

A16 - Instruments de mesures

Erreur et incertitude sur la mesure d'une grandeur

Ce qui suit découle des prescriptions du BIPM (Bureau International des Poids et Mesures, France), reprises par le NIST (National Institute of Standards and Technology, USA).

Erreur systématique ou de manipulation

Quelques considérations théoriques simples faites à propos du mesurage à effectuer permettent d'apprécier l'ordre de grandeur du résultat auquel on peut s'attendre : cela permet souvent d'éliminer les résultats de mesure aberrants, dûs à des appareils défectueux ou à des manipulations erronées (protocole expérimental mal conçu, erreur de câblage, etc...).

Une mesure correcte, c'est-à-dire exempte d'erreur systématique, est dite "juste".

Nombre de chiffres significatifs d'une donnée

- En général, un résultat de mesure donné avec 3 chiffres significatifs suffit pour les mesures ordinaires en électricité. Ce niveau de précision correspond d'une part à la précision d'un appareil de mesure courant ; d'autre part au niveau du bruit électronique (en général $\approx \text{‰}$) qui se superpose à la grandeur mesurée.

- Il est conseillé d'effectuer les calculs intermédiaires avec un nombre de chiffres significatifs plus élevé (les calculatrices font cela sans problème), pour éviter les arrondis de calcul. Par contre il faut ensuite arrondir le résultat final au même nombre de chiffres significatifs que celui adopté lors de la mesure initiale.

- Un résultat ne peut pas être plus précis que la moins précise des mesures qui a permis son calcul.

- Une incertitude est donnée avec au plus deux chiffres significatifs et n'est jamais écrite avec une précision plus grande que le résultat.

Évaluation de l'incertitude de mesure par une méthode statistique ("méthode de type A")

→ Voir cours d'instrumentation

Évaluation de l'incertitude de mesure sur une mesure unique ("méthode de type B")

La **mesure** x d'une **grandeur** X (ou "mesurande") n'est jamais exacte, mais connue à une **erreur** $\pm \varepsilon$ près. On appelle **encadrement** l'intervalle $[x_{\min}, x_{\max}] = [x - \varepsilon, x + \varepsilon]$.

En outre, cette connaissance sur l'erreur possible est elle-même incertaine, ce qui implique une **incertitude** sur la précision estimée de la mesure. Cette incertitude est déduite d'une loi de probabilité que l'opérateur se donne a priori, à partir des informations dont il dispose sur la situation expérimentale (précision des appareils de mesure, protocole de mesurage, nature aléatoire ou non du mesurande, capacité de l'opérateur, etc).

Le calcul s'effectue en quatre étapes :

- *Étape 1 : estimation des erreurs de mesure*

a) cas d'un appareil analogique à aiguille :

- lecture de x : si l'échelle de graduation comporte N divisions, et si la lecture indique n divisions, alors : $x = n \times \frac{\text{calibre}}{N}$

- erreur ε : elle est fonction de la *classe* de l'appareil :

$$\varepsilon = \frac{\text{classe} \times \text{calibre}}{100}$$

Exemple : calibre 10V ; 200 divisions ; classe 0,5 ; mesure : $U = 5,25 \text{ V} \Rightarrow \varepsilon = \frac{0,5 \times 10}{100} = 0,05 \text{ V}$

b) cas d'un appareil numérique à affichage digital :

- lecture de x : pour un appareil à k digits ($k = 5$ par ex.), le digit de poids fort n'est souvent que partiellement utilisé (par ex. il ne peut prendre que les valeurs 0 ou 1). On dit que l'appareil affiche $k-1$ digits et demi (pour $k = 5$ par ex. : 4 digits 1/2).

- erreur ε : elle est fonction de la précision p de l'appareil (exprimée en %) dépendant du calibre employé, et d'un nombre n fixé de digits :

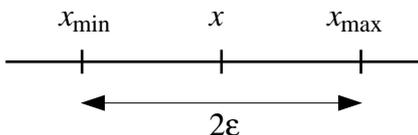
$$\varepsilon = \frac{p \cdot x}{100} + n$$

Exemple : $p = 0,5\%$; $n = 4$; mesure : $U = 5.2485 \text{ V} \Rightarrow \varepsilon = 5,2485 \times 0,005 + 0,0004 \approx 0,027 \text{ V}$

c) autres cas : estimation de l'erreur par encadrement. Pour tout autre type de mesure (par ex. : mesurage au pied à coulisse, mesurage à l'aide d'un oscillographe, etc), on estime les limites x_{\min} et x_{\max} de la valeur mesurée, dont on déduit :

$$x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$$

$$X = x \pm \varepsilon$$


Exemples :

- mesures de la tension, de la période, de la phase d'un signal sinusoïdal sur l'écran d'un oscilloscope. Dans ce cas, les erreurs sont d'origine paramétrique (respectivement : précision de l'amplification verticale, de la base de temps, de la synchronisation) ou graphiques (notamment : épaisseur de la trace, ajustement correct de sa position sur l'écran par rapport au réticule). Manifestement, les secondes sont prépondérantes par rapport aux premières, ce qui impose d'estimer l'erreur par encadrement.

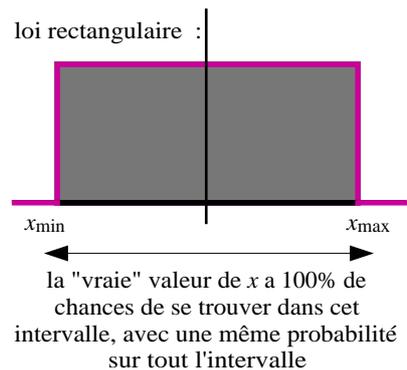
- mesure de la fréquence de résonance d'un système électrique du second ordre à l'aide d'un voltmètre et d'un fréquencemètre. Il est clair que cette mesure est plus ou moins précise selon que la courbe de résonance est plus aiguë ou au contraire plus "molle" : il peut être délicat, dans ce dernier cas, de définir correctement les extrémités de l'intervalle d'encadrement de la mesure. Solution : changer de méthode de mesure !

- on applique aussi ce type de raisonnement aux composants marqués. Par exemple, une résistance $r = 1000 \Omega$ de catégorie de précision 1% est telle que $990 \Omega \leq r \leq 1010 \Omega$, avec $\varepsilon = 10 \Omega$.

- Étape 2 : calcul de l'incertitude-type (ou "écart-type")

On suppose que la loi de probabilité est **uniforme** (ou "rectangulaire"), c'est-à-dire que la probabilité pour que l'intervalle $[x_{\min}, x_{\max}]$ contienne la "vraie" valeur de la grandeur X est égale à 1 (pas de valeur possible en dehors de cet intervalle), et que, réciproquement, toutes les valeurs entre x_{\min} et x_{\max} sont réputées a priori équiprobables. Dans ce cas, on montre que l'incertitude-type vaut :

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{\sqrt{3}}$$



- *Étape 3 : cas d'une grandeur composée*

Cette étape ne concerne que les grandeurs dépendant de plusieurs variables (par ex., une résistance $R = U / I$ mesurée par la méthode volt-ampèremétrique).

Une méthode simple et suffisamment fiable consiste à calculer les bornes de l'intervalle d'encadrement de la grandeur inconnue à partir des bornes des intervalles d'encadrement des grandeurs qui la composent. Pour l'exemple cité, connaissant les intervalles $[u_{\min}, u_{\max}]$ et $[i_{\min}, i_{\max}]$, il vient :

$$[r_{\min}, r_{\max}] = \left[\frac{u_{\min}}{i_{\max}}, \frac{u_{\max}}{i_{\min}} \right]$$

$$r = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{2}$$

$$R = r \pm \varepsilon$$

Une méthode plus rigoureuse consiste à utiliser un calcul que nous ne détaillerons pas ici, qui aboutit notamment aux formules suivantes :

somme algébrique : $g = a_1 x_1 \pm a_2 x_2 \pm \dots \Rightarrow \sigma_g^2 = a_1^2 \sigma_1^2 + a_2^2 \sigma_2^2 + \dots$

produit ou rapport : $g = \frac{x_1 x_2}{x_3} \Rightarrow \frac{\sigma_g^2}{g^2} = \frac{\sigma_1^2}{x_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{x_2^2} + \frac{\sigma_3^2}{x_3^2}$

- *Étape 4 : calcul de l'encadrement pour un taux de confiance donné*

En dehors des imprécisions dues à l'appareillage ou à la lecture des indications, de nombreux facteurs peuvent affecter une mesure : bruit électronique, parasites de type CEM, influence de la température, etc. Ces facteurs sont aléatoires. On suppose cette fois que la loi de probabilité de la distribution des erreurs qu'ils entraînent est **gaussienne**. On peut seulement dire que la "vraie" valeur de x a statistiquement plus de chance de se trouver vers le milieu de l'intervalle $[x_{\min}, x_{\max}]$ que sur ses bords. Mais cette valeur peut aussi se trouver en dehors de cet intervalle avec une probabilité non nulle ! On montre que l'incertitude Δx vaut :

$$\Delta x = \sigma \text{ avec une probabilité } p = 68\%$$

$$\Delta x = 2\sigma \text{ avec une probabilité } p = 95\%$$

$$\Delta x = 2,57\sigma \text{ avec une probabilité } p = 99\%$$

où p est le taux de confiance.

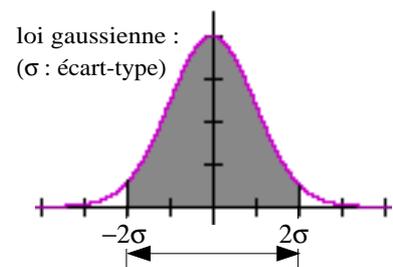
On note :

$$X = (x \pm \Delta x)_{p\%}$$

Cela signifie, avec $p = 68\%$ par ex. : il y a environ 2 chances sur 3 ($2/3 \cong 0,68$) pour que la grandeur X ait une valeur comprise dans l'intervalle $[x - \sigma, x + \sigma]$.



Cette dernière étape n'est pas obligatoire : dans une situation de mesurage simple et bien maîtrisée, comme par ex. la mesure de la fréquence d'un signal périodique stable à l'aide d'un fréquencemètre numérique, il n'y a pas de raison a priori de mettre en doute l'indication fournie par l'appareil de mesure, à la précision de celui-ci près. Dans ce cas, il est recommandé de s'arrêter à l'étape 1 (ou à l'étape 3 si la grandeur est composée).

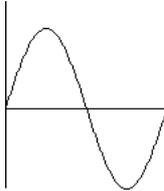
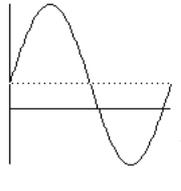
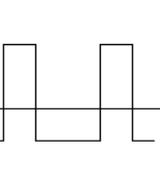


loi gaussienne :
(σ : écart-type)

la "vraie" valeur de x a 95% de chances de se trouver dans l'intervalle $[-2\sigma, +2\sigma]$

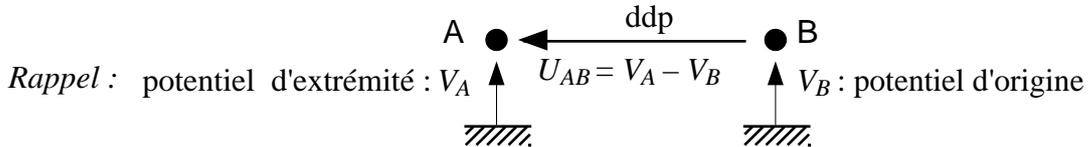
Mesure des tensions : voltmètre

• **Rappels des notations** (cf §A11)

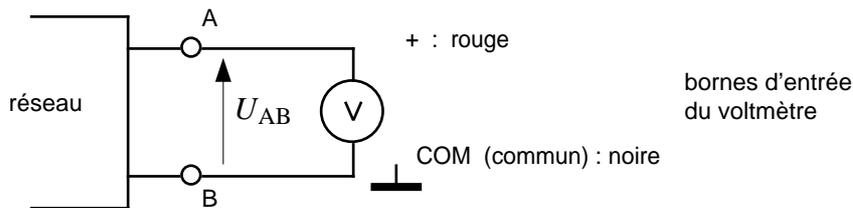
		alternatif sinusoïdal pur	sinusoïdal avec composante continue	périodique de forme quelconque
$u(t)$	Signal périodique			
U	Amplitude			
U_{\min}, U_{\max}	valeurs minimale, maximale			
U_{PEAK}	valeur crête			$U_{PEAK} = U_{\max}$
U_{pp} ou \hat{u}	Amplitude crête à crête (<i>Peak-to-peak</i>)			$U_{pp} = U_{\max} - U_{\min}$
$\langle u \rangle$ ou u ou U_{DC}	valeur moyenne ou composante continue			$\langle u \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$
U_{eff} ou U_{RMS} ou U_{AC+DC}	valeur efficace vraie (<i>RMS</i>)			$U_{eff} = \sqrt{\langle u^2 \rangle}$
$u_{ac}(t)$	Composante alternative			$u_{ac}(t) = u(t) - \langle u \rangle$
U_{AC}	valeur efficace de la composante alternative			$U_{AC} = \sqrt{\langle u_{ac}^2 \rangle}$
	 Théorème : $U_{eff}^2 = U_{DC}^2 + U_{AC}^2$			

• **Mesure en courant continu**

- Sens de branchement :



Le sens de branchement de l'appareil marque l'orientation de la flèche représentative de la ddp (COM ↔ potentiel d'origine, ⊕ ↔ potentiel d'extrémité).

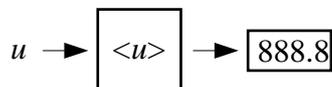


Indications du voltmètre :
 +1 ⇒ $U_{AB} = +1V$; $U_{AB} > 0$
 -2 ⇒ $U_{AB} = -2V$; $U_{AB} < 0$

 **Choix du calibre** : toujours commencer les mesures par le calibre le plus élevé.

- Mesure de $\langle u \rangle = U_{DC}$

Tout multimètre, quel qu'il soit, mesure en position **DC** la composante continue d'un signal en calculant sa valeur moyenne :

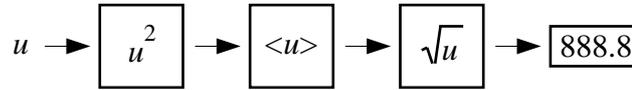


• **Mesure en courant alternatif**

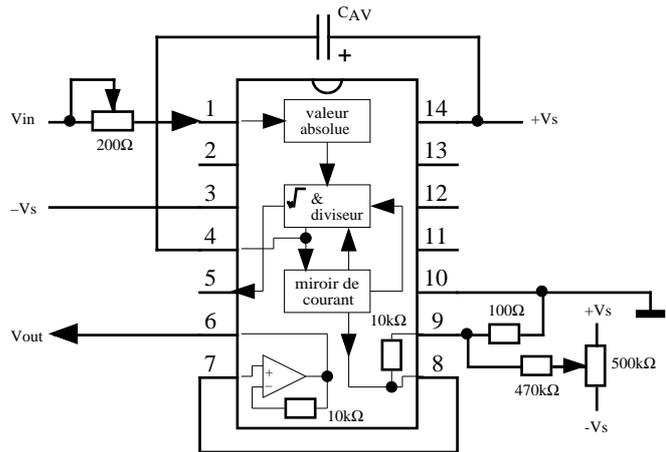
- Mesure de U_{eff} avec un multimètre "RMS vrai" (True RMS)

Instrument : - multimètre analogique ferromagnétique (symbole : )

- multimètre numérique RMS vrai, couplage "AC+DC" (entrée AC, commutateur en position AC+DC) : exécute l'algorithme de calcul de la valeur efficace :

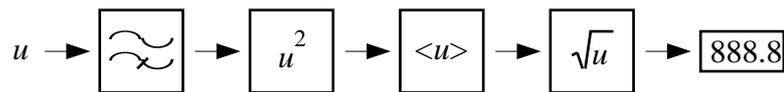


- circuit intégré de mesure de valeur efficace vraie (convertisseur RMS/CC) : même calcul.
Exemple : AD636 de Analog Devices



- Mesure de U_{eff} avec un multimètre "RMS" alternatif uniquement

Instrument : - multimètre numérique RMS vrai, couplage "AC" (entrée AC, commutateur en position AC) : un tel multimètre élimine tout d'abord la composante continue du signal par filtrage passe-haut et ne mesure que la valeur efficace de sa composante alternative, selon l'algorithme précédent :



C'est à l'opérateur, après avoir mesuré $\langle u \rangle$ en couplage DC, de calculer U_{eff} à l'aide de la

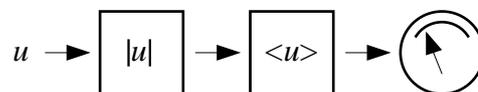
$$U_{\text{eff}} = \sqrt{U_{\text{DC}}^2 + U_{\text{AC}}^2}$$

- Mesure de U_{eff} avec un multimètre non RMS

Instrument : - multimètre analogique magnétoélectrique. Symbole: 

- multimètre analogique
- multimètre numérique non RMS

Un tel appareil ne sait mesurer (en couplage AC) que la valeur efficace d'un signal purement sinusoïdal. Pour cela, il réalise les opérations suivantes :



Or, dans le cas d'un signal purement sinusoïdal, on sait que :

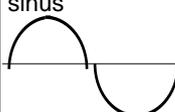
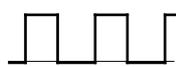
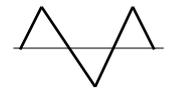
$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \text{ et } \langle |u| \rangle = \frac{2U_{\text{max}}}{\pi} \text{ (val. moyenne du signal redressé)} \Rightarrow U_{\text{eff}} \approx 1,11 \langle |u| \rangle$$

⇒ la valeur moyenne du signal redressé est multipliée par 1,11 pour afficher la valeur efficace de la composante alternative sinusoïdale .

⇒ pour les autres signaux périodiques, non sinusoïdaux, il faut multiplier la valeur lue par un facteur correctif qui tient compte de la forme du signal.

On donne ci-dessous la valeur de ce terme correctif pour divers signaux et pour diverses mesures. Il est évident que cette méthode est limitée aux signaux simples, et qu'elle n'est pas applicable dans le cas général.

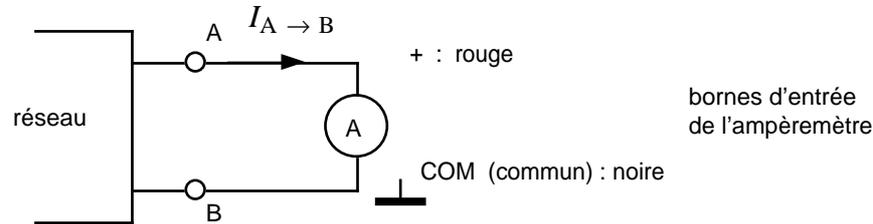
Facteur multiplicatif pour la conversion des mesures

Forme d'onde d'entrée	RMS AC+DC	Comp. DC	crête à crête	Forme d'onde d'entrée	RMS AC+DC	Comp. DC	crête à crête
sinus 	1,000	0,000	2,828	rapport cycl. a = 0,5 	1,274	0,900	1,800
red 2 alt 	2,375	2,138	3,359	rapport cyclique a 	$\frac{0,450}{\sqrt{a(1-a)}}$	$\frac{0,450}{(1-a)}$	$\frac{0,450}{a(1-a)}$
red 1 alt 	1,283	0,817	2,566		1,040	0,000	3,600
carré 	0,900	0,000	1,800				

Mesure des courants : ampèremètre , pince ampèremétrique

• Mesure en DC

Le sens de branchement de l'appareil marque l'orientation du conducteur (le conducteur est orienté de la borne \oplus vers la borne COM).



Indications de l'ampèremètre :

+1 $\Rightarrow I_{A \rightarrow B} = +1A$; $I_{A \rightarrow B} > 0 \Rightarrow$ sens de circulation de I (de A vers B) \equiv orientation du conducteur

-2 $\Rightarrow I_{A \rightarrow B} = -2A$; $I_{A \rightarrow B} < 0 \Rightarrow$ sens de circulation de I (de B vers A) \neq orientation du conducteur



Choix du calibre : *toujours commencer les mesures par le calibre le plus élevé.*

• Mesure en AC : idem voltmètre

• Pince ampèremétrique

Utilisation : mesure d'un courant *sans coupure du circuit*. Mesure de fortes intensités.

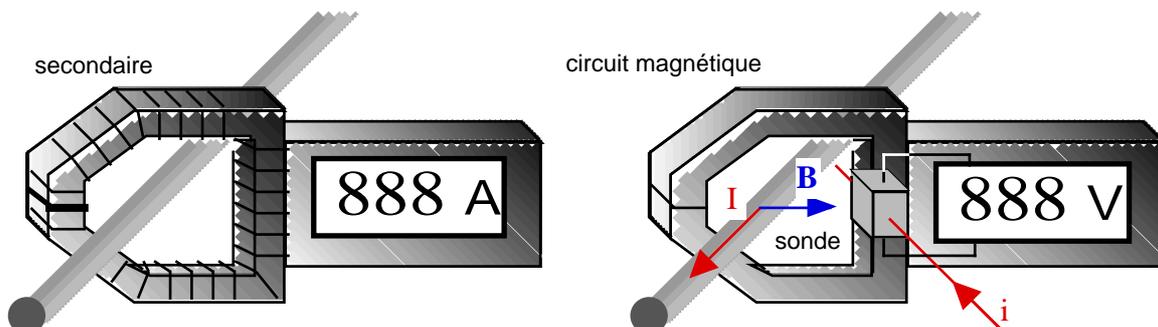
Principes de fonctionnement :

- *en alternatif uniquement* : transformateur d'intensité de rapport $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$. Ici, le conducteur central dans lequel circule le courant à mesurer constitue le primaire, donc $N_1 = 1 \Leftrightarrow m > 1$. Un tel transformateur, où $I_2 < I_1$ et $U_2 > U_1$, est appelé "transformateur d'intensité". Un ampèremètre AC ferme le circuit secondaire (donc $U_2 = 0$).

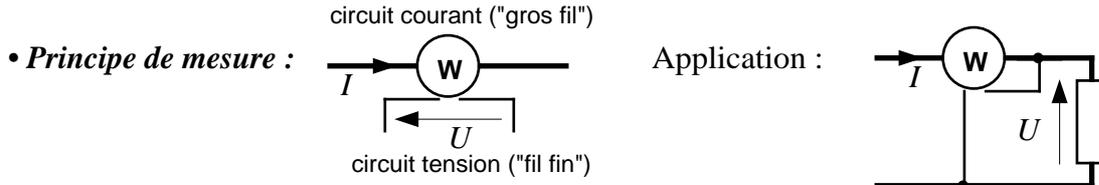


Le secondaire d'un transformateur d'intensité doit toujours être court-circuité. Sinon, si $I_2 \rightarrow 0$, la tension secondaire peut être très élevée à vide, d'où risque d'échauffement du circuit, de claquage, voire d'électrocution (cf § C12 p 19) ...

- *en alternatif et en continu* : cellule à effet Hall (cf §C31). Il s'agit d'une sonde semiconductrice sensible au champ magnétique \mathbf{B} créé par le courant I qui parcourt le conducteur central. Lorsque cette sonde est parcourue par un courant i perpendiculaire à \mathbf{B} , on montre qu'une ddp V proportionnelle à \mathbf{B} et donc à I apparaît sur les faces latérales de la cellule.

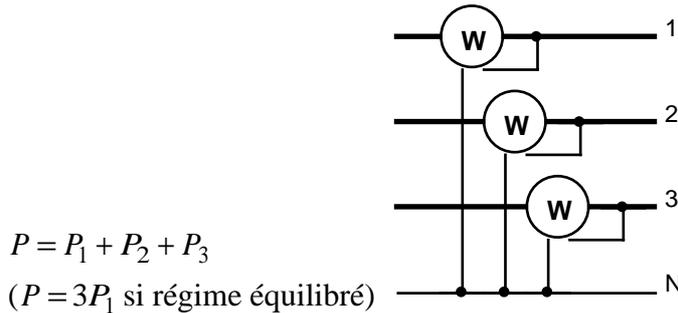


Mesure des puissances : wattmètre

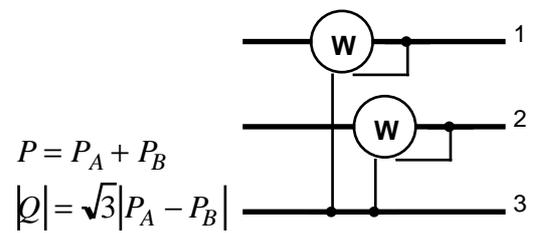


 Choix des calibres : *toujours commencer les mesures par les calibres les plus élevés.*

• **Mesures de puissance en régime triphasé**
avec neutre



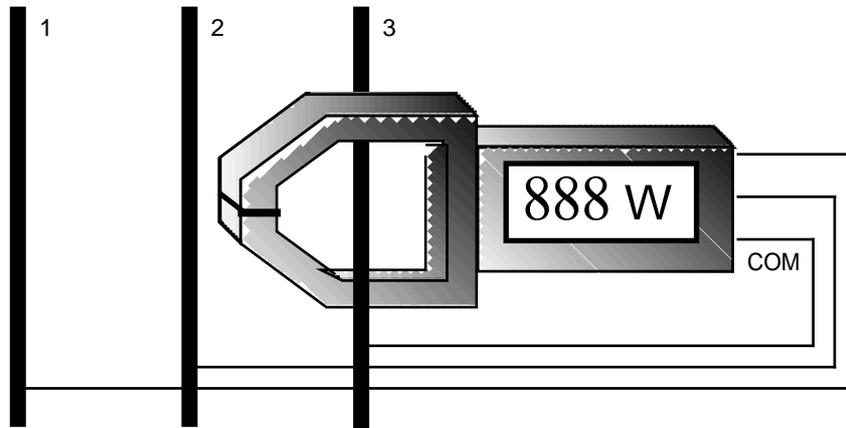
sans neutre



Le signe de Q dépend de la nature de la charge ($Q > 0$ si charge inductive, $Q < 0$ si charge capacitive)

• **Pince multifonction (METRIX MX 240)**

La référence de tension (entrée COM) est la phase sur laquelle se fait la mesure du courant :



• **Compteur d'énergie**

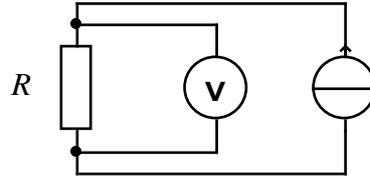
Le compteur d'énergie mesure l'énergie consommée par l'utilisateur du réseau EDF : $W = P_a.t$. Cette énergie est proportionnelle à la puissance active consommée ($kUI\cos\phi$) et est en général exprimée en W-h. Dans tous les cas, EDF facture l'énergie consommée active, mais :

- tarif "vert" (usage industriel moyenne tension) : EDF facture aussi l'énergie réactive (à l'aide d'un compteur d'énergie réactive) si le facteur de puissance $\cos\phi$ est inférieur à 0,928 ($\Leftrightarrow \tan\phi = 0,4$).

- tarifs "bleu" (usage domestique) et "jaune" (usage industriel petite puissance basse tension) : pas de compteur d'énergie réactive, mais un limiteur d'intensité (disjoncteur) taré à la puissance apparente souscrite par l'abonné \Rightarrow lorsque le courant dépasse la valeur maxi, le disjoncteur coupe le circuit, et l'utilisateur doit intervenir pour refermer celui-ci après avoir effectué l'allègement de la charge. En cas de dépassements trop fréquents, l'utilisateur est donc obligé de souscrire un abonnement de puissance plus grande.

Mesure des impédances : ohmmètre, pont d'impédance, RLCmètre

- **Ohmmètre** : principe :

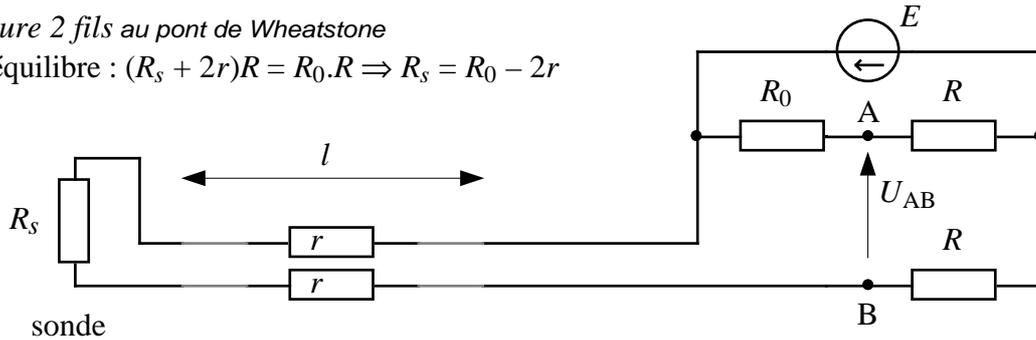


- **Mesure de température par sonde résistive**

Soit r la résistance des fils de mesure (on suppose que cette résistance est la même sur chaque fil)

Mesure 2 fils au pont de Wheatstone

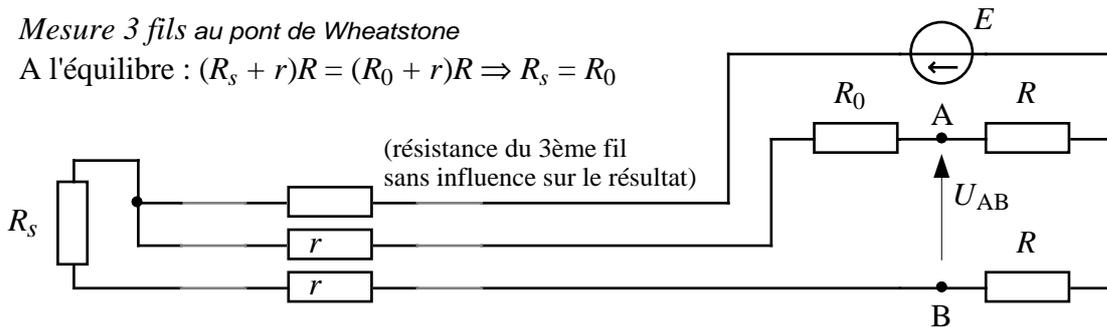
A l'équilibre : $(R_s + 2r)R = R_0 \cdot R \Rightarrow R_s = R_0 - 2r$



⚠ erreur de mesure due à la résistance des fils. On limite $r < 1 \text{ à } 2\Omega \Leftrightarrow l < 100 \text{ m}$

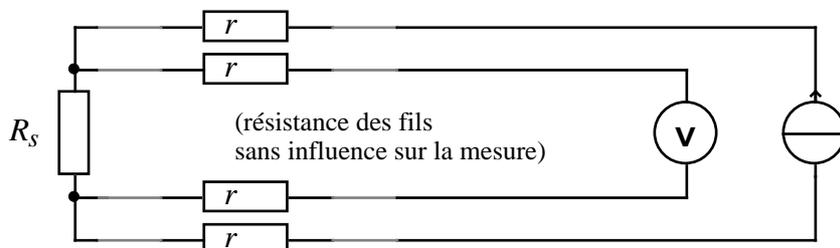
Mesure 3 fils au pont de Wheatstone

A l'équilibre : $(R_s + r)R = (R_0 + r)R \Rightarrow R_s = R_0$



⚠ erreur de mesure compensée seulement au voisinage de l'équilibre. On limite $r < 10\Omega \Leftrightarrow l < 500 \text{ m}$

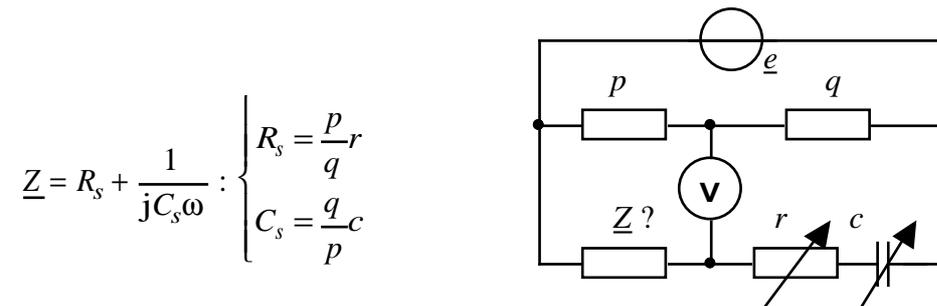
Mesure 4 fils par source de courant



- **Ponts de Wheatstone en alternatif ou "pont d'impédances"**

Calcul général identique au pont en continu : il suffit de remplacer les résistances par des impédances. Les résultats numériques sont obtenus en calculant séparément partie réelle et partie imaginaire de $\underline{Z} = R_s + jX_s$ à partir de l'équation d'équilibre : $\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3$ (cf § A12 p 4).

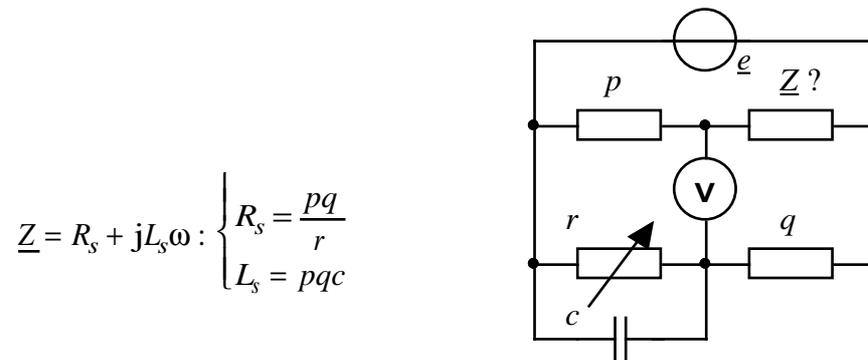
Mesure de dipôle capacitif en représentation série : pont de Sauty série



Mode opératoire (mesure manuelle) :

- 1°) Choisir une valeur simple du rapport p/q (puissance de 10)
- 2°) Mettre r à zéro. Rechercher la valeur de c qui minimise l'indication du voltmètre.
- 3°) Régler r pour obtenir le "minimum minimorum" indiqué par le voltmètre.
- 4°) Éventuellement, retoucher légèrement la valeur de c . NB : à cause du bruit électronique, le minimum définitif que l'on atteint est rarement nul.

Mesure de dipôle inductif en représentation série : pont de Maxwell



Mode opératoire :

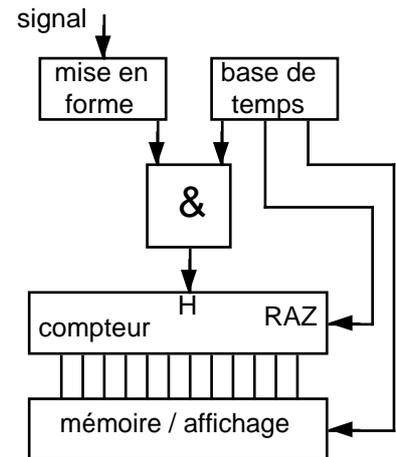
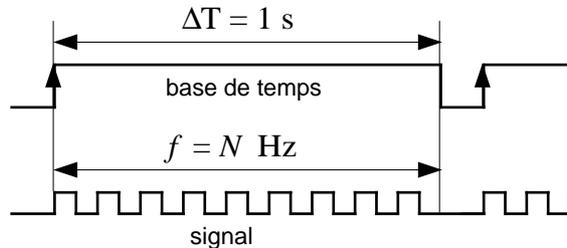
- 1°) Choisir une valeur simple du produit pq (puissance de 10)
- 2°) Rendre r infinie. Rechercher la valeur de c qui minimise l'indication du voltmètre.
- 3°) Régler r pour obtenir le "minimum minimorum" indiqué par le voltmètre.
- 4°) Éventuellement, retoucher légèrement la valeur de c .

RLCmètre. C'est un pont d'impédances automatique réunissant les méthodes de mesure des dipôles R , L et C .

Mesures chronométriques

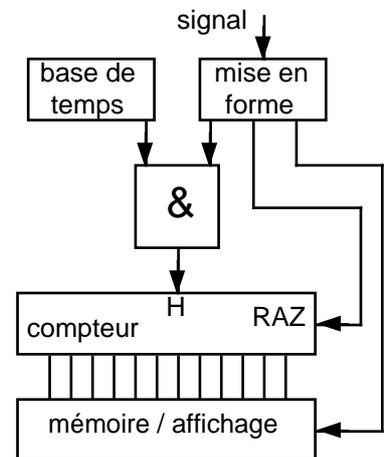
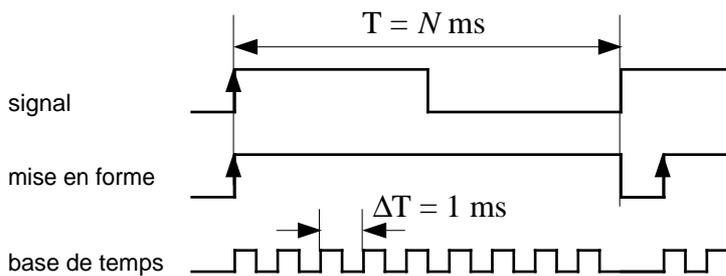
• **Fréquence**

Utilisé en haute fréquence. La base de temps génère un temps ΔT fixé (par exemple une seconde). On compte le nombre de périodes du signal pendant ΔT . La précision de la mesure dépend de la précision de ΔT .



• **Période**

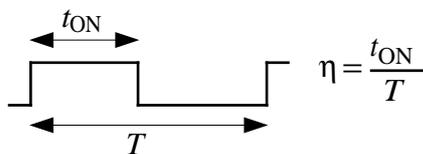
Utilisé en basse fréquence. Une base de temps (un oscillateur à quartz) génère un temps ΔT fixé (par exemple une milliseconde). On mesure par comptage des intervalles ΔT le temps écoulé pendant une période du signal (par exemple entre deux fronts montants).



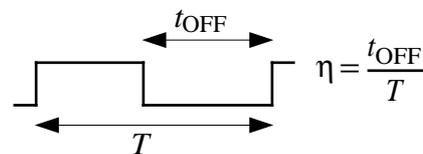
• **Mesure de rapport cyclique**

Mesure réalisée par comptage (périodemètre) ou par filtrage passe-bas (extraction de la valeur moyenne du signal)

Direct :

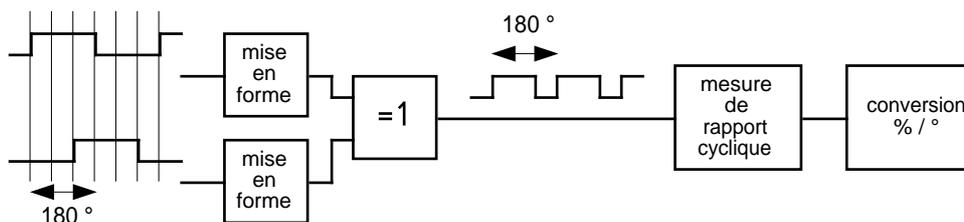


Inverse :



• **Phasemètre**

Principe d'un phasemètre à OU Exclusif :



Observation et mesure des signaux : oscilloscope, système d'acquisition

• **Réglages** : quel que soit l'oscilloscope, on trouve presque toujours les réglages suivants :

visualisation

- 1 M / A
- 2 menu / print
- 3 autose
- 4 luminosité
- 5 contraste
- 6 focus

amplification verticale

- 9 position
- 10 V/div
- 11 VAR CAL
- 12 AC 0 DC
- 13 A 20 pF 1 MΩ
- 14 B 20 pF 1 MΩ

base de temps

- 17 position
- 18 s/div
- 19 VAR CAL
- 20 X 1 X 2 X 5 X10 X50 NORMAL ZOOM

déclenchement

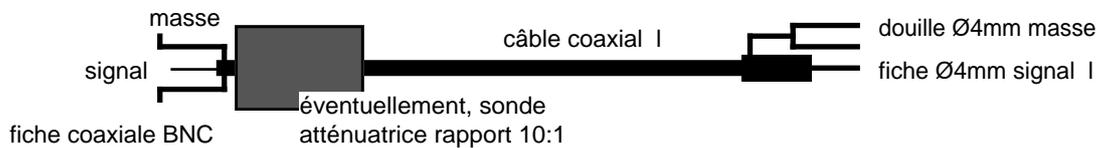
- 21 niveau
- 22 L
- 23 AUTO MANU monocoup
- 24 RAZ
- 25 A B ALT EXT
- 26 EXT

curseurs

- 27 ON OFF
- 28 Δt ΔV
- 29 1 2
- 30 position

mémoire numérique

- 31 ON OFF
- 32 enregistrement lecture
- 33



Visualisation :

1. Marche / Arrêt.
2. Menu "utilisateur" pour réglages personnalisés, initialisation liaison série vers PC, impression...
3. Initialisation automatique de l'affichage des traces (détecte les signaux présents en A et B et règle automatiquement l'amplification, la base de temps, la synchronisation,...). *Autoset* en anglais.
4. Luminosité des traces.
 - ⚠ Avant de commencer, toujours vérifier le réglage de luminosité : l'écran reste désespérément vide si la luminosité est faible, voire nulle !
5. Contraste (écrans LCD uniquement).
6. Netteté des traces.
7. Écran avec réticule gradué (en général, une division = un cm).
8. Lignes pointillées tracées sur l'écran, permettant de mesurer le temps de montée d'une impulsion entre 10 et 90% de sa valeur finale, après avoir positionné la trace entre les lignes 0% (minimum) et 100% (maximum). Nécessite en général d'agir sur 11.

Amplification verticale :

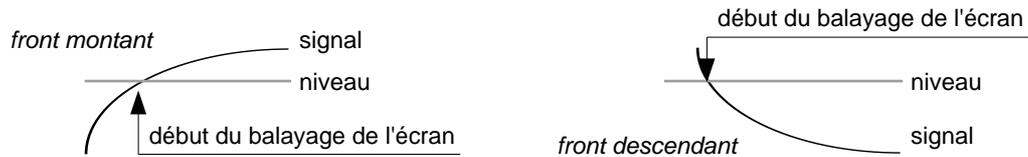
9. Réglages de la position verticale des traces.
10. Choix de l'amplification verticale (en V/division) : échelle des ordonnées.
11. Position VAR (variable) \Rightarrow amplification verticale réglable entre deux positions de 10.
 - ⚠ Avant de commencer, toujours vérifier que le commutateur est en position CAL (calibré)
12. DC : entrée normale ; AC : composante alternative uniquement ; 0 (ou GND : *ground*) : masse
 - ⚠ Un oscilloscope s'utilise en général en couplage DC. L'entrée AC ne sert que dans certains cas particuliers (exemple : examen de l'ondulation résiduelle d'un signal continu, mesure de déphasage,...)
13. Entrée coaxiale (douille BNC).
 - ⚠ Sur un appareil de table, la masse de l'entrée est reliée à la terre de l'alimentation électrique de l'oscilloscope.
14. Impédance d'entrée.
15. Inversion de signe du signal voie B.
16. Trace A uniquement, ou B uniquement, ou A et B alternativement, ou A et B avec découpage (anglais *CHOP* : *chopper*), ou A+B, ou B en fonction de A (B en ordonnée, A en abscisse : figure de Lissajous...). Remarque : on peut aussi afficher A-B en choisissant A+B après avoir actionné 15.
 - ⚠ Pour afficher deux traces simultanément, on choisit généralement le mode DEC, sauf en haute fréquence où le mode ALT devient nécessaire pour éviter de voir apparaître le découpage des traces. Mais, pour des raisons de confort visuel, le mode ALT est à proscrire en basse fréquence.

Base de temps :

17. Réglage de la position horizontale des traces.
18. Choix de la base de temps (en s, ms ou μ s/division) : échelle des abscisses.
19. Position VAR (variable) \Rightarrow base de temps réglable entre deux positions de 18.
 - ⚠ Avant de commencer, toujours vérifier que le commutateur est en position CAL (calibré)
20. Zoom (ou grossissement) ; parfois assuré par une 2^{ème} base de temps, plus rapide.
 - ⚠ Avant de commencer, toujours vérifier que le commutateur est en position x1 (pas de zoom)

Synchronisation :

21. Niveau (anglais *level*) de déclenchement (anglais *trigger*) : détermine le début de la trace (sur le bord gauche de l'écran), lorsque le signal atteint ce niveau de tension.



En mode manuel (commutateur 23 en position MANU), la stabilisation de la trace n'est possible que si $V_{\min} < \text{niveau} < V_{\max}$ (V_{\min} et V_{\max} étant les valeurs crête du signal).

22. Détermine si le début de la trace est croissant (front montant) ou décroissant (front descendant)

23. Synchronisation automatique, manuelle (par 21), ou unique (un seul balayage de l'écran)

24. Remise à zéro après un balayage unique (23 en position monocoup, anglais *single sweep*)

25. Synchronisation d'après voie A, ou B, ou alternativement A et B, ou signal externe (par 26)



En mode de synchronisation alternativement par A et B, tout se passe comme si l'on avait deux oscilloscopes séparés (un par voie). L'avantage de ce mode de synchronisation est de pouvoir afficher deux signaux asynchrones (signaux indépendants sans relation de phase entre eux). L'inconvénient de ce mode est, précisément, de ne pas respecter, en général, la différence de phase qui existe entre deux signaux synchrones \Rightarrow avant de commencer, toujours vérifier que le commutateur n'est pas en position ALT.

26. Entrée de synchronisation externe par un troisième signal, ni A ni B. Ex : signal réseau 50Hz.

Curseurs :

25. Marche / arrêt de l'affichage des curseurs sur l'écran.

26. Choix entre curseurs verticaux (mesures d'intervalles de temps) et curseurs horizontaux (mesures de tensions)

27. Choix entre déplacement d'un seul curseur ou des deux à la fois.

28. Déplacement des curseurs.

Mémoire numérique :

29. Marche / arrêt de la mémoire numérique (si l'oscilloscope est numérique...).

30. Enregistrement (anglais *SAVE*)

31. Affichage du (ou des) dernier(s) enregistrement(s) (anglais *RECALL*)

• Check List

Liste des réglages et vérification à effectuer avant de commencer :

- 1) Connecter un signal sur la voie A, après avoir vérifié que sa tension crête n'excède pas la tension maximale admissible sur cette voie.
- 2) Luminosité (4) en position maxi, potentiomètres position verticale (9) en milieu de course
- 3) Amplifications verticales et base de temps calibrées (11 et 19 sur CAL),
- 4) Entrées en couplage DC (12), et commutateur (16) sur DEC
- 5) Zoom non actionné (20 en position NORMAL)
- 6) Synchronisation en mode automatique (23 sur AUTO), sur la voie A (25)
- 7) Mémoire numérique désactivée (31 sur OFF)
- 8) Éventuellement : faire un *autoset* (3)
- 9) Vérifier les réglages proposés par l'*autoset*. Modifier si nécessaire.

Analyseur de spectre

• Un analyseur de spectre permet de visualiser un signal périodique (en général complexe) en fonction de la fréquence. Il en existe plusieurs types :

- Analyseur analogique : batterie de filtres passe-bandes (cf § A26), ou récepteur hétérodyne (équivalent à un récepteur radio, qui, par construction, "analyse" le signal présent sur son antenne). Existe notamment pour les très hautes fréquences.

- Analyseur numérique : acquisition numérique du signal, puis calcul du spectre par transformée de Fourier (FFT : cf §B24). Matériellement, existe sous trois formes : appareil spécialisé, bloc FFT adjoint à un oscilloscope, ou système d'acquisition sur PC (cf §B17).

• **Analyseur de spectre de réseau (ou "analyseur d'énergie")** : c'est un analyseur BF spécialisé dans la mesure des harmoniques de courant (ou éventuellement de tension) présents sur un réseau de distribution 50 Hz. Pour un signal donné, on définit :

- valeur efficace vraie totale (RMS) : $I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{n \text{ eff}}^2}$ ($I_{n \text{ eff}}$: val. eff. de l'harmonique de rang n)

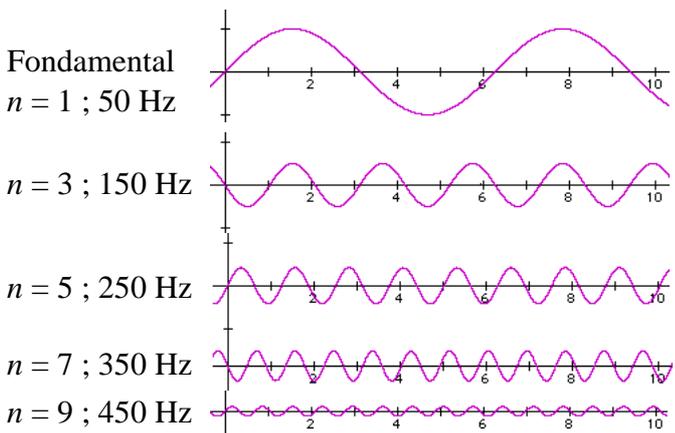
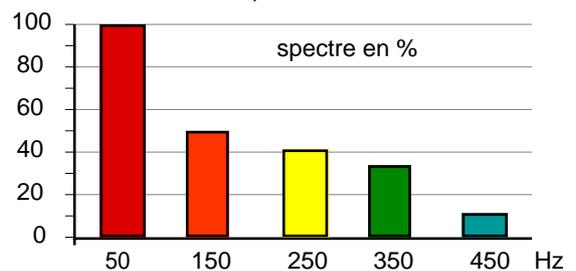
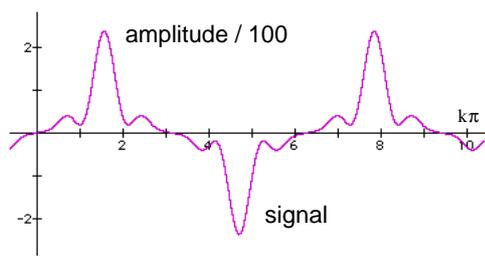
- taux d'harmonique ramené au fondamental (norme IEEE) :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n \text{ eff}}^2}}{I_{1 \text{ eff}}}$$

- facteur de distorsion ou taux d'harmonique ramené à la valeur efficace totale du signal (norme CEI)

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n \text{ eff}}^2}}{I_{\text{eff}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n \text{ eff}}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{n \text{ eff}}^2}} \quad \text{NB : } D \text{ toujours } < 100\%.$$

Exemple : $i(t) = 100(\sin x - 0,5\sin 3x + 0,42\sin 5x - 0,34\sin 7x + 0,11\sin 9x)$ avec $x = 2\pi 50t$



I_{eff} (A)	88,2	
$I_{\text{crête}}$ (A)	237,0	
THD		74,4%
D		59,7%
H1 (A)	70,7	100,0%
H3 (A)	35,4	50,0%
H5 (A)	29,7	42,0%
H7 (A)	24,0	34,0%
H9 (A)	7,8	11,0%