

## MESURE DE COURANT

Dans la pratique, la mesure de courant est très largement utilisée. Le but de cet article est d'étudier sommairement les principales méthodes utilisées en fonction des exigences imposées par l'environnement, principalement

- .niveau de courant à mesurer
- .précision, résolution, stabilité
- .avec ou sans séparation galvanique
- .réponse en fréquence (AC/DC)
- .environnements (température, durée de vie...)

Dans le choix de l'instrumentation de mesure, les coûts du matériel et de son utilisation sont de première importance. Il est donc nécessaire d'optimiser le design de manière à répondre aux maximums des exigences du cahier des charges.

Les techniques de mesure couramment

- .shunt de mesure
- .transformateur de courant
- .capteur de courant basé sur la mesure directe d'induction
- .transducteur de courant sans circuit magnétique (bobine de Rogowski)
- .capteur de courant à effet Hall
- .capteur à champ moyen nul de type Fluxgate
- .capteur de courant basé sur l'effet Néel

### SHUNT DE MESURE

La méthode la plus simple mais sans séparation galvanique, consiste à mesurer la tension aux bornes d'une résistance pour déterminer le courant la traversant. Cette méthode est peu onéreuse et assure une bonne précision en basse fréquence.

La tension aux bornes d'un shunt donne, par une mesure indirecte le courant traversant l'élément de mesure.

Deux cas sont à distinguer.

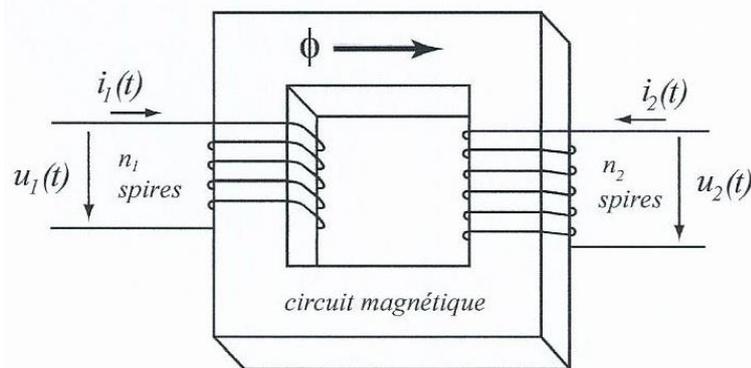
- .le courant à mesurer est dans un conducteur dont le potentiel est celui de la masse électronique.
- .le courant à mesurer est dans un conducteur dont le potentiel (mode commun) est quelconque.

La résistance de mesure et le circuit associé doivent présenter une bonne stabilité en température, une bonne précision et être exempts de termes parasites (inductance série, capacité répartie) et d'effet de peau qui dégradent la réponse en haute fréquence.

Ses limitations importantes, sont liées à l'absence d'isolation, aux pertes d'insertion pour la mesure de forts courants et à la bande passante limitée en haute fréquence. Différentes technologies existent, shunt en couche et shunt coaxial.

## TRANSFORMATEUR DE COURANT

Le transformateur de courant, constitué de deux enroulements liés par un circuit magnétique est la plus simple possibilité de mesurer un courant en assurant une séparation galvanique entre le mesurant et la mesure. Toutefois ce mode de mesure présente des caractéristiques limitant son champ d'application.

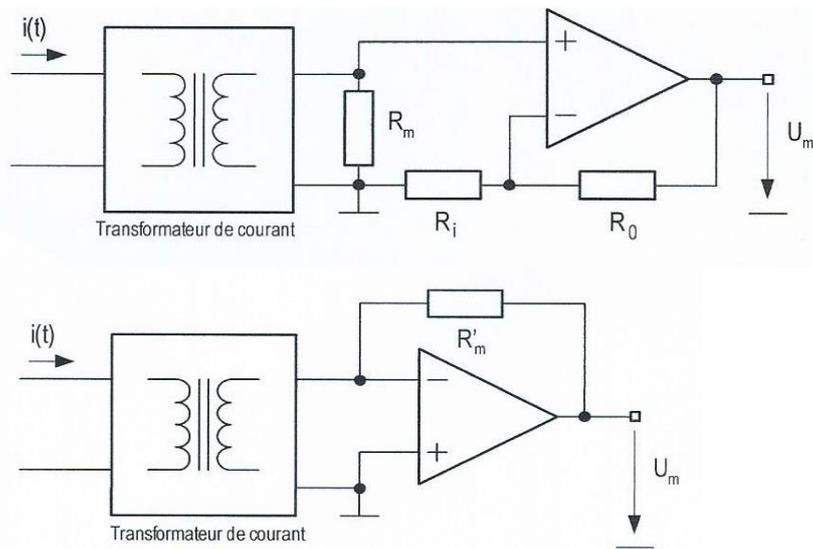


*Transformateur de courant*

Le transformateur de courant, constitué de deux enroulements liés par un circuit magnétique est une des possibilités de mesurer un courant en assurant une séparation galvanique entre le mesurant et la mesure. Toutefois ce mode de mesure présente des caractéristiques limitant son champ d'application.

Pour pouvoir utiliser le transformateur de courant comme système de mesure, il est de première importance de connaître son comportement dynamique. Sans tenir compte des capacités réparties entre spires de chaque enroulement ainsi qu'entre les enroulements et le circuit magnétique.

En pratique, de manière simplifiée, la mesure est réalisée selon les figures suivantes

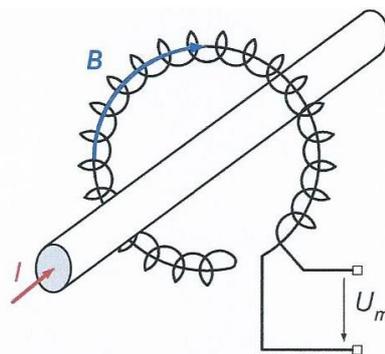


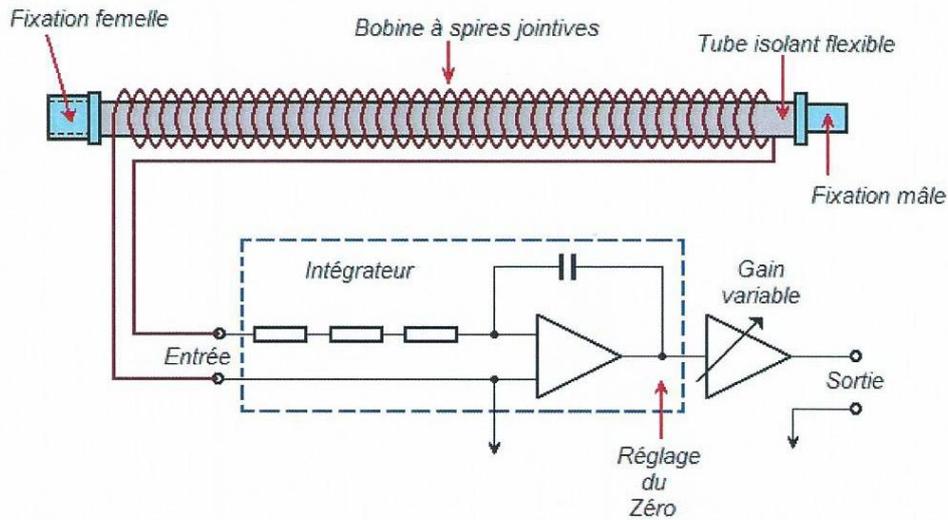
*Topologies du système de mesure de courant par transformateur*

En faisant la transformation courant tension au moyen d'un amplificateur à transimpédance, on s'affranchit de la résistance de mesure. Dans ce cas la fréquence de coupure est augmentée.

**TRANSDUCTEUR DE COURANT SANS CIRCUIT MAGNETIQUE. (BOBINE DE ROGOWSKI)**

Pour les mesures de courants alternatifs (AC), c'est à dire sans composante continue (DC) une bobine placée dans l'air et magnétiquement couplée avec le conducteur primaire. Il ne s'agit ni plus ni moins que d'un transformateur à faible couplage. Le bobinage est réalisé de manière à avoir une surface maximum offerte au champ d'induction magnétique produit par la circulation de courant dans le conducteur principal (enroulement primaire) mais une surface aussi petite que possible aux champs parasites externes.



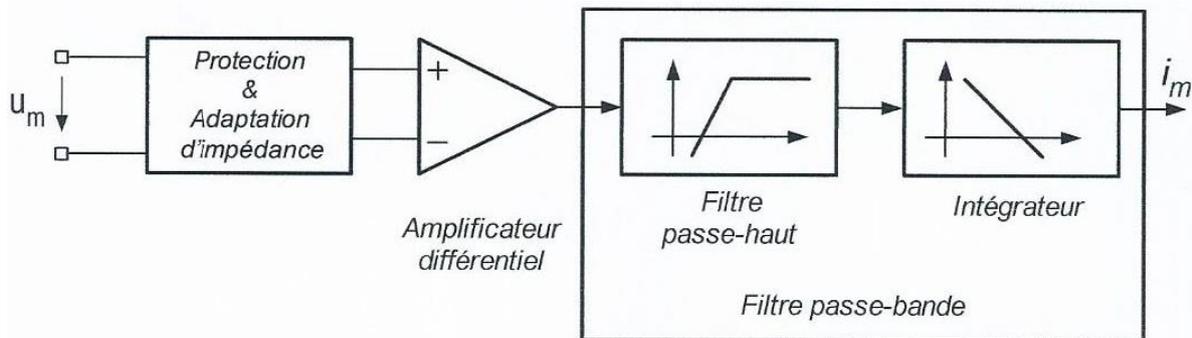


### Principes de la bobine de Rogowski

La tension de mesure correspond à la tension induite due à la variation du flux mutuel entre les enroulements primaire (fil linéaire) et secondaire.

$$U_m = \frac{\partial \psi}{\partial t} = N \Lambda_{12} \frac{\partial I}{\partial t}$$

Il s'agit alors de faire l'intégrale de la tension de mesure. En pratique les offsets en amont de l'intégrateur rendent une simple intégrale impossible. Il faut donc réaliser un découplage de la composante DC. L'intégrateur devient donc un passe bande d'ordre supérieur à 1 (passe haut couplé à un intégrateur).



### Chaine d'acquisition du signal de sortie d'une bobine de Rogowski

Le capteur est constitué d'un tube isolant souple sur lequel un fil conducteur est bobiné en spires jointives. Les extrémités du tube sont équipées d'un système de fixation verrouillage

pour pouvoir constituer une boucle d'enserrage avec cet ensemble. La sortie de la bobine est suivie d'une électronique de mise en forme et de calibrage du signal.

Ce type de capteur présente des avantages, notamment :

.la flexibilité et la maniabilité pour enserrer les conducteurs

.une faible masse du capteur due à l'absence de circuit magnétique et suppression des effets de saturation.

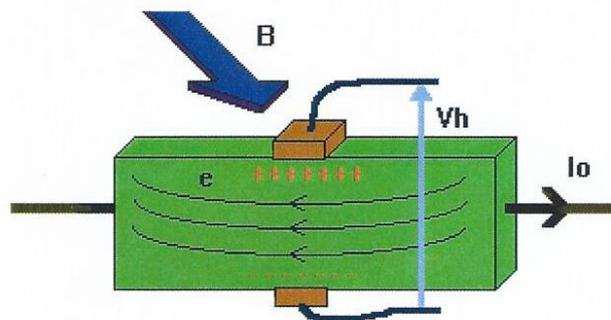
.très faible déphasage permettant une meilleure adaptabilité aux mesures de puissance.

Plusieurs conceptions de bobines de Rogowski fabriquées sur des circuits imprimés ont été analysées, dans le but de réduire les coûts de fabrication, la taille ou la masse. Pour l'instant, peu de produits basés sur ces technologies sont utilisés industriellement.

## TRANSDUCTEURS DE COURANT A EFFET HALL

Ce type de capteur de courant exploite l'effet Hall pour produire une tension qui est l'image exacte (avec un facteur de proportionnalité connu) du courant à mesurer.

On appelle *effet Hall* l'apparition d'un champ électrique transversal et, par suite, d'une différence de potentiel dans un métal ou un semi-conducteur parcouru par un courant électrique lorsqu'on l'introduit dans un champ d'induction magnétique perpendiculaire à la direction du courant.



Si un courant  $I_0$  traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si un champ magnétique d'induction  $B$  est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension  $V_h$ , proportionnelle au champ magnétique et au courant  $I_0$  apparaît sur les faces latérales du barreau.

Les électrons sont déviés par le champ magnétique, créant une différence de potentiel appelée tension de Hall. Le champ magnétique déforme la trajectoire des électrons car il engendre une force de Lorentz (e).

$V_h = K_h \cdot B \cdot I_0$  avec  $K_h$  : constante de hall, qui dépend du matériau utilisé

La Constante de Hall étant inversement proportionnelle à la densité des porteurs, la tension de Hall est beaucoup plus importante dans les semi-conducteurs que dans les métaux.

Finalement la tension de Hall dépend du courant I, du champ d'induction magnétique, de la surface et de l'épaisseur du matériau ainsi que du type de matériau.

Il existe plusieurs technologies exploitant l'effet Hall pour la mesure du courant alternatif et continu.

*Les pinces ampère-métrique étant probablement l'application industrielle la plus répandue*

### Pinces ampérométriques pour courant alternatif et continu

Le rôle premier d'une pince ampérométrique est de mesurer de manière non intrusive des intensités dans une très large étendue de mesure. Ces appareils sont toutefois de plus en plus polyvalents et présentent aujourd'hui la plupart des fonctionnalités de base des multimètres numériques portables.

Deux grandes familles existent :

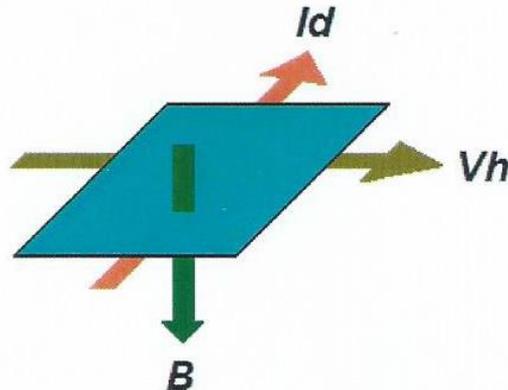
- .celles de type transformateur, capables de mesurer uniquement des courants alternatifs.
- .celles, dit à effet Hall, aptes à mesurer des courants alternatifs et continus



Les fournisseurs de pinces ampérométriques sont très nombreux et l'offre est particulièrement fournie.

## Principe de fonctionnement (Rappel)

A la différence des transformateurs alternatifs traditionnels, la mesure des courants alternatifs et continus est souvent obtenue en mesurant la force du champ magnétique créée par un barreau en matériau semi-conducteur parcouru par un courant  $I_d$  en utilisant le principe de l'effet Hall. Si un champ magnétique d'induction  $B$  (figure 1) est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension  $V_h$  apparaît sur ses faces latérales. Cette tension est connue sous le nom de tension de Hall, du nom du physicien Edwin HALL qui découvrit ce phénomène.

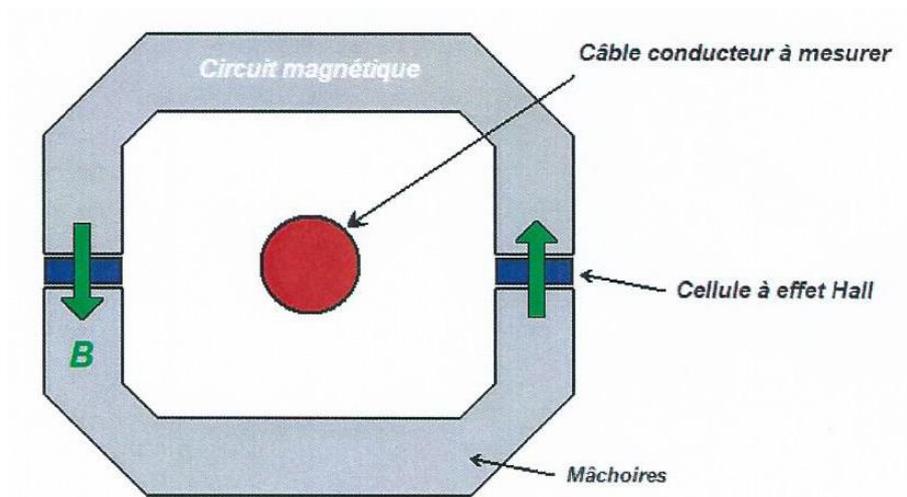


Quand le courant d'excitation de la cellule de Hall est maintenu constant, le champ magnétique  $B$  est directement proportionnel au courant circulant dans le conducteur. Donc la tension de sortie de Hall,  $V_h$  est représentative de ce courant. Un tel dispositif a deux avantages pour la mesure de courant.

.Le dispositif peut être utilisé pour mesurer des grandeurs continues puisque la tension de Hall dépend uniquement de la force du champ magnétique.

.La réponse est instantanée car la force du champ magnétique varie avec le courant dans le conducteur. Ainsi, des signaux alternatifs de formes complexes peuvent être détectés et mesurés avec précision et un faible déphasage.

La construction de base de la mâchoire d'une telle pince est montrée par la figure suivante. Une ou deux cellules de Hall peuvent être utilisées suivant le type de pince.



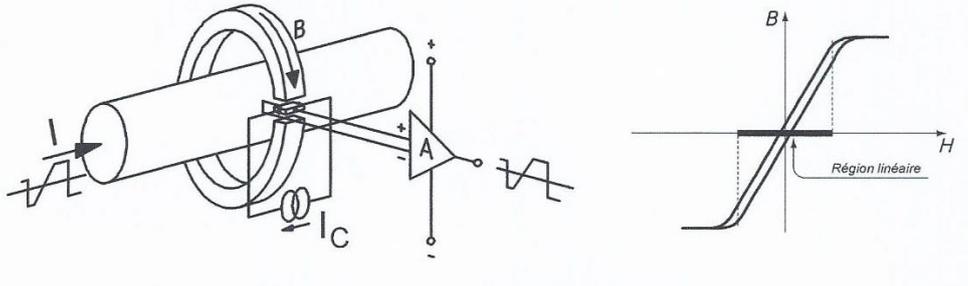
Les pinces pour courant alternatif et continu des principaux fournisseurs sont développées suivant ce principe avec un circuit électronique pour obtenir une sortie linéaire et un système de compensation pour la température. Les courants continus peuvent être mesurés directement de façon économique (sans shunt de puissance) et les courants alternatifs peuvent être mesurés jusqu'à plusieurs dizaines de kHz pour répondre aux exigences de mesure de signaux complexes ou RMS.

Ces pinces sortent en tension **mV** (mV DC pour les courants continus et mV AC pour les courants en alternatif).

D'autres technologies ou variantes des précédentes sont aussi utilisées, selon le principe des circuits magnétiques saturés, elles sont capables de mesurer des courants très faibles.

### Les transducteurs à effet Hall en boucle ouverte

Les transducteurs à boucle ouverte exploitent l'effet Hall. La tension du générateur de hall est générée par le courant de Hall  $I_c$  et par l'induction dans l'entrefer  $B$



### *Transducteur de courant en boucle ouverte*

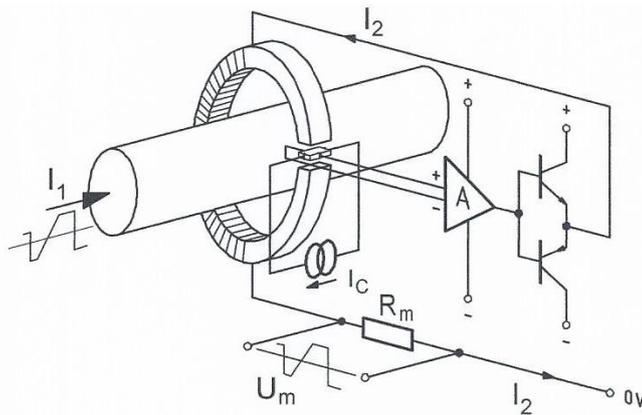
Bien adaptés aux applications industrielles, ce type de transducteur vise plutôt des critères économiques.

- .plage de mesure : 0.....15000A
- .bande passante : 0.....25kHz
- .précision typique : +/-1%
- .linéarité : +/-0,5%
- .temps de réponse : < 3 $\mu$ s à 7 $\mu$ s
- .faible consommation d'énergie
- .poids et taille réduits

Par contre, ils présentent l'inconvénient d'avoir une bande passante et un temps de réponse modestes et une précision de mesure qui varie beaucoup avec la température. Dans certaines applications spécifiques, les pertes de courant de Foucault à haute fréquence risquent également d'être un facteur restrictif

### **Les transducteurs à effet Hall en boucle fermée**

Les transducteurs de courant à boucle fermée, dits aussi à flux nul, possèdent un circuit de compensation intégré qui améliore notablement les performances. La cellule Hall des transducteurs en boucle fermée est utilisée comme signal de contre réaction régulant le courant  $I$  de la bobine secondaire de manière que le champ magnétique dans l'entrefer soit égal à zéro. L'enroulement secondaire comprend plus de tours que l'enroulement primaire. La figure ci-dessous illustre un transducteur de courant en boucle fermée. Le primaire constitué d'une seule spire ( $n_1=1$ ) est parcouru par un courant  $I_1$ . Le secondaire possède  $n_2$  spires et est parcouru par un courant  $i_2$ . Un capteur Hall, placé dans l'entrefer du circuit magnétique permet la mesure du flux circulant dans ce dernier, Le flux est une image de la solénoïde totale  $n_1I_1+n_2I_2$ .



### *Transducteur de courant en boucle fermée*

La tension aux bornes du capteur Hall est amplifiée à l'aide d'un amplificateur différentiel dont la sortie est directement connectée à l'enroulement secondaire qui joue le rôle de circuit de contre réaction. Idéalement on aimerait avoir un flux nul, de manière à avoir un courant secondaire proportionnel au courant primaire. De plus, le point de fonctionnement du circuit magnétique est indépendant du niveau du courant à mesurer ce qui assure une bonne linéarité de la mesure. Les performances sont bien adaptées aux applications industrielles exigeantes en performances, précision et bande passante.

- .précision : +/-0,5%
- .linéarité : +/-0,1%
- .temps de réponse : <1µs
- .bande passante : 0 à 20kHz

La fréquence de mesure maximale est généralement comprise entre 2 et 10 kHz. Cette gamme relativement réduite est due à la bande passante limitée des composants électroniques et à la faible dynamique de tension qui permet de générer le courant I2 dans la bobine secondaire.

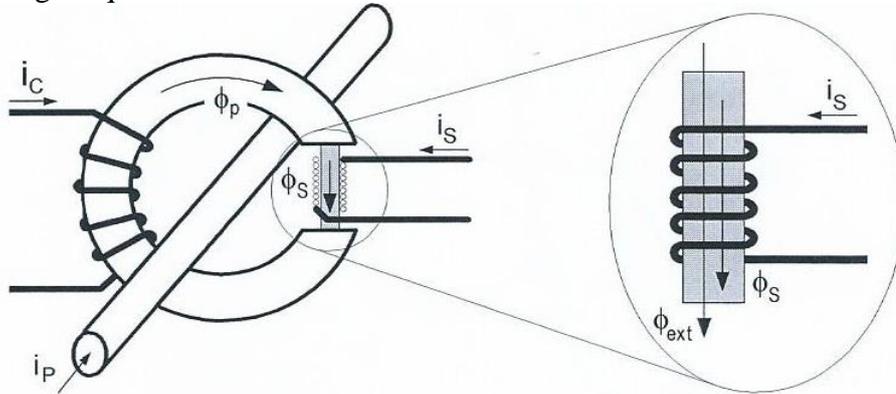
Les transducteurs à effet Hall en boucle fermée sont capables de mesurer des formes d'onde de courants continus, alternatifs et complexes tout en assurant une isolation galvanique. Ils se distinguent par d'excellentes précisions et linéarité, une faible dérive en température, un temps de réponse rapide, aucune perte d'insertion dans le circuit primaire et une sortie de courant très résistante aux interférences électromagnétiques.

### **CAPTEURS DE COURANT FLUXGATE (porte de flux)**

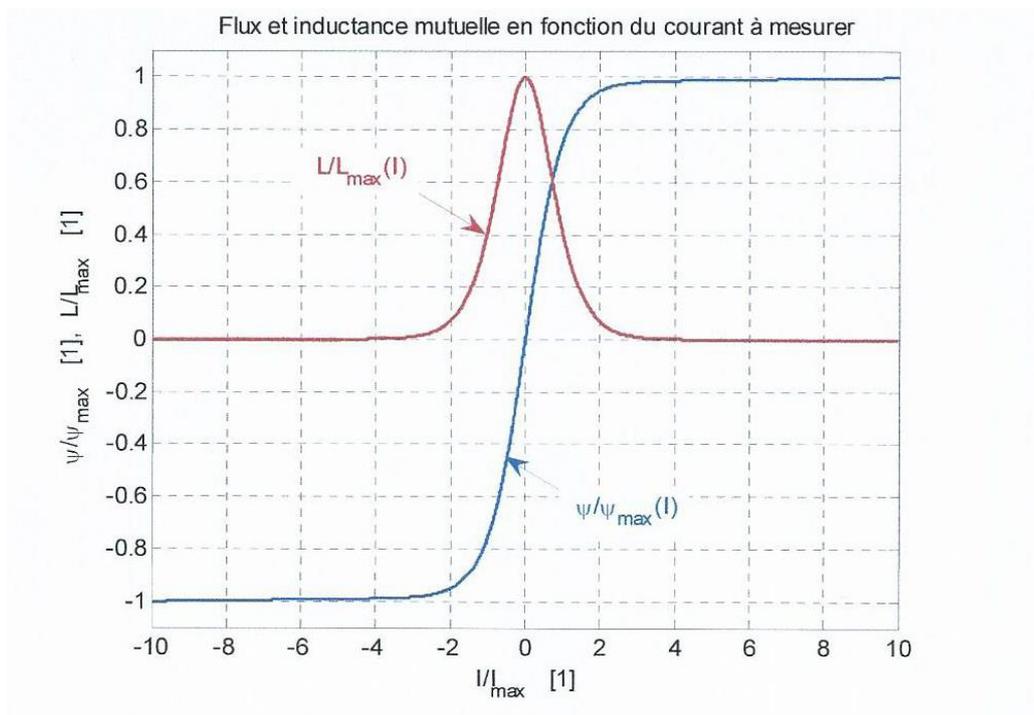
Les transducteurs de courant de ce type sont des capteurs à large bande passante utilisés pour des applications particulières nécessitant une très grande précision associée à une excellente résolution. La technologie Fluxgate peut être déployée de différentes manières, utilisant toujours le même principe mais donnant des performances diverses suivant la complexité de la conception.

### Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un transducteur standard intégrant la technologie Fluxgate est similaire à celle d'un transducteur de courant à sonde de Hall en boucle fermée. La sonde de Hall placée dans l'entrefer du circuit magnétique étant remplacée par un (ou plusieurs) élément magnétique saturable entouré d'un enroulement



L'inductance vue aux bornes de l'enroulement de l'élément saturable varie fortement en fonction du courant qui le traverse mais également en fonction du flux produit par une ou plusieurs sources magnétiques extérieures. La caractéristique liant le courant dans l'enroulement au flux totalisé traversant l'élément saturable est ci-dessous illustré.

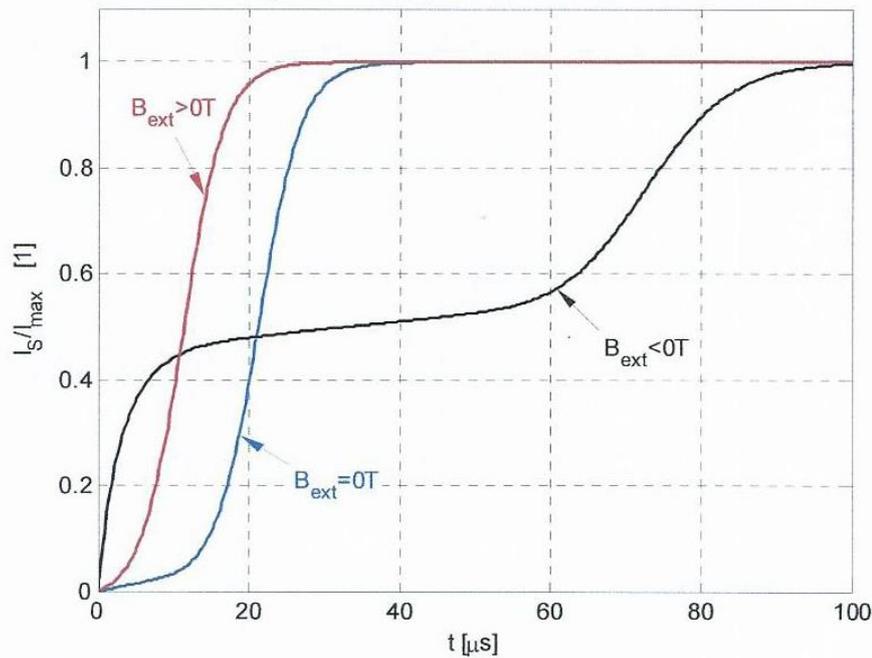


*Flux totalisé et inductances de l'élément saturable en fonction du courant*

La figure suivante montre la forme de la réponse du courant à un saut de tension aux bornes de l'enroulement de l'élément saturable. Pour un champ d'induction extérieur nul,  $B_{ext} = 0T$ , l'inductance, relativement grande à faible niveau de courant diminue rapidement avec l'augmentation de ce dernier. Lorsque le champ d'induction externe renforce celui créé par la circulation du courant dans l'enroulement  $B_{ext} > 0$ , la saturation est atteinte plus rapidement et le courant croît plus vite.

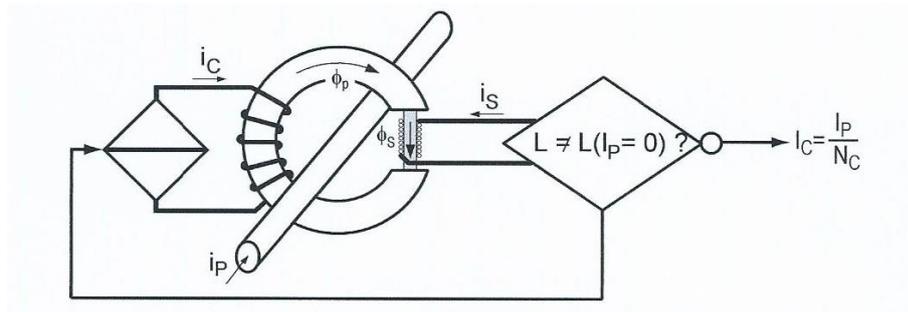
Dans le cas contraire,  $B_{ext} < 0$ , la saturation du circuit magnétique va commencer par diminuer. Le champ d'induction va finir par s'annuler pour atteindre la saturation inverse

Réponse indicielle à un saut unité de tension



*Réponse à un saut unité de tension aux bornes de l'enroulement*

Comme pour le transducteur de courant à sonde de Hall en boucle fermée, l'enroulement de compensation permet d'annuler le champ d'induction magnétique (ou le flux) dans le circuit magnétique principal. Cette partie fonctionne pour un courant à mesurer constant et basse fréquence. Pour les fréquences plus élevées, c'est l'effet transformateur qui domine.



*Principe de fonctionnement du transducteur de courant « Fluxgate » standard*

Il existe plusieurs configurations de transducteurs de capteur de courant de type Fluxgate. Mesure de la composante continue de l'élément saturable  $I_S$ , analyse spectrale du courant  $I_S$  et mesure de l'amplitude d'une harmonique remarquable, généralement celle de rangs 2 ou 3, et enfin mesure du rapport cyclique de la tension  $u(t)$ . Le paramètre détecté est ensuite utilisé comme signal de retour pour la boucle fermée.

On en distingue trois grandes variantes

.le Fluxgate standard

.le Fluxgate à deux noyaux magnétiques, dont les performances sont nettement améliorées en utilisant un des deux tores magnétiques comme élément saturable, sans espace d'air entre les deux. Pour ce qui est du comportement aux hautes fréquences, un second tore bobiné est utilisé comme transformateur de courant, ici non plus il n'y a pas d'entrefer.

.les Fluxgates à trois noyaux magnétiques, qui apportent une amélioration supplémentaire de performances en dédoublant la tête de détection du champ, en utilisant deux tores bobinés séparément. La bobine d'excitation est enroulée autour de chaque tore. Pour les hautes fréquences, l'amélioration est apportée en optimisant la conception du transformateur de courant et en combinant plusieurs bobinages sur le même tore avec une électronique adaptée.

### Exemple de réalisation

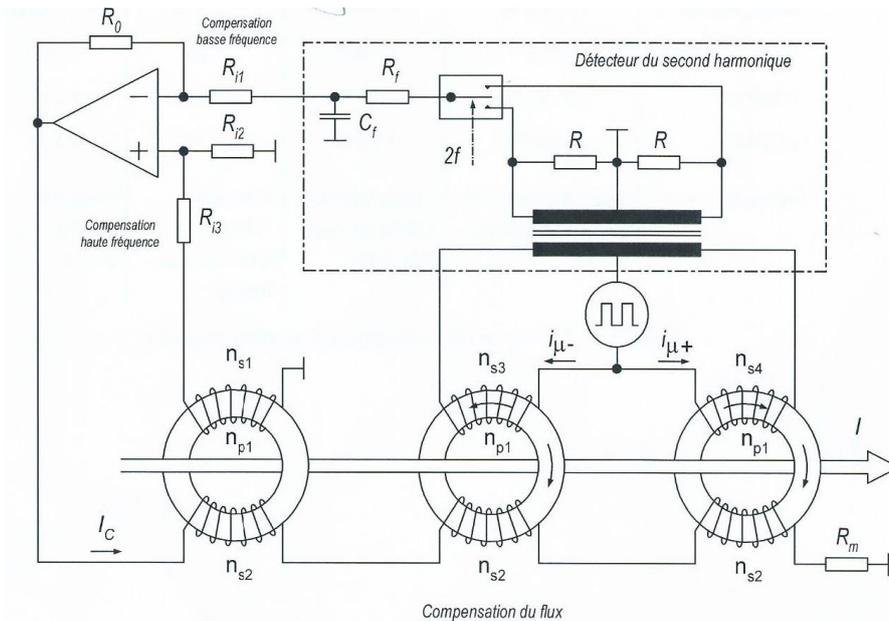
La figure suivante illustre un transducteur de courant de type Fluxgate. Le courant à mesurer est représenté par une barre traversant trois circuits magnétiques.

Le premier, de type classique permet un fonctionnement pour les fréquences élevées (effet transformateur).

Les deux suivants sont des éléments saturables. Les enroulements  $n_{S3}$  et  $n_{S4}$ , lorsqu'ils sont traversés par un courant  $i_{\mu-}$ , respectivement  $i_{\mu+}$ , engendrent des flux en anti phase, respectivement en phase avec le flux créé par un courant primaire positif.

Cette configuration à l'avantage de limiter le bruit injecté sur le circuit primaire (tension induite en opposition). Les enroulements  $n_{s2}$  de chaque circuit magnétique sont parcourus par le même courant de compensation. En basse fréquence, lorsque le réglage du courant de compensation est à l'intérieur de la bande passante, les flux dans chaque enroulement sont nuls. Pour les fréquences élevées, la compensation se fait par l'enroulement  $n_{s1}$ .

La grandeur observée pour le contrôle du courant de compensation correspond à la deuxième harmonique donnée par le circuit de détection suivie d'un filtre passe bas.



*Exemple de réalisation de transducteur de courant « Fluxgate »*

### Performances des technologies Fluxgate

La technologie Fluxgate (porte de flux) peut être déployée de différentes manières utilisant toujours le même principe mais donnant des performances diverses suivant la complexité de la conception.

Il est difficile de comparer simplement les diverses conceptions Fluxgate mais on peut néanmoins souligner des tendances générales.

Au nombre des avantages, on trouve le faible décalage et la faible dérive du décalage, la précision et la résolution élevées, la grande plage de températures de fonctionnement, la grande dynamique de mesure de courant, la bande passante élevée, le temps de réponse très rapide jusqu'à 200kHz typique, 800kHz maximum.

Au nombre des inconvénients, on peut noter la bande passante limitée pour les modèles les plus simples, le risque d'une injection de bruit (courant/tension) dans le conducteur primaire

et enfin la consommation de courant secondaire relativement importante, mais semblable aux transducteurs en boucle fermée basés sur la technologie Hall.

Les caractéristiques (typiques) des transducteurs de type Fluxgate sont fortement dépendantes de la conception.

Conception	Trois noyaux magnétiques	Deux noyaux magnétiques avec transformateur	Deux noyaux magnétiques sans transformateur	Type standard
Plage de courant	0...5000A	0...150A	0...400A	0...500A
Bande passante	0-100kHz	0-500kHz	0-100kHz	0-200kHz
Temps de réponse	< 1ms	< 1ms	≠ 5 ms	< 1ms
Précision	± 0,0002%	± 0,1%	± 0,1%	± 0,2%
Linéarité	± 0,0001%	± 0,05%	± 0,1%	± 0,1%

## CAPTEUR DE COURANT EFFET NEEL

Le physicien français Louis Néel a découvert en 1949 que des matériaux ferromagnétiques finement divisés en nanoparticule perdent toute hystérésis en deçà d'une taille critique. Ce phénomène est appelé le super paramagnétisme.

Une application importante de l'effet Néel est la mesure du champ magnétique rayonné par un conducteur lorsqu'il est parcouru par un courant.

L'effet Néel apparait lorsque :

- .on place un matériau super magnétique à l'intérieur d'une bobine parcourue par un courant d'excitation alternatif.
- .on soumet ladite bobine à un champ magnétique extérieur statique ou périodique.

Le transducteur d'un capteur de courant à effet Néel est constitué d'une bobine dont le noyau est un composite chargé de nanoparticules super magnétiques. La bobine est parcourue par un courant d'excitation.

L'intérêt de l'effet Néel est en particulier de permettre une mesure précise de courants continus ou de très faible fréquence avec un capteur du type transformateur de courant sans contact.

---

### ALLIANTECH S.A.S



### Etendue de l'échelle décalage du zéro

.l'étendue de l'échelle exprime la différence entre les valeurs minimales et maximales

.la sortie à 0% ne correspond pas toujours a une valeur nulle de la grandeur mesurée.On exprimera ce décalage de zéro par un offset.

### Précision, sensibilité

.la précision s'apparente à la qualité de la mesure effectuée par le capteur

.l'erreur de précision ou imprecision de mesure délimite un intervalle d'incertitude.

.la sensibilité est définie autour d'une valeur m de la grandeur.

Elle s'exprime par le rapport :  $\sigma = \Delta S / \Delta m$  soit la variation de la sortie / variation de la mesure.

---

#### ALLIANTECH S.A.S

RCS Nanterre : B 424 367 902 00022  
Code TVA : FR 58 424 367 902  
Capital : 200 000 Euros  
Code NAF : 4669B



[www.alliantech.com](http://www.alliantech.com)  
XXX XXX

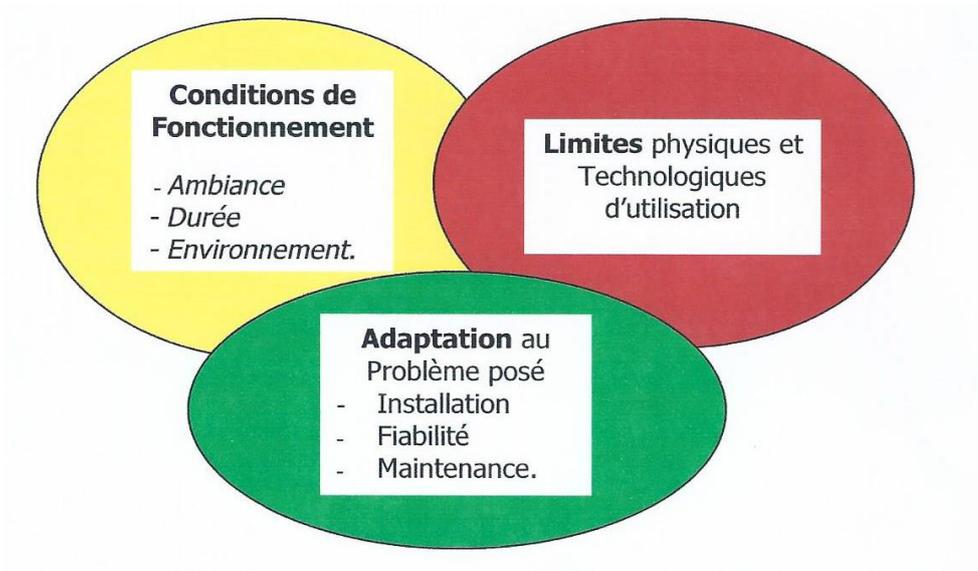
Téléphone : +33 (0) 1 47 90 77 77  
Email : [information@alliantech.com](mailto:information@alliantech.com)  
ALLIANTECH, 12 rue Traversière  
92 230 Gennevilliers  
France

### Temps de réponse (Tr)

.Tr est un critère d'appréciation des performances dynamiques du capteur, qui se comporte comme un filtre passe- bas.

.le Temps de réponse qualifie la rapidité du capteur à transmettre l'information.

### Critères de choix d'un capteur



---

**ALLIANTECH S.A.S**

RCS Nanterre : B 424 367 902 00022  
Code TVA : FR 58 424 367 902  
Capital : 200 000 Euros  
Code NAF : 4669B



[www.alliantech.com](http://www.alliantech.com)  
XXX XXX

Téléphone : +33 (0) 1 47 90 77 77  
Email : [information@alliantech.com](mailto:information@alliantech.com)  
ALLIANTECH, 12 rue Traversière  
92 230 Gennevilliers  
France