

Les capteurs et transformateurs de courant

When **energy** matters



When **energy** matters

socomec
Innovative Power Solutions

Sommaire

A quoi sert un transformateur/capteur de courant ?.....	1
Quels sont les différents types de transformateur/capteur de courant ?	1
Les capteurs et transformateurs de courant de mesure	2
Les capteurs et transformateurs de courant de facturation.....	2
Les transformateurs de courant de protection	2
Les transformateurs de courant différentiel	2
Comment fonctionne un transformateur de courant ?.....	2
Impact du déphasage sur la mesure.....	3
Les critères essentiels de qualité et de performance pour un noyau magnétique de transformateur de courant	4
La perméabilité	4
L'inductance maximale (Bmax).....	5
Stabilité en température	5
Quelles sont les différentes technologies pour mesurer le courant ?.....	5
Les transformateurs et capteurs de courant à noyau ferromagnétique.....	5
Les capteurs de courant Rogowski	6
Les capteurs de courant à effet Hall	7
Quelles sont les caractéristiques d'un capteur de courant ?	8
Le signal de sortie.....	8
Le courant primaire assigné	8
La précision	9
La puissance	11
Tension maximale d'utilisation	11
Tension d'isolement	11
Surcharge intermittente.....	11
Catégorie de mesure	12
Quels sont les principaux critères de choix d'un capteur de courant ?	12

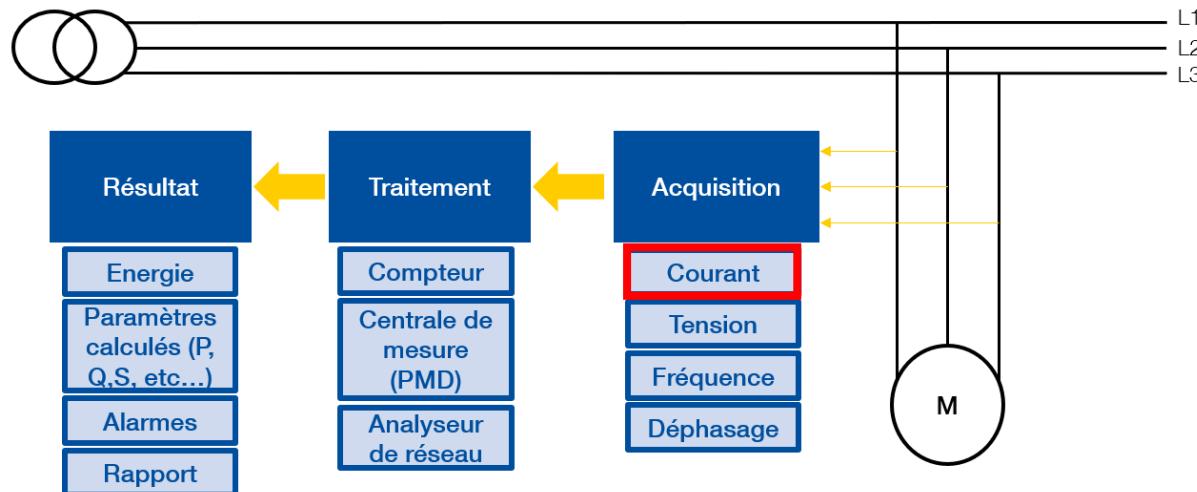
A QUOI SERT UN TRANSFORMATEUR/CAPTEUR DE COURANT ?

Le transformateur de courant (TC) ou d'intensité (TI) tout comme le capteur de courant est un maillon essentiel dans les chaînes de mesure d'énergie électrique.

En effet, le transformateur de courant transforme un courant primaire, généralement trop élevé pour les centrales de mesure, en un courant ou une tension secondaire, de valeur inférieure, compatible avec ces dernières.

Le capteur de courant, quant à lui, est une appellation plus générique qui englobe l'ensemble des technologies de mesure (Rogowski, effet Hall, Fluxgate, etc...). Il sert à convertir tout comme le TC un courant primaire en un signal secondaire interprétable pour le dispositif raccordé.

En résumé, le rôle du transformateur et du capteur de courant est d'adapter la mesure du courant pour les appareils de mesure (compteurs, centrales de mesure, analyseurs de réseau, etc...). Cette mesure est ensuite utilisée par les centrales de mesure pour le calcul des différents paramètres électriques (puissances, énergies, harmoniques, etc...).



Par ailleurs, les transformateurs de courant jouent également un rôle dans la protection des réseaux électriques et la sécurité des installations électriques (mesure des courants différentiels et de protection).

QUELS SONT LES DIFFERENTS TYPES DE TRANSFORMATEUR/CAPTEUR DE COURANT ?

On peut distinguer 4 types de capteur de courant :

Les capteurs et transformateurs de courant de mesure

Leurs rôles sont de mesurer et d'abaisser le courant de charge au niveau du secondaire d'un circuit électrique pour que ce dernier soit facilement interprétable par les centrales de mesures

Les capteurs et transformateurs de courant de facturation

Ces transformateurs sont similaires aux transformateurs de courant de mesure mais requièrent une précision élevée sur une large plage de courant et une fiabilité extrême liées à une utilisation pour de la facturation.

Les transformateurs de courant de protection

En plus de mesurer et d'abaisser le courant de charge au niveau du secondaire, ces transformateurs sont capables de mesurer des courants dont l'intensité peut atteindre 5 à 30 fois le courant nominal. Ce type de phénomène est appelé « court-circuit ». Associé à un relais, le transformateur de courant de protection permet d'isoler le défaut et d'éviter des dommages sur une installation.

Les transformateurs de courant différentiel

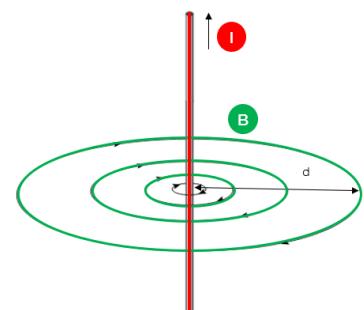
En condition normale, la somme vectorielle des courants dans un circuit doit être nulle. Si cette somme n'est pas nulle, cela indique une fuite de courant dans le réseau, ce qui peut présenter un danger pour les personnes et les biens (incendie). Les transformateurs de courant différentiel permettent de vérifier cette condition et de mesurer ce courant de défaut dit différentiel. Associé à un relais, le transformateur de courant différentiel permet de protéger les personnes contre les contacts indirects.

COMMENT FONCTIONNE UN TRANSFORMATEUR DE COURANT ?

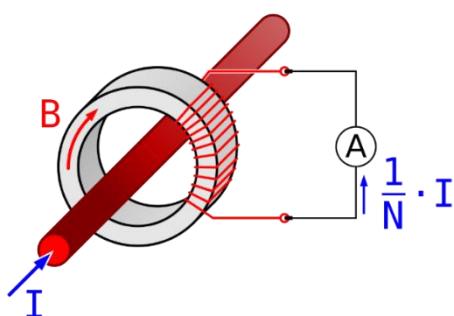
Un transformateur de courant permet de mesurer le courant circulant dans un conducteur en mesurant le champ magnétique émis par ce dernier

En effet, lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur, un champ magnétique, proportionnel à ce courant, est induit (Loi de Lenz-Faraday).

Pour récupérer la valeur du courant à partir du champ magnétique, des matériaux ferromagnétiques sont utilisés. Ces derniers ont en effet, grâce à leur perméabilité élevée, la propriété de courber les champs magnétiques pour mieux les capter.



$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \rightarrow B \Leftrightarrow I \text{ Proportionnel}$$



Par conséquent, en faisant circuler le champ magnétique dans un noyau constitué de matériaux ferromagnétiques on sera capable de récupérer une image proportionnelle du courant primaire I_p aux bornes du bobinage secondaire. Le nombre de spires du bobinage conditionne ensuite le rapport de transformation et la valeur du courant secondaire I_s .

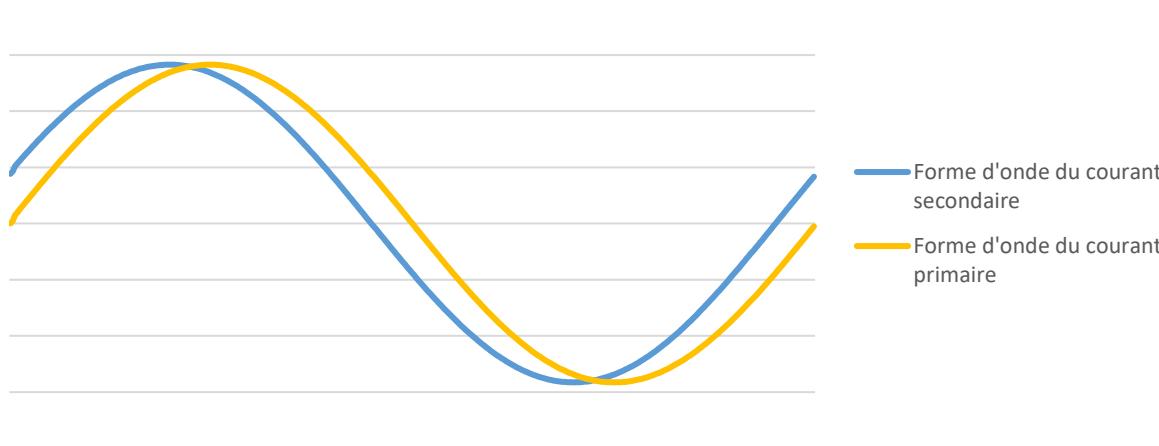
Le choix du matériau ferromagnétique est crucial pour la performance de la mesure des transformateurs de courant de mesure, de protection ou différentiel.

Cependant, certaines technologies, comme Rogowski, n'utilisent pas les propriétés des matériaux ferromagnétiques.

Impact du déphasage sur la mesure

Le déphasage représente un décalage dans le temps entre le signal primaire et le signal secondaire du TC. Ce déphasage est généralement provoqué par la présence d'éléments inductifs et capacitifs dans le circuit.

Représentation du déphasage entre le courant primaire et secondaire

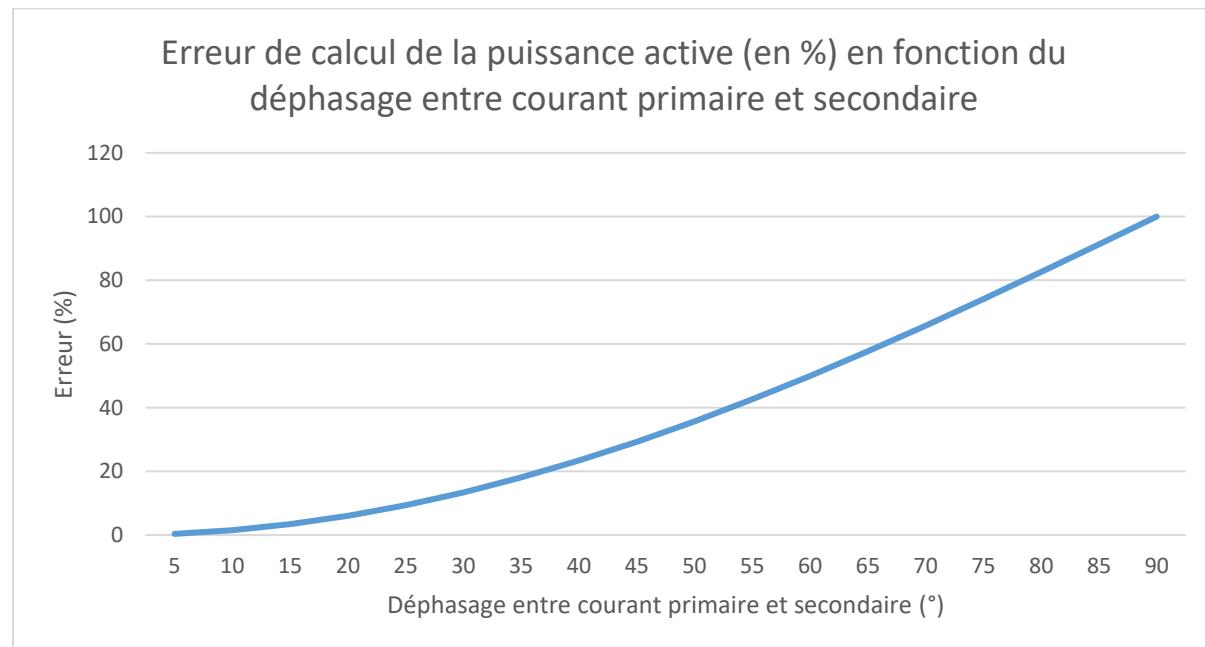


Or, la puissance active et réactive calculée par la centrale de mesure dépend directement du déphasage car :

$$P = V * I * \cos(\varphi), \varphi \text{ étant le déphasage entre le courant et la tension mesurés}$$

$$Q = V * I * \sin(\varphi), \varphi \text{ étant le déphasage entre le courant et la tension mesurés}$$

Le courant secondaire apporte donc un déphasage supplémentaire entre le courant réel et celui mesuré par la centrale ce qui peut augmenter l'erreur de mesure pour la puissance active et réactive.

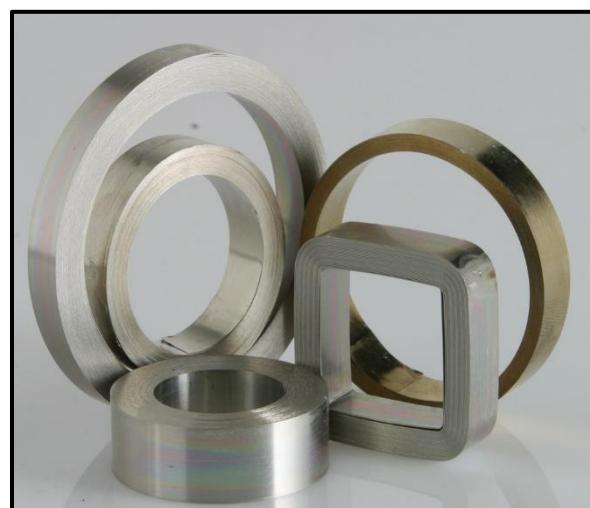


Pour limiter le déphasage, le matériau ferromagnétique du noyau doit être de très bonne qualité et extrêmement perméable.

LES CRITERES ESSENTIELS DE QUALITE ET DE PERFORMANCE POUR UN NOYAU MAGNETIQUE DE TRANSFORMATEUR DE COURANT

La perméabilité

La perméabilité est l'un des critères essentiels pour évaluer la qualité d'un alliage, car elle détermine sa capacité à interagir avec un champ magnétique. Plus la perméabilité d'un matériau ferromagnétique est élevée, plus il capte efficacement les lignes de flux magnétique, améliorant ainsi la précision des transformateurs de courant. Une perméabilité élevée permet au noyau du transformateur de capter et de canaliser plus facilement les champs magnétiques créés par le courant. En parallèle, un noyau magnétique de plus grande section capte un volume plus important de flux magnétique, ce qui renforce encore la précision de la mesure, puisque le courant est proportionnel à ces champs.



L'inductance maximale (Bmax)

L'induction magnétique maximale (Bmax) est la densité de flux magnétique maximale que le noyau peut supporter avant de saturer.

Si le noyau sature, le transformateur perd sa linéarité et ses performances de mesure deviennent erratiques, pouvant entraîner des erreurs critiques dans des applications sensibles comme la protection des réseaux électriques.

En pratique, l'inductance maximale est définie de manière à permettre une utilisation en toute sécurité, même en cas de surcharge temporaire



La stabilité en température

Les transformateurs de courant doivent fonctionner dans des environnements où la température varie, parfois de manière significative.

Une augmentation de la température peut affecter les propriétés magnétiques du noyau, les résistances des enroulements et même la stabilité mécanique. Cela peut entraîner des dérives dans les performances et réduire la durée de vie du transformateur.

Les alliages magnétiques modernes et les techniques avancées de conception garantissent une faible variation des caractéristiques électriques et magnétiques sur une large plage de températures. De plus, les isolants thermiques sont essentiels pour protéger les enroulements et prévenir les dégradations liées aux cycles thermiques.

QUELLES SONT LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES POUR MESURER LE COURANT ?

Les transformateurs et capteurs de courant à noyau ferromagnétique

Les transformateurs de courant à noyau ferromagnétique s'appuient sur le principe expliqué précédemment. Ils utilisent un noyau en matériaux ferromagnétiques pour capter le champ magnétique créé par la circulation du courant, dit primaire, dans le conducteur. Un bobinage autour du tore permet ensuite de générer un courant, dit secondaire, image du courant primaire et du nombre de spire du bobinage

Dans un transformateur de courant parfait on a donc la relation mathématique suivante :

$N_p * I_p = N_s * I_s$ avec N_p le nombre de spire primaire, N_s le nombre de spire secondaire et I_p et I_s respectivement le courant primaire et secondaire

Or, en réalité, il faut considérer qu'une partie du courant primaire est utilisée pour aimanter le noyau et n'est donc pas transmis au secondaire (courant magnétisant), et une partie du courant transmis est dissipée dans le noyau (pertes fers), engendrant des erreurs dans la mesure

L'équation devient donc :

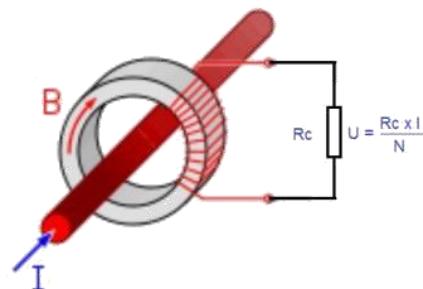
$$N_p * I_p = N_s * I_s + \text{erreurs}$$

Ces phénomènes ont un impact direct sur la précision du capteur de courant. La qualité et la section du matériau ferromagnétique permettent de limiter ces pertes. En effet, plus la perméabilité du matériau ferromagnétique est élevée, plus le transformateur de courant est précis. De même plus la section du tore magnétique est grande, plus le transformateur de courant est précis.

Il existe 2 types de sorties pour les capteurs de courant à noyau ferromagnétique :

- Sortie de courant
- Sortie de tension

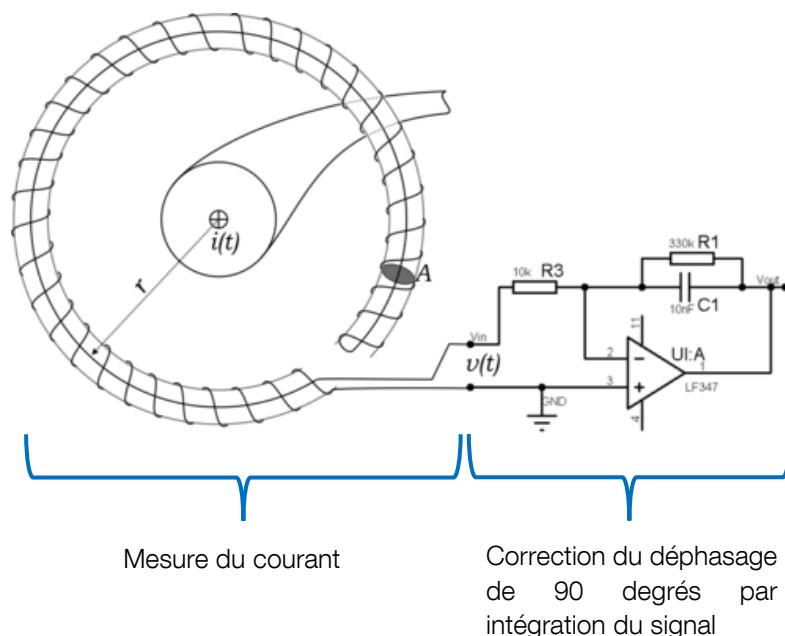
La sortie en tension est obtenue par ajout d'une résistance RC dans le circuit secondaire.



Les capteurs de courant Rogowski

Les capteurs de courant Rogowski n'utilisent pas de matériaux ferromagnétiques pour capter le champ magnétique induit mais s'appuient sur un des principes de la loi de Faraday qui stipule que tout circuit électrique traversé par un champ magnétique variable induit une tension qui est égal à la dérivée de ce champ. Pour simplifier, un capteur Rogowski délivre une tension égale à la dérivée du champ magnétique variable induit par le passage du courant primaire dans un conducteur.

Dans la majorité des cas, les tores Rogowski sont accompagnés d'un intégrateur. Sans cet intégrateur, le signal mesuré serait déphasé de 90 degrés et donc difficilement interprétable par les centrales de mesure.



L'avantage de ces capteurs de courant est qu'ils restent très flexibles et peu encombrant du fait de leur conception. Ils sont donc très prisés pour les utilisations de type rétrofit. Ils offrent également une large plage de mesure étant donné qu'ils ne saturent pas. (Absence de matériaux ferromagnétiques)

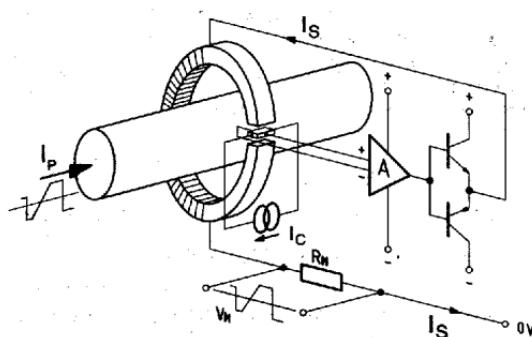
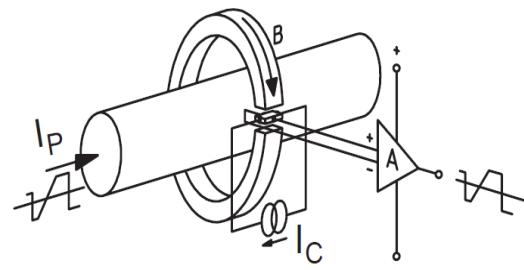
Les capteurs de courant à effet Hall

« Tout courant électrique traversant un matériau baignant dans un champ magnétique, engendre une tension perpendiculaire à ce dernier » Edwin Herbert Hall. Les transformateurs à effet Hall utilisent ce principe de mesure.

On utilise ici un tore ferromagnétique pour canaliser le champ magnétique, qui traverse ensuite une cellule de Hall. Cette configuration génère une différence de potentiel appelée « Tension de Hall », proportionnelle au champ magnétique et donc au courant primaire.

Il existe deux types de capteur à effet Hall :

- **Les capteurs à effet Hall en boucle ouverte.** Ils mesurent directement le champ magnétique généré par le courant électrique et produisent une tension proportionnelle à ce champ. Leur conception est relativement simple.
- **Les capteurs à effet Hall en boucle fermée.** Ils utilisent un système de rétroaction pour compenser les variations du champ magnétique. Ils intègrent un noyau magnétique et ajustent continuellement le champ détecté pour maintenir une mesure constante. Cette approche plus complexe assure une meilleure performance du capteur



L'avantage de ce type de technologie est qu'il est possible d'aussi bien mesurer les courants AC que DC. Cependant, ils restent moins précis que les capteurs de courant Rogowski ou à noyau ferromagnétique, notamment pour les capteurs fonctionnant en boucle ouverte. Ces capteurs nécessitent également une alimentation externe pour polariser la cellule de Hall.

Remarque : Les capteurs de courant peuvent aussi bien être ouvrant que fermés. Les capteurs ouvrants ont l'avantage d'être plus facile à installer, notamment sur les installations existantes. Cependant ils sont moins précis que les capteurs fermés à cause de la présence d'un entrefer dans le circuit ferromagnétique.

QUELLES SONT LES CARACTÉRISTIQUES D'UN CAPTEUR DE COURANT ?

Historiquement, la norme IEC 61869-2 est la norme de référence pour les capteurs de courant. Cette norme définit en effet les différents paramètres qui caractérisent les transformateurs et capteurs de courant.

Cependant, cette norme a récemment évolué et son domaine d'application se rapproche de plus de la haute tension en omettant les capteurs de courant ayant un signal de sortie en tension. En conséquent, la norme IEC 60688 a vu le jour. Cette norme reprend les exigences de l'IEC 61869-2 tout en apportant des précisions sur l'impact de la position du conducteur sur la précision de mesure.

Le signal de sortie

Un capteur de courant délivre un signal de sortie qui est une image proportionnelle du courant primaire mesuré. Ce signal de sortie est souvent de 2 types :

- Un signal en tension, généralement 100 ou 333mV
- Un signal en courant, généralement 5 ou 1A.

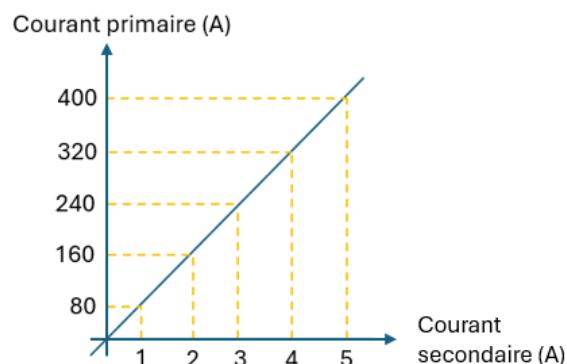
L'avantage d'une sortie en tension est qu'il n'y a pas de pertes Joule (échauffement dû à la circulation du courant dans le fil) lors de la transmission du signal entre le transformateur de courant et la centrale de mesure. En conséquent, pour une même précision, on peut réduire l'encombrement du TC et ne pas être limité par la longueur du câble. Une sortie en tension offre également l'avantage de pouvoir ouvrir le circuit secondaire en étant en charge ce qui n'est pas le cas avec les transformateurs de courant où un risque pour les personnes et le matériel subsiste.

Le courant primaire assigné

Il s'agit de la valeur du courant primaire d'après laquelle sont déterminées les caractéristiques de fonctionnement d'un transformateur.

Par exemple, un transformateur 500A/5A aura pour courant primaire 500A et comme courant secondaire 5A. A 300A, le courant du secondaire sera de 3A, etc...

Le courant primaire assigné est communément appelé intensité nominale du capteur de courant.



La précision

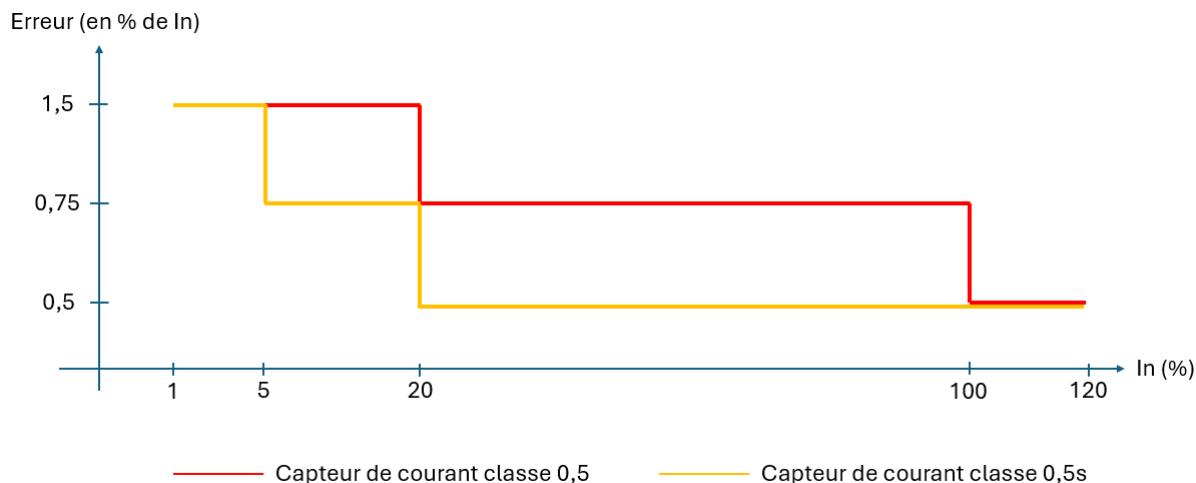
La norme IEC 60688 définit le terme de classe de précision dont les performances en termes de pourcentage d'erreur et de déphasage sont précisées dans les tableaux suivants :

Classe de précision	Erreur en +/-% en fonction du % de l'intensité nominale						
	0,20%	1%	5%	20%	50%	100%	120%
5					5		5
3					3		3
1			3	1,5		1	1
0,5			1,5	0,75		0,5	1
0,5s		1,5	0,75	0,5		0,5	0,5
0,2			0,75	0,35		0,2	0,2
0,2s		0,75	0,35	0,2		0,2	0,2
0,2smax	0,2					0,2	0,2
0,1			0,4	0,2		0,1	0,1

Classe de précision	Déphasage (en°) en fonction du % de l'intensité nominale						
	0,20%	1%	5%	20%	50%	100%	120%
5							
3							
1			2	1,5		1	1
0,5			1,5	0,75		0,5	0,5
0,5s		1,5	0,75	0,5		0,5	0,5
0,2			0,5	0,25		0,167	0,167
0,2s		0,5	0,25	0,167		0,167	0,167
0,2smax	0,167					0,167	0,167
0,1			0,25	0,125		0,084	0,084

De manière générale la précision de la classe est obtenue à pleine échelle, c'est-à-dire lorsque le courant de charge est égal au courant nominal du capteur de courant. Il existe cependant une exception pour les capteurs de classe 0,5s ou 0,2s ou le maximum de précision est obtenu dès qu'on atteint 20% du courant nominal du capteur.

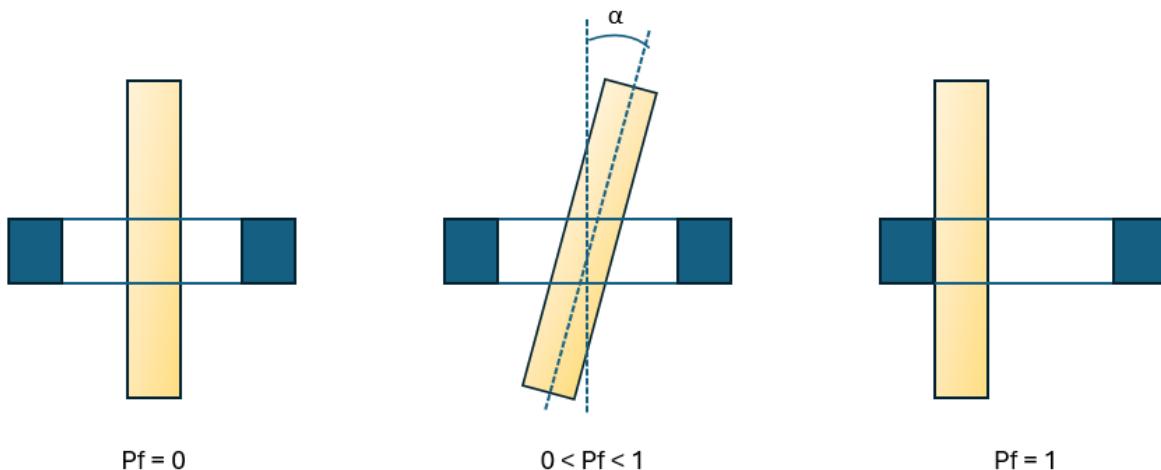
A titre de comparaison, un capteur de courant de classe 0,5 aura une précision de +/- 0,5% In entre 100 et 120% de In tandis qu'un capteur de courant de classe 0,5s aura une précision de +/- 0,5% entre 20 et 120% de In



Remarque : La classe de précision 0,2smax est une classe de précision propre à Socomec qui se base sur l'IEC 60688 et l'IEC 61869-2 tout en augmentant les performances de manières significatives en amplitude et en déphasage dès de très faibles courants primaires.

L'IEC 60688 définit également des classes quant à l'influence du positionnement du conducteur dans le transformateur.

Extension de la désignation de classe de précision	Facteur de position max (P_f) jusqu'auquel la classe de précision est garantie	Angle max (α) jusqu'auquel la classe de précision est garantie
A1	0	0
A2	0,5	15°
A3	1	45°



Un capteur de courant classe 0,5 A2 aura donc une précision garantie tant que le conducteur est centré et qu'un angle de 15° n'est pas dépassé.

La puissance

La puissance (en VA) d'un transformateur de courant défini la puissance que délivre le transformateur au niveau du secondaire. Cette caractéristique ne concerne que les transformateurs de courant avec une sortie en courant. En effet, étant donné que le signal de sortie est un courant, il y a des pertes par effet Joule dues à la consommation des entrées de courant des centrales de mesure.

Les pertes se calculent de la manière suivante :

$$\text{Pertes} = \frac{I^2 * 2}{S * 56} * L$$

Avec :

- I (A) : Le courant secondaire du transformateur (1 ou 5)
- S (mm²) : La section du câble utilisé
- L (m) : La longueur du câble entre le TC et la centrale de mesure.

Il est nécessaire de dimensionner un transformateur de courant avec suffisamment de puissance pour compenser les pertes afin de respecter l'équation suivante :

$$P_{TC} > \text{Pertes}_{Joules} + \text{Consommation}_{PMD}$$

Tension maximale d'utilisation

Il s'agit de la tension maximale d'utilisation en continu. Au-delà de cette limite, le conducteur doit être isolé pour pouvoir continuer à utiliser le capteur de courant

Tension d'isolement

Il s'agit de la propriété diélectrique du capteur. La valeur est obtenue au travers d'un test où une tension supérieure à la tension maximale d'utilisation est appliquée pendant une durée limitée selon les préconisations normatives. Si une tension supérieure à la tension d'isolement est appliquée, un claquage destructif des isolants entre le primaire et le secondaire, entraînant un risque pour le matériel et les personnes en aval peu apparaître

Surcharge intermittente

Il s'agit de la capacité du capteur de courant à résister à des forts courants de surcharge pendant un temps très court. L'IEC 60688 détermine les conditions de surcharges à appliquer au capteur :

- Pour un capteur avec sortie en courant, un courant égal à 20 x In sur 1s est appliqué
- Pour un capteur avec sortie en tension, un courant égal à 10 x In sur 1s est appliqué

Catégorie de mesure

L'IEC 60688 reprend les recommandations de l'IEC 61010 pour définir les catégories de mesure. Communément appelé catégorie de surtension, ces dernières désignent des zones précises dans une installation électrique.

CAT I : Mesures effectuées sur des appareils électroniques (téléphone portable, PC, etc...)

CAT II : Mesures effectuées sur des circuits directement branchés à l'installation (installation domestique, prise de courant, etc...)

CAT III : Mesures effectuées dans l'installation du bâtiment (Charge fixe dans des installations industrielles, éclairage industrielle, etc...)

CAT IV : Mesures réalisées à la source de l'installation (jeux de barre, lignes aériennes, etc...)

Le tableau ci-dessous reprend également la tenue face aux surtensions transitoires en fonction de la tension et de la catégorie d'utilisation.

Catégorie	Tension Phase-Neutre (AC ou DC)	Surtension transitoire max
CAT I	300	1,5 kV
	600	2,5 kV
	1000	4 kV
CAT II	300	2,5 kV
	600	4 kV
	1000	6 kV
CAT III	300	4 kV
	600	6 kV
	1000	8 kV
CAT IV	300	6 kV
	600	8 kV
	1000	12 kV

QUELS SONT LES PRINCIPAUX CRITERES DE CHOIX D'UN CAPTEUR DE COURANT ?

Plusieurs critères sont à prendre en compte dans le choix d'un capteur de courant :

- **Le type de signal de sortie** : A choisir en fonction des caractéristiques des entrées de courant de la centrale de mesure utilisée

- **Le type d'application** : Si c'est une installation neuve, préférer les tores fermés. En revanche si c'est pour une application rétrofit, préférer les tores ouvrants ou Rogowski pour éviter de manœuvrer les charges.
- **L'encombrement** : Si l'espace est exiguë ou réduit les tores Rogowski seront plus adapté L'utilisation de capteur avec sortie de tension peut également correspondre à ce besoin étant donné qu'ils sont bien plus petits par rapport à un transformateur de courant équivalent.
- **La puissance** : A déterminer pour les transformateurs de courant en fonction de la section du câble et de la longueur entre le transformateur de courant et la centrale de mesure
- **La classe de précision** : Si l'erreur veut être réduite au maximum sur une large plage de mesure, préférer l'utilisation de capteur de classe de précision 0,5s ou 0,2s

HEAD OFFICE

SOCOMECH GROUP

SAS SOCOMECH capital 10749940 €
R.C.S. Strasbourg B 548 500 149
B.P. 60010 - 1, rue de Westhouse
F-67235 Benfeld Cedex
Tel. +33 3 88 57 41 41 - Fax +33 3 88 57 78 78
info.scp.isd@socomec.com

www.socomec.com

