

Chapitre 4

Capteurs de position et déplacement

4.1 Introduction

Ce type de capteur est utilisé pour déterminer la position et le déplacement des éléments mobiles ; il existe deux types de capteur de position et déplacement :

- Capteur résistif : potentiomètre résistif
- Capteurs capacitifs

4.2 Capteurs résistifs

4.2.1 Réalisation du potentiométriques

4.2.1.1 Diverses formes géométriques

Un potentiomètre est constitué d'une résistance fixe R_M sur laquelle peut se déplacer un contact électrique, le curseur. Celui-ci est solidaire mécaniquement de la pièce dont on veut traduire le déplacement ; il en est isolé électriquement. La valeur de la résistance R entre le curseur et l'une des extrémités fixes est fonction, La piste résistive est placée sur la partie fixe du capteur et la partie opérative mécanique entraîne un curseur qui se déplace sur celle-ci.

Ainsi, la résistance entre un point fixe et la partie mobile du potentiomètre est fonction de la position à mesurer

D'une part de la position du curseur, et de la pièce mobile dont on veut traduire électriquement la position,

D'autre part de la réalisation de la résistance fixe. Lorsque celle-ci est constituée de façon uniforme, le potentiomètre est linéaire car il établit une relation de proportionnalité entre R et la position du curseur.

Selon la forme géométrique de la résistance fixe et du mouvement du curseur on distingue :

- Le potentiomètre de déplacement angulaire (figure 4.1) et le -Le potentiomètre de déplacement rectiligne (figure 4.2)

$$R(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha_M} R_M$$

$$R(l) = \frac{l}{L} R_M$$

De façon générale, on désignera dans la suite le déplacement du curseur par x , qu'il soit linéaire ($x = l$) ou angulaire ($x = \alpha$) et par X sa valeur maximale (L ou α_M).

4.2.2 Caractéristiques métrologiques

4.2.2.1 Course électrique utile

La course électrique utile est la plage de variation de x dans laquelle $R(x)$ est fonction linéaire du déplacement.

4.2.2.2 Vitesse maximale du curseur

Afin d'assurer un bon contact entre le curseur et la résistance, le constructeur fixe en général une limite à la vitesse maximale de déplacement du curseur. Cette limite est la vitesse maximale autorisée pour le curseur qui fixe, en général, la fréquence maximale des déplacements que l'on peut traduire à l'aide d'un potentiomètre.

4.2.2.3 Durée de vie

Le frottement du curseur sur le fil ou la piste conductrice provoque son usure et fixe toujours une limite à l'emploi du potentiomètre. L'usure irrégulière de la piste due à de fréquents mouvements oscillatoires du curseur autour de positions déterminées entraîne une dégradation de la linéarité et peut aboutir à la coupure du fil d'un potentiomètre bobiné.

Par exemple la durée de vie :

Pour potentiomètre bobiné est 10^6 manœuvres

Pour potentiomètre à piste plastique : $5 \cdot 10^7$ à 10^8 manœuvres.

4.2.3 Influence des divers éléments du montage de mesure

4.2.3.1 Montage de base

Le potentiomètre est alimenté par une source de f.é.m. E_s et de résistance interne R_s . La tension V_x aux bornes de la résistance variable $R(x)$ est mesurée par un dispositif de résistance d'entrée R_e (figure 9.3).

On établit l'expression:

$$V_x = E_s \cdot \frac{R(x)}{R_s + R_M} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R(x)}{R_e} \left(1 - \frac{R(x)}{R_s + R_M} \right)}$$

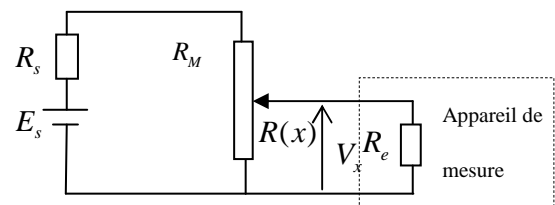


Figure 4.3

Dans le cas idéal, que l'on cherche à approcher, $R_s = 0$ et $R_e = \infty$, la tension de mesure a pour expression :

$$V_x = E_s \cdot \frac{R_{(x)}}{R_M} = E_s \cdot \frac{x}{X}$$

Soit dans le cas d'un potentiomètre rectiligne: $V_x = E_s \cdot \frac{l}{L}$,

Et dans le cas d'un potentiomètre circulaire : $V_x = E_s \cdot \frac{\alpha}{\alpha_M}$.

4.2.3.2 influence de la source

En supposant pour cette étude : $R_M \ll R_e$ on a pratiquement:

$$V_x = E_s \cdot \frac{R_{(x)}}{R_s + R_M} = E_s \cdot \frac{x}{X} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_M}}$$

La sensibilité du montage est dans ce cas : $S = \frac{\Delta V_x}{\Delta x} = \frac{E_s}{X} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_M}}$

Où X est la course maximale à traduire.

S est indépendant de x : la résistance R_s réduit la sensibilité mais n'affecte pas la linéarité, dans la mesure où $R_M \ll R_e$.

Une sensibilité élevée est obtenue en choisissant une source tension de résistance faible $R_s \ll R_M$ et de f.é.m. E_s importante.

4.2.3.3 influence de la résistance d'entrée de l'appareil de mesure

En admettant que la résistance de source ait été choisie conformément à la condition $R_s \ll R_M$, l'expression de la tension devient:

$$V_x = E_s \cdot \frac{R_{(x)}}{R_M} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R(x)}{R_e} \left(1 - \frac{R(x)}{R_M} \right)}$$

Soit, en fonction de la position: $V_x = E_s \cdot \frac{x}{X} \cdot \frac{1}{1 + \frac{x}{X} \left(1 - \frac{x}{X} \right) \cdot \frac{R_M}{R_e}}$,

La sensibilité du montage, $S = \frac{\Delta V_x}{\Delta x}$, est une fonction de x : le dispositif n'est pas linéaire et

l'écart de linéarité est d'autant plus important que le rapport $\frac{R_M}{R_e}$ est plus grand.

Dans le cas où : $\frac{R_M}{R_e} \ll 1$, l'expression de V_x peut s'écrire:

$$V_x = E_s \cdot \frac{x}{X} \left(1 - \frac{x}{X} \left(1 - \frac{x}{X} \right) \cdot \frac{R_M}{R_e} \right).$$

4.2.4 Montage de mesure

Détermination d'une position. L'information est fournie par la tension V_x entre le curseur et une extrémité du potentiomètre: elle doit être mesurée ou acquise à l'aide d'un dispositif à grande impédance d'entrée.

- Voltmètre ;
- Amplificateur en montage suiveur (figure 4.4);
- Amplificateur en montage inverseur (figure 4.5) : la résistance d'entrée du montage, R_1 , doit être très supérieur à R_M .

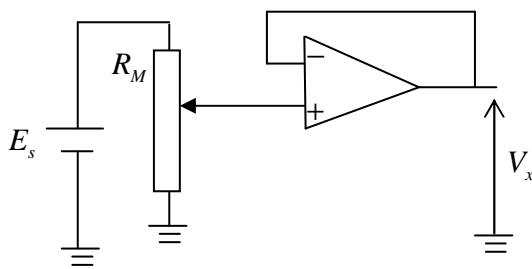


Figure 4.4 : Montage suiveur

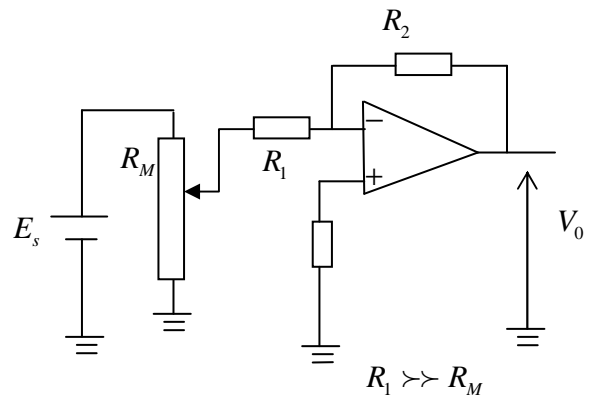


Figure 4.5 Montage inverseur

4.3 Capteurs capacitifs

4.3.1 Principe et caractéristiques générales

On distingue deux types de condensateur ; condensateurs plan et condensateur cylindriques dont l'une des armatures subit le déplacement à traduire, entraînant une variation de capacité.

La valeur de condensateur C est donnée par $C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A}{D}$ dans le cas de condensateur plan,

ϵ_r étant la permittivité relative du milieu placé entre les armatures, $\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$ F/m, permittivité du vide, A et D étant respectivement leur surface et leur distance.

Pour le condensateur cylindrique la valeur de C est donnée par $C = \frac{2\pi\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\log \frac{r_2}{r_1}}$

l étant l'enfoncement du cylindre intérieur de rayon r_1 dans le cylindre creux de rayon r_2 .

L'unité de capacité est le Farad.

Le déplacement des armatures peut s'effectuer :

- Dans le cas d'un condensateur plan, soit dans son propre plan : A variable et D constant, soit perpendiculaire à son plan : A constant et D variable ;
- Dans le cas d'un condensateur cylindrique uniquement parallèlement à l'axe : l variable.

4.3.2 Condensateur à surface variable

4.3.2.1 Condensateur unique

Il s'agit habituellement soit d'un condensateur plan avec armature tournante (figure 4.6) soit d'un condensateur cylindrique dont une armature est translatable le long de l'axe (figure 4.7).

Dans les deux cas, la capacité varie linéairement en fonction du déplacement x :

$$C(x) = k \cdot x$$

Pour le condensateur tournant : $k = \frac{\epsilon_0 \cdot \pi \cdot r^2}{360 \cdot D}$, $x = \alpha$ en degrés

Pour le condensateur cylindrique: $k = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$, $x = l$ en mètre.

La sensibilité de la capacité $S_c = \frac{\Delta C}{\Delta x} = k$

La sensibilité de l'impédance $S_z = \frac{\Delta Z}{\Delta x} = -\frac{1}{k\omega} \cdot \frac{1}{x^2}$ fonction non linéaire de x .

La sensibilité relative $S_r = \frac{1}{C} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x} = -\frac{1}{Z} \cdot \frac{\Delta Z}{\Delta x} = \frac{1}{x}$. Les sensibilités S_z et S_r sont d'autant plus grandes que x plus petit.

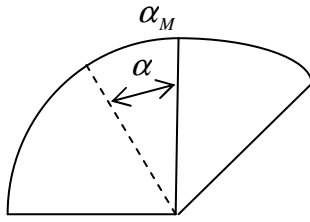


Figure 4.6: Condensateur unique rotatif

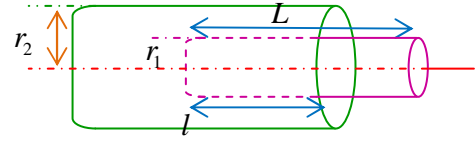


Figure 4.7: Condensateur à déplacement rectiligne

4.3.2.2 Condensateur double différentiel

L'armature mobile A_1 est placée entre deux armatures fixes A_2 et A_3 constituent deux condensateurs dont les capacités C_{21} et C_{31} variant en sens contraire en fonction du déplacement x (figure 4.8, figure 4.9). La position prise comme origine des déplacements x est celle où l'armature mobile est placée symétriquement par rapport aux deux armatures fixes et où les deux capacités C_{21} et C_{31} sont égales. En fonction de k et x précédemment définis et du déplacement maximum X on a:

$$C_{21} = k(X + x) = kX \left(1 + \frac{x}{X} \right) = C_0 \left(1 + \frac{x}{X} \right)$$

$$C_{31} = k(X - x) = kX \left(1 - \frac{x}{X} \right) = C_0 \left(1 - \frac{x}{X} \right)$$

En posant $kX = C_0$ et avec: $X = \frac{L}{2}$, L étant la longueur de l'armature mobile dans le cas d'un condensateur cylindrique.

$X = \frac{\alpha_M}{2}$, α_M étant l'angle au centre de l'armature mobile dans le cas d'un condensateur circulaire.

L'intérêt du montage différentiel apparaît évidemment dans l'association des condensateurs C_{21} et C_{31} ; c'est pourquoi il est important de noter, pour le bon choix d'une méthode de mesure, que les rapports potentiométriques suivants sont des fonctions linéaires du déplacement :

$$\frac{Z_{31}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{21}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{X} \right)$$

$$\frac{Z_{21}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{31}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{X} \right).$$

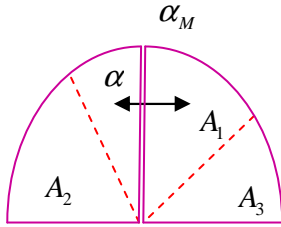


Figure 4.8 : Condensateur double différentiel rotatif

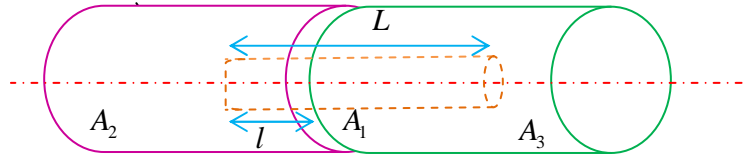


Figure 4.9 : Condensateur à déplacement rectiligne

4.3.3 Condensateur à écartement variable

4.3.3.1 Condensateur unique

En désignant par d le déplacement par rapport à l'écartement origine D_0 figure 6.10, on a:

$$C(d) = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{D_0 + d}$$

La sensibilité de la capacité $S_c = -\frac{\epsilon_0 \cdot A}{(D_0 + d)^2}$;

La sensibilité de l'impédance $S_z = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot A \cdot w}$;

La sensibilité relative $S_r = \frac{-1}{D_0 + d}$.

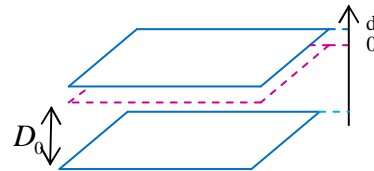


Figure 4.10 : Condensateur simple

La variation d'impédance dans ce cas est linéaire en fonction du déplacement. les sensibilités S_c et S_r sont d'autant plus élevées que d est plus petit ; elles peuvent être considérées comme constantes dans la mesure où $d \ll D_0$.

Remarque : La sensibilité S_c du condensateur à écartement variable est très supérieure à celle du condensateur à surface variable. Par contre, le condensateur à écartement variable ne peut

être utilisé que pour des étendues de mesure faibles (en général inférieur au mm) alors que le condensateur à surface variable a une étendue de mesure nettement plus importante (supérieur au cm).

4.3.3.2 Condensateur double différentiel

L'armature mobile A_1 est placée, perpendiculairement à son plan entre deux armatures fixes A_2 et A_3 (figure 4.11).

Soit d son déplacement par rapport à la position origine équidistante de D_0 des 2 plans ; on a :

$$C_{21} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{D_0 - d} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{D_0} \cdot \frac{1}{1 - d/D_0} = C_0 \cdot \frac{1}{1 - d/D_0}$$

$$C_{31} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{D_0 + d} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{D_0} \cdot \frac{1}{1 + d/D_0} = C_0 \cdot \frac{1}{1 + d/D_0}$$

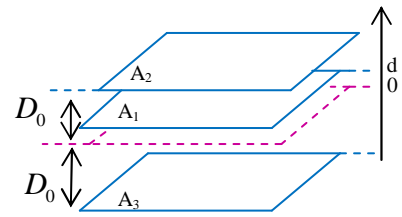


Figure 4.11 : Condensateur double différentiel

En posant: $C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{D_0}$.

Comme dans le cas du condensateur différentiel

à variation de surface, c'est l'association de ces deux

condensateurs qui présente des propriétés intéressantes, à savoir, des rapports potentiométriques variant linéairement avec le déplacement :

$$\frac{Z_{31}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{21}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_0} \right)$$

$$\frac{Z_{21}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{31}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_0} \right).$$

4.3.4 Méthodes de mesure des variations de capacité

4.3.4.1 Pont de Sauty et condensateur différentiel

Soit le montage illustré par la figure 4.12. On suppose l'influence des capacités parasites et de leurs variations est rendue négligeable ; on a :

$$V_x = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}}.$$

Cette expression du signal de mesure est fonction linéaire du déplacement pour le condensateur à variation de surface comme pour le condensateur à écartement variable.

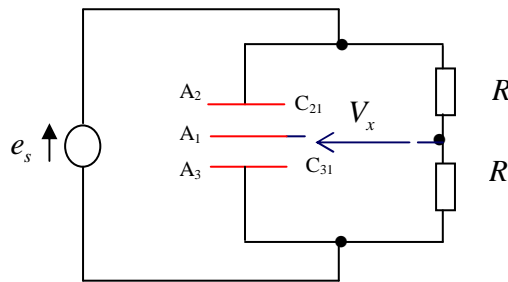


Figure 4.12 : Pont de Sauty et condensateur double différentiel

4.3.4.2 Montage potentiométrique résistance-condensateur en régime dynamique

Lorsque les déplacements à traduire sont rapidement variables, on peut utiliser un montage potentiométrique constitué d'une résistance fixe en série avec le condensateur variable, l'ensemble étant alimenté par une source de tension continue (figure 4.13).

On considère le cas où la capacité du condensateur

varie sinusoïdalement autour d'une valeur fixe :

$$C = C_0 + C_1 \sin \omega t$$

Les équations du montage sont:

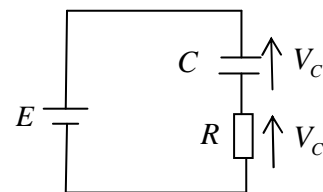


Figure 4.13 : Montage potentiométrique d'une résistance et d'un condensateur

$$V_c + V_R = E_s$$

Où
$$V_R = Ri \text{ et } V_c = \frac{1}{C} \int_0^t i \cdot dt$$

Soit
$$(RC_0 + RC_1 \sin wt) \frac{di}{dt} + (RC_1 w \cdot \cos wt + 1)i = E_s w C_1 \cos wt$$

Cette équation admet, dans le cas général, une solution de la forme :

$$i(t) = I_1 \sin(wt - \varphi_1) + I_2 \sin(2wt - \varphi_2) + \dots$$

Dans l'hypothèse où $C_1 \ll C_0$:

$$I_2, I_3, \dots \ll I_1$$

Et
$$I_1 = \frac{w \cdot E_s \cdot C_1}{\sqrt{1 + R^2 C_0^2 w^2}} \quad \varphi_1 = \text{Arctg} \frac{1}{RC_0 w}$$

Lorsqu'en outre : $RC_0 w \gg 1$, la tension V_R a pour expression:

$$V_R = E_s \cdot \frac{C_1}{C_0} \sin wt$$

Quand ce montage est employé avec un condensateur à écartement variable, l'amplitude d_1 du déplacement étant faible devant D_0 on a:

$$D = D_0 + d_1 \sin wt \quad \text{et} \quad C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{D_0 + d_1 \sin wt} = C_0 \left(1 - \frac{d_1}{D_0} \sin wt \right)$$

Soit
$$\frac{C_1}{C_0} = -\frac{d_1}{D_0}$$

et
$$V_R = -E_s \cdot \frac{d_1}{D_0} \sin wt$$

L'amplitude de la tension V_R est à chaque instant proportionnel au déplacement $d = d_1 \sin wt$.

4.3.4.3 Montage à amplificateur opérationnel

C_1 ou C_2 est le capteur, l'autre condensateur étant fixe (figure 4.14) ; R_1 a un rôle de protection de l'entrée inverseur et R_2 permet la circulation du courant continu de polarisation de cette même entrée. e_s est une source de tension sinusoïdal de pulsation $\omega = 2\pi f$.

En supposant l'amplificateur opérationnel parfait :

$$V_x = -\frac{Z_2}{Z_1} e_s$$

Où $Z_2 = \frac{R_2}{1 + jR_2C_2\omega}$ et $Z_1 = \frac{1 + jR_1C_1\omega}{jC_1\omega}$

Soit $V_x = -\frac{jR_2C_1\omega}{(1 + jR_1C_1\omega)(1 + jR_2C_2\omega)} e_s$

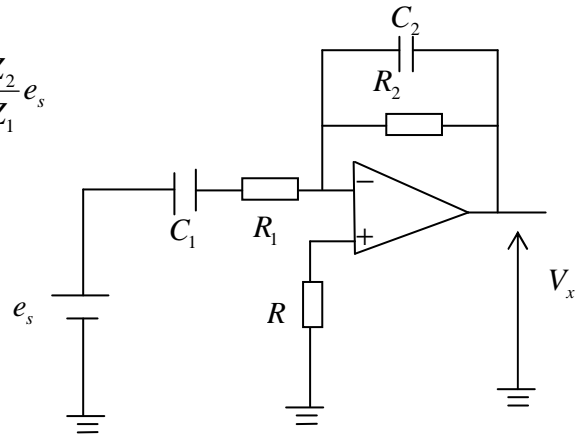


Figure 4.14 : Amplificateur opérationnel associé à un capteur capacitif

Lorsque les éléments du montage sont tels que:

$$R_1C_1\omega \ll 1 \text{ et } R_2C_2\omega \gg 1$$

C'est-à-dire

$$\frac{1}{2\pi R_2C_2} \ll f \ll \frac{1}{2\pi R_1C_1} \text{ voir figure (4.15)}$$

$$V_x = -\frac{C_1}{C_2} e_s$$

Le montage est linéaire en fonction du déplacement dans les cas suivants:

C_1 est condensateur à surface variable, C_2 est fixe,

C_1 est fixe, C_2 est un condensateur à écartement variable.

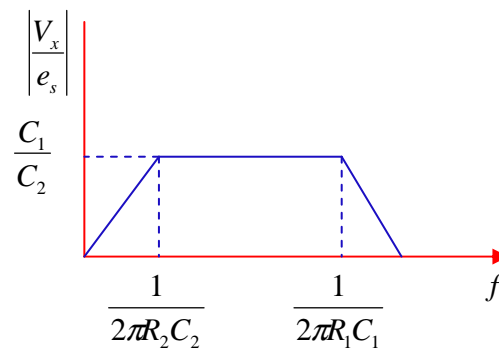


Figure 4.15 : réponse en fréquence