Chapitre 4. Mesure et contrôle des déplacements

4.1- Introduction

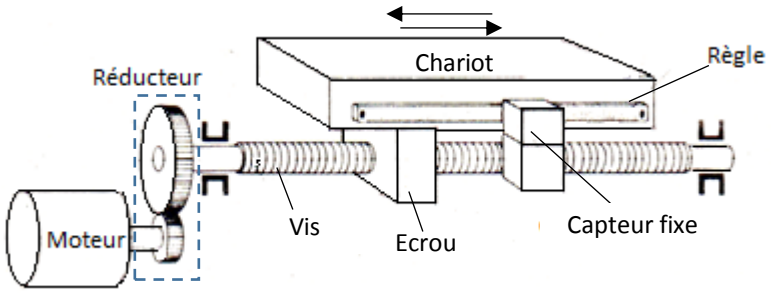
La mesure de position ou le contrôle des déplacements des organes mobiles, est fondamentale pour assurer l'asservissement d'un axe de MOCN. Sur les machines-outils classiques, les mesures de déplacements et le repérage des positions sont fournies par les verniers des manivelles et des règles graduées en faisant intervenir l'opérateur. Sur les machines-outils semi-automatique et automatiques, les contrôles des déplacements sont obtenus par le positionnement des contacts électriques, des cames et des butées. Sur les machines à commande numérique, sont employés des dispositifs spéciaux (capteurs de mesure). La précision des équipements de mesure influe directement sur la mise en position, donc sur la précision de la pièce usinée.

4.2- Système de mesure

La mesure peut être réalisée par un système de mesure directe ou indirecte

4.2.1- Mesure directe (figure 1a, b)

a) Mesure directe par capteur linéaire



b) Mesure directe par capteur rotatif

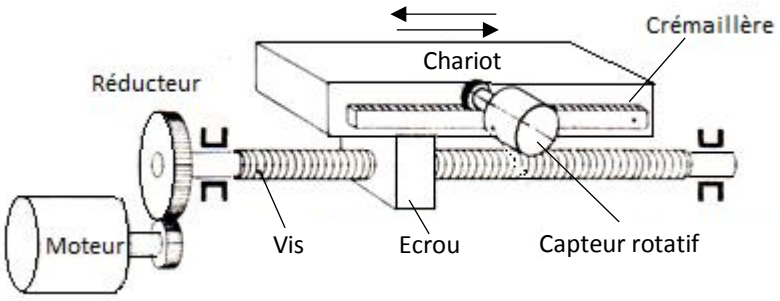


Figure 1. Système de mesure directe

Dans la figure (1a), la mesure de la position du chariot est réalisée au moyen d'un système linéaire fonctionnant par translation. Le système de mesure est indépendant du mode d'entrainement choisi. Par conséquent, la mesure est indépendante de la précision de la vis ainsi que des forces exercées sur l'écrou du chariot.

La disposition présentée dans la figure (1b), permet de mesurer directement le déplacement du chariot au moyen d'un capteur rotatif. La course longitudinale est convertie en un mouvement circulaire. Les efforts exercés sur l'arbre n'influent pas sur les résultats de la mesure. Ce système exige nécessairement l'emploi d'un pignon et d'une crémaillère de précision.

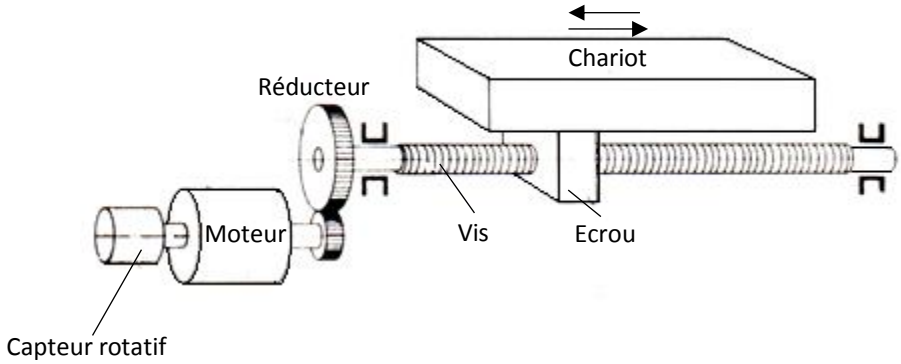
La mesure directe de la position de l'élément mobile par le capteur linéaire est la solution la plus appréciée (assure la précision) ; les seules erreurs sont celles du capteur lui-même. Cette solution est la plus coûteuse et elle est adoptée pour les machines de précision.

4.2.2- Mesure indirecte (figure 2a, b)

Les dispositions adoptées dans ce système de mesure montrent que la mesure est liée à la vis d'avance. Le parcours ou la position est mesurée indirectement par l'angle de rotation de la vis, ainsi tous les jeux, les contraintes d'action des forces, …….etc, sont compris dans la mesure. Ces arrangements offrent les avantages suivants :

- Le dispositif de mesure à fonctionnement rotatif est plus simple est moins coûteux que le système linéaire.
- Le rapport de transmission permet d'obtenir un facteur d'agrandissement, facilitant ainsi le palpage des petites unités de déplacement (ΔS).

a) Capteur installé sur le moteur d'entrainement



b) Capteur installé à l'extrémité de la vis d'entrainement

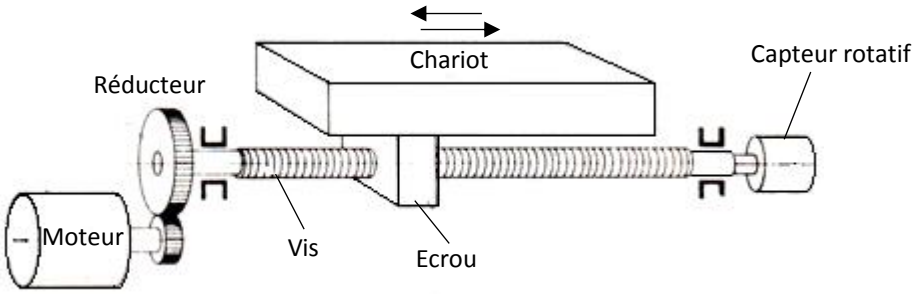


Figure 2. Système de mesure indirecte

La solution présentée dans la figure (2a) est moins précise car entre la position mesurée et la position réelle du chariot interviennent les erreurs suivantes :

- Le jeu dans les engrenages
- Le jeu entre la vis est l'écrou
- Les erreurs du pas de la vis

- Les erreurs dues à la dilatation de la vis
- Les erreurs provoquées par l'élasticité de la vis qui est soumise à la torsion et à la traction
- Les erreurs dans les engrenages (précision, erreurs cinématiques,…)
- Les erreurs provoquées par l'élasticité des engrenages

La solution présentée dans la figure (2b) est meilleure que la précédente, dans cette disposition interviennent les erreurs suivantes

- Le jeu et élasticité entre vis et écrou
- Les erreurs du pas de la vis
- La dilatation de la vis

4.3- Méthodes de mesures

Les méthodes employées pour la mesure de déplacements des organes mobiles de la MOCN, peuvent être analogique ou numérique.

4.3.1- Méthode analogique

La position ou les déplacements numériques sont représentées par des variables physiques (exemple : le déplacement linéaire du mobile est établi par une tension électrique (effet de potentiomètre)). La mesure est effectuée par un capteur de position analogique, c'est un capteur électromagnétique ou électrique dont les signaux de sortie varient de manière continu en fonction du déplacement du mobile. La mesure peut être opérée directement ou indirectement selon le système employé.
La mesure directe est réalisée par la règle inductosyn (voir figure 3).

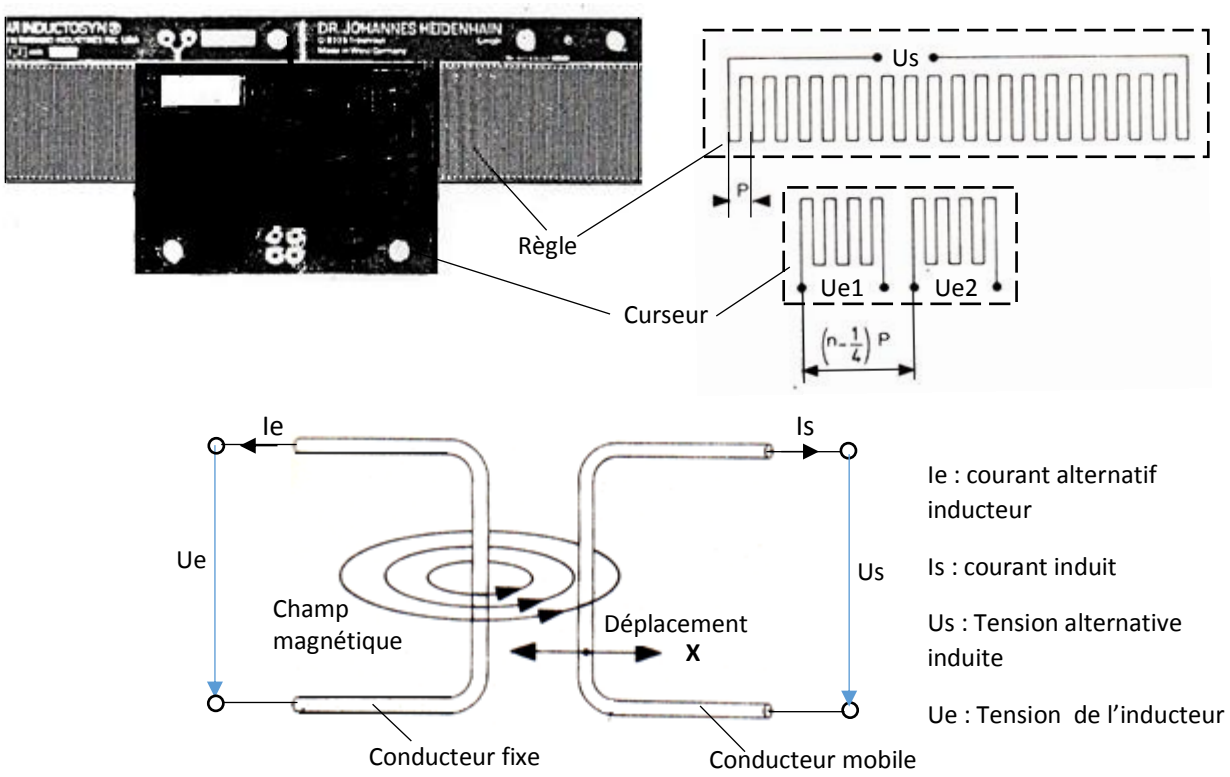


Figure 3. Mesure analogique directe par la règle Inductosyn

L'inductosyn linéaire est constituée de deux parties essentielles : la règle et le curseur. La règle comporte un support en acier isolé sur lequel est imprimé un circuit en cuivre par photogravure en forme de zigzag, de pas P=2mm. Le curseur comporte deux enroulements de même pas P=2mm, décalés d'un quart de pas. La règle et le curseur sont placés respectivement l'un sur la partie fixe et l'autre sur la partie mobile. Les enroulements sont exposés en face avec un entrefer de 0.2 mm environ. Les circuits indépendants du curseur sont alimentés par deux tensions sinusoïdales "Ue1" et "Ue2", déphasées de $\pi/2$ et d'une fréquence variant de 1 à 20 kHz.
Le fonctionnement de l'inductosyn est basé sur le principe de l'induction magnétique, comme présenté sur le schéma. L'amplitude de la tension induite " Us " dépend de la position "**X**" du conducteur mobile, elle est de plus en plus faible lorsque le conducteur mobile s'éloigne de l'inducteur. Ceci permet d'utiliser la mesure de la tension pour définir le déplacement.

La longueur des règles inductosyn varie de 250 mm à 1000 mm. Pour couvrir des courses importantes, les règles sont placées bout à bout avec un ajustement précis afin d'éviter l'erreur au joint. La précision de fabrication des règles inductosyn est de 1 à 3 µm.
La mesure indirecte est réalisée au moyen des capteurs analogiques tournants (revolvers).

4.3.2- Méthode numérique

Les méthodes numériques présentent deux principaux avantages :

- Possibilité d'utilisation directe de la valeur de mesure dans le système numérique de traitement d'information (aucune modification de la précision de la mesure) ;
- Pas de transformation de la forme de la mesure d'où un coût minimal.

Les méthodes de mesure numériques sont classées en deux groupes

4.3.2.1 Méthodes relatives (par incréments ou par comptage), figure 4

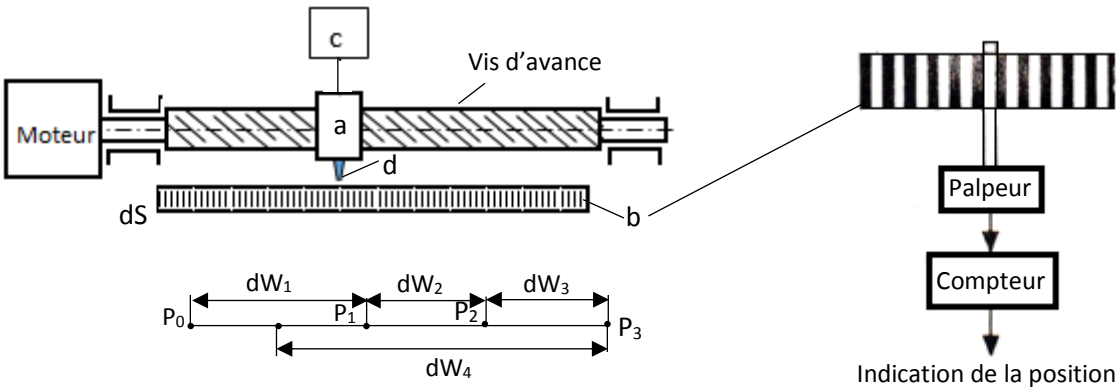


Figure 4. Mesure incrémentale

a- Chariot de la machine ; b- règle à échelle de mesure incrémentielle ; c- Comparateur ; d- Capteur de mesure de déplacement (palpeur) ; dS- Quantum de parcours (pas numérique) ; dw- taux d'accroissement de parcours.

Le mouvement du chariot "a" permet au moyen du capteur "d'" d'envoyer une information toujours la même chaque fois que le déplacement atteint une valeur déterminée ; les informations sont traduites en impulsions électriques, où il y'a émission d'une impulsion à chaque déplacement d'un pas du chariot. Les impulsions sont comptées par un système compteur (incorporées dans le comparateur "c"). Le compteur additionne algébriquement les impulsions suivant le sens de déplacement. La somme des impulsions émises pendant un déplacement représente la mesure du parcours.

Cette méthode ne donne que la mesure d'un déplacement par rapport à son origine (méthode relative : le point précédent représente l'origine du point suivant) et non la mesure de la côte de la position atteinte après plusieurs déplacements (position absolue).

4.3.2.2- Méthode absolue (par codage) figure 5

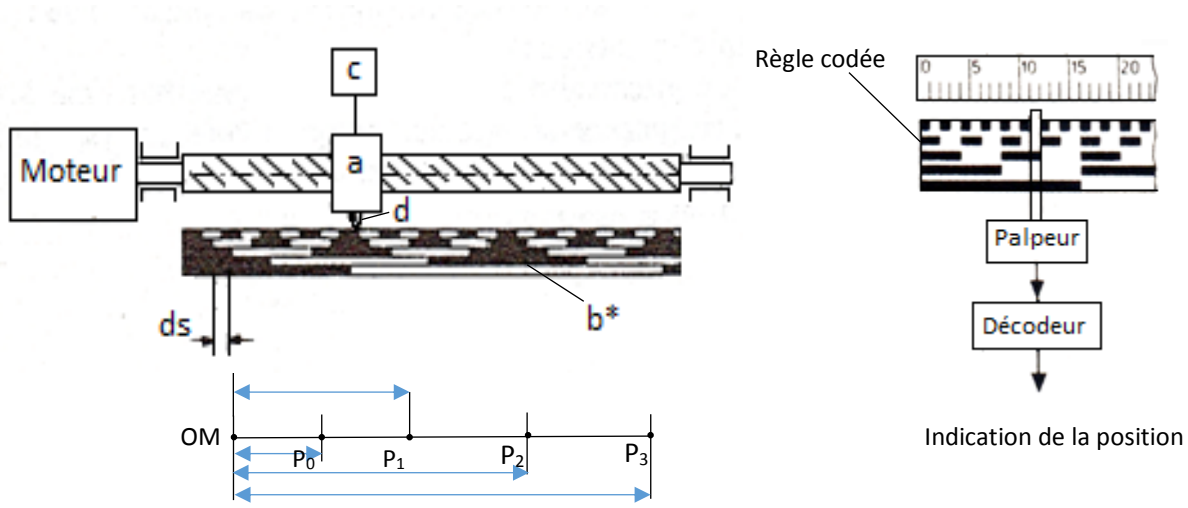


Figure 5. Mesure absolue

a- Chariot de la machine ; b*- règle à échelle de mesure absolue (en code gray) ; c- Comparateur ; d- Capteur de mesure de déplacement (palpeur) ; dS- Quantum de parcours (pas numérique)

Dans ce cas, la position du chariot est définie en permanence par un code porté par l'organe de mesure, lu au moyen du capteur "d" solidaire du chariot. Ainsi, pour une position déterminée les informations envoyées par le système de mesures représentent la mesure de cette position par rapport à une origine unique (origine de mesure). En conclusion, on peut retenir ce qui suit :

- La méthode de mesure par codage est plus coûteuse que le procédé par incréments
- Les systèmes incrémentaux sont utilisés sur des machines simples et de précision moyenne
- Les systèmes codés sont employés sur les machines de précision élevée et les machines plus complexes.

4.4- Les capteurs de mesure

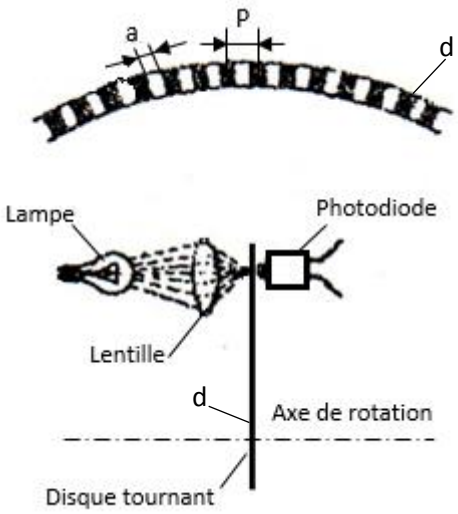
4.4.1- Capteurs incrémentaux

Ces types de capteurs délivrent une impulsion à chaque déplacement élémentaire, la position et les déplacements sont déterminés par comptage ou décomptage des impulsions émises selon le sens de déplacement.

4.4.1.1 - Capteurs rotatifs

Les capteurs sont entraînés soit par la vis de commande de déplacement soit par un pignon actionné au moyen d'une crémaillère.

a- Capteurs photoélectriques (voir figure 6)



a-Zone éclairée (1.5 mm)

P-Pas (P= 2a)

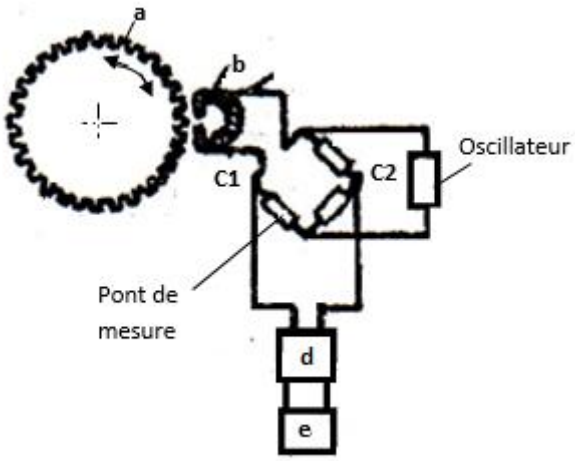
d-Disque subdivisé en zones claires et obscures

Figure 6. Capteur photoélectrique rotatif

Les capteurs photoélectriques sont très répandus, ils utilisent des photodiodes au Germanium et au Silicium. Le disque d'impulsion est en verre et porte une échelle présentant des parties claires et des parties opaques, obtenues par procédés de reproduction. L'éclairement est réalisé au moyen d'une lampe à incandescence (à filament sous voltés). La marge du faisceau lumineux est de l'ordre de grandeur de la largeur utile de la photodiode. Pour les faibles valeurs de "a", on utilise une grille de même pas et un système optique approprié. La discrimination du sens de rotation, est réalisée par la disposition de deux cellules photoélectriques (photodiodes) déclarées de (np + p/4).
Les capteurs photoélectriques délivrent des signaux très faibles qui doivent être amplifiés et mis en forme avant transmission au système compteur.

- Avantages :
  - construction simple
  - on peut atteindre 2500 Pas par tour
  - absence de contact entre le disque et le capteur.
- Inconvénients :
  - durée de vie très limitée (1000 heures de fonctionnement de lampe)
  - énergie dissipée assez importante de 5 à 6 watt
  - sensibilité à la poussière

b- Capteurs inductifs (voir figure 7)



a- Disque cranté en fer doux

b-Bobine montée sur circuit magnétique

C1C2- diagonale du pont de mesure

d- démodulateur (la fréquence porteuse de 100 à 200 kHz)

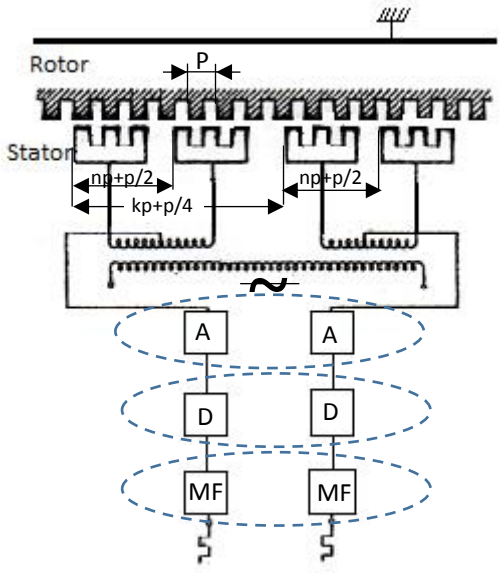
e- Compteur

Figure 7. Capteur inductif

Le principe de fonctionnement du capteur est basé sur la variation de la réluctance de la bobine (b) par l'intermédiaire du disque cranté (a), l'entrefer entre (a) et (b) varie selon la position de la dent ce qui modifie l'inductance de la bobine (b). Cette dernière est placée dans un pont alimenté en haute fréquence par l'oscillateur. La tension recueillie dans la diagonale C1C2 admet une amplitude modulée par le défilement des dents portées par le disque tournant. Le démodulateur (d) recueille les signaux dus aux variations d'inductance de la bobine (b) ; qui sont ensuite mis en forme d'impulsions et envoyés au compteur (e).

Les capteurs inductifs sont très robustes ; le nombre de dents est de l'ordre de 200 à 250.

c- Capteurs capacitifs (voir figure 8)



P- Pas

A- Amplificateur

D- Démodulateur

MF- Mise en forme

Figure 8. Capteur capacitif

Le principe de fonctionnement de ce capteur est basé sur la variation de la capacité entre un organe tournant (rotor) portant une armature découpée et des armatures fixes (stator). Les ensembles de détection sont décalées de P/4 pour la discrimination du sens de déplacement. Chaque ensemble est

constitué de deux condensateurs décalés de P/2 et font partie du même pont alimenté en haute fréquence.
Ces types de capteur permettent d'obtenir 250 à 500 pas par tour ; ils ne nécessitent qu'une faible énergie et sont insensibles au champ extérieur.
Les capteurs capacitifs sont remarquables par la simplicité de leur construction qui permet des réalisations robuste et fiable.

4.4.1.2 - Capteur linéaire incrémental

Dans cette catégorie de capteurs, on n'utilise pratiquement que les capteurs photoélectriques comme présenté dans la figure 9. Dans ce cas, la règle est en verre et comporte des zones transparentes et des zones opaques, le curseur est aussi en verre et comporte deux grilles décalées de P/4 (pour l'identification du sens de déplacement).

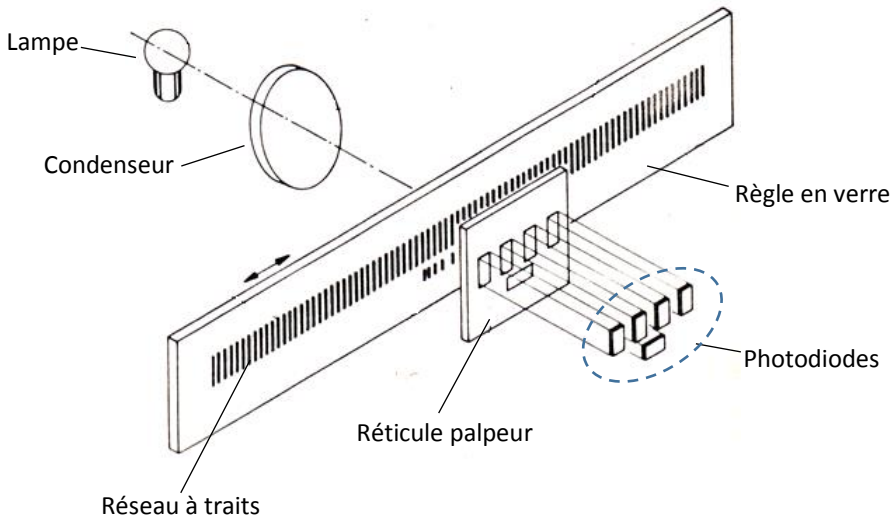


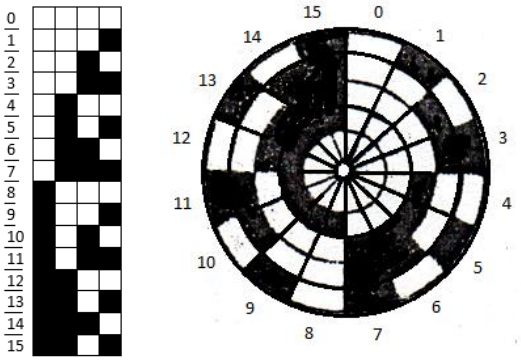
Figure 9. Capteur incrémental linéaire

Les règles peuvent avoir une longueur de 1 m et des traits espacés de 0,01mm. Pour mesurer des parcours de longueur importante, il faut juxtaposer une seconde règle.

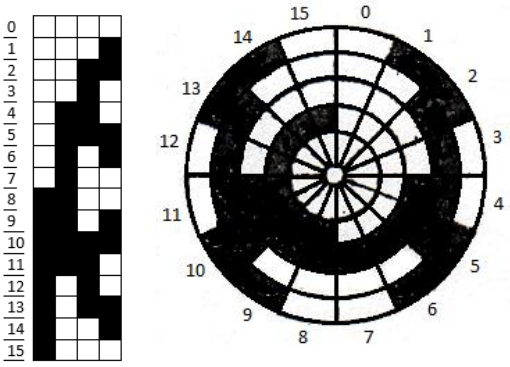
4.4.2- Capteurs digitaux

Ce type de capteur permet le repérage de position par une combinaison codée. Il assure de façon immédiate la traduction d'une position linéaire ou angulaire en un mot binaire (voir figure 10).
L'avantage principal de ce procédé de mesure du parcours consiste en la possibilité de détecter à chaque instant la position exacte du chariot même immobile après l'interruption de l'alimentation électrique.
Les capteurs codés sont plus chers que les émetteurs d'impulsions (capteurs incrémentaux). Les organes détecteurs sont soit des disques commandés par des vis et crémaillère de précision associées à des pignons, soit des règles codées.
Les codeurs rotatifs sont soit photoélectriques, soit magnétiques, soit à balais de contact.
Les codeurs linéaires sont photoélectriques.
Le code binaire naturel offre l'intérêt d'être directement utilisable par le dispositif de traitement. (Calculateur). Son inconvénient réside dans la présentation simultanée de changement de plusieurs bits lorsque des nombres varient d'une seule unité (voir figure 10a). Si les dispositifs de lecture ne sont pas parfaitement alignés, les changements de bits ne sont pas lus simultanément par conséquent,

le décodage peut faire apparaître des valeurs erronées. L'emploi des codes réfléchis (code gray) permet d'éviter le risque de lecture erronée car le passage d'une position à une autre se fait avec le changement de valeur d'un seul digit (voir figure 10b). Néanmoins, l'usage de tels codes soulève des difficultés pour le décodage car les codes réfléchis ne sont pas pondérés. Cependant, pour traiter l'information captée, il sera nécessaire d'utiliser des tables de conversion (voir exemple de la figure 10c) et de repasser en code binaire naturel, ce qui augmente la complexité de l'ensemble et son prix.



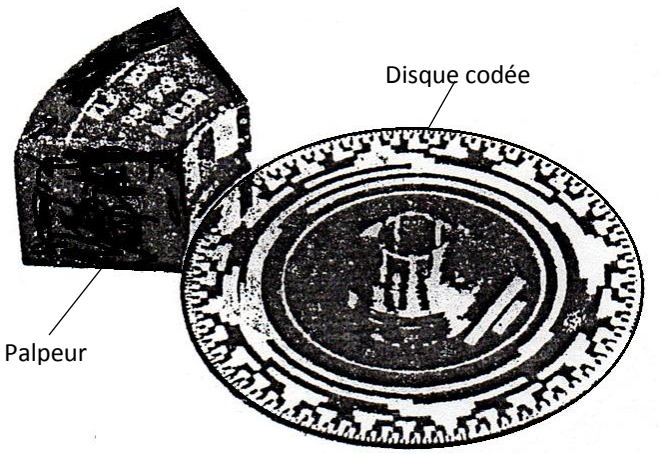
a- Capteur en code binaire



b- Capteur en code gray

c- table de conversion (décimal/Gray)

Valeur décimale	Code Gray (binaire réfléchi)
0	00000
1	00001
2	00011
3	00010
4	00110
5	00111
6	00101
7	00100
8	01100
9	01101
10	01111
11	01110
12	01010
13	01011
14	01001
15	01000
16	11000
17	11001
18	11011
19	11010
20	11110
21	11111
22	11101
23	11100



Capteur rotatif

Figure 10. Capteurs digitaux