

Master d'Université Spécialisé MUS

Ingénierie des Systèmes Embarqués ISE

Cours: Capteurs en Instrumentation Industrielle

Ch.2: Capteurs de position et de déplacement

Par:

Pr. A. LASSIOUI

Année universitaire: 2024/2025

1. Introduction

- il existe plusieurs principes pour mesurer un déplacement ou une position angulaire:
 - Capteurs absolus : potentiomètre résistif, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile, ...
 - Capteurs incrémentaux : le capteur délivre une impulsion à chaque déplacement élémentaire, codeurs digitaux.... La position et les déplacements sont déterminés par comptage des impulsions émises, ou décomptage selon le sens du déplacement
 - Capteurs de proximité : Ils sont caractérisés par l'absence de liaison mécanique avec l'objet dont ils mesurent la distance ou le déplacement.

2. Le potentiomètre résistif:

2.1. Rappel physique

- On rappelle que la résistance R (en Ω) d'un conducteur s'écrit:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

R : la résistance en Ω ;

ρ : la résistivité du conducteur en $\Omega.m$;

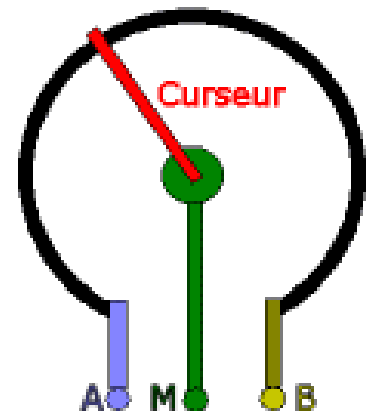
L : la longueur du conducteur en m ;

S : la section du conducteur en m^2 .

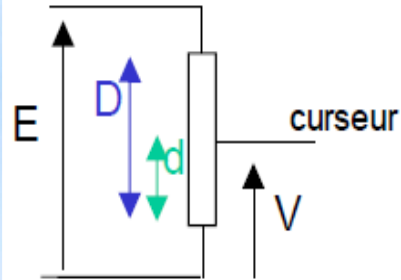
2.2. Principe de fonctionnement

- La piste résistive est placée sur la partie fixe du capteur et le mouvement mécanique à mesurer est **accouplé à un curseur** qui se déplace sur celle-ci.

Piste résistive au carbone



2.3. Potentiomètre de déplacement rectiligne:



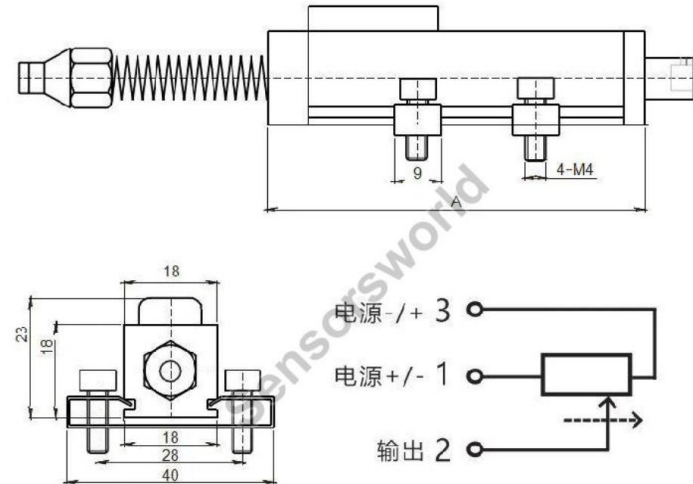
$$V = \frac{R_d}{R_{D-d} + R_d} E = \frac{R_d}{R_D} E = \frac{\rho \frac{d}{S}}{\rho \frac{D}{S}} E = \frac{d}{D} E$$



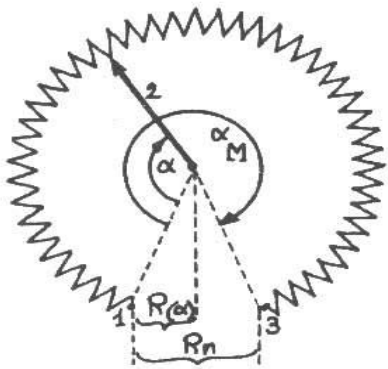
Exemple: Imprimante 3D, machine CNC...



3 types of KTR Potentiometer Sensors



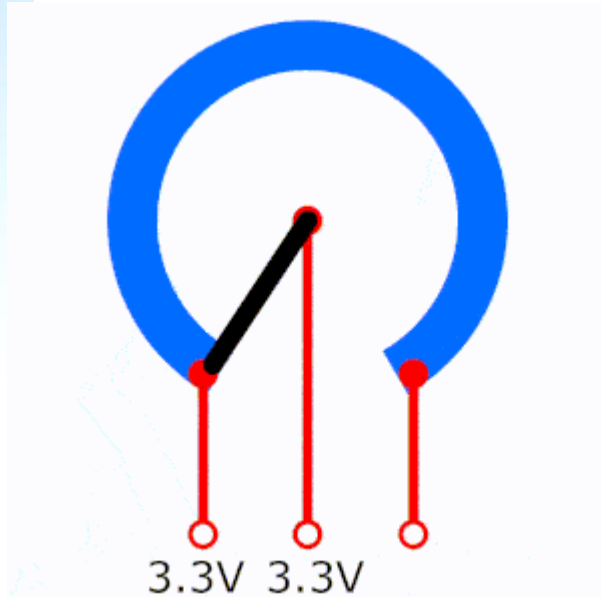
2.4. Potentiomètre de déplacement circulaire:



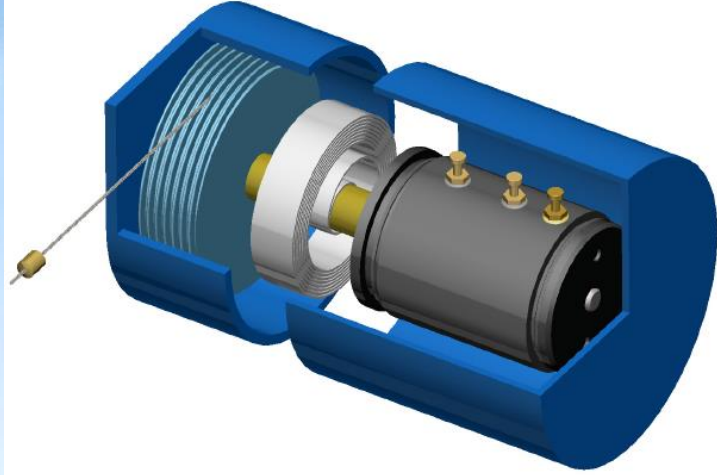
$$V = \frac{\alpha}{\alpha_M} E$$

•TE Connectivity

- Standard rotary potentiometer designs or custom packages
- Analog outputs including 0-10V and 4-20mA
- Digital outputs including CAN J1939 and DeviceNet 2.0
- Wide range of sensing angles
- Linearity 0.15%



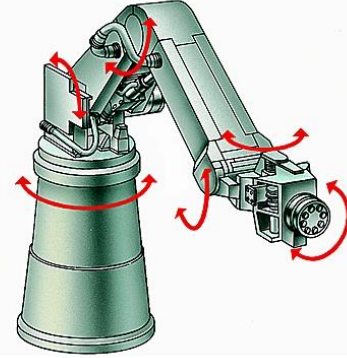
2.4. Potentiomètre de déplacement à câble



- Measuring ranges from 50 mm to 50 m.
- Draw wire mechanics for Encoder assembly and Hydraulic Transducers also available.
- Variety of output options: Voltage, Current, Potentiometric and Digital (TTL, HTL, Profibus, CANopen, Profinet etc....)

2.5. Applications:

- Capteurs très utilisés dans les applications courantes comme la détermination de la position d'un bras de robot.



2.5. Avantages et inconvénients:

- Avantages :

- simplicité
- peu coûteux

- Inconvénients :

- usure par frottements
- influence de l'appareil de mesure. Solution : amplificateur suiveur pour garantir la validité de l'utilisation du diviseur de tension

3. Le capteur capacitif

3.1. Principe:

- Il s'agit de condensateurs plans ou de condensateurs cylindriques dont l'une des armatures subie le déplacement. Il en résulte alors la variation de la capacité.

3.2. Condensateur plan :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{e}$$

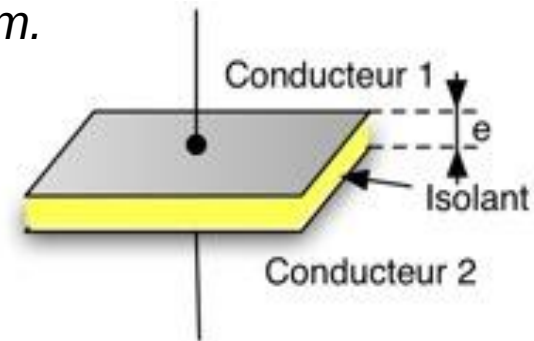
ε_0 : permittivité du vide = $8,85 \cdot 10^{-12}$;

ε_r : permittivité relative de l'isolant ;

S : surface en regard en m^2 ;

e : épaisseur de l'isolant en m .

- Pour faire **varier** la capacité du condensateur en fonction du déplacement, on fait varier soit la surface en regard S , **soit l'épaisseur e** .

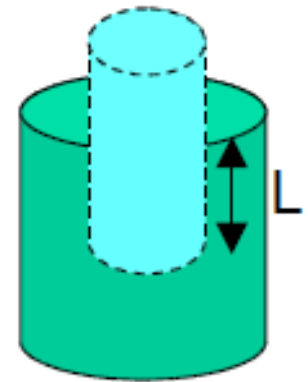


3.3. Condensateur cylindrique :

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

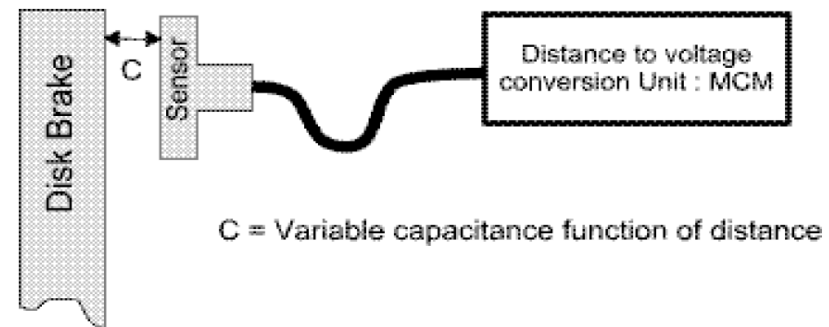
r_1 : rayon interne;
 r_2 : rayon externe;

- La capacité **varie** en fonction de la **longueur L** qui dépend du déplacement.



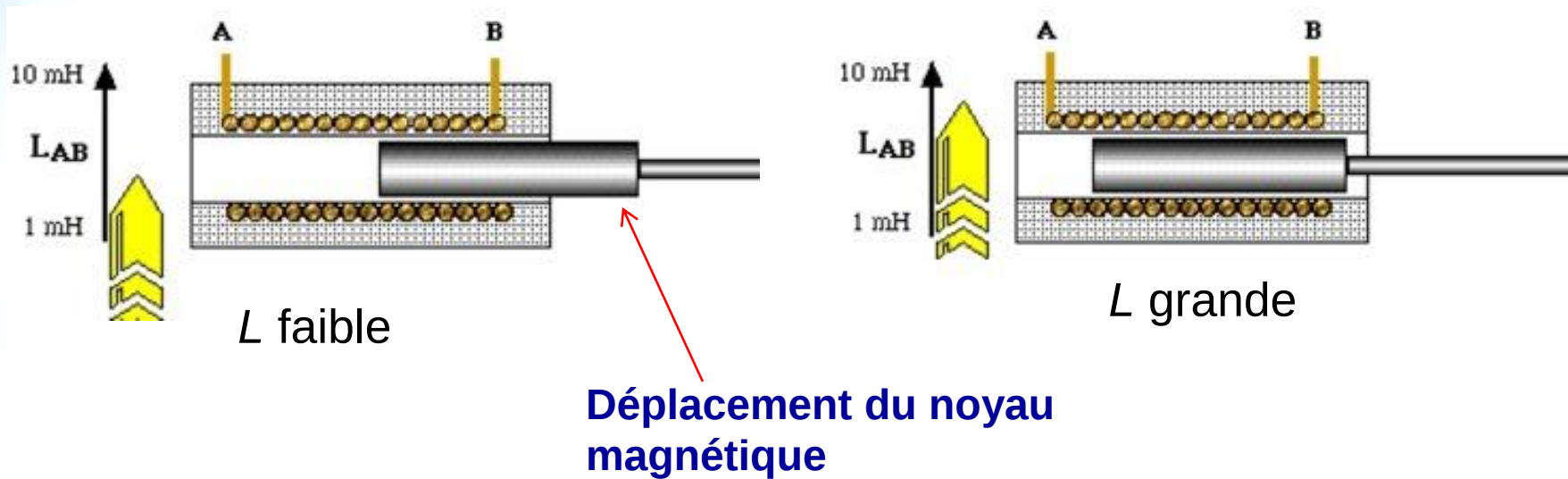
3.4. Applications :

- Détermination de l'usure des freins des voitures



4.2. Inductance variable:

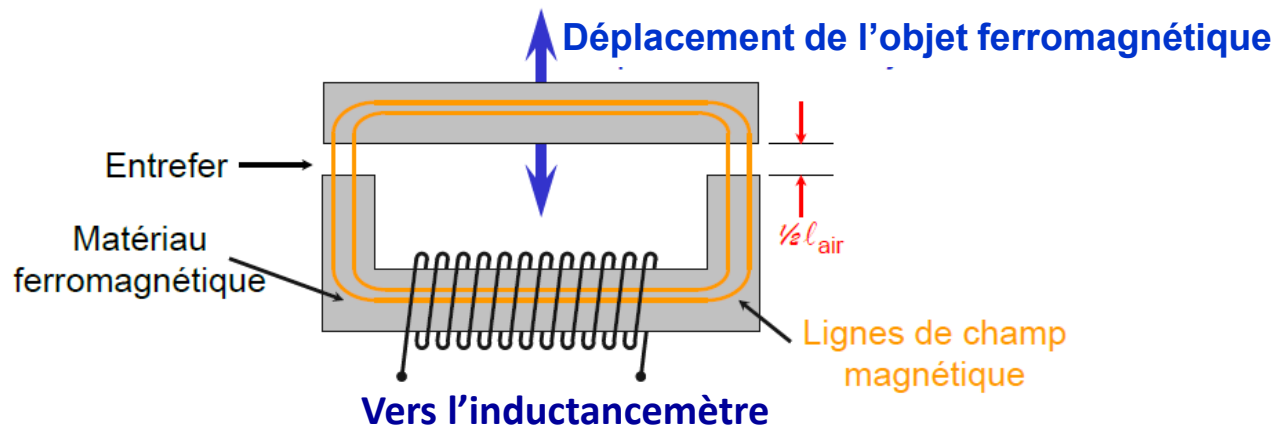
- Un noyau magnétique se déplace à l'intérieur d'une bobine.
- Ce déplacement entraîne une variation de l'inductance de la bobine.



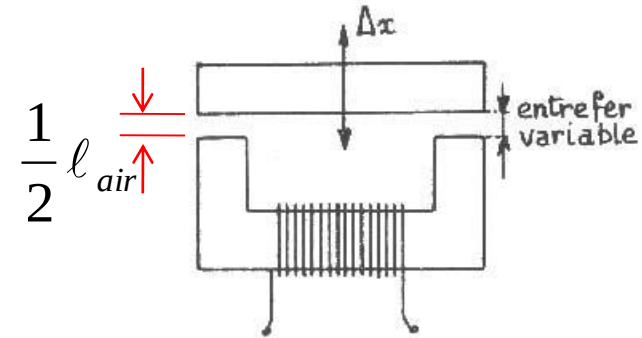
4.5. Circuit magnétique à entrefer variable

4.5.1. Principe:

- Consiste à mesurer le coefficient d'autoinduction dans un circuit magnétique.
- Lorsque le noyau bobiné se déplace à proximité d'un matériau ferromagnétique, le champ magnétique engendré varie, modifiant ainsi le coefficient d'auto induction dans la bobine.

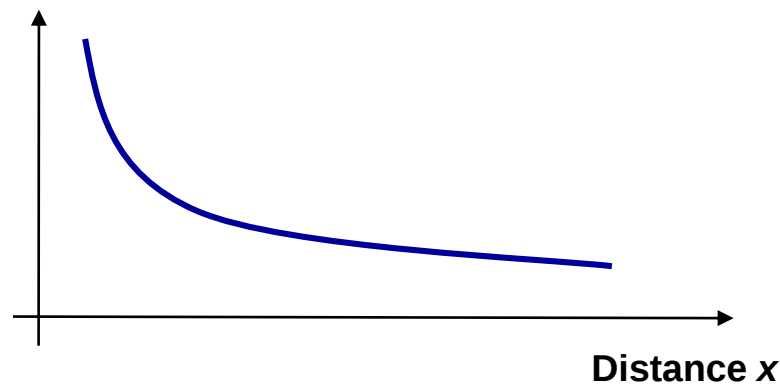


$$L \approx \frac{\mu_0 N^2 S}{\ell_{air}}$$



- Cette relation montre que l'inductance L dépend de l'entrefer, on peut donc en déduire le déplacement d'un objet physiquement relié à la partie mobile du noyau ferromagnétique.

Grandeur de sortie



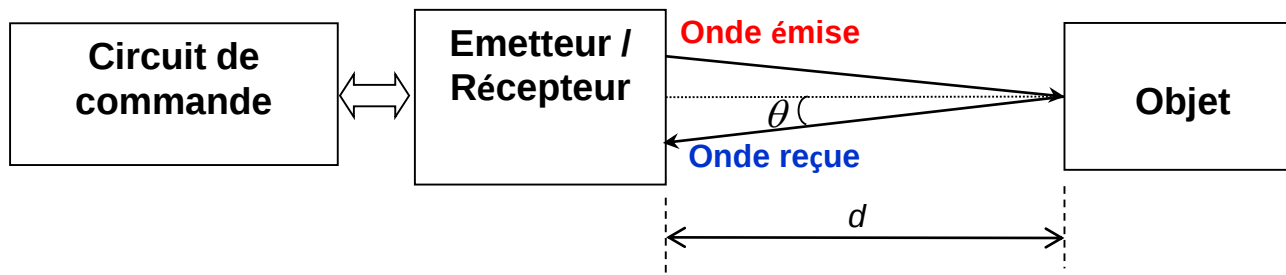
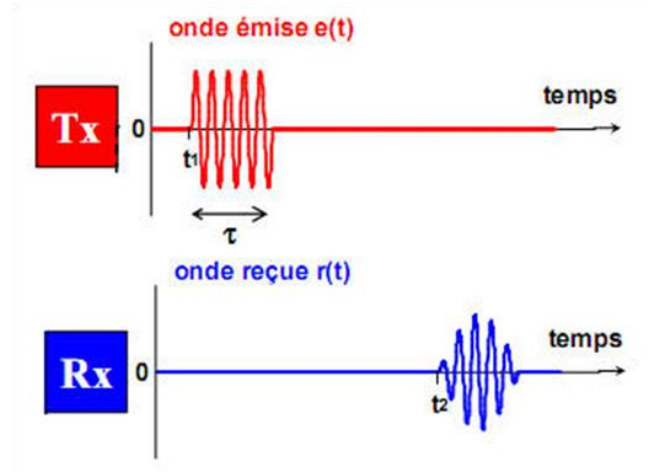
4.5.2. Caractéristiques:

- L'étendue de mesure d'un tel système est de l'ordre du *mm* La précision peut être de l'ordre du *μm*.
- Avantages:
 - mesure sans contact,
 - Simple,
- Inconvénients:
 - non linéaire, sauf en petite variation,

5. Le capteur à ondes acoustiques:

5.1. Principe:

- En mesure continue, on utilise un transducteur fonctionnant successivement en émetteur et en récepteur d'une onde acoustique



- La distance séparant le capteur de l'objet se détermine comme suit :

$$d = \frac{v \times \Delta t \times \cos \theta}{2}$$

$\Delta t = t_2 - t_1$: intervalle du temps séparant l'émission de la réception du train d'ondes réfléchi.

v : vitesse de l'onde acoustique dans le milieu

Matériaux	Célérité du son (en m.s ⁻¹)
Air	343
Eau	1 480
Glace	3 200
Verre	5 300
Acier	5 600 à 5 900
Sable sec	10 à 300

5.2. Caractéristiques:

● Avantages :

- ne dépend pas du matériau en déplacement
- Etendue de mesure (E.M) jusqu'à **une dizaine de m**

● Inconvénients :

- E.M à partir **du cm**
- dépend de l'angle de réflexion et de l'amplitude de l'écho

5.3. Exemple:

Capteur à ultrason microsonic mic+35/D/TC



Portée min.	65 mm
Portée limite	600 mm
Mode de fonctionnement	Détecteur de proximité/réflexion
Fréquence ultrasonique	400 kHz
Tension d'alimentation min.	9 V
Type de tension	DC
Courant de sortie max.	200 mA
Application	Automatisation industrielle

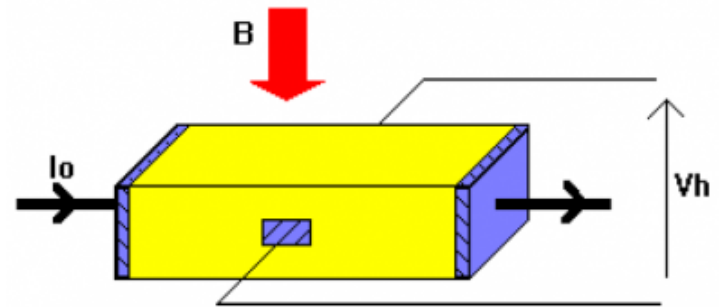
Remarque: Le radar a un fonctionnement similaire sauf qu'il utilise des ondes électromagnétiques ($C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

7. Capteur à effet Hall:

7.1. Rappel physique

- Lorsqu'un matériau semi-conducteur est parcouru par un courant I_0 et soumis **normalement aux grandes faces** à un champ d'induction magnétique B , on constate, entre les deux faces parallèles à la direction du courant, l'existence **d'une tension** appelée tension de Hall (V_h).

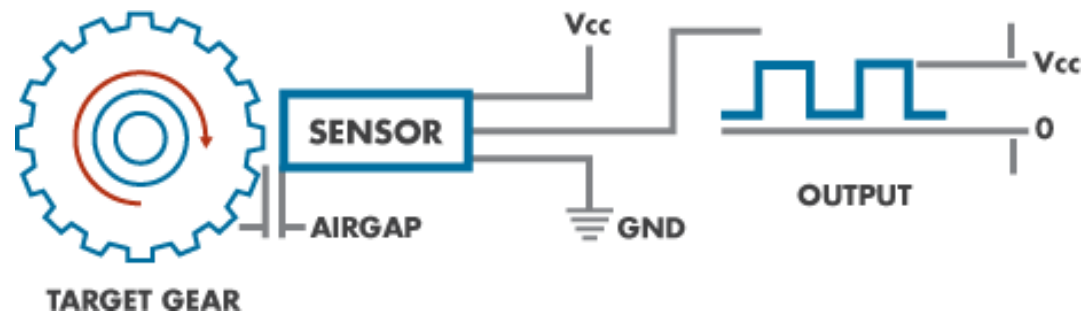
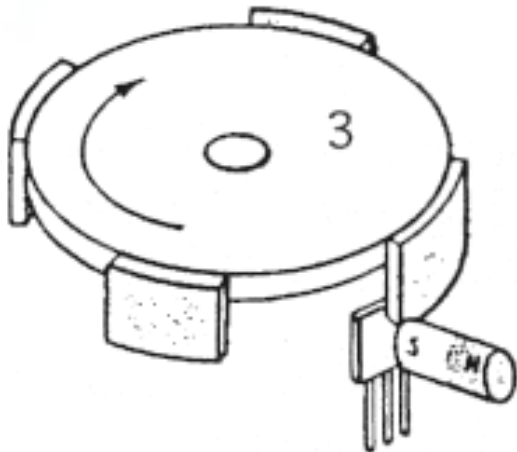
$$V_h = K_h \times B \times I_0$$



avec K_h : constante de Hall, qui dépend du matériau utilisé.

7.2. Exemple de mesure

- Le codeur utilise un disque magnétique multipolaire tournant en face d'un capteur à effet hall.
- Une dent (pôle Nord) en face du capteur génère une tension à la sortie du capteur tandis que un creux (pôle Sud) génère une tension nulle.
- La **résolution** dépend du nombre de pôles (dents) du disque en rotation.



Une dent= pôle nord « 1 »

Un creux= pôle sud « 0 »

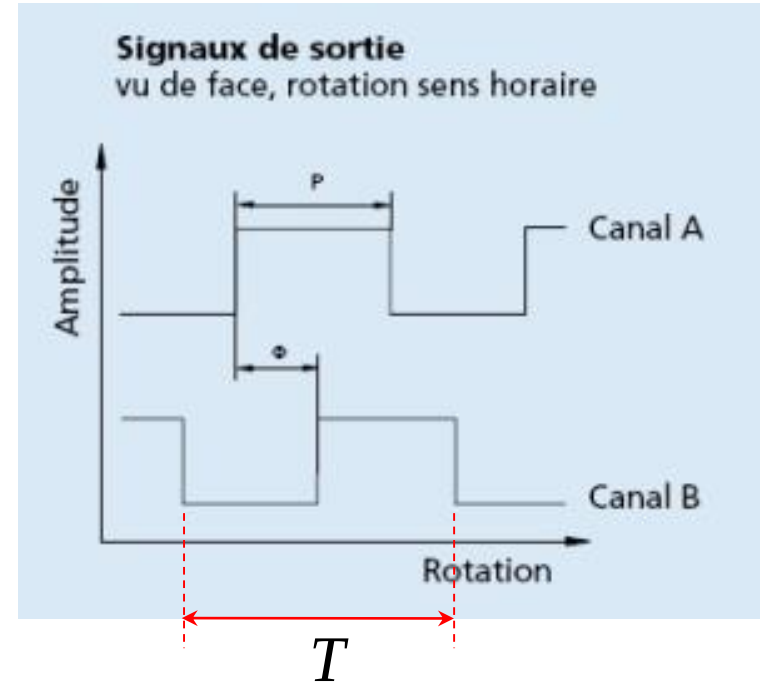
- En mesurant le **nombre d'impulsions** du signal A ou B on peut connaître la **position** et la **vitesse**.

$$Pas = \frac{2\pi}{n_d}$$

$$\theta = N_i \times Pas$$

$$\Omega = \frac{Pas}{T}$$

n_d : nombre de pôles (dents)
 N_i : nombre d'impulsions générées
 T : Période du signal A ou B
 θ : position en *rad*
 Ω : vitesse de rotation en *rad/s*



7.3. Exemples:

Capteurs 91xxx series



AB Elektronik

<http://www.abelektronik.com/>

Alimentation: 5 V/5 mA maximum par signal
Température ambiante : -40 °C au °C +120 (+130 °C/1h)
Chaîne d'angle : 30° à 360°
Rendement (gamme de tension) : 0.5 V - 4.5 V
Temps de la vie : >10 millions de. cycles

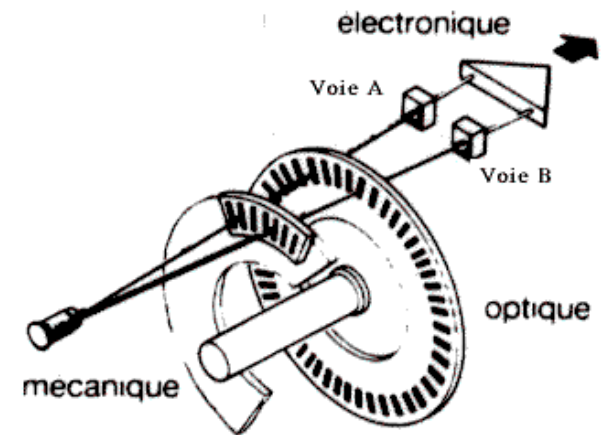
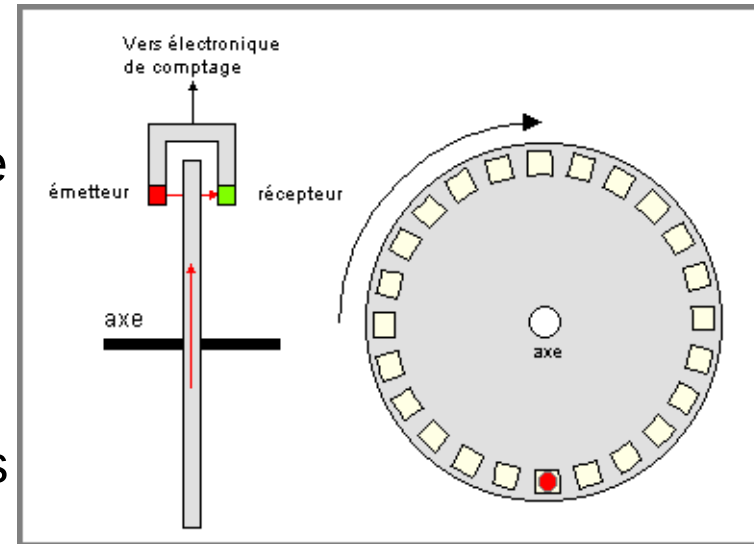
Capteurs des séries **ENA22 & ENS28** de
MEGATRON <http://www.megatron.fr>



9. Le Codeurs incrémental:

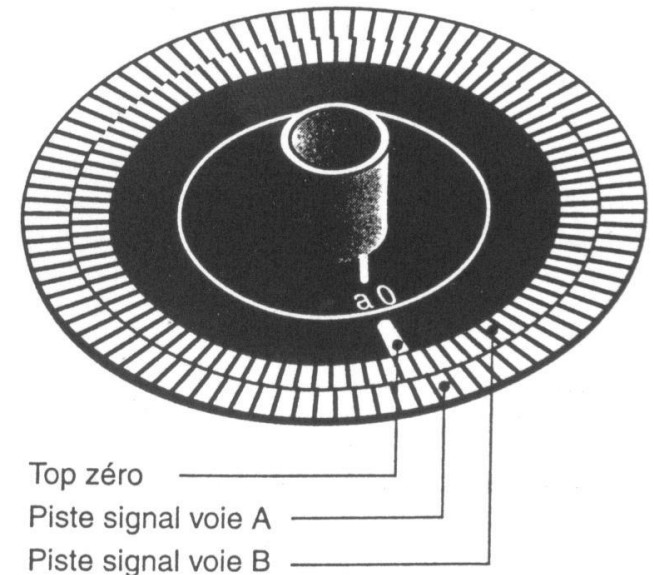
9.1. Principe de fonctionnement:

- Le codeur incrémental utilise une source de lumière fixe et un disque rotatif et un récepteur de lumière
- Le disque est divisée en « **n** » intervalles d'angles égaux opaques et transparents.
- Le **comptage/décomptage** des impulsions par l'unité de traitement permet de **définir la position** du mobile.



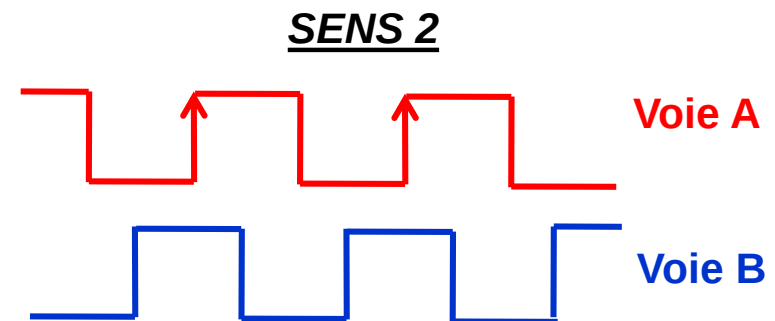
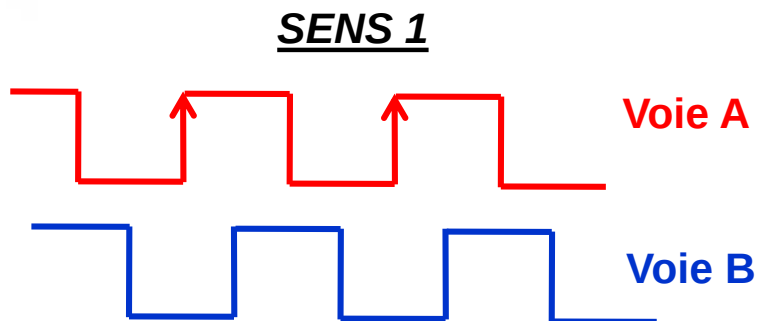
- Parfois on trouve des codeurs dont les disques contiennent deux pistes dont les intervalles sont décalés. Une troisième piste avec un seul trou est utilisée pour indiquer la référence (top zéro) et permet la réinitialisation du comptage à chaque tour
- Derrière les pistes sont installées deux **photodiodes décalées** qui délivrent des **signaux carrés** A et B en quadrature.

Disque d'un codeur

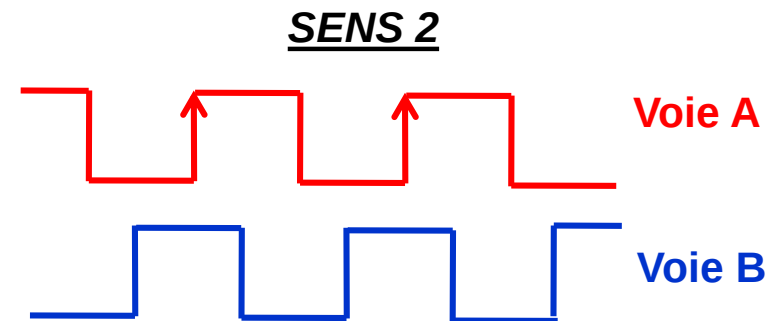
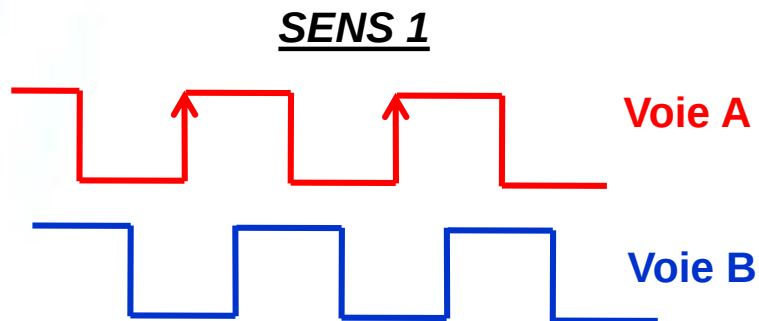


9.3. Sens de rotation:

- Le déphasage des signaux A et B permet de déterminer le sens de rotation:
 - Dans un sens pendant le front montant du signal A, le signal B est à 0.
 - Dans l'autre sens pendant le front montant du signal A, le signal B est à 1.



- Le déphasage de 90° électriques des signaux A et B permet de déterminer le sens de rotation:
 - Sens1: signal A en avance sur le signal B.
 - Sens2: signal B en avance sur le signal A.



- Avantages:
 - Pas de contact, pas d'usure
 - Coût réduit

9.5. Principales caractéristiques:

- Nombre de points,
- Vitesse de rotation maximale (en tr/mn),
- Nombre de voies (A, B, Z, ...)
- Fréquence maximale en Hz des signaux,
- Alimentation, ...



Characteristics

Residual ripple	0...500 mV
Maximum revolution speed	9000 rpm
Shaft moment of inertia	0 lb.in ² (10 g.cm ²)
Torque value	0.04 lbf.in (0.004 N.m)
Maximum load	5 daN axial 10 daN radial
Output frequency	300 kHz
Number of channels	3

Exemple:

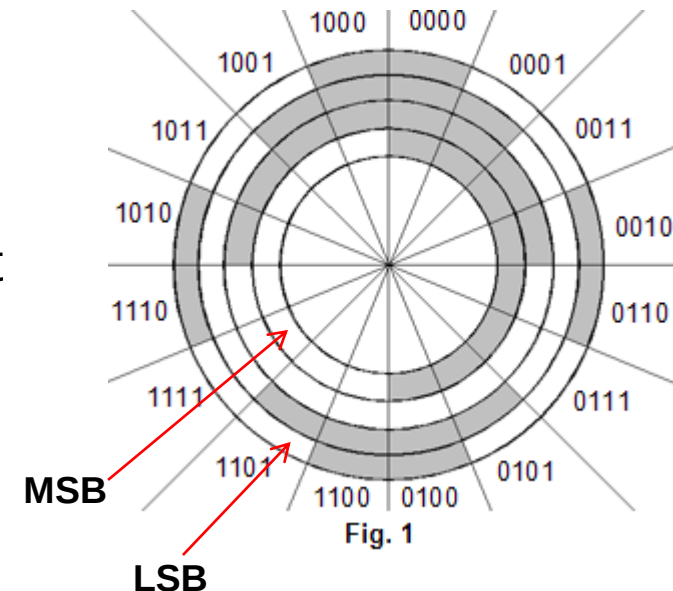
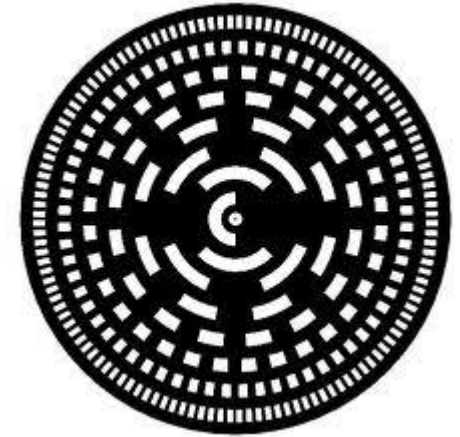
XCC1510PS50Y



10. Le codeur absolu:

10.1. Principe :

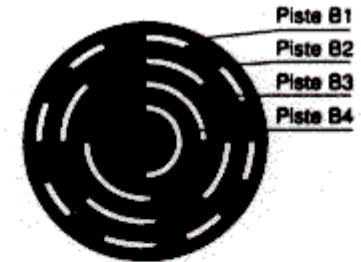
- Le disque de ce type de codeur comporte un nombre « N » de pistes.
- Chaque type a son propre système de lecture (diode LED et photodiode).
- La première piste en partant du centre du disque est composée d'une moitié opaque et d'une moitié transparente.
- C'est la piste MSB « Most Significant Bit ».



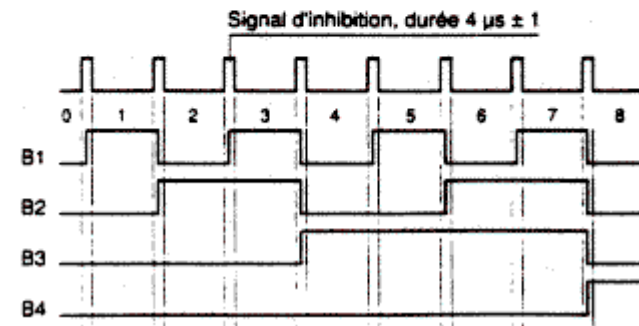
- la dernière piste, la plus extérieure, est la piste LSB « **Least Significant Bit** » = bit de poids le plus faible.
- C'est elle qui donne la **précision** finale du codeur appelée résolution.
 - Si on appelle N le nombre de pistes, cette dernière piste comportera 2^N points.
 - La résolution est alors de 2^N points par tour.
 - Le code binaire délivré par le codeur est N bits.

10.2. Code généré :

- Le code binaire délivré par un codeur absolu peut être soit du binaire naturel (binaire pur), soit du binaire réfléchi (**code Gray**).
- Le code binaire naturel a l'avantage de pouvoir être directement **utilisé par l'unité de traitement**.
- Il présente cependant l'inconvénient d'avoir plusieurs bits qui changent d'état entre deux positions.
- Ces changements d'états peuvent **générer des erreurs**.



Disque binaire pur



10.5. Comparaison des deux codeurs:

	Codeur incrémental	Codeur absolu
Avantages	• de conception simple (son disque ne comporte que deux pistes • moins onéreux	• l'information de position est disponible dès la mise sous tension.
inconvénients	• Sensible aux coupures du réseau: chaque coupure du courant peut faire perdre la position réelle du mobile à l'unité de traitement. Il faudra alors procéder à la réinitialisation du système automatisé.	• De conception électrique et mécanique plus complexe, • Son coût est plus élevé qu'un codeur incrémental.