

# Instrumentation

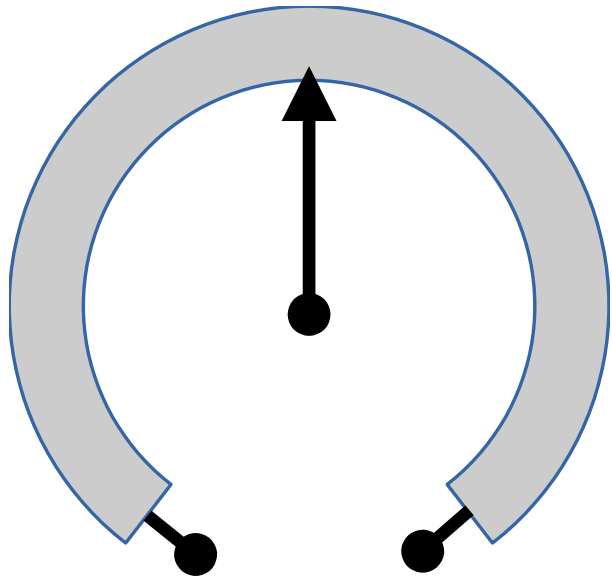
Joseph Moerschell, Marc Nicollrat

# 5 Capteur de position et d'angle

- Potentiomètres rotatifs et linéaire
- Mesures dans un champ

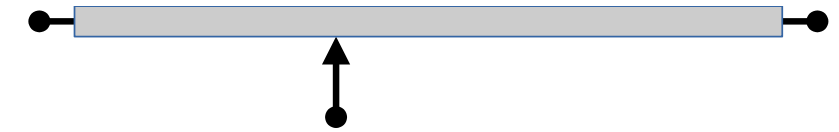
# 5.1 Potentiomètre

Le principe du potentiomètre est d'avoir une bande résistive régulière. Un curseur se déplace sur la bande résistive.

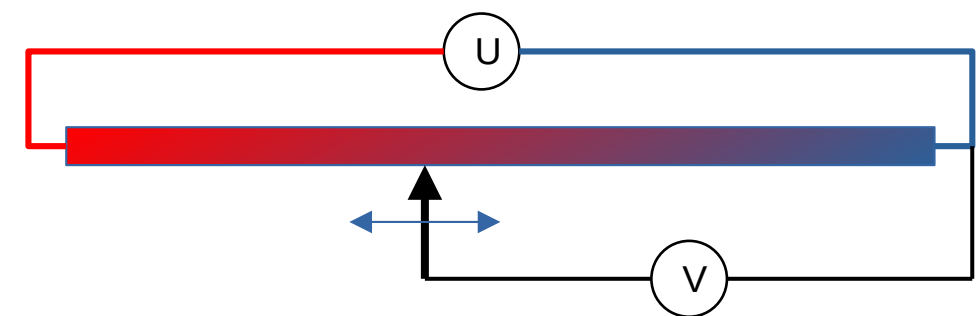


Potentiomètre rotatif

Lorsqu'on applique une tension sur le potentiomètre, la bande résistive a une tension proportionnelle à la position



potentiomètre linéaire



Utilisation du potentiomètre

Le curseur frotte sur la bande conductrice. La position détermine la tension. L'Equation 1 montre la relation pour un potentiomètre rotatif.

$$U_{curseur} = U_0 * \frac{\Theta}{\Theta_{max}} \quad (1)$$

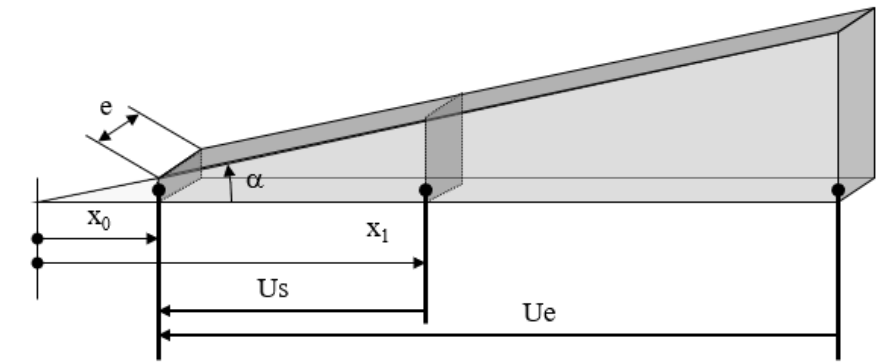
## 5.2 Potentiomètres spéciaux

Il est possible de réaliser un potentiomètre avec une variation logarithmique de la résistance. Ceci s'obtient avec une bande résistive de forme triangulaire.

$$h(x) = x \cdot \alpha$$

$$\Delta R = \rho_c \frac{\Delta x}{e \cdot \alpha \cdot x}$$

$$R(x_1) = R_P \cdot \frac{\log(x_0/x_1)}{\log(x_0/x_{max})}$$



Piste d'un potentiomètre logarithmique

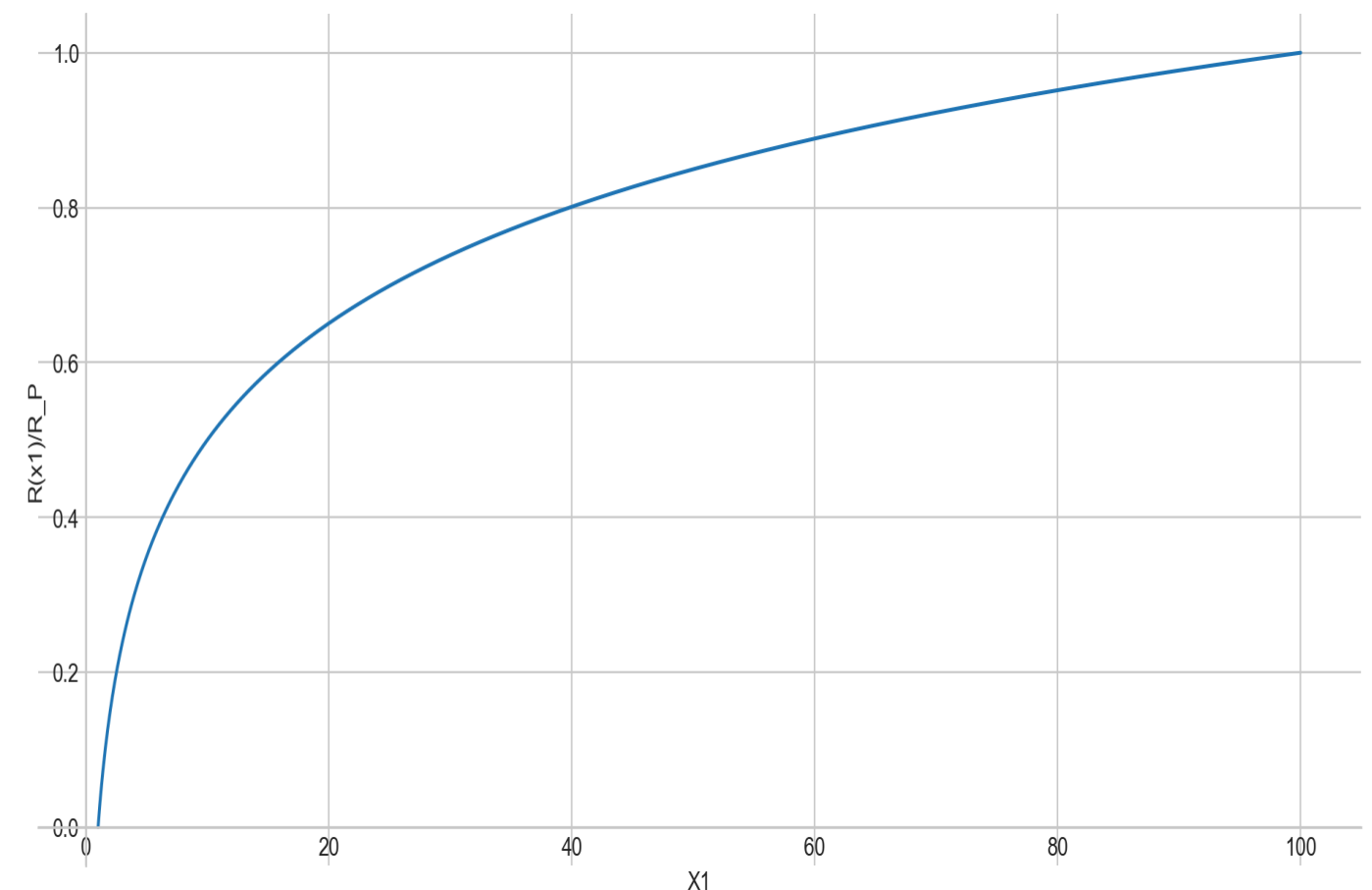


Figure 1: Caractéristique du potentiomètre logarithmique



Tip

Le développement est fait dans un jupyter notebook `ex_5.1_potentiometre.ipynb`.

## 5.3 Exemples de potentiomètres

Quelques potentiomètre en images :

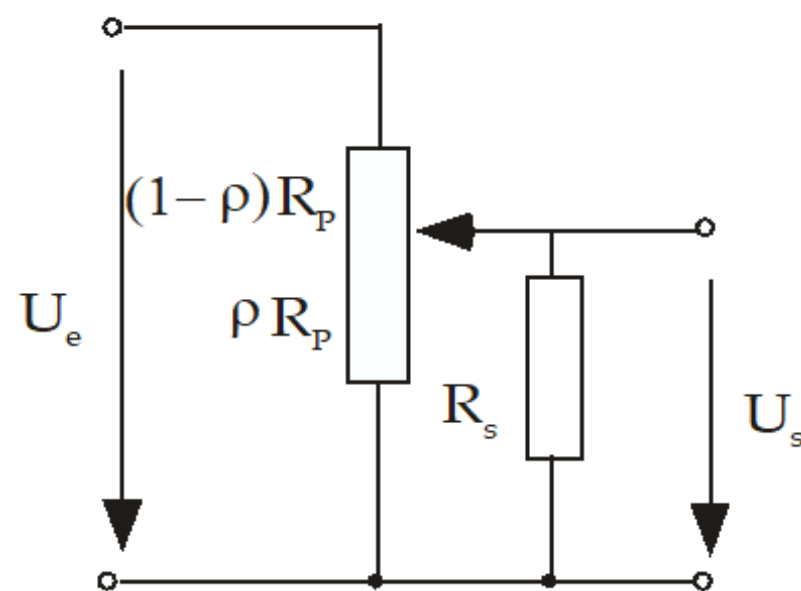


Tip

Le potentiomètre multitours permet d'avoir une meilleure résolution pour le réglage de la valeur.

## 5.4 Effet de charge

Lorsqu'une résistance en parallèle due au système de mesure est présente, la caractéristique est faussée.



Résistance de charge  $R_s$

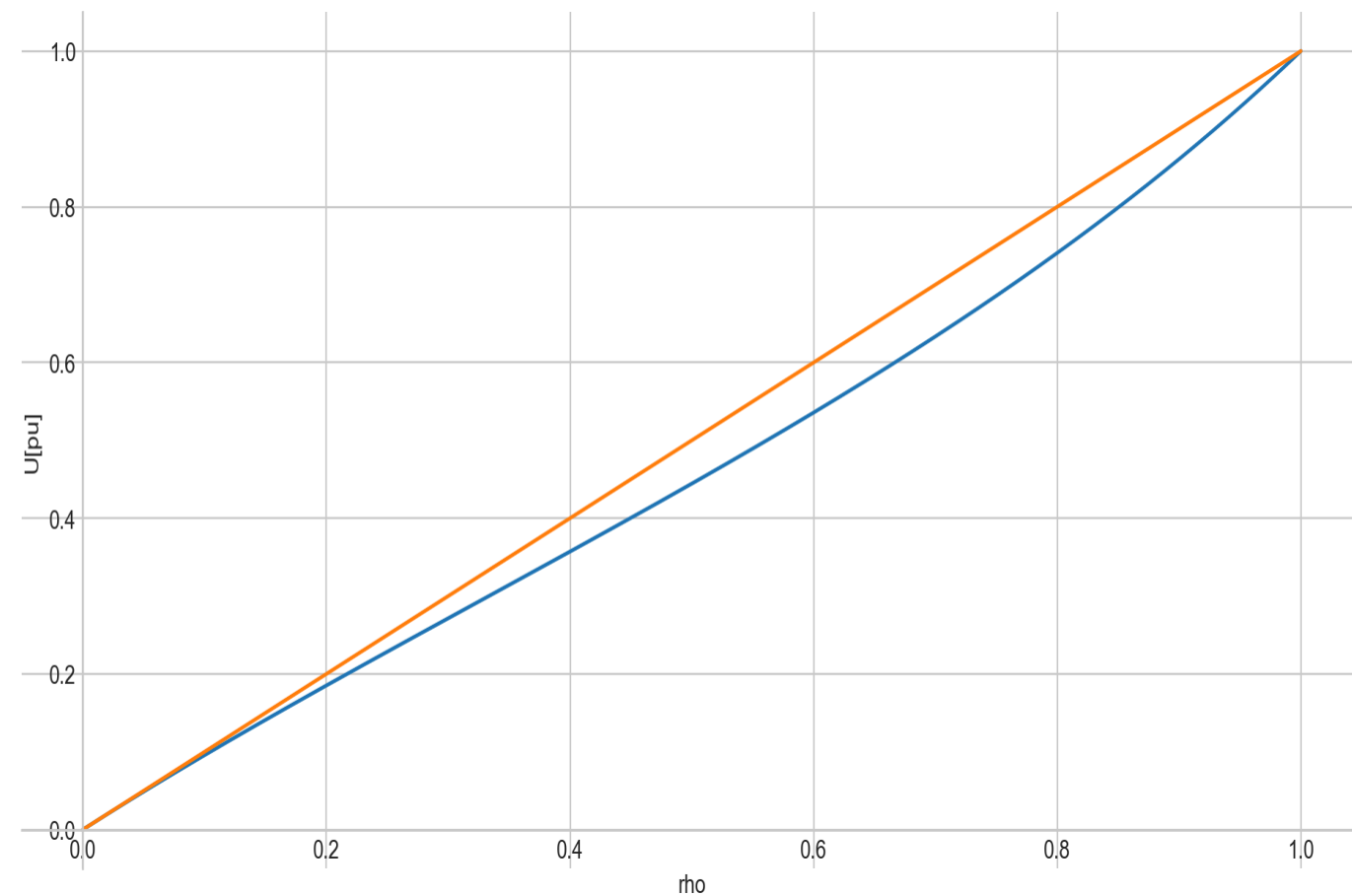


Figure 2: En bleu, on voit l'influence de la résistance de charge

### 💡 Exercice

Calculez l'influence d'une impédance non négligeable.

Tests possibles avec le jupyter notebook `ex_5.1_potentiometre.ipynb`

## 5.5 Avantages et inconvénients du potentiomètre

### Avantages

- Simple et bon marché.
- *Linéaire* s'il n'est pas chargé comme on verra par la suite
- Sa précision est indépendante des variations de la température.

### Inconvénients

- La précision de mesure dépend de la constance de la tension d'alimentation.
- Le déplacement du curseur nécessite un certain couple ou une certaine force (effet de charge).
- Il y a *usure* entre le contact électrique et le matériel résistif. Par conséquent, ce capteur n'est pas adapté pour des déplacements fréquents et rapides
- A cause des *tolérances de fabrication*, une certaine déviation par rapport à la linéarité, de l'ordre de 0.1% ... 1% est possible
- Le système situé en aval ne doit pas présenter *d'effet de charge* important .

## 5.6 Principes physiques avec des champs

Pour éviter le contact, on utilise la présence d'un *champ* qui a un gradient. Au moyen du bon capteur, il est possible de mesurer le champ et d'en déduire la position.

Les possibilités sont les suivantes :

- Champ magnétique
- Champ électrique
- Champ lumineux

Les caractéristiques recherchées sont :

- Insensibilité aux variations environnementales
- Linéarité



## 5.7 Capteur inductif ou capacitif

Le principe des capteurs inductifs et capacitifs est d'émettre un champ électrique ou magnétique (variation sinusoïdale) et de mesurer l'influence des objets sur la valeur de la capacité ou de l'inductance.

### Capteur inductif

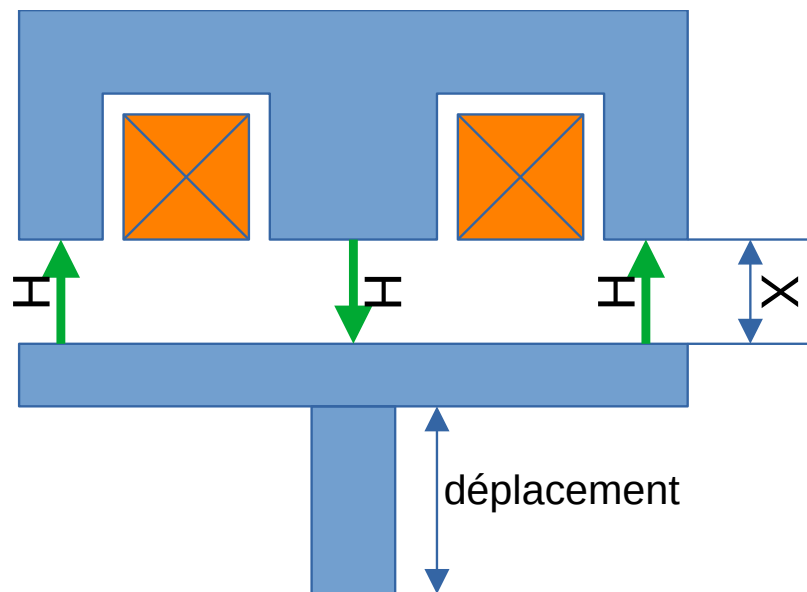
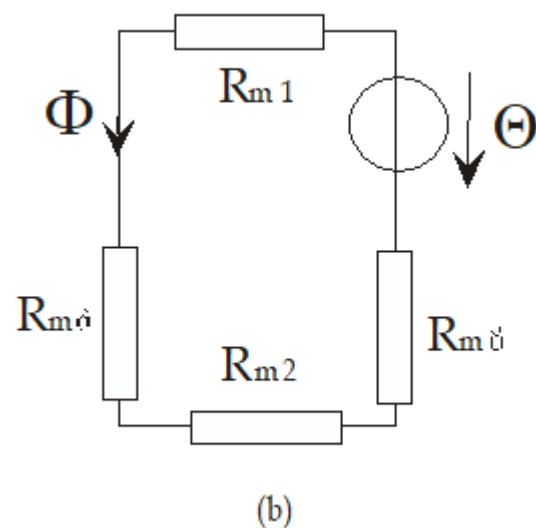


Figure 3: Mesure de position inductive



Circuit magnétique équivalent

### Capteur capacitif

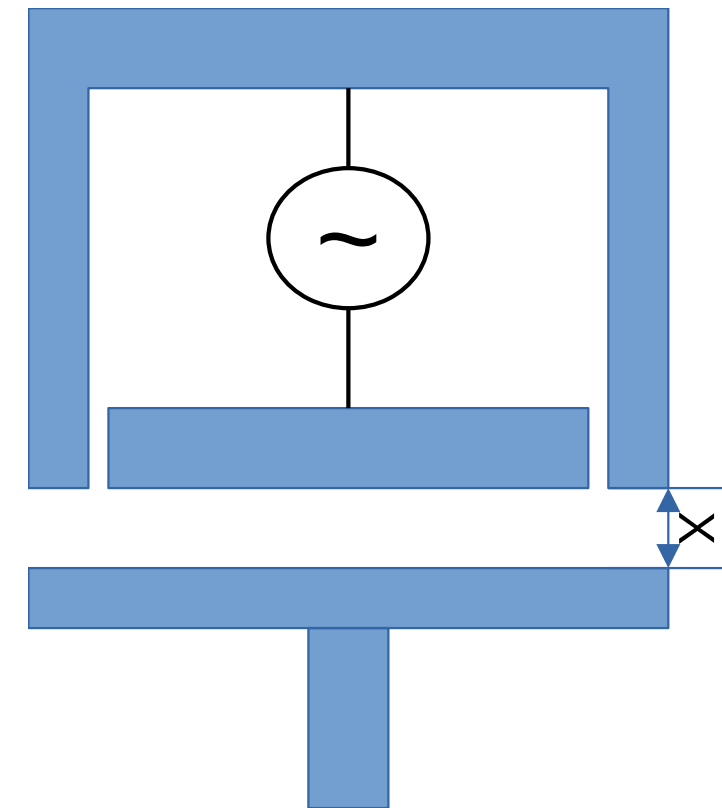


Figure 4: Mesure de position capacitive

## 5.8 Equations de mesure de distance inductive

Le champ créé par la bobine ([Figure 3](#)) se concentre dans l'*entrefer*. La perméabilité de l'air étant bien plus faible que celle du matériau, on a une équation du genre (pour un entrefer suffisamment grand) :

$$R_{mx} = \frac{x}{\mu_0 A_x}$$

$$\Theta = N \cdot I$$

$$2R_{mx} \cdot \Phi = \Theta$$

$$L_x = \frac{\Phi \cdot N}{I} = \frac{N^2}{2R_{mx}} = \frac{\mu_0 \cdot A_x N^2}{2x}$$

Si l'on tient compte des impédances du circuit magnétique, on peut formuler l'équation de l'inductance selon l'[Equation 2](#)

$$L_x = \frac{L_0}{1 + 2\mu_r x/l_m} \quad (2)$$

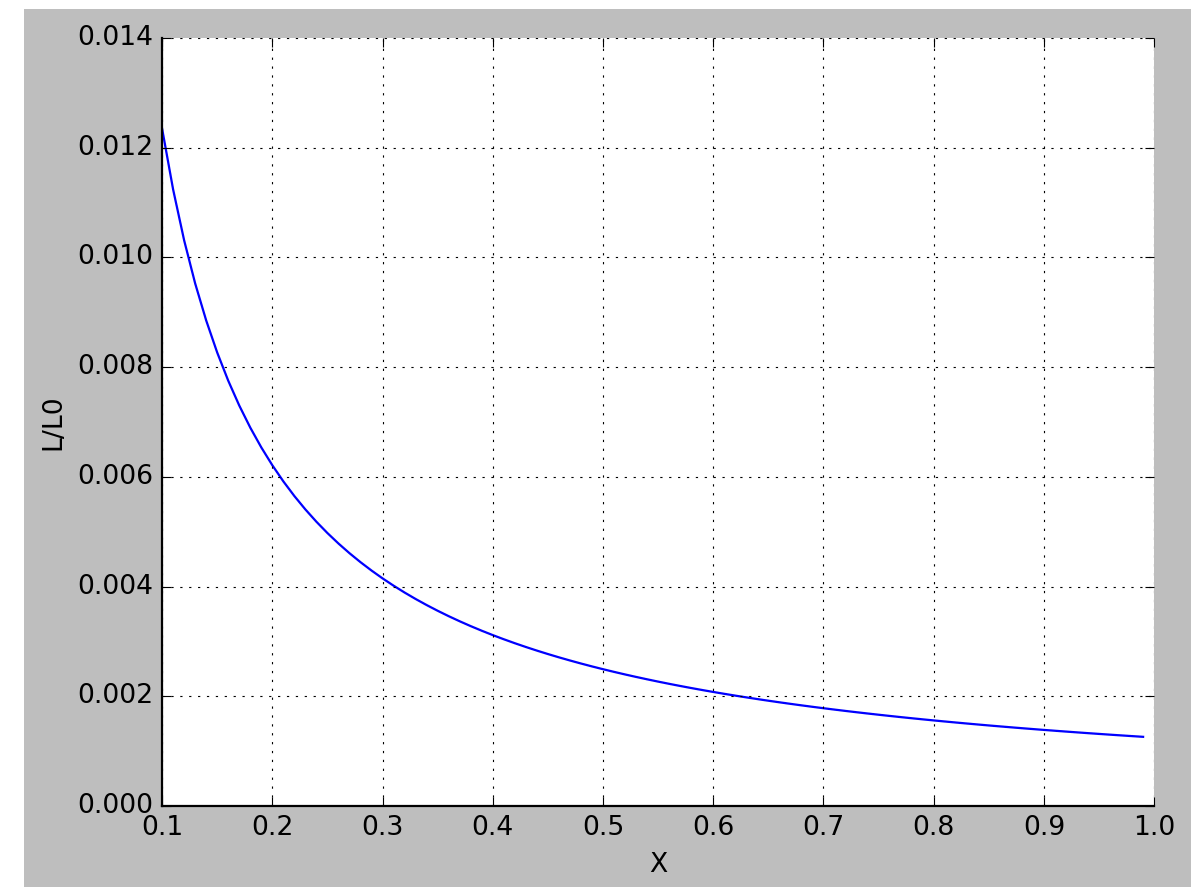


Figure 5: Variation de l'inductance d'un capteur inductif

### ⚠ Important

Les matériaux utilisés dans cette application ne doivent pas être conducteurs afin de minimiser les courants de Foucault.

## 5.9 Mesure de distance avec un plongeur

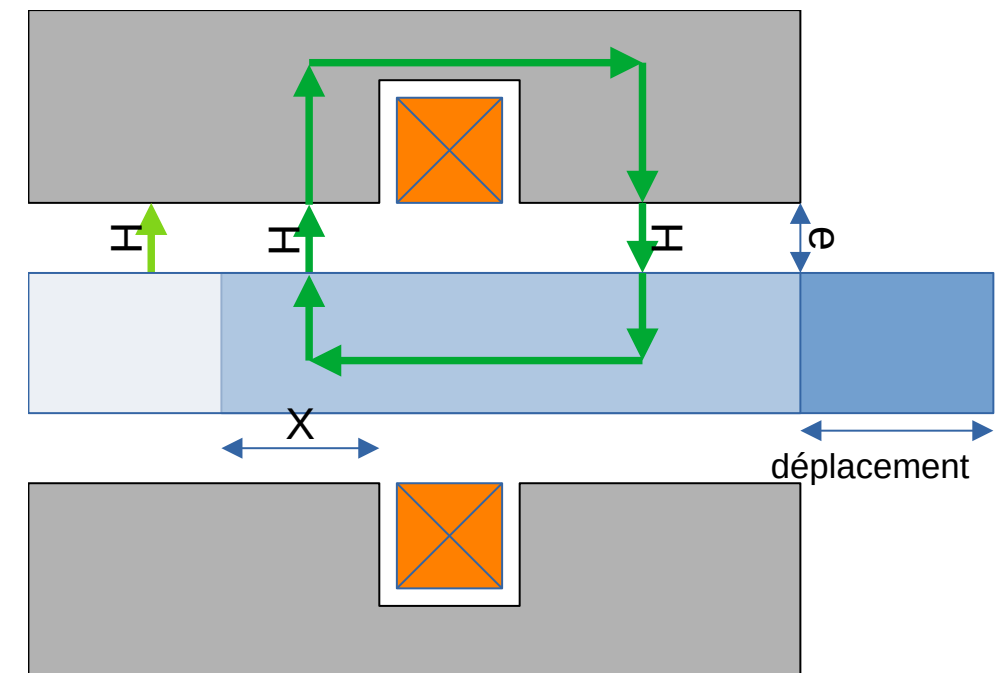
On obtient une meilleure linéarisation avec le déplacement d'un plongeur.

Ici la surface varie, donc la résistance magnétique de l'entrefer de gauche est proportionnelle au déplacement.

$$R_{mx} = \frac{e}{\mu_0 \cdot p \cdot x}, L_x = \frac{N^2}{R_{mx}} = \frac{N^2 \mu_0 \pi d}{e} \cdot x$$

Avec  $p = \pi d$  est le périmètre du plongeur,  $d$  étant le diamètre.

Ce qui est négligé dans ce calcul vient s'ajouter comme des variations non linéaires à la caractéristique.



Mesure de la position d'un plongeur

### Note

On suppose que l'espace entre le plongeur et le capteur est faible par rapport au diamètre du plongeur ( $e \ll d$ ). La résistance magnétique du circuit magnétique est négligée.

## 5.10 Avantage et inconvénients d'un capteur de position inductif

### Avantages

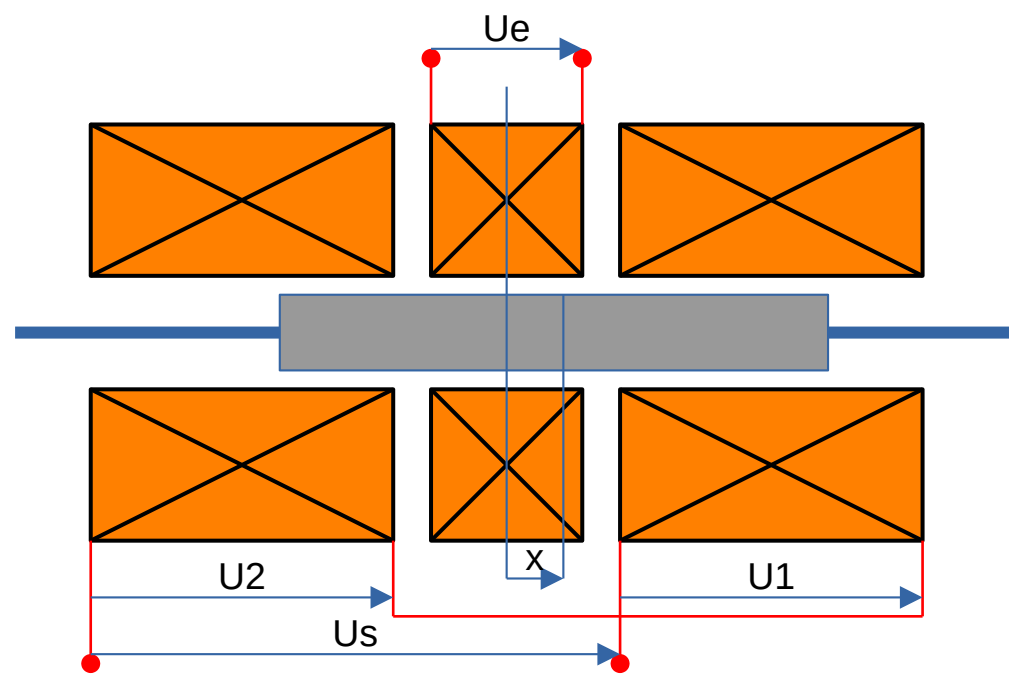
- Le déplacement de la partie mobile *n'est pas soumis à des frictions*. On peut donc l'utiliser dans les déplacements fréquents et rapides. On doit toutefois considérer que la masse transportée est relativement importante.

### Inconvénients

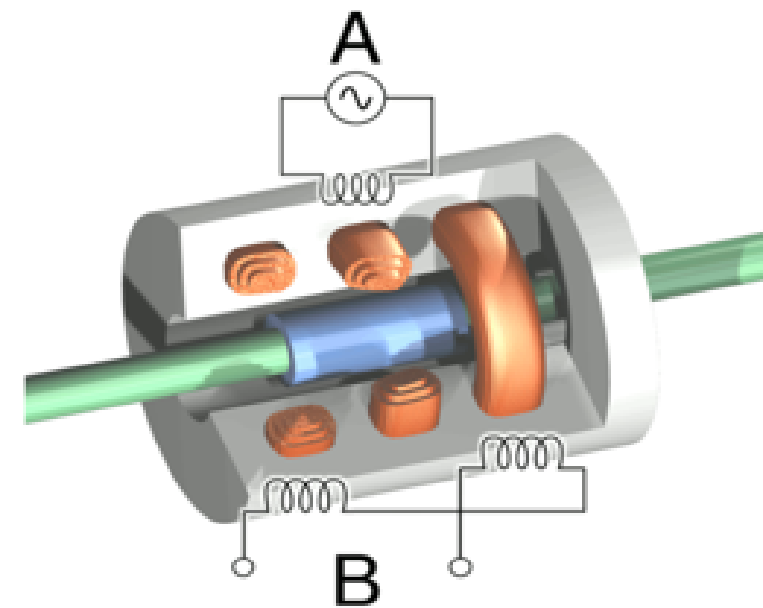
- Le capteur a des *non-linéarités*. Le système de mise en forme doit compenser cette non-linéarité.
- La *température ambiante* influence la résistance  $R$  de la bobine et la perméabilité relative du matériau magnétique. Ceci influence la caractéristique et doit être compensé.
- Le capteur inductif possède une *fréquence de coupure*. Celle-ci limite la vitesse maximale de déplacement.
- *L'hystérésis* du matériau magnétique peut provoquer une inductance légèrement différente pour la même position  $x$ .

## 5.11 Transformateur différentiel

Le noyau se déplace dans un champ magnétique créé par une bobine centrale. La tension induite sur les 2 enroulements aux extrémités dépend de la position de ce dernier.



Transformateur différentiel



Transformateur différentiel

La connexion des 2 bobines est faite pour mesurer la différence entre les 2. La sortie du capteur est proportionnelle à la position. Elle est nulle quand le plongeur est centré.

## 5.12 Resolver

Le résolver est un capteur robuste de mesure de l'angle d'un axe. Il peut être utilisé par un régulateur de position.

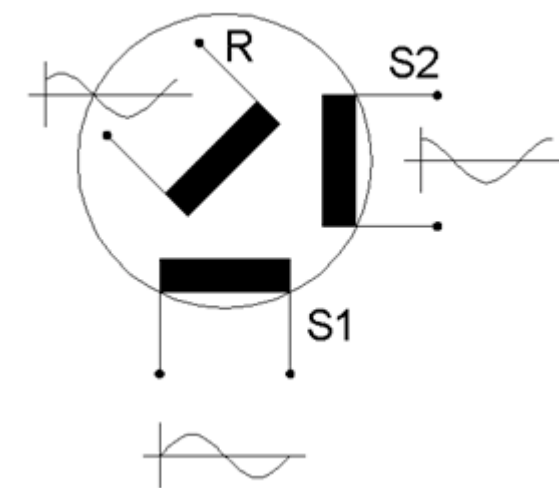
- Un champ magnétique est induit dans le rotor. Pour éviter les contacts, on utilise un transformateur pour transmettre l'énergie au rotor.
- La bobine alimentée au rotor passe à l'intérieur de 2 bobines situées à 90° au stator. L'amplitude de la tension entre les 2 bobines dépend de la position.
- La position est calculée par des circuits spécialisés.

$$U_r(t) = \sqrt{2}U_r \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{S1}(t) = K \cdot U_r \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{S2}(t) = K \cdot U_r \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\omega t)$$

On a  $\theta$ , l'angle du rotor, et  $\omega$  la pulsation du signal d'excitation.



Principe du resolver



Tip

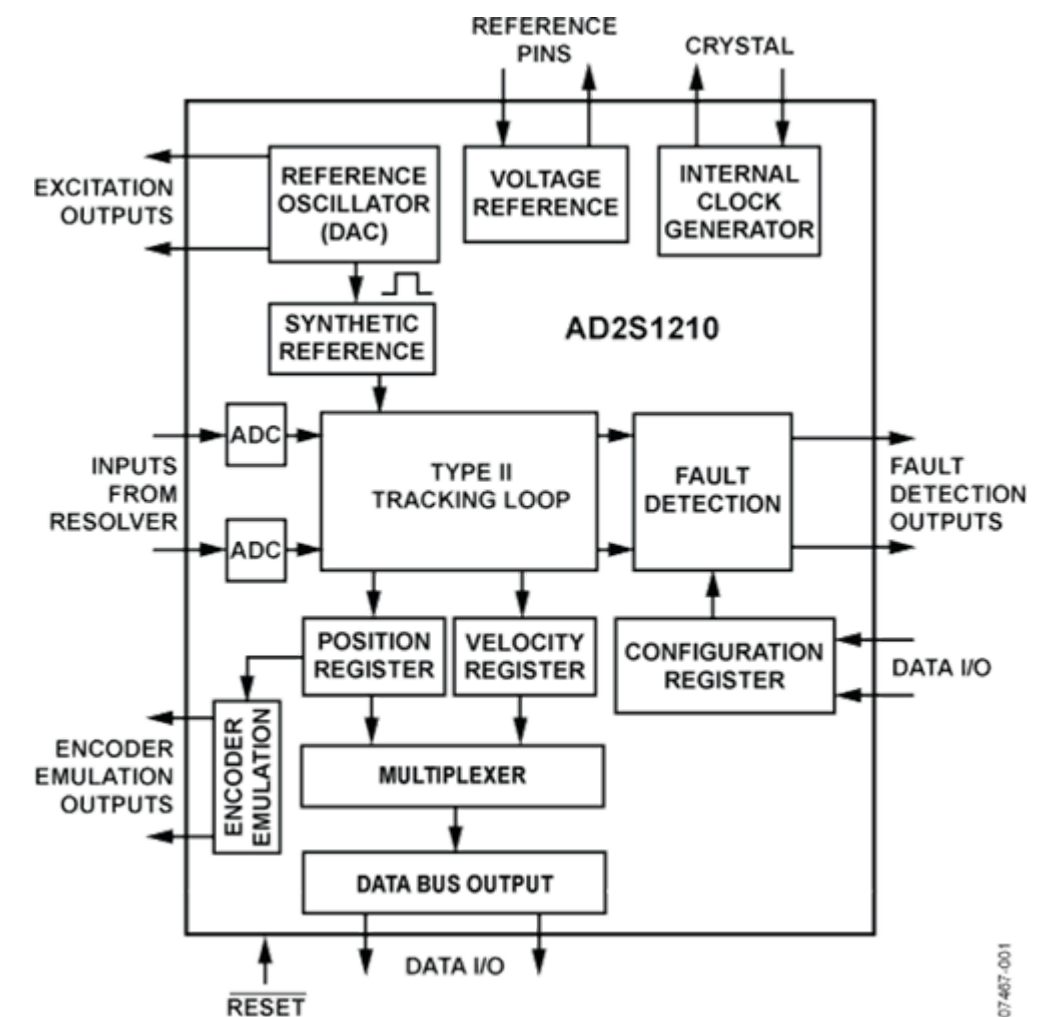
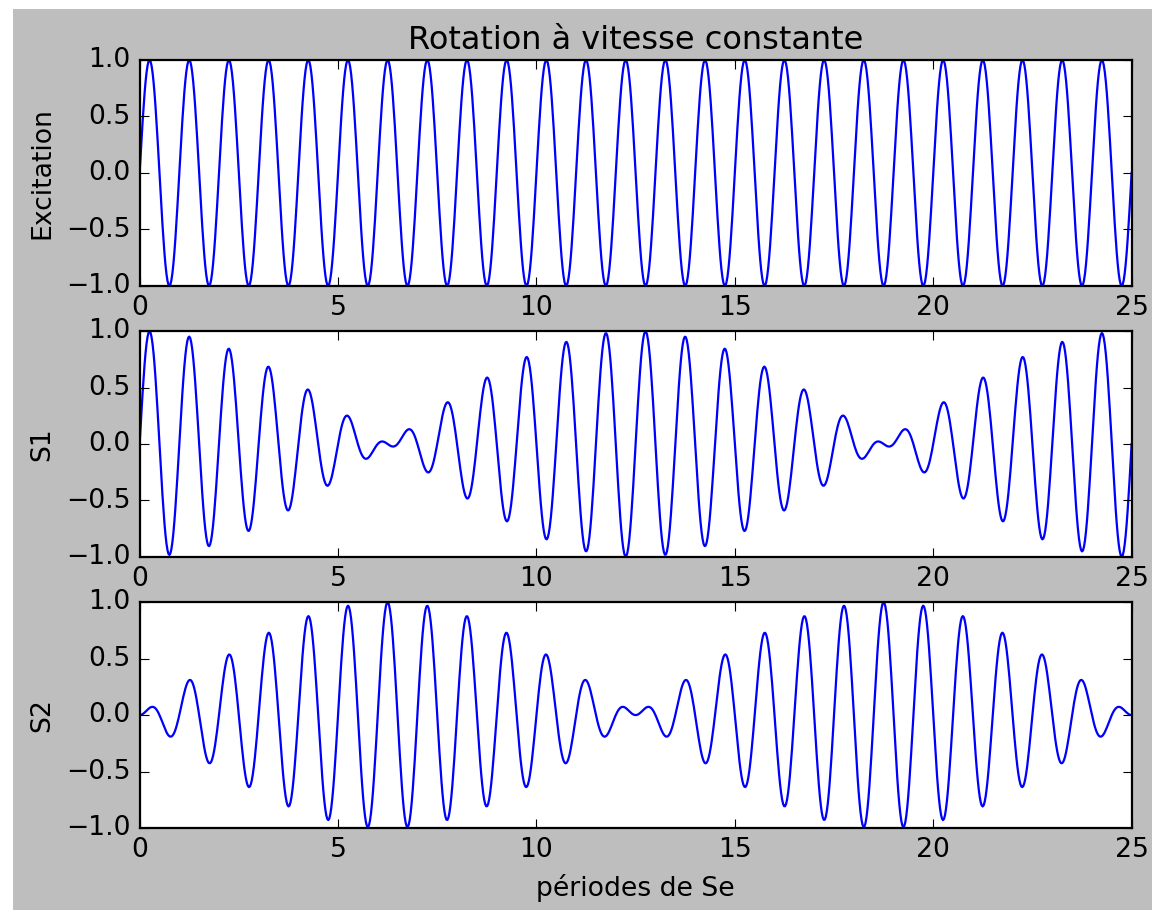
Le notebook jupyter `dev_5.1_resolver.ipynb` montre comment évoluent les signaux

## 5.13 Quelques résolveurs



## 5.14 Exploitation du resolver

Le resolver fournit des signaux qui nécessitent un traitement pour pouvoir être utilisés. Le principe de mesure est composé d'une boucle de poursuite (tracking) qui détermine la position correspondant aux signaux mesurés.



Exemple de circuit de conversion



Tip

Comment passer de l'information alternative à une information d'angle stable ?



## 5.15 Algorithme "Resolver to digital"

Signaux S1 et S2 sont modulés par l'excitation  $Se = \sin(\omega t)$  et dépendants de l'angle du moteur  $\theta$  :

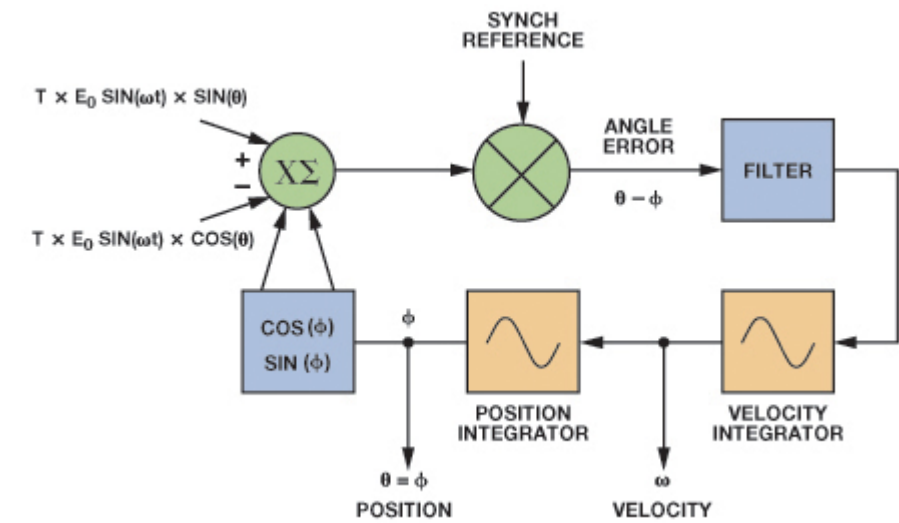
$$S1 = \cos(\theta) \cdot Se, S2 = \sin(\theta) \cdot Se$$

On soustrait les 2 signaux après avoir multiplié par sin et cos de l'angle estimé  $\hat{\theta}$ .

$$\begin{aligned} E &= Se(\cos(\theta) \sin(\hat{\theta}) - \sin(\theta) \cos(\hat{\theta})) \\ &= Se \cdot \sin(\hat{\theta} - \theta) \end{aligned}$$

Enfin, on multiplie par le signal d'excitation pour obtenir un signal de la forme :

$$D = \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \cdot \sin(\hat{\theta} - \theta)$$



Decodage des signaux du resolver

Après filtrage passe-bas, on élimine la fréquence double pour obtenir

$$D_{filtre} = \frac{1}{2} \sin(\hat{\theta} - \theta)$$

Ce signal, pour de petites différences est proportionnel à l'erreur d'angle entre l'estimation et le rotor, ce qui permet de corriger l'angle  $\hat{\theta}$  pour annuler cette erreur.

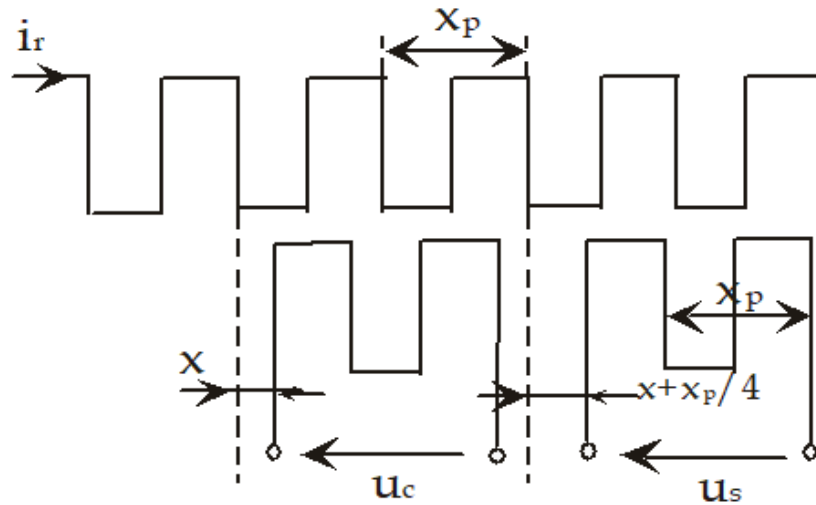


Tip

Le jupyter notebook dev\_5.1\_resolver.ipynb permet d'analyser le développement en détail.

## 5.16 Inductosyn

Un capteur Inductosyn (marque) fonctionne de façon comparable au resolver, mais utilise des traces sur un PCB. Les inductances sont plus faibles, aussi utilise-t-on des fréquences d'excitation plus élevées.



Principe de l'inductosyn(r)

L'induction mutuelle entre la trace portant le courant de référence et la trace de lecture génère une tension. Elle est maximum lorsque les traces se superposent, inverse lorsque les traces sont en opposition.



Exemple de Produit

# 5.17 Avantage et inconvénients des résolveurs

## Avantages

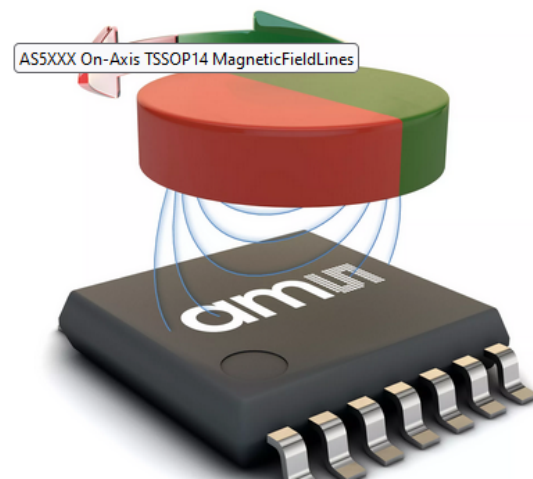
- Haute précision

## Inconvénients

- La nécessité de démodulation.
- Pas de sortie exploitable directement par un système numérique : nécessité d'un convertisseur analogique/digital.

# 5.18 Capteur de champ magnétique

Il est possible de mesurer un angle à partir d'une mesure du champ magnétique. Si un aimant est placé sur un arbre, un champ de sondes de Hall peut mesurer son orientation.



Mesure d'angle par un ams AS5047D

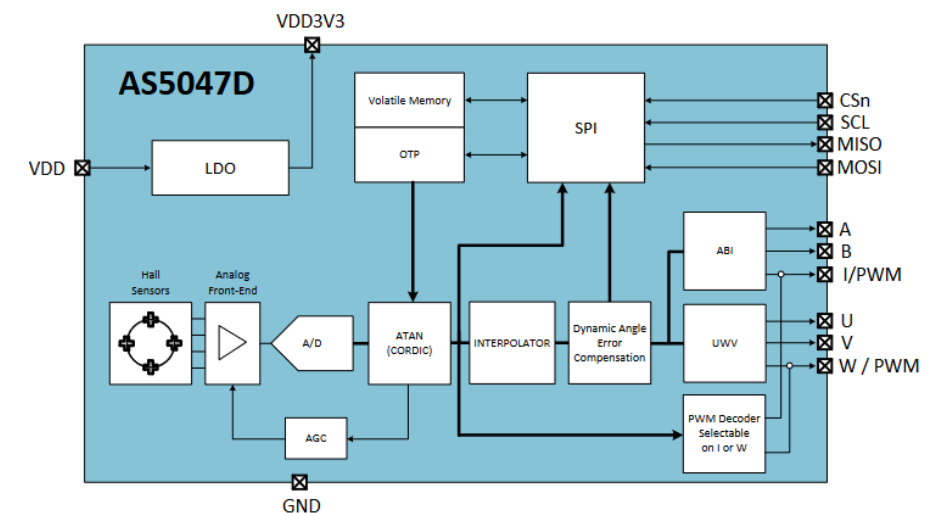
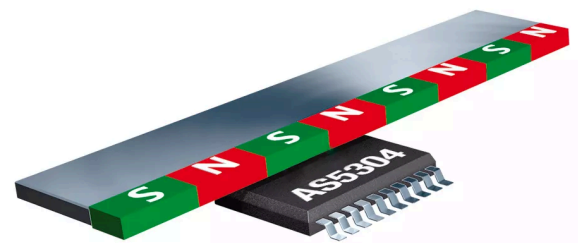
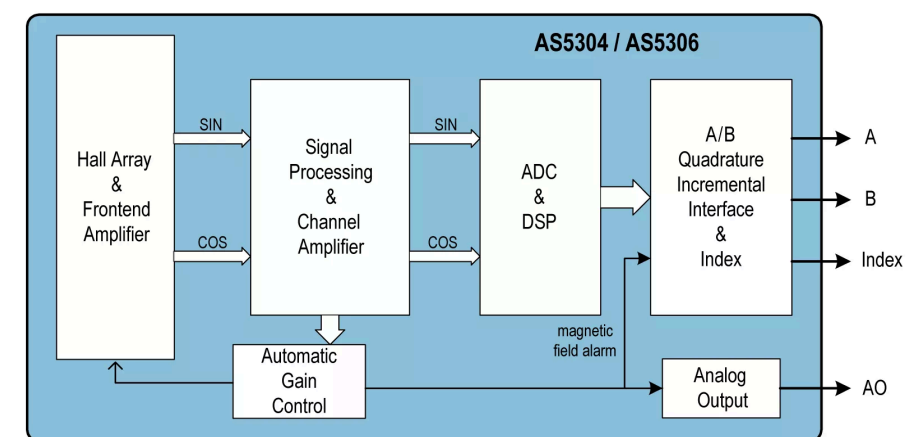


Schéma-bloc du circuit : interface A/B et SPI

Le même principe peut se décliner en version linéaire :



Mesure d'angle



Mise en forme

## 5.19 Pied à coulisse électronique

Un pied à coulisse électronique fonctionne sur une base capacitive.

- Des pistes sont gravées sur la partie mobile.
- Le circuit de mesure injecte une tension alternative sur une électrode par couplage capacitif.
- Les électrodes de mesures sont placées de façon à récupérer des signaux qui dépendent de la position.

### Exercice (de la mort qui tue)

- Comment confectionner le PCB de la partie mobile pour obtenir une mesure proportionnelle au déplacement ?
- Comment injecter le signal de mesure ?
- Comment positionner les électrodes pour mesurer la position ?

# 5.20 Exercices



## Mesures de position

1. Calculez l'effet d'une résistance de charge sur un potentiomètre (schéma §5.4). Trouvez l'erreur maximum sur la plage de fonctionnement.
2. Pour le capteur capacitif du croquis du §5.7, on mesure le courant induit sur la partie mobile qui est connectée à la masse avec une résistance.
  - Que va-t-on mesurer comme signal ?
  - Comment déduire la position  $X$  de cette mesure ?
3. Peut-on obtenir la position d'un arbre avec les valeurs instantannées fournies par un resolver ?