

La mesure de courant en milieu industriel

ALAIN KOHLER, CHRISTIAN PEUTOT^[1]

Pour faire face aux perturbations présentes sur les réseaux, les appareils de mesure du courant doivent intégrer des capteurs adaptés. Ceux-ci assureront une indication fiable et représentative de la réelle valeur efficace d'un courant au sein d'une installation électrique.

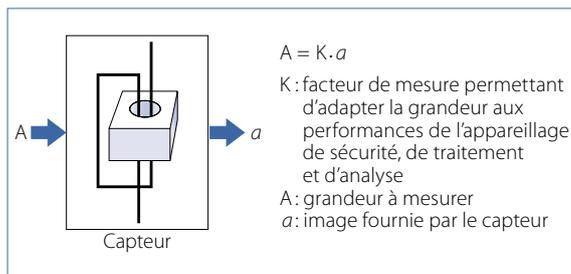
Voici donc une description des différents types de capteurs, de leur principe de fonctionnement et de leur champ d'application dans le domaine de la mesure du courant ainsi que de leur intégration dans les équipements de mesure actuels.

Les capteurs de courant

Les capteurs de courant doivent tous remplir des conditions d'utilisation précises :

● Homothétie et fidélité

L'image fournie par le capteur doit être homothétique de la grandeur mesurée : c'est à partir de l'intensité et la tension que l'on élabore certaines autres grandeurs comme la puissance, le facteur de puissance, etc. Un capteur est dit fidèle si le facteur de mesure K est constant dans le temps **1**.



1 Le schéma bloc d'un capteur

● Isolation

Le capteur doit être compatible avec le niveau d'isolation des appareils pour assurer une sécurité d'emploi. En effet, aucune perturbation électrique ou électromagnétique présente sur le réseau de puissance ne doit interférer avec la mesure, ou pire encore détruire l'appareil de contrôle.

● Adaptation d'impédance

Il faut que l'appareil de contrôle de mesure couplé au capteur de courant soit compatible avec l'impédance d'entrée du réseau de mesure.

Les capteurs couplés à un appareillage électronique numérique sont de plus en plus fréquents, car ils assurent

[1] Respectivement ex-chef de marché chez Chauvin-Arnoux et professeur certifié de génie électrique au lycée Léonard-de-Vinci de Melun (77).

Mots-clés

énergie, perturbations, puissance, sécurité

une bonne adaptation d'impédance en garantissant une puissance apparente consommée très faible par rapport à l'analogique ou à l'électromécanique.

Les différents types

● Le shunt

Le « shunt » est un conducteur de faible résistance très précis, constitué en général de manganine (alliage de cuivre, nickel, manganèse), ce qui assure une très faible variation en fonction de la température. La plage d'utilisation est de 10 mA (en laboratoire) à 10 kA (dans l'industrie). Il suffit donc de mesurer la tension à ses bornes pour connaître la valeur du courant le traversant. Généralement, la prise de mesure de tension sur le shunt est calibré à 100 mV.

● Le transformateur de courant (TC, ou parfois TI)

Ce capteur comporte deux circuits électriques et un circuit magnétique. C'est une source de courant qui présente une plage d'utilisation limitée par les phénomènes de saturation magnétique. Malgré cela, il reste le capteur le plus usité en HTA et HTB.

● Le capteur à bobine de Rogowski

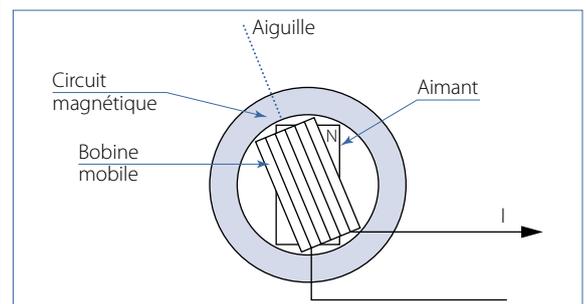
Très utilisé en HTA et HTB, il a la particularité d'être linéaire dans une plage d'utilisation assez large : en effet, il est constitué d'un tore magnétique non ferromagnétique.

● Le capteur à effet Hall

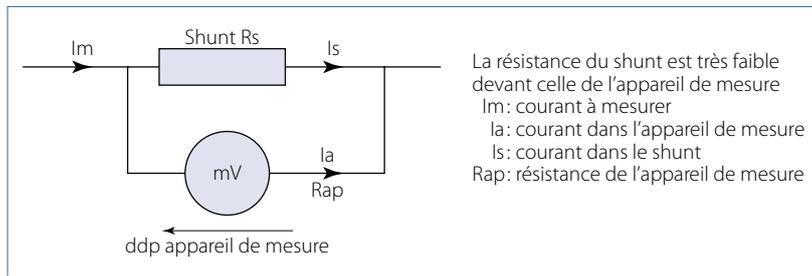
L'élément sensible est un semi-conducteur, appelé cellule de Hall, disposé dans un circuit magnétique pour accroître sa sensibilité. Ce capteur, s'il permet de mesurer un courant alternatif comme un courant continu, est toutefois soumis aux effets de la saturation magnétique, ce qui limite sa plage d'utilisation.

● Le TC à flux nul

L'élément sensible est un circuit magnétique dans lequel le flux est annulé par un enroulement auxiliaire et un amplificateur de courant, ce qui permet d'éviter la saturation magnétique. La plage de ce TC est limitée en intensité et en fréquence.



2 Le mouvement d'Arsonval



3 La mesure de tension aux bornes d'un shunt

● **Le capteur à effet Hall à flux nul**

C'est un capteur à effet Hall pourvu d'un enroulement auxiliaire chargé d'annuler le flux et d'accroître les effets de la saturation magnétique.

● **Le capteur optique à effet Faraday**

Il s'agit d'une application de l'effet Faraday; l'élément sensible est soit une fibre optique soit un cristal optique.

Le fonctionnement des capteurs nécessaires à la mesure de courant

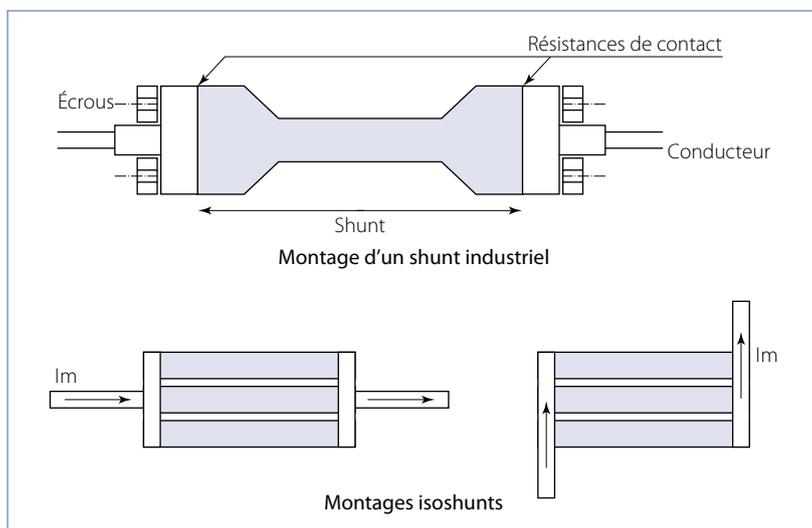
Le galvanomètre

Il fonctionne selon le principe du mouvement d'Arsonval, utilisé dans la plupart des ampèremètres à aiguilles **2**. Ce principe repose sur les forces électromagnétiques (forces de Laplace) dues à l'action du flux sur une bobine mobile parcourue par le courant (dispositif en courant continu).

La bobine composée de fil fin ne peut être traversée que par des courants dont l'intensité n'excède pas 2 mA. Pour les forts courants, la section du fil est plus importante, ce qui pose des problèmes de poids, d'encombrement et donc de coût.

Le shunt

Il effectue la mesure de courant continu indirecte (mesurée par un voltmètre continu) en créant une chute de tension normalisée (60 mV, 100 mV, 200 mV).

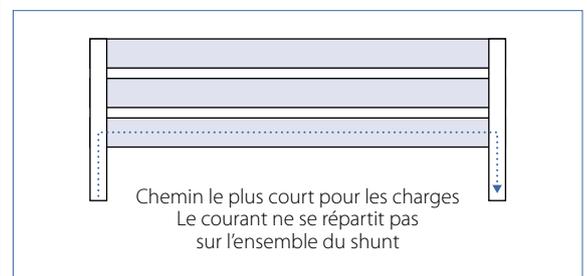


4 La constitution de différents shunts

C'est la solution la moins coûteuse au-delà du milli-ampère, car la perturbation due à la chute de tension n'est plus négligeable. On utilise alors un milli-voltmètre en parallèle sur le shunt **3**.

Les résistances des shunts sont données par les constructeurs, mais les résistances de contact sont très mal définies, car elles dépendent du serrage des écrous et de la nature du conducteur, de la corrosion... **4**

La disposition des shunts est source d'erreur de mesure. Par exemple, celui de la figure **5** peut entraîner une erreur de l'ordre de 10 % de I_m pour 5 000 A, due à la mauvaise répartition du courant: les charges parcourant le chemin le plus court, la densité est très forte dans le bas du shunt.



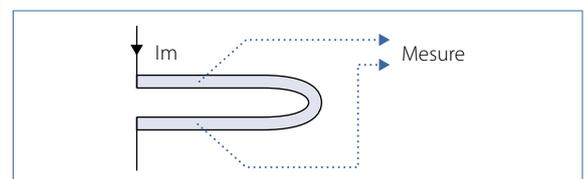
5 Une mauvaise répartition du courant dans le shunt

La puissance à dissiper dans le shunt est dépendante du courant. Pour 1 000 A et 100 mV, le shunt dissipera 100 W; il faudra minimiser les résistances de contact et ventiler le shunt.

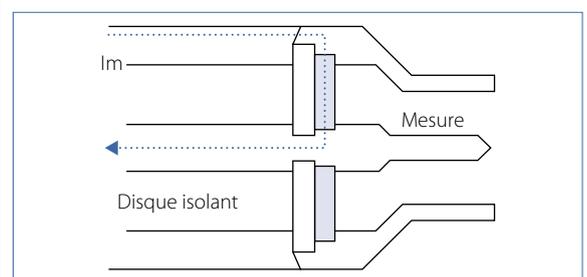
Les cordons de mesure donnés à 70 MΩ sont en série avec l'appareil de mesure et doivent être utilisés lors de l'étalonnage de cet appareil, car ils peuvent induire une erreur de mesure non négligeable.

Le couplage d'un appareil de mesure à un shunt impose le calcul du courant maximal circulant dans l'appareil de mesure en fonction des classes de précision du shunt et de cet appareil:

$$I_{ap} = (I_m / 1\,000) \cdot (\text{classe de l'appareil} + \text{classe du shunt})$$



6 Le shunt à structure en bande



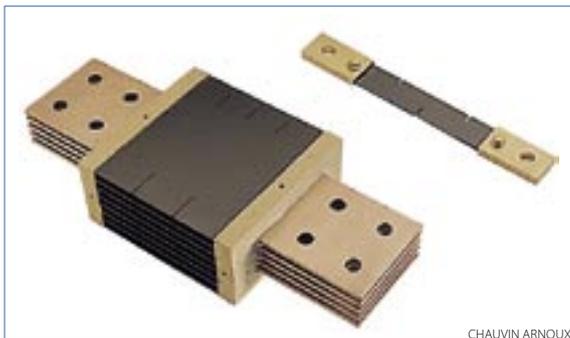
7 Le shunt à structure coaxiale

En alternatif, les shunts posent des problèmes de tenue en fréquence, des perturbations par couplage magnétique induites par la source apparaissant sur le circuit de mesure. Cette mutuelle inductance va croître avec la fréquence; c'est ce qui limite la plage d'utilisation du shunt. Il est conseillé d'utiliser des liaisons torsadées ou coaxiales et d'éloigner l'appareil de mesure de la source.

Les shunts à structure en bande ou à structure coaxiale sont les plus utilisés en alternatif **6 7**. La structure coaxiale offre une bande passante plus large grâce à une élimination de l'effet de bord par les disques isolants; le shunt est un disque résistif aux bornes duquel on pratique la mesure.

En continu (et plus rarement en AC), ce capteur est utilisable de 1 000 à 6 000 A en 100 mV; des modèles 60 mV et 150 mV existent également **8 9**.

«L'installation d'un shunt à raccord à lames», bien particulière, est présentée en encadré.



9 Des shunts à structure en bande à raccord à lames

Le transformateur de courant

Le TC est composé d'un tore ferromagnétique parcouru par un champ magnétique image du courant à mesurer **10 11**.

Pour les fortes intensités, le primaire n'est autre que le câble portant la grandeur, le secondaire étant

L'installation d'un shunt à raccord à lames

Prévoir pour une utilisation permanente un calibre de 25 % supérieur au courant nominal.

Les surcharges admissibles vont de 1,2 In pendant 2 minutes à 10 In pendant 5 secondes pour certains modèles.

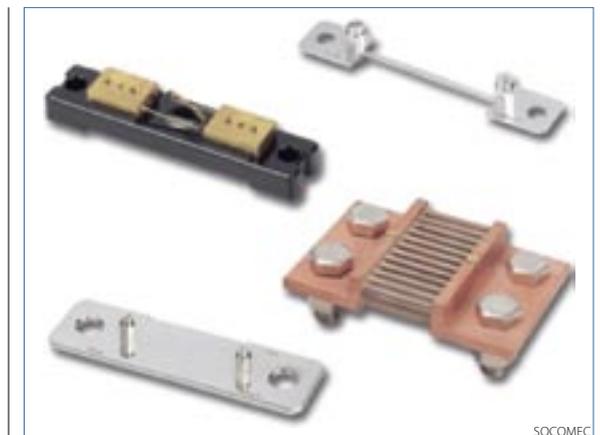
Veiller à installer le shunt sur le côté masse de l'installation, surtout si celle-ci met en service une tension supérieure à 500 V.

Ces shunts sont réalisés en manganine, matériau offrant une stabilité à long terme et un très faible coefficient de température, mais il faut éviter tout dépassement des 100 °C.

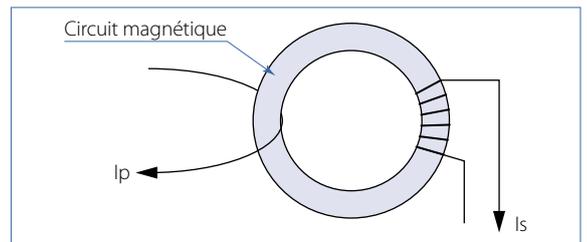
On obtient un meilleur échange thermique en montant le shunt horizontalement, lames orientées verticalement. Si les barres d'arrivée de courant ne permettent pas un refroidissement suffisant, il faut prévoir une ventilation forcée.

Pour un calibrage particulier, on est amené à placer en parallèle des shunts de même type au moyen de barrettes en cuivre. Attention aux cordons de plus de 1,5 mètre, dont l'influence (résistance) n'est plus négligeable.

La précision est donnée pour une température ambiante donnée (de 15 à 30 °C).



9 Des shunts à structure en bande



10 Le transformateur de courant

Les primaires bobinés
Faibles intensités au primaire, puissance de charge élevée pour alimenter de nombreux instruments de mesure ou pour transmettre la mesure à longue distance, isolements des appareils, élévation d'intensité, telles sont les applications nécessitant l'utilisation de transformateur à primaire bobiné.

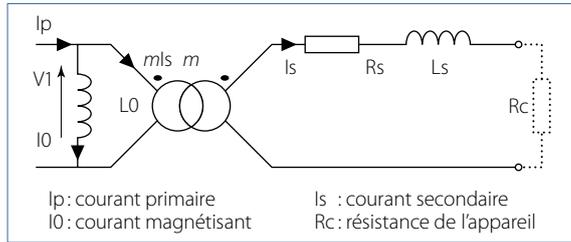
Les passages de câbles
Une gamme complète dédiée au passage des câbles de diamètre extérieur 12 mm à 88 mm pour des intensités primaires de 40 à 1 500 A.

Les mixtes et passages de barres
Passages à empreintes multiples pour câbles et barres en version JVO 25 CR DIL, JVO 32 CR et JVPS 10 CR ou passages largement dimensionnés pour les JVP 824, JVP 1025, JVP 1045 et JVP 1260. Ces transformateurs s'adaptent sur toutes les barres jusqu'à 125mm pour des intensités primaires de 75 à 5 000 A.

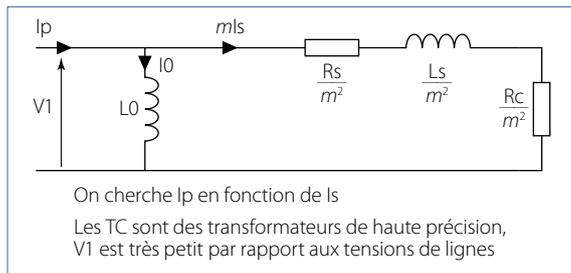
Les tores ouvrants
Les tores ouvrants sont commercialisés par Enerdis, filiale du groupe Chauvin Arnoux. Ils sont spécifiquement développés pour être facilement insérés dans une installation existante. L'utilisateur appréciera également la possibilité de mettre ces transformateurs en œuvre sans interruption supplémentaire lorsqu'il s'agit d'intervenir sur une installation en fonctionnement. Ils sont équipés d'un cache-bornes imperdable et d'une double borne pour le court-circuitage du secondaire. Ils sont disponibles en trois tailles différentes pour des intensités au primaire pouvant atteindre 5 000 A.

11 Différentes constitutions de transformateurs de courant

CHAUVIN ARNOUX



12 Le schéma équivalent du TC



13 Le schéma équivalent ramené côté primaire

parcouru par la même intensité de courant au rapport k près.

Pour les faibles intensités, on crée un enroulement de N_1 spires formant le primaire.

Le tore a une grande perméabilité et, en travaillant en faible induction (0,1 T), assure un transfert des courants : $N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 = 0$

Le TC fonctionnant comme un transformateur en court-circuit, donc à I_0 très faible, on peut négliger les pertes fer (la réluctance est très faible) 12 13.

Attention, un transformateur de courant doit toujours travailler en secondaire en court-circuit et ne pas être équipé de fusible, pour que les ampères-tours primaires soient neutralisés par les ampères-tours secondaires.

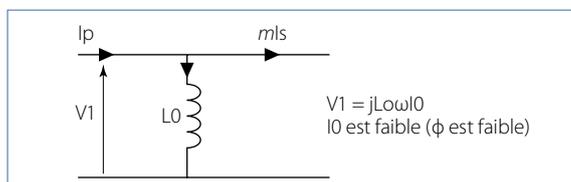
Si $N_2 \cdot I_2 = 0$ et $I_1 > 0$, l'induction dans le tore augmente, provoquant un accroissement de la tension, des pertes fer, donc un échauffement destructeur.

En cas d'ouverture du secondaire, $m \cdot I_s = 0$, donc V_1 augmente aux bornes de L_0 car I_0 augmente 14.

Comme le TC est élévateur de tension, une très grande tension traverse les enroulements secondaires de fils fins ayant une faible isolation, et ils sont susceptibles de claquer.

Point essentiel, le TC est le seul capteur à bénéficier d'une normalisation internationale, la CEI (185 et 186) définissant l'emploi des TC dans l'industrie :

- Courants primaires : de 5 à 5000 A suivant les modèles et les constructeurs



14 Le schéma équivalent en cas d'ouverture du secondaire du TC

15 Les pertes dans les câbles en VA en fonction de la longueur et de la section pour les deux calibres des TC 1 A et 5 A

TC 5 A	Longueur (en m)						
	1	2	5	10	20	50	100
Section (en mm ²)							
1,0	0,89	1,79	4,46	8,93	17,9	44,6	89,3
2,5	0,36	0,71	1,79	3,57	7,14	17,9	35,7
4,0	0,22	0,45	1,12	2,23	4,46	11,2	22,3
6,0	0,15	0,30	0,74	1,49	2,98	7,44	14,9
10	0,09	0,18	0,45	0,89	1,79	4,46	8,93

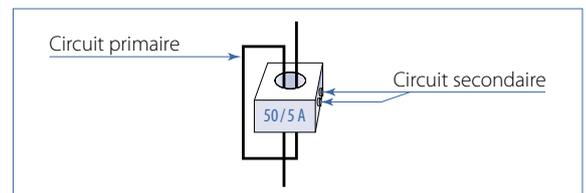
TC 1 A	Longueur (en m)						
	1	2	5	10	20	50	100
Section (en mm ²)							
1,0	0,04	0,07	0,18	0,36	0,71	1,79	3,57
2,5	0,01	0,03	0,07	0,14	0,29	0,71	1,43
4,0	-	0,02	0,04	0,09	0,18	0,45	0,89
6,0	-	-	0,03	0,06	0,12	0,30	0,60
10	-	-	0,02	0,04	0,07	0,18	0,36

- Courants secondaires : deux valeurs normalisées, 1 A et 5 A

Pourquoi ces deux valeurs de courants de sortie 1 A et 5 A ? La consommation des câbles est à prendre en compte pour définir la puissance du TC afin d'assurer un bon fonctionnement de la chaîne de mesure. En cas de forte longueur, il faut prendre une sortie 1 A 15.

À l'aide d'un TC à câbles passants ayant un courant primaire plus élevé à la place d'un TC bobiné, on peut adapter un rapport de transformation inférieur aux valeurs normalisées en faisant passer la ligne primaire plusieurs fois au travers du TC 16 17.

Les différents types de transformateurs de courant, hormis le transformateur saturable de courant, qui est associé à un relais différentiel thermique, garantissent une sécurité optimale grâce à une courbe de saturation définie en fonction du relais du montage 2 ou 3 TC (à 4 In ou à 1,5 In pour les démarrages sévères, par exemple pour ventilateurs sans registres).



16 L'adaptation du rapport inférieur du TC en bouclant de n spires le primaire

17 Le nombre de passage à réaliser en fonction du calibre du TC et du courant réel primaire à mesurer

Courant primaire à mesurer	Nombre de passages
50 A	1
25 A	2
10 A	5
5 A	10

Remarque : Attention lors de la mise en œuvre du TC bobiné, il a un sens de connexion ; le sens de bobinage est repéré par un point et doit recueillir le conducteur adéquat pour respecter la formation des ampères-tours.

Caractéristiques

- **Fréquences nominales :** 50 et 400 Hz
- **Puissances apparentes disponibles au secondaire :** De 2,5 à 100 VA. Le transformateur de courant étant destiné à alimenter des appareils de mesures, des compteurs, des relais... il est intéressant de connaître l'ordre de grandeur des consommations usuelles de ces récepteurs.
- **Erreurs de déphasage en fonction de la charge :** Exprimées en minutes d'angle, elles sont données par l'argument de I secondaire (Is) moins l'argument de I primaire (Ip).
- **Erreurs de rapport :** Le rapport Kn est défini par le quotient Ip/Is. Du fait des imperfections des TC, le rapport de transformation réel K est différent de Kn. L'erreur est définie en pourcentage :

$$\varepsilon = \frac{100 \cdot K_n \cdot I_s - I_p}{I_p}$$

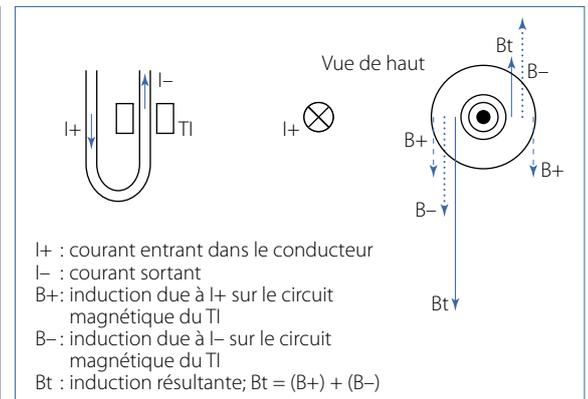
- **Précision :** Elle spécifie et évalue les performances ainsi que les domaines d'utilisation.
- **Charge de précision :** C'est la valeur de la charge pour laquelle les conditions de précision sont remplies. Elle est caractérisée par la puissance apparente absorbée au secondaire à un facteur de puissance donné. Les charges de précision s'échelonnent de 2,5 à 30 VA.
- **Classe de précision :** Elle est caractérisée par un nombre égal à la limite supérieure de l'erreur pour la grandeur primaire et la charge de précision (exprimée en pourcentage). Il en existe deux :
 - la **classe de mesure**, pour les erreurs faibles, à domaine restreint ;
 - la **classe de protection**, pour les erreurs plus importantes, au domaine étendu.

Pour les TC destinés à la protection, l'indice de la classe est suivi de la lettre P, elle-même suivie du facteur de limite de précision. Par exemple, le TC 5P20 présente une erreur de rapport de 5 % sur une plage de courant variant de Ip à 20 Ip.

● Influences externes :

- **L'influence de la charge.** C'est la principale cause de la variation de l'erreur. Les limites de la classe de précision doivent être définies pour une charge variant de 25 % à 100 % de la charge de précision.
- **L'influence de la fréquence.** La précision doit être tenue lorsque la fréquence varie dans les limites imposées par le cahier des charges.
- **L'influence du conducteur primaire.** La répartition du champ n'étant pas uniforme, afin d'éliminer l'induction de I+, on ajoute un enroulement de compensation.

- **Régime transitoire :** L'induction rémanente s'ajoutant à celle créée par le courant en cours d'établissement, il faut prendre en compte ce phénomène d'hystérésis **18**.



18 L'influence du conducteur primaire sur la mesure

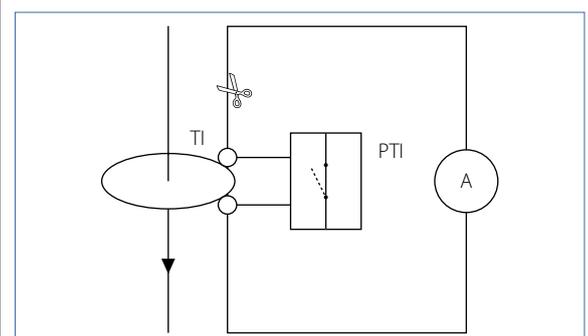
Grâce à la saturation naturelle du TC, le courant secondaire est limité, protégeant les équipements qui lui sont raccordés.

- **Constitution :** L'isolation est réalisée en porcelaine ou en matériaux composites. Le circuit magnétique est en tôles roulées ou en carlite, ce qui réduit les courants de Foucault.

- **Protection :** La protection du secondaire d'un TC est une nécessité. En effet, les transformateurs de courant étant souvent de rapport élevé, l'ouverture du secondaire alors que le primaire est encore sous tension peut donner lieu, comme nous l'avons déjà indiqué, à une surtension transitoire, due à l'ouverture d'un circuit secondaire selfique. La nécessité est la même dans le cas d'une tension très élevée permanente au secondaire, le transformateur de courant fonctionnant alors comme un transformateur de tension.

Par exemple, pour un TC de rapport 1 000:1 (nombre de spires au secondaire/nombre de spires au primaire), en cas d'ouverture du secondaire, le courant I1 provoque une tension de 1 V au primaire, ce qui donne 1 000 V au secondaire.

Ces tensions sont dangereuses pour le TC lui-même, pour les appareils de mesure reliés au TC et pour les personnels intervenant dessus. Pour pallier ce risque, il convient d'installer une PTI (Protection électronique de TI ou TC) en permanence au secondaire du TC, qui rendra toute coupure de charge au secondaire sans conséquence. Il en existe deux calibres, 1 A et 5 A, et deux limites de tensions crêtes, 21 V_{ac} et 25 V_{ac} **19**.



19 La protection électronique du TI

● Applications :

TGBT important, tableaux débrochables
Industries à risques d'explosion
Marine nationale ou marchande
Prévention des chaînes de mesure alimentées par des TC
Mines et carrières

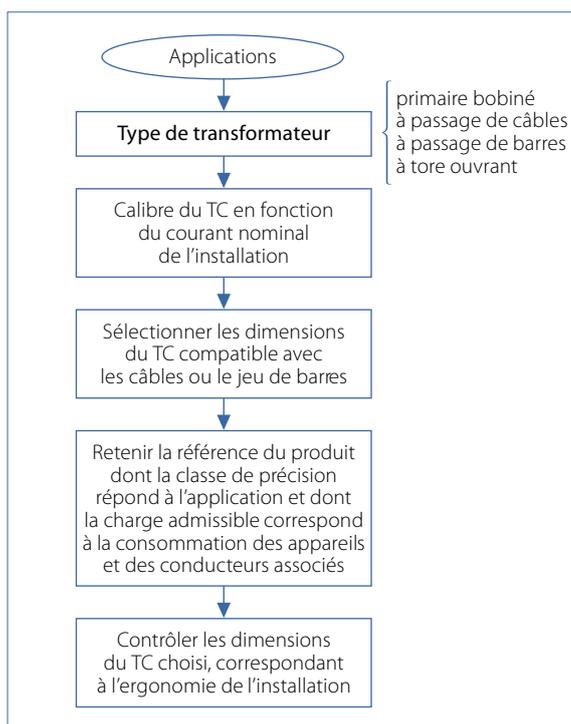
● Normes :

NFC 15-100 articles 473.1.4 et 556.3
GAM EG 13.C (norme militaire)

● Décrets :

N° 88-1056 des travailleurs
N° 91-986 des mines et carrières
Conforme à la publication UTE 18-610 : « Les interventions ou travaux sur les circuits alimentés par les secondaires de transformateurs de courant dont les primaires sont sous tension doivent être précédés de la mise en court-circuit des secondaires de ces transformateurs de courant à l'aide de dispositifs appropriés. »

L'organigramme de choix d'un TC est donné en 20.



20 L'organigramme de choix d'un transformateur de courant

Le capteur à bobine de Rogowski

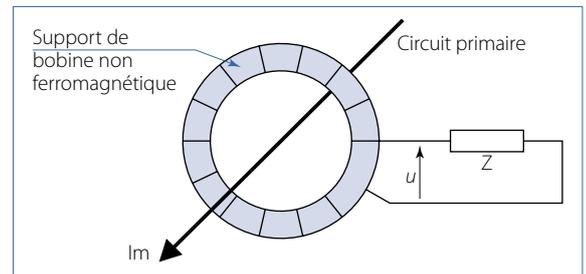
Le support de la bobine est non ferromagnétique ; il est en résine, ce qui procure une très bonne linéarité, car il n'y a aucune saturation magnétique 21.

L'image du courant I_m est une tension déphasée de $+90^\circ$.

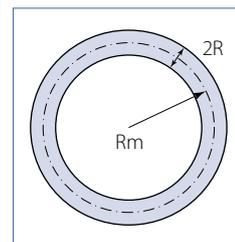
Si on applique le théorème d'Ampère, on peut déterminer U en fonction du courant primaire à mesurer 22 :

$$\oint H \cdot dl = N_p \cdot I_p$$

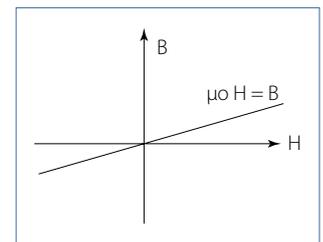
$$R_m : \text{rayon moyen du tore} \quad l = 2\pi R_m \quad N_p = 1$$



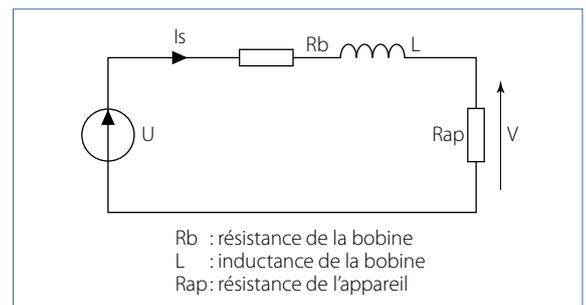
21 Le capteur à bobine de Rogowski



22 Le tore de Rogowski



24 La linéarité de $B = f(H)$



23 Le schéma équivalent

En déterminant $H = I_p/l$, puis $B = \mu_0 \cdot H$, enfin l'induction ϕ et la dérivée par rapport au temps multipliée par le coefficient $-N_s$, on arrive à l'expression de $U = f(I_p)$.

$$U(t) = -K \cdot I_p \cdot \omega \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

d'où le déphasage de $+90^\circ$, et le schéma équivalent 23. À partir de ce schéma et de l'expression de $U(t)$, on peut définir I_s en fonction de I_p . Après calcul et simplification :

$$I_s = \frac{I_p}{N_s} \times \frac{1}{1 + \frac{R_b + R_{ap}}{j\omega}}$$

Ainsi, pour les fortes fréquences, ω tendant vers l'infini :

$$I_s \approx \frac{I_p}{N_s}$$

En laboratoire, les bobines sont utilisées pour des fréquences de l'ordre du mégahertz avec des courants de 100 kA. La sensibilité de ce type de capteur est très faible 24, et la pente de la caractéristique est :

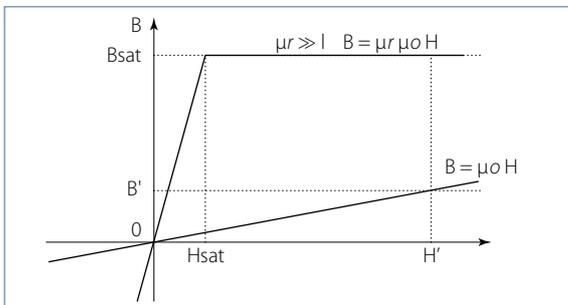
$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

La résistance de l'appareil doit être grande, en général de l'ordre de 10 kΩ.

Caractéristiques

● **Linéarité:** Les capteurs à bobine de Rogowski sont linéaires et ont une bonne réponse en régime transitoire, ce qui justifie leur emploi en sécurité et en protection.

Comparons les caractéristiques $B = f(H)$ d'un TC à celles d'un capteur à bobine de Rogowski en transitoire. Pour le TC, I_p peut prendre des valeurs considérables et H devient important (H'); il y a saturation magnétique; $B = B_{sat}$, l'image fournie ne correspond donc plus à l'évolution de I_p . Le capteur à bobine de Rogowski ne présente quant à lui aucune saturation magnétique, donc $H = h'$; $B = B'$, l'image fournie est donc fidèle à l'évolution de I_p en transitoire 25.



25 La comparaison des caractéristiques $B = f(H)$ d'un TC et d'un capteur à bobine de Rogowski

● **Influences externes:** Toutefois, la réponse de ces capteurs peut être affectée par l'environnement. Afin d'éviter les variations de charge et donc une augmentation de l'erreur, il faut que la charge soit très résistive et peu sensible à la température.

La fréquence fixée par le courant I_p impose le traitement électronique de l'image par un intégrateur de très bonne qualité.

L'influence électromagnétique d'autres conducteurs peut modifier la mesure.

Le capteur doit avoir un blindage assurant une protection aussi parfaite que possible.

● **Utilisation:** Du fait de leur faible sensibilité, ces capteurs sont utilisés pour mesurer des courants importants en HTA et HTB. De plus, si la fréquence est importante, le terme $L\omega$ croît, et L peut compter peu de spires, ce qui diminue les capacités parasites de la bobine; la bande passante s'en trouve élargie.

● **Spécification:** L'ensemble constitué par le capteur et l'unité de traitement est fourni par les industriels. Cela simplifie le choix du capteur, le client ne spécifiant plus que le courant secondaire, la puissance de précision, la classe de précision et le facteur limite de précision. En revanche, il faut déterminer le niveau d'isolement, le courant de court-circuit et la plage d'utilisation.



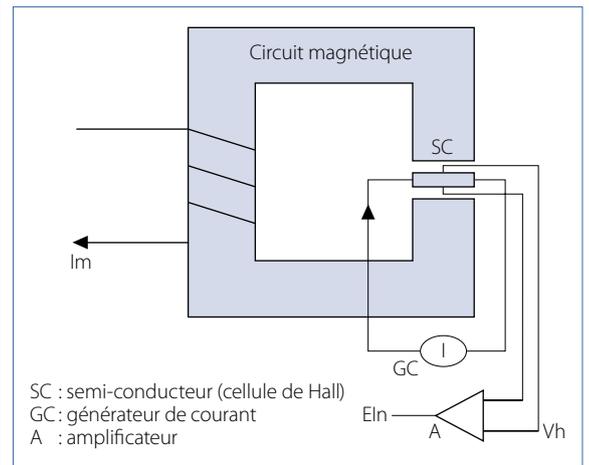
26 Le système AmpFLEX A100

27 Le système LEM-flex RR3035

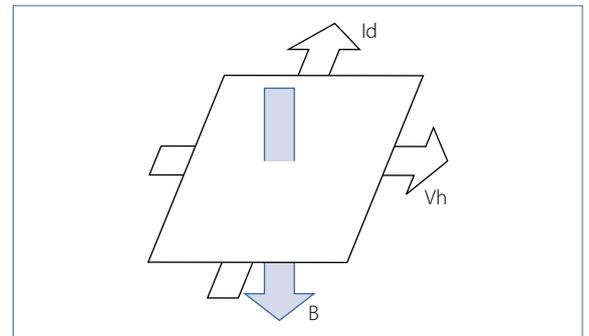
● **Applications:** Les systèmes AmpFLEX de Chauvin Arnoux ou LEM-flex de LEM 26 27.

Le capteur à effet Hall

Le capteur à effet Hall comporte un circuit magnétique traversé par un champ magnétique B qui est produit par le courant à mesurer I_m ($I_m = I_p$ au primaire). Un semi-conducteur, appelé cellule de Hall, est disposé dans l'entrefer du circuit magnétique 28.

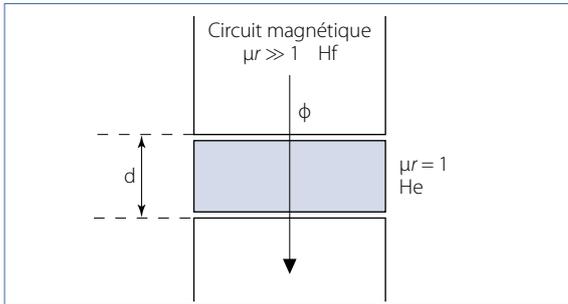


28 Le capteur à effet Hall



29 Les différentes grandeurs électriques

Si un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant à mesurer, une tension V_h apparaît sur ses faces latérales 29. Cette tension est connue sous le nom de



30 La vue en coupe d'une sonde à effet Hall

tension de Hall, du nom de celui qui l'a mise en évidence, Edwin Hall. Quand le courant d'excitation du dispositif de Hall est maintenu constant, le champ magnétique B est directement proportionnel au courant circulant dans le conducteur. La tension de sortie de Hall V_h est donc représentative de ce courant.

Un tel dispositif a deux avantages pour la mesure de courant :

- Il peut être utilisé pour mesurer des grandeurs en continu, puisque la tension V_h dépend uniquement de la force du champ magnétique.
- La réponse est instantanée, car la force du champ magnétique varie avec le courant à mesurer dans le conducteur. Ainsi, des signaux alternatifs de formes complexes peuvent être détectés et mesurés avec une grande précision et un faible déphasage.

Recherche de V_h en fonction de I_p :

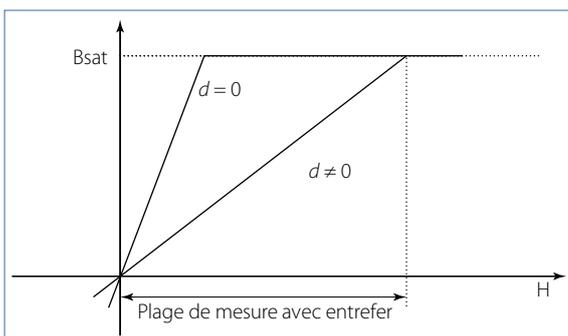
I_p crée un flux dans le circuit magnétique. On considère que le semi-conducteur a une perméabilité relative $\mu_r = 1$ et que le circuit magnétique est constitué de matériaux ferromagnétiques dont $\mu_r \gg 1$ 30. Après application du théorème d'Ampère,

$$\oint H \cdot dl = N_p \cdot I_p \quad H_e \cdot l + H_f \cdot l_f = N_p \cdot I_p$$

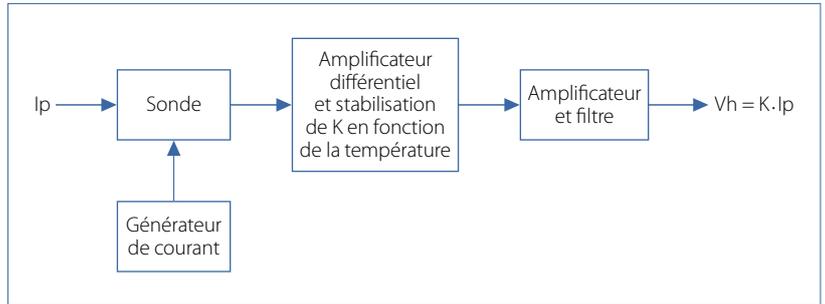
on obtient :
$$V_h = k \cdot I_p \cdot \frac{\mu_0 \cdot N_p}{d}$$

- H_f : excitation magnétique dans le fer
- H_e : excitation magnétique dans l'entrefer
- d : épaisseur de la cellule de Hall

Les constructeurs ajoutent à la cellule de Hall un circuit magnétique ayant pour fonction de concentrer le champ en surface du semi-conducteur. B dévient les électrons sur la totalité de la face soumise au champ,



31 La sensibilité accrue d'une sonde à effet Hall



32 Le schéma fonctionnel d'une sonde à effet Hall

la sensibilité est meilleure 31. Le semi-conducteur possédant une perméabilité relative proche de 1, ce qui l'assimile à un entrefer dans le circuit magnétique ; la plage de mesure est élargie 32.

Caractéristiques

- **Précision :** V_h n'est pas parfaitement proportionnelle à B . Quatre facteurs en sont la cause :
 - La tension d'offset. Elle est due au semi-conducteur : même si B est nul, V_h ne l'est pas ; c'est ce que le constructeur appelle la composante résiduelle inductive.
 - Les courants de Foucault. Les variations alternatives de B donnent naissance à des courants de Foucault dans la cellule de Hall, ce qui réduit la valeur du courant de commande (augmentation de la température). Pour des entrefers assez larges, on néglige les courants de Foucault sous 10 MHz.
 - Les erreur de linéarité. Il y a des phénomènes de saturation magnétique malgré l'entrefer, ce qui ajoute des erreurs de linéarité.
 - La température. Elle modifie les caractéristiques de la cellule de Hall : K varie de 0,01 % par degré Celsius.
- **Sensibilité :** Pour les courants faibles, le problème est récurrent. Les cellules actuelles ont une sensibilité de l'ordre de 40 mV/A, d'où un domaine d'emploi s'étendant de 1 A à 100 kA.
- **Bande passante :** Il est possible de mesurer des courants continus et alternatifs dont la bande passante serait de l'ordre de 40 kHz (ce qui est suffisant pour le contrôle des régulations à MLI). L'électronique de traitement limite la bande passante ; sensibilité et fréquence influencent la technologie des composants.
- **Applications :** La série PR de LEM 33.

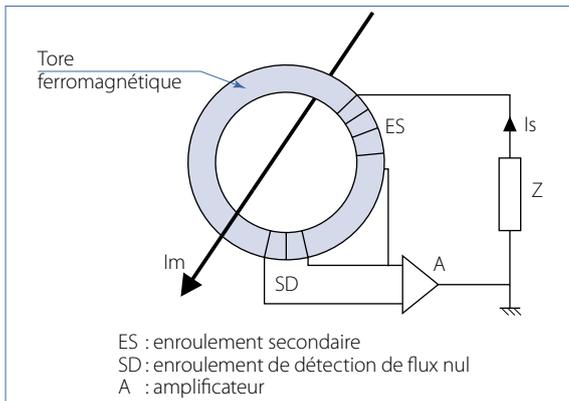


33 Pinces à effet Hall LEM PR 30 et LEM PR 200

Mesure en instantané
Bande passante: 30 kHz
Sortie: 100 mV/A

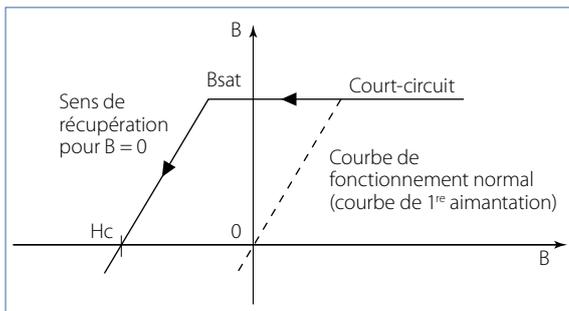
Le TC à flux nul

C'est un transformateur de courant auquel on ajoute un enroulement auxiliaire, de façon à éliminer les phénomènes de saturation magnétique. On cherche à travailler sur la courbe de première aimantation ($B = 0; H = 0$) 34.



34 Le TC à flux nul

Mais, en cas de court-circuit ou surcharge, l'électronique a un temps de réponse trop long par rapport à la perturbation, ce qui sature le circuit magnétique. Après un court-circuit, l'unité de traitement annule le champ pour obtenir $B = 0$, or, du fait de la saturation, h n'est pas nul (H coercitif). Apparaît alors une tension d'offset, donc une erreur de mesure 35.

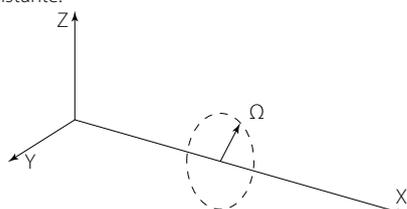


35 Il faut procéder à une démagnétisation du capteur de façon à avoir $B = 0$ à $H = 0$

Rappels d'optique

La polarisation

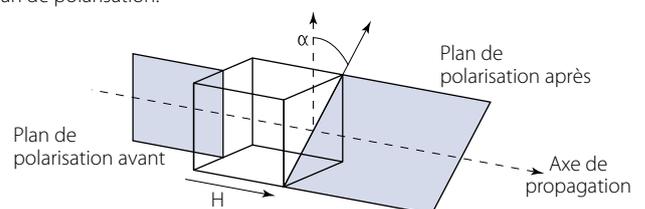
On parle de polarisation quand une onde lumineuse monochromatique décrit une sinusoïde en rotation autour de son axe de propagation. La vitesse de rotation est constante.



Le plan de propagation de l'onde est le plan XZ, et la rotation s'effectue autour de l'axe X, qui indique aussi le sens de propagation de l'onde. Ω est la vitesse de rotation.

La biréfringence

La biréfringence est un phénomène présenté par certains corps naturels, traversés par une lumière qui ne se propage pas à la même vitesse suivant son plan de polarisation.



Le milieu optique soumis au champ magnétique est représenté par le cube. L'angle α est donné par la relation: $\alpha = V \cdot \oint H \cdot dl$
 V : constante de verdet, dépendante du milieu optique

Caractéristiques

- **Précision** : Dans le cadre d'un fonctionnement normal, la précision de ce capteur est très bonne; l'erreur est de l'ordre de 0,02 %. Pour la phase, on rencontre des erreurs inférieures à 0,1'.
- **Utilisation** : La plage d'utilisation est liée à l'électronique qui gère la compensation de flux. Ces capteurs sont presque uniquement réservés à l'étalonnage des autres TC, compte tenu de leur précision.
- **Coût** : Élevé.

Le capteur à effet hall à flux nul

On ajoute un enroulement auxiliaire à un capteur à effet Hall pour enrayer toute saturation.

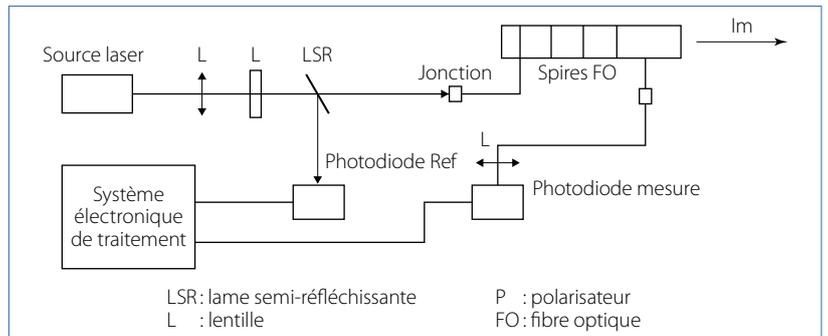
Le principe de l'annulation du flux est identique à celui du TC à flux nul, et les problèmes liés à la rapidité de l'électronique en cas de surintensité sont les mêmes. En revanche, la bande passante est beaucoup plus grande, de l'ordre de quelques mégahertz.

Ses propriétés sont similaires à celles du capteur à effet Hall.

Le capteur optique à effet Faraday

L'effet Faraday repose sur l'utilisation d'une onde lumineuse polarisée soumise à un fort champ électrique et qui voit son plan de propagation effectuer une rotation d'un angle α (voir l'encadré « Rappels d'optique ») 36.

Il existe deux réalisations possibles :
– à cristaux optiques, d'un montage complexe, et



36 Le capteur optique à effet Faraday

qui, plus ou moins sensibles aux courants extérieurs, doivent être au plus près du conducteur ;
 – à fibre optique, peu sensible aux courants externes, mais plus à la température (modification des propriétés optiques).

$$\alpha = V \cdot \oint H \cdot dl = V \cdot N \cdot I$$

N : nombre de spires de fibre optique

L'utilisation des capteurs optiques ne va pas sans poser de problèmes :

- Ils sont relativement sensibles à la température ; leur précision s'en trouve affectée, et l'électronique doit compenser ces effets.
- Les contraintes mécaniques sur la fibre optique et la température modifient le taux de biréfringence, or celui-ci doit rester constant.
- L'électronique agit aussi sur la bande passante et sur l'aptitude à détecter α .

Malgré cela, les capteurs optiques ont une précision proche de celles des TC.

Les matériels de mesure

Le tableau comparatif 37 dresse la liste des avantages et des inconvénients de chacun des types de matériels ; le tableau 38 en résume le principe d'utilisation.

L'appareil le plus utilisé est évidemment la pince ampèremétrique.

Les pinces ampèremétriques

On distingue trois types de pinces :

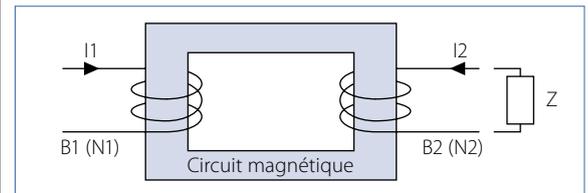
- Dans le cas du régime alternatif uniquement
 Elles sont basées sur le principe d'un TC d'un type particulier.

Un transformateur est constitué, comme chacun sait, d'un circuit magnétique sur lequel sont bobinés deux enroulements, un primaire et un secondaire 39. Lorsqu'un courant I_1 passe dans le bobinage primaire, il crée par le circuit magnétique un courant dans le bobinage secondaire régi par la relation :

$$I_2 = (I_1 \cdot N_1) / N_2$$

Le principe des pinces est identique, mais la constitution est différente : les mâchoires de la pince contiennent le circuit magnétique commun et l'enroulement secondaire 40. Le conducteur seul constitue l'enroulement primaire ($N_1 = 1$), ce qui donne, N_2 étant le nombre de spires au secondaire de la pince :

$$I_2 = I_1 / N_2$$



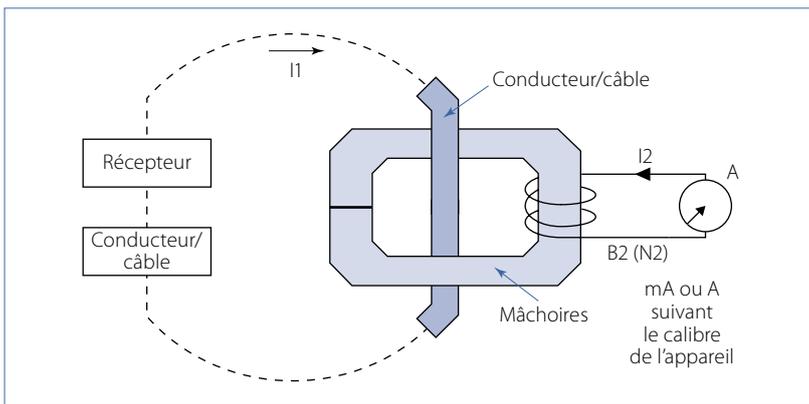
39 Le principe du TC utilisé en alternatif

37 Les avantages et inconvénients des différents matériels de mesure de courant

Principe physique	Matériel proposé	Avantages	Inconvénients
Shunt	Ampèremètre	Montages fixes, essais en laboratoire, enseignement, lecture directe	Ne convient pas à la maintenance : pour insérer l'appareil, il faut interrompre l'alimentation de la charge (arrêt de la chaîne de fabrication)
	Shunt	Montage fixe, essais en laboratoire, enseignement, entrée intensité d'un appareillage de mesure Permet de charger un TC ou une pince ampèremétrique	Pas d'isolement galvanique entre la source et l'appareil de mesure Convient seulement pour une installation fixe : pour insérer le shunt, il faut interrompre l'alimentation de la charge (arrêt de la chaîne de fabrication)
TC	TC	Conversion d'intensité et isolement galvanique	Distance entre la source et la mesure limitée Danger en cas de rupture du secondaire du TC Convient seulement pour une installation fixe en alternatif (armoire)
Bobine de Rogowski	Capteur flexible d'intensité	Mesure des courants forts, possibilité d'enserrer n'importe quel conducteur (barre, câble, toron...) Faible déphasage (idéal pour les mesures wattmétriques), absence d'effet de saturation, très léger (pas de circuit magnétique) Conversion d'intensité et isolement galvanique	Réservé à la mesure des courants en AC industriels (de 1 à 10 kA)
Effet Hall	Transformateur à effet Hall	Montage en installation fixe, mesure du courant dans toutes ses composantes (AC, DC, AC + DC) Génération de courant de process sans interruption de charge Conversion d'intensité, isolement galvanique	Traitement des petits courants difficiles Prix élevé (ajout de l'unité de traitement)
	Convertisseur de mesure	Montage en installation fixe, mesure du courant dans toutes ses composantes (AC, DC, AC + DC) Génération de courant de process (avec décalage d'origine possible) Conversion d'intensité, isolement galvanique	Prix élevé (ajout de l'unité de traitement)
	Pince ampèremétrique	Idéale pour la maintenance, l'enseignement, le laboratoire Tout type de mesure possible Génération de signaux de sortie de divers types possible Isolement galvanique et sécurité largement accrue	Prix élevé (si ajout de l'unité de traitement, des fonctions et des protections) Ne convient pas en installation fixe

38 Le principe d'utilisation des différents matériels de mesure de courant

Matériel proposé	Principe d'utilisation
Ampèremètre	On insère un ampèremètre dans le montage. L'intensité passe au travers d'un shunt interne à l'appareil ou d'un bobinage suffisamment dimensionné. La valeur est directement lue en ampères sur le dispositif d'affichage. Cet appareil peut être portable ou de tableau sous forme d'un afficheur numérique ou galvanométrique
Shunt	On insère un shunt dans le montage. L'intensité traversant le shunt calibré crée une chute de tension proportionnelle à ses bornes. La valeur peut être lue à l'aide d'un voltmètre. Les shunts sont calibrés en ampères, et la mesure en volts. Ex.: 100 A / 0,1 V, soit 1 mV par ampère
TC	L'intensité à mesurer traversant le conducteur, le TC crée un champ magnétique proportionnel à l'intensité débitée par la charge, dont l'image peut être ensuite récupérée par un transformateur calibré La valeur est lue en ampères. Les TC sont calibrés en ampères, et la mesure en ampères. Ex.: 100 / 5 A ou 100 / 1 A
Capteur flexible d'intensité	Le conducteur dont on cherche à mesurer l'intensité du courant forme le primaire, tandis que le secondaire est formé par un bobinage spécifique réalisé sur un support flexible. Cette bobine développe à ces bornes une tension U proportionnelle à la dérivée de courant Cet ensemble doit être ensuite traité par une électronique appropriée
Transformateur à effet Hall	Une cellule à effet Hall placée dans un champ magnétique a une tension proportionnelle à l'intensité débitée par la charge à ses bornes. La valeur peut être lue à l'aide d'un voltmètre. Il est alors nécessaire de traiter le signal de mesure
Convertisseur de mesure	Un transformateur interne qui peut être muni d'une cellule à effet Hall placée dans son circuit magnétique voit apparaître une tension proportionnelle à l'intensité débitée par la charge. La valeur peut être lue par un ampèremètre ou un voltmètre
Pince ampèremétrique	Elle peut consister en un simple transformateur (ouvrant), chargé ou non au secondaire avec une cellule à effet Hall avec ou sans traitement du signal de mesure, avec ou sans affichage Elle peut comporter l'ensemble des fonctions d'un appareil de mesure (A, V, Ω, F, W, VA, var, FP, THD...) Elle peut avoir divers types de sorties (analogiques, RS232...)



40 La pince utilisée en alternatif

Or, il est souvent difficile de mesurer I_1 directement, car les courants sont trop importants pour être mesurés directement par l'appareil, ou simplement parce que l'on ne peut pas interrompre le circuit. Pour obtenir un niveau convenable, un nombre connu de tours est effectué sur le bobinage de la pince. Le nombre de tours du bobinage secondaire est généralement un nombre entier (100, 500, 1 000). Si N_2 est de 1 000 spires, la pince aura un rapport de 1 000:1, soit 1 mA au secondaire pour 1 A au primaire.

Il existe d'autres rapports pour des applications bien spécifiques : 500:2, 2 000:2, 3 000:1, 3 000:5.

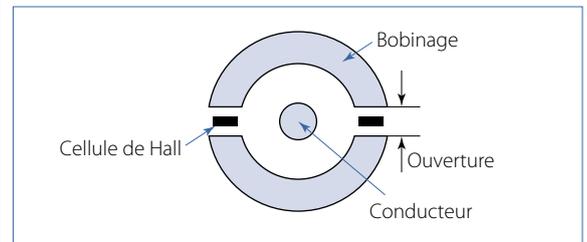
Ces pinces peuvent être utilisées avec des multi-

mètres numériques sur le calibre courant alternatif (il faudra multiplier la valeur lue par le rapport de la pince) pour tout appareil à entrée courant ayant une bonne impédance d'entrée **41**.

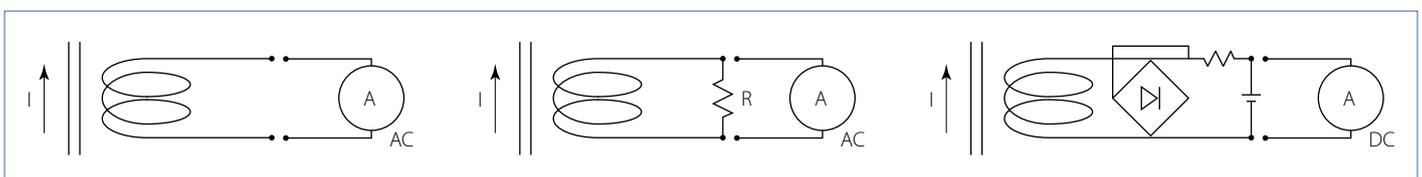
Avec tout appareil ne disposant que des calibres tension – oscilloscope, centrale d'acquisition...-, elles peuvent avoir des sorties tension AC ou DC. Dans ce cas, la sortie en millivolts de la pince est proportionnelle au courant mesuré (1 mV_{AC} / A_{AC}).

En encadré est présentée « Une technologie particulière, le système AmpFLEX ».

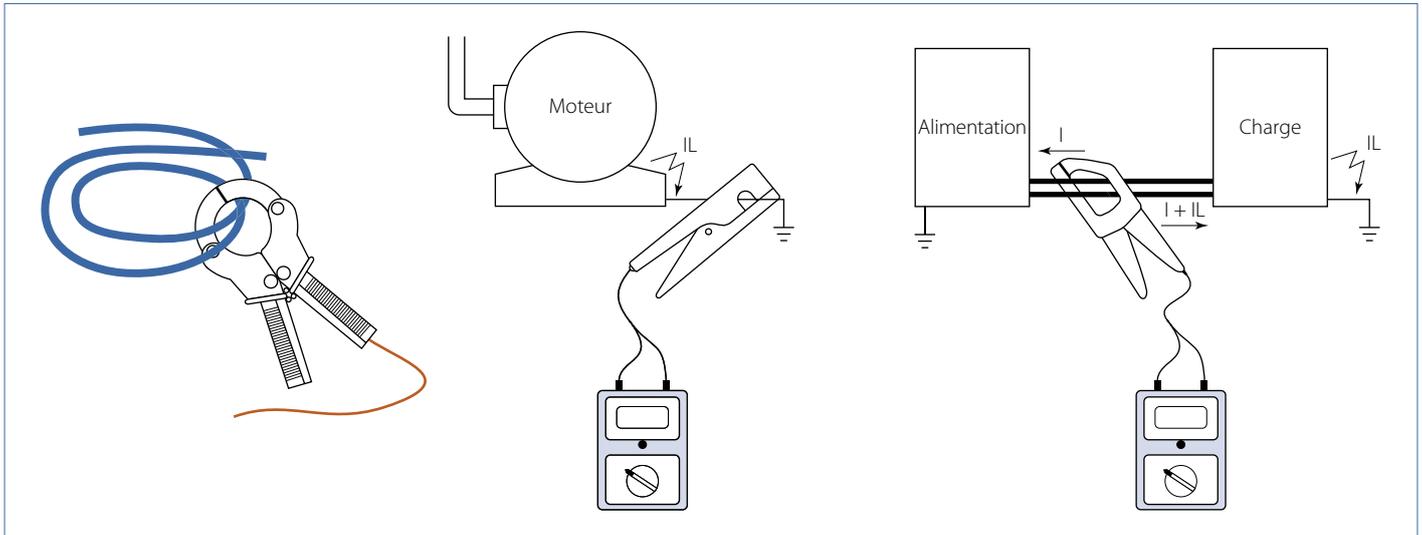
● **Dans le cas des régimes alternatif et continu**
Basées sur l'effet Hall déjà vu précédemment, les pinces sont constituées d'une mâchoire insérant une ou deux cellules de Hall. Capables de mesurer aussi du continu, elles sortent en millivolts AC et DC et sont donc connectables à n'importe quel appareil à entrée tension **42**.



42 La pince ampèremétrique polyvalente (AC et DC)



41 3 types de pinces adaptables aux multimètres (ampèremètre, voltmètres AC et DC)



43 La pince pour courants faibles

44 La recherche de défaut de fuite avec une pince pour courants faibles ou un modèle adaptable sur multimètre

45 La recherche de défaut de fuite peut se faire en enserrant les deux câbles de deux polarités différentes: si la lecture est non nulle, il y a bien présence d'un courant de fuite

● Pour les courants faibles, boucles de process et courants de fuite

Les pinces utilisent le principe de saturation des circuits magnétiques. Elles sont prévues pour la mesure de courants faibles continus comme les boucles de process de type 4-20 mA **43 44 45**.

Si les courants sont trop faibles pour la sensibilité de la pince, il est possible d'insérer plusieurs

fois le conducteur dans la mâchoire de la pince. La valeur du courant est le rapport de la valeur lue sur le nombre de tours. Par exemple, avec un rapport de pince de 1000:1, un multimètre réglé sur le calibre 200 mA_{AC}, un nombre de tours de 10, si la lecture du multimètre donne 60 mA_{AC}, le courant réel, tenant compte des 10 spires créées, est de: $60 \text{ mA} \times 1000 / 10 = 6 \text{ A}$

Une technologie particulière, le système AmpFLEX

Les AmpFLEX série A100, ce sont neuf modèles standard de tores flexibles pour mesurer les courants alternatifs de 0,5 A à 10 kA, aux fréquences industrielles. Chaque tore flexible (longueur: 45, 80 ou 120 cm selon le modèle) est raccordé par un cordon blindé à un petit boîtier contenant l'électronique de traitement et une pile 9 V standard. L'entraxe des douilles (19 mm) permet le raccordement direct sur tout type de multimètre, sur un enregistreur doté d'une entrée tension alternative (impédance $Z > 1 \text{ M}\Omega$), ou encore sur un oscilloscope, avec un accessoire de raccordement spécifique. Le boîtier dispose d'un témoin de contrôle de la pile.

Rappel du principe de fonctionnement

Le capteur AmpFLEX est un transformateur conçu sur le principe de la bobine de Rogowski. Le conducteur véhiculant le courant alternatif à mesurer forme le circuit primaire, tandis que le secondaire est formé par un bobinage spécifique, réalisé sur un support flexible. Cette bobine développe à ses bornes une tension proportionnelle à la dérivée du courant primaire à mesurer. Cette tension alternative est alors ramenée par un câble blindé au boîtier contenant toute l'électronique de traitement et la pile d'alimentation.

La série A100 offre différents rapports d'entrée/sortie selon les modèles: 0,1 mV, 1 mV, 10 mV et 100 mV par ampère.

Les atouts des AmpFLEX

La flexibilité et la maniabilité: C'est leur intérêt majeur. Ils peuvent enserrer un conducteur quelles que soient sa nature (câble, barre, toron...) et son accessibilité. Le système d'ouverture/fermeture du tore, simple et rapide, autorise la manipulation aisée dans toutes les situations, même avec des gants de sécurité, obligatoires dès lors que l'on doit intervenir sur des conducteurs nus sous tension. Et les plus petits modèles (45 cm), pour compenser leur plus grande rigidité, sont préformés afin de faciliter l'enserrage autour du primaire.

À noter également, la possibilité d'enserrer plusieurs câbles ou des jeux de barres, en raison de la grande longueur de capteur (jusqu'à 1,20 m en standard), ce qui permet une sommation de mesure.

Une plage de mesure très étendue: Chaque modèle, quel que soit son calibre, commence à mesurer à partir de 500 mA de courant primaire. Les différents calibres proposés (suivant le modèle, en mono ou bicalibre) sont: 20 A, 200 A, 300 A, 1 kA, 2 kA, 3 kA et 10 kA.

Une conception des plus sûres: Question sécurité, ils sont conformes à la norme IEC 61010 (1 000 V, catégorie III) et double isolation. Question robustesse, le capteur tolère une température permanente de 80 °C et bénéficie d'un indice de protection IP 65. Il résiste également aux huiles et hydrocarbures aliphatiques.

Les autres points forts sont:

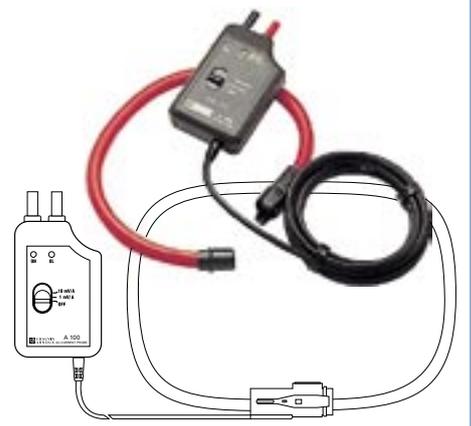
La bande passante de 10 Hz à 20 kHz, adaptée aux fréquences industrielles et aux analyses d'harmoniques

La bonne précision de 1 % typique

La légèreté, due à l'absence de circuit magnétique

L'absence d'effet de saturation, donc d'échauffement

Le faible déphasage, constant sur toute l'étendue de mesure, donc approprié aux mesures wattmétriques



AmpFLEX Chauvin Arnoux 20-200 A

Les exploitations

● Pincas ampèremétriques à effet Hall AC/DC (TRMS)

Diagnostic automobile : mesure du courant de démarrage du moteur à courant continu sur un véhicule électrique ou mesure du courant de fuite d'une batterie sur un véhicule thermique

Moteur piloté par variateur : mesure de l'intensité nominale moteur déformée en TRMS grâce à une bande passante élevée

Contrôle de l'équilibrage des phases en sortie d'onduleur, mesure de courants déformés sur une charge non linéaire

Diagnostic sur les alimentations à découpage en amont et en aval par la mesure de courants déformés et à fréquence élevée

● Enregistreur numérique en AC RMS

Contrôle du débit et de la charge d'un alternateur, d'un générateur, d'un groupe électrogène

Gestion d'énergie et diagnostic de panne

● Pincas AC/DC faibles courants (de 1 mA à 4,5 A)

Contrôle de boucle de process 4-20 mA, vérification de certains capteurs ou des courants de commande de relais

Mesure de courants de défaut (de fuite)

Contrôle, par un moyen détourné, de l'isolement des matériels électroniques (En effet, les circuits électroniques n'apprécient pas beaucoup les tensions nécessaires à la mesure des isollements des mégohmmètres traditionnels. Certaines pincas peuvent évaluer l'isolement en mesurant le courant de fuite circulant à la terre dans le conducteur de protection vert-jaune.)

● Pincas à capteur flexible en AC

Des outils de mesure souples, sûrs, et remarquablement simples d'emploi (voir l'encadré « Une technologie particulière, le système AmpFLEX »), adaptés aux mesures de courant sur câbles phase/neutre ou phase/neutre/terre.

Guide de choix

Il s'agit de répondre aux questions suivantes (voir l'encadré « Méthodologie ») :

- Quelle est la nature du courant à mesurer : alternatif ou continu (les pincas en courant continu sont répertoriées en AC/DC car elles mesurent les deux) ?
- Quelles sont la valeur la plus élevée et la valeur la moins élevée de l'intensité du courant à mesurer ?
- La précision à bas niveau est-elle appropriée ? Sinon, sélectionner une pince pour courants plus faibles ; la précision est la plus élevée sur les calibres forts.
- Quelle est la taille du conducteur à enserrer (la taille de la mâchoire) ?
- Quel type de signal accepte l'appareil sur lequel sera branchée la pince (mA, mV, AC, DC) ? Vérifier l'impédance de charge maximale pour s'assurer que la pince réponde bien aux besoins.
- Quelle est la tension du conducteur (certaines pincas acceptant jusqu'à 600 V) ?

Méthodologie

Pour réaliser son choix

Pour adapter au mieux un capteur au montage à mesurer, il convient de tenir compte des points suivants :

L'étendue de mesure en ampère

La bande passante en hertz avec ou sans continu

La précision en pourcentage de l'étendue de l'échelle

La résolution (c'est la plus petite valeur lue)

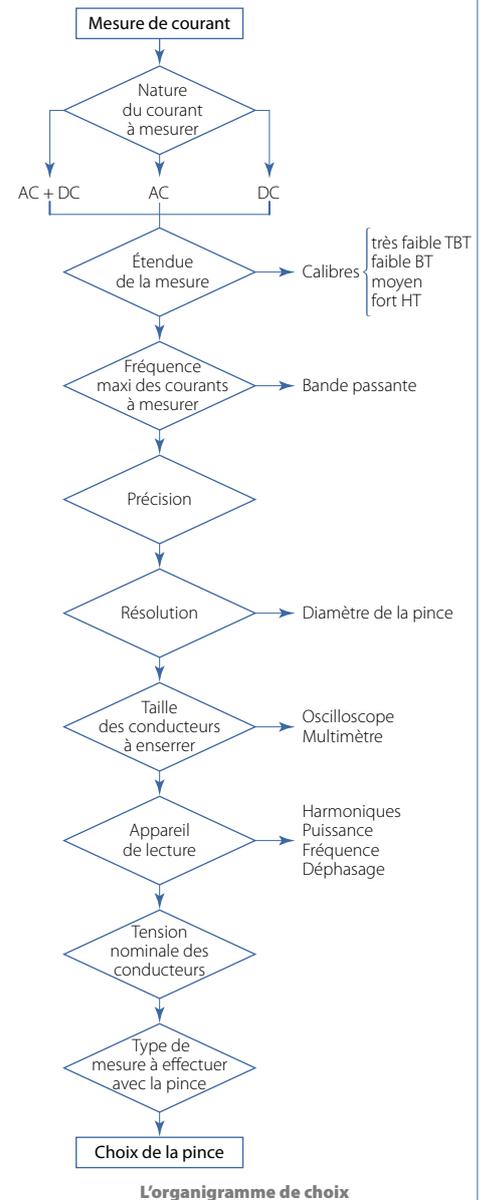
La catégorie de surtension ou d'installation (qui précise un environnement) : I, II ou III

Le degré de pollution (selon la pollution ambiante) : 1, 2 ou 3

La classe : 1 (avec terre), 2 (double isolation) ou 3 (tension non dangereuse) si accessible à l'utilisateur

Pour réaliser une mesure

- 1 Connecter la pince à l'appareil.
- 2 Sélectionner la fonction et le calibre adapté.
- 3 Enserrer la pince autour d'un seul conducteur.
- 4 Lire la valeur du courant traversant le conducteur en tenant compte du calibre de la pince et du calibre de l'appareil de mesure. Par exemple, pour une pince à sortie 100 mV/A, on a choisi sur l'oscilloscope 0,5 V/div ; le calibre réel en courant est donc 5 A/div. Mais il existe des pincas ampèremétriques adaptables sur des multimètres permettant de donner directement la valeur en courant en milliampères ou en ampères en AC ou DC.

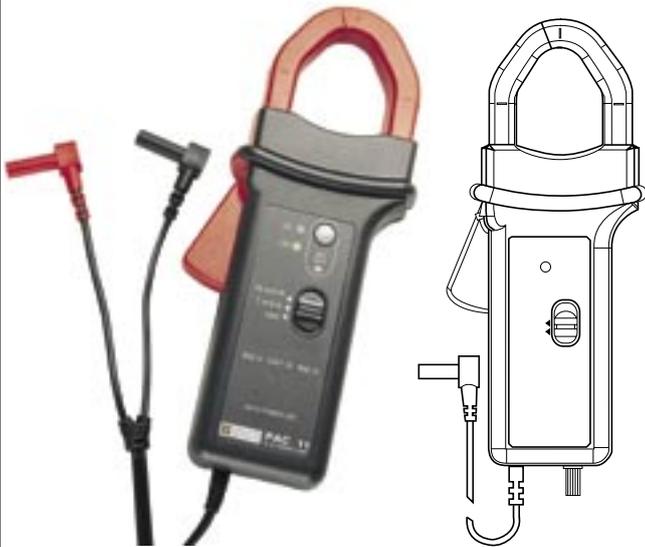


- Quel est le type de connectique utilisé : douilles, cordons et fiches bananes ou BNC ?
- La pince devra-t-elle mesurer des harmoniques ou des puissances ?
- Quelles sont les spécifications en fréquence, les déphasages... ?

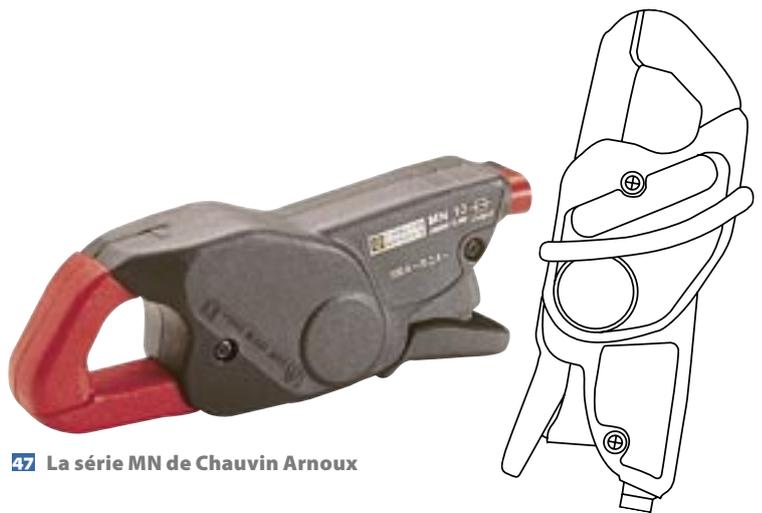
Des exemples types

Voici quelques séries de modèles de la gamme intermédiaire de pincas ampèremétriques (excluant les pincas multimétriques, wattmétriques, la gamme courant faible, la gamme courant fort et les pincas de mesure de terre). Leurs mâchoires sont prévues pour enserrer du plus petit câble jusqu'aux plus grosses barres.

- La série PAC de Chauvin Arnoux utilisent l'effet Hall et vont jusqu'à des mesures de 1000 A en AC et 1500 A en DC, avec deux sensibilités, 1 mV/A et 10 mV/A [46](#).



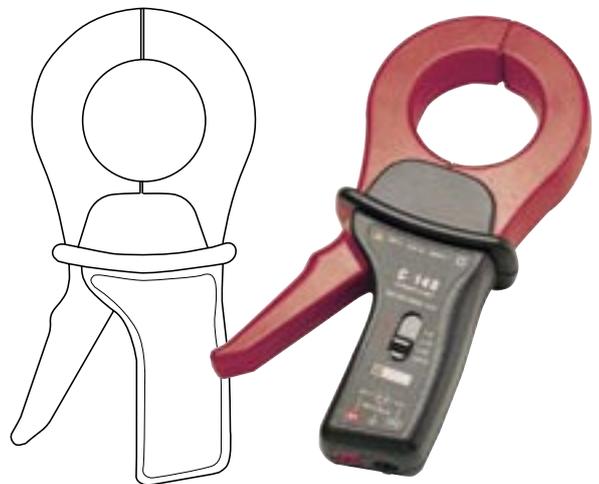
46 La série PAC de Chauvin Arnoux



47 La série MN de Chauvin Arnoux



48 La série Y de Chauvin Arnoux



49 La série C de Chauvin Arnoux

Les séries MN, C, et Y sont prévues en mesure de courant alternatif uniquement :

- La série MN est conçue pour la mesure des courants faibles à moyens (0,01 à 240 A) à partir de n'importe quel multimètre ou oscilloscope 47. Deux types sont proposés : l'un, fonctionnant comme un transformateur de courant (1 000:1), fournit un courant en milliampères ; le second, fonctionnant en tension (tension, proportionnelle à la valeur du courant, de 1 mV/A, 10 mV/A, 100 mV/A ou 1 000 mV/A), permet aux contrôleurs ne disposant pas de calibres courants de mesurer des intensités à partir des calibres tension AC ou DC.
- La série Y est prévue pour les petites barres jusqu'à 600 A 48. Les deux mêmes types sont proposés : transformateur de courant (rapport 10:1, 1 000:1), utilisable sur les appareil à calibres en courant ; sortie tension continue proportionnelle au courant alternatif mesuré (1 mV/A, 10 mV/A). Un modèle spécial oscilloscope est disponible.
- La série C 100 est riche de treize modèles mesurant des courants jusqu'à 1 000 A avec une grande précision et une bonne linéarité 49 : bobinage symétrique uniformément réparti pour un déphasage minimal, système pendulaire d'ajustement des éléments magnétiques, enserrage de diamètre 52 mm. Certains modèles sont pourvus de tore en micrométal spécialement développé

pour des applications wattmétriques (C112, C113, C116, C117). Le modèle C160 permet de se connecter directement sur un oscilloscope, car la pince est isolée et offre trois sensibilités différentes : 100 mV/A (courant 30 A crête), 10 mV/A (courant 300 A crête), 1 mV/A en AC (courant 2 000 A crête).

Les pinces au regard de la norme

La norme internationale IEC 61010 définit les prescriptions générales de sécurité pour les appareils électriques destinés aux usages professionnels, industriels et éducatifs.

Les pinces F11 et F15 ont une double isolation, un degré de pollution 2 (protection contre les corps étrangers, solides, liquides...), sont de catégorie II (protection contre les surtensions, transitoires...) et comprennent une protection contre les chocs mécaniques (chute de 1 mètre de hauteur sur réceptacle en chêne posé sur béton).

Les pinces AmpFLEX répondent à la norme IEC 61010-1-32 pour les tensions de 1 000 V par rapport à la terre, à la catégorie d'installation III (ou 600 V catégorie IV selon IEC 664) et au degré de pollution 2.

Les pinces PAC 10/20 sont conformes aux normes IEC 61010-1 et 61010-2-032 600 V catégorie III et au degré de pollution 2. ■