

Capteurs et détecteurs

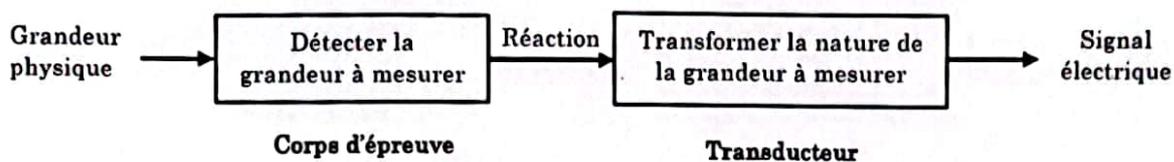
I. Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

II. Structure et fonctions principales d'un capteur

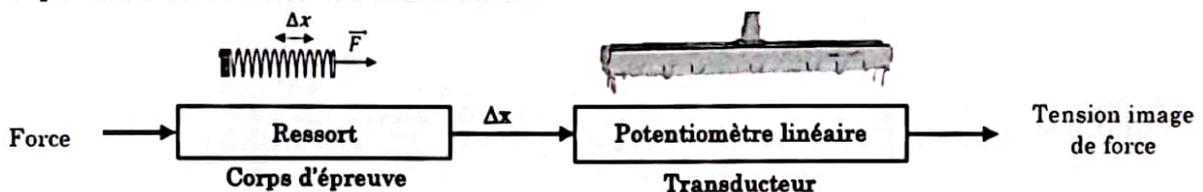
Un capteur peut être défini comme un transducteur convertissant une grandeur physique en un signal électrique. Cette transformation peut être directe ou fait appel à plusieurs conversions physiques avant d'arriver au signal de sortie.

La structure d'un capteur est généralement la suivante ;



- **Corps d'épreuve** : C'est un élément mécanique qui réagit à la grandeur physique à mesurer. Il transforme la grandeur mesurée en une autre grandeur physique dite mesurable.
- **Transducteur** : un élément en interaction avec le corps d'épreuve permettant de traduire ses réactions en un autre phénomène physique (au final on obtient en général un signal électrique).

Exemple : Mesure d'une force à l'aide d'un ressort



III. Grandeurs physiques dans la chaîne d'acquisition

Différentes grandeurs physiques interviennent entre les fonctions de la chaîne d'acquisition. Afin d'identifier les performances des systèmes d'acquisition il est nécessaire de caractériser les signaux d'entrée et de sortie de ces différentes parties.

1. Grandeur physique à mesurer

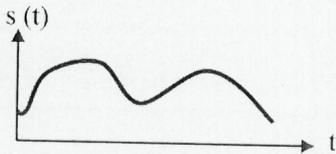
- **Cinématique** : position, vitesse, accélération, angle
- **Effort** : force, pression, couple
- **Fluide** : pression, débit,
- **Thermique** : température...

2. Grandeur physique sortant du corps d'épreuve

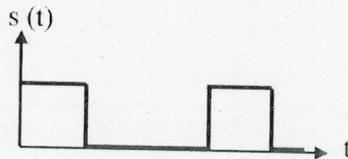
- Variation de résistance,
- Variation de longueur,
- Tension électrique.

3. Grandeur physique du signal de sortie

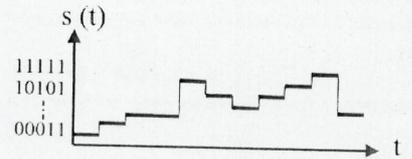
- **Analogique** : le signal délivré varie de façon continue au cours du temps
- **Logique (détecteur tout ou rien ou utilisation d'un seuil)** : le signal de sortie prend que niveau haut ou bas
- **Numérique** : le signal de sortie est numérique (la grandeur évolue de façon discontinue par escaliers)



capteur analogique



capteur logique



capteur numérique

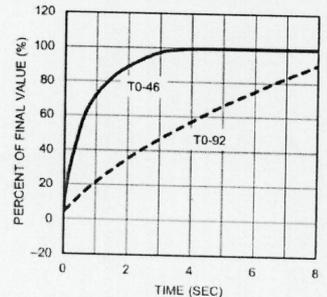
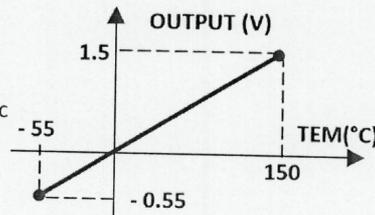
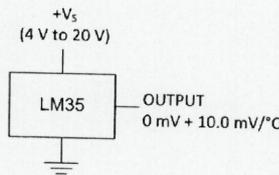
IV. Caractéristiques d'un capteur

On choisit un système d'acquisition en fonction d'un cahier des charges qui correspond au phénomène que l'on observe par la mesure de grandeur physique. Les caractéristiques métrologiques disponibles dans les documents constructeurs font généralement référence à des étalonnages réalisés en laboratoire

Pour comprendre bien ses caractéristiques, on doit se baser sur la documentation technique du capteur de température LM35

1 Features

- Calibrated Directly in Celsius (Centigrade)
- Linear + 10-mV/°C Scale Factor
- 0.5°C Ensured Accuracy (at 25°C)
- Rated for Full -55°C to 150°C Range
- Suitable for Remote Applications
- Low-Cost Due to Wafer-Level Trimming
- Operates From 4 V to 30 V



1. Temps de réponse Tr

Le temps de réponse t_r est défini comme la durée minimale d'attente après l'application d'un échelon à l'entrée, pour que l'écart relatif de la sortie par rapport à sa valeur finale.

Question 1 : déterminer le temps de réponse à 5 % du capteur LM35 (T0-46) : $t_{r5\%} = t(95\% \times 100) \Rightarrow t_{r5\%} = 3s$

2. Etendue de mesure EM

C'est la plage de valeurs de la grandeur physique mesurée pour lesquelles le capteur répond aux spécifications du constructeur : $EM = m_{max} - m_{min}$

Question 2 : Calculer l'étendue de mesure du capteur LM35: plage de fonctionnement : $-55 \leq T \leq 150^\circ C$

3. Sensibilité s

La sensibilité s d'un système d'acquisition, pour une valeur donnée de la grandeur physique mesurée, est égale au rapport de la variation du signal électrique sur la variation du signal physique : $S(m) = \frac{ds}{dm} = \left(\frac{\Delta s}{\Delta s} \right)_m$

Remarque : la sensibilité d'un capteur linéaire est constante

Question 3 : Calculer la sensibilité du capteur LM35 et en déduire la valeur de la tension fournie par le capteur à la température 25°C : D'après les caractéristiques output = f(TEM) $\Rightarrow s = \frac{\Delta output}{\Delta TEM}$

$s = \frac{1.5}{150} \Rightarrow s = 10 \text{ mV}/^\circ C$ or $output = s \cdot TEM \Rightarrow TEM = 25^\circ C \Rightarrow output = 0.25 \text{ V}$

4. Résolution R

La résolution est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication délivrée par le système d'acquisition : $R = \frac{EM}{\text{Nombre de point}}$

Question 4 : la tension fournie par le capteur LM35 est convertie par convertisseur A/N, la valeur convertie est présentée sur $n = 10$ bits. Calculer la résolution de la chaîne d'acquisition (capteur + CAN) :

TEM \rightarrow Capteur LM35 \rightarrow CAN \rightarrow TEM(N)

$R = \frac{EM}{2^n - 1} \Rightarrow R = \frac{205}{1023}$

donc : $R = 0.2^\circ C$

5. Précision de la mesure

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure M proche de la valeur vraie m de la grandeur mesurée.

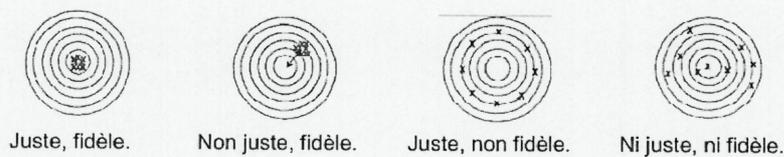
- L'incertitude de mesure. δM est telle que : $m = M \pm \delta M$
- L'erreur relative de précision est : $\epsilon_r = \frac{\delta M}{EM}$

Question 4 : nous avons installé le capteur LM35 à OUJDA. Pour une température ambiante 28°C , le capteur mesure la température 27.75°C . Calculer l'incertitude de mesure δT et déduire l'erreur relative de précision ϵ_r .

$$\delta T = |m - M| \Rightarrow \epsilon_r = 0.25\% \Rightarrow \epsilon_r = \frac{\delta M}{EM} \times 100 \Rightarrow \epsilon_r = 0.12\%$$

6. Justesse de la mesure et fidélité :

- Un capteur est juste si ses valeurs ne changent pas quand on les compare à des valeurs étalon, ou à des valeurs données par d'autres capteurs normalisés.
- Un capteur est fidèle si ses valeurs ne changent pas au cours du temps (mesures reproductibles)



V. Technologie des capteurs

1. Les capteurs actifs

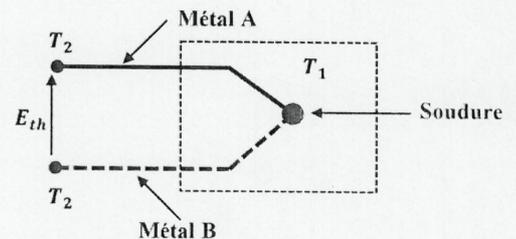
Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre.

1.1. Effet thermique

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 , est le siège d'une force électromotrice (tension) d'origine thermique.

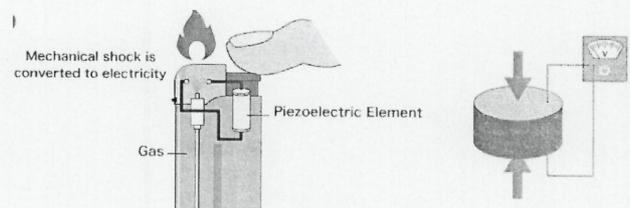
$$E_{th} = S_{AB} (T_1 - T_2)$$

- S_{AB} : le coefficient de Seebeck ($\text{V}/^\circ\text{C}$)
- La fém. E est de l'ordre de quelques dizaines de mV



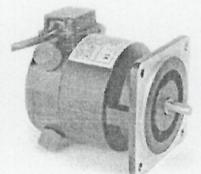
1.2. Effet piézoélectrique

L'application d'une contrainte mécanique sur certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne par déformation du cristal l'apparition d'une tension aux bornes du quartz.



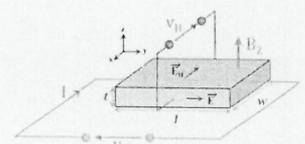
1.3. Effet d'induction électromagnétique

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique ou de la vitesse d'une génératrice à courant continu : tachymètre).



1.4. Effet Hall

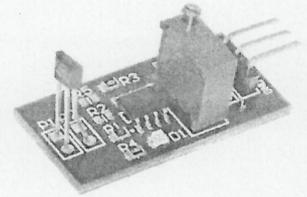
Un courant électrique I_0 traversant une plaque métallique baignant dans un champ magnétique B , engendre une tension V_H perpendiculaire à B : $V_H = k \cdot B \cdot I$



Ce principe est notamment utilisé pour la mesure du courant électrique dans un circuit à partir du flux magnétique qu'il génère dans une boucle conductrice.

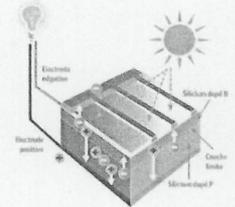
Exemple : module Arduino « Capteur à effet hall CH3144 »

Module basé sur le capteur à effet hall A3144 et un amplificateur LM393 permettant de capter un champ magnétique. La sensibilité est réglable via un potentiomètre



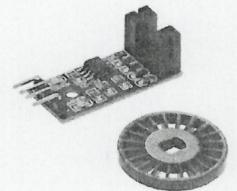
1.5. Effet photo-électrique

La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique

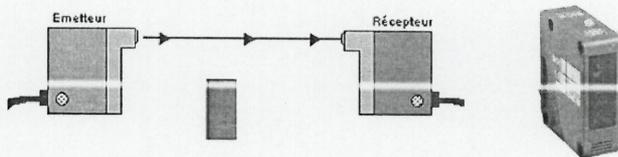


Exemple 1: Capteur de vitesse Arduino (coupleur)

Module capteur de vitesse basé sur un LM393, un capteur optique à fourche et un disque perforé.



Exemple 2 : Détecteur photoélectrique

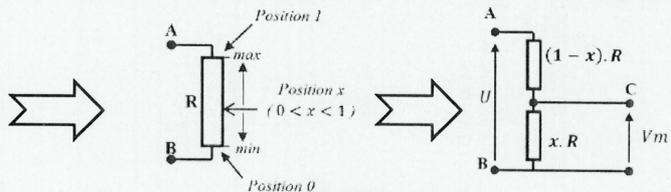
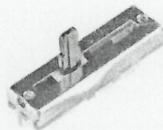
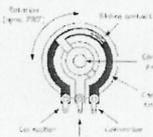


2. Les capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédance (Résistance, capacité ou inductance) qui varie en fonction de la grandeur à mesurer.

2.1. Déplacement d'un curseur

Principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteurs de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.



Potentiomètre rotatif

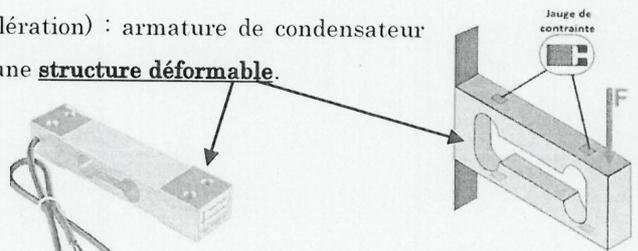
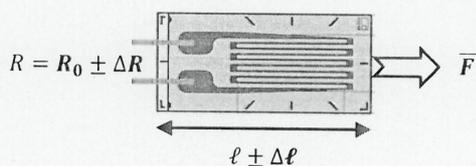
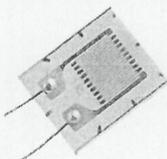
Potentiomètre linéaire

Modèle électrique

La relation entre V_m et le déplacement x est : $V_m = \frac{xR \cdot U}{R} \Rightarrow V_m = x \cdot U$

2.2. Déformation

Résultant de force ou de grandeur s'y ramenant (pression, accélération) : armature de condensateur soumise à une différence de pression, **jauge d'extensomètre** liée à une **structure déformable**.



Lors de l'allongement des longueurs l du fil, la section des conducteurs diminue ce qui augmente la résistance du fil ($R = \rho \frac{l}{s}$). Cette variation est très faible et sera amplifiée : $\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \frac{\Delta l}{l}$

- R_0 : la résistance de la jauge au repos
- K : le facteur de jauge

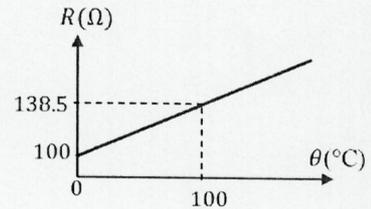
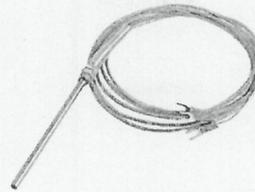
2.3. Effet thermique

La température et ses dérivés font varier la valeur de la résistance fabriquée par certains matériaux semi-conducteurs sensibles à l'effet thermique.

a. Capteur Pt100

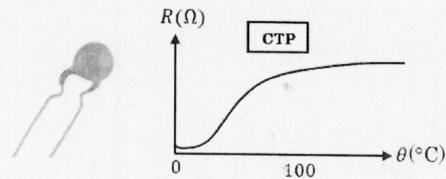
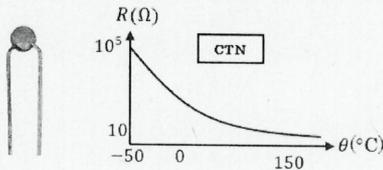
La sonde Pt 100 est un capteur de température qui est utilisé dans le domaine industriel est constitué d'une résistance en Platine : $R\theta = R_0 \cdot (1 + \alpha\theta)$ avec $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

À $T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ $R\theta = R_0 = 100\Omega$ d'où le nom PT100 (il existe des PT25, PT1000...)



b. Thermistance CPT-CTN

Elles utilisent des matériaux semi-conducteurs dont le coefficient de température est positif (CTP) ou négatif (CTN), c'est à dire que leur résistance augmente ou diminue lorsque la température augmente.

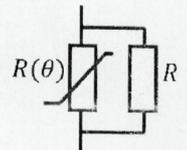


Formule CTN :

$$R = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T+273.75} + \frac{1}{25+273.75} \right)}$$

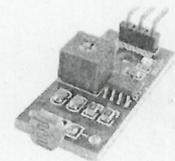
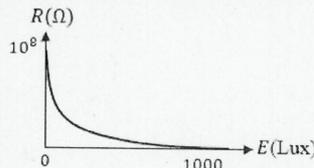
- R_0 : valeur de référence donnée par le constructeur (à 25°C)
- T : température en $^\circ\text{C}$
- Rappelons que : $T(^\circ\text{C}) = t(\text{K}) - 273,15$.

Remarque : La caractéristique de ces capteurs n'est pas linéaire, donc on le monte en parallèle avec une résistance R pour rendre la caractéristique linéaire dans une plage réduite de température.



2.4. Photorésistance

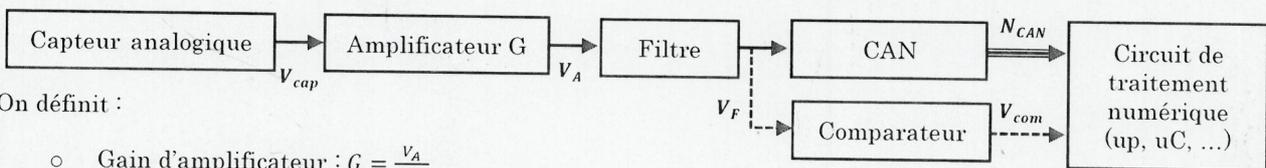
Une photorésistance est une résistance R dont la valeur varie en fonction du flux lumineux E reçu.



On utilisera de préférence une partie sensiblement linéaire de la caractéristique.

3. Conditionnement du signal

Le conditionneur de signal est un circuit électrique qui réalise l'opération d'amplification, de filtrage et de comparaison ou de conversion analogique numérique afin d'adapter le signal capté aux processeurs de traitement numériques.



On définit :

- Gain d'amplificateur : $G = \frac{V_A}{V_{cap}}$
- Gain du filtre dans la bande passante : $A = \frac{V_F}{V_A}$

Le cahier des charges demande parfois de vérifier l'erreur de mesure commise par le convertisseur analogique numérique CAN, cette erreur peut être calculée par la relation suivante : $\epsilon_m = \frac{\epsilon_{CAN}}{s.G.A}$ avec s est la sensibilité du capteur analogique.

Exemple : calculer l'erreur de mesure en ($^\circ\text{C}$) du capteur LM35. On donne : $\epsilon_{CAN} = \pm \frac{V_{ref}}{2^{n+1}}$, $V_{ref} = 5\text{V}$, $n = 10$ bits, $A = 1$, $G = 10$.

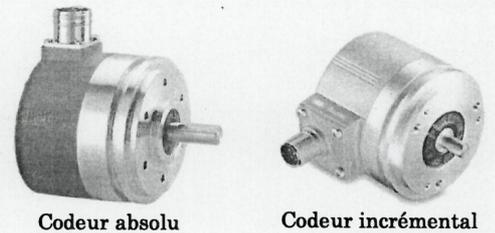
Le cahier de charges impose une erreur sur la mesure de température à ne pas dépasser $\pm 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$.

On a : $\epsilon_m = \frac{\pm V_{ref}}{s.G.A.2^{n+1}} \Rightarrow \epsilon_m = \pm 0.024 \text{ } ^\circ\text{C} < \pm 0.05 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow$ *caractéristiques des charge respectées*

VI. Les codeurs optiques

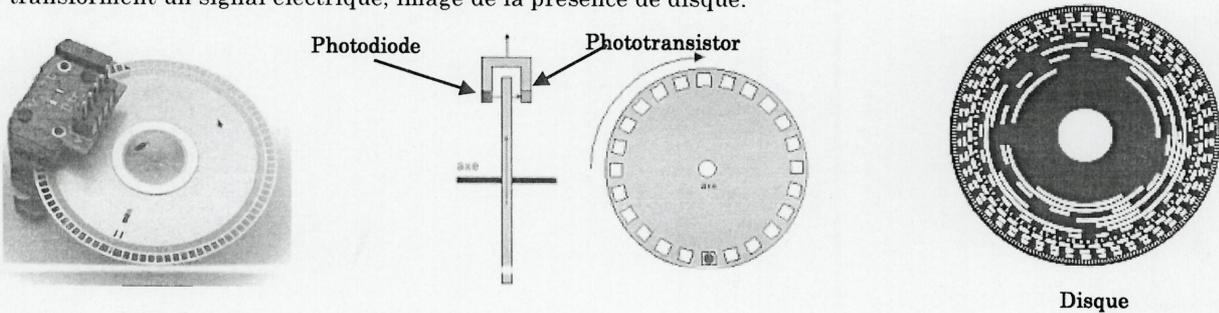
1. Présentation

Un codeur optique, également appelé codeur d'arbre, est un dispositif qui mesure la position angulaire, le déplacement ou la vitesse des outils ou des produits. Il fournit un bus d'impulsion ou un mot binaire sur N bits qui représente l'image de la mesure. Il existe deux grandes catégories de codeur optique : **absolu** et **incrémental** (relatif).

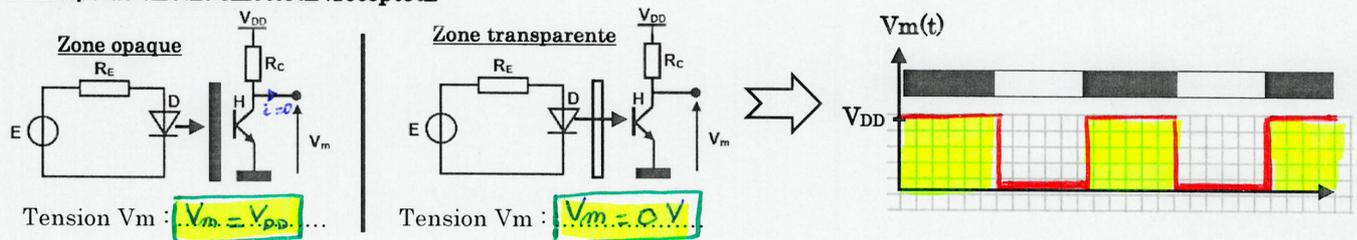


2. La technologie des codeurs optiques

Un codeur optique est constitué d'un disque comportant des zones opaques et des zones transparentes, des photodiodes émettent une lumière qui peut traverser les zones transparentes et des phototransistors captent cette lumière et le transforment un signal électrique, image de la présence de disque.



Principe de circuit émetteur /récepteur :

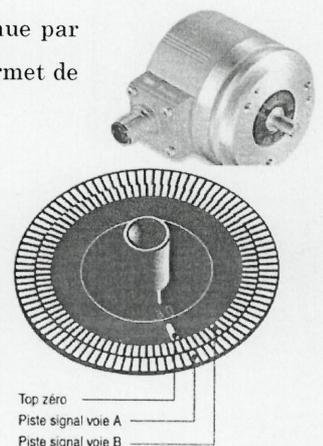


3. Codeur incrémental

Le codeur incrémental est consacré à des applications où l'information de position est obtenue par mesure du **déplacement de l'objet**. Le codeur délivre un train d'impulsions dont le nombre permet de déduire la valeur du **déplacement** ainsi que la **vitesse de rotation**.

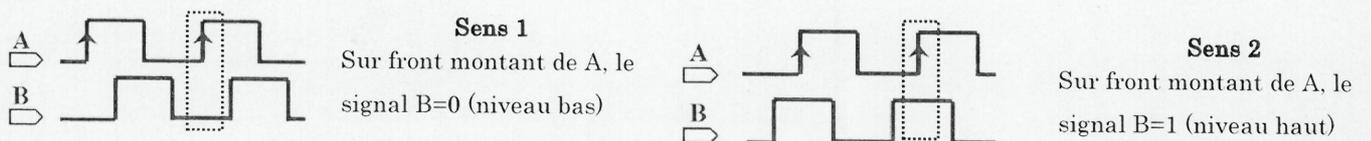
Le disque comporte au maximum 3 pistes :

- **Top zéro** : une seule fenêtre qui délivre qu'un signal par tour du disque. Il permet d'initialiser le compteur angulaire et de connaître une position d'origine.
- **Deux pistes A et B** : ils sont nécessaires pour déterminer le sens de rotation et ainsi permet de calculer la vitesse de rotation à travers la fréquence *du signal fournit*



3.1. Détection de sens de rotation

Les signaux A et B sont décalés l'un par rapport à l'autre par un angle de 90°, pour le but de détecter le sens de rotation en utilisant la méthode suivante :



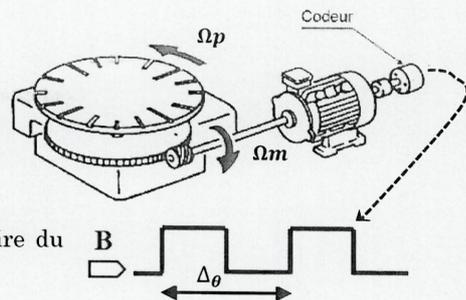
3.2. Calcul la résolution du codeur optique

Sans tenir compte des jeux et imprécisions mécaniques, le nombre de points est calculé à l'aide des formules :

❖ Mouvement circulaire

$$R = \frac{360^\circ}{\Delta_\theta (^\circ)} \cdot K$$

- **R** : résolution ou nombre de point par tour du codeur.
- **K** : rapport de réduction entre l'engrenage du mouvement entraînant le codeur et le dernier engrenage entraînant le mobile ($K = \frac{\Omega_p}{\Omega_m}$)
- Δ_θ : la **précision** demandée en degré, il correspond à la rotation angulaire du plateau pour **une impulsion délivrée** par le codeur.



Exemple :

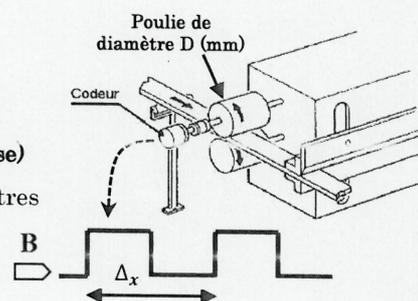
Le plateau circulaire fait **1 tour** lorsque le codeur directement monté sur l'axe du moteur fait 100 tours. La précision demandée est de 0.01°.

Le rapport de réduction K : $K = \frac{1}{100}$, donc la résolution R : $R = \frac{360}{0,01} \times \frac{1}{100} \Rightarrow R = 360 \text{ P/tour}$

❖ Mouvement de translation

$$R = \frac{1}{\Delta_x (mm)} \cdot K \cdot P$$

- **P** : Conversion du mouvement de rotation en mouvement de translation en mm/tour. Si D est le diamètre de la poulie ($P = \pi \cdot D$) ou si il s'agit d'un vis à bille ($P = \text{pas de vise}$)
- Δ_x : la précision demandée en millimètres, il correspond au déplacement en millimètres du plateau (par exemple) pour une impulsion délivrée par le codeur.



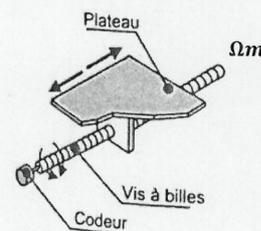
Exemple :

Un plateau en translation se déplace à droite et à gauche, le cahier des charge demande de choisir un codeur optique qui réponde au critère suivante :

Précision : 0.01 mm, pas de vise 20 mm et longueur 1m

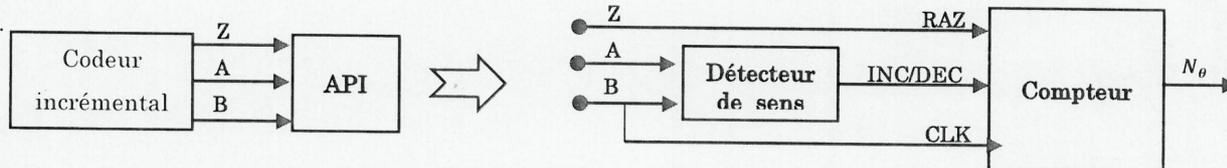
Calculer la résolution du capteur à installer ? $P = 20 \text{ mm}, K = 1, \Delta_x = 0.01 \text{ mm}$

$$R = \frac{1}{\Delta_x} \cdot K \cdot P \Rightarrow R = 2000 \text{ point / tour}$$



3.3. Mesure de la position angulaire par un codeur incrémental

Le codeur incrémental est utilisé pour mesurer la position angulaire, cette opération nécessite un module des compteurs installés dans une API (par exemple) pour compter le nombre des impulsions image de la position N_θ .



La relation liée entre la position θ à N_θ est : $\theta = \frac{360^\circ}{R} N_\theta$ avec R est la résolution en point par tour. Le modulo du compteur est choisi toujours égal à la résolution R.

Exemple : Un codeur incrémental de résolution $R=2000$ pt/tours est utilisée pour mesurée la position d'une table ronde.

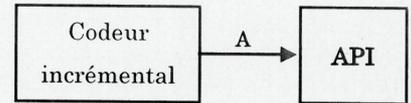
Déterminer :

- Etendu de mesure : $E_M = 360^\circ$
- La résolution de mesure en ($^\circ$) : $R_M = \frac{E_M}{R} \Rightarrow R_M = \frac{360}{2000} \Rightarrow R_M = 0,18^\circ$

- o Modulo du compteur : ... $Module = R = 2000 \text{ pt/tours}$
- o La valeur de la position θ lorsque le compteur compte la valeur $N_\theta = 540$: ... $\theta = R_M N_\theta \Rightarrow \theta = 97,2^\circ$

3.4. La mesure de vitesse par un codeur incrémental

Le codeur incrémental permet de mesurer la vitesse de rotation d'un moteur MCC par exemple. La fréquence l'un des deux signaux A et B permet de récupérer la vitesse de rotation en tour par minute : $F \text{ (hz)} = \frac{1}{60} \cdot R \cdot N$



F est la fréquence du signal A en Hz, R la résolution en point/tour et N la vitesse de rotation en tour/min.

Exemple des codeurs incrémentaux



Prix/UDV: 1
87,45 €

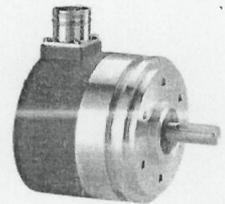
Spécifications techniques	
Alimentation:	10-30 V c.c., 5% ondulation résiduelle
Consommation:	30 mA
Rapport cyclique:	1 ±30%
Fréquence:	10 kHz max.
Vitesse de rotation:	6000 tr/mn max.
Temps de montée:	1 µs
Temps de descente:	1 µs
Charge:	40 mA max.
Diamètre axe:	7 mm
Poids:	130 g
Température d'utilisation:	-20°C à +60°C
Branchement connecteur circulaire 5 broches fourni	

code	nombre de voies	résolution
181-1508	1	20 impulsions/tour
181-1514	1	50 impulsions/tour
407-1129	1	100 impulsions/tour
407-1135	1	125 impulsions/tour
181-1520	2 (90°)	50 impulsions/tour
407-1157	2 (90°)	60 impulsions/tour

Si on choisit le codeur de référence 407-1129. La fréquence délivrée par le capteur est 1.25 kHz. Calculer la vitesse de rotation : ... $R = 100 \text{ pt/tour} \Rightarrow F = \frac{RN}{60} \Rightarrow N = \frac{60F}{R} \Rightarrow N = 750 \text{ tr/min}$

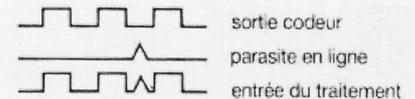
4. Codeur absolu

Le codeur numérique de position est destiné à des applications pour obtenir l'information de position sans passer par un traitement par une API. Un codeur absolu délivre en permanence un code qui est l'image de la position réelle du mobile à contrôler.



Ce concept a été développé pour pallier les contraintes générées par le codeur incrémental :

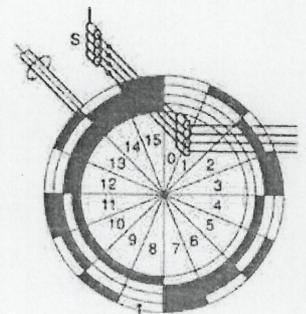
- △ Sensibilité aux coupures du réseau
- △ Sensibilité aux parasites en ligne
- △ Les fréquences des signaux A et B étant généralement élevées, le non-comptage d'une période par le système de traitement induit une erreur de positionnement.



4.1. Technologie de ce capteur

Le codeur absolu est constitué :

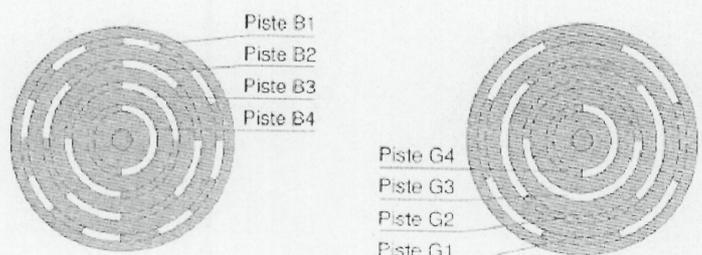
- o Le disque des codeurs absolus comporte un nombre « n » de pistes concentriques divisées en segments égaux alternativement opaques et transparents.
- o A chaque piste est associé un couple émetteur / récepteur optique. Chaque piste a donc son propre système de lecture.



4.2. Mode de codage

Le mot binaire de sorties du codeur est le même que le nombre de bits ou de pistes sur le disque. Elles sont désignées par b1...bn (binaire pur), ou g1...gn (Gray).

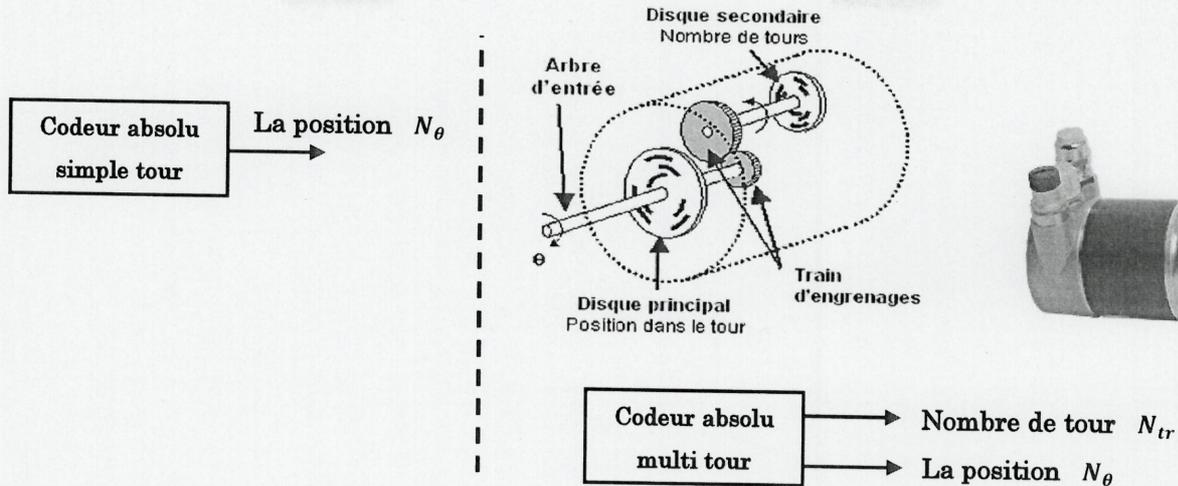
Suivant le mode de traitement (automates, commandes numériques, ordinateurs, cartes, ...), le choix se portera soit sur un code binaire pur, soit sur un code de Gray.



4.3. Famille des codeurs absolus

Il existe au marché deux gammes différents de codeur absolus sont :

- Le codeur absolu simple tour, décrit précédemment, donne une position absolue dans chaque tour.
- Le codeur absolu multi-tours, permet, grâce à l'ajout d'un système d'axes secondaires d'indiquer le nombre de tours.



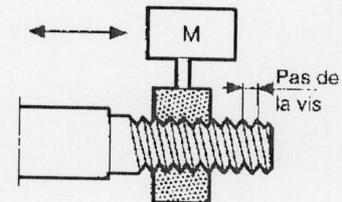
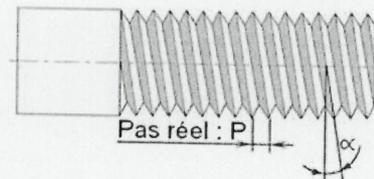
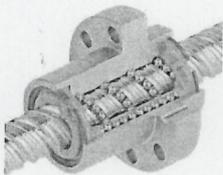
Exemple 2 : codeur XCC MG6G0604N Schneider Electric

- Codeur absolu multi tours
- Diamètre de disque optique : 65 mm
- Nombre de pistes : 10 pistes (10 bits)
- Nombre de position : $2^{10} = 1024$ positions



5. Relations essentielles : Transformation de mouvement

5.1. Système vis à belle



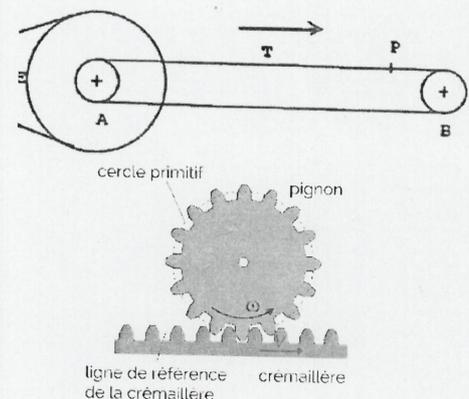
- La course X : $X = n \cdot p$ avec
- La vitesse linéaire : $V = p \cdot N$

- X : la course en (mm)
- n : nombre de tours
- p : le pas de la vise en (mm)
- V : la vitesse de translation linéaire en (mm/s)
- N : la fréquence de rotation en tr/min

5.2. Système pignon ou poulie (ou crémaillère)

- Avancement de crémaillère : $L = \frac{D}{2} \cdot \theta$
- La vitesse linéaire : $V = \frac{D}{2} \cdot \Omega$

- L : avancement en (mm)
- D : diamètre du pignon (mm)
- θ : arc en (rad)
- V : la vitesse de déplacement crémaillère en (mm/s)
- Ω : la vitesse angulaire en (rad/s)



Exercice d'application :

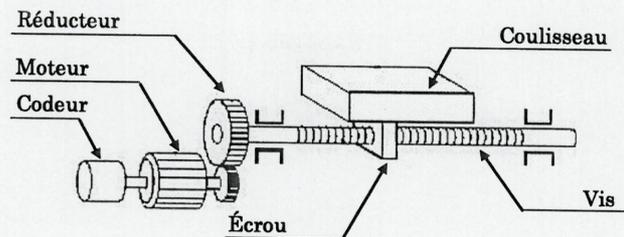
On étudie deux systèmes coulisseau et vis sans fin utilisés sur des machines semi-automatiques d'usinage.

A. Système avec un encodeur incrémental en bout d'arbre moteur.

Caractéristiques mécaniques :

Exigence	Valeur
Encodeur incrémental	
Vitesse maximal du coulisseau	0.1 m/s
Pas de vis	20 mm
Course de coulisseau	1m
Rapport de réduction K	0.5
Précision souhaitée	0.03 mm

schéma cinématique du système :



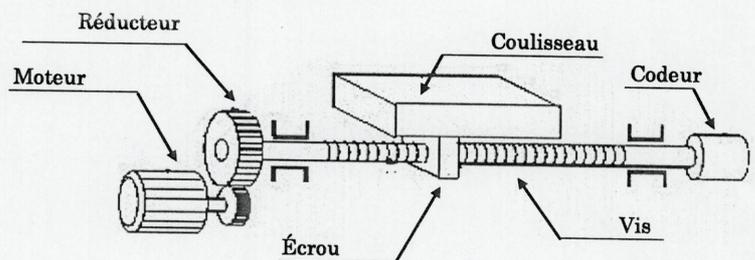
1. Calculer la vitesse de rotation maximale de la vis en tr/s
2. Calculer la vitesse de rotation maximale du moteur en tr/s.
3. Calculer le nombre de points par tour sur le disque de l'encodeur, nécessaire pour satisfaire le cahier des charges.
4. Quelle sera la fréquence maximale des impulsions en sortie de l'encodeur ?
5. Combien d'impulsions devra-t-on compter pour la course maximale du coulisseau ?
6. Sur combien de bits sera codé le mot image de la position du coulisseau ?
7. Expliquer comment peut-on arriver à connaître le sens de déplacement du coulisseau en analysant les informations fournies par l'encodeur.

B- Système avec un encodeur absolu en bout de vis sans fin

Caractéristiques électrique et mécaniques :

Exigence	Valeur
Encodeur absolu multi tour	
Vitesse maximal du coulisseau	0.05 m/s
Pas de vis	2 mm
Course de coulisseau	40 Cm
Rapport de réduction K	-
Précision souhaitée	0.01 mm

schéma cinématique du système :



1. Calculer la vitesse de rotation maximale de la vis en tr/s
2. Déterminer le nombre de code/tour nécessaire pour le codeur
3. Déterminer le tour nécessaire sur le codeur pour la course maximale du coulisseau
4. Combien faudra-t-il réserver d'entrées TOR pour coder la position dans le tour.
5. Combien faudra-t-il réserver d'entrées TOR pour coder le nombre de tour.