

Introduction à la Métrologie électrique

© Fabrice Sincère ; version 1.1.2.web

<http://perso.orange.fr/fabrice.sincere/>

Plan du cours

Chapitre 1 - Le multimètre numérique

- 1- Mesure de tension continue (fonction V DC)
 - 1-1- Conditionnement du signal & Amplification
 - 1-2- Convertisseur analogique–numérique double rampe
 - 1-3- Nombre de points d'un multimètre
 - 1-4- Résolution numérique
 - 1-5- Réjection de mode normal (NMR)
 - 1-6- Le circuit intégré ICL7106
- 2- Mesure de courant continu (fonction A DC)
- 3- Mesure de la valeur efficace d'une tension (fonction V AC)
 - 3-1- Conditionnement du signal
 - 3-2- Convertisseur AC -> DC bas de gamme
 - 3-3- Multimètre True RMS
 - 3-4- Bande passante
- 4- Mesure de la valeur efficace d'un courant (fonction A AC)

- 5- Mesure de résistances
 - 5-1- Technique 2 fils (Ω 2W)
 - 5-2- Technique 4 fils (Ω 4W)
- 6- Mesure de fréquence et de période

Chapitre 2 - Incertitudes de mesures

- 1- Incertitude de mesure d'un multimètre numérique
- 2- Loi de propagation des incertitudes
- 3- Méthode de calcul préconisée par le COFRAC
 - 3-1- Les incertitudes-types
 - 3-2- Evaluation des incertitudes-types
 - 3-3- Combinaison des incertitudes-types
 - 3-4- Bilan d'incertitudes

Bibliographie

Chapitre 1 Le multimètre numérique

1- Mesure de tension continue (fonction V DC)

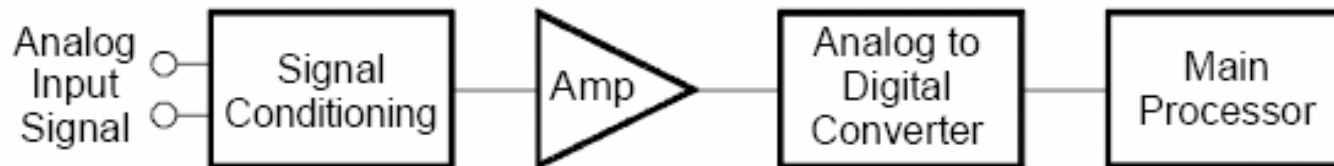


Figure 1

1-1- Conditionnement du signal & Amplification

Rôle : mise à l'échelle de la tension d'entrée :

- atténuation des hautes tensions
- amplification des basses tensions

Exemple de calibres (multimètre Agilent 34401A) :

0,1 V 1 V 10 V 100 V 1000 V

Le signal d'entrée est ramené à une tension comprise dans l'intervalle ± 10 V.

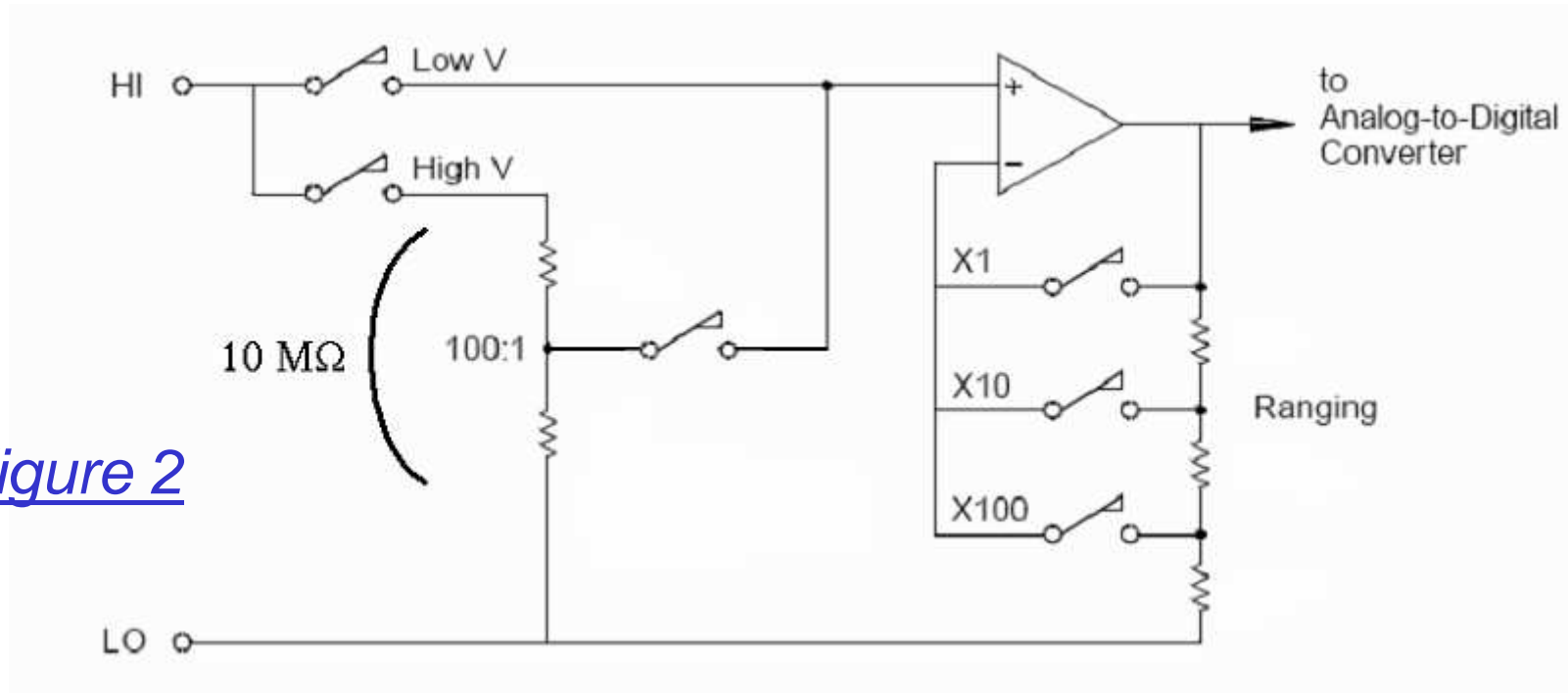


Figure 2

Exemple : $V_E = 82 \text{ V}$

Le pont diviseur ramène la tension à 0,82 V puis amplification d'un facteur 10.

Finalement 8,2 V en sortie du conditionneur et donc en entrée du convertisseur analogique-numérique (ADC).

- résistance d'entrée :

$$R_E = 10 \text{ M}\Omega$$

Le voltmètre consomme :

$$8,2 \mu\text{A}$$

Pour les calibres 0,1 V 1 V 10V

$$R_E > 10 \text{ G}\Omega \text{ (« Low V » fermé)}$$

1-2- Convertisseur analogique – numérique

Type : double rampe

Schéma simplifié :

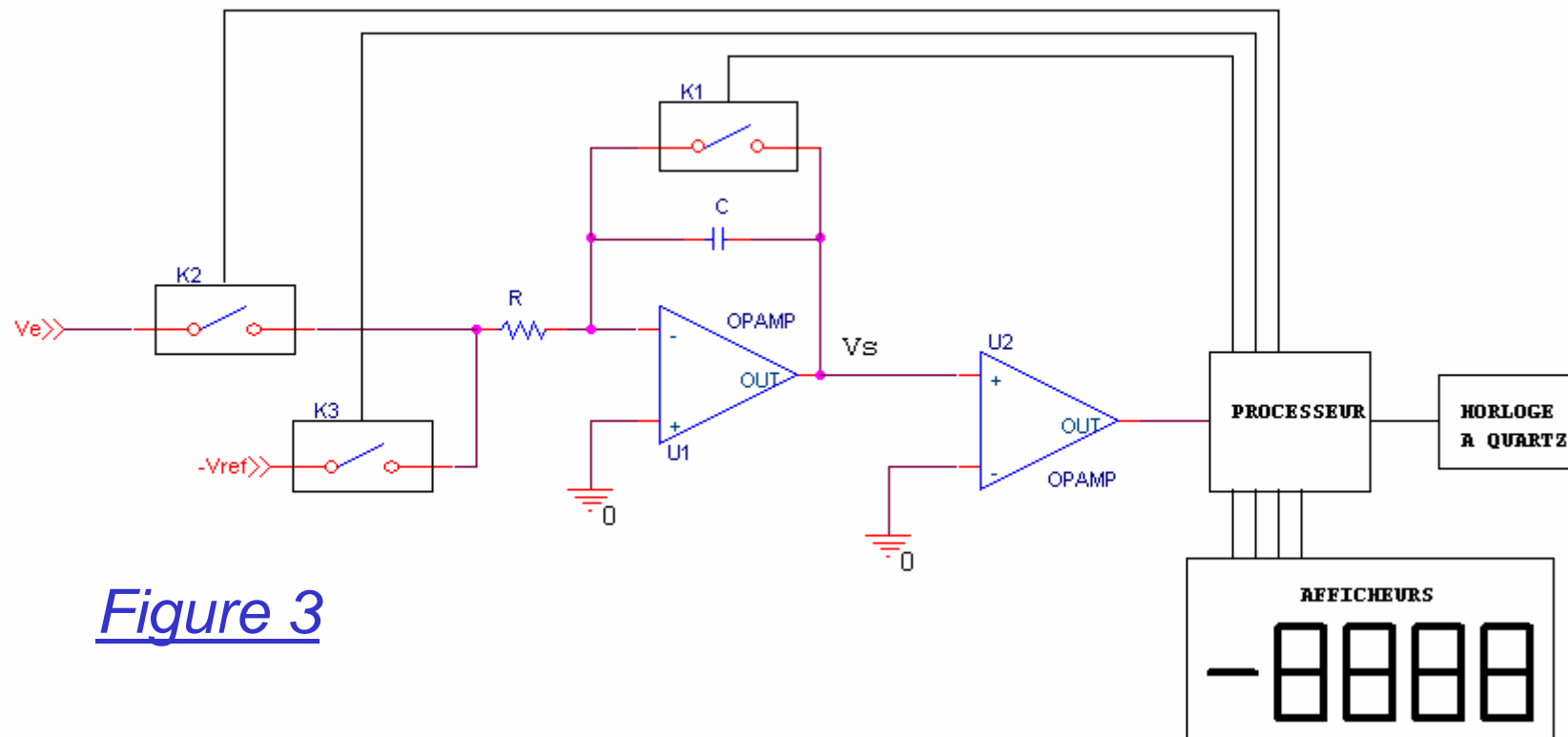


Figure 3

- Première phase : K1 fermé

Décharge du condensateur , $V_S = 0 \text{ V}$

- Deuxième phase : K2 fermé à l'instant $t = 0$

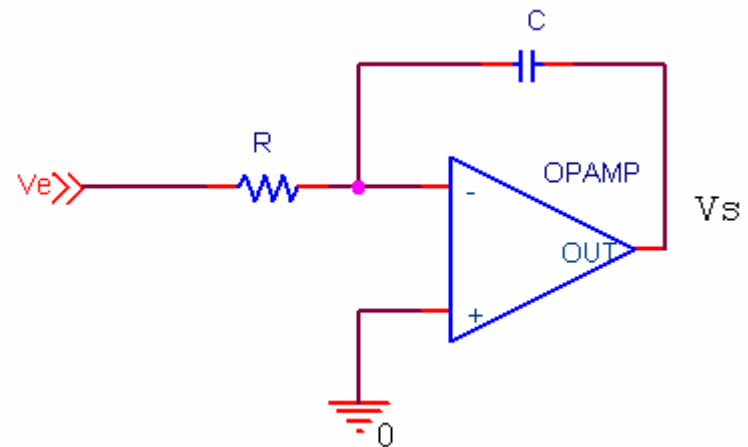
Le signal est appliqué en entrée d'un intégrateur inverseur pendant une durée T_{int} .

$$\text{Rappel: } v_S(t) = -\frac{1}{RC} \int v_E(t) dt \quad \text{ou: } \frac{dv_S(t)}{dt} = -\frac{v_E(t)}{RC}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta v_S}{\Delta t} = -\frac{V_E}{RC}$$

$$v_S(t) = -\frac{V_E}{RC} \cdot t \quad (\text{rampe négative})$$

$$v_S(t = T_{\text{int}}) = -\frac{V_E}{RC} \cdot T_{\text{int}}$$



- Troisième phase : K3 fermé

On applique en entrée une tension de référence ($-V_{REF}$) :

$$\frac{\Delta v_S}{\Delta t} = \frac{V_{REF}}{RC}$$

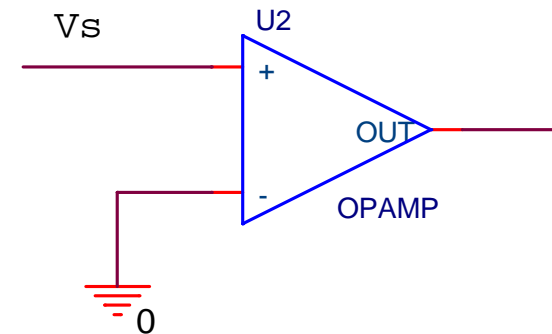
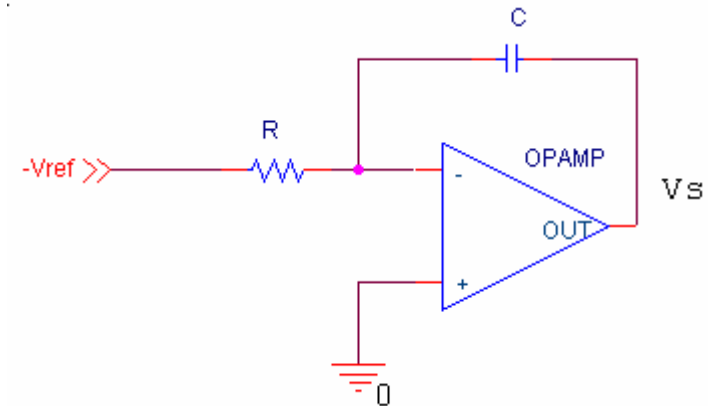
$$v_S(T_{int} + t) = -\frac{V_E}{RC} \cdot T_{int} + \frac{V_{REF}}{RC} \cdot t$$

(rampe positive)

La sortie du comparateur bascule au niveau bas quand V_S atteint 0 V.

$$v_S(T_{int} + T_0) = 0 \text{ V}$$

$$\frac{T_0}{T_{int}} = \frac{V_E}{V_{REF}}$$



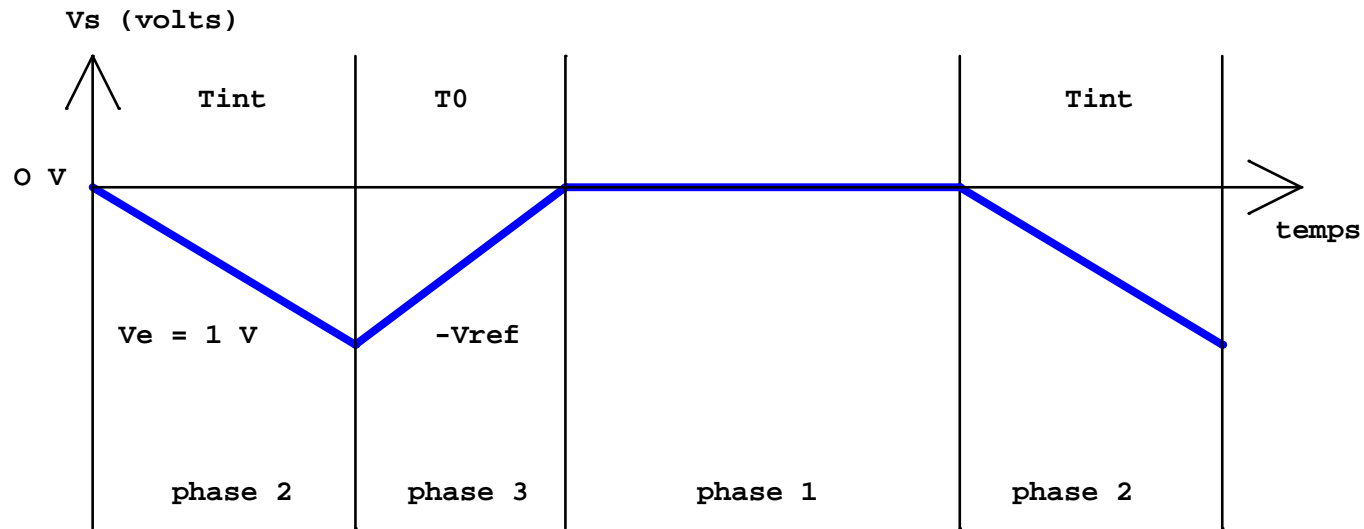
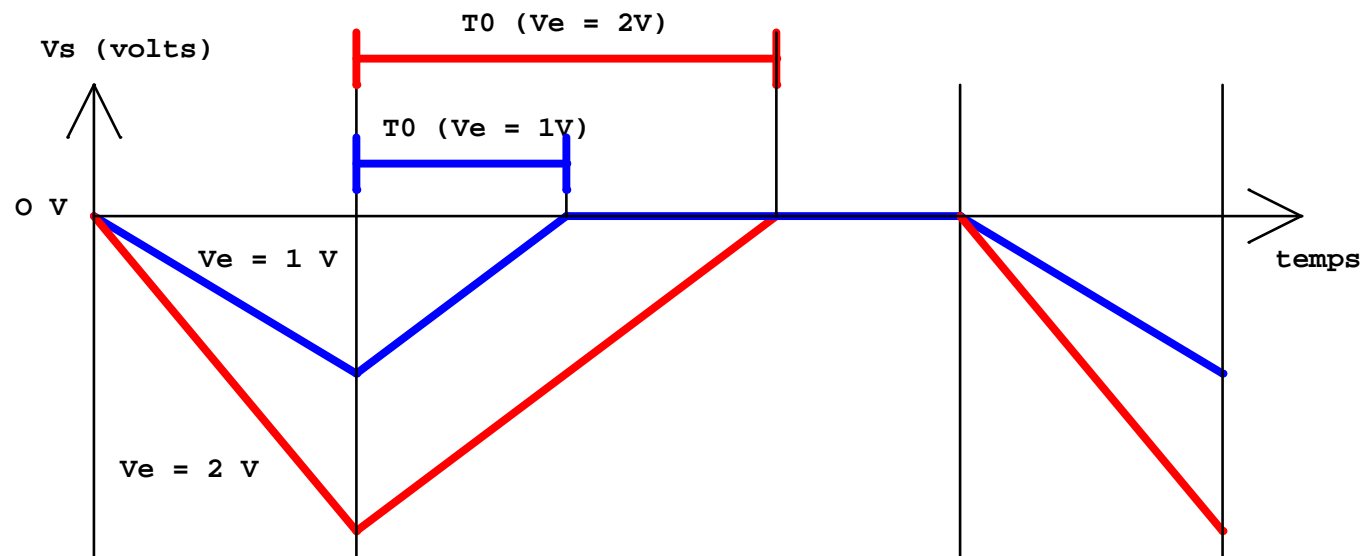


Figure 4



La mesure de T_0 se fait avec un compteur numérique.

Le résultat du comptage est proportionnel à V_E .

1-3- Nombre de points d'un multimètre

Exemple : un multimètre 4000 points permet d'afficher des valeurs de 0000 à ± 4000 .

On parle aussi de multimètre « 3 digits $\frac{1}{2}$ ».

Pour obtenir le calibre 400 mV, il faut faire en sorte de compter jusqu'à 4000 pour $V_E = 400,0$ mV.

1-4- Résolution numérique

C'est la plus petite valeur que peut afficher le multimètre.

A.N. multimètre 4000 points, sur calibre 400 mV

$$\text{Résolution } 000.1 \text{ mV} = 100 \mu\text{V}$$

A.N. calibre 40 V

$$\text{Résolution } 00.01 \text{ V} = 10 \text{ mV}$$

A.N. calibre 1000 V

$$\text{Résolution } 0001 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

1-5- Réjection de mode normal

Au signal d'entrée se rajoute du bruit, en particulier le “ronflement” du secteur.

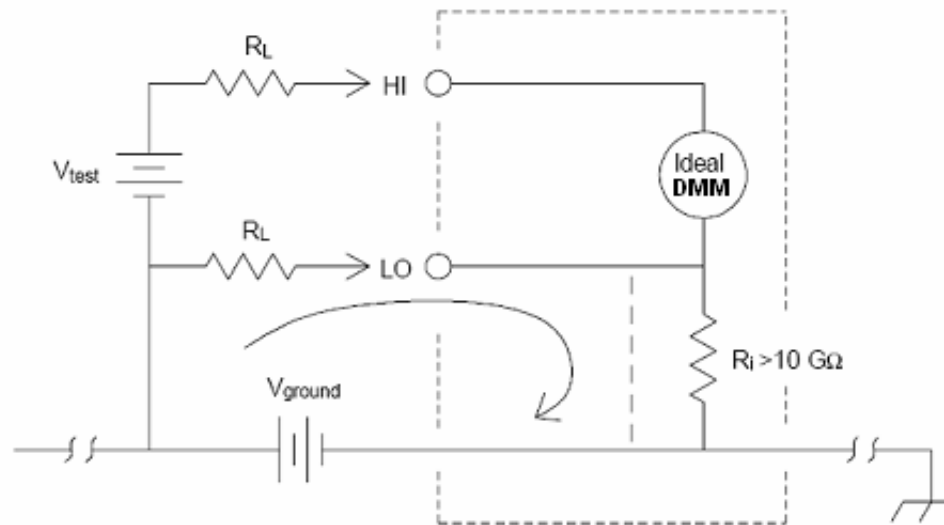


Figure 5

R_L = lead resistance
 R_i = multimeter isolation resistance
 V_{ground} = voltage drop on ground bus

- Mesure avec un multimètre Agilent 34401A (fonction V DC)

$v_E = 1 \text{ V}$ (composante continue) + 10 V crête à crête
sinusoïdale de fréquence f (composante alternative)

$f = 50 \text{ Hz}$: affichage stable 1,000X V

$f = 55 \text{ Hz}$: affichage stable 1,000X V

$f = 52,5 \text{ Hz}$: affichage instable !

La valeur oscille autour de 1 V : entre 0,848X V et 1,152X.

- Explication

$$V_S(t = T_{\text{int}}) = \frac{1}{T_{\text{int}}} \int_{t=0}^{T_{\text{int}}} v_E(t) dt$$

En position V DC, un multimètre à double rampe affiche la valeur moyenne pendant T_{int} (durée d'intégration).

$T \neq T_{\text{int}}$

Sauf cas particulier, c'est différent de la valeur moyenne :

$$\langle v_E \rangle = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T v_E(t) dt$$

$$V_S(t = T_{\text{int}}) = \frac{1}{T_{\text{int}}} \int_{t=0}^{T_{\text{int}}} (\langle v_E \rangle + \hat{V}_E \sin(\omega t + \varphi)) dt$$

$$= \langle v_E \rangle - \frac{\hat{V}_E}{\omega T_{\text{int}}} [\cos(\omega t + \varphi)]_0^{T_{\text{int}}}$$

$$= \langle v_E \rangle - \frac{\hat{V}_E}{\omega T_{\text{int}}} (\cos(\omega T_{\text{int}} + \varphi) - \cos \varphi)$$

$$= \langle v_E \rangle - \frac{2\hat{V}_E}{\omega T_{\text{int}}} \sin\left(\frac{\omega T_{\text{int}}}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega T_{\text{int}}}{2} + \varphi\right)$$

$$= \langle v_E \rangle \quad \text{si} \quad \sin\left(\frac{\omega T_{\text{int}}}{2}\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega T_{\text{int}}}{2} = k\pi \quad k \in \mathbf{N}^*$$

Si $T_{\text{int}} = k \cdot T$ avec k entier ≥ 1
alors le multimètre donne la valeur moyenne.

A.N. $T_{int} = 200 \text{ ms}$

Montrer que le multimètre affiche la valeur moyenne (1 V stable) pour 50 Hz et 55 Hz.

$f = 50 \text{ Hz}$ $T = 20 \text{ ms}$

$T_{int} = 10 \times 20 \text{ ms}$

$k = 10 = \text{entier}$

$f = 55 \text{ Hz}$

$k = 11 = \text{entier}$

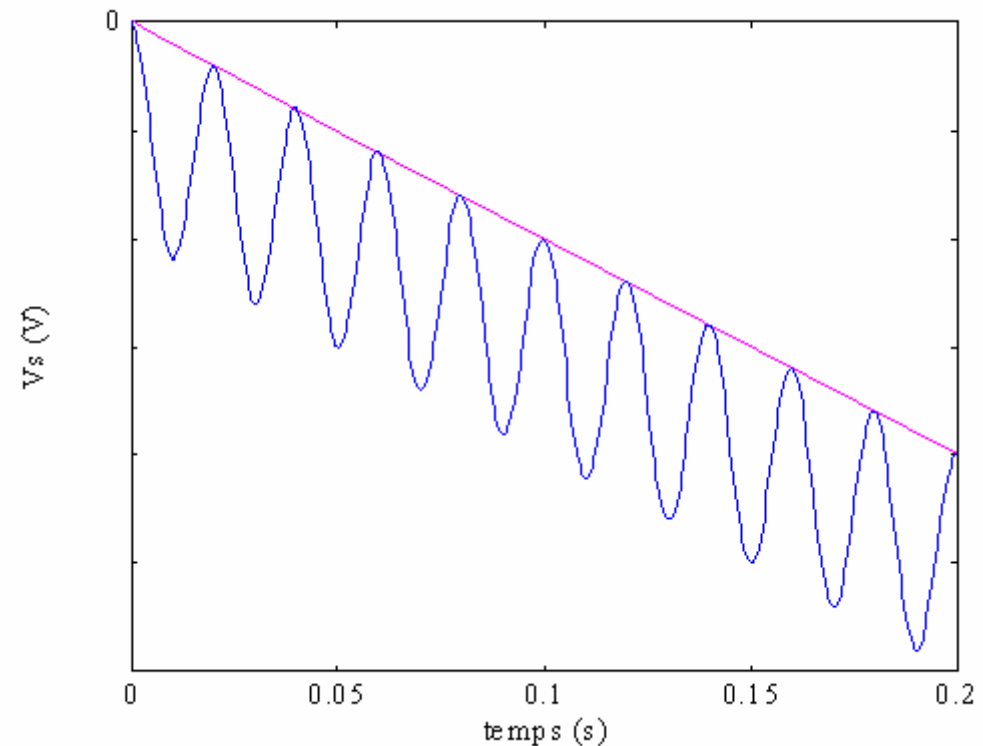


Figure 6

Autrement, il y a un affichage fluctuant, dû au terme :

$$-\frac{2\hat{V}_E}{\omega T_{\text{int}}} \sin\left(\frac{\omega T_{\text{int}}}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega T_{\text{int}}}{2} + \varphi\right)$$

La phase φ a une valeur aléatoire.

L'amplitude de la fluctuation est :

$$\pm \frac{2\hat{V}_E}{\omega T_{\text{int}}} \sin\left(\frac{\omega T_{\text{int}}}{2}\right) = \pm \frac{\hat{V}_E}{k\pi} \sin(k\pi)$$

N.B. La fluctuation est maximale pour k demi-entier.

A.N. $f = 52,5 \text{ Hz}$

$T = 19 \text{ ms}$

$k = T_{int}/T = 200/19 = 10,53 \text{ non entier}$

L'afficheur indiquera : $1 \pm \frac{5}{10,53 \cdot \pi} \sin(10,53 \cdot \pi) = 1 \pm 0,151 \text{ V}$
 $= 0,849 \text{ à } 1,151 \text{ V}$

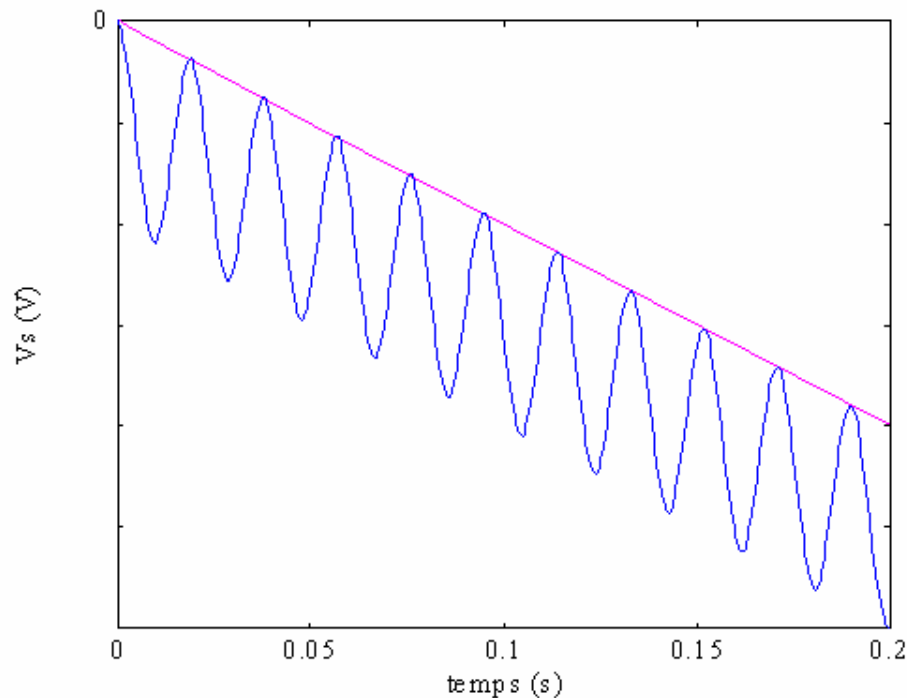


Figure 7

- **Taux de réjection de mode normal (NMR)**

Définition :

$$\text{NMR (en dB)} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{amplitude du bruit d'entrée}}{\text{variation maximale de l'affichage}} \right)$$

$$= 20 \log \left| \frac{\hat{V}_E}{\frac{\hat{V}_E}{k\pi} \sin(k\pi)} \right| = 20 \log \left| \frac{k\pi}{\sin(k\pi)} \right| \quad \text{avec} \quad k = \frac{T_{\text{int}}}{T}$$

Le NMR dépend de la fréquence ($f = 1/T$) du bruit.

Le NMR doit être le plus grand possible.

Pour limiter la perturbation par le bruit du secteur, il faut que la durée d'intégration (T_{int}) soit un multiple entier de la période du secteur.

NPLC = number of power line cycles

$$\text{NPLC} = \frac{T_{\text{int}}}{T_{\text{secteur}}}$$

NMR \approx 0 dB (bruit non rejeté) si NPLC < 1

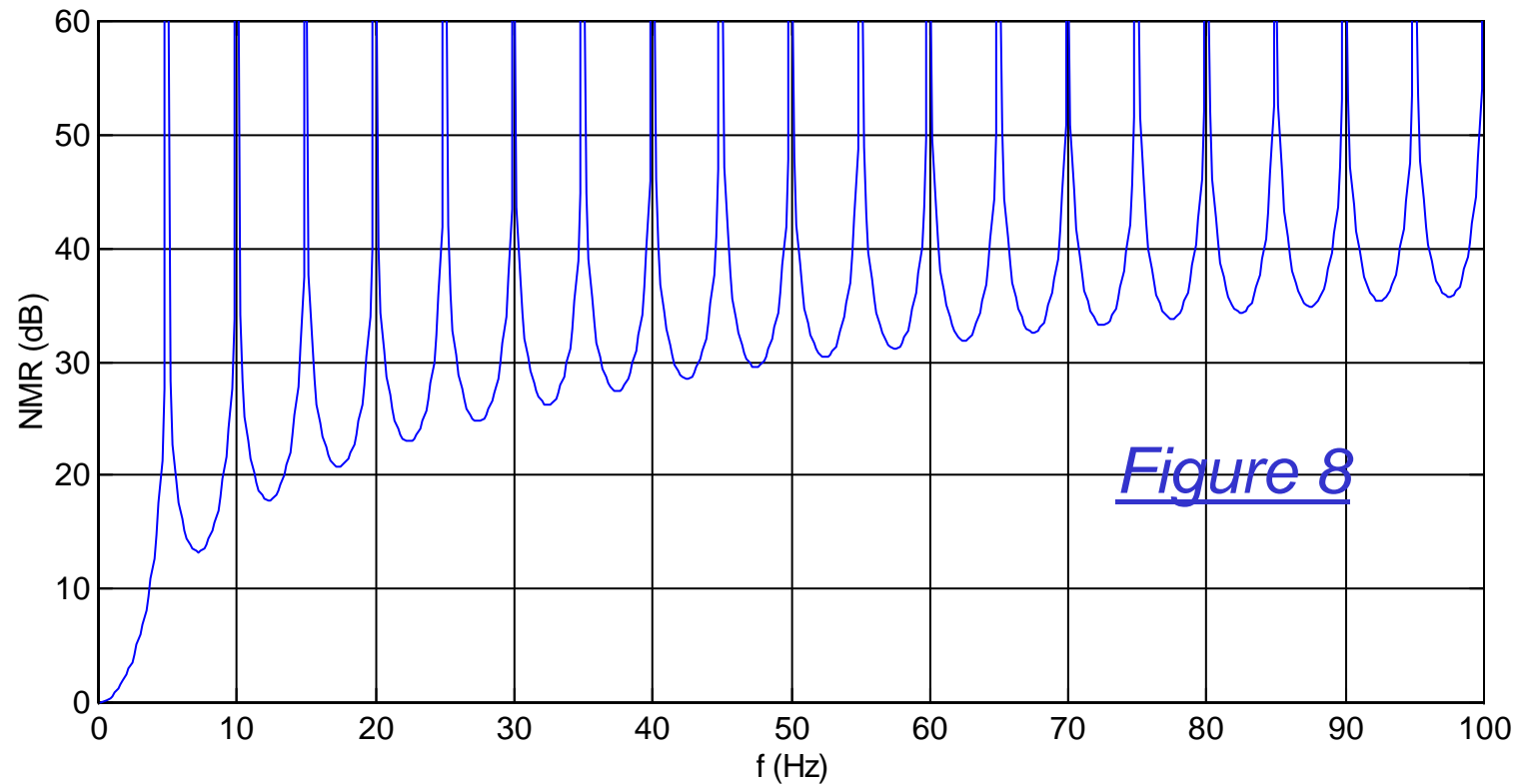
NMR > 60 dB si NPLC \geq 1 (et entier) $f_{\text{secteur}} \pm 0,1 \%$

NMR > 70 dB si NPLC > 1000 $f_{\text{secteur}} \pm 0,1 \%$

A.N. $T_{int} = 200 \text{ ms}$

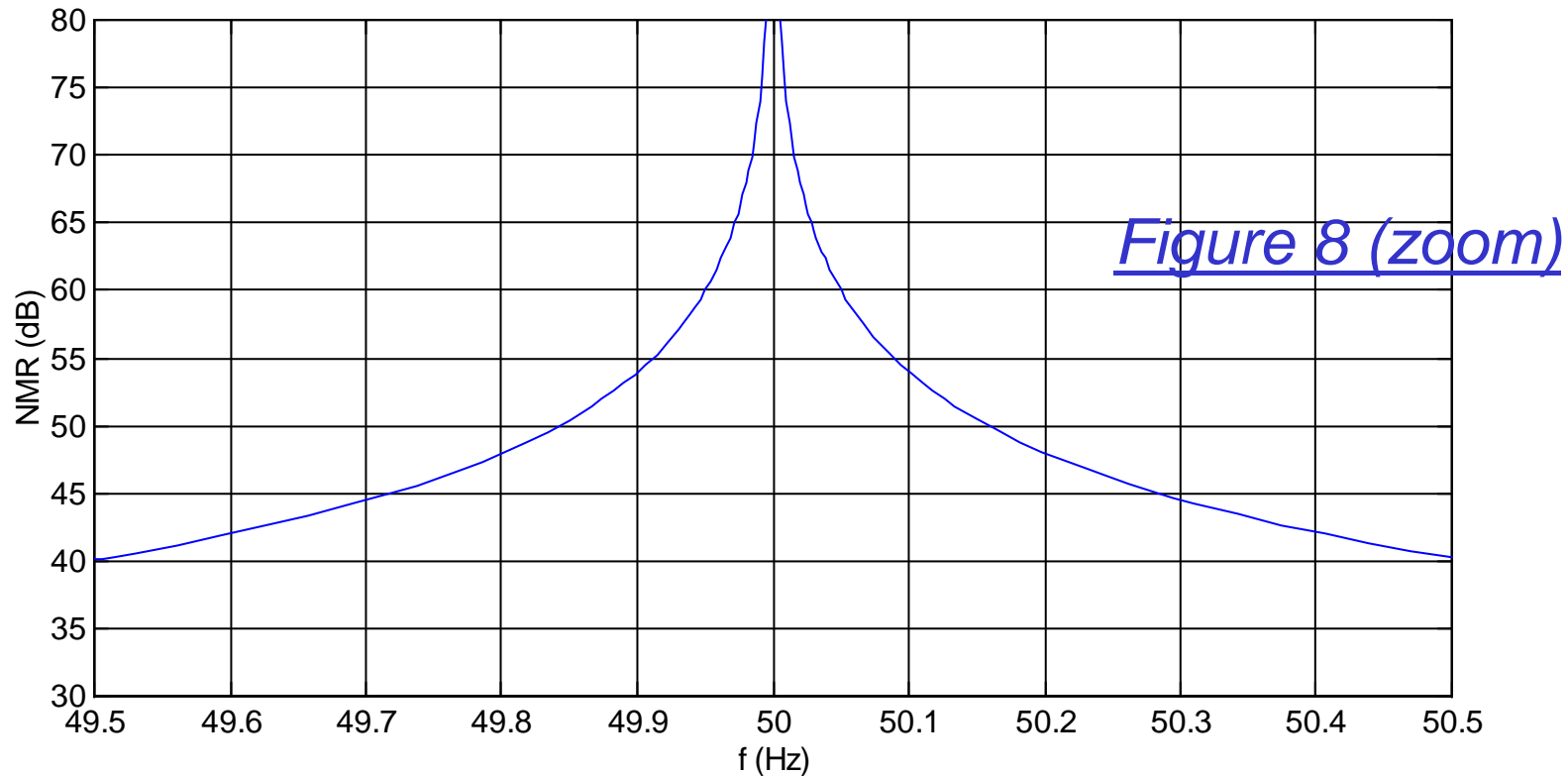
NPLC = ?

$NPLC = 10$ ($f_{secteur} = 50 \text{ Hz}$)



A.N. NMR à 50 Hz ; 52,5 Hz et 55 Hz ?

$\infty \text{ dB}$ (bruit complètement rejeté) ; 30 dB ; $\infty \text{ dB}$



$f_{\text{secteur}} \pm 0,1 \% : NMR > 60 \text{ dB} \quad (49,95 \text{ à } 50,05 \text{ Hz})$

$f_{\text{secteur}} \pm 1 \% : NMR > 40 \text{ dB} \quad (49,5 \text{ à } 50,5 \text{ Hz})$

$f_{\text{secteur}} \pm 3 \% : 48,5 \text{ à } 51,5 \text{ Hz}$

$k = 0,200 / (1/51,5) = 10,3$

$$NMR > 20 \log \left| \frac{10,3 \cdot \pi}{\sin(10,3 \cdot \pi)} \right| = 32 \text{ dB}$$

- **Exercice** : Détermination expérimentale du NPLC du multimètre HP 973A.

On mesure une tension sinusoïdale en position V DC.

On constate que l'affichage est stable pour $f = 50$ Hz.

On augmente doucement f :

Une instabilité de l'affichage apparaît, passe par un maximum à 51,25 Hz puis diminue.

A $f' = 52,5$ Hz, l'affichage est de nouveau stable.

Il en est de même tous les 2,5 Hz.

- 1) En déduire T_{int} et le NPLC.
- 2) Calculer le NMR à 51,25 Hz.
- 3) En pratique, on mesure 47 dB. Comment expliquer cet écart ?

1)

$$T_{\text{int}} = k \cdot T \quad \text{avec } k \text{ entier}$$

$$T_{\text{int}} = (k+1) \cdot T'$$

$$f = 1 / T = k / T_{\text{int}}$$

$$f' = 1 / T' = (k+1) / T_{\text{int}}$$

$$\Delta f = f' - f = 1 / T_{\text{int}}$$

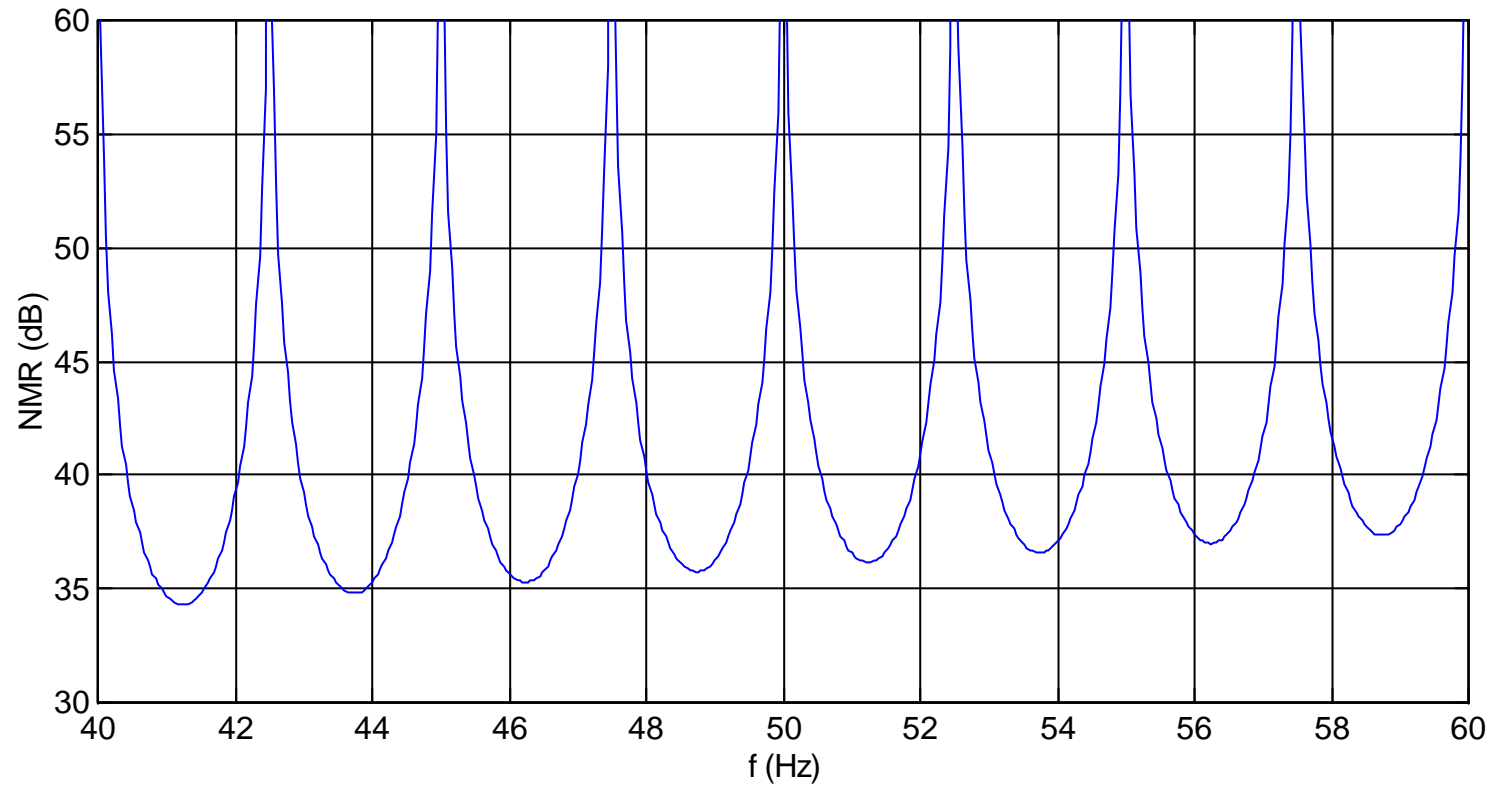
$$\mathbf{T_{\text{int}} = 1 / \Delta f}$$

$$= 1 / 2,5 = 400 \text{ ms}$$

$$= 20 \text{ PLC (pour } f_{\text{secteur}} = 50 \text{ Hz)}$$

2) Calcul du NMR à 51,25 Hz

36 dB



3) Il y a un filtre passe-bas en entrée, ce qui améliore les performances.

- Remarque

Le multimètre Agilent 34401A (un multimètre de laboratoire 6 digits $\frac{1}{2}$) permet de choisir le NPLC :

0,02 0,2 1 10 ou 100 PLC

- Avec 1, 10 ou 100 PLC, la mesure est peu sensible au bruit (car le NMR est important).

- Avec 0,02 PLC, une mesure dure :

$$T_{\text{int}} = 0,02 \times 20 \text{ ms} = 400 \mu\text{s}$$

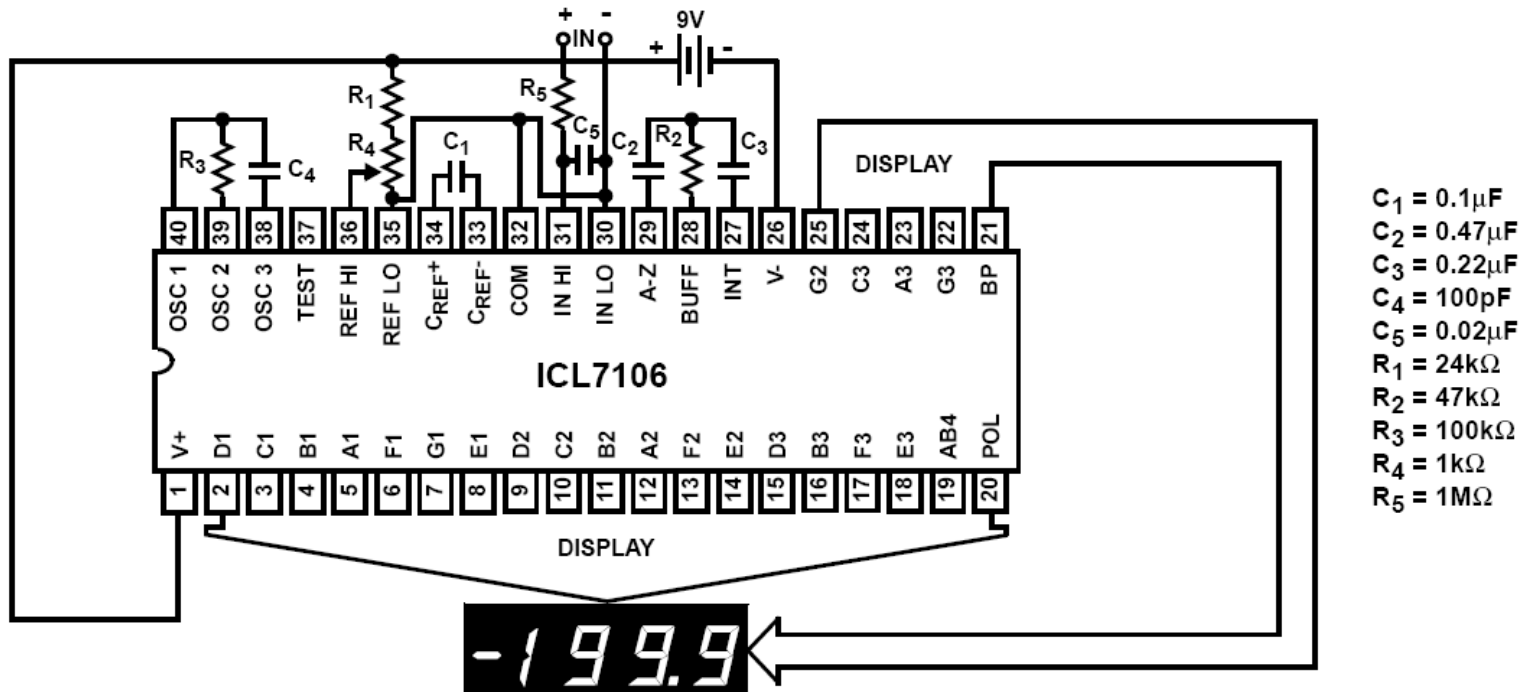
On peut donc faire beaucoup de mesures (2500 par seconde) mais la précision est limitée par la présence du bruit du secteur (NMR ≈ 0 dB).

1-6- Le circuit intégré ICL7106

Le ICL7106 est couramment utilisé dans les multimètres bas de gamme.

Il possède un convertisseur analogique – numérique double rampe (3 digits $\frac{1}{2}$, 2000 points).

Le ICL7106 permet la commande directe d'un afficheur LCD :



2- Mesure de courant continu (fonction A DC)

La mesure de l'intensité du courant se ramène à la mesure d'une tension par l'utilisation d'un shunt R_S :

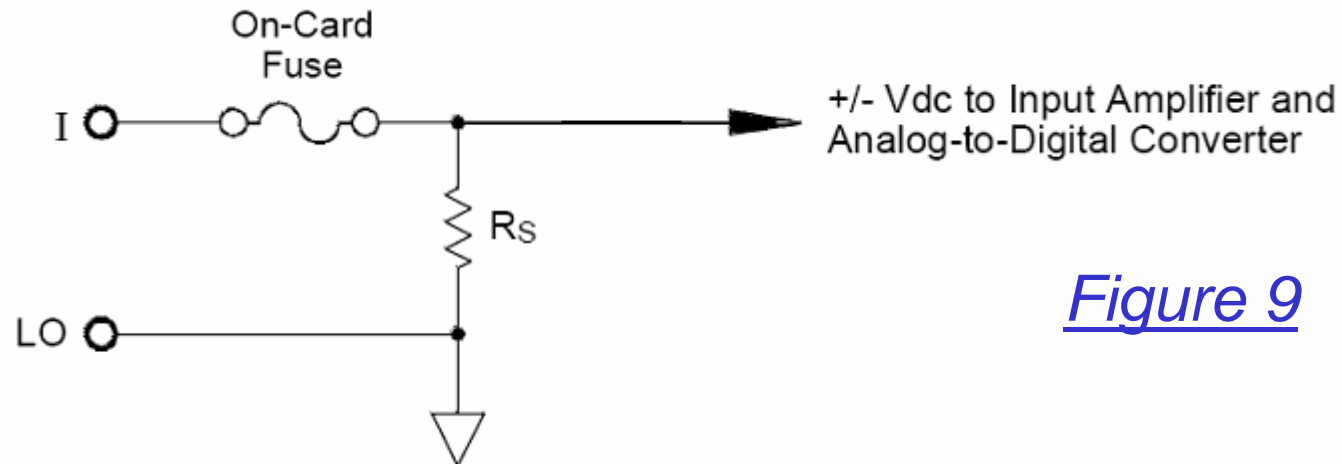


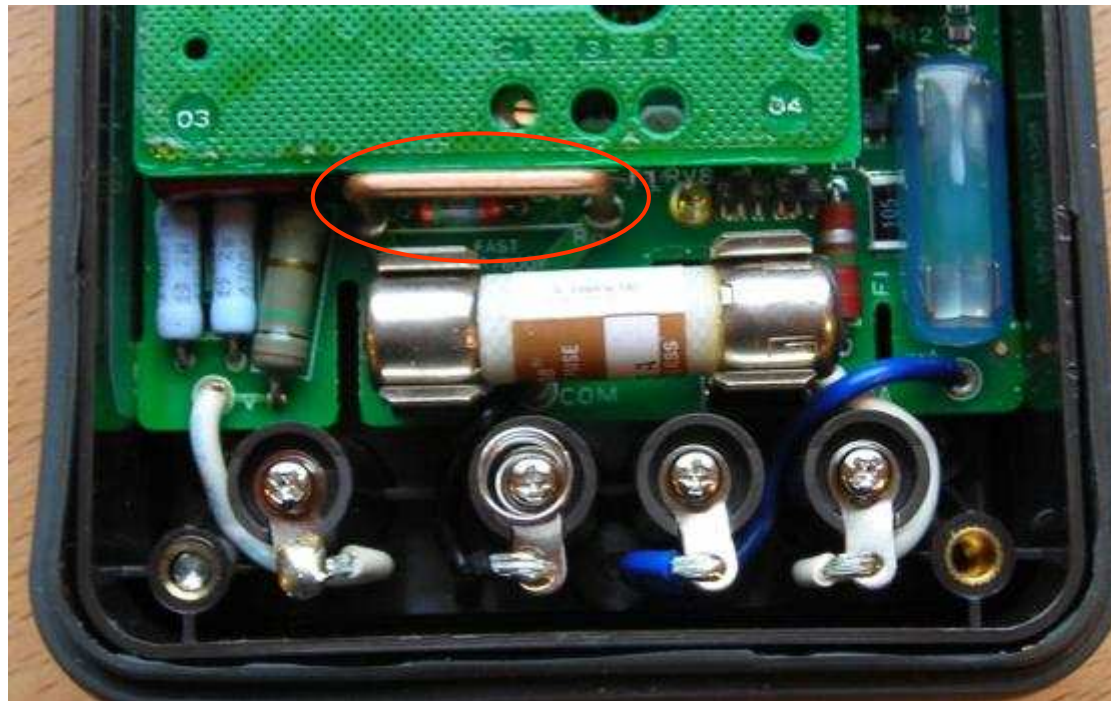
Figure 9

Loi d'Ohm : $I = V / R_S$

Résistance d'entrée : R_S

Shunt du calibre 10 A (HP973A)

$R_S \# 0,05 \Omega$



L'incertitude de mesure du courant dépend de :

- l'incertitude de mesure de la tension
- l'incertitude sur la résistance du shunt

L'incertitude de mesure du courant est donc supérieure à l'incertitude de mesure de la tension.

HP 973A :

V DC : au mieux 0,1 %

A DC : au mieux 0,5 %

3- Mesure de la valeur efficace d'une tension (fonction V AC)

3-1- Conditionnement du signal

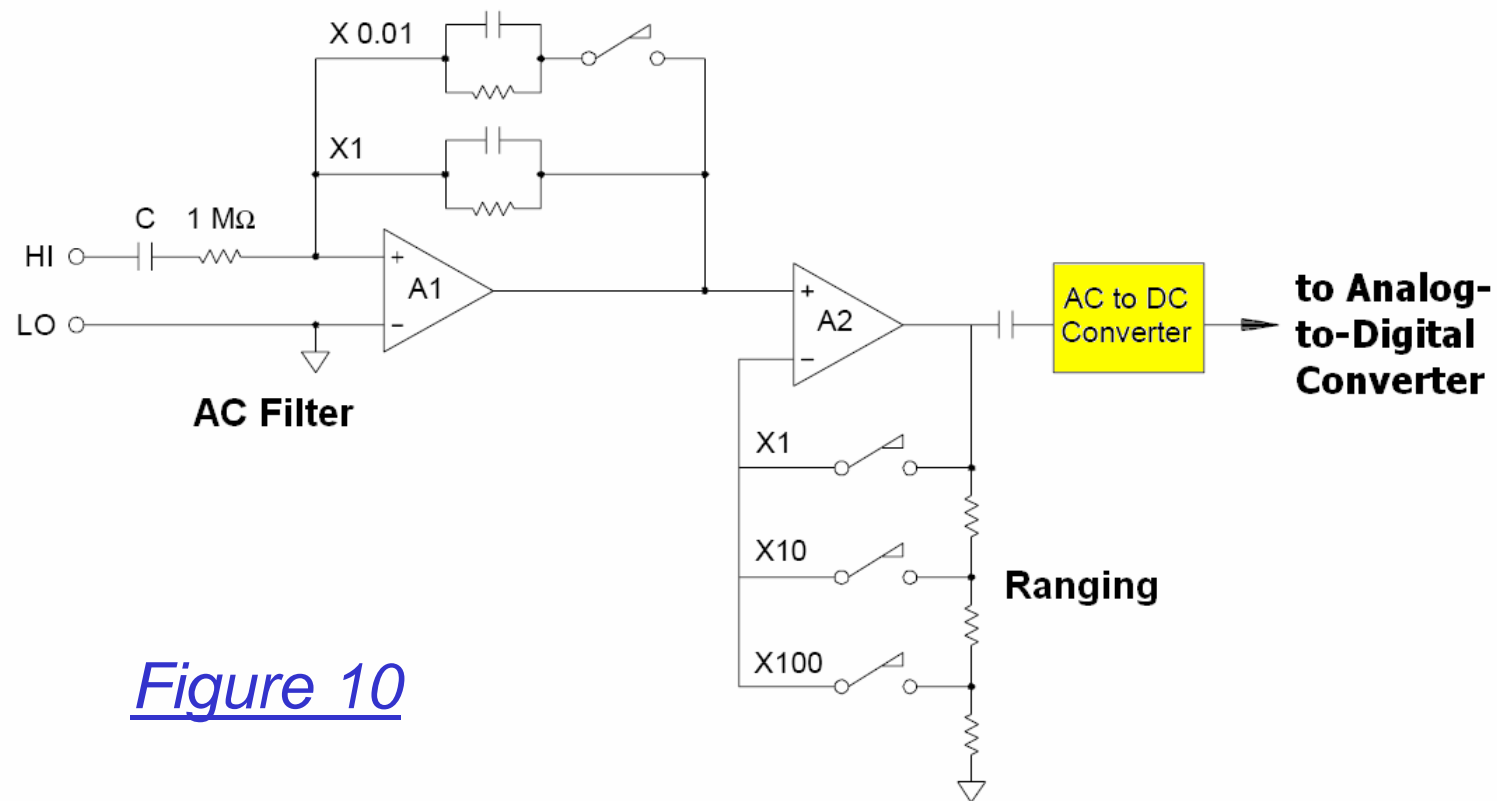
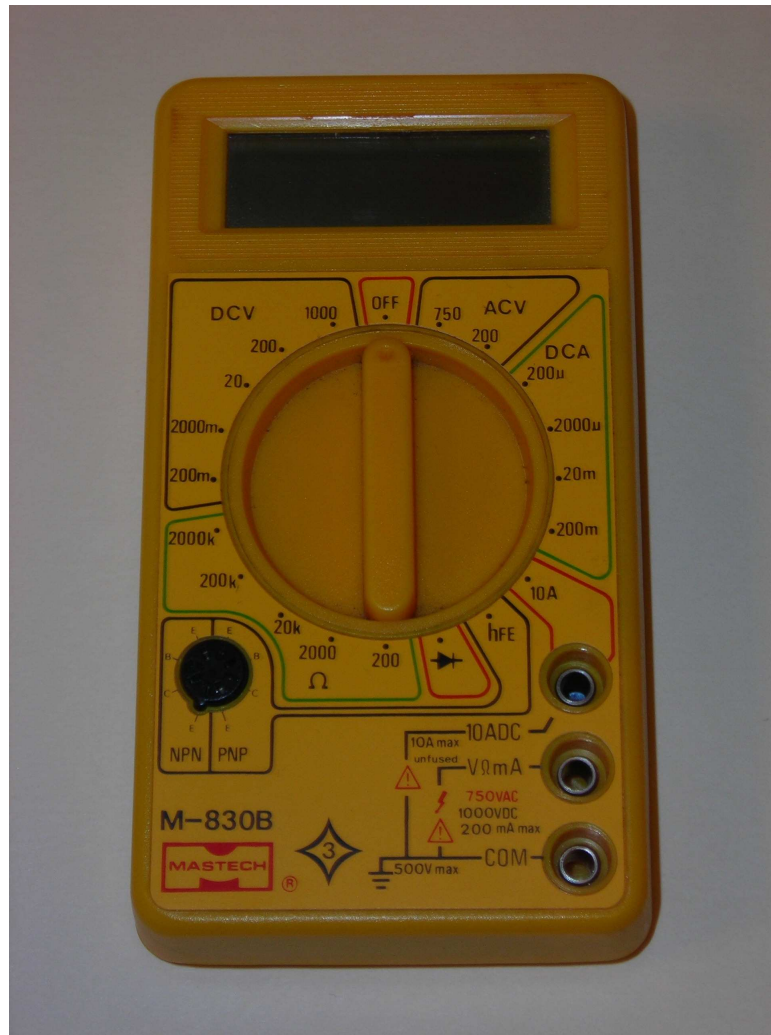


Figure 10

3-2- Convertisseur AC -> DC bas de gamme

Multimètre de bas de gamme (< 10 euros)



Mesure de la tension efficace :

1) d'un sinus alternatif 50 Hz, 20 V crête à crête.

Valeur lue : **7,1 V**

2) d'un créneau alternatif 50 Hz, 20 V crête à crête

Valeur lue : **11,1 V**

Comparons aux valeurs théoriques :

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\langle u^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T u^2(t) dt}$$

$$1) \quad U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07 \text{ V}$$

$$2) \quad U_{\text{eff}} = \sqrt{\langle u^2 \rangle} = \sqrt{\langle 100 \rangle} = 10 \text{ V} \quad 11 \% \text{ d'erreur !}$$

La mesure de valeur efficace est valable uniquement pour les signaux sinusoïdaux alternatifs.

Ceci est lié à la technique de mesure :

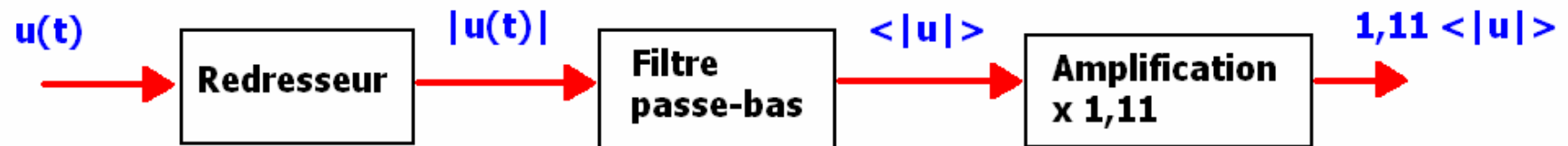


Figure 11 : Convertisseur AC->DC

En effet, pour un signal sinusoïdal alternatif :

$$\langle |u| \rangle = \frac{2}{\pi} \hat{U}$$

$$F = \frac{U_{\text{eff}}}{\langle |u| \rangle} = \frac{\hat{U}}{\frac{2}{\pi} \hat{U}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11 \text{ (facteur de forme)}$$

$$\Rightarrow U_{\text{eff}} = 1,11 \langle |u| \rangle$$

Cette relation est fautive si la forme n'est pas sinusoïdale.

Ainsi, pour un créneau :

$$1,11 \cdot \langle |\pm 10\text{V}| \rangle = 1,11 \times 10 = 11,1 \text{ V} \\ \neq 10 \text{ V}!$$

3-3- Multimètre True RMS (TRMS)

a) TRMS AC

Mesure la valeur efficace “vraie” de la composante alternative.

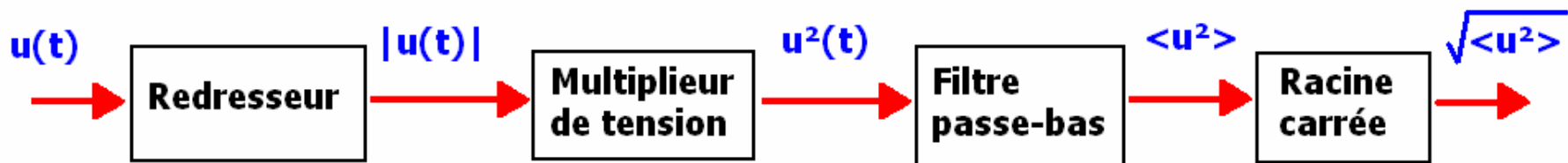
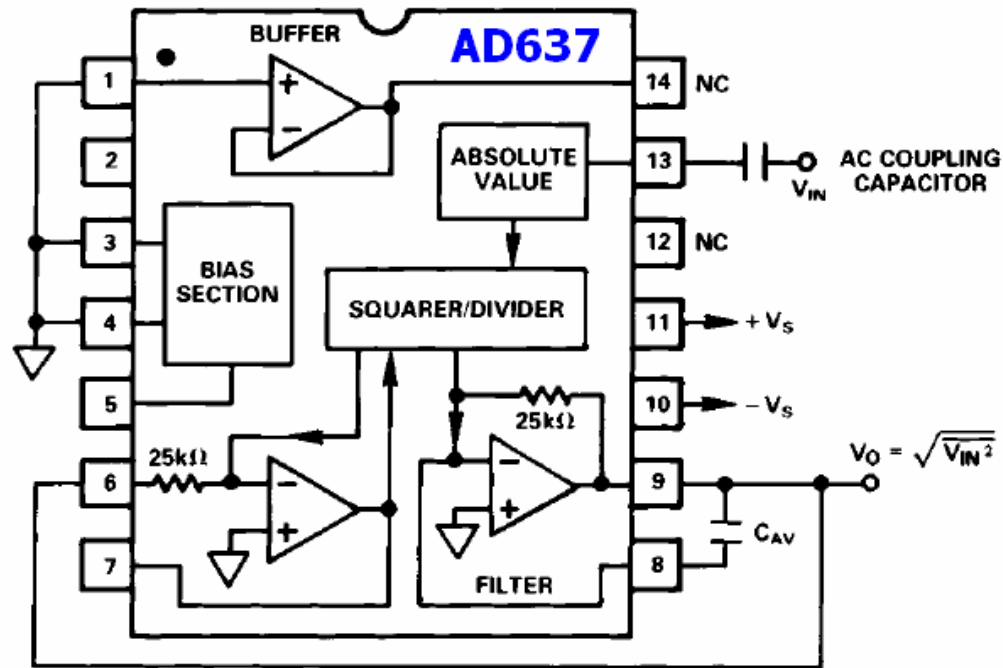


Figure 12 : Convertisseur AC->DC

$$U_{ACeff} = \sqrt{\langle u_{AC}^2 \rangle}$$

Figure 13

AD637 High Precision, Wide-Band RMS-to-DC Converter

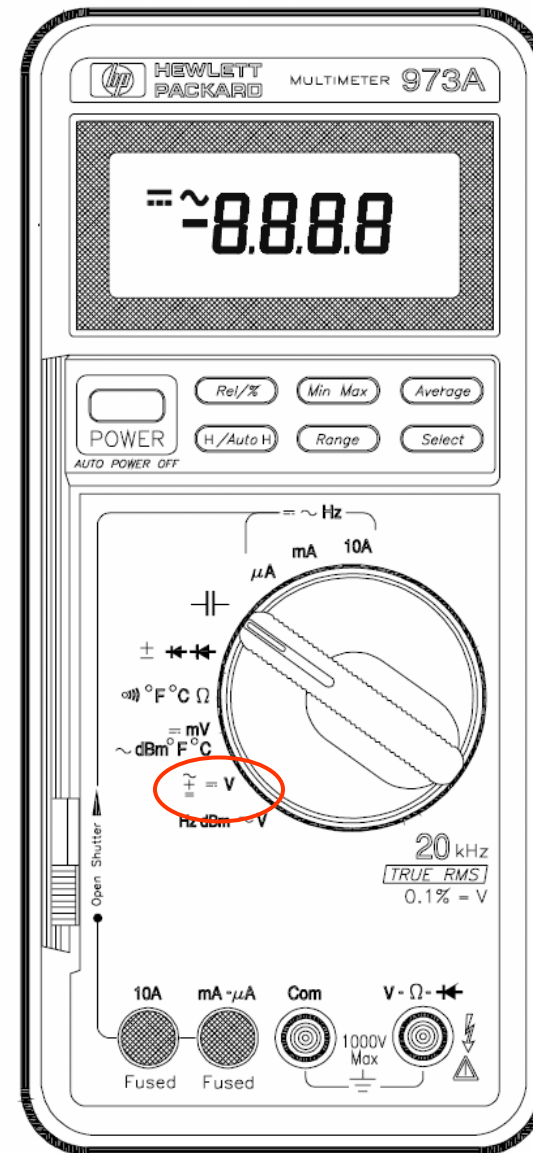


b) TRMS DC+AC

Le processeur effectue le calcul suivant :

$$U_{\text{eff}}^2 = \langle u \rangle^2 + U_{\text{AC eff}}^2$$

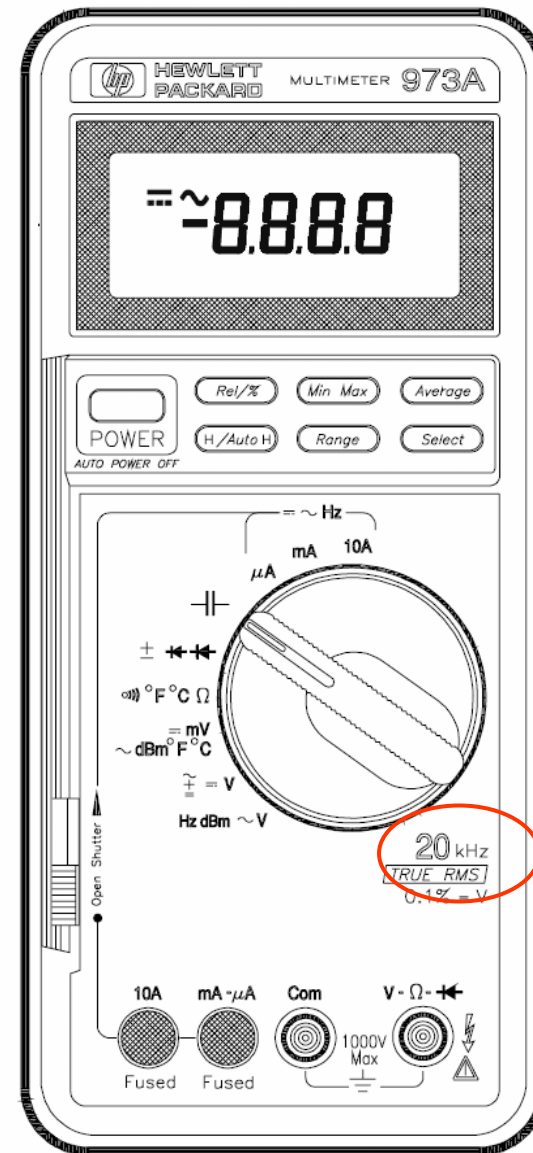
$\langle u \rangle$ est obtenue avec V DC.



3-4- Bande passante

40 Hz - 20 kHz (HP 973A)

3 Hz - 300 kHz (Agilent 34401A)



4- Mesure de la valeur efficace d'un courant (fonction A AC)

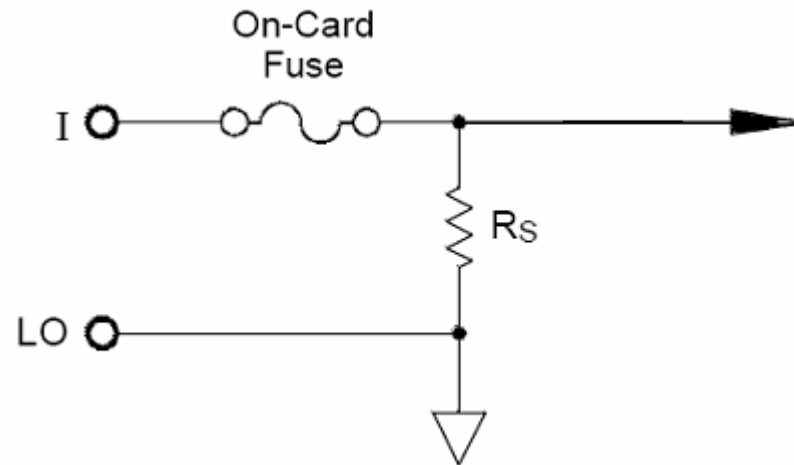


Figure 9

Loi d'Ohm : $I_{\text{eff}} = V_{\text{eff}} / R_S$

L'incertitude de mesure de la valeur efficace est supérieure à l'incertitude de mesure de la valeur moyenne (à cause de l'incertitude du convertisseur AC -> DC).

HP973A :

V DC : au mieux 0,1 %

TRMS V AC : au mieux 0,7 %

TRMS V DC + AC : au mieux 1 %

A DC : au mieux 0,5 %

TRMS A AC : au mieux 1,5 %

5- Mesure de résistances

5-1- Technique 2 fils (Ω 2W)

Source interne de courant continu I.

Loi d'Ohm : $R = V / I$

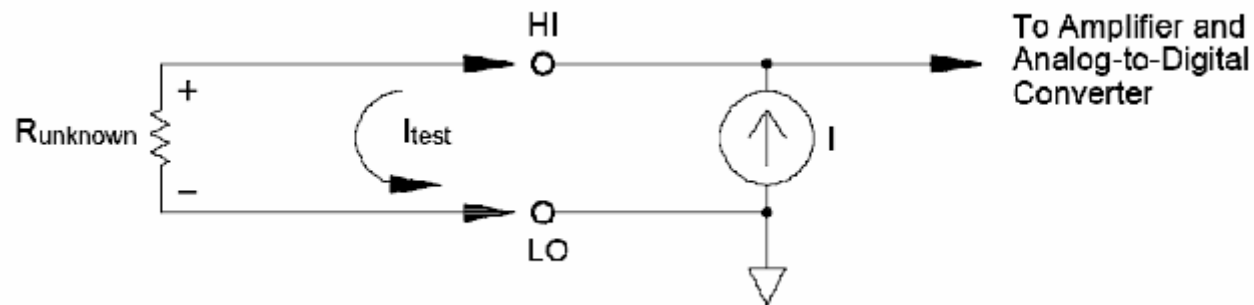


Figure 14

Technique inadaptée à la mesure des faibles résistances
(à cause de la résistance des câbles de mesure).

5-2- Technique 4 fils (Ω 4W)

Elle résout l'imperfection de la technique 2 fils :

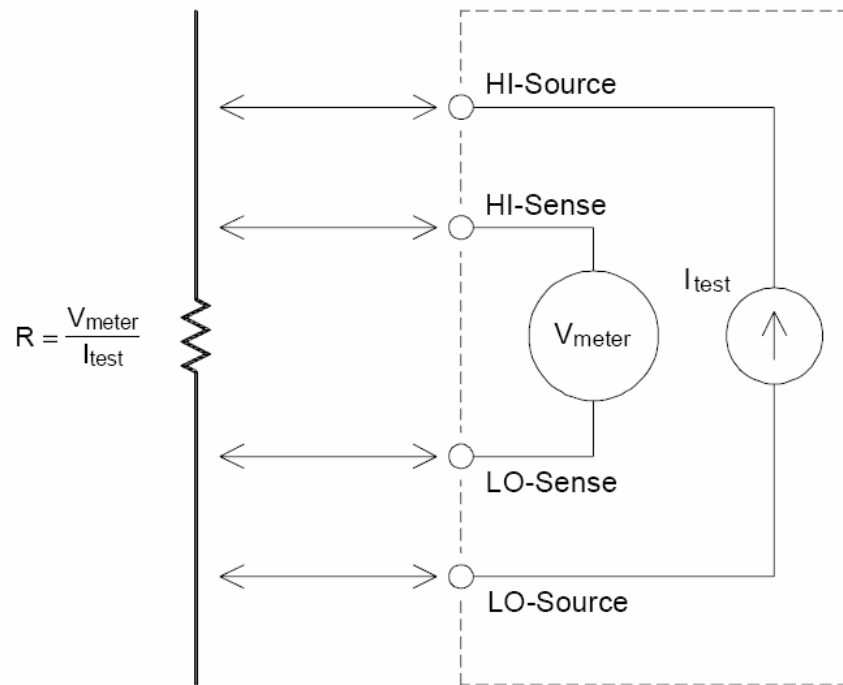
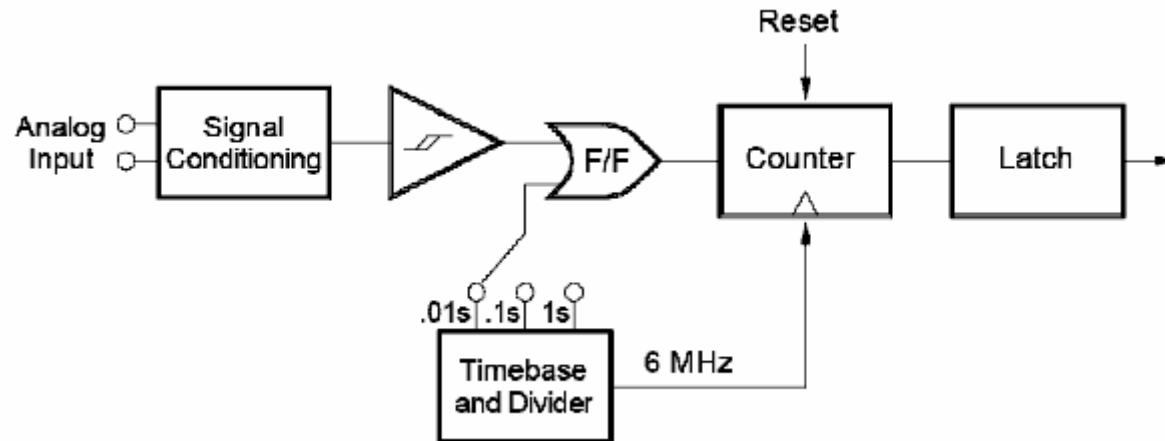


Figure 15



Facade avant
Agilent 34401A

6- Mesure de fréquence et de période



Principe : Comptage pendant une durée de 1 seconde.

L'incertitude de mesure est liée à l'incertitude de l'horloge à quartz du processeur.

HP 973A : au mieux 0,02 %

Chapitre 2 – Incertitudes de mesures

1- Incertitudes de mesure d'un multimètre numérique

Exemple : Mesure d'une tension continue (avec HP973A) :

Valeur lue : 1,006 V

Une mesure n'a de sens que si on lui associe une incertitude.

Incertitude absolue de l'appareil de mesure (d'après spécifications du constructeur) :

$$0,1 \% \text{ de } 1,006 \text{ V} + 1 \times 1 \text{ mV} = 2 \text{ mV}$$

Incertitude relative :

$$2 \text{ mV} / 1,006 \text{ V} = 0,20 \%$$

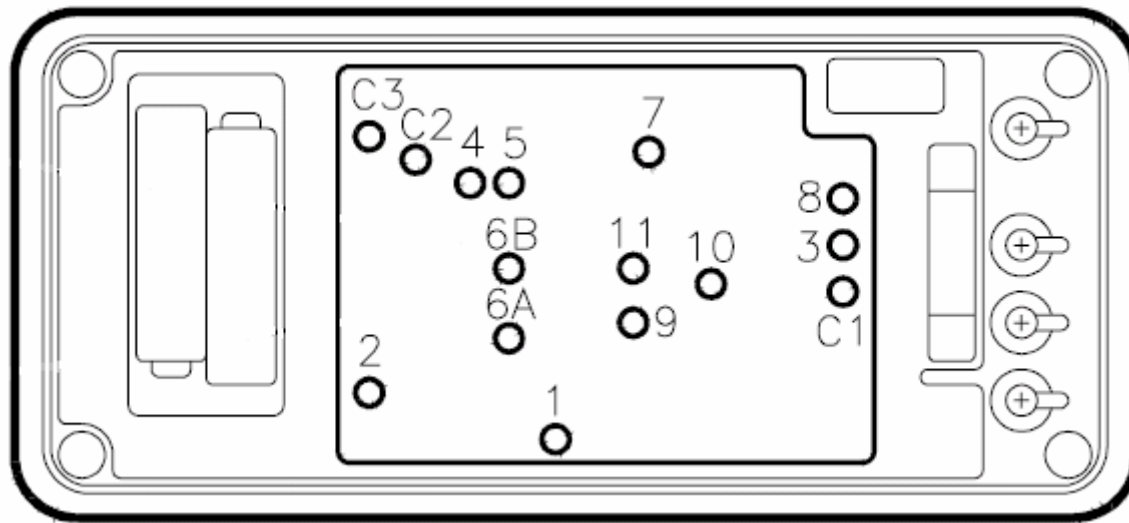
Les spécifications du constructeur n'ont de sens que si le multimètre est périodiquement vérifié.

Cela se fait dans un laboratoire de Métrologie électrique (de préférence accrédité COFRAC) avec délivrance d'un certificat d'étalonnage ou d'un constat de vérification.

Si le multimètre est hors spécifications, il doit être :

- ajusté
- réparé
- déclassé
- ou réformé.





*Position des potentiomètres
d'ajustage du HP973A*

Par la suite, on dispose d'un multimètre conforme aux spécifications du constructeur.

- Niveau de confiance

Le constructeur indique que les spécifications sont données avec un niveau de confiance de 95 % (facteur d'élargissement : $k = 2$).

$$(1,006 \pm 0,002) \text{ V} \quad k = 2$$

Niveau de confiance de 68 % ($k = 1$) :

$$(1,006 \pm 0,001) \text{ V} \quad k = 1$$

Niveau de confiance de 99 % ($k = 3$) :

$$(1,006 \pm 0,003) \text{ V} \quad k = 3$$

A.N. On mesure la tension sur le calibre 40 V : 01,01 V

$$0,1 \% + 1 \times 10 \text{ mV} \approx 10 \text{ mV}$$

$$(1,01 \pm 0,01) \text{ V} \quad k = 2$$

Calibre 400 V : 001,1 V

$$0,1 \% + 1 \times 100 \text{ mV} \approx 100 \text{ mV}$$

$$(1,1 \pm 0,1) \text{ V} \quad k = 2$$

Calibre 1000 V : 0001 V

$$0,2 \% + 1 \times 1 \text{ V} \approx 1 \text{ V}$$

$$(1 \pm 1) \text{ V} \quad k = 2$$

Conclusion ?

Pour une meilleure précision, il faut utiliser le calibre immédiatement supérieur (ici 4 V).

2- Loi de propagation des incertitudes

- Exemple :

Puissance consommée par une résistance :

$$I_{\text{eff}} = 101,2 \text{ mA (50 Hz)}$$

$$R = 97,7 \Omega$$

(mesures avec un HP973A)

$$P = ?$$

$$P = R I_{\text{eff}}^2 = 97,7 \times 0,1012^2 = 1,0006 \text{ W}$$

Incertitude sur P ?

Elle dépend des incertitudes sur R et I_{eff} .

$$u(I_{\text{eff}}) = 1,5 \% + 4 \times 0,1 \text{ mA} = 1,9 \text{ mA} \quad (k = 2)$$

$$u(I_{\text{eff}}) / I_{\text{eff}} = 1,9 \%$$

$$u(R) = 0,2 \% + 1 \times 0,1 \Omega = 0,3 \Omega \quad (k = 2)$$

$$u(R) / R = 0,3 \%$$

- Formule générale (grandeurs indépendantes) :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$
$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u^2(x_n)}$$

Cas particuliers :

$$\begin{cases} y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \\ u(y) = \sqrt{a_1^2 u^2(x_1) + \dots + a_n^2 u^2(x_n)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} y = a \cdot x_1^{p_1} \cdot x_2^{p_2} \cdot \dots \cdot x_n^{p_n} \\ \frac{u(y)}{y} = \sqrt{\left(p_1 \cdot \frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2 + \dots + \left(p_n \cdot \frac{u(x_n)}{x_n}\right)^2} \end{cases}$$

A.N. $P = f(R, I_{\text{eff}}) = R^1 \cdot I_{\text{eff}}^2$

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\left(1 \cdot \frac{u(R)}{R}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{u(I_{\text{eff}})}{I_{\text{eff}}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{(1 \cdot 0,3)^2 + (2 \cdot 1,9)^2} = 3,8 \%$$

$$P = (1,001 \pm 0,038) \text{ W} \quad (k = 2)$$

Autre méthode :

$$\begin{aligned}u(P) &= \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial R}\right)^2 u^2(R) + \left(\frac{\partial P}{\partial I_{\text{eff}}}\right)^2 u^2(I_{\text{eff}})} \\&= \sqrt{(I_{\text{eff}}^2)^2 u^2(R) + (2 \cdot R \cdot I_{\text{eff}})^2 u^2(I_{\text{eff}})} \\&= \sqrt{(0,1012)^4 0,3^2 + (2 \cdot 97,7 \cdot 0,1012)^2 0,0019^2} \\&= 0,038 \text{ W} \quad (k = 2)\end{aligned}$$

3- Méthode de calcul préconisée par le COFRAC

D'après le document n°2021 (révision 02).

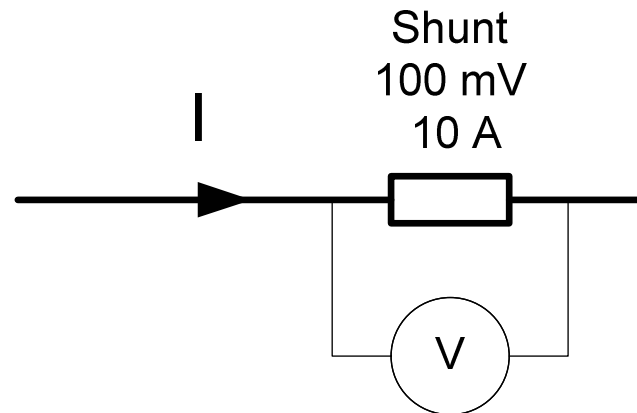
Cette méthode s'inspire du "GUM" (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure NF X 07-020).

3-1- Les incertitudes-types

- de type A : estimées statistiquement (répétabilité)
- de type B :
 - BR : liées aux raccordements avec les étalons (extraites des certificats d'étalonnage)
 - BL : liées aux montages
 - influence de la température
 - résolution numérique
 - influence des câbles ...

3-2- Evaluation des incertitudes-types

Exemple : mesure d'un courant continu avec un shunt



Local climatisé : $(23 \pm 3) \text{ } ^\circ\text{C}$

$$I = V / R$$

- Incertitude-type A1

L'opérateur réalise une série de 10 mesures :

<i>100,13</i>	<i>99,98</i>	<i>99,94</i>
<i>100,09</i>	<i>100,20</i>	<i>99,93</i>
<i>99,98</i>	<i>99,90</i>	<i>100,06</i>
<i>100,15</i>		

(en mV)

Valeur moyenne :

100,036 mV

Ecart-type expérimental :

$$u(v) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v - \bar{v})^2} = 0,104 \text{ mV} \quad (k = 1)$$

Ecart-type expérimental de la moyenne :

$$u(\bar{v}) = \frac{u(v)}{\sqrt{n}} = 0,033 \text{ mV} \quad (k = 1)$$

$$u(\bar{v}) / \bar{v} = 0,033 \%$$

$$I = V / R$$

$$\frac{u(I)}{I} = \frac{u(V)}{V} = 0,033 \%$$

$$A1 = 0,033 \% \quad (k = 1)$$

- BR1 : Ce voltmètre est conforme aux spécifications du constructeur : $0,05 \% + 4$ (k = 2)

$$0,0005 \times 100,036 \text{ mV} + 4 \times 10 \text{ } \mu\text{V} = 90 \text{ } \mu\text{V} \text{ (k = 2)}$$

$$45 \text{ } \mu\text{V} \text{ (k = 1)}$$

$$BR1 = 100 \times 45 \text{ } \mu\text{V} / 100,036 \text{ mV}$$

$$= 0,045 \% \text{ (k = 1)}$$

- BR2 : Le certificat d'étalonnage du shunt indique :

$$R = 0,010\ 018\ \Omega \pm 6\ \mu\Omega \quad (k = 2)$$

$$T = 23\ \text{°C}$$

$$I = V / R$$

$$BR2 = 100 \times 3\ \mu\Omega / 0,010\ 018\ \Omega$$

$$= 0,03\ \% \quad (k = 1)$$

- BL1 : Influence de la température

Le constructeur donne la coefficient de température du shunt : $\alpha = 5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

Avec une loi de probabilité de la température en arcsinus :

Local climatisé : $(23 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$

$$\frac{3^\circ\text{C}}{\sqrt{2}} = 2,12 \text{ }^\circ\text{C} \quad (k = 1)$$

$$R(23 + 2,12 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,010\,018(1 + \alpha \cdot 2,12) = 0,010\,019 \text{ } \Omega$$

$$\text{BL1} = 100 \frac{0,010\,019 \text{ } \Omega - 0,010\,018 \text{ } \Omega}{0,010\,018 \text{ } \Omega} = 100 \cdot \alpha \cdot 2,12$$

$$= 0,011 \% \quad (k = 1)$$

- BL2 : Résolution numérique du voltmètre

Avec une loi de probabilité rectangulaire :

$$\frac{10\mu\text{V}}{\sqrt{12}} \approx 3\mu\text{V} \quad (k=1)$$

$$\text{BL2} = 100 \frac{3\mu\text{V}}{100,036 \text{ mV}}$$
$$= 0,003 \% \quad (k=1)$$

3-3- Combinaison des incertitudes-types

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots}$$
$$BR = \sqrt{BR_1^2 + BR_2^2 + \dots}$$

Les incertitudes BL_i sont considérées comme corrélées :

$$BL = BL_1 + BL_2 + \dots$$

Au total :

$$u = \sqrt{A^2 + BL^2 + BR^2}$$

3-4- Bilan d'incertitudes

Nature de l'incertitude	Incertitude relative (k=1)
A Répétabilité	
BR1 Etalonnage voltmètre	
BR2 Etalonnage shunt	
BR	
BL1 Influence de la température	
BL2 Résolution du voltmètre	
BL	
u	

$$A = A_1 = 0,033 \%$$

$$BR = \sqrt{BR_1^2 + BR_2^2} = \sqrt{0,045^2 + 0,03^2} = 0,054 \%$$

$$BL = BL_1 + BL_2 = 0,011 + 0,003 = 0,014$$

$$u = \sqrt{A^2 + BL^2 + BR^2} = \sqrt{0,033^2 + 0,014^2 + 0,054^2}$$

$$u = 0,065 \% \quad (k = 1)$$

Nature de l'incertitude	Incertitude relative (k=1)
A Répétabilité	0,033 %
BR1 Etalonnage voltmètre	0,045 %
BR2 Etalonnage shunt	0,03 %
BR	0,054 %
BL1 Influence de la température	0,011 %
BL2 Résolution du voltmètre	0,003 %
BL	0,014 %
u	0,065 %

Incertitude relative élargie : 0,13 % (k = 2)

$$I = 100,036 \text{ mV} / 0,010\ 018 = 9,986 \text{ A}$$

Incertitude absolue élargie : 13 mA (k = 2)

Résultat final : $I = (9,986 \pm 0,013) \text{ A}$ $k = 2$

Bibliographie

➤ www.agilent.com

(Agilent 34970A User's Guide
Agilent 34411A User's Guide)

➤ www.fluke.com

➤ www.intersil.com

➤ www.analog.com

➤ www.cofrac.fr

Guide technique pour un dossier d'accréditation Electricité-
Magnétisme (document COFRAC n°2021 Révision 02)

➤ www.afnor.org

“GUM” : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
(norme NF X 07-020)