



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **R400 V1**

Capteurs - Définitions, principes de détection

Date de publication :
10 mars 2009

Cet article est issu de : **Génie industriel | Métier : responsable qualité**

par **Yves PARMANTIER, Frédéric KRATZ**

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **22/03/2022**

Pour le compte : **7200048087 - ecole normale superieure de lyon // 140.77.178.194**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Capteurs

Définitions, principes de détection

par **Yves PARMANTIER**

*Ingénieur de recherche
Animateur du pôle Capteurs - Automatismes, université d'Orléans*

et **Frédéric KRATZ**

*Professeur des universités
Institut Prisme, ENSIB (École nationale supérieure d'Ingénieurs de Bourges)
Responsable de l'équipe – projet MCDS (modélisation, commande et diagnostic des systèmes)*

1. Définitions	R 400 – 2
1.1 Éléments de la chaîne de mesure	– 2
1.2 Transformation de la grandeur physique	– 2
1.3 Type de capteur	– 2
2. Terminologie en métrologie	– 3
2.1 Caractéristiques métrologiques	– 3
2.2 Termes relatifs aux conditions de fonctionnement d'un capteur	– 4
2.3 Quelques autres termes utilisés	– 4
3. Principes de détection utilisés dans les capteurs	– 5
3.1 Variation de résistance	– 5
3.2 Variation d'induction	– 8
3.3 Variation de capacité	– 10
3.4 Variation de quantité d'électricité	– 11
3.5 Variation de fréquence	– 11
3.6 Variation de caractéristique de composant électronique.....	– 11
3.7 Variation de flux lumineux : capteurs optique et optoélectronique	– 11
3.8 Balance de force à système asservi	– 13
Pour en savoir plus	Doc. R 401

Le capteur (en anglais *sensor* ou *transducer*) est le premier maillon de la chaîne de mesure. Il fournit un signal électrique proportionnel à la grandeur physique à mesurer.

Dans cette première partie, nous étudierons les définitions et le vocabulaire de la métrologie, ainsi que les principes de détection utilisés pour réaliser les capteurs.

Cet article est la nouvelle édition de l'article **Capteurs** rédigé par Jacques Toux, auquel sont empruntés certains extraits.

La seconde partie [R 401] détaillera la constitution des capteurs.

1. Définitions

1.1 Éléments de la chaîne de mesure

Les professionnels, utilisateurs et constructeurs de capteurs, ont défini dans un groupe de travail de la CIAME (Commission industrie-administration pour la mesure) le langage à utiliser.

■ **Capteur.** Élément d'un appareil mesureur servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer.

Selon cette définition, le capteur constitue nécessairement le premier élément transducteur.

■ **Transducteur.** Élément qui sert à transformer, suivant une loi déterminée, la grandeur mesurée (ou bien une grandeur déjà transformée de la grandeur mesurée) en une autre grandeur ou une autre valeur de la même grandeur avec une précision spécifiée et qui constitue un ensemble pouvant être utilisé séparément.

■ **Transmetteur.** Élément influencé par une grandeur physique mesurée, qui transmet un signal. Ce peut être un assemblage d'éléments constitué d'un capteur, d'un amplificateur ou d'un convertisseur qui modifie le signal suivant spécification.

■ **Boucle de régulation.** Ensemble des éléments utilisés pour l'asservissement à une grandeur de consigne. Une boucle de régulation va du (ou des) capteur(s) à l'actionneur comme organe de sortie. Les éléments intermédiaires traitent généralement le signal par voie électronique ou pneumatique. Une boucle de régulation peut utiliser des techniques analogiques ou numériques.

■ **Chaîne de mesure.** Suite d'éléments transducteurs et d'organes de liaison d'un instrument de mesure allant du capteur, premier élément de la chaîne, au dispositif indicateur, de stockage ou de traitement qui en est le dernier élément.

■ **Instrument de mesure.** Ensemble de moyens techniques destinés à exécuter les mesures en atelier ou en laboratoire et à matérialiser les mesures.

■ **Évaluation.** L'évaluation consiste à constater, en utilisant des méthodes d'essais appropriées, les performances et les caractéristiques de l'instrument de mesure ou du capteur, objet de l'essai.

1.2 Transformation de la grandeur physique

■ **Transformations directes.** Les variables physiques sont en général traduisibles directement en variables électriques : par exemple, le couple thermoélectrique ou certaines sondes de mesure de pH.

■ **Transformations indirectes.** Les variables mécaniques et certaines variables physiques nécessitent une transformation préalable permettant la traduction en grandeur électrique.

Le capteur comporte alors deux éléments sensibles : par exemple, dans un capteur de force à jauges de contrainte, nous trouvons le corps d'épreuve, ou **élément primaire**, qui relie le phénomène à un deuxième **élément sensible**, le pont de jauges de contrainte, qui assure la transformation en grandeur électrique. Ces éléments secondaires peuvent être actifs ou passifs.

1.3 Type de capteur

■ **Sans apport d'énergie extérieure.** Un quartz piézoélectrique soumis à une force F voit apparaître sur ses faces une charge électrique Q proportionnelle à F . Chaque fois que l'on peut obtenir une force F proportionnelle à la grandeur mesurée (poussée, pression, accélération, etc.), on dispose d'un signal électrique traduisant cette grandeur. On a là un capteur sans source d'énergie

extérieure : le capteur constitue un générateur d'énergie dont la modulation est intérieure au capteur.

Dans cette catégorie figurent les capteurs à variation de flux magnétique. Cette variation, proportionnelle aux variations de la grandeur à mesurer, induit aux bornes d'une bobine ou d'un simple conducteur une force électromotrice E , qui peut être modulée en fréquence (alternateur) ou bien en amplitude (dynamo tachymétrique).

Des exemples de tels capteurs sont donnés dans le tableau 1.

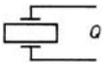
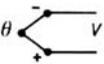
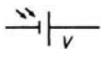
■ **Avec apport d'énergie extérieure.** Considérons un potentiomètre rotatif dont l'axe est entraîné par un élément sensible primaire, par exemple un indicateur de niveau. Si l'on applique aux bornes du potentiomètre une tension fixe E , la tension recueillie entre l'une de ses extrémités et le curseur solidaire de l'axe est proportionnelle à la hauteur du niveau. On a là un capteur avec apport extérieur d'énergie (tableau 2). Le mode de modulation dépend des circuits de mesure associés (exemples : modulation d'amplitude d'une tension alternative alimentant un transformateur différentiel, modulation de fréquence d'un circuit accordé, etc.).

■ **Avec énergie modulée par la grandeur à mesurer.** Dans une sonde ionique, la conductivité du milieu module le courant d'un circuit électrique. Le capteur doit être considéré comme un récepteur d'énergie. On peut citer aussi le cas des mesures d'analyse spectrale où l'on excite la matière le plus souvent par un rayonnement, la cristallographie par rayons X ou γ , etc. (figure 1).

■ **Capteurs passifs, capteurs actifs, conditionneurs.** Il est important de donner quelques définitions fréquemment utilisées quel que soit le type de capteur considéré : les capteurs dont le signal électrique délivré est une variation d'impédance sont dits « **passifs** », car ils nécessitent une source d'énergie électrique pour que l'on puisse lire le signal de mesure.

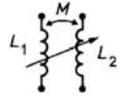
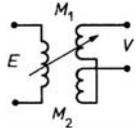
Le circuit dans lequel ils sont incorporés s'appelle le « **conditionneur** ».

Tableau 1 – Exemples de capteurs sans apport d'énergie extérieure

Grandeur mesurée	Élément sensible	Relation	Symbole
Force F	Cristal piézo-électrique	$Q = KF$	
Température θ	Couple thermo-électrique	$V = f(\theta)$	
Flux d'énergie rayonnée R	Cellule photo-voltaïque	$V = f(R)$	
Vitesse dx/dt	Générateur à induction	$E = f(d\Phi/dt) = K(dx/dt)$	

Q charge électrique, V différence de potentiel, E force électromotrice, Φ flux magnétique, K coefficient de proportionnalité.

Tableau 2 – Grandeurs de traduction électrique

Grandeur de traduction	Transformations possibles
	Résistance R : $R = f(p, \ell, s)$ p résistivité, ℓ longueur, s section
	Capacité C : $C = f(S, e, \epsilon)$ S surface des armatures, e distance entre armatures, ϵ permittivité
	Inductance L : $L = f(\ell, S, \mu, n)$ ℓ longueur, S surface d'une spire, n nombre de spires, μ perméabilité
	Inductance mutuelle : $M = f(L_1, L_2)$
	Tension V : $V = f(\omega, M_1, M_2)$ (M_1, M_2 étant généralement fonction d'un paramètre de circuit magnétique) ω pulsation, M_1, M_2 inductances mutuelles

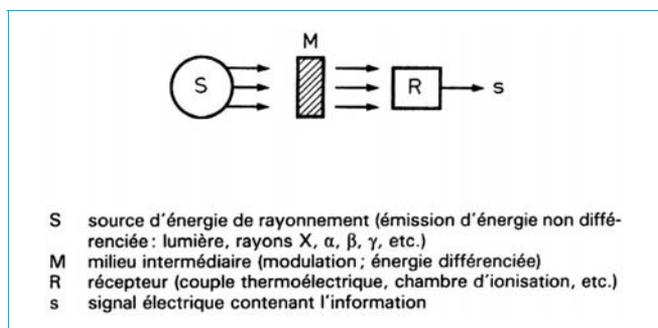


Figure 1 – Modulation d'un rayonnement par modification des propriétés de transmission d'un matériau soumis à une contrainte ou à une déformation

2. Terminologie en métrologie

2.1 Caractéristiques métrologiques

Les liens entre un capteur et la grandeur qu'il mesure sont définis par ses caractéristiques d'emploi.

■ **Étendue de mesure.** Valeur absolue de la différence entre les valeurs extrêmes pouvant être prises par la grandeur à mesurer, pour lesquelles les indications d'un capteur, obtenues à l'intérieur du domaine nominal d'emploi en une seule mesure, ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée.

■ **Portée minimale, portée maximale.** Valeurs de la grandeur à mesurer correspondant aux limites minimale et maximale de l'étendue de mesure.

■ **Zéro.** Valeur prise comme origine de l'information délivrée par le capteur.

Ce sera, suivant le cas :

- soit la valeur de l'information de sortie pour une valeur nulle de la grandeur d'entrée ;
- soit la valeur de l'information de sortie qui correspond à la portée minimale.

■ **Sensibilité.** Pour une valeur donnée de la grandeur mesurée, la sensibilité s'exprime par le quotient de la variation de la grandeur de sortie par la variation correspondante de la grandeur mesurée.

■ **Écart de linéarité** (dans le cas d'une réaction linéaire). Plus grand écart entre la courbe d'étalonnage et une ligne droite appelée « meilleure droite » obtenue par la méthode des moindres carrés. L'écart de linéarité s'exprime en pourcentage de l'étendue de mesure.

■ **Loi de conformité.** Droite ou courbe représentant la relation fonctionnelle liant la grandeur d'entrée à la grandeur de sortie.

■ **Écart de conformité.** Plus grand écart entre la courbe d'étalonnage et la courbe représentant la loi de conformité.

■ **Exactitude (précision).** Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

Erreur de précision. Erreur globale d'un capteur dans les conditions déterminées d'emploi et comprenant l'erreur de justesse ainsi que l'erreur de fidélité.

L'erreur de précision est déterminée en composant les erreurs élémentaires, pour le domaine d'emploi considéré.

Le *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie* publié par l'ISO (Organisation internationale de normalisation) au nom du BIPM, de l'OIML, de la CEI et de l'ISO (identique à NF X 07-001, cf. [Doc R 401]) retient le mot **exactitude**, au lieu de précision.

Se reporter à l'article *Vocabulaire de la mesure* [R 113] dans le présent traité.

■ **Fidélité.** Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des indications concordant entre elles, les erreurs systématiques des valeurs variables n'étant pas prises en considération.

D'après cette définition, la fidélité caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications qui ne sont pas entachées d'erreurs fortuites.

■ **Erreur de fidélité.** C'est un indice de dispersion des indications d'un capteur pour une série d'indications correspondant à une même valeur de la grandeur mesurée.

Pour représenter cet indice, on adopte souvent l'écart type qui est appelé alors « erreur moyenne quadratique de fidélité » pour une série d'indications consécutives dans des conditions déterminées d'emploi du capteur.

■ **Justesse.** Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications égales à la valeur de la grandeur mesurée, les erreurs de fidélité n'étant pas prises en considération.

D'après cette définition, la justesse caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications qui ne sont pas entachées d'erreurs systématiques.

Erreur de justesse. Somme algébrique (résultante) des erreurs systématiques entachant l'indication d'un capteur dans des conditions déterminées d'emploi.

■ **Mobilité.** Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à réagir aux petites variations de la grandeur mesurée.

Erreur de mobilité : variation maximale de la grandeur mesurée qui ne provoque pas de variation décelable de l'indication du capteur.

■ **Erreur de zéro** (appelée également « **biais** »). Écart entre la valeur mesurée et la valeur théorique de l'information de sortie d'un capteur, pour la valeur zéro ou pour la valeur prise comme origine de la grandeur mesurée.

■ **Réversibilité (hystérésis)**. Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner la même indication lorsqu'on atteint une même valeur de la grandeur mesurée, que cette valeur ait été atteinte par variation croissante continue ou décroissante continue de la grandeur.

■ **Erreur de réversibilité**. Différence des indications lorsqu'on atteint la même valeur de la grandeur mesurée soit par variation croissante continue, soit par variation décroissante continue de la grandeur.

L'erreur de réversibilité est égale à l'écart maximal constaté sur ces deux valeurs dans l'étendue de mesure.

Pratiquement, la valeur retenue pour l'erreur d'hystérésis est égale à la moitié de l'erreur de réversibilité. Elle s'exprime en pourcentage de la valeur de l'étendue de mesure.

■ **Finesse**. Qualité exprimant l'aptitude d'un capteur à donner la valeur de la grandeur à mesurer sans modifier celle-ci par sa présence.

Remarque : le vocabulaire international ISO retient le terme « discrétion », pour cette caractéristique.

■ **Rapidité**. Qualité qui exprime la manière de suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer.

Remarque : la caractéristique la plus intéressante à connaître pour caractériser la rapidité dépend essentiellement de la grandeur à mesurer ; elle peut être la bande passante à x %, le temps de réponse à x % à un échelon, etc.

■ **Classe de précision**. La classe d'un appareil de mesure correspond à la valeur du rapport entre la plus grande erreur possible et l'étendue de mesure.

$$\text{Classe} = 100 \times \frac{\text{La plus grande erreur possible}}{\text{Étendue de mesure}}$$

■ **Rangeabilité**. On définit la rangeabilité par le rapport minimal entre l'étendue de mesure et la pleine échelle.

2.2 Termes relatifs aux conditions de fonctionnement d'un capteur

■ **Conditions de référence**. Série de valeurs assorties de tolérances, ou de domaines réduits fixés pour les grandeurs d'influence, qui sont spécifiées pour effectuer les essais comparatifs.

■ **Grandeur d'influence**. Grandeur qui, appliquée de l'extérieur, est susceptible de modifier les caractéristiques métrologiques du capteur. Cette grandeur peut être de nature mécanique, thermique, électrique, chimique, etc.

■ **Domaine nominal d'emploi**. Le domaine nominal d'emploi est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver de façon permanente, d'une part la grandeur à mesurer, d'autre part les grandeurs d'influence, sans que les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur soient modifiées (les erreurs correspondantes ne dépassent pas les valeurs maximales tolérées).

■ **Domaine de non-détérioration**. Le domaine de non-détérioration est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver, d'une part la grandeur à mesurer, d'autre part les grandeurs d'influence, sans que les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur soient altérées après retour dans le domaine nominal.

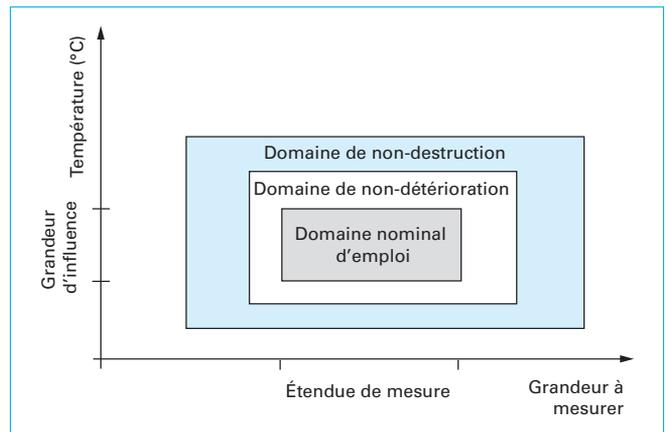


Figure 2 – Domaine de fonctionnement

■ **Domaine de non-destruction**. Le domaine de non-destruction est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre, d'une part la grandeur à mesurer, d'autre part les grandeurs d'influence sans qu'il y ait destruction du capteur, mais dans lequel les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur peuvent être altérées plus ou moins profondément et d'une manière permanente (cf. figure 2).

2.3 Quelques autres termes utilisés

■ **Dérive**. Déplacement lent et progressif du zéro, ou plus généralement de l'indication, au cours du temps.

■ **Erreur moyenne**. Pour une valeur donnée de la grandeur à mesurer, c'est la moyenne arithmétique des erreurs obtenues au cours de l'étalonnage par valeurs croissantes et par valeurs décroissantes de la grandeur à mesurer.

■ **Courbe d'étalonnage**. Elle exprime la correspondance entre les valeurs de la grandeur mesurée et les valeurs indiquées par le capteur. Elle concerne un capteur individuellement désigné.

■ **Reproductibilité**. Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesures d'une même grandeur dans le cas où des mesures individuelles sont effectuées suivant différentes méthodes, au moyen de différents instruments de mesure, par différents observateurs, dans différents laboratoires, après des intervalles de temps assez longs par rapport à la durée d'une seule mesure, dans différentes conditions usuelles d'emploi du capteur utilisé.

■ **Répétabilité**. Étroitesse de l'accord entre les résultats de mesure successifs d'une même grandeur effectués avec la même méthode, par le même observateur, avec les mêmes instruments de mesure, dans le même laboratoire, et à des intervalles de temps assez courts.

■ **Erreur de répétabilité**. C'est un indice de dispersion des indications d'un capteur pour une série de mesures consécutives effectuées dans les mêmes conditions, par un même observateur, avec les mêmes méthodes et à des intervalles de temps assez courts.

■ **Interchangeabilité**. Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à se substituer à un autre capteur sans altérer pour autant les performances d'une chaîne de mesure ou d'une boucle de régulation.

Nota : l'interchangeabilité implique certaines conditions sur les caractéristiques géométriques du capteur aussi bien que sur ses caractéristiques métrologiques.

3. Principes de détection utilisés dans les capteurs

Le tableau 3 donne, dans les grandes lignes, les différents principes de détecteurs utilisés.

3.1 Variation de résistance

3.1.1 Capteur potentiométrique

Le potentiomètre (figure 3) fournit une relation linéaire entre la variable Z_x et la tension de sortie V_s , à condition que le dispositif de mesure de cette dernière ait une impédance d'entrée suffisamment grande.

Les voltmètres et les millivoltmètres électroniques ont une impédance d'entrée supérieure à 1 M Ω . Compte tenu de la dissipation maximale admissible dans les divers éléments du diviseur de tension, la tension E sera choisie aussi élevée que possible. Le circuit ainsi constitué est asymétrique : la tension correspondant au niveau de référence de la grandeur à mesurer n'est pas nulle.

L'évolution dans la fabrication des potentiomètres permet une mesure continue grâce aux pistes plastiques, sans supprimer pour autant l'effet d'usure locale qui limite l'emploi de ce type de capteur.

3.1.2 Capteur extensométrique

Ce type de capteur est le plus utilisé (cf. article *Capteurs à jauges extensométriques* [R 1 860] dans le présent traité). Les extensomètres à jauges de contrainte (strain gauge ou strain gage) sont réalisés sur la base d'un élément résistif, monté en pont, qui détecte la déformation de la structure sur laquelle les jauges sont collées. Dans le montage en pont, le signal est prélevé aux bornes de la diagonale de mesure, le signal correspondant au niveau de référence peut être annulé par un équilibrage du pont (figure 4).

On a :

$$S = \frac{E}{4} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R_i}$$

où $\frac{\Delta R_i}{R_i}$ est la variation relative de résistance de chacune des jauges :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

avec K facteur de jauge,
 $\frac{\Delta \ell}{\ell}$ allongement des jauges.

Des éléments résistifs placés dans les branches du pont permettent des mesures à mieux que 10^{-4} .

3.1.2.1 Jauges collées à fil

Les jauges à fil ont longtemps été utilisées dans les mesures extensométriques en général ; l'évolution des technologies a vu disparaître ce type de jauges au profit de produits plus modernes et plus performants. Toutefois, dans les mesures à haute température ou sous flux de neutrons, les jauges à fil sont toujours présentes. Elles sont constituées par un fil replié, soutenu par un support provisoire d'assemblage et bloqué sur la structure par une projection d'alumine (procédé Rokide) ou par une colle haute température (800 à 1 200 °C).

■ Caractéristiques :

- précision : 10^{-3} ,
- température : 1 200 °C,
- prix : élevé.

3.1.2.2 Jauges à trame pelliculaire

Ce type de jauges est le plus courant (figure 5).

Les fabricants ont fait de gros efforts pour améliorer ce type de produit en travaillant sur la nature et la qualité du support (support polyimide, polyimide renforcé, époxyde, époxyde renforcé), sur la géométrie de la jauge permettant de compenser, par exemple, le fluage des capteurs, sur la nature des métaux utilisés : *Constantan* (cuivre-nickel), *Karma* (nickel-chrome), *Isoélastic* (le plus courant, fer-chrome-molybdène), manganine et platine-tungstène (qui offre un facteur de jauges de 4, au lieu de 2 pour les autres métaux).

Cette méthode permet la fabrication de jauges de forme adaptée à la mesure souhaitée (jauges diaphragme pour les capteurs de pression par exemple) et la fabrication d'éléments résistifs (cuivre pur ; *Balco*, nickel) qui permettent la compensation des capteurs en température.

La gravure permet de fabriquer des jauges de contrainte à haute impédance (5 000 Ω) utilisées dans les transmetteurs 4-20 mA.

■ Caractéristiques :

- précision : mieux que 10^{-4} ,
- température : 130 °C,
- prix : bas sur grande série.

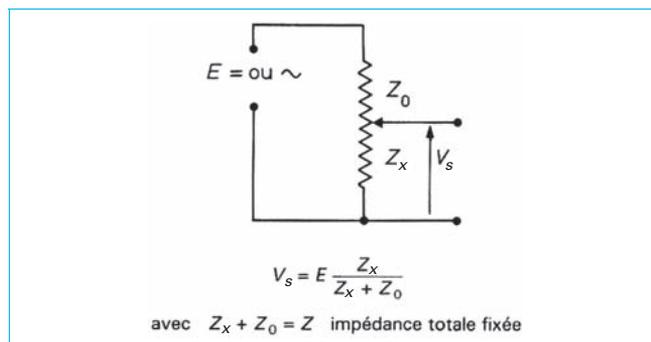


Figure 3 - Montage potentiométrique

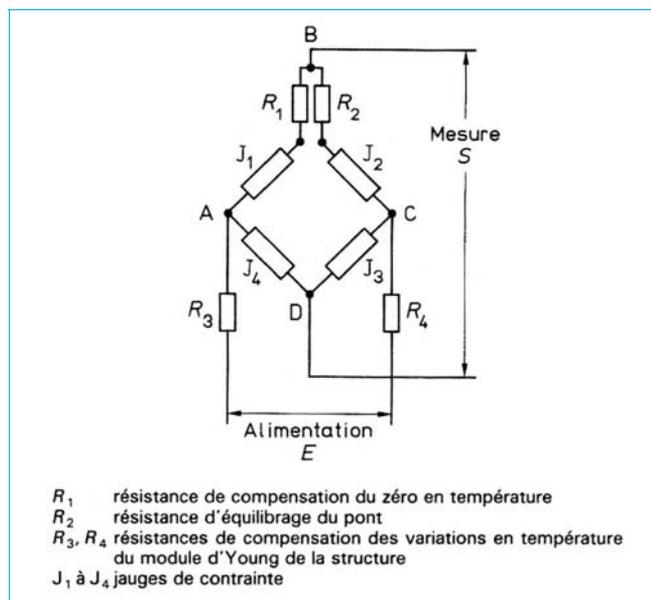


Figure 4 - Montage des jauges extensométriques en pont de Wheatstone

Tableau 3 – Transformations possibles d'une grandeur mesurée (non électrique) en grandeur susceptible d'être mesurée par des procédés électriques et électroniques

Grandeur mesurée	Éléments traducteurs								
	Variation de résistance	Variation d'induction magnétique	Variation de capacité	Variation de quantité d'électricité	Variation de fréquence	Variation de caractéristique de composant	Variation de flux (rayonnement)	Variation de force électromotrice ou de potentiel	Variation du temps de parcours d'ondes ultrasonores
Longueur, épaisseur	Conductivité Potentiométrique Extensométrique	Réductance variable Transformateur différentiel Courants de Foucault	Variation : – de surface des électrodes – de distance – de permittivité		Résonance mécanique		Transparence aux rayons X, γ et β Interférométrie	Sonde à effet Hall	Réflexion des ultrasons
Force, poids	Potentiométrique Extensométrique Piézorésistif	Magnétostriction Mutuelle inductance	Variation : – de surface des électrodes – de distance Effet électret	Piézo électricité Photo électricité	Corde vibrante Quartz, céramique	Effet piézo-FET (transistor à effet de champ)	Magnétostriction Flux lumineux	Pot magnétique	
Pression	Potentiométrique Extensométrique Fil chaud	Transformateur différentiel Mutuelle inductance	Variation de distance des électrodes Effet électret	Piézo électricité	Quartz, céramique Lame vibrante	Effet piézo-FET	Flux lumineux Fibre optique Flux ionique		
Déplacement	Potentiométrique Extensométrique	Variation : – d'entrefer – de réductance Courants de Foucault	Variation : – de distance des électrodes – de surface		Corde vibrante		Codeur optique Flux lumineux		Réflexion des ultrasons
Allongement relatif	Extensométrique		Électrodes scellées en deux points		Corde vibrante				
Temps					Quartz				
Position, niveau	Potentiométrique Codeur	Réductance variable	Variation de distance des électrodes				Codeur optique		Réflexion des ultrasons
Vitesse linéaire	Fil chaud (vitesse de fluides)				Effet Doppler-Fizeau Lame vibrante		Flux lumineux		
Vitesse angulaire	Potentiomètre asservi			Charge et décharge du condensateur	Roue phonique		Flux lumineux Dynamo		
Température	Sonde platine ou à semiconducteur (thermistances)			Quartz oscillant				Couples thermoélectriques	
Conductivité	Mesure directe								
Humidité	Variation d'électrode		Variation de permittivité diélectrique						

Tableau 3 – Transformations possibles d'une grandeur mesurée (non électrique) en grandeur susceptible d'être mesurée par des procédés électriques et électroniques (suite)

Grandeur mesurée	Éléments transducteurs								
	Variation de résistance	Variation d'induction magnétique	Variation de capacité	Variation de quantité d'électricité	Variation de fréquence	Variation de caractéristique de composant	Variation de flux (rayonnement)	Variation de force électromotrice ou de potentiel	Variation du temps de parcours d'ondes ultrasonores
pH, pK			Charge et décharge du condensateur					Électrode spécifique	
Couple	Extensométrique				Optique et mesure du déphasage		Flux lumineux		
Accélération, vibrations	Extensométrique Potentiométrique	Réductance variable	Variation de distance des électrodes	Piézo-électricité	Corde vibrante	Effet piézo-FET		Pot magnétique Effet Hall	

3.1.2.3 Jauges déposées sous vide

Cette technologie (figure 6) consiste à déposer sous vide une couche métallique mince (inférieure à 50 nm) sur une couche isolante et à graver, chimiquement ou sous faisceaux d'ions, des éléments résistifs permettant de remplacer les jauges collées.

Cette méthode permet la fabrication de capteurs à haute performance, surtout en température (voisine de 400 °C).

■ Caractéristiques :

- précision : $0,5 \times 10^{-4}$,
- température : 400 °C,
- prix : plus élevé que les jauges collées.

3.1.2.4 Jauges à fils tendus

Dans ce type de capteur (figure 7), la jauge de contrainte est constituée par des fils tendus sur des ergots fixes A, avec un point mobile B solidaire d'une membrane M. Les fils sont tendus sur des ressorts R maintenant une tension permanente sur les fils.

Sous l'effet de la pression, la membrane va se déformer, la tension mécanique sur les fils va diminuer sur les brins centraux, augmenter sur les brins extérieurs, l'ensemble étant monté en pont.

■ Caractéristiques :

- précision : 10 °C,
- température : 300 °C,
- prix : élevé ou très élevé,
- fragilité forte sous pression maximale.

3.1.3 Capteurs à jauges piézorésistives

L'effet piézorésistif est utilisé dans les capteurs à jauges à semi-conducteur, diffusées ou collées.

L'application d'une contrainte modifie la résistivité du silicium dopé, en modifiant à la fois le nombre des porteurs et leur mobilité. La grandeur et le signe de la variation obtenue dépendent de la concentration des porteurs et de l'orientation cristallographique de la contrainte appliquée [1].

3.1.3.1 Jauges diffusées

La résistance de jauge est obtenue par la diffusion d'impuretés de type P dans un substrat de silicium. La diffusion simultanée dans un même substrat (souvent utilisé comme élément sensible) de quatre résistances formant, après connexion, un pont de Wheatstone complet permet de fabriquer des capteurs miniaturisés

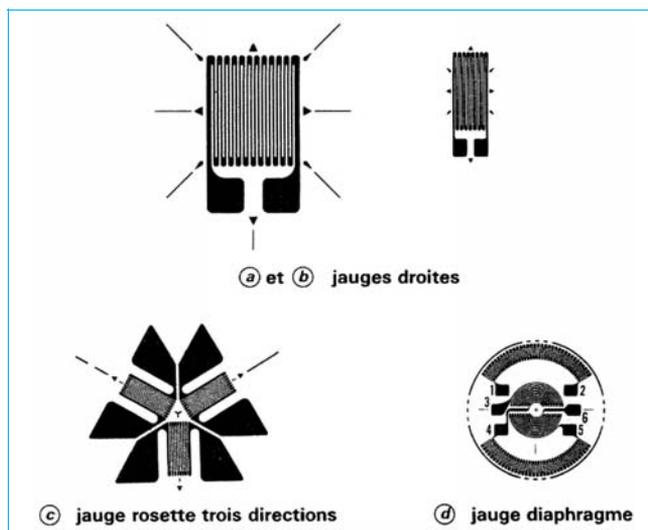


Figure 5 - Jauges à trame pelliculaire

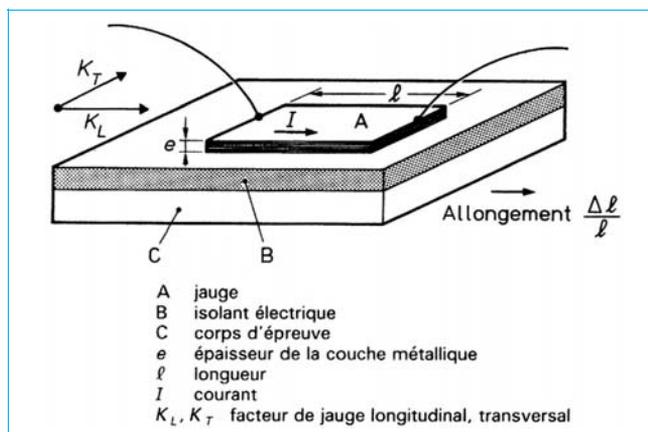


Figure 6 - Jauge déposée sous vide

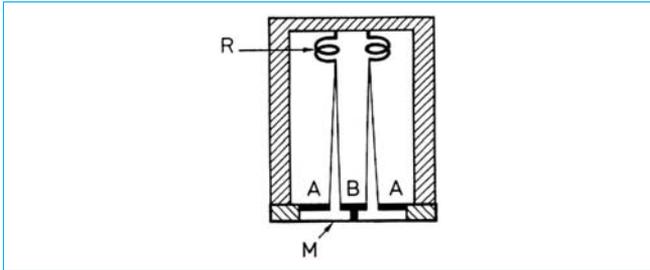


Figure 7 – Jauge à fils tendus

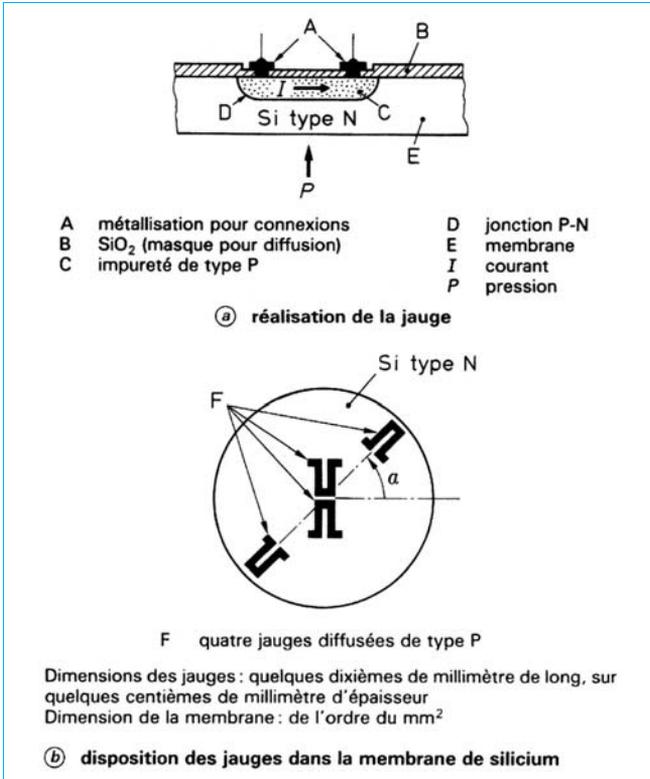


Figure 8 – Capteur de pression à jauges piézorésistives diffusées

(figure 8) à haut signal électrique (100 mV), le facteur de jauge étant très élevé (175 à 200).

■ Caractéristiques :

- précision : 10⁻³,
- température d'utilisation : capteur très sensible à la température (limitée à 150 °C environ).

3.1.3.2 Jauges semiconductrices collées

Ce type de jauges (figure 9) est dit « découpé ». Elles sont formées d'un brin unique de silicium dopé parallèle à la diagonale du cube cristallin pour le silicium type P, perpendiculaire pour le silicium type N.

Ces jauges étant formées d'un brin unique, elles ont une sensibilité transverse pratiquement nulle ; raccordées par *bonding*, elles sont ensuite collées sur la structure comme les jauges des autres types classiques.

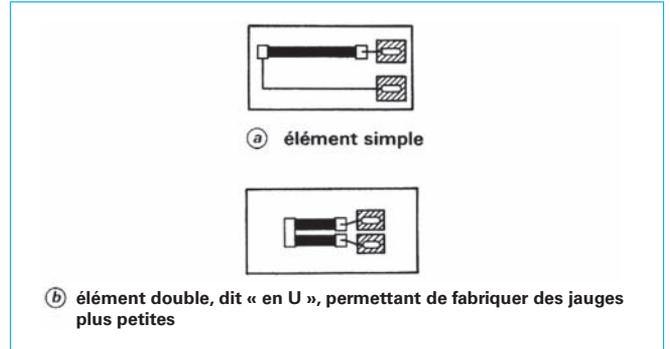


Figure 9 – Jauges semiconductrices collées

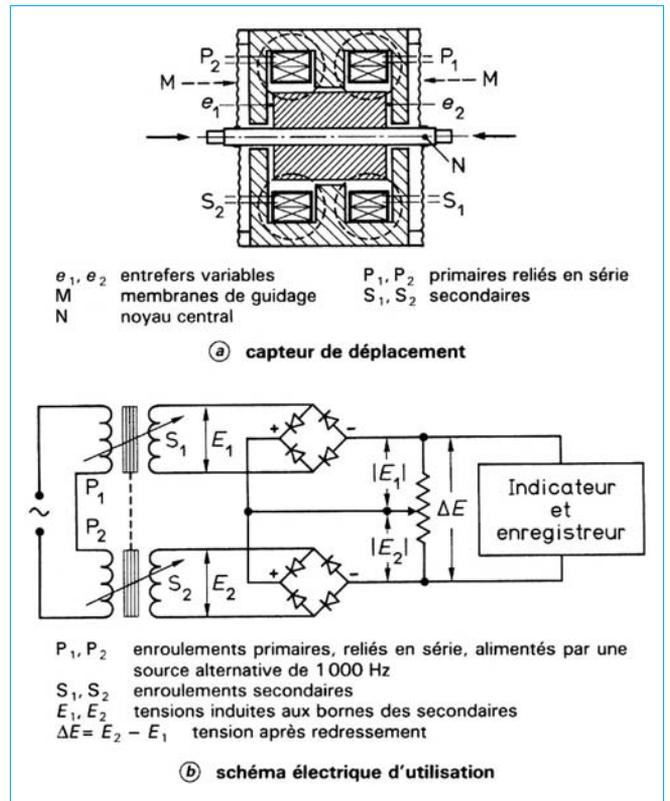


Figure 10 – Capteur de déplacement à variation d'inductance mutuelle

3.2 Variation d'induction

3.2.1 Mutuelle inductance

Dans ce montage, on fait en général varier le couplage entre deux enroulements secondaires S₁, S₂ et un enroulement primaire double P₁, P₂ parcouru par un courant alternatif, cette variation de couplage est effectuée en différentiel (figure 10a).

Le déplacement axial du noyau central N, obtenu au moyen de deux membranes de guidage M, fait varier en sens inverse les entrefers e₁ et e₂. La réluctance du circuit correspondant variant corrélativement, le couplage entre primaire et secondaire se trouve modifié. Les f.é.m. induites varient en sens inverse et proportionnellement au déplacement. Ces f.é.m., après redressement, sont

opposées dans le circuit de mesure comportant un galvanomètre indicateur ou enregistreur (figure 10b).

Nota : f.é.m (forces électromotrices).

Les avantages de cette méthode résident principalement dans la robustesse, l'inutilité d'amplification (l'amplitude de modulation pouvant atteindre 30 %) dans la plupart des cas, la facilité de stabilisation de la tension alternative qui peut, dans certains cas, être prélevée directement sur le secteur.

3.2.2 Réductance variable

Les capteurs de ce type utilisent généralement des circuits symétriques. Considérons, à titre d'exemple, le circuit de la figure 11. La réductance d'un tel circuit magnétique est égale à :

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3$$

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{1}{2} (1/\mu) (\ell/s) \text{ réductance du noyau de fer,}$$

$$\mathfrak{R}_2 \text{ réductance parasite fixe des entrefers non variables,}$$

$$\mathfrak{R}_3 \text{ réductance de l'entrefer variable } \left(\frac{\ell_1}{\mu_0 s} \text{ par exemple} \right).$$

avec μ	perméabilité du noyau,
ℓ	longueur du noyau,
s	section du noyau,
μ_0	perméabilité du vide.

Pour la position médiane de la palette mobile P :

$$\ell_1 = \ell_2 = \ell_0$$

Lorsqu'on fait varier l'entrefer ℓ_1 de $+\Delta x$, l'entrefer ℓ_2 varie de $-\Delta x$.

On peut généralement négliger \mathfrak{R}_1 et \mathfrak{R}_2 devant \mathfrak{R}_3 d'où l'inductance du capteur :

$$L = \mu_0 N^2 s / \ell_1$$

avec N nombre de spires.

et

$$\Delta L/L = -(\Delta x/\ell_1)$$

I_0 étant l'intensité du courant pour la position d'équilibre, on aura en fonction du déplacement Δx une variation de courant :

$$\Delta I = \frac{I_0}{1 + (R/L\omega)^2} \cdot \frac{\Delta x}{\ell_1}$$

Pratiquement, on redresse les courants et on les oppose de manière à annuler la composante continue et à avoir une compensation automatique des dérives. Toutefois, ces relations ne sont valables que pour autant que Δx reste suffisamment faible devant ℓ .

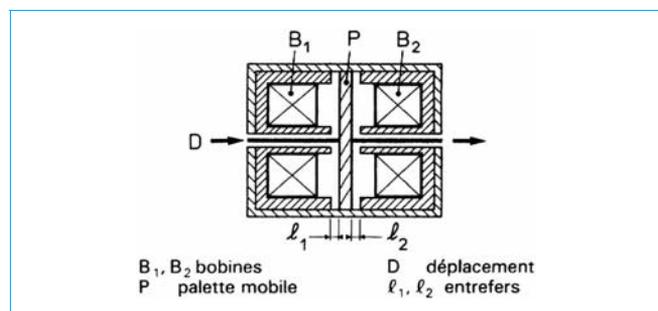


Figure 11 – Capteur de déplacement à variation de réductance

3.2.3 Transformateur différentiel

Le transformateur différentiel (figure 12) est constitué de deux enroulements secondaires placés symétriquement par rapport au primaire. Le déplacement d'un noyau ferromagnétique modifie le couplage entre le primaire et chacun des secondaires reliés en opposition, les forces électromotrices induites par mutuelle induction se soustraient.

3.2.4 Magnétostriction

Les propriétés magnétiques de certains corps (fer, cobalt, nickel, etc.) varient lorsqu'on soumet ces corps à une contrainte mécanique (effet Villari). C'est ainsi que, lorsqu'un barreau en métal magnétique de longueur ℓ s'allonge de $\Delta \ell$ sous l'action d'une force F , on constate une diminution de l'induction B :

$$CdB = \Delta \ell / \ell$$

où C est une constante.

Dans le nickel par exemple, une contrainte de 10 MPa réduit l'aimantation de 5 % environ. La valeur du coefficient C dépend, entre autres, de la valeur initiale du champ.

L'induction préalable peut être celle d'un barreau déjà aimanté en alliage de nickel, ou bien celle que l'on obtient en faisant passer un courant continu dans un enroulement d'excitation. Généralement, le magnétisme rémanent du barreau donne un flux suffisant.

En disposant une bobine concentrique, on peut induire dans cette dernière des f.é.m. consécutives aux variations de flux.

Erwing ayant vérifié que, pour de faibles variations $d\sigma$ de contrainte, l'induction varie linéairement, on peut écrire :

$$K d\sigma/dt = d\Phi/dt$$

avec Φ flux magnétique,
 K constante.

et si l'on envisage une variation périodique de la contrainte :

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \sin \omega t$$

la f.é.m. induite est :

$$E = -N(d\Phi/dt) = -K\sigma_1 \omega N \cos \omega t$$

N nombre de spires.

La f.é.m. induite est donc proportionnelle à la vitesse de variation de la contrainte et, pour obtenir la variation d'amplitude de la contrainte, il y a lieu d'intégrer cette f.é.m. au moyen d'un circuit approprié.

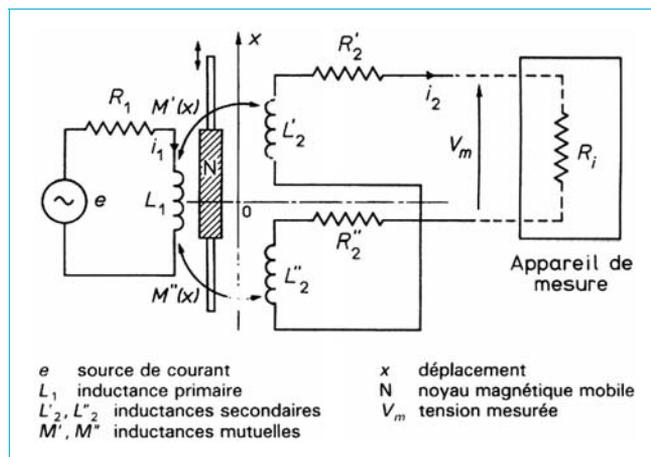


Figure 12 – Schéma électrique simplifié du transformateur différentiel

e source de courant
 L_1 inductance primaire
 L_2, L_2' inductances secondaires
 M', M'' inductances mutuelles
 x déplacement
 N noyau magnétique mobile
 V_m tension mesurée

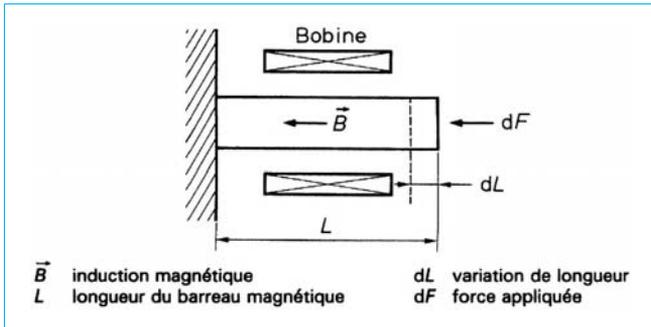


Figure 13 – Principe de la magnétostriction

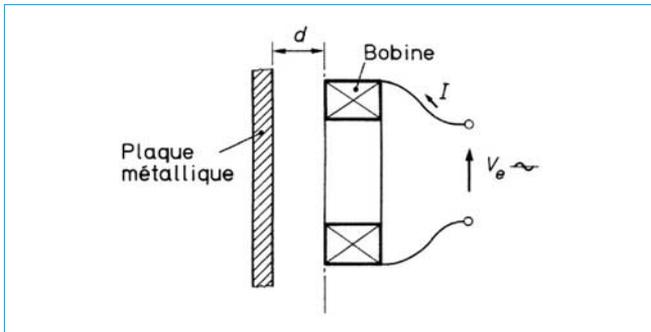


Figure 14 – Capteur à courants de Foucault

Les barreaux au nickel avec une bobine concentrique peuvent être utilisés pour la réalisation de capteurs de vibrations ou d'accélération, ou pour la mesure directe d'efforts variables (figure 13).

3.2.5 Courants de Foucault

En approchant d'une plaque métallique (figure 14) une bobine alimentée par une tension alternative constante, V_e , il se développe dans la plaque métallique des courants de Foucault. Lorsque la distance d diminue, les pertes par courants de Foucault augmentent, entraînant un accroissement du courant d'alimentation I , et inversement lorsque d augmente.

3.3 Variation de capacité

3.3.1 Variation de surface active des armatures

Il s'agit la plupart du temps de condensateurs plans ou de condensateurs cylindriques dont l'armature subit le déplacement à traduire par une variation de capacité.

– Pour le condensateur plan (figure 15a), la variation de capacité dC est proportionnelle à la variation da de l'angle de recouvrement des armatures fixe et mobile.

– Pour le condensateur cylindrique (figure 15b), on a :

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r\ell}{\ln(r_2/r_1)}$$

avec ϵ_0 permittivité du vide,
 ϵ_r permittivité relative du diélectrique,
 ℓ enfoncement du cylindre de rayon r_1 dans le cylindre de rayon r_2 .

3.3.2 Variation de distance entre les armatures

Le condensateur est destiné à la traduction de déplacements rectilignes, il est inséré dans un montage en pont (figure 16). Pour

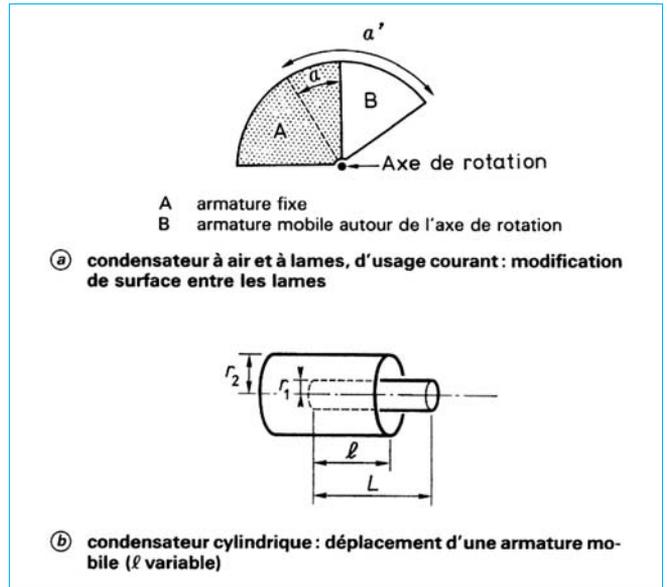


Figure 15 – Capteurs à variation de capacité par armature mobile

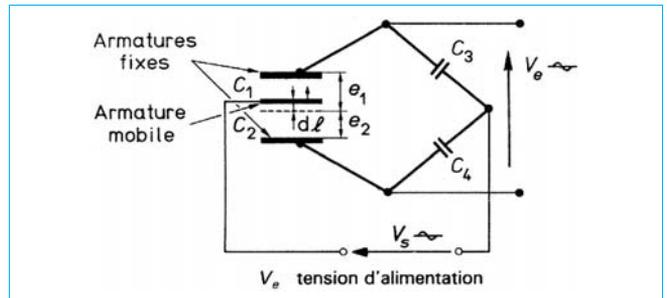


Figure 16 – Capteur à variation de capacité par variation de distance entre les armatures

$d\ell = 0$, le pont est équilibré : $V_s = 0$. Pour un déplacement $d\ell$ de l'armature mobile, la tension de sortie V_s est proportionnelle à $d\ell$.

La sensibilité d'un tel condensateur est beaucoup plus importante que dans le cas d'une variation de surface (exemple : $10^{-2} \mu\text{m}$ pour le capteur Fogale).

3.3.3 Variation de permittivité

Les capteurs de ce type sont constitués par deux armatures d'un condensateur à air entre lesquelles on introduit un diélectrique de forte permittivité. Ce diélectrique est en général un liquide car le procédé est surtout utilisé en capteur de niveau (figure 17).

Le système est équivalent à deux condensateurs en parallèle, de capacités C_1 et C_2 ; la capacité totale est :

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0\ell}{e} (\epsilon_r x + L - x)$$

3.3.4 Effet électret

Cet effet est la propriété qu'ont certains diélectriques solides (polymères : PTFE, Téflon, polypropylène, etc.) de conserver une polarisation après application d'un champ électrique.

Une feuille de plastique métallisée (figure 18) constitue une électrode d'un condensateur et repose sur une deuxième électrode dont la surface est gaufrée. Si l'on applique une pression sur la face supérieure, la membrane se déforme et la capacité entre les deux électrodes varie.

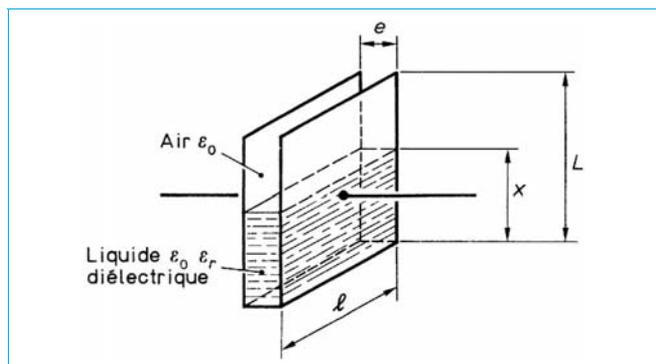


Figure 17 – Capteur de niveau à variation de capacité par variation de permittivité

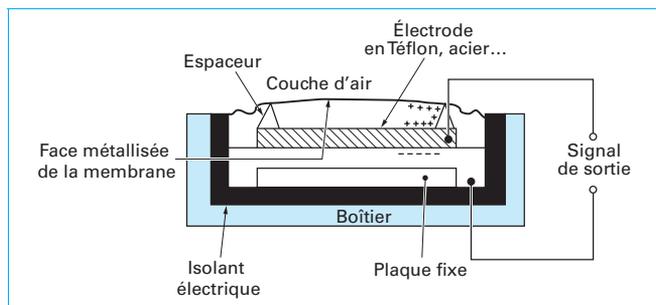


Figure 18 – Microphone à électrets (d'après P. Chabot et A. Boissinot)

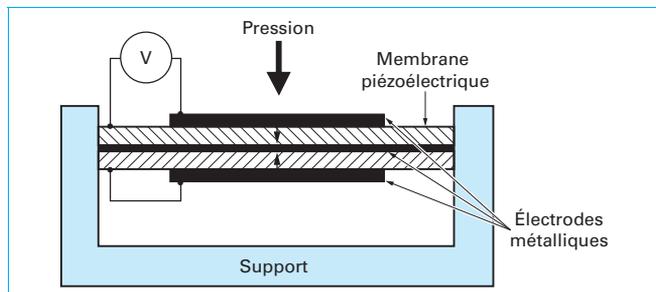


Figure 19 – Capteur à effet piézoélectrique

3.4 Variation de quantité d'électricité

■ **Piézoélectricité.** L'effet piézoélectrique (figure 19) est la particularité que possèdent certains matériaux (quartz, céramiques PZT, etc.) de se polariser électriquement lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques convenablement orientées par rapport aux axes cristallographiques.

La quantité d'électricité apparaissant en surface du cristal peut s'écrire :

$$q = KF$$

avec K module piézoélectrique ou constante de Curie,
 F contrainte mécanique.

■ **Photoélectricité.** La cellule photoélectrique permet de mesurer des rayonnements (cas de la mesure de température) ou peut être utilisée comme élément sensible secondaire pour transformer une grandeur physique en courant électrique.

Ce type de capteur fait partie d'une famille détaillée dans le paragraphe 3.7.

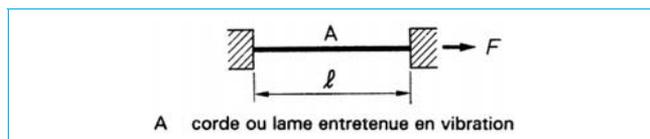


Figure 20 – Corde vibrante

3.5 Variation de fréquence

■ **Corde vibrante.** Dans ce type de capteur, le *corps d'épreuve* est une corde d'acier tendue entre deux points ancrés dans une structure ou dans un élément de capteur.

Un dispositif d'excitation fait vibrer la corde. Un dispositif de détection mesure les variations de fréquence directement liées à la tension mécanique ou à un déplacement (figure 20).

La fréquence propre de la corde est :

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho S}}$$

avec F force appliquée,
 l longueur de la corde,
 S section de la corde,
 ρ masse volumique.

■ **Quartz et céramiques.** Les quartz et céramiques sont utilisés en piézoélectricité. On peut mesurer des pressions, des forces, etc., en exploitant la variation de fréquence d'un quartz ou d'une céramique.

Si le quartz est excité, sa fréquence de résonance sera modifiée par l'application d'un dépôt, par exemple, ou par la modification d'un débit de fluide. En rendant variable l'épaisseur de la lame d'air entre un quartz oscillant et l'une de ses électrodes, on peut modifier la fréquence d'oscillation.

Sur un diaphragme de quartz, d'autres solutions sont possibles en mesurant la fréquence par des résonateurs à ondes de surface.

3.6 Variation de caractéristique de composant électronique

Effet piézo-FET ou piézo-transistor

Le transistor piézoélectrique à effet de champ (piézo-FET) est un élément actif intégré conçu et réalisé pour avoir une sensibilité maximale à la contrainte. La force appliquée est transmise par une pointe qui modifie la conduction dans la jonction émetteur-base (figure 21).

3.7 Variation de flux lumineux : capteurs optique et optoélectronique

Se reporter à l'article *Détecteurs de rayonnements optiques* [R 6 450] dans le présent traité, et *Physique des dispositifs électroniques* [E 1 100] dans le traité *Électronique* (cf. [Doc. R 401]).

3.7.1 Photodétecteurs

■ **Cellule photoconductrice.** La photoconduction résulte d'un effet photoélectrique interne. La lumière libère dans le matériau semi-conducteur des charges électriques provoquant une augmentation corrélative de la conductivité (figure 22).

Le courant photoélectrique I_p s'écrit :

$$I_p = V(\sigma_{ph} - \sigma_o) \frac{A}{L}$$

avec V tension appliquée,
 σ_{ph} conductivité photo-induite,
 σ_o conductivité à l'obscurité.

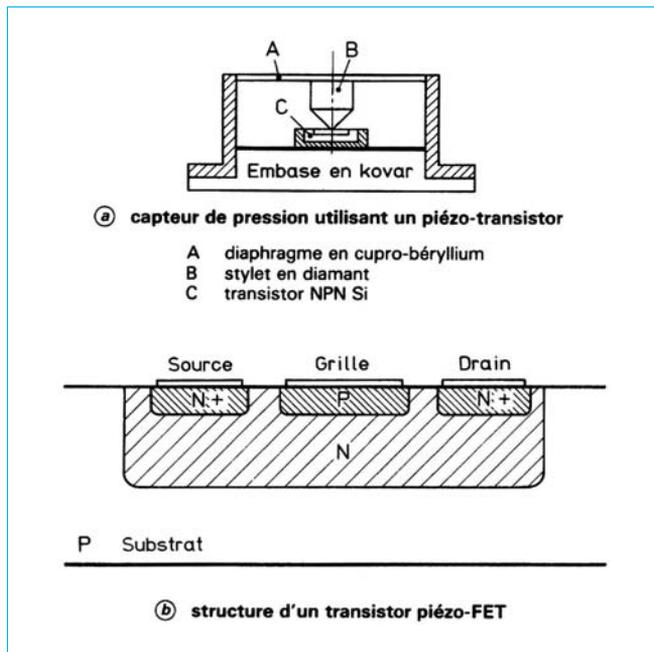


Figure 21 – Capteur à transistor piézo-FET

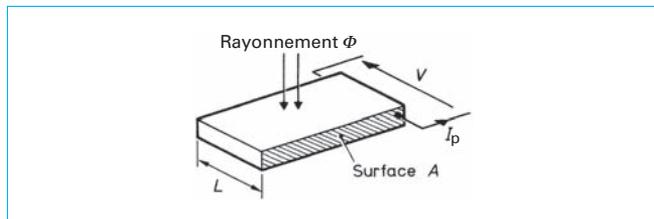


Figure 22 – Cellule photoconductrice

■ **Photodiode à jonction PN.** La zone de charge d'espace, localisée entre une jonction d'un semi-conducteur de type N et d'un semi-conducteur de type P, est dénuée de porteurs libres en équilibre à cause du champ électrique qui établit entre les deux éléments de semi-conducteur une barrière de potentiel Φ (figure 23). Celle-ci est modifiée par une tension extérieure appliquée. Un courant traverse alors la jonction.

Sous l'action du rayonnement lumineux, il y a augmentation des porteurs minoritaires et le courant traversant la diode s'écrit :

$$I = I_0 [\exp(e V/kT) - 1] - I_{ph}$$

- avec I_0 courant de saturation inverse,
 e charge de l'électron,
 V tension appliquée,
 k constante de Boltzmann,
 T température thermodynamique,
 I_{ph} courant dû à l'éclairement.

Ces photodiodes peuvent fonctionner en mode photoconducteur (une source polarise la diode en inverse, et le signal est recueilli aux bornes d'une résistance) ou en mode photovoltaïque (aucune source de polarisation externe).

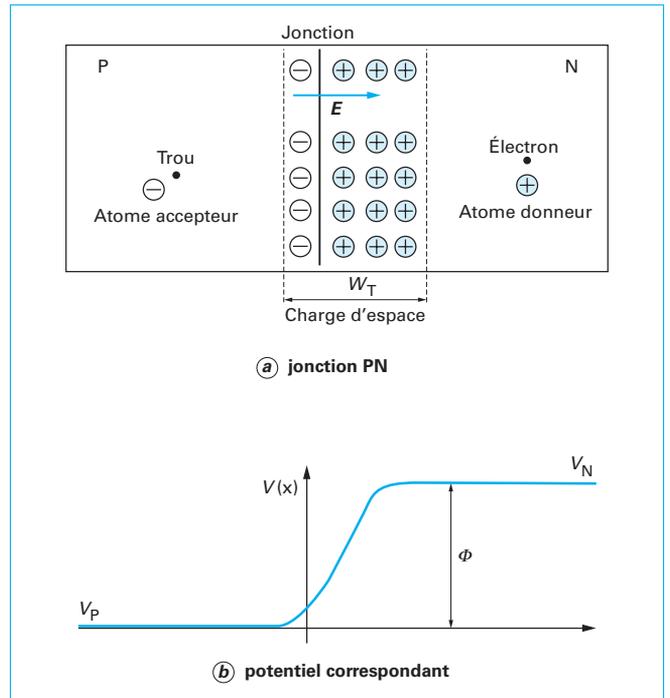


Figure 23 – Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique en circuit ouvert (d'après http://www.brive.unilim.fr/files/fichiers/quere/Elec_phys/CHAP_2.pdf)

■ **Photodiode à avalanche.** En appliquant à une diode une tension inverse inférieure à sa tension de claquage, l'énergie des porteurs créés par effet photoélectrique est suffisante pour ioniser par choc des atomes de la zone de transition et créer une nouvelle paire électron-trou, à son tour, peut reproduire le même processus. Il y a multiplication des porteurs et la diode est le siège d'un phénomène d'avalanche, qui est linéaire : le courant d'origine photoélectrique est multiplié par un facteur contrôlable par la tension inverse.

3.7.2 Fibres optiques

Les fibres optiques sont des guides d'ondes lumineuses très utilisées en transmission d'informations.

Elles peuvent aussi être employées en modulateurs de signaux optiques : sous l'action d'une grandeur physique (contraintes, déformations), la fibre optique modifie les conditions de propagation de la lumière ; c'est la fibre qui constitue l'élément sensible.

Se reporter à l'article *Capteurs à fibres optiques* [R 412] dans le présent traité.

Exemple d'un capteur : une illustration schématique du transducteur de température à fibres optiques de la série de produits WLPI d'Opsens (Canada) apparaît sur la figure 24. Son principe de fonctionnement repose sur un interféromètre à polarisation fait d'un cristal dont la biréfringence dépend fortement de la température (brevets en instance). Un polariseur rectiligne est placé sur la face d'entrée du cristal biréfringent et sa face arrière est recouverte d'un miroir diélectrique. Cet ensemble forme un interféromètre à polarisation à deux ondes.

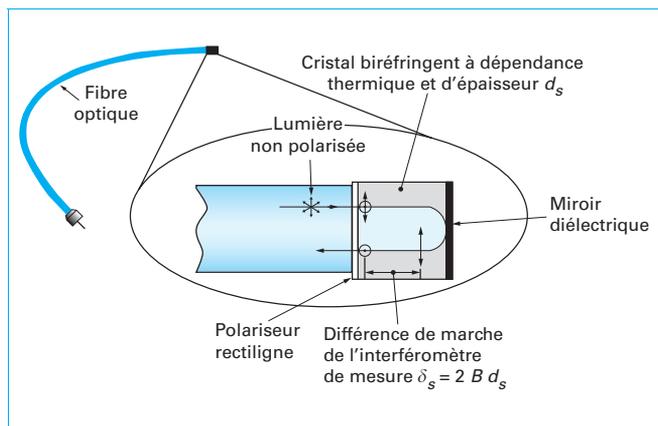


Figure 24 – Transducteur de température à base d'interféromètre à polarisation (document Opsens, Canada)

3.8 Balance de force à système asservi

Le principe de mesure fait appel à une méthode de zéro. Par un système d'asservissement, on oppose à la force à mesurer une force égale, connue et de signe opposé. La grandeur d'asservissement, généralement un courant électrique, représente la grandeur de sortie. La figure 25 illustre le principe.

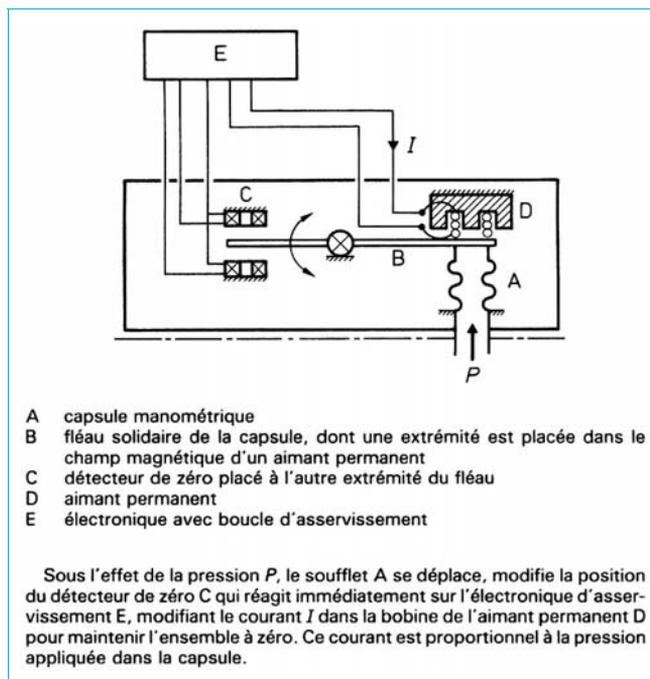


Figure 25 – Capteur à balance de force, ou équilibre de forces

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre, leurs compléments et mises à jour,** et bénéficiez des **services inclus.**



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- **+ de 350 000 utilisateurs**
- **+ de 10 000 articles de référence**
- **+ de 80 offres**
- **15 domaines d'expertise**

- Automatique - Robotique
- Biomédical - Pharma
- Construction et travaux publics
- Électronique - Photonique
- Énergies
- Environnement - Sécurité
- Génie industriel
- Ingénierie des transports
- Innovation
- Matériaux
- Mécanique
- Mesures - Analyses
- Procédés chimie - Bio - Agro
- Sciences fondamentales
- Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com