

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 74 (1983)

**Heft:** 9

**Artikel:** Mécanismes de conversion et choix des capteurs

**Autor:** Robert, P.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904791>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Mécanismes de conversion et choix des capteurs

Ph. Robert

La classification des capteurs la plus fondamentale utilise comme critère, le mode de conversion pris au sens large. Elle conduit à définir trois catégories: les capteurs à conversion d'énergie directe, les capteurs à modulation et les capteurs à contre-réaction. Les caractéristiques les plus importantes de chaque catégorie sont présentées et illustrées par quelques exemples. La physique du solide contribue au développement des capteurs par la mise à disposition de matériaux nouveaux (sensibilité, miniaturisation), la micro-électronique et la micro-informatique, par l'augmentation de la tolérance au bruit et la diminution de l'effet des grandeurs d'influence, rendues possibles par un traitement de signaux sophistiqué.

Als Kriterium zur Hauptunterteilung der Sensoren verwendet man die generelle Art der Umwandlung. Dies führt zu drei Kategorien: Sensoren ohne Hilfsenergie, Modulations- sowie Kompensationssensoren. Die wichtigsten Eigenschaften jeder Kategorie werden dargestellt und an Beispielen erläutert. Zur Weiterentwicklung der Sensoren trägt einerseits die Festkörperphysik mit neuen Materialien bei (Empfindlichkeit, Miniaturisierung), andererseits die Mikroelektronik und Mikroinformatik durch die Erhöhung der Geräuschtoleranz und die Verminderung des Einflusses störender Größen, was durch ausgeklügelte Signalverarbeitung möglich geworden ist.

Conférence présentée à la Journée d'information ASE «Les capteurs – base de l'automatique de demain», le 8 mars 1983 à l'EPFL à Ecublens.

## Adresse de l'auteur

Prof. Ph. Robert, Laboratoire de métrologie, EPFL, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.

## 1. Introduction

Quel que soit son rôle, un système de mesure par voie électrique correspond invariablement à une partie ou à la totalité du schéma de la figure 1. La grandeur à mesurer peut être de nature quelconque: vitesse, masse, pression, température, débit, concentration, turbidité, couleur, etc. Elle est tout d'abord convertie en grandeur électrique brute au moyen d'un capteur. Le signal délivré par le capteur n'est, le plus souvent, pas utilisable tel quel, mais il doit déjà posséder trois propriétés fondamentales:

- être lié à la grandeur à mesurer d'une façon bi-univoque,
- être soit insensible aux grandeurs d'influence, soit dépendre de celles-ci d'une manière précise de façon à ce qu'une correction d'erreur systématique soit possible,
- ne pas présenter d'erreur fortuite trop importante, c'est-à-dire posséder un rapport signal/bruit acceptable.

En fonction de sa qualité, le signal délivré par le capteur fera l'objet d'un traitement plus ou moins complexe. L'éventail des possibilités utilisables comprend l'amplification et le filtrage du côté des techniques «légères». La modulation du signal en vue d'une détection synchrone (lock-in), l'échantillonnage ordinaire ou associé à un déclenchement à retard variable (box-car), la corrélation, le moyennage numérique, les transformations telles que

la FFT<sup>1)</sup> sont des techniques très puissantes. Bien que connues de longue date, leur emploi est resté longtemps limité en raison du volume de matériel nécessaire à leur mise en œuvre. La micro-électronique et les possibilités qu'elle offre par l'intégration à large échelle rend l'usage de ces techniques «lourdes» de plus en plus fréquent. Cet apport de la micro-électronique à la métrologie est essentiel car il permet d'abaisser significativement les exigences en matière de qualité du signal délivré par le capteur. La gamme des mécanismes de conversion s'en trouve élargie considérablement. La grandeur électrique épurée disponible après le traitement du signal est mesurée sans difficultés et le résultat transféré vers l'utilisateur, par l'intermédiaire éventuel d'une unité de traitement du résultat. Cette unité, dans laquelle la micro-électronique joue également un rôle important, permet l'analyse des phénomènes détectés par les capteurs et la synthèse des informations en provenance de plusieurs sources.

## 2. Trois types de capteurs

La grande diversité des capteurs, liée au fait que toutes les sciences ou presque en font usage, rend indispensable une classification. La plus fonda-

<sup>1)</sup> FFT = Fast Fourier Transform

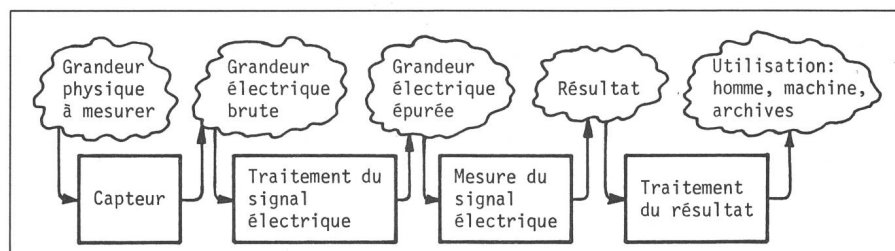


Fig. 1 Système de mesure

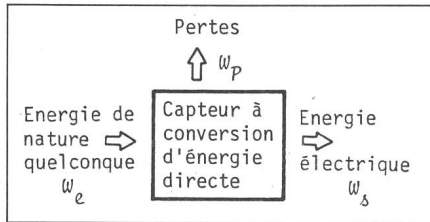


Fig. 2 Principe du capteur à conversion d'énergie directe

mentale est celle basée sur le mode d'action de la grandeur à mesurer. Elle permet de classer tous les capteurs en trois catégories.

### 2.1 Capteurs à conversion d'énergie directe

Ce sont les capteurs qui utilisent une puissance ou une énergie liée à la grandeur à mesurer  $e_D$ , et la convertissent directement en une puissance ou une énergie électrique (fig. 2).

Le capteur piézo-électrique en est un exemple typique. Le rendement  $\eta = W_s/W_e$  de la transformation étant connu, le problème de la perturbation de la grandeur à mesurer par le capteur lui-même est entièrement défini. A  $e_D$ , ce capteur associe *obligatoirement* une grandeur  $e^*$  telle que

$$e_D \cdot e^* = \text{puissance} \quad (1)$$

soit encore

$$\int e_D \cdot e^* dt = \text{énergie} \quad (2)$$

Si  $e_D$  est une variable d'effort (intensive),  $e^*$  est une variable d'écoulement (extensive) et réciproquement. Les variables  $e_D$  et  $e^*$  constituent les véritables liens physiques entre le capteur et ce qu'il mesure. D'un côté, ces variables sont liées par une loi propre à la source délivrant  $e_D$ . De l'autre, elles sont liées par une loi caractéristique du capteur lui-même. Lorsque ces deux lois sont linéaires, les comportements de la source et du capteur sont entièrement déterminés par un paramètre chacun. La dimension de ces paramètres varie selon que  $e_D$  est une variable d'effort ou d'écoulement d'une part, selon que la mesure s'effectue par transfert d'une puissance ou d'une énergie d'autre part. L'ensemble des cas possibles est inventorié aux tableaux I et II. Les grandeurs n'y portent pas d'indice lorsqu'elles se rap-

portent à la source et portent l'indice  $c$  lorsqu'elles se rapportent au capteur.

Pendant la mesure,  $e_D$  et  $e^*$  ont même valeur à la source et sur le capteur, il s'ensuit que

$$e_{D0} = (1 + X/X_c)e_D \quad (3)$$

où  $X$  représente  $R$ ,  $S$ ,  $G$  ou  $C$  selon le cas.

La perturbation de la grandeur à mesurer est donc d'autant plus faible que  $X/X_c$  est petit comparé à 1, mais elle n'est jamais nulle. C'est l'une des caractéristiques de ce type de capteur. A titre d'illustration, les tableaux III et IV donnent les grandeurs associées  $e^*$  et la dimension des paramètres  $R$ ,  $S$ ,  $G$ ,  $C$  pour quelques variables d'effort et d'écoulement courantes.

On constate par exemple que la mesure d'une force implique nécessairement un déplacement de son point d'application. Ce déplacement est limité dans le cas d'un capteur utilisant un transfert d'énergie (ressort p.ex.) alors qu'il est indéterminé pour un capteur utilisant un transfert de puissance (frottement p.ex.). De même, la mesure de la pression d'un fluide est impossible sans un écoulement de ce fluide, limité (membrane, transfert d'énergie) ou illimité (fuite calibrée, transfert de puissance).

Cas:  $e_D = \text{variable d'effort}$

Grandeur mesurée	Grandeur associée		Résistance généralisée $R = e_D/e^*$	Rigidité généralisée $S = e_D/\int e^* dt$
	(Puissance) $e^*$	(Energie) $\int e^* dt$		
Tension électrique V	Courant électrique A	Charge électrique C	Résistance électrique $V/A = \Omega$	$V/c = 1/F$
Force N	Vitesse linéaire m/s	Déplacement m	$\frac{N}{m/s}$	N/m
Couple N·m	Vitesse de rotation rad/s	Rotation rad	$\frac{N \cdot m}{rad/s}$	$\frac{N \cdot m}{rad}$
Pression N/m <sup>2</sup>	Débit volumique m <sup>3</sup> /s	Volume m <sup>3</sup>	$\frac{N/m^2}{m^3/s}$	$\frac{N/m^2}{m^3}$
Température K	Coeff. de transfert de chaleur W/K	Transfert de chaleur J/K	$\frac{K}{W/K}$	$\frac{K}{J/K}$

Cas:  $e_D = \text{variable d'effort}$

$e^* = \text{variable d'écoulement}$

Tableau I

Transfert	Système délivrant $e_D$	Capteur
Puissance	$e_D = e_{D0} - Re^*$	$R_c = e_D/e^*$
Energie	$e_D = e_{D0} - \int Se^* dt$	$S_c = e_D/\int e^* dt$

Cas:  $e_D = \text{variable d'écoulement}$

$e^* = \text{variable d'effort}$

Tableau II

Transfert	Système délivrant $e_D$	Capteur
Puissance	$e_D = e_{D0} - Ge^*$	$G_c = e_D/e^*$
Energie	$e_D = e_{D0} - \int Ce^* dt$	$C_c = e_D/\int e^* dt$

$e_{D0}$  = valeur de  $e_D$  non perturbée par le capteur

$R$  = résistance généralisée

$S$  = rigidité généralisée

$G$  = conductance généralisée

$C$  = souplesse généralisée

### 2.2 Capteurs à modulation

La grandeur  $e_D$  modifie un paramètre du capteur, ce qui implique souvent mais *pas nécessairement* l'existence d'un travail ou d'une énergie fournie par la source de  $e_D$ , et par conséquent la présence d'une grandeur associée  $e^*$ . Ce qui distingue le plus nettement ce type de capteur du précédent, c'est le fait que cette modification n'est elle-même génératrice d'aucune énergie électrique et qu'il faut par conséquent recourir à une source extérieure de tension pour la détecter.

La figure 3 représente schématiquement un capteur à modulation, dans lequel  $e_D$  produit une variation de ré-

Tableau III

Cas:  $e_D = \text{variable d'écoulement}$

Tableau IV

Grandeur mesurée $e_D$	Grandeur associée		Conductance généralisée $G = e_D / e^*$	Souplesse généralisée $C = e_D / \int e^* dt$
	(Puissance) $e^*$	(Energie) $\int e^* dt$		
Courant électrique A	Tension électrique V	Flux d'induction magnétique $\int U dt = \Phi$	Conductance électrique A/V = S	A/Vs
Déplacement m	N/s	Force N	$\frac{m}{N/s}$	$\frac{m}{N}$
Rotation rad	Nm/s	Couple Nm	$\frac{rad}{Nm/s}$	$\frac{rad}{Nm}$
Vitesse linéaire m/s	Force N	$\int (\text{force}) dt$ Ns	$\frac{m/s}{N}$	$\frac{m/s}{Ns}$
Vitesse de rotation rad/s	Couple N·m	$\int (\text{couple}) dt$ Nms	$\frac{rad/s}{Nm}$	$\frac{rad/s}{Nms}$
Accélération linéaire m/s <sup>2</sup>	$\int (\text{force}) dt$ Ns	Ns <sup>2</sup>	$\frac{m/s^2}{Ns}$	$\frac{m/s^2}{Ns^2}$
Accélération de rotation rad/s <sup>2</sup>	$\int (\text{couple}) dt$ Nms	Nms <sup>2</sup>	$\frac{rad/s^2}{Nms}$	$\frac{rad/s^2}{Nms^2}$
Débit volumique m <sup>3</sup> /s	Pression N/m <sup>2</sup>	$\int (\text{pression}) dt$ $\frac{Ns}{m^2}$	$\frac{m^3/s}{N/m^2}$	$\frac{m^3/s}{Ns/m^2}$

sistance. Elle correspond à l'exemple typique d'un capteur de pression piézorésistif à jauge de contrainte diffusée sur une membrane de silicium. Les capteurs de champ magnétique basés sur l'effet Hall, les capteurs de débit massique utilisant la variation du transfert de chaleur d'un fil chauffé au fluide en mouvement appartiennent à la même catégorie.

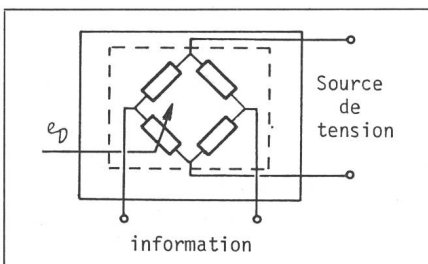


Fig. 3 Principe d'un capteur à modulation

L'essor des composants opto-électroniques, diodes laser, réseaux linéaires de photodiodes, etc. a stimulé le développement de capteurs dans lesquels la grandeur modulée est l'intensité d'un faisceau lumineux ou la position de son point d'impact. Un capteur de positions sans contact développé au Laboratoire de métrologie de l'EPFL pour le relevé du profil d'une maquette de terrain appartient à cette catégorie. Son principe de fonctionnement est décrit à la figure 4.

Un faisceau lumineux vertical est déplacé au moyen d'un système de translation  $x, y$  sur toute la surface à analyser. La position de la tache lumineuse  $L$  formée à l'intersection du faisceau avec la surface est observée au moyen d'une optique  $\theta$ , qui forme une image  $L'$  de  $L$  sur un réseau linéaire de photodiodes. La position de  $L'$ , défini-

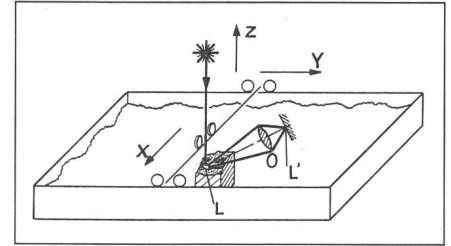


Fig. 4 Principe de fonctionnement d'un capteur pour altimètre

nie par  $l'$  et  $a'$  est liée à la cote  $z$  recherchée par les équations (fig. 5)

$$a' = z \frac{f' \sin \delta}{d - f' - z \cos \delta} \quad (4)$$

$$l' = \frac{f' (d - z \cos \delta)}{d - f' - z \cos \delta} \quad (5)$$

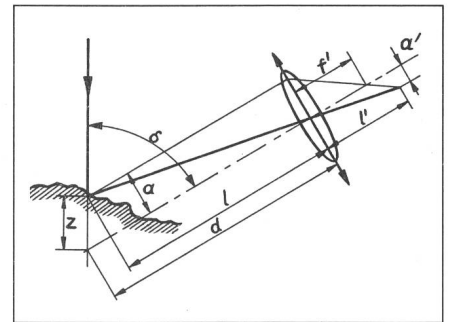


Fig. 5 Grandeurs intervenant dans la détermination de la position  $z$

On remarque que:

- la sensibilité est proportionnelle au sinus de l'angle entre la verticale et l'axe d'observation,
- la linéarité est d'autant meilleure que  $(d-f')$  est grand comparé à  $z \cos \delta$ ,
- une augmentation de la linéarité diminue la sensibilité et vice-versa.

Les équations (4) et (5) permettent de dimensionner exactement le capteur en fonction des exigences qu'on lui impose. La figure 6 montre une exé-

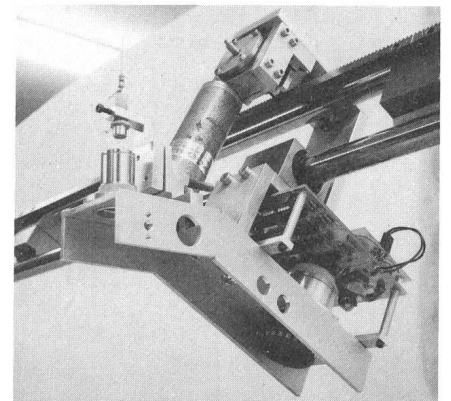


Fig. 6 Capteur optique pour altimètre

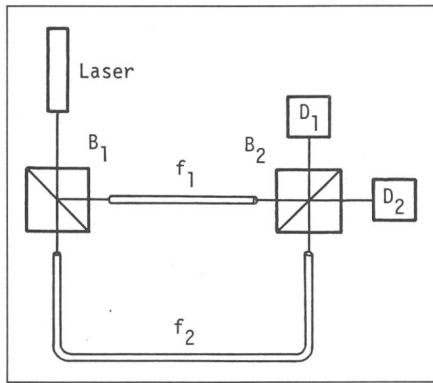


Fig. 7 Interféromètre de Mach-Zehnder

cution de ce capteur prévue pour une dynamique de 200 mm avec une résolution de 0,2 mm. La linéarisation complète est obtenue par voie numérique.

Les capteurs basés sur la modulation d'une lumière se propageant dans un guide optique monomode forment un groupe à part. On utilise comme guide, soit des canaux diffusés dans des substrats adéquats par les techniques de l'optique intégrée, soit des fibres optiques. Dans ce dernier cas, la possibilité d'employer de grandes longueurs de fibre (quelques centaines de mètres) sans augmentation significative du volume du dispositif, confère aux capteurs une sensibilité théorique très élevée. Une configuration de base est celle de l'interféromètre de *Mach-Zehnder* (fig. 7):

Un diviseur de faisceau  $B_1$  répartit la lumière du laser dans deux fibres. L'une d'elles,  $f_1$ , est à l'abri de toutes perturbations. Elle constitue le chemin optique de référence. L'autre fibre,  $f_2$ , est soumise à la grandeur à mesurer  $e_D$ . Une variation de  $e_D$  pourra induire par exemple une variation de la longueur  $l$  de  $f_2$ , ou de son indice de réfraction  $n$ . Il en résultera une variation du déphasage  $\Delta\Phi$  des ondes lumineuses émergentes de  $f_1$  et  $f_2$ , donnée par

$$\Delta\Phi = \left( nk \frac{dl}{de_D} + kl \frac{dn}{de_D} \right) \Delta e_D \quad (6)$$

où  $k$  est le nombre d'onde de la lumière dans le vide. Le déphasage  $\Delta\Phi$  est mesuré par les deux détecteurs en quadrature  $D_1$  et  $D_2$ . Les coefficients de sensibilité  $dl/de_D$  et  $dn/de_D$  étant connus, l'équation (6) donne  $\Delta e_D$ . La faisabilité de capteurs basés sur le principe de l'interféromètre de *Mach-Zehnder* a été démontrée pour plusieurs types de grandeurs d'entrée: pression, température, accélération, champs électriques et magnétiques.

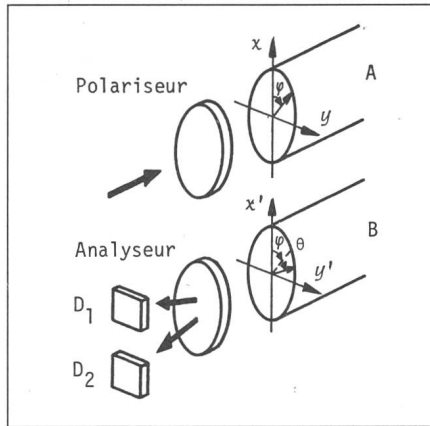


Fig. 8 Interféromètre monofibre à polarisation

A et B sont les deux extrémités de la fibre soumise à  $e_D$

Un inconvénient du montage de la figure 7 réside dans le fait qu'il n'est jamais possible de garantir totalement l'immunité de  $f_1$  aux grandeurs d'influence, voire à  $e_D$ . Deux remèdes sont possibles. Ils remplacent chacun les fibres  $f_1$  et  $f_2$  par une seule et même fibre, conduisant simultanément les deux ondes indépendantes nécessaires à la formation des interférences.

Dans le premier cas, les ondes se distinguent par leur polarisation (fig. 8). L'onde polarisée linéairement, dans la direction définie par  $\varphi$ , peut être considérée comme la résultante de deux ondes polarisées linéairement selon les axes  $x$  et  $y$ . Si la fibre subit par exemple une compression selon l'axe  $x$ , l'onde polarisée selon  $x$  subira un déphasage différent de celui de l'onde polarisée selon  $y$ . Ce phénomène se traduira par une variation d'un angle  $\theta$  de l'orientation du plan de polarisation de l'onde à la sortie B de la fibre, mesuré par les détecteurs  $D_1$  et  $D_2$ . Une rotation semblable peut résulter d'autres effets croisés, tel l'effet Faraday, utilisé pour la mesure de champs magnétiques ou de courants par application directe du théorème d'*Ampère*.

Dans le deuxième cas, les ondes se distinguent par leur sens de propagation. L'application la plus typique du procédé est le capteur de rotation (gyroscope) à fibres optiques (fig. 9). [1].

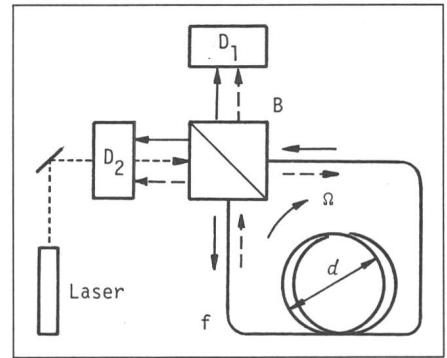


Fig. 9 Interféromètre monofibre à sens de propagation (Gyromètre)

Le faisceau est injecté simultanément aux deux extrémités de la fibre (ondes  $\longrightarrow$  et  $\dashrightarrow$ ). Si la fibre est immobile, ces ondes sont encore en phase après avoir parcouru toute la longueur de la fibre. Par contre, si la fibre tourne dans le sens  $\Omega$  indiqué, l'onde ( $\longrightarrow$ ) mettra un temps inférieur à celui de l'onde ( $\dashrightarrow$ ) pour parcourir toute la fibre. Il en résultera un déphasage  $\Delta\Phi$  donné par

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi dl\Omega}{\lambda c} \quad (7)$$

où  $d$  est le diamètre des spires,  $l$  la longueur de la fibre,  $\lambda$  et  $c$  respectivement la longueur d'onde et la vitesse de la lumière dans le vide.

### 2.3 Capteurs à contre-réaction

Les capteurs à contre-réaction se distinguent des précédents par le fait qu'ils possèdent une source délivrant une grandeur de même nature que  $e_D$ , ou de nature voisine (une force pour une pression par exemple). Ils effectuent la mesure par comparaison, amenant leur valeur de  $e_D$  à égaliser celle qui est imposée de l'extérieur, selon le schéma de la figure 10.

La force  $F_1$  à mesurer est appliquée sur une pièce mobile  $M$  qu'elle a tendance à déplacer; mais tout mouvement est détecté par un capteur de déplacement, lequel délivre un signal qui servira à élaborer une force  $F_2$  exactement antagoniste à  $F_1$ . Ce signal cons-

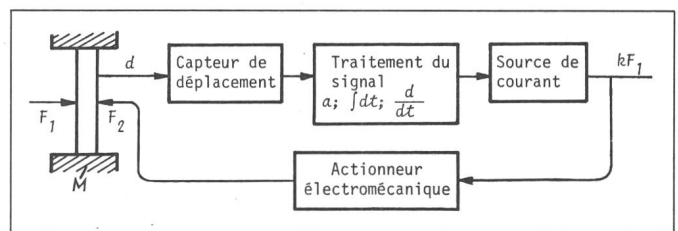


Fig. 10 Principe d'un capteur à contre-réaction (capteur de force)

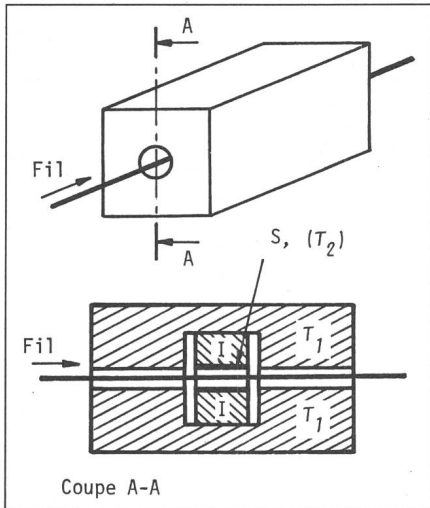


Fig. 11 Capteur de température sans contact, à contre-réaction

titue la mesure de  $F_1$ . A l'équilibre, ce capteur ne prélève aucune énergie associée à  $e_D$ , en régime transitoire il res-

titue toute énergie momentanément prélevée. C'est la caractéristique fondamentale de ce type de capteur. Leur haute sensibilité, liée au mode de fonctionnement différentiel, permet de résoudre de nombreux problèmes délicats, comme celui qui est illustré à la figure 11.

Il s'agit de mesurer la température d'un fil en mouvement à la sortie d'une machine (câblerie, industrie textile, etc.). Le fil est trop fin et fragile pour qu'on puisse effectuer une mesure par contact, sa température est trop basse et son pouvoir émissif trop variable pour qu'une méthode par rayonnement soit envisageable. La solution par capteur à contre-réaction consiste à chauffer une enceinte à une température  $T_1$ , de façon à annuler le flux de chaleur à travers l'isolant I dont la surface externe S est en équilibre thermodynamique avec le fil. Alors,  $T_1$  est une mesure de la température du fil.

## Conclusions

La classification des capteurs la plus fondamentale utilise comme critère, le mode de conversion pris au sens large. Elle conduit à définir trois catégories: les capteurs à conversion d'énergie directe, les capteurs à modulation et les capteurs à contre-réaction.

Les caractéristiques de chaque catégorie sont suffisamment distinctes pour que, le plus souvent, l'une d'elles s'impose en fonction de l'application envisagée, bien avant le choix exact du type de capteur.

## Bibliographie

- [1] K. Petermann: Faserkreisel - eine neue Messmethode für Drehbewegungen. Bull. SEV/VSE 73(1982)3, S. 127...129.