ndIngénierie

Votre expert en habilitation électrique

Les fiches techniques

65 Les détecteurs

Les mesures

Nicolas DOUGUET - Formateur Consultant

www.ndingenierie.fr

62 Rue George Sand 37000 Tours
02.46.65.08.91
nd.ingenierie@gmail.com

SARL NDIngénierie
N° de SIRET : 808 572 499 00016
Enregistré sous le n° 24 3703091 37 auprès du Préfet de la Région Centre

65 Mesures

65 ■ 1 Valeurs moyenne et efficace

Considérons un courant variable $i(t)$.

■ La **valeur moyenne** du courant $i(t)$ est l'intensité moyenne (notée $\overline{I}$) que devrait avoir un courant continu (donc constant) pour transporter, durant le même temps, la même quantité d'électricité que $i(t)$.

$$\overline{I} = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\cdot \mathrm{d}t$$

■ La **valeur efficace** du courant $i(t)$ est l'intensité I_{eff} que devrait avoir un courant continu pour produire, dans la même résistance, durant le même temps, le même dégagement de chaleur que $i(t)$.

$$I_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,.\,\mathrm{d}$$

Cas particuliers :

■ en courant continu : valeur moyenne = valeur efficace ;

■ en courant alternatif sinusoïdal :

valeur moyenne = 0 ;

valeur efficace = valeur maximale / $\sqrt{2}$;

■ en redressement double alternance :

$$\overline{I} = \frac{2\,.\,\hat{I}}{\pi}\ ;\ I_{eff} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

Généralisation

Une intensité $i(t)$ non sinusoïdale de période T peut être décomposée en une série de Fourier telle que :

$$i(t) = \overline{I} + I_1\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi_1) + I_2\sqrt{2}\sin(2\omega t - \varphi_2) + \ldots$$

$\overline{I}$ = valeur moyenne du signal.

I_1 = valeur efficace du fondamental (harmonique de rang 1).

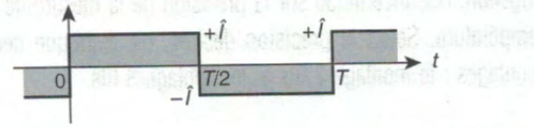
I_2 = valeur efficace de l'harmonique de rang 2.

La valeur efficace de l'intensité $i(t)$ a pour expression :

$$I_{eff} = \sqrt{\overline{I}^2 + I_1^2 + I_2^2 + \ldots}$$

VALEURS MOYENNE ET EFFICACE : ÉTUDE DE SIGNAUX PÉRIODIQUES

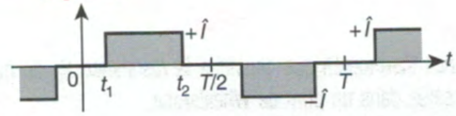
Signal *a*



$$\overline{I} = \frac{1}{T}\left[\int_0^{\frac{T}{2}} +\hat{I}\,\mathrm{d}t + \int_{\frac{T}{2}}^{T} -\hat{I}\,\mathrm{d}t\right] = 0$$

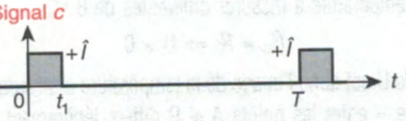
$$I_{eff}^2 = \frac{1}{T}\left[\int_0^{\frac{T}{2}} +(\hat{I}^2)\cdot\mathrm{d}t + \int_{\frac{T}{2}}^{T}(-\hat{I}^2)\,.\,\mathrm{d}t\right] \Rightarrow I_{eff} = \hat{I}$$

Signal *b*



$$\overline{I} = 0\ ; \qquad I_{eff}^2 = \frac{1}{\frac{T}{2}}\int_{t_1}^{t_2}\hat{I}^2\,.\,\mathrm{d}t$$

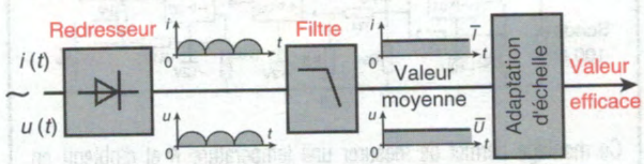
Signal *c*



$$\overline{I} = \frac{1}{T}\int_0^{t_1}\hat{I}\,\mathrm{d}t = \hat{I}\,.\,\frac{t_1}{T}$$

$$I_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_0^{t_1}\hat{I}^2\cdot\mathrm{d}t \Rightarrow I_{eff} = \hat{I}\,.\,\sqrt{\frac{t_1}{T}}$$

MESURE DE VALEURS EFFICACES : APPAREILS MAGNÉTOÉLECTRIQUES



Exemple pour un courant alternatif sinusoïdal :

$$\overline{I} = \frac{2\,.\,\hat{I}}{\pi} = \frac{2\,.\,I_{eff}\cdot\sqrt{2}}{\pi}$$

$$I_{eff} = \frac{\pi}{2\,.\,\sqrt{2}}\,.\,\overline{I} = 1{,}11\,.\,\overline{I}$$

Nota : Si le signal n'est pas sinusoïdal, la valeur efficace affichée est erronée.

65 ■ 2 Mesures de valeurs moyennes

Elles sont mesurées par les appareils :

- magnétoélectriques ∩ en position « continu »,
- numériques : par calcul analogique, ils réalisent l'intégration du signal d'entrée.

65 ■ 3 Mesure de valeurs efficaces

Mesure en valeur moyenne avec lecture en valeur efficace

L'appareil magnétoélectrique en position ~. Il mesure la valeur moyenne et est gradué en valeur efficace.

APPLICATION :

Mesure de la valeur efficace d'une grandeur alternative sinusoïdale $I_{eff} = 1{,}11 \, . \, \overline{I}$.

Mesure de la valeur efficace réelle

- *Méthode thermique* avec appareils à thermocouple. Les graduations de ces appareils sont valables pour toute fréquence, assez grande précision.
- *Appareils ferromagnétiques à aiguille* :
Les caractéristiques non linéaires du fer mobile et leur médiocre réponse en fréquence limitent leurs performances dans la mesure des signaux déformés, précision moyenne.
- *Calcul analogique* (**RMS**) : l'appareil effectue l'opération :

$$\boxed{I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t) \, . \, dt}}$$

- *Calcul numérique* : la valeur efficace du signal est mesurée par d'un échantillonnage numérique.

REMARQUE :
En électronique de puissance, on privilégie l'emploi des appareils à calcul analogique ou numérique.

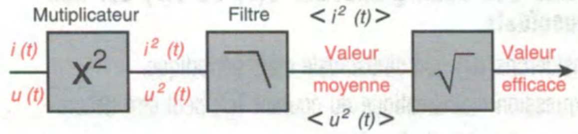
65 ■ 4 Mesure des puissances

65 ■ 41 Régime sinusoïdal

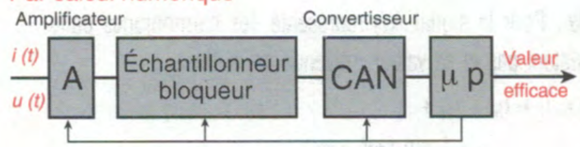
- *La puissance active* consommée par un récepteur continu ou monophasé est mesuré à l'aide d'un wattmètre. Par définition, la puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée : $p = u(t) \times i(t)$ sur une période.
- *La puissance réactive* en monophasé peut être mesurée à l'aide d'un wattmètre branché en varmètre.
- *Mesure de la puissance active en triphasé équilibré* : un seul wattmètre suffit.

MESURE DE LA VALEUR EFFICACE RÉELLE

Par calcul analogique

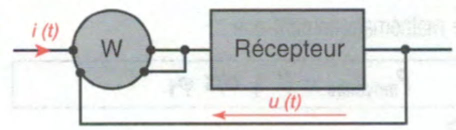


Par calcul numérique



MESURES DE PUISSANCES

Récepteur monophasé : mesure de la puissance active P

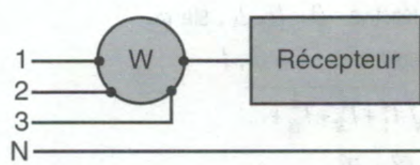


$P_{active} = \frac{1}{T}\int_0^T u(t) \, . \, i(t) \, . \, dt$ = puissance lue au wattmètre.

Cas particulier : régime alternatif sinusoïdal

$P = U_{eff} \, . \, I_{eff} \, . \, \cos \varphi$ (φ = argument du récepteur).

Récepteur monophasé :
Mesure de la puissance réactive Q

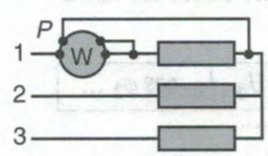


$P_{lue} = U_{23} \, . \, I_1 \, . \, \cos(\overrightarrow{U_{23}}, \overrightarrow{I_1})$.

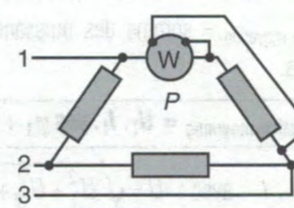
On démontre que : $Q = P_{lue}$ au wattmètre $/ \sqrt{3}$.

Récepteur triphasé :
Mesure de la puissance active

• **Récepteur équilibré**



Montage étoile



Montage triangle

$$\boxed{P_{active\ totale} = 3 \times P}$$

• **Généralisation** : méthode des deux wattmètres (voir chapitre 9)

65 ▪ 42 Puissance des courants non sinusoïdaux

▪ Une des deux grandeurs $u(t)$ ou $i(t)$ est non sinusoïdale.

Considérons $i(t)$ non sinusoïdale mais périodique.

L'expression mathématique du courant $i(t)$ peut être décomposé en une série de Fourier.

Nota : Pour le signal $i(t)$ représenté, les harmoniques pairs n'existent pas et sa valeur moyenne est nulle.

$i(t) = i_f + i_{3f} + i_{5f} + \dots$

$i_f = i_{\text{fondamental}} = \hat{I}_f \sin(\omega t - \varphi_1)$

$i_{3f} = \hat{I}_{3f} \sin(3\omega t - \varphi_3) \dots$

$$P_{\text{moyenne}} = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,.\,i(t)\,.\,\mathrm{d}t$$

On démontre mathématiquement que :

$$\boxed{P_{\text{moyenne}} = U\,.\,I_f\,.\cos\varphi_1}$$

avec $I_f = \dfrac{\widehat{I_f}}{\sqrt{2}}$.

Conclusion : si l'une des deux grandeurs est non sinusoïdales, seul le fondamental de cette grandeur transporte de la puissance.

Autres puissances :

Puissance réactive : $Q = U\,.\,I_f\,.\sin\varphi_1$

Puissance apparente : $S = U\,.\,I$

avec $I = \sqrt{I_f^2 + I_{3f}^2 + I_{5f}^2 + \dots}$

$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

D est appelée puissance déformante.

Facteur de puissance : $f_p = \dfrac{P}{S} \neq \cos\varphi_{\text{récepteur}}$

▪ Les deux grandeurs ne sont pas sinusoïdales.

$u(t)$ et $i(t)$ sont décomposables en série de Fourier.

$P_{\text{active moyenne}}$ = somme des puissances actives des harmoniques.

$$\boxed{P_{\text{active moyenne}} = U_f\,.\,I_f\,.\cos\varphi_1 + U_{3f}\,.\,I_{3f}\,.\cos\varphi_3 \dots}$$

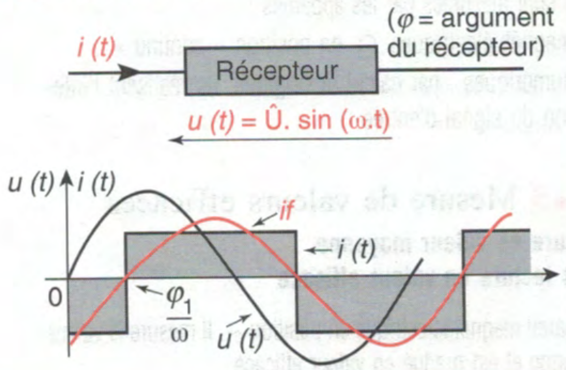
$S = U\,.\,I$ avec : $U = \sqrt{U_f^2 + U_{3f}^2 + \dots}$

$I = \sqrt{I_f^2 + I_{3f}^2 + \dots}$

$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

Facteur de puissance : $f_p = \dfrac{P}{S} \neq \cos\varphi_{\text{récepteur}}$

PUISSANCE EN RÉGIME NON SINUSOÏDAL



Déformation d'un signal

On définit le facteur de crête d'un signal par :

$$\boxed{F_c = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}}}$$

La valeur F_c fournit une information supplémentaire qui permet d'apprécier qualitativement la déformation d'un signal. Pour quantifier le signal déformé, on utilise la décomposition en série de Fourier qui ramène le signal aux signaux sinusoïdaux élémentaires (fondamental et harmoniques).

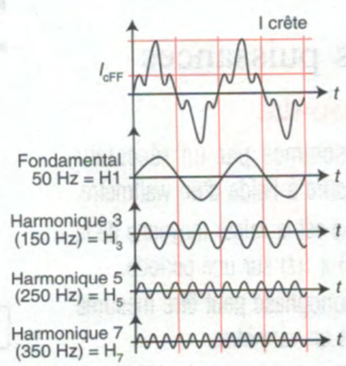
Les harmoniques engendrent des perturbations sur le récepteur (pertes supplémentaires, échauffement, dysfonctionnement).

La mesure des harmoniques est une méthode pour connaître le niveau de pollution harmonique afin de comparer sa valeur par rapport aux normes en vigueur.

EXEMPLE :

Étude d'un signal déformé à l'aide d'une pince ampèremétrique*

I_{eff}	$I_{\text{crête}}$	F_c	T_{HD}	D_F	H_1	H_3	H_5	H_7
157 A	392 A	2,5	113,5 %	75,2 %	104 A	84 A	64 A	40 A



T_{HD} = taux d'harmoniques.

$$T_{HD} = \frac{\sqrt{H_3^2 + H_5^2 + \dots}}{H_1}$$

D_F = facteur de distorsion.

$$D_F = \frac{\sqrt{H_3^2 + H_5^2 + \dots}}{I_{\text{efficace}}}$$

* L'avantage des pinces ampèremétriques est de permettre la mesure d'une intensité sans arrêter l'installation en toute sécurité.

PINCES AMPÈREMÉTRIQUES*							
Type de pince	de courant			multimètre		harmonique	
Modèle	F1	F2	F3	F11	F13	F21	F25
Signaux sinusoïdaux ou faiblement déformés		•		•	•	•	•
Signaux répétitifs déformés		•			•	•	•
Signaux déformés et à fréquence variable		•				•	•
Mesure AC		•		•	•	•	•
Mesure AC+DC							•
Mesure DC							•
Mesure du taux d'ondulation							•
Mesure de la valeur crête						•	•
Mesure du facteur crête						•	•
Mesure de la distorsion harmonique totale						•	•
Mesure d'harmonique rang par rang							•

65.5 Mesure de l'énergie W

Par définition :

$$dW = u(t) \,.\, i(t) \,.\, dt \quad \Rightarrow \quad W = \int_0^T u(t) \,.\, i(t) \,.\, dt \,.$$

La mesure de l'énergie s'affiche à l'aide d'un compteur d'énergie caractérisé par une constante C qui représente l'énergie consommée par le récepteur par tour de disque du compteur :

$$\boxed{W = C \times \text{nombre de tours}}$$

(Voir exemple § 51.15.)

65.6 Capteur à effet Hall

Effet hall

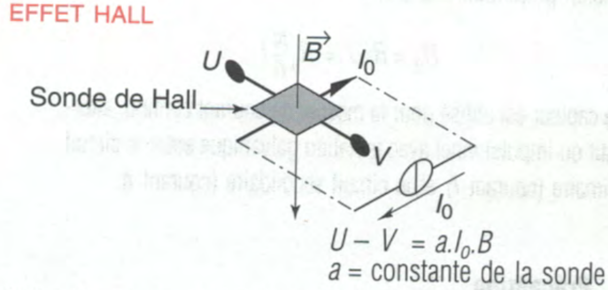
En présence d'un champ magnétique transversal B, la sonde parcourue par un courant I_0 présente suivant sa troisième dimension une d.d.p $U - V$ proportionnelle au produit $B.I_0$.

Tel est l'effet Hall particulièrement marqué dans les semi-conducteurs.

APPLICATION :

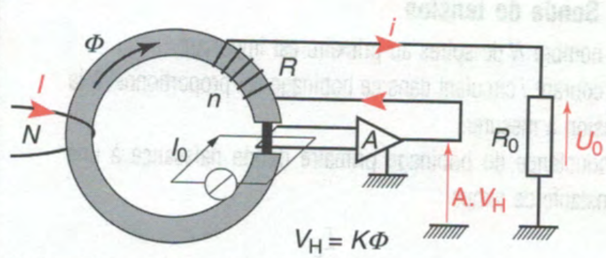
On utilise une sonde à effet Hall pour mesurer un courant circulant dans un conducteur par l'intermédiaire du champ magnétique B qu'il crée.

EFFET HALL



Si I_0 = Cte → $U - V = K\Phi = V_H$.

CAPTEUR À EFFET HALL - *Principe de fonctionnement*

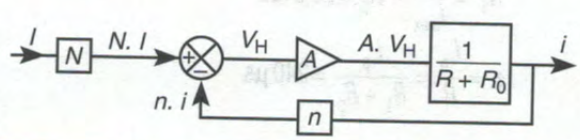


Si l'amplificateur A possède un gain important, i est important et les ampères-tours $n.i$ compensent pratiquement ceux formés par $N.I$ $\Rightarrow N.I \approx n.i \Rightarrow \Phi \Rightarrow 0$.

Un tel système est dit à flux nul (système asservi).

R_0 représente la résistance de mesure.

CAPTEUR À EFFET HALL - *Schéma fonctionnel*



* Chauvin Arnoux.

Principe de fonctionnement

La sonde est placée dans l'entrefer d'un tore en ferrite. Le courant I à mesurer circule dans un conducteur formant N spires à travers le tore.

Le flux Φ n'est proportionnel au courant I que si le matériau magnétique n'est pas saturé.

Pour ne pas saturer le matériau, on réalise une contre-réaction magnétique par un enroulement de n spires parcouru par un courant i.

Le sens des 2 bobinages est tel que :

$$(N.I) - (n.i) = \mathcal{R} . \Phi$$

($\mathcal{R}$ = réluctance du circuit magnétique).

Constatation

Le courant i recopie le courant I quelle que soit sa forme.

Aux bornes de la résistance de mesure R_0, on recueille une tension proportionnelle à $i(t)$.

$$U_0 = R_0 . i = R_0 \frac{N}{n} I .$$

Ce capteur est utilisé pour la mesure de courant continu, alternatif ou impulsionnel avec isolation galvanique entre le circuit primaire (courant I) et le circuit secondaire (courant i).

Précaution

La chute de tension $(R + R_0).i$ ne doit pas excéder 15 V afin de ne pas saturer l'amplificateur opérationnel A.

Sonde de tension

Le nombre N de spires au primaire est important.

Le courant i circulant dans ce bobinage est proportionnel à la tension à mesurer.

L'inductance du bobinage primaire donne naissance à une constante de temps :

$$\tau = \frac{L_p}{R_p}.$$

limitant la rapidité de réaction de la sonde.

APPLICATION :

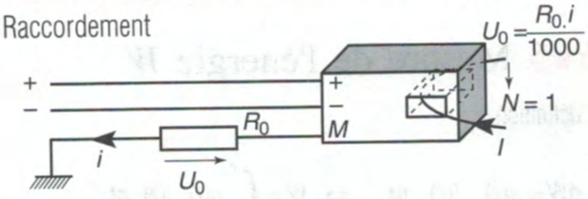
U à mesurer = 500 V

$$R_1 = \frac{U}{i_{max}} - R_p = 23{,}5\,\text{k}\Omega$$

$$\tau = \frac{L_p}{R} = \frac{L_p}{R_1 + R_p} = 240\,\mu\text{s}$$

Capteur courant : module LEM Le module LEM LA 50-P est un capteur de courant basé sur la compensation du champ magnétique	
Caractéristiques électriques	
Courant nominal I_N	50 A eff.
Plage de mesure	0 à +/– 70 A (Alim. + et – 15 V R. mes. mini - 100 Ω
Rapport de transformation	1 : 1000
Courant de mesure	• nom. 50 mA pour 50 A • max. 70 mA pour 70 A
Circuit de mesure	
Résistance interne	90 ohms à 70° C
Alimentation	+ et – 15 V (+/– 5 %)

Raccordement



Le conducteur parcouru par l'intensité I à mesurer traverse le capteur à travers une fenêtre prévue à cet effet.

Capteur tension : module LEM LV 100	
Caractéristiques électriques	
Courant nominal I_N	10 mA
Plage de mesure	0 à ± 20 mA
Rapport de transformation	10 000 : 2 000
Courant de mesure	• nom. 50 mA pour 10 mA primaire • max. 100 mA pour 20 mA primaire
Circuit primaire	
Résistance interne	R_p = 1 500 Ω (à 25° C)
Inductance	L_p = 6 H
Circuit secondaire	
Résistance interne	60 Ω
Alimentation	+ et – 15 V (± 5 %)

Raccordement