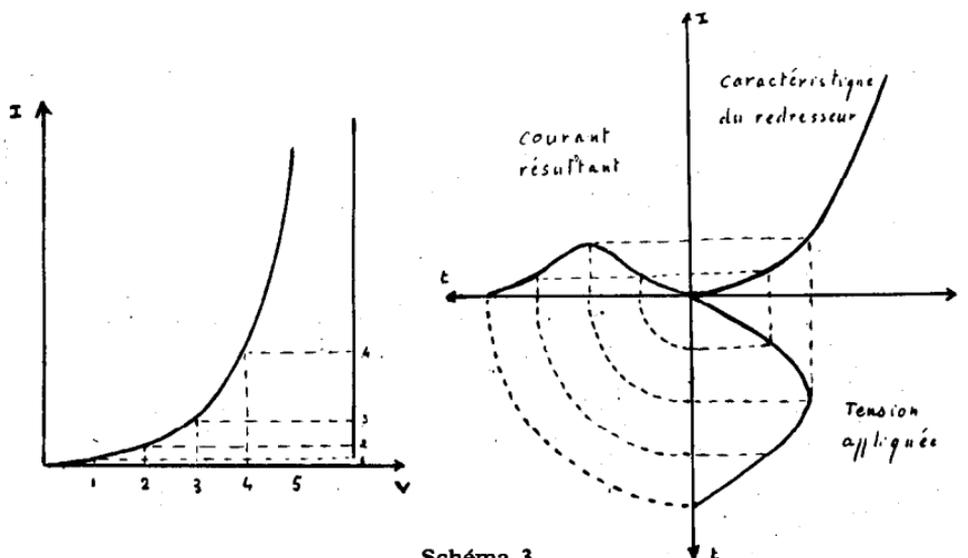


Schéma 3

Expérience pour un signal de 2 V crête à crête.

Triangulaire.

VALEUR MOYENNE DU SIGNAL REDRESSÉ : 0.5 V

$$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot 0.5 = 0.55 \text{ V}$$

VALEUR EFFICACE : 0.577 V.

	PEKLY	CDA 25	METRIX	PHILIPS
Hertz	Volts			
50	0.54	0.55	0.577	0.56
1 000	0.54	0.54	0.551	0.551
10 000	0.52	0.53	0.546	0.55
50 000	0.52	0.53	0.548	0.548

Carré.

VALEUR MOYENNE DU SIGNAL REDRESSÉ : 1 V

$$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot 1 = 1.11 \text{ V}$$

VALEUR EFFICACE : 1 V.

Hertz	PEKLY	CDA 25	METRIX	PHILIPS
50	1.06	0.95	1.094	1.1
1 000	1.01	1.05	1.079	1.1
50 000	1.	0.95	1.033	1.
100 000	0.98	0.87	0.956	0.920

CONCLUSION.

Ces valeurs montrent deux choses ; la première : que les voltmètres choisis sont sensibles à la valeur moyenne redressée et

qu'ils affichent $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ fois celle-ci ; la seconde est, que de par

leur conception, la mesure de la tension à l'aide de ce type d'appareil n'a aucun sens dans le cas de signaux non sinusoïdaux. Il est donc nécessaire de concevoir l'oscilloscope comme un voltmètre pour des signaux quelconques, la valeur moyenne pouvant être approchée à l'aide d'une résolution graphique. Si l'on veut mesurer le facteur de forme d'un signal, il faudra disposer d'un voltmètre électrodynamique ou un voltmètre digital sensible à la valeur efficace (R.M.S.) (METRIX, BEKMANN, PEKLY...).

La valeur moyenne étant donnée par un voltmètre électromagnétique :

$$V_{\text{moy}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (\text{lecture}) \simeq (1,11)^{-1} (\text{lecture}).$$

$$\text{FACTEUR DE FORME : } F = \frac{V_{\text{eff}}}{V_{\text{moy}}}.$$

Remarque.

Il est possible d'avoir accès à la valeur moyenne d'un signal de forme quelconque, ceci grâce à un amplificateur opérationnel en faisant le montage suivant :

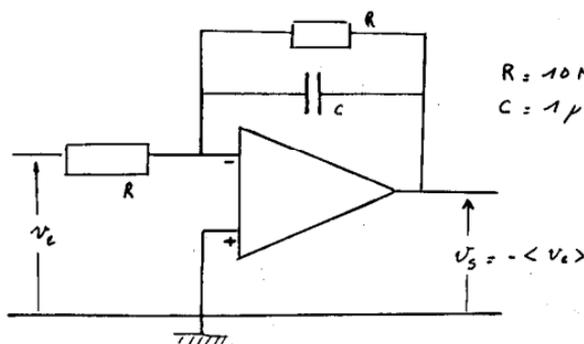
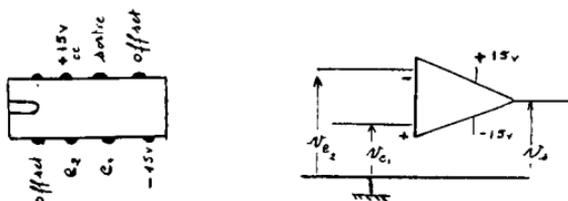


Schéma 4



Exemple de branchement (avec TLO 81) : Pour l'alimentation on prendra celle fournie par le centre de l'opération pHmètre.

Cet article ne fait qu'aborder le sujet mais nous espérons qu'il permettra à nos collègues d'y voir un peu plus clair (comme nous-mêmes) sur ce sujet et de mesurer la distance qui existe entre la physique au tableau et sa vérification expérimentale.