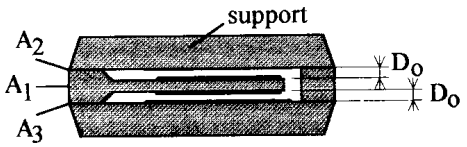
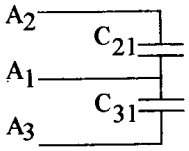
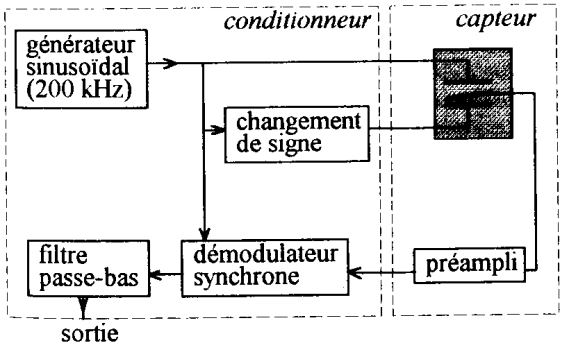
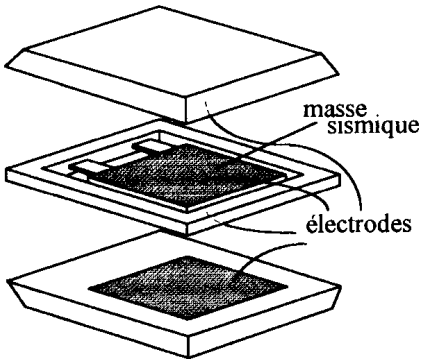
CHAPITRE II

Capteurs et électronique associée









Olivier Français, 2000

SOMMAIRE

I DÉFINITIONS 3

I.1 MESURANDE 3
I.2 CAPTEUR 3
I.3 CHAÎNE DE MESURE 4
I.4 TYPES DE GRANDEUR PHYSIQUE 4

II CLASSIFICATION DES CAPTEURS 5

II.1 CAPTEURS PASSIFS 5
II.2 CAPTEURS ACTIFS 5

III PERFORMANCES D'UN CAPTEUR : DÉFINITION MÉTROLOGIQUE 7

III.1 ETENDUE DE LA MESURE 7
III.1.1 Zone nominale d'emploi 7
III.1.2 Zone de non-détérioration 7
III.1.3 Zone de non-destruction 7
III.2 RÉSOLUTION 7
III.3 CARACTÉRISTIQUE D'ENTRÉE-SORTIE D'UN CAPTEUR 7
III.4 SENSIBILITÉ 8
III.5 FINESSE 8
III.6 LINÉARITÉ 8
III.7 CARACTÉRISTIQUES STATISTIQUES D'UN CAPTEUR 9
III.8.1 Fidélité 9
III.8.2 Justesse 9
III.8.3 Précision 9
III.8 RAPIDITÉ 9

IV CONDITIONNEUR ASSOCIÉ 10

IV.1 CAPTEURS ACTIFS 10
IV.1.1 Capteur source de tension : 10
IV.1.2 Capteur source de courant : 10
IV.1.3 Capteur source de charge 11
IV.2 CAPTEURS PASSIFS 11
IV.2.1 Montage potentiométrique 11
IV.2.2 Montage en pont 13
IV.2.3 Montage oscillant 14

Les capteurs

Lorsque l'on souhaite traduire une grandeur physique en une autre grandeur, on fait appel à ce que l'on nomme classiquement « capteur ». Son rôle est de donner une image interprétable d'un phénomène physique de manière à pouvoir l'intégrer dans un processus plus vaste.

Ainsi, un capteur de température au sein d'un micro-processeur s'intègre dans le processus de stabilisation en température du composant de manière à assurer son bon fonctionnement. De cette mesure va dépendre la vitesse de rotation du ventilateur ou la commande en courant d'un module à effet Peltier.

I Définitions

I.1 Mesurande

C'est la grandeur physique que l'on souhaite connaître.

I.2 Capteur

C'est l'élément qui va permettre sous l'effet du mesurande d'en délivrer une image exploitable (signal électrique par exemple).

On parle aussi de transducteur, la grandeur physique d'entrée (le mesurande) étant transformée en une autre grandeur physique de sortie ou en un signal électrique.

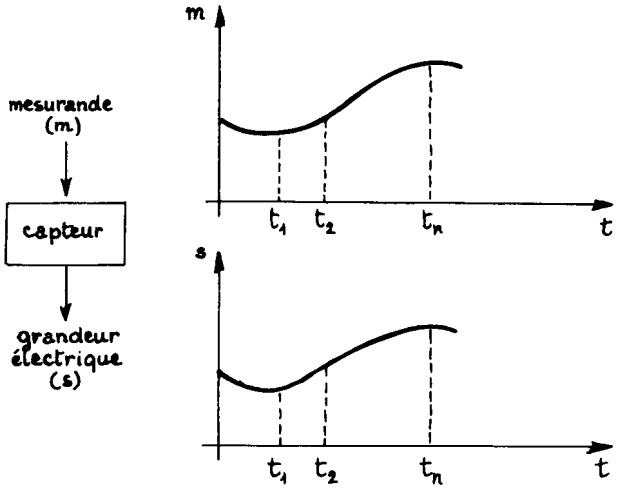


Figure 1 : principe d'un capteur

Généralement, on obtient une grandeur de sortie du type électrique. Elle peut être soit :

- une charge,
- une tension,
- un courant,
- une impédance (R, L, C).

I.3 Chaîne de mesure

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. Par exemple, la mesure d'un débit peut se faire en plusieurs étapes :

- transformation du débit en une pression différentielle,
- transformation de la pression différentielle en la déformation mécanique d'une membrane,
- transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézo-électrique) via un circuit électronique associé.

L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure.

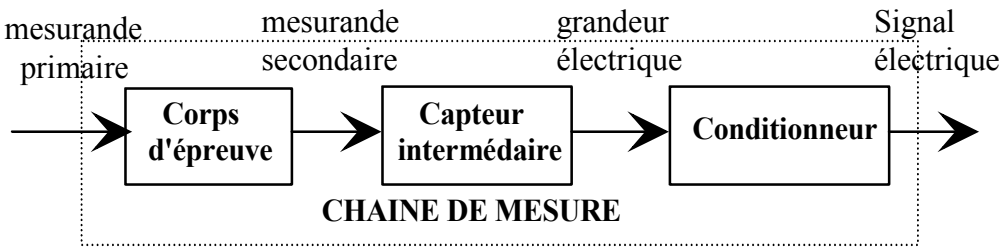


Figure 2 : constitution d'une chaîne de mesure classique

De manière classique la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le mesurande. Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable. Le choix de ce conditionneur est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure car, associé au capteur, il détermine la nature finale du signal électrique et va influencer les performances de la mesure.

I.4 Types de grandeur physique

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles, chaque capteur s'associant à l'une de ces 6 familles :

- Mécanique : déplacement, force, masse, débit etc…
- Thermique : température, capacité thermique, flux thermique etc...
- Electrique : courant, tension, charge, impédance, diélectrique etc…
- Magnétique : champ magnétique, perméabilité, moment magnétique etc…
- Radiatif : lumière visible, rayons X, micro-ondes etc...
- (Bio)Chimique : humidité, gaz, sucre, hormone etc…

II Classification des capteurs

On classifie les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé.

II.1 Capteurs passifs

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif.

Le tableau ci-dessous résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

MESURANDE	EFFET UTILISE (Grandeur de sortie)	MATERIAUX
Température Très basse température	Résistivité Cste diélectrique	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteurs Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

II.2 Capteurs actifs

Dans ce cas, la sortie du capteur est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge. Les principes physiques mis en jeu sont présentés ci-dessous.

MESURANDE	EFFET UTILISE	GRANDEUR DE SORTIE
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

<u>Précision sur les effets utilisés :</u>

Thermoélectricité : c'est le principe de tout thermocouple. C'est un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes T1 et T2. Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice) liée à la différence de température (T1-T2).

Pyroélectricité : certains cristaux présentent une polarisation électrique proportionnelle à leur température. Ainsi, en absorbant un flux de rayonnement, le cristal pyroélectrique va s'échauffer et ainsi sa polarisation va se modifier entraînant une variation de tension détectable.

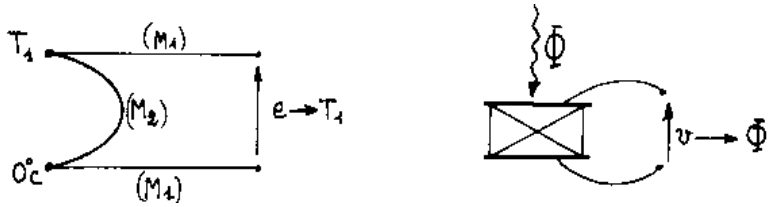


Figure 3 : Thermoélectricité et pyroélectricité

Piézoélectricité : l'application d'une force sur ce type de matériau engendre l'apparition de charges électriques crées par la déformation du matériau.

C'est un phénomène réversible.

Induction : la variation d'un flux magnétique engendre l'apparition d'une force électromotrice.

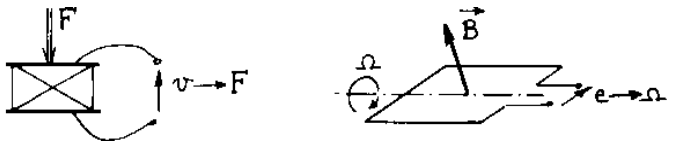


Figure 4 :Piézoélectricité et induction

Photoélectricité : sous l'influence d'un rayonnement lumineux, le matériau libère des charges électriques et celles-ci en fonction du rayonnement.

Effet Hall : un semi-conducteur de type parallélépipède rectangle, placé dans une induction B et parcouru par un courant I, voit l'apparition, dans la direction perpendiculaire au courant et à l'induction, d'une différence de potentiel qui a pour expression :

$$U_H = K_H.I.B.\sin\theta$$

K_H est fonction du matériau, θ est l'angle entre I et B.

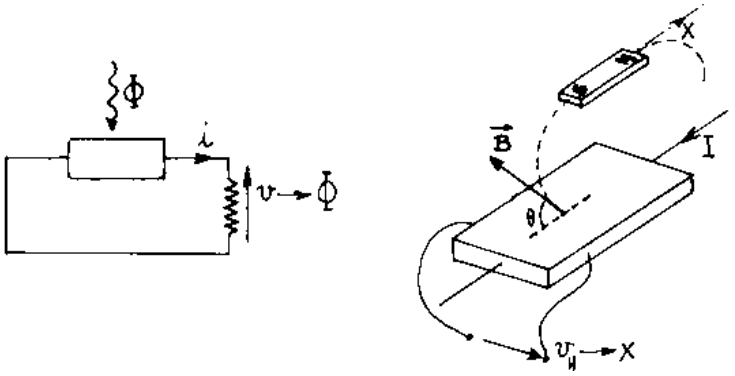


Figure 5 : Photoélectricité et effet Hall

III Performances d'un capteur : définition métrologique

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, on est amené à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

III.1 Etendue de la mesure

Elle définit la zone dans laquelle les caractéristiques du capteur sont assurées par rapport à des spécifications données. On peut classer cette zone en trois familles :

III.1.1 Zone nominale d'emploi

Zone dans laquelle le mesurande peut évoluer sans modification des caractéristiques du capteur.

III.1.2 Zone de non-détérioration

Valeurs limites des grandeurs influençant le capteur (mesurande, température environnante, etc…) sans que les caractéristiques du capteur ne soient modifiées après annulation de surcharges éventuelles.

III.1.3 Zone de non-destruction

Elle définit les limites garantissant la non-destruction du capteur mais dans laquelle il peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques du capteur.

III.2 Résolution

Elle correspond à la plus petite variation du mesurande que le capteur est susceptible de déceler.

III.3 Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur

Elle donne la relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée. Elle est donnée classiquement par une courbe en régime permanent. Elle ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

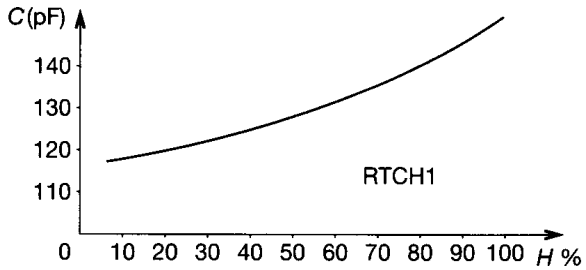


Figure 6 : Exemple de caractéristique d'un capteur d'humidité du type capacitif

III.4 Sensibilité

Elle détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné. C'est la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur.

Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante.

$$\boxed{\text{Sensibilité} = \left.\frac{\text{d(Grandeur de sortie)}}{\text{d(mesurande)}}\right|_{\text{Ptd'étude}}}$$

Il faut noter que la sensibilité d'un capteur peut être fonction du conditionneur auquel il est associé.

Dans l'exemple de la figure 6, la sensibilité moyenne du capteur est de 0.4pF/%H.

III.5 Finesse

C'est la qualité d'un capteur à ne pas venir modifier par sa présence la grandeur à mesurer. Cela permet d'évaluer l'influence du capteur sur la mesure. On la définit non seulement vis à vis du capteur mais aussi vis à vis de l'environnement d'utilisation du capteur. Par exemple, dans le cas d'une mesure thermique, on cherchera un capteur à faible capacité calorifique vis à vis des grandeurs l'environnant.

Finesse et sensibilité sont en général antagonistes. Il peut y avoir un compromis à faire.

Pour un capteur d'induction B, un capteur à forte perméabilité sera très sensible, par contre sa présence aura tendance à perturber les lignes de champ et la mesure de l'induction ne sera pas celle sans capteur, d'où une mauvaise finesse. Mais cette erreur peut être évaluée en vue d'une correction post-mesure et ainsi faire abstraction de la présence du capteur.

III.6 Linéarité

Zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande.

Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple par la méthode des moindres carrés.

On définit à partir de cette droite l'écart de linéarité qui exprime en % l'écart maximal entre la courbe réelle et la droite approchant la courbe.

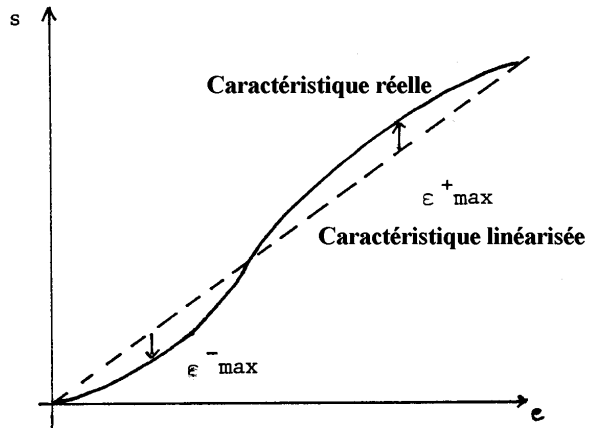


Figure 7 : Exemple de linéarisation de caractéristiques

III.7 Caractéristiques statistiques d'un capteur

Ces paramètres permettent de prendre en compte la notion d'erreurs accidentelles qui peuvent survenir sur un capteur.

Rappel : soit n mesures effectuées sur un mesurande, on définit à partir de ces n mesures :

- la valeur moyenne : $\langle m \rangle = \frac{\sum_i m_i}{n}$
- l'écart type (dispersion des résultats autour de la valeur moyenne) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \langle m \rangle)^2}{n-1}}$$

III.8.1 Fidélité

Elle définie la qualité d'un capteur à délivrer une mesure répétitive sans erreurs. L'erreur de fidélité correspond à l'écart type obtenu sur une série de mesures correspondant à un mesurande constant.

III.8.2 Justesse

C'est l'aptitude d'un capteur à délivrer une réponse proche de la valeur vraie et ceci indépendamment de la notion de fidélité. Elle est liée à la valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur réelle.

III.8.3 Précision

Elle définie l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur. Ainsi un capteur précis aura à la fois une bonne fidélité et une bonne justesse.

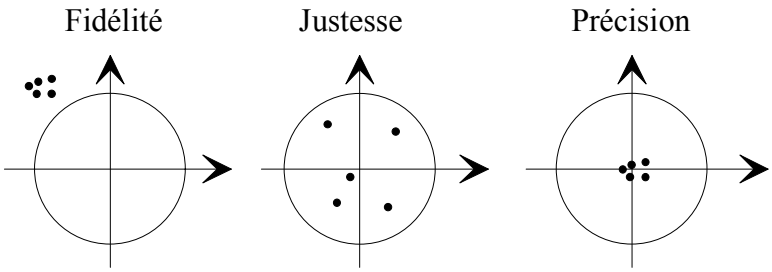


Figure 8 : Caractéristiques statistiques d'un capteur

III.8 Rapidité

C'est la qualité d'un capteur à suivre les variations du mesurande. On peut la chiffrer de plusieurs manières :

- bande passante du capteur. (à –3 dB par exemple).
- Fréquence de résonance du capteur.
- Temps de réponse (à x%) à un échelon du mesurande.

IV Conditionneur associé

Le conditionnement de la mesure consiste à rendre exploitable la mesure issue du capteur. L'association capteur-conditionneur détermine le signal électrique et ses caractéristiques.

On effectue une adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure complète.

IV.1 Capteurs actifs

Le capteur se comporte comme une source.

IV.1.1 Capteur source de tension :

On peut adopter le modèle suivant pour la sortie du capteur auquel on vient connecter une impédance correspondant à l'impédance d'entrée du conditionneur.

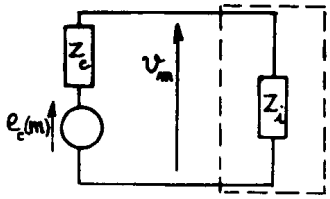


Figure 9 : modèle du capteur source de tension

On utilisera des dispositifs à forte impédance d'entrée de manière à obtenir une tension en sortie du conditionneur aussi proche que la tension en sortie du capteur. On pourra utiliser un montage suiveur (inverseur ou non), ou un amplificateur différentiel plus classiquement appelé amplificateur d'instrumentation (Voir ci-dessous).

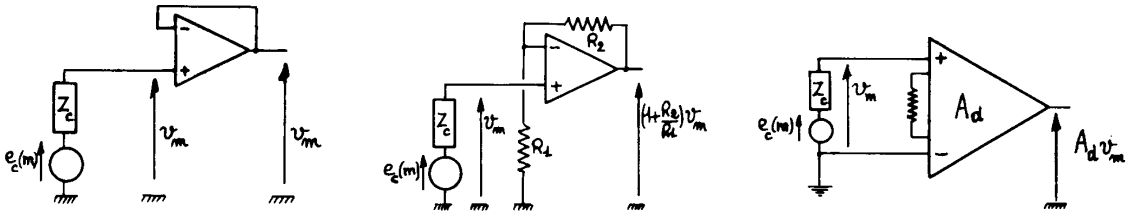


Figure 10 : exemple de conditionneur

IV.1.2 Capteur source de courant :

Dans ce cas, le capteur peut se modéliser par une source de courant avec une impédance en parallèle.

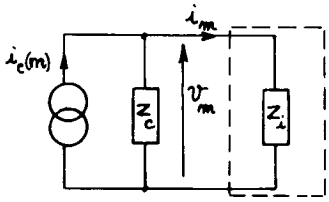


Figure 11 : Modèle du capteur type source de courant

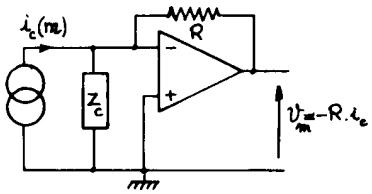


Figure 12 : convertisseur courant-tension

On fait appel dans ce cas à un convertisseur courant-tension de manière à obtenir une tension proportionnelle au courant de sortie du capteur.

IV.1.3 Capteur source de charge

Le capteur en tant que générateur présente une impédance interne capacitive. C'est le cas d'un cristal piézo-électrique. Il faut faire attention dans le cas où l'on vient brancher une impédance équivalente résistive à ses bornes. Cette résistance peut engendrer une décharge trop rapide de la capacité empêchant toute mesure.

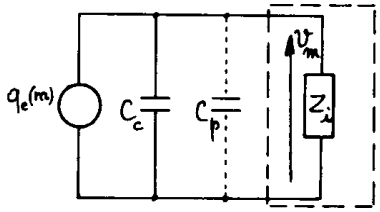


Figure 13 : modèle du capteur type source de charge

Dans ce cas, il est préférable d'utiliser un amplificateur de charge dont le principe est présenté ci-dessous.

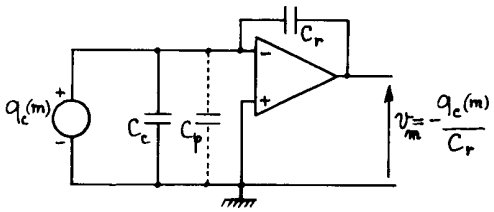


Figure 14 : amplificateur de charge

IV.2 Capteurs passifs

Ce capteur donne une image du mesurande par l'intermédiaire d'une impédance. On associe donc toujours une source externe de tension ou de courant au capteur.

Deux grands principes de conditionneurs peuvent être employés :

Montage en pont : on récupère alors une tension proportionnelle au mesurande.

Montage oscillant : la fréquence du signal de sortie est modulée par le mesurande.

IV.2.1 Montage potentiométrique

A/ Cas des résistances

On utilise un simple pont diviseur alimenté par une source de tension continue Ve. L'impédance interne de la source (Rs) et l'impédance de l'appareil de mesure (Rd) doivent être prises en compte. Le capteur est modélisé par la résistance Rc.

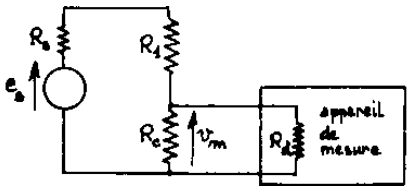


Figure 15 : modèle du montage potentiométrique

En négligeant Rs et Rd, on obtient :

$$V_m = \frac{Rc}{Rc + R1} Ve$$

La relation qui lie la tension de sortie (Vm) au paramètre image du mesurande (Rc) n'est pas linéaire. La sensibilité du montage n'est donc pas constante. On peut néanmoins faire une étude en petites variations du mesurande (étude petit signaux). Ainsi si l'on se place aux petites variations $\Delta R < Rc + R1$:

$$Rc \rightarrow Rco + \Delta R$$

$$Vm \rightarrow Vmo + \Delta Vm$$

Alors on obtient :

$$\Delta Vm = Ve \frac{(R1)\Delta R}{(R1 + Rco)^2}$$

C'est une relation linéaire d'où on peut directement extraire la sensibilité du capteur $\Delta Vm / \Delta Rc$. Cette sensibilité est maximum pour R1=Rco soit :

$$\boxed{\Delta Vm = \frac{Ve}{4R1} \Delta R}$$

Remarque : Cas d'une alimentation en courant :

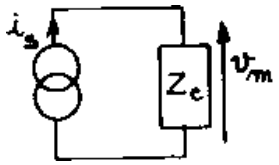


Figure 16 : Capteur alimenté en courant

L'utilisation d'une source de courant I rend le montage directement linéaire si l'on néglige l'impédance interne de la source, c'est à dire :

$$\Delta Vm = I.\Delta Rc$$

B/ Cas des impédances complexes (Zc)

Le capteur est capacitif (détecteur de niveau par exemple) ou inductif (détecteur de position). On utilise alors une source d'alimentation sinusoïdale associée à pont diviseur.

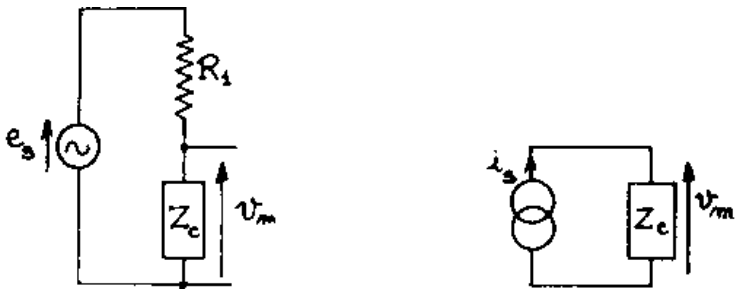


Figure 17 : Montage en pont dans le cas d'impédances complexes

En supposant $R1 < |Zc|$, on obtient aux petites variations :

$$\Delta Vm = \frac{Ve}{R1} \Delta Zc$$

De même en utilisant une source de courant I :

$$\Delta Vm = I.\Delta Zc$$

IV.2.2 Montage en pont

L'utilisation d'un montage potentiométrique présente le défaut d'avoir en sortie la présence d'une tension continu, et ceci en l'absence de variations du mesurande. L'emploi d'un montage en pont présente l'avantage de s'affranchir de cette tension continue.

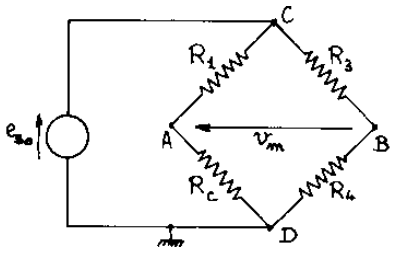


Figure 18 : montage en pont

<u>Calcul des potentiels :</u>

<u>En A :</u> $V_A = \frac{R_C}{R_C + R_1} E$ <u>En B :</u> $V_B = \frac{R_4}{R_4 + R_3} E$

On obtient une tension de mesure encore appelée tension déséquilibre du pont :

$$V_m = V_A - V_B = \frac{R_c R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_C)(R_4 + R_3)} E$$

Si on veut une tension nulle en l'absence d'évolution du mesurande (cas stable R_c=R_{co}), on trouve la condition d'équilibre d'un pont de Wheastone :

$$\boxed{R_C R_3 = R_1 R_4}$$

<u>Cas Rc=R1=R2=R3=R :</u>

cela correspond à une ***sensibilité maximum*** pour le cas du diviseur potentiométrique, et l'on suppose que le mesurande évolue autour d'une valeur R_{co} : $R_C = R_{co} + \Delta R$, avec R_{co}=R.

On obtient alors pour : $V_A = \frac{E}{2} \frac{(1 + \Delta R / R)}{(1 + \Delta R / 2R)}$ et $V_B = E/2$

$$\text{Soit } \boxed{V_m = \frac{E}{4} \frac{\Delta R / R}{(1 + \Delta R / 2R)}}$$

On peut alors tracer l'évolution de la tension de déséquilibre en fonction du rapport $\Delta R / R$:

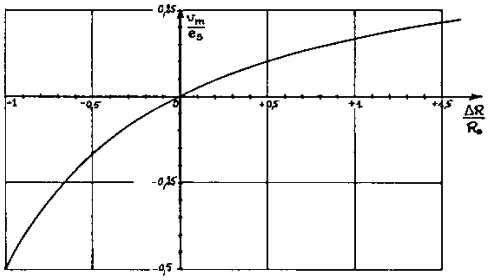


Figure 19 : Valeur de la tension de décalage du pont de Wheatstone

Calcul pour de très faibles variations de Rc :

En faisant une étude autour du voisinage de zéro ($\Delta R / R << 1$), on peut linéariser la relation entre V_m et ΔR :

$$\boxed{V_m = \frac{E}{4}\frac{\Delta R}{R}}$$

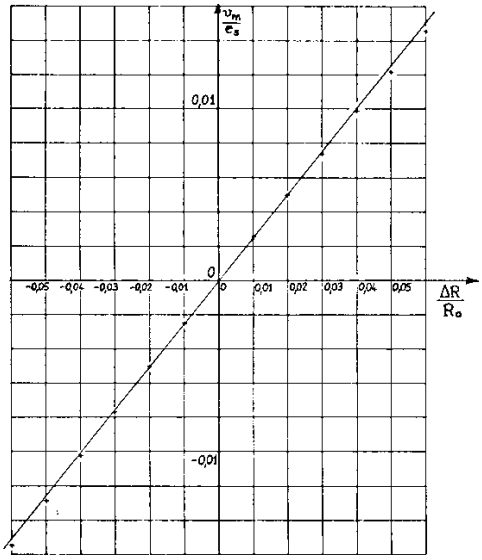


Figure 20 : Evolution de la tension de déséquilibre du pont pour de très faibles variations de Rc

On obtient ainsi une mesure avec une sensibilité constante autour du point d'équilibre.

IV.2.3 Montage oscillant

Un circuit oscillant (LC) présente une fréquence de résonance Fo telle que :

$$Fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Si on insère un capteur capacitif ou inductif dans un tel circuit, ses variations entraîneront une variation Δf de la fréquence d'oscillation du circuit. En supposant des petites variations on obtient une évolution :

$$\frac{\Delta F}{Fo} = -\frac{\Delta L}{2Lo} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta F}{Fo} = -\frac{\Delta C}{2Co}$$

Dans le cas d'un capteur capacitif, on peut utiliser un oscillateur à relaxation :

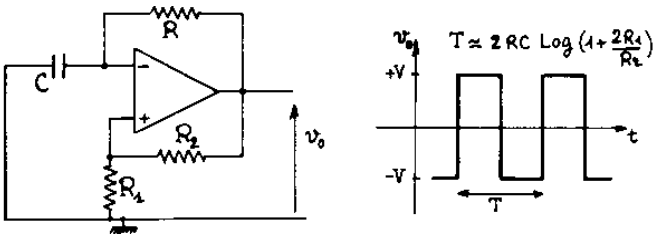


Figure 21 : Schéma électrique d'un montage astable à circuit R-C.

La période des oscillations est directement reliée à la valeur de la capacité par la relation :

$$T = 2RC\log(1 + \frac{2R1}{R2})$$