

Pressions usuelles dans les fluides

Capteurs et transmetteurs

par **Christian RIBREAU**

Docteur ès sciences

Institut universitaire de technologie de Cachan

Marc BONIS

Docteur ès sciences

Université de technologie de Compiègne

et **Jacques BEAUFONT**

Ingénieur-conseil

1. Corps d'épreuve	R 2 042 – 2
1.1 Différents corps d'épreuve.....	— 2
1.2 Pression absolue, relative, différentielle.....	— 2
1.3 Modélisation	— 3
1.3.1 Schémas classiques	— 3
1.3.2 Gammes de mesure et corps d'épreuve.....	— 5
2. Capteurs et transmetteurs analogiques	— 5
2.1 Capteurs et transmetteurs à variation de résistance.....	— 5
2.1.1 Potentiomètre	— 5
2.1.2 Jauges	— 6
2.1.3 Raccordement électrique	— 14
2.2 Autres capteurs et transmetteurs.....	— 16
2.2.1 Capteurs et transmetteurs à variation d'inductance.....	— 16
2.2.2 Capteurs et transmetteurs à effet Hall	— 19
2.2.3 Capteurs et transmetteurs à variation de capacité	— 19
2.2.4 Capteurs et transmetteurs à effet piézoélectrique	— 21
2.2.5 Capteurs et transmetteurs à variation de fréquence	— 22
2.2.6 Capteurs et transmetteurs à variation de flux lumineux (optique)	— 23
2.3 Microcapteurs, microtechnologies.....	— 25
2.3.1 Le silicium	— 25
2.3.2 Structures micro-usinées	— 25
2.3.3 Assemblage des microstructures.....	— 26
2.3.4 Circuits.....	— 27
2.3.5 Microsenseurs.....	— 28
2.3.6 Microcapteurs intégrés (intégration du conditionnement)	— 30
2.3.7 Capteurs montables sur circuits imprimés et cartes PC.....	— 31
2.4 Capteurs et transmetteurs à zéro asservi (ou à détection de zéro)	— 32
2.5 Commutateurs de voies de mesure	— 33
2.5.1 Commutateurs de voies d'entrée d'un capteur.....	— 33
2.5.2 Commutateurs de voies de sortie d'un système multicapteur	— 33
3. Capteurs et transmetteurs numériques	— 33
3.1 Sortie numérique.....	— 33
3.2 Transmetteurs de réseau	— 34
3.2.1 Caractéristiques générales.....	— 34
3.2.2 Schéma fonctionnel.....	— 34
3.2.3 Réseau de terrain	— 35
3.2.4 Exemples.....	— 35
4. Choix des capteurs et transmetteurs	— 35
Pour en savoir plus	Doc. R 2 042

Les capteurs et transmetteurs sont indiqués pour des mesures statiques ou /et dynamiques nécessitant une exploitation sous forme d'un signal électrique. Ces instruments sont dotés de propriétés, voire de fonctions intrinsèques, qui permettent de **déporter l'information à distance plus ou moins grande**. Ce critère, qui permet de différencier capteurs et transmetteurs, n'exclut pas, bien sûr, une utilisation locale limitée au seul affichage numérique de la valeur de pression (manomètre électronique). Rappelons enfin que la mesure des pressions usuelles couvre une gamme allant de quelques centaines de pascals à 50 MPa.

A l'instar de l'article précédent sur les manomètres mécaniques, nous présentons ici l'agencement des instruments, leur potentiel et leurs limites. L'accent est notamment porté sur la technologie du maillon essentiel : le senseur (corps d'épreuve + détecteur). Que ce soit dans les appareils à sortie analogique ou/et numérique, intégrant ou non des fonctions logiques, le senseur représente le cœur du système ; il lui confère ses qualités intrinsèques. La plupart des senseurs délivrent un signal analogique. Leurs technologies seront donc développées dans la présentation des appareils à sortie analogique. Les aspects inhérents à l'intégration des fonctions seront soulignés dans la présentation des instruments dits numériques.

La liaison de données entre l'instrument et le site d'exploitation des mesures conditionne de plus en plus les choix de l'ingénieur. Cette question primordiale conditionne l'interchangeabilité, l'interopérabilité, le renouvellement des matériels, voire la pérennité des installations. Après l'essor technologique des détecteurs et des senseurs, l'intégration-boîtier des fonctions, de traitement du signal et de communication, constitue la principale avancée des dernières années. La tendance, avec l'essor des microtechniques, tend vers davantage d'intégration.

Le tableau A donne quelques points de repère de l'évolution rapide de la technologie en matière de capteurs et transmetteurs.

Pour une revue générale sur l'étude des pressions usuelles dans les fluides, le lecteur pourra consulter dans ce traité les articles [R 2 040] et [R 2 041] références [1] et [2].

Technologie	Date
Jauges métalliques collées Jauges semi-conductrices	1954
Détecteur inductif LVDT Jauges semi-conductrices diffusées dans la membrane silicium	1960
Jauges déposées en couches minces	1968
Capteur capacitif	1974
Jauges déposées en couches épaisses	1975
Puce en silicium micro-usiné	1980
Quartz vibrant	1983
Bus de terrain	1990

(1) MICHAUD. – *Mesure de pression : vers la grande unification ?* Mesures, 656, p. 79-82 (juin 1993).

1. Corps d'épreuve

1.1 Différents corps d'épreuve

La pièce maîtresse d'un capteur est le **corps d'épreuve** [3]. De ses qualités intrinsèques (élasticité, fluage, conductibilité thermique, robustesse) dépend en grande partie la qualité du capteur. Le corps d'épreuve est conçu pour recevoir soit directement la pression, soit les efforts transmis par la membrane séparatrice. Sa réponse mécanique conditionne un positionnement judicieux des détecteurs ; la tendance est d'en obtenir un signal électrique de grande amplitude, donc d'avoir de grandes déformations ou de grands déplacements. Outre le calcul des déformations et des déplacements, il faut également évaluer les contraintes maximales admissibles et optimiser les formes pour éviter les concentrations de contrainte. Pour cela, on dispose des schémas simples de la résistance des matériaux auxquels se ramènent la plupart des corps d'épreuve conventionnels : plaques circulaires et poutres rectilignes en flexion (figure 1). Les corps d'épreuve sculptés, issus des procédés physico-chimiques de fabrication (plaque de forme carrée, circulaire avec plots désaxés, etc.) nécessitent d'autres schémas qui ne seront pas abordés ici.

Le matériau élastique qui constitue le corps d'épreuve est réputé avoir un comportement linéaire, tout du moins dans le domaine nominal d'emploi. Son choix est naturellement dicté par le système de détection mais, surtout, largement induit par les procédés de fabrication et leur coût de revient [4]. Alliage d'aluminium, acier inoxydable, silicium et céramique entrent dans la composition du plus grand nombre (tableau 1). On retiendra que les matériaux de

plus bas module d'Young sont plutôt réservés aux capteurs de faibles étendues de mesure.

1.2 Pression absolue, relative, différentielle

■ Dans un **capteur (ou transmetteur) de pression absolue** la pression est mesurée par rapport à une chambre de référence incluse dans le capteur et dans laquelle on a fait le vide. Une des faces du corps d'épreuve constitue la paroi déformable de la chambre de référence, l'autre face peut être au contact d'un fluide quelconque compatible avec le matériau du corps d'épreuve ou reliée à une membrane séparatrice (figure 2). Le corps d'épreuve se déforme toujours dans le même sens à partir de sa position naturelle.

■ Dans un **capteur (ou transmetteur) de pression relative**, la pression est mesurée par rapport à la pression ambiante (le plus souvent la pression atmosphérique). Il suffit généralement d'ouvrir à l'atmosphère la face arrière du corps d'épreuve par un trou de référence ou évent. Cette chambre contenant en général les circuits de détection du senseur ne peut être exposée qu'à un environnement neutre et non corrosif : l'exposition de l'orifice de référence à l'eau peut provoquer un court-circuit et endommager irrémédiablement l'instrument. Quelques précautions sont nécessaires en prévision d'une utilisation dans un environnement difficile (atmosphère humide, saline, poussiéreuse, etc.). La prise d'air est alors réalisée au travers d'une chicane ou d'une pastille poreuse et un revêtement isolant protège les parties électriques et les éléments sensibles. La zone de référence peut également être remplie d'une graisse de silicone (ou d'une autre graisse équivalente utilisée en électronique) qui oppose une barrière à l'humidité.

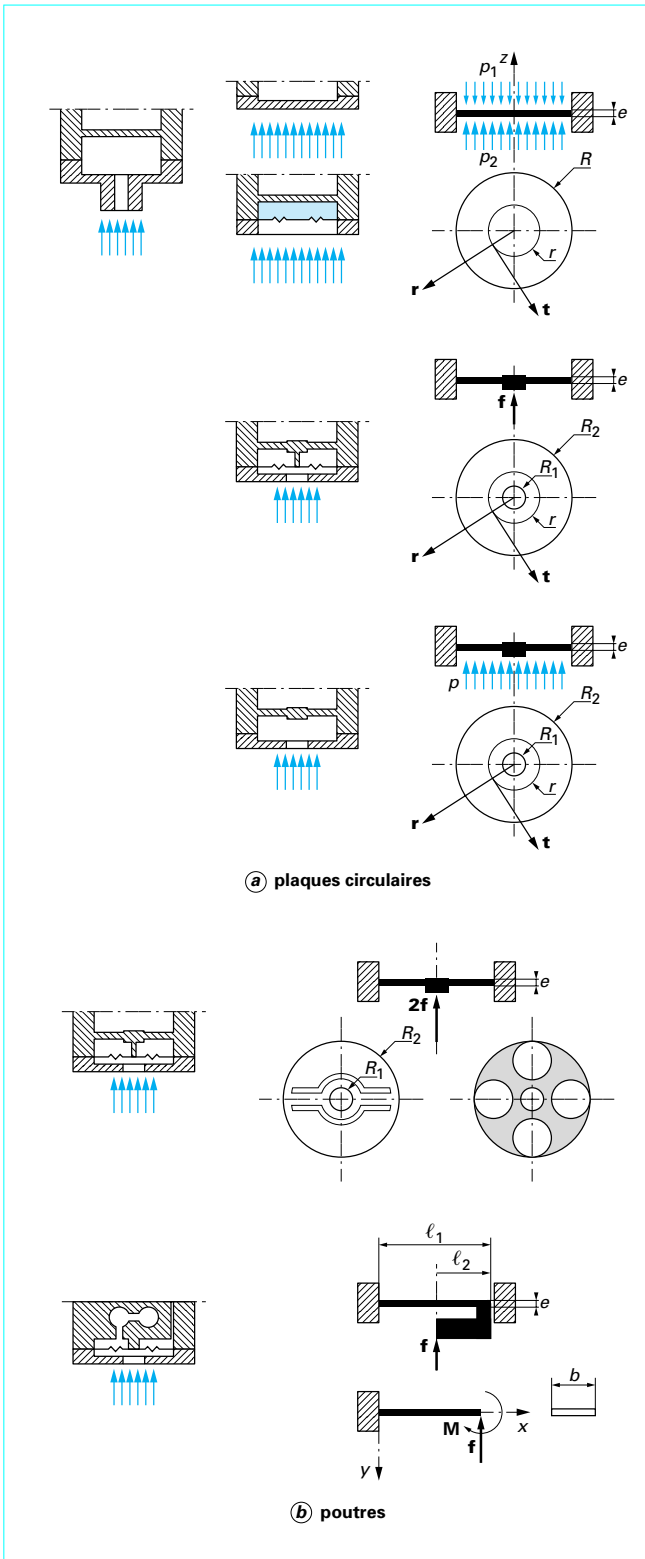


Figure 1 – Schémas des différents corps d'épreuve conventionnels, leur chargement, leur modèle associé

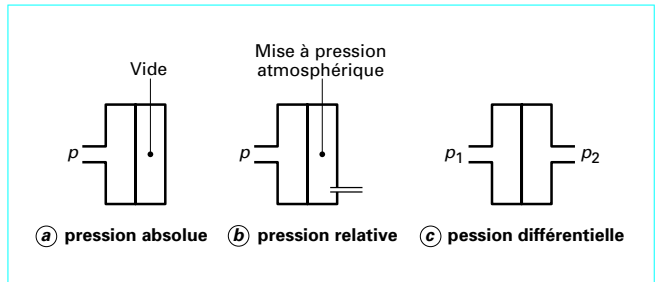


Figure 2 – Signes distinctifs

Partant de ces technologies, certains capteurs (ou transmetteurs) sont proposés pour la mesure des **pressions différentielles**. Ils possèdent deux prises de pression et mesurent la différence entre ces deux pressions. En fait ces appareils ne sont utilisables que pour mesurer des différences de pression entre un fluide quelconque d'un côté et un gaz sec et neutre de l'autre (face arrière). Lorsque le capteur peut fonctionner indifféremment de part et d'autre de sa position naturelle, le capteur est dit **bidirectionnel**.

Les « vrais » capteurs différentiels (**liquide-liquide** et **bidirectionnel**) ont une conception tout à fait spécifique. En particulier, ils doivent être capables de mesurer une pression différentielle souvent très faible, tout en supportant une pression de ligne (appliquée dans les deux chambres) très élevée. Le capteur possède un système de butées évitant ainsi sa destruction en cas de branchement accidentel d'une seule voie ou, tout simplement, une mise en charge (ou décharge) non synchronisée des deux voies.

Un remplissage de la cavité arrière ou les événements peuvent affecter la réponse dynamique du capteur.

1.3 Modélisation

1.3.1 Schémas classiques

Les matériaux ont un comportement élastique linéaire (modèle de Hooke). Soient E et ν respectivement leur module d'Young et leur coefficient de Poisson, et ρ_s leur masse volumique.

Une **plaque circulaire encadrée** (cf. figure 1 a), de rayon R , d'épaisseur e , uniformément chargée sur les deux faces (cas d'un capteur différentiel), subit des contraintes σ et des déformations ε , radiales et tangentiels. En un point de la surface supérieure ($z = e/2$) situé à la distance r du centre, elles s'expriment par :

$$\sigma_r(r) = (p_2 - p_1) \frac{3}{8} \frac{R^2}{e^2} \left[(1 + \nu) - (3 + \nu) \frac{r^2}{R^2} \right]$$

$$\varepsilon_r(r) = (p_2 - p_1) \frac{3}{8} \frac{R^2}{Ee^2} \left(1 - \nu^2 \right) \left(1 - 3 \frac{r^2}{R^2} \right)$$

$$\sigma_t(r) = (p_2 - p_1) \frac{3}{8} \frac{R^2}{e^2} \left[(1 + \nu) - (1 + 3\nu) \frac{r^2}{R^2} \right]$$

$$\varepsilon_t(r) = (p_2 - p_1) \frac{3}{8} \frac{R^2}{Ee^2} \left(1 - \nu^2 \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

La déformation tangentielle est nulle au bord et maximale au centre. La déformation radiale est maximale au bord puis change de sens au point $R\sqrt{3}/3$ avant de retrouver au centre la même valeur que la déformation tangentielle. Les deux déformations sont égales et opposées sur le cercle de rayon $R\sqrt{2}/2$ (figure 3).

Tableau 1 – Caractéristiques des matériaux de corps d'épreuve (ordres de grandeur)

	Alliage d'aluminium 2024-T351	Acier inox 17-4PH	Silicium	Céramique à base d'alumine
Module d'Young	73 GPa	200 GPa	–	3 000 GPa
Coefficient de Poisson	–	0,27	–	0,22
Limite indicative contrainte-déformation élastique	317 MPa – 2 000 µm/m	1300 MPa – 2 000 µm/m	–	300 MPa – 300 µm/m
Limite indicative contrainte-déformation de rupture	–	2 GPa	7 GPa – 5 000 µm/m	1 GPa – 1 000 µm/m
Limite de fatigue	–	à l'infini 480 MPa	10 M cycles pour une déformation à ± 500 µm/m	–
Conductivité thermique	121 W./m ⁻¹ . °C ⁻¹	20 W./m ⁻¹ . °C ⁻¹	–	–

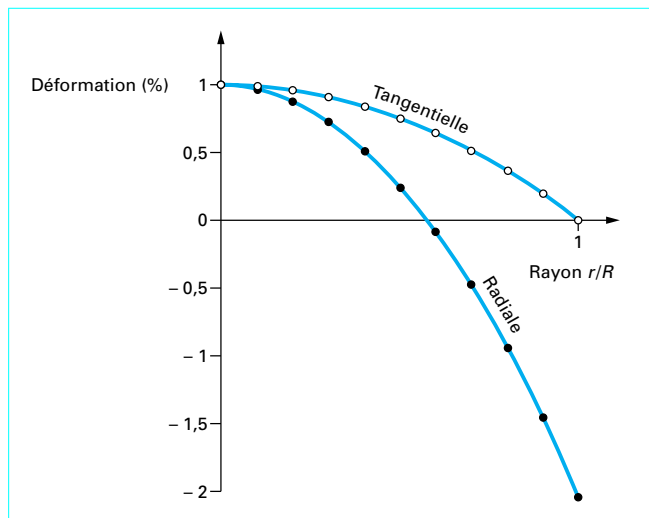


Figure 3 – Déformations radiale et tangentielle de la plaque circulaire encastrée

Le centre de la plaque se déplace de la quantité :

$$w(0) = \frac{3(1 - \nu^2)(p_2 - p_1)R^4}{16Ee^3}$$

La fréquence propre théorique est donnée par :

$$F_0 = \frac{0,47e}{R^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_s(1 - \nu^2)}}$$

■ Une plaque annulaire, encastrée, présente un renforcement au centre (cf. figure 1 a). Cette disposition permet d'exercer une charge concentrée **f** par l'intermédiaire d'une tige reliée à la membrane séparatrice. Les contraintes radiales, de sens opposés, ont une intensité maximale aux deux bords, interne et externe, de la plaque ; sur la surface supérieure de la plaque, à la cote $z = e/2$, elles s'écrivent :

$$\sigma_r(R_2) = \frac{3f}{2\pi e^2} \left(\frac{2R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln \frac{R_2}{R_1} - 1 \right)$$

$$\sigma_r(R_1) = \frac{3f}{2\pi e^2} \left(\frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln \frac{R_2}{R_1} - 1 \right)$$

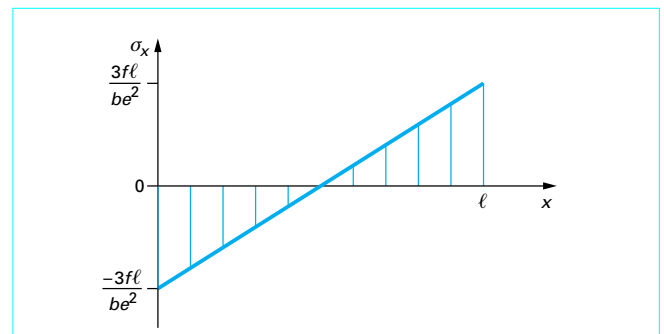


Figure 4 – Contrainte longitudinale sur la demi-longueur déformée en S d'une poutre encastrée

Le déplacement du renforcement central est :

$$w(0) = \frac{3f(1 - \nu^2)}{4\pi E e^3} \left(R_2^2 - R_1^2 - \frac{4R_2^2 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln^2 \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Pour un chargement sous pression directe p , on aurait :

$$\sigma_r(R_2) = -\sigma_r(R_1) = \frac{3}{4} \frac{R_2^2}{e^2} p \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right)$$

$$w(0) = \frac{3(1 - \nu^2)p}{16Ee^3} \left(R_2^4 - R_1^4 - 4R_2^2 R_1^2 \ln \frac{R_2}{R_1} \right)$$

■ Astucieusement taillée, une plaque annulaire peut se transformer en poutre encastrée (cf. figure 1 b). Les poutres simples ou croisées ainsi obtenues ont des **déformées en S** présentant, par conséquent, une alternance compression-extension à leur surface. La contrainte longitudinale à la surface supérieure est donnée par :

$$\sigma_x = \frac{6f}{be^2} \left(x - \frac{\ell}{2} \right)$$

si l'on note ℓ la demi-longueur. Elle est donc maximale au centre et au bord (figure 4). Le déplacement du renforcement central sur l'axe vertical y s'exprime tout aussi simplement par :

$$v(\ell) = -\frac{f}{Eb} \frac{\ell^3}{e^3}$$

Un corps d'épreuve parallélépipédique où $\ell_2 = \ell_1/2$ donne un résultat équivalent.

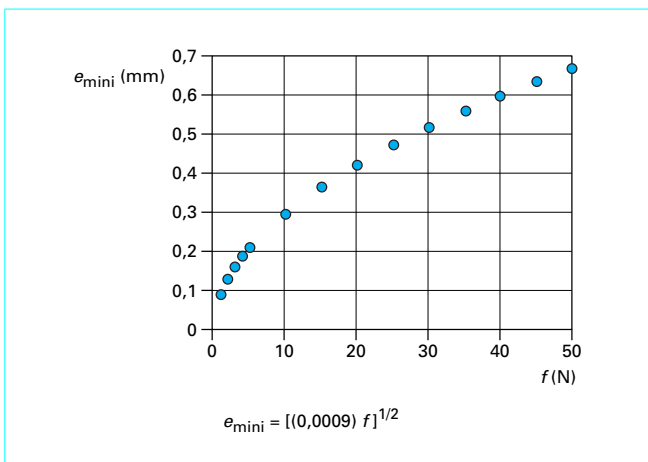


Figure 5 – Épaisseur minimale d’une plaque annulaire en acier inox 17-4PH soumise à une charge *f* concentrée au centre

1.3.2 Gammes de mesure et corps d’épreuve

Il ne faut pas oublier que les formules ci-dessus ne sont applicables que pour des déplacements petits devant l’épaisseur. La réponse mécanique du corps d’épreuve n’est donc proportionnelle à la charge à laquelle il est soumis que dans la limite de cette approximation. Moyennant quoi, la sensibilité du corps d’épreuve (contrainte ou déformation ou déplacement rapporté à la charge) est principalement conditionnée par le rapport *R/e*, ou *ℓ/e*. La notion de miniaturisation prend ainsi tout son sens dès lors qu’elle reste compatible avec le procédé de fabrication des détecteurs et la transmission éventuelle des efforts concentrés. Paramètre essentiel de conception, l’épaisseur permet, pour une valeur de sortie attendue, d’adapter une famille donnée de corps d’épreuve à différentes gammes de mesure. Parallèlement, le choix de l’épaisseur est subordonné :

- aux chocs thermiques (d’autant plus marqués que l’épaisseur du corps d’épreuve est faible) ;
- aux contraintes maximales supportables par les encastremets ;
- aux compromis entre la linéarité, la surface effective et l’épaisseur minimale tolérable.

Exemple : calcul d’épaisseur minimale

Soit une plaque annulaire telle que $R_2/R_1 = 2$ soumise au centre à une force *f*. Aux encastremets, les contraintes radiales sont maximales et s’écrivent sous forme simplifiée :

$$\sigma_r(R_2) = -0,257f/e^2$$

$$\sigma_r(R_1) = 0,405f/e^2$$

Dans ce cas, le maximum de contrainte se situe sur la couronne intérieure. Si la limite de fatigue à l’infini vaut 450 MPa, l’épaisseur minimale de la plaque se calcule à l’aide de la seconde formule dans laquelle $\sigma_r(R_1)$ est la limite de fatigue (figure 5).

2. Capteurs et transmetteurs analogiques

Les principes physiques de détection de la pression ont été rappelés dans la référence [1]. Il reste à présenter ici leur mise en œuvre respective dans la réalisation des senseurs. Simple détecteur

associé à des circuits de mesure et de compensation ou ensemble de mesure avec traitement de signal intégré, les exemples de capteurs ou transmetteurs que nous présentons ont ceci de commun qu’ils possèdent tous une sortie électrique analogique dont seuls le niveau et la nature sont différents. On montre, à l’aide de quelques exemples significatifs, les avantages et les inconvénients des différentes versions d’instruments ainsi que les ordres de grandeur de leurs caractéristiques métrologiques.

2.1 Capteurs et transmetteurs à variation de résistance

On peut considérer deux grands types de senseurs à variation de résistance. Les senseurs potentiométriques et les senseurs à jauges. Les premiers traduisent des déplacements, tandis que les seconds traduisent des déformations.

2.1.1 Potentiomètre

Le détecteur est un potentiomètre de précision, rectiligne, circulaire, voire hélicoïdal (figure 6) dont le curseur traduit, avec ou sans démultiplication, les déplacements du corps d’épreuve. Par exemple, le curseur peut être directement accouplé à l’axe de l’aiguille d’un manomètre. Dans ce cas, l’appareil est équipé d’un double système de mesure qui permet une indication locale de la pression par moyens mécaniques et une mesure à distance par transmission électrique.

La résistance du potentiomètre est constituée soit par un fil bobiné, soit par une piste conductrice. Le bobinage de fil isolé est serti dans un support isolant (plastique, alliage léger anodisé, etc.). Il est dénudé sur la partie en contact avec le curseur. L’erreur de résolution est grossièrement égale à la distance entre deux spires. Les potentiomètres à piste conductrice ont une résolution meilleure. Les pistes sont fabriquées à partir d’un plastique chargé par une poudre conductrice de carbone ou de métal ; elles sont électriquement discontinues à l’échelle de leur structure granulaire, ce qui entraîne une erreur de résolution d’environ 0,1 μm. Les résistances nominales sont comprises habituellement entre 1 et 100 kΩ. Sur la course, l’écart de linéarité propre entre la courbe réelle et la meilleure droite peut atteindre 1 % de la valeur nominale. On peut cependant retenir un ordre de grandeur standard de 0,1 %.

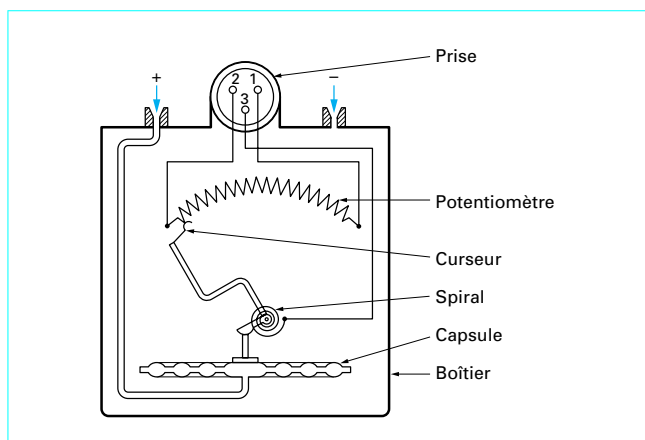


Figure 6 – Capteur à transducteur potentiométrique circulaire (schéma SFIM)

Les variations aléatoires de la résistance électrique de contact au cours des déplacements du curseur sont une source de bruit, notamment dans les potentiomètres à piste conductrice. Un bon contact entre le curseur et la résistance est garanti par le constructeur jusqu'à une vitesse maximale de déplacement. La fréquence maximale des déplacements traduisibles est proportionnelle à cette vitesse et inversement proportionnelle à l'amplitude des déplacements ; elle est de l'ordre de un kilohertz. La résistance de contact entre piste et curseur est particulièrement sensible aux vibrations, ce qui limite la réponse de ce détecteur en régime dynamique.

Le dispositif de mesure électrique peut être alimenté par une alimentation secteur ou, plus généralement, par une alimentation à courant continu. Le signal de mesure qu'il permet d'obtenir peut être d'un niveau de sortie relativement élevé sans avoir recours à des circuits spécifiques de traitement. En règle générale, la simplicité du principe conduit à des réalisations de coût modéré.

L'usure du fil ou de la piste peut provoquer des dysfonctionnements importants : augmentation du bruit, dégradation de la linéarité, coupure de fil. La durée de vie des potentiomètres est d'environ 10 millions de rotations pour un potentiomètre à fil et environ 100 fois plus pour un potentiomètre à piste.

Ordre de grandeur des principales **caractéristiques métrologiques**, selon [1], des **capteurs et manomètres transmetteurs potentiométriques** par rapport à l'étendue de mesure (EM) :

- résolution : < 0,03 % de l'EM ;
- écart de linéarité : ± 0,5 à ± 1 % de l'EM ;
- hystérésis : ± 0,1 à ± 1 % de l'EM.

2.1.2 Jauges

Les jauges traduisent en variation de résistance leur propre déformation qui est en principe identique à celle du corps d'épreuve à l'endroit où elles sont installées. On comprend aisément que, pour obtenir un signal notable aux bornes d'un pont complet de jauges, il soit indiqué de choisir les zones de plus grandes déformations du corps d'épreuve et de disposer dans les branches adjacentes du pont les déformations de signes opposés. Cette disposition permet en outre de compenser, en partie du moins, les variations de résistance qui sont provoquées par les facteurs d'influence.

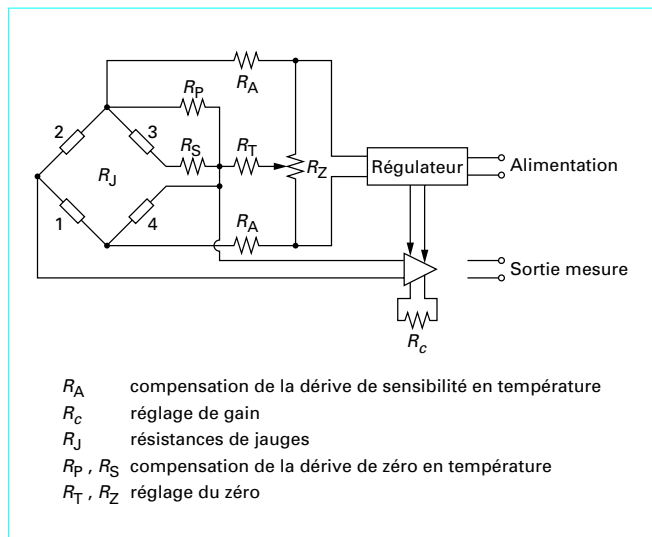


Figure 7 – Circuit de mesure et de compensation

Le circuit de mesure comporte donc un pont de Wheatstone auquel on associe un certain nombre d'éléments destinés à compenser les imperfections des différentes parties du montage et les dérives d'origine thermique (inhomogénéité des longueurs de fil et des températures, thermocouples parasites, etc.). La figure 7 montre un exemple de circuit où une résistance R_S à fort coefficient de température compense la dérive de zéro conjointement à la résistance R_P (ces deux résistances sont testées expérimentalement). Le déséquilibre de compensation du pont est corrigé par les résistances de réglage de zéro R_T, R_Z . Dans le même exemple, des résistances R_A à fort coefficient de température induisent une tension variable aux bornes du pont de jauge qui compense la variation de sensibilité. De tels circuits de compensation confèrent au « simple » senseur sa qualité de capteur ; ils diffèrent selon les instruments et les constructeurs.

2.1.2.1 Jauges métalliques collées (jauges à trame pelliculaire)

La jauge est photographiée à partir d'une feuille métallique pelliculaire de 2 à 10 μm d'épaisseur : *Constantan, Karma, Isoelastic* sont des alliages communément utilisés. La grille réalisée repose sur un support isolant de polyimide laminé de 20 à 30 μm d'épaisseur, ou bien s'encapsule dans une résine époxyphénolique renforcée de fibres de verre sur une épaisseur totale d'environ 70 μm . Une colle de la famille des époxydes appliquée en fine pellicule (entre 3 à 13 μm) transmet au support la totalité des déformations superficielles du corps d'épreuve. La résistance d'isolement, en parallèle avec la résistance de la jauge, est au moins de 500 $\text{M}\Omega$.

Le procédé de fabrication des jauges permet une **grande homogénéité des caractéristiques** au sein d'un même lot et les formes les plus diverses sont aisément réalisées avec des dimensions très réduites.

Exemple : le pont complet que l'on peut voir dans la figure 8 avec ses brins de jauge radiaux au bord et tangentiels au centre a été conçu spécialement pour tirer avantage de la distribution des déformations sur une plaque circulaire. Des plaques jusqu'à 5 mm de diamètre peuvent être équipées dans ce cas.

Typiquement, le signal de sortie du circuit de détection est voisin de 2 mV/V. Une source de 10 V permet donc de fournir en pleine échelle un signal de 20 mV avec un bon rapport signal sur bruit. Éventuellement, on peut améliorer encore le rapport signal sur bruit en augmentant la tension d'alimentation, jusqu'à 15 ou 20 V par exemple, mais on court alors le risque d'augmenter fortement la puissance dissipée par les jauges (puissance dissipée admissible 6 à 16 mW/mm^2) si l'impédance des jauges n'est pas suffisante et de générer ainsi des dérives de zéro et de sensibilité. Les jauges de capteurs usuels ont des résistances nominales courantes de 350 Ω ; des jauges de 1000 Ω et plus s'utilisent aussi.

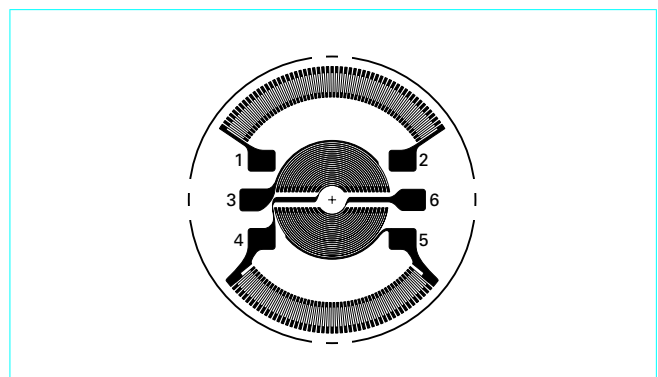


Figure 8 – Jauge de plaque circulaire

■ De petites tailles et de faibles masses, les jauges métalliques collées permettent intrinsèquement des mesures à des fréquences élevées (jusqu'à plus de 50 kHz) et des réalisations robustes peu sensibles aux chocs ; néanmoins, les limites de fatigue métallurgique dues aux déformations alternées peuvent altérer les propriétés des jauges (limite de fatigue environ : 10^7 cycles à 1,5 % de déformation). Ces détecteurs ont une excellente linéarité sur une grande étendue de déformation. Dans ces deux domaines, les limites du corps d'éprouve sont bien souvent atteintes en premier. Les jauges utilisant des produits organiques comme support, colles et protections, ont pour limites de température et de longévité celles de ces produits. Les températures maximales d'emploi sont de l'ordre de 70 °C à 260 °C, suivant les caractéristiques requises. On peut également descendre jusqu'aux températures cryogéniques. Conventuellement protégées, les jauges conservent leurs caractéristiques sur une longue période. Néanmoins, le vieillissement des matières organiques du support et de la colle est imprévisible et risque après quelques années (environ 10 ans) d'entraîner des modifications notables des caractéristiques du senseur. L'intégration des jauges est économique en petite série de production, même si le collage, le câblage et les manipulations nécessitent une main-d'œuvre importante.

Outre les propriétés qui viennent d'être énoncées, les capteurs munis de senseurs à jauge de déformation possèdent les avantages suivants :

- retouches possibles en cours de fabrication ;
- aucun mécanisme de transformation de mouvement ;
- fréquence propre essentiellement induite par le dispositif mécanotransducteur composé du corps d'éprouve, de la membrane séparatrice et du médium de transmission : de 1 à 20 kHz suivant les types et les étendues de mesure, sachant que les capteurs à faible EM ont les fréquences propres les plus basses ;
- faible sensibilité aux vibrations et aux accélérations (corollaire du point qui précède) ;
- utilisation possible sans détérioration dans de larges gammes de température (on peut atteindre couramment -40 °C ou/et +120 °C, ainsi que -100 °C ou +200 °C sur de nombreux modèles optionnels) ;
- le capteur peut être alimenté par une source alternative (porteuse).

De construction simple, souvent monolithique, en acier inoxydable, ces capteurs présentent l'avantage d'être compatibles avec les milieux aqueux ou corrosifs. Leur technologie est depuis longtemps optimisée, même si ce n'est pas la plus avancée. Ils sont proposés, le plus souvent en sortie de tension bas niveau, dans toute la gamme des étendues de mesure usuelles de 0-0,1 à 50 MPa et au-delà.

Caractéristiques métrologiques principales des capteurs à jauges métalliques collées :

- écart de linéarité : de 1 à 0,05 % de l'EM ;
- hystérésis : 1 à 0,03 % de l'EM ;
- erreur combinée courante : $\pm 0,25$ % de l'EM dans le domaine nominal de température ;
- mobilité : $< 0,01$ % de l'EM ;
- signal de sortie de : 20 à 50 mV pour une tension d'alimentation de 10 à 15 V et une résistance interne de 350 Ω ;
- puissance disponible à la sortie du détecteur : $0,5 \times 10^{-6}$ à 2×10^{-6} W ;
- dérive thermique de sensibilité : $\pm 0,5 \times 10^{-4}$ à $\pm 2 \times 10^{-4}$ / °C ;
- dérive thermique du zéro : $\pm 0,005$ à $\pm 0,02$ % de l'EM / °C.

La figure 9 donne le schéma de capteurs à jauges métalliques collées.

Le capteur de pression différentielle bidirectionnel (figure 9 a) est destiné aux mesures de pertes de charge, de débit ou de niveau, sous des pressions de ligne élevées. Il permet d'effectuer des mesures dans des fluides corrosifs compatibles avec l'acier inoxy-

dable. La gamme de mesure proposée varie de ± 7 kPa pleine échelle à $\pm 0,25$ MPa pour un signal de sortie de ± 30 mV. Le corps d'éprouve est constitué par deux ensembles de poutres reliés entre eux par une tige. Une jauge collée sur chacune des poutres s'inscrit dans un bras du pont de Wheatstone complet. Un soufflet convertit la différence de pression d'huile des deux chambres en une force appliquée à la tige. Des clapets viennent occulter les canalisations transmettant la pression à la cellule de mesure quand une pression différentielle supérieure à l'étendue de mesure est atteinte. Un système séparateur isole le senseur des fluides à mesurer.

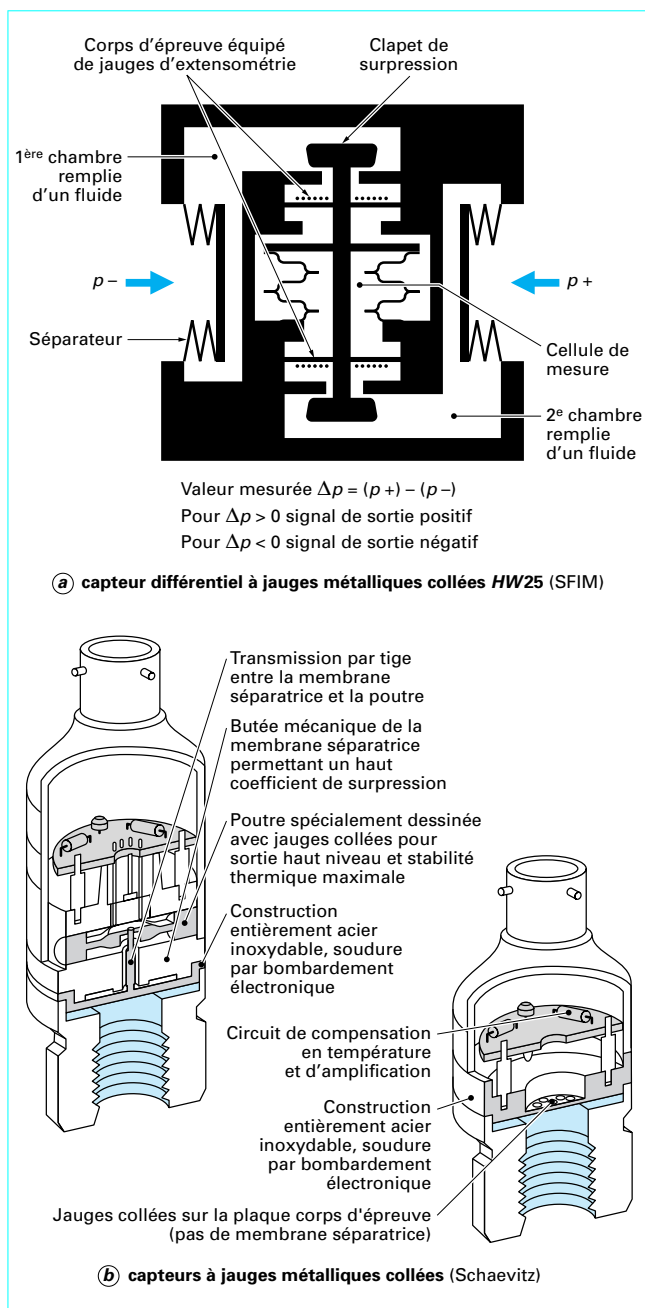


Figure 9 – Capteurs à jauges métalliques collées

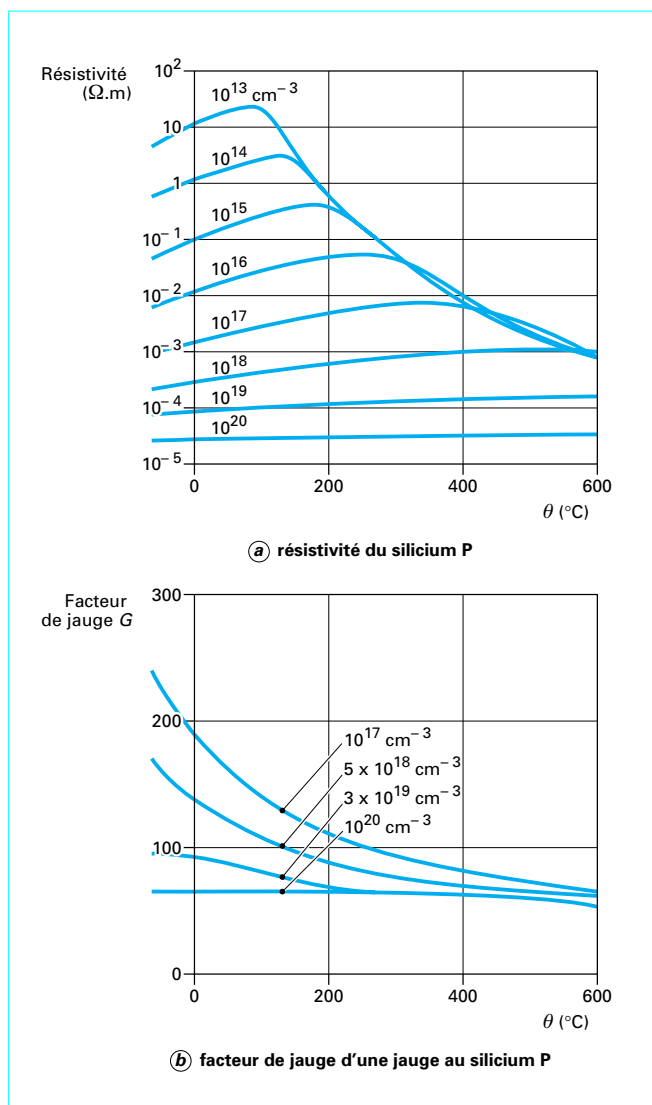


Figure 10 – Résistivité et facteur de jauge d’une jauge au silicium P en fonction de la température θ et du dopage

2.1.2.2 Jauges en semi-conducteur collées

■ Ce type de jauge est constitué le plus souvent par un **bâtonnet découpé mécaniquement ou photochimiquement dans un monocristal de silicium dopé**. Le bâtonnet est parallèle à la diagonale du cube cristallin (direction $\langle 111 \rangle$) pour le silicium P et au côté du cube (direction $\langle 100 \rangle$) pour le silicium N. Les dimensions moyennes sont de l’ordre de 0,8 à 8 mm pour la longueur, de 0,2 à 2 mm pour la largeur et de 0,02 à 0,1 mm pour l’épaisseur. Les caractéristiques du bâtonnet, notamment la résistivité et le coefficient de jauge, dépendent de la concentration en impuretés et de la température, comme montré sur la figure 10 pour le silicium P. Pratiquement, les coefficients de jauge sont compris entre 50 et 270 (de l’ordre de 100 sur les capteurs). Les jauges en semi-conducteur ont, par principe, des formes très simples (figure 11).

■ Les jauges en semi-conducteur offrent **des avantages comparables à ceux des jauges métalliques**, mais, alors que les jauges

métalliques peuvent être collées indifféremment sur un grand nombre de surfaces grâce à une très faible rigidité en flexion, les jauges en semi-conducteur ne peuvent être collées que sur des surfaces planes. En fait, ce qui les rend attractives est leur sensibilité élevée à l’allongement. En théorie et à un niveau de déformation équivalent à celui d’une jauge métallique, elles permettent d’obtenir des niveaux de sortie de 1 à 2 V. Le double objectif recherché avec des jauges en semi-conducteur est :

- une diminution substantielle du taux de travail du corps d’épreuve (≈ 10 MPa pour des raideurs de jauge comprises entre 1×10^7 et 1×10^9 N/m) ;
- leur miniaturisation.

Cet aspect de la conception est mis à profit pour obtenir des fréquences propres comprises entre 10 et 500 kHz suivant les étendues de mesure.

Les capteurs réalisés avec ce type de jauges présentent une tenue thermique des caractéristiques moins bonne que les capteurs équivalents à jauges métalliques.

Exemple : les valeurs couramment relevées pour la dérive de zéro et de la sensibilité sont respectivement de $\pm 0,02$ % de l’EM/°C et $\pm 3 \times 10^{-4}$ /°C dans une plage de variation de la température de 60 °C.

La puissance électrique disponible à la sortie des capteurs est de l’ordre de 5×10^{-4} W. Des capteurs miniatures en bas de gamme d’étendue de mesure, entre 0 et 10^5 Pa, sont proposés avec un signal de sortie de bas niveau (quelques dizaines de millivolts pour une alimentation en 10 V). Plus généralement, on obtient des signaux de sortie supérieurs à 100 mV, sans amplification, pour les étendues de mesure usuelles de 1 à 500×10^5 Pa.

2.1.2.3 Jauges en semi-conducteur intégrées

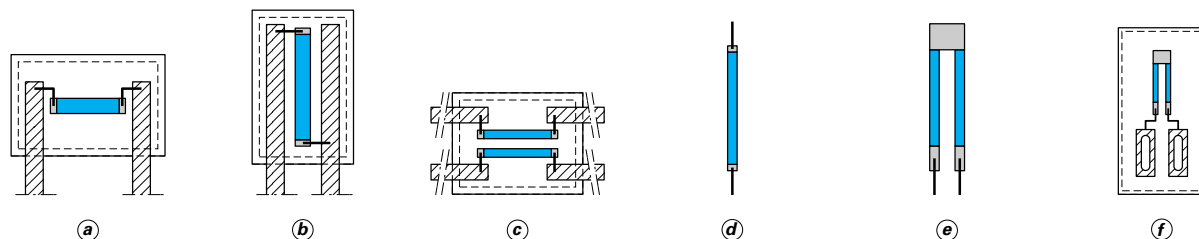
■ Les jauges sont directement **intégrées par liaison atomique** à la structure même du corps d’épreuve : généralement, une plaque d’un monocristal de silicium. Le silicium est intéressant pour sa bonne élasticité, ses propriétés d’intégration et d’isolement des jauges. Le facteur de jauge est en principe élevé, jusqu’à 150, et dépend, en particulier, de l’orientation cristalline du substrat et de l’orientation proprement dite des jauges. Dans les réalisations les plus courantes où l’on utilise un monocristal de silicium (100) de type N, les jauges diffusées de type P sont alignées sur une des directions $\langle 110 \rangle$ de la plaque.

Ce type de jauge offre une facilité d’adaptation à différentes conditions de mesure ; les résistances retenues peuvent valoir 120, 350, 750, 1 200, 5 800 Ω , par exemple. Les jauges sont interconnectées par une couche mince d’aluminium (0,1 à 0,2 μm), déposée par évaporation sous vide à la surface du disque (figure 12), ou par l’intermédiaire de plots de jonction nickel et or recouvrant, sur une très faible épaisseur, une partie de la jauge davantage dopée. Des fils d’or de 25 à 50 μm de diamètre, soudés le plus souvent par thermocompression, assurent les différentes jonctions, notamment avec l’extérieur.

■ Les différents **procédés de fabrication** permettent d’atteindre un coût unitaire relativement faible par fabrication collective sur des tranches de silicium. Ils nécessitent des investissements très lourds et les lots de fabrication doivent être de taille importante. Une brève description en est donnée ci-après.

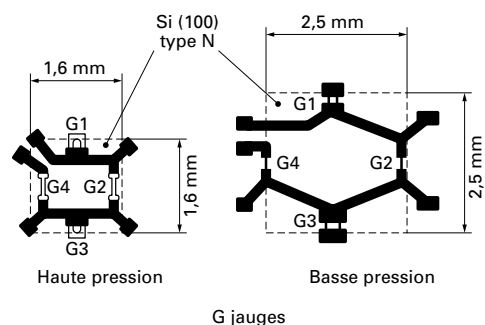
● **Diffusion atomique**

La diffusion (figure 13) consiste à faire pénétrer des impuretés (dopant type P) dans le silicium à travers des fenêtres ouvertes par photogravure dans la couche d’oxyde. L’isolement électrique des jauges ainsi créées au sein de la masse silicium est obtenu directement par jonctions P-N (positif-négatif) ; il devient insuffisant au-dessus de 200 °C.

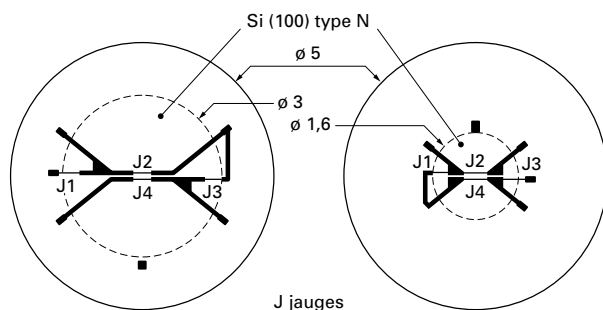


- (a) et (b) bâtonnet encapsulé entre deux couches d'époxyde, les sorties s'effectuant par deux rubans de nickel
- (c) deux bâtonnets, un cristal P et un cristal N, montés sur le même support pour réaliser la compensation apparente de température
- (d) bâtonnet nu aux extrémités duquel sont soudés deux fils d'or
- (e) monocristal en forme de U
- (f) jauge identique à la précédente montée sur un support avec cosses relais intégrées

Figure 11 – Jauges en semi-conducteur (doc. Kulite)



- (a) jauges type P alignées sur une direction $\langle 110 \rangle$ de la plaque carrée, parallèlement ou perpendiculairement à ses côtés



- (b) jauges type P alignées sur une direction $\langle 110 \rangle$ de la plaque circulaire, selon un diamètre. On remarque une sonde de température disposée suivant une direction de non-sensibilité le long du cercle des déformations radiales nulles

Figure 12 – Disposition des jauges et des circuits sur des plaques de silicium (doc. Schlumberger)

● Implantation ionique

La technique de l'implantation ionique permet, comme avec la diffusion, de faire pénétrer des dopants dans les zones choisies du corps d'éprouve en éliminant quelques limitations et contraintes dues aux procédés à haute température. Le principe est basé sur l'accélération des dopants (gaz ionisés) : l'impact à haute énergie permet la pénétration dans le silicium. L'énergie fournie aux ions de dopants détermine la profondeur de pénétration et le temps conditionne la quantité de dopant. Pour contrôler l'impact des ions, l'implantation s'effectue à travers un oxyde de silicium de 300 à 400 Å. Les zones à ne pas implanter sont protégées par une couche épaisse de résine (3 à 4 µm). Après implantation, le réseau de silicium impacté est réorganisé et activé par traitement thermique sous gaz neutre à 900 °C.

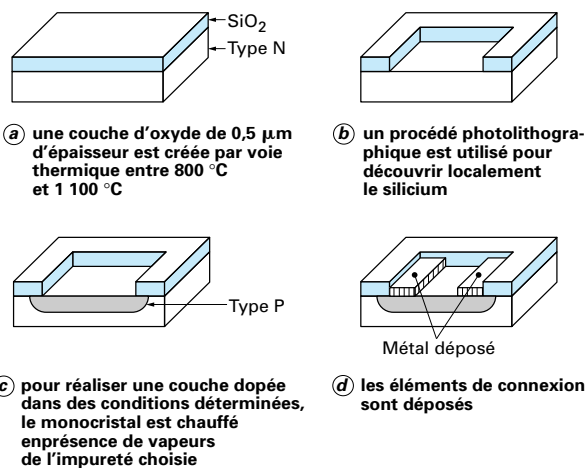


Figure 13 – Processus de fabrication de jauges par diffusion (doc. Kulite)

● **Intégration par épitaxie**

La méthode repose sur le fait que certains réactifs attaquent le silicium et non son oxyde. Si la plaque est recouverte d'oxyde et si celui-ci est retiré sélectivement, la partie d'oxyde restant agit comme un masque pour l'attaque chimique de différents canaux, isolés par la suite. La réduction du tétrachlorure de silicium par l'hydrogène produit du silicium sous forme polycristalline (présence d'oxyde) qui remplit les différents canaux avant de constituer le corps d'épreuve (épitaxie). Les blocs monocristallins subsistant à l'issue du processus de fabrication matérialisent les jauges (figure 14). L'isolement obtenu par couche d'oxyde reste efficace aux hautes températures et sous des radiations intensives [cf. également technologie sur SOI (*Silicon On Insulator*) (§ 2.3)].

■ La fabrication d'une cellule de pression requiert un enchaînement de plusieurs dizaines d'opérations qui sont réalisées principalement en salle blanche. Parmi les principales, on retiendra, par exemple : l'oxydation des faces avant des « wafer » suivie de l'intégration des jauges par diffusion, l'usinage chimique anisotrope des faces arrière, l'évaporation de l'aluminium, la découpe des différentes plaques sur les « wafer », le raccordement des contacts par fils d'or, le montage sur traversée étanche haute pression, le vieillissement de fabrication pour stabilisation (par exemple, Druck administre 128 fois la pression à 120 % entre -50° et 100 °C pour stabiliser des cellules de capteurs aéronautiques), les contrôles.

Nota : une maîtrise approfondie des opérations d'usinage chimique [cf. (§ 2.3)] permet aujourd'hui d'atteindre des épaisseurs du corps d'épreuve pouvant aller jusqu'à 20 µm.

La fermeture des cellules absolues s'effectue à haute température sous un vide poussé de l'ordre de 1,33 mPa. L'assemblage étanche est obtenu par refusion d'un joint eutectique Al/Si ou de verre.

■ Nous l'avons déjà dit, les ponts de Wheatstone à semi-conducteurs sont sensibles à la température. C'est la raison pour laquelle il est indispensable de prévoir une compensation appropriée. Celle-ci combine l'augmentation et la diminution respective de la résistivité et du facteur de jauge quand la température augmente. La dépendance en température qui subsiste peut être linéarisée en complétant le pont avec des résistances adaptées aux domaines de température (haute ou basse).

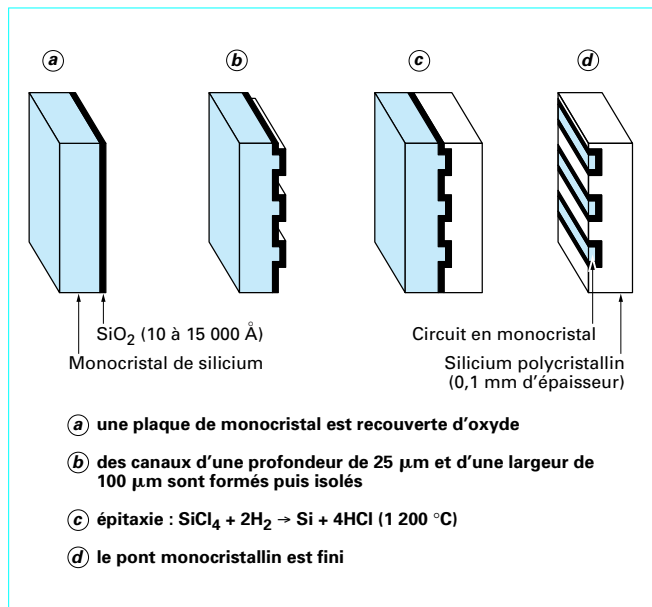


Figure 14 – Processus de fabrication de jauges par épitaxie (doc. Kulite)

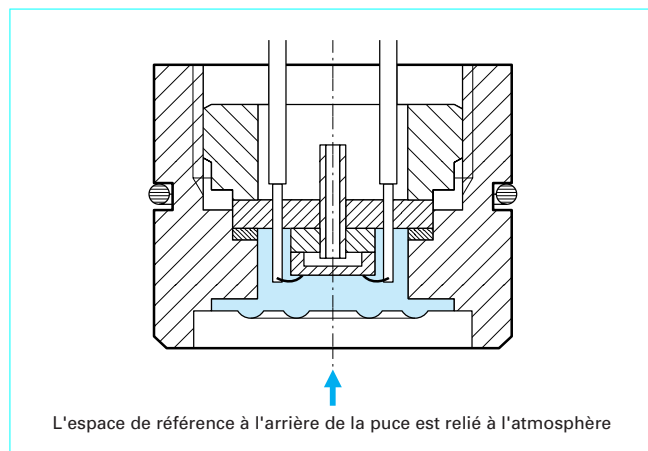


Figure 15 – Cellule de pression à jauges intégrées (doc. Keller)

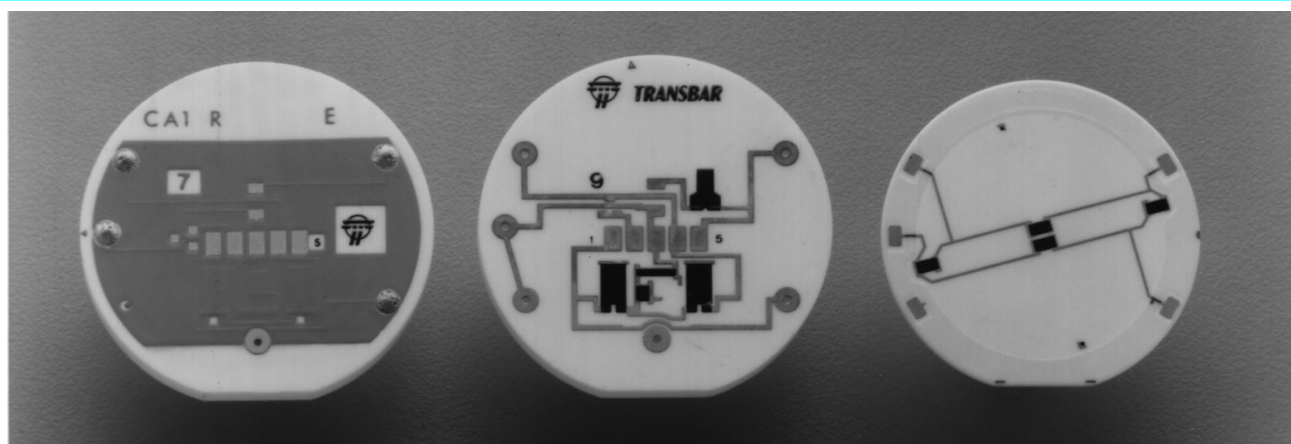
Sur un instrument ou une cellule standard (figure 15), seule la face avant (côté détecteur) est conçue pour être exposée à un environnement donné, sauf, évidemment, s'il s'agit d'une série conçue pour une immersion totale. En principe, la puce en silicium n'est conciliable qu'avec des gaz inertes et secs ; il est donc nécessaire de la protéger en prévision de mesures en milieu aqueux ou chimique. À cet effet, elle est placée dans un espace clos, rempli sous vide d'une huile inerte, qui transfère vers la plaque de silicium le signal de pression appliqué à une fine membrane séparatrice, elle-même soudée au corps. Montée sur une embase comportant des broches isolées par scelllements en verre comprimé, elle est raccordée aux autres circuits par l'intermédiaire de cette traversée étanche. En l'absence de telles enceintes de protection, pour les instruments destinés à une utilisation exclusive dans des gaz inertes et secs, il est recommandé de prévenir tous risques de détérioration par projections et contacts mécaniques, avec un écran de protection.

■ Cette technologie permet de réaliser des capteurs de très petite taille : 2 mm de diamètre et 8 mm de hauteur. Elle leur confère une bonne durée de vie et une bonne stabilité à long terme : typiquement 0,1 % de l'EM/an. Les erreurs cumulées d'hystérésis et de linéarité sont faibles : de l'ordre de 0,2 % de l'EM. La non-linéarité provient en partie de la réponse des jauges en semi-conducteur, notamment aux faibles contraintes, mais est toutefois compensée en pont. Ces instruments ont une bonne tenue en très hautes fréquences : les jauges intégrées n'altèrent pas le comportement dynamique de la plaque. La gamme des étendues de mesure est largement couverte de 0-10 kPa à 50 MPa, et au-delà. Indépendamment du domaine compensé, le domaine courant d'utilisation en température est compris entre -40 °C à +20 °C ; il peut atteindre -55 °C et +250 °C (notamment avec les technologies SOI). Le signal de sortie, non amplifié, vaut une centaine de millivolts au maximum de l'étendue de mesure pour une tension d'alimentation de 10 à 15 V. Les dérives thermiques de sensibilité et du zéro ont respectivement pour ordre de grandeur ± 2 x 10⁻⁴ /°C et ± 2 x 10⁻⁴ de l'EM /°C.

Cette technologie représente actuellement une part importante du marché des capteurs et transmetteurs à variation de résistance ; les fabricants sont nombreux (cf. [Doc. R 2 042]).

2.1.2.4 Jauges déposées en couches épaisses sur substrat céramique [7]

Dans les années 70, il est apparu que les encres résistives utilisées pour la réalisation de circuits électroniques en couche épaisse par sérigraphie, dits circuits en technologie hybride, présentaient elles aussi des caractéristiques piézorésistives avec des facteurs de jauge de l'ordre de 10 à 15. Marelli Autronica, en Italie, fut le premier à utiliser cette technologie pour la réalisation de capteurs de pression de grande diffusion destinés à un usage industriel et automobile.



Protection des circuits de l'embase

Circuits sur la partie supérieure de l'embase

Jauges et conducteurs sérigraphiés

Figure 16 – Capteur couche épaisse sur céramique (doc. Bourdon-Sedeme)

■ Le **corps d'épreuve** est une plaque céramique à base d'alumine (96 %) sur laquelle sont sérigraphiés les jauges et les conducteurs d'interconnexion d'un pont de Wheatstone. Bons isolants électriques, les matériaux céramiques, non cristallins, ont également un excellent comportement mécanique (cf. tableau 1) : bonne linéarité, faible hystérésis et fluage réduit. Chimiquement inertes, ils tolèrent des environnements très agressifs et présentent une très bonne stabilité à long terme. Leurs dérives thermiques sont faibles et quasi linéaires, donc facilement compensables. La tenue en température de ces matériaux (jusqu'à 1 500 °C pour la céramique à base d'alumine) permet de fixer l'encre piézorésistive des jauges et l'alliage à base de platine et d'or des conducteurs (quelque 800 °C), par cuisson dans un four à passage multizone selon un profil thermique bien déterminé. La composition platine/or des conducteurs a été retenue afin de pouvoir supporter les déformations de la plaque sans risque de coupure de la couche ou d'altération des propriétés. Toutefois, la faible capacité d'élongation des encres et la faible capacité de déformation des céramiques rendent difficile la réalisation d'une butée mécanique de protection contre les surcharges.

■ L'**encastrement de la plaque sur son embase**, également en céramique à base d'alumine, est réalisé par scellement, obtenu par refusion (à 700 °C environ) de deux couches de verre déposées par sérigraphie, l'une sur la plaque, l'autre sur l'embase. Le verre de scellement a été particulièrement étudié afin d'obtenir un excellent assemblage et une dureté suffisante. L'ensemble ainsi constitué permet une configuration de montage en pression relative ou absolue par scellement sous vide.

À la partie supérieure de l'embase, figure 16, on dépose un réseau conducteur et des résistances d'équilibrage et de réglage de sensibilité, qui sont réalisées avec la même encre que les jauges, et ont ainsi le même coefficient de température. Les connexions électriques entre les éléments de la plaque et de l'embase s'effectuent directement par le biais d'une colle conductrice. Une couche protectrice recouvre enfin les circuits. Les cellules ainsi réalisées ont une dispersion de sensibilité de l'ordre de $\pm 10 \%$ dans un même lot de production et de $\pm 20 \%$ entre différents lots, nécessitant une calibration du système dans lequel elles sont incorporées. Il est possible, optionnellement, de réduire ces dispersions par l'utilisation d'un jeu de résistances « chargeant » la diagonale de mesure du pont.

L'alumine, bonne conductrice de la chaleur, permet le transfert très rapide de la chaleur générée dans les conducteurs métalliques déposés directement sur elle. Par ailleurs, rien ne s'oppose à l'insertion directe d'une sonde thermique sur la plaque céramique. D'impédance élevée, typiquement de 1 à 10 k Ω , les cellules consomment peu (équipements alimentés par piles ou cellules solaires), elles se prêtent

à la réalisation de transmetteurs 4-20 mA. La faible dérive temporelle du zéro constitue une des qualités essentielles de cette technologie.

■ Les **performances** obtenues avec un instrument doté de telles cellules le situent à mi-chemin des avantages présentés par la technologie jauges métalliques et de ceux des jauges en semi-conducteur.

Caractéristiques métrologiques principales d'un capteur à jauges déposées en couches épaisses sur substrat céramique (capteur Bourdon-Sedeme TB111 à couche épaisse) :

- gamme des étendues de mesure : 0 +50 kPa à 0 + 40 MPa ;
- tension d'alimentation : 9 V(mini), 12 V(maxi) ;
- signal de sortie : 1 à 4 mV/V à l'EM ;
- résistance d'entrée : > 6 k Ω ;
- résistance de sortie : 10 k Ω ;
- plage d'utilisation en température : - 25 à + 85 °C ;
- dérive thermique de sensibilité : $\leq \pm 0,01 \%$ / °C ;
- dérive thermique du zéro : $\leq \pm 1 \%$ de l'EM (entre - 10 et + 55 °C) ;
- erreur combinée : $\leq \pm 0,4 \%$ de l'EM ;
- stabilité du zéro à long terme [cf.(§ 2.1.2.5)] : $\pm 0,1 \%$ de l'EM sur 1 an.

2.1.2.5 Jauges déposées en couches minces

Un isolant minéral stable et un film métallique mince sont successivement déposés sous vide sur la surface polie du corps d'épreuve. Les jauges résistives, montées en pont de Wheatstone, ainsi que les connexions entre les différents éléments sont gravées par attaque ionique de la couche métallique (figure 17). Le film métallique, généralement en nickel-chrome, est déposé sur une épaisseur inférieure à 1 μm .

■ La faible dimension des jauges, entre 1 et 0,2 mm, permet leur positionnement aux points de déformations maximales. Il en découle soit un taux de travail plus faible du métal (réduction du fluage et de l'hystérésis), soit un signal de sortie plus élevé, soit un compromis raisonnable entre ces deux caractéristiques. Différents corps d'épreuve équipés de leurs jauges sont montrés sur la figure 18.

La couche d'isolant minéral étant également très mince, de l'ordre du micromètre, le transfert thermique entre jauges et corps d'épreuve est excellent. La dissipation calorifique permise autorise une puissance par unité de surface au moins dix fois plus élevée que pour les jauges à trame pelliculaire collées, ce qui favorise la miniaturisation sans pour autant limiter le signal. L'épaisseur totale d'une jauge en couche mince, incluant celle de l'isolant, est au moins seize fois plus petite que celle d'une jauge conventionnelle.

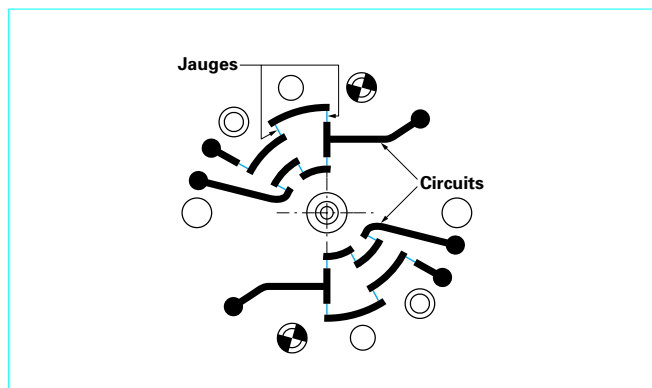


Figure 17 – Dessin d'un pont de jauges réalisé sur une mince couche métallique. Le corps d'épreuve est un disque annulaire (doc. Sedeme)

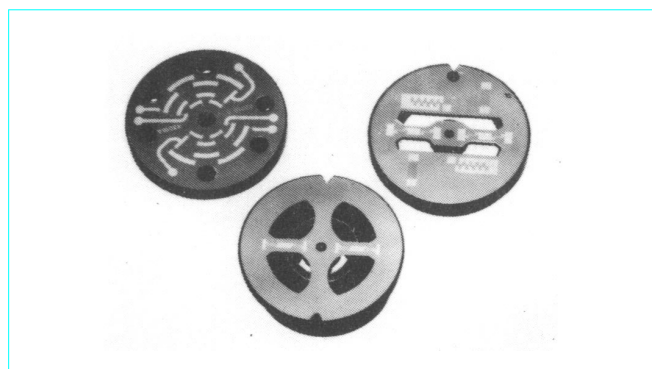


Figure 18 – Corps d'épreuve de capteurs couches minces (doc. Sedeme)

Avec un coefficient de jauge voisin de 3 et une résistance courante de 350 Ω, le pont de jauges d'un capteur couches minces délivre une tension de 2 à 3 mV par volt d'alimentation sur l'étendue de mesure. Dans un large domaine d'utilisation qui va en plusieurs gammes de la cryogénie (-270 °C) à plus de 250 °C, les dérives thermiques de ces capteurs sont remarquablement faibles (figure 19).

■ Les méthodes de dépôt par voie physique ou PVD (de l'anglais *Physical Vapor Deposition*) peuvent être classées en deux grandes familles, les couches pouvant être obtenues soit par évaporation sous vide, soit par pulvérisation cathodique. Chacune de ces familles recouvre des domaines d'application variés et nécessite de forts investissements (procédé salle blanche). Pour la réalisation de capteurs en couches minces, la pulvérisation cathodique a été retenue pour sa polyvalence. Elle permet en effet :

- de déposer facilement et de façon reproductible des alliages complexes ;
- d'obtenir des couches de très forte adhérence ;
- de pulvériser indifféremment des matériaux conducteurs ou isolants.

Le dépôt de jauges métalliques par évaporation sous vide pour une qualité d'adhérence moindre présente l'avantage d'une possibilité d'automatisation du procédé plus importante.

Le développement de la technique de pulvérisation cathodique a été favorisé par les progrès accomplis dans l'industrie optique et dans l'industrie de la micro-électronique. Le principe consiste à désintégrer une électrode, la cathode, constituée de matériaux à

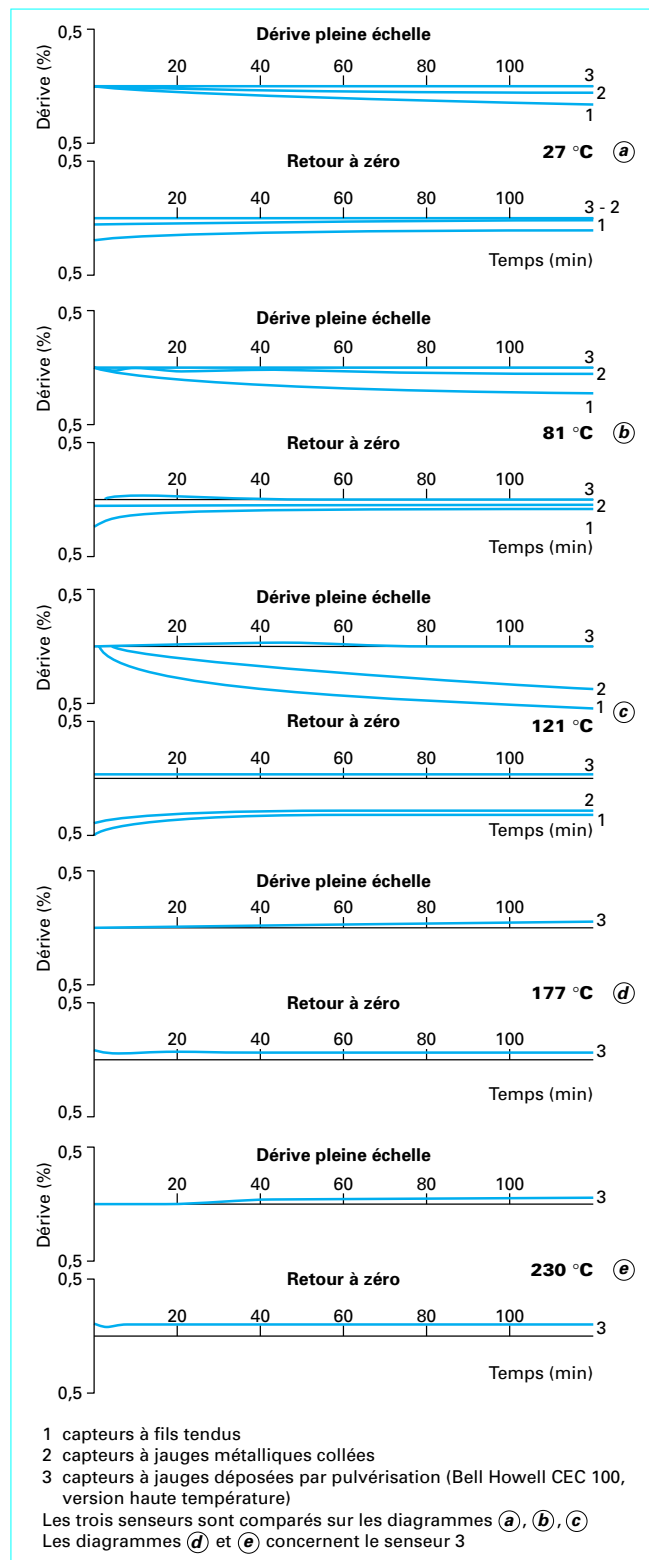


Figure 19 – Exemple de dérive pleine échelle et retour à zéro de différents capteurs, pour différentes températures [8] (doc. Bell Howell)

déposer sur le substrat, l'anode. La pulvérisation de la cathode est provoquée par l'ionisation d'un gaz rare (l'argon par exemple). Les molécules éjectées percutent l'anode avec une énergie suffisante pour pénétrer plusieurs couches moléculaires ; de la sorte, l'adhérence des matériaux déposés est excellente. Ce procédé permet des dépôts d'alliages complexes et des dépôts successifs d'isolants et de conducteurs sans remise à l'air des corps d'épreuve. Les différentes séquences de fabrication sont décrites dans la figure 20 :

- décapage ionique sous vide (figure 20 a) ;
- dépôt de la couche isolante sous vide (figure 20 b) ;
- dépôt de la couche résistive sous vide (figure 20 c) ;
- dépôt de la résine photosensible en salle blanche (figure 20 d) ;
- résine masquée, insolée, développée, révélée (masque jauges) en salle blanche (figure 20 e) ;
- attaque ionique de la couche résistive sous vide (figure 20 f) ;
- élimination de la résine en salle blanche (figure 20 g) ;
- dépôt de résine photosensible en salle blanche (figure 20 h) ;
- résine masquée, insolée, développée, révélée (masque contacts) en salle blanche (figure 20 i) ;

- dépôt de la couche d'or sous vide (figure 20 j) ;
- élimination or sur résine (*lift off*) en salle blanche (figure 20 k) ;
- résine photosensible déposée en salle blanche (figure 20 l) ;
- résine masquée, insolée, développée, révélée (masque passivation) en salle blanche (figure 20 m) ;
- dépôt d'une couche isolante de protection sous vide (figure 20 n) ;
- élimination de résine (*lift off*) en salle blanche (figure 20 o) .

L'absence d'éléments organiques (support polyimide de jauges, colles époxydes ou autres) donne à ces capteurs une excellente stabilité dans le temps : les dérives temporelles sont négligeables grâce à la suppression des phénomènes découlant de la polymérisation. De plus, cette absence d'éléments organiques permet une utilisation en présence de rayonnements (neutrons, rayons γ , etc.) avantage que l'on retrouve aussi avec les capteurs à jauges diffusées en semi-conducteur. Les senseurs maintiennent leur précision et autres paramètres durant toute leur vie de travail sans nouvel étalonnage, sans réglage, sans réparation. Ils sont dits à « maintenance nulle ». La courbe de la figure 21 est à ce sujet éloquent.

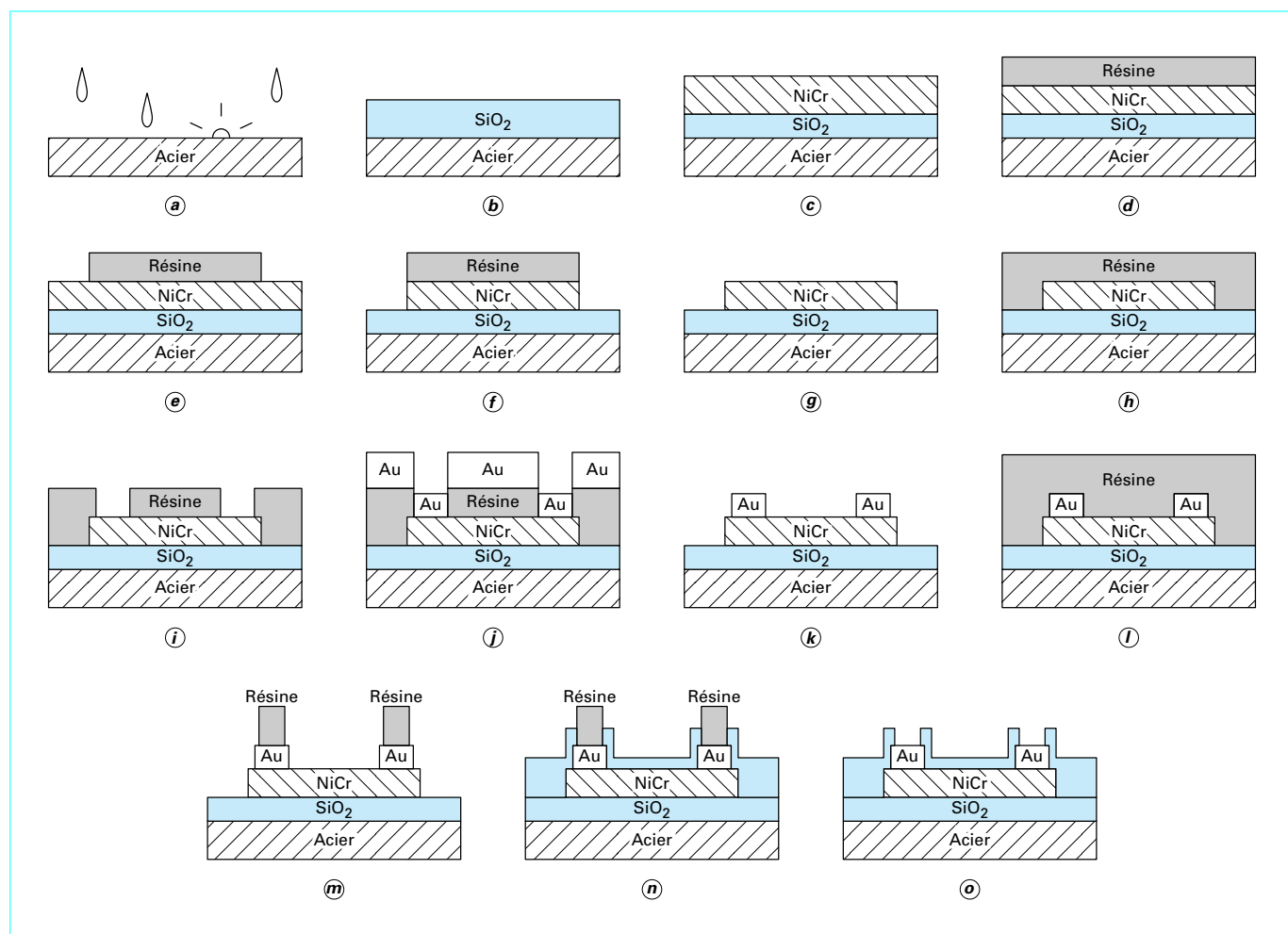


Figure 20 – Élaboration d'une jauge déposée par pulvérisation (doc. Sedeme)

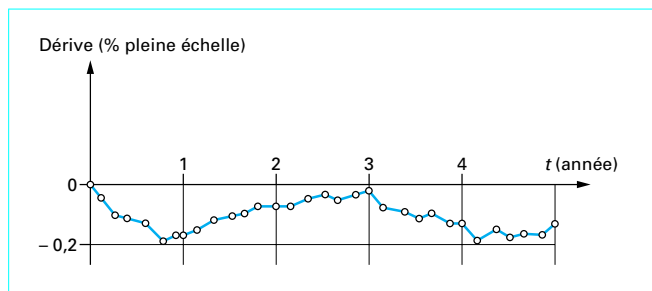


Figure 21 – Stabilité du zéro sur plusieurs années d'un capteur à jauges déposées (Gould) stocké à 120 °C, mesurée à la température ambiante

■ **Stabilité**

Cette notion prend tout son sens lorsque le réétalonnage régulier de l'instrument n'est pas possible ou difficile (capteur de pression embarqué sur un satellite, capteur d'accès difficile et limité) et, plus généralement, dans n'importe quelle application où la précision des mesures est critique.

Remarque : la stabilité est l'aptitude d'un instrument à maintenir ses performances caractéristiques sur une longue durée. (Cette définition empirique ne précise pas le type de performance, ni la durée, ni surtout les conditions de test requises.)

Autre définition : la stabilité est l'aptitude d'un capteur à reproduire durant une période de temps spécifiée, à la température ambiante, dans des conditions de pression données, le signal de calibration d'origine. La spécification est généralement exprimée comme « à l'intérieur $\pm \dots\%$ de la pleine échelle de sortie pour \dots mois ».

Pour garantir la stabilité de l'instrument, il faut avant tout que la technologie du capteur soit appropriée. Les matériaux utilisés doivent être sélectionnés avec soin. Au fur et à mesure de la fabrication et les différentes connexions électriques. Si ces contraintes sont transmises au capteur, les caractéristiques du système ne seront pas stables à terme (équivalent à des contraintes résiduelles). Enfin, il faut veiller à l'équilibrage et aux résistances de compensation (choix des matériaux, des composants, vieillissement).

Pour que l'instrument conserve ses caractéristiques d'étalonnage, encore faut-il qu'il soit manipulé avec précaution avant et durant son installation, et pendant l'application, dans les limites spécifiées de non-détérioration (pression et température), de chocs, d'accélération, de vibrations et de surtension. En ce qui concerne les capteurs couches minces, toute décharge électrique statique à l'intérieur de l'enveloppe du capteur peut entraîner une détérioration des éléments résistifs et modifier la calibration et les caractéristiques de stabilité de l'instrument.

Exemple : la structure d'un capteur absolu à jauges couches minces (figure 22) est décrite ci-après. Soudé au corps du capteur, le capteur est placé dans un compartiment qui l'isole mécaniquement des contraintes extérieures causées par le montage, la pression et le câble de connexion. Les forces de pression sont intégrées par une membrane séparatrice reliée par une tige au centre du corps d'épreuve : une poutre. La chambre de référence est scellée par une bille après y avoir fait le vide. Le pont et les connexions sont protégés des nuisances ambiantes par encapsulation et les fils de raccordement sont soudés par thermocompression ou ultrasons sur des plots généralement en or.

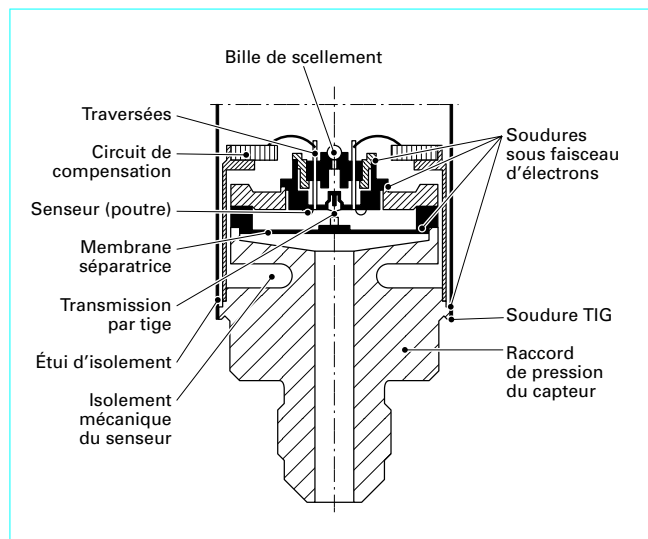


Figure 22 – Capteur absolu à jauges couches minces (doc. Omégadyne)

Caractéristiques métrologiques principales d'un capteur à couche mince (Bourdon-Sedeme TF.0) :

- gamme des étendues de mesure : 0 + 0,1 MPa à 0 + 60 MPa ;
- alimentation nominale : 10 V ;
- signal de sortie : 3 mV/V ;
- impédance de sortie : 1 250 Ω ;
- plage d'utilisation en température : - 55 à + 150 °C ;
- dérive thermique de sensibilité : $\pm 0,005\%$ / °C ;
- dérive thermique du zéro : $\pm 0,005\%$ de l'EM/°C ;
- stabilité de la sensibilité à long terme : $\pm 0,01\%$ sur 5 ans ;
- stabilité du zéro à long terme : $\pm 0,2\%$ de l'EM sur 5 ans ;
- erreur combinée (non-linéarité et hystérésis) : $\leq \pm 0,25\%$ de l'EM.

2.1.3 Raccordement électrique

Précisons que seuls les raccordements électriques des capteurs et transmetteurs à variation de résistance seront abordés dans le cadre de cet article. Moyennant quelques précautions (cf. fiches constructeurs), la question pourra être généralisée aux autres capteurs à impédance variable. Quels sont donc les points à examiner à propos du raccordement électrique des capteurs (ou transmetteurs) à variation de résistance ?

2.1.3.1 Niveau de sortie

Les capteurs se regroupent généralement dans trois classes de sorties électriques : millivolts (mV), volts (V) et courant (mA). Pour l'utilisateur, il est important de connaître quelle sortie convient à son application : ses avantages, ses inconvénients et le câblage.

■ Les capteurs à tension de sortie bas niveau (mV) sont essentiellement destinés aux applications de laboratoire. Ils sont généralement bon marché, de petite taille et requièrent une source d'alimentation stabilisée. Il faut se rappeler qu'un signal < 100 mV est de très bas niveau ; il est donc indiqué pour les courtes distances de jonction (quelques mètres) ; il est sensible à son environnement électrique. Une configuration typique du câblage est montrée sur la figure 23.

Remarque : la couleur des fils de câblage-capteur permet de repérer les liens de connexion et leur polarité, notamment en l'absence de prise. Il est recommandé de se référer aux indications du constructeur.

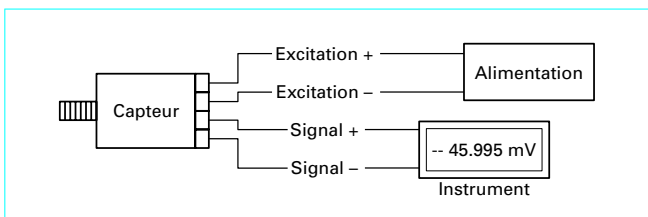


Figure 23 – Câblage 4 fils d'un capteur à tension de sortie bas niveau (mV)

Les capteurs à tension de sortie haut niveau (0 + 5 V, 0 + 10 V, 1 + 5 V) sont plutôt adaptés aux environnements industriels peu perturbés et/ou pour attaquer une interface d'ordinateur. Le conditionnement intégré du signal (amplification), quand il est nécessaire, augmente le coût et la taille du capteur. Cette classe de capteurs est moins sensible aux perturbations extérieures de liaison, mais la distance maximale reste limitée à une trentaine de mètres. Une configuration typique de câblage 3 fils est représentée sur la figure 24 a.

Remarque : la température agit sur la résistance R_ℓ des câbles de liaison, son influence est sensible sur les câbles d'alimentation et pratiquement négligeable sur le câble de sortie-mesure lorsque l'impédance d'entrée du terminal est élevée. La tension u aux bornes du capteur de résistance R_c s'exprime par la relation :

$$u = UR_c / (R_c + 2R_\ell)$$

en fonction de la tension d'alimentation U (figure 24 b).

Solution 1 : alimenter les jauges à courant constant, dans ce cas les variations de ligne ne jouent plus.

Solution 2 : réaliser un montage 6 fils sur la tension d'alimentation

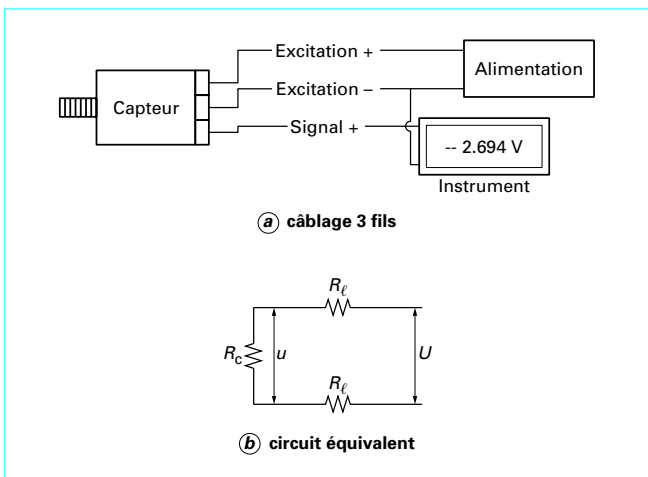


Figure 24 – Câblage 3 fils d'un capteur à tension de sortie haut niveau (V) et circuit équivalent dû à la résistance de ligne

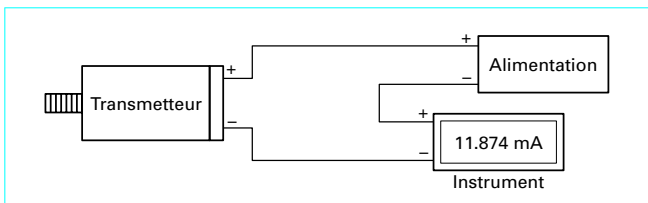


Figure 25 – Câblage en boucle de courant d'un transmetteur

Les capteurs avec sortie de courant (mA) sont recommandés pour les mesures dans des environnements industriels sévères, du fait de l'immunité de la ligne de raccordement aux interférences d'origine électrique ; ils sont très répandus dans le domaine de la conduite des procédés. Leur sortie normalisée (0 + 10 mA, 0 + 20 mA et surtout 4 + 20 mA) ainsi que leur faculté à transmettre des informations sur de longues distances (quelques kilomètres) les font ranger dans la classe des transmetteurs. Pour les mêmes raisons que précédemment, à classe d'exactitude équivalente, un transmetteur est plus coûteux qu'un capteur mV. Un schéma typique du montage en boucle de courant est donné sur la figure 25.

2.1.3.2 Raccordement aux instruments

L'un des grands avantages de la boucle de courant réside dans sa simplicité de mise en œuvre dans les systèmes multicomposants. Les transmissions à longue distance entre composants sont permises. Le nombre d'instruments est seulement limité par la tension de la source d'alimentation. La tension requise étant donnée par la loi d'Ohm :

$$V = I \times R$$

on a donc pour un courant maximal de 20 mA, une tension minimale requise qui vaut :

$$0,020 \times (R_\ell + R_i) + V_c$$

avec R_ℓ résistance de ligne,
 R_i résistance combinée des instruments,
 V_c tension minimale requise pour le fonctionnement du capteur.

Exemple : supposons qu'un transmetteur (4 + 20 mA) nécessite une source de tension continue 12 + 30 V ; un indicateur, un enregistreur, un ordinateur ont une impédance d'entrée de 10 Ω , 25 Ω et 200 Ω respectivement, la ligne a une résistance de 5 Ω . Dans ce cas, la tension minimale requise est égale à

$$0,020 \times (5 + 10 + 25 + 200) + 12 = 16,8 \text{ volts}$$

soit une alimentation courante de 24 volts pour une boucle de courant de 4 + 20 mA.

Un capteur qui délivre une tension de bas ou haut niveau en sortie nécessitera une impédance d'entrée élevée des instruments à relier.

2.1.3.3 Raccordement de plusieurs capteurs à un instrument

Pour des raisons économiques ou autres, comme la limitation d'encombrement, on est parfois amené à raccorder plusieurs capteurs à un seul instrument, par exemple un indicateur. Un simple commutateur de voies peut être utilisé mais, dans ce cas, il est conseillé d'utiliser des capteurs équivalents, de même niveau de sortie (tension ou courant), de même étendue de mesure et, surtout, à réglage de zéro intégré, l'indicateur n'ayant qu'un seul réglage de zéro. La solution du scrutateur de voies est également envisageable : chaque voie indépendante pouvant recevoir le signal spécifique (mA, mV, V) d'un type quelconque de capteur.

2.1.3.4 Adaptation de la sortie-capteur à l'entrée-instrument

Le plus souvent, les instruments de mesure sont configurés pour recevoir une tension. Le raccordement d'un transmetteur, à sortie de courant, est donc a priori incompatible avec ce type d'instrument. En fait, on tourne la difficulté en installant une résistance R entre les bornes de l'entrée du terminal (figure 26). Une fois encore, la valeur de la résistance est déduite de la loi d'Ohm.

Exemple : une résistance de 500 Ω convertira 20 mA en 10 V. Dans la boucle 4 + 20 mA, l'offset sur le zéro correspondra à 2 V.

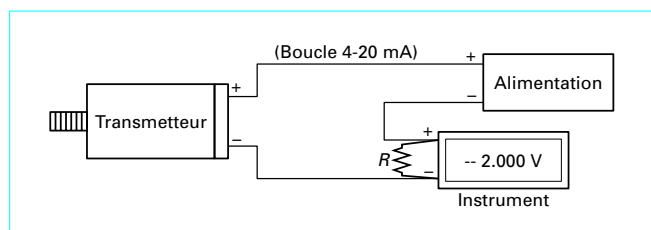


Figure 26 – Conversion d’un courant en tension aux bornes de l’instrument

2.1.3.5 Alimentation partagée

Lorsqu’une alimentation est partagée entre plusieurs capteurs, la somme des courants consommés par chacun d’entre eux ne doit pas excéder la capacité de l’alimentation. Par exemple, si l’on alimente 50 capteurs nécessitant 13 mA, il faudra une alimentation capable de délivrer 650 mA. Inversement, il est possible d’alimenter un seul capteur à partir d’une telle alimentation à forte capacité de courant.

2.1.3.6 Connectique

Il va de soi que les circuits du capteur (ou du transmetteur) doivent être facilement accessibles aux autres équipements de la chaîne de mesure. A cet effet, les fils d’entrée et de sortie des circuits sont regroupés et, soit soudés sur l’embase d’un connecteur, soit câblés à la sortie du capteur. Les solutions retenues préservent l’étanchéité du capteur et dépendent des conditions d’utilisation (par exemple : immersion brève ou prolongée, à faible profondeur ou à plusieurs centaines de mètres, etc.). Ainsi, la connectique d’un capteur ou d’un transmetteur présente différentes « versions » tributaires en principe de l’application (tableau 2).

2.2 Autres capteurs et transmetteurs

2.2.1 Capteurs et transmetteurs à variation d’inductance

Un élément déplacé dans un circuit magnétique entraîne une variation de flux concomitante. Le déplacement peut être mis en évidence soit :

- par modification du coefficient d’auto-induction d’une bobine (circuit magnétique à entrefer(s) variable(s) ou bobine à noyau plongeur) ;
- par variation de la perméabilité ou de l’induction rémanente d’un élément ferromagnétique (magnétostriktion) ;
- par couplage des enroulements primaire et secondaire d’un transformateur provoquant une variation de la tension secondaire ;

— par couplage d’une bobine et d’une cible conductrice qui se comporte comme le secondaire d’un transformateur en court-circuit (courants de Foucault).

2.2.1.1 Variation de réluctance

Les détecteurs inductifs de déplacement qui équipent les manomètres mécaniques (manomètres transmetteurs) entrent pour partie dans cette catégorie. Un élément ferromagnétique (noyau ou volet), déplacé par le corps d’épreuve ou l’axe de l’aiguille, s’enfonce dans un bobinage ou dans l’entrefer d’un circuit magnétique, ou encore en modifie l’épaisseur. Les circuits de mesure, oscillateur ou pont [1], sont directement montés dans le boîtier du manomètre.

Il est possible d’obtenir les modifications de réluctance directement à partir du corps d’épreuve (à condition qu’il soit magnétiquement perméable). Tel est le cas d’une plaque déformable qui modifie l’entrefer d’un circuit magnétique. Le capteur de pression Validyne à réluctance variable s’apparente à ce type de technologie. L’instrument comporte deux coquilles symétriques, fixes, entre lesquelles une plaque se déforme librement en réponse à une différence de pression de part et d’autre (figure 27). La déformation entraîne des variations opposées d’entrefer dans un circuit magnétique symétrique qui est induit par une bobine placée dans chaque coquille et qui se referme à travers la plaque. D’impédances approximativement égales, ces bobines sont branchées en série et alimentées en alternatif, usuellement 5 V rms à 3 ou 5 kHz. Sous l’effet d’une différence de pression, la plaque s’écarte d’une bobine et se rapproche de l’autre. La densité du flux magnétique s’accroît (resp. décroît) auprès de la bobine la plus proche (resp. éloignée). Un champ magnétique plus fort (resp. faible) cause une augmentation (resp. diminution) d’inductance qui accroît (resp. amenuise) ainsi l’impédance de cette bobine. Les variations d’impédance déséquilibrent le pont de mesure (figure 28) et un faible signal alternatif de mesure apparaît. Le signal doit être démodulé pour donner une tension de sortie continue. L’élimination convenable de la fréquence porteuse impose que cette dernière soit plusieurs fois supérieure à la fréquence maximale de la pression à mesurer.

Pour produire une sortie pleine échelle d’environ 20mV/V, soit environ dix fois plus qu’un capteur à jauges métalliques, un déplacement de deux à quatre centièmes de millimètre suffit. De fait, l’échelle de mesure est principalement imposée par l’épaisseur et le rayon de la plaque : une grande plaque très mince correspond aux pressions extrêmement faibles (25 Pa sur un modèle standard de Validyne) et, inversement, une plaque épaisse de petit rayon correspond aux pressions élevées (70 MPa). De conception simple, ces capteurs se démontent facilement et s’adaptent à toute une gamme d’étendues de mesure avec des plaques interchangeables.

Exemple : un modèle de capteur Validyne peut utiliser 23 plaques différentes pour couvrir une gamme d’étendue de mesures allant de 875 Pa à 22 MPa

Tableau 2 – Différentes versions de la connectique des capteurs

Versions « câble »	Versions « connecteur »	Versions « OEM » (1)
Blindé	Bornier à vis avec capot presse-étoupe	Connecteurs spécifiques
Longueur 1 m et plus	Connecteur « baïonnette » suivant normes MIL-C 26 482 ou DEF 5325	Soudé sur cartes électroniques
Avec presse-étoupe		
Moulé étanche	Connecteur débrochable type DIN 43650/ISO 4400	Connecteurs à emboîter
Proposé avec ou sans prise de connexion en extrémité	Connecteur Microtech	

(1) OEM : Original Equipment Manufacturer (cf. article [R 2 040, § 1.4]).

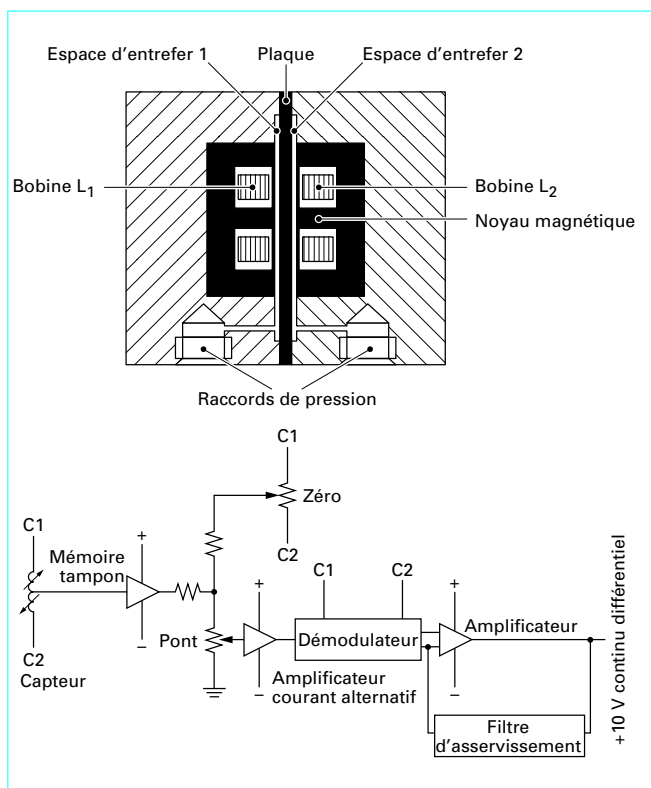


Figure 27 – Capteur de pression différentielle à réluctance variable (Validyne)

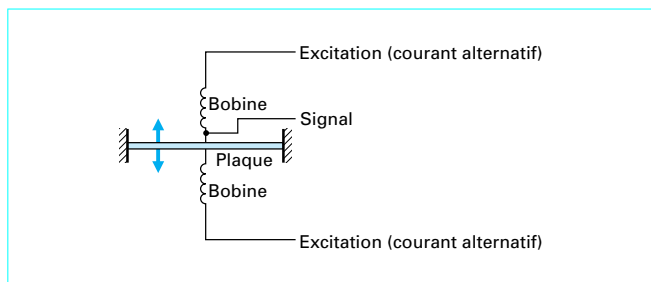


Figure 28 – Montage différentiel et modèle du demi-pont de mesure associé

Ces capteurs sont robustes (absence de pièces mobiles), ils résistent aux chocs et aux impacts. Les parties dommageables, plaque et joints, sont facilement remplaçables. Les réponses dynamiques sont principalement limitées par les fréquences propres des plaques et l'électronique des circuits : on peut espérer quelques kilohertz. Dans le domaine des basses pressions, il faut également tenir compte des volumes morts et des volumes de respiration qui, au demeurant, sont faibles : inférieurs à 575 mm³ et 57 mm³, respectivement, pour une étendue de mesure de 560 Pa.

À titre indicatif, les principales performances se résument ainsi :

- écart de linéarité : ± 0,5 % de l'EM ;
- écart d'hystérésis : 0,5 % de la lecture ;
- capteurs utilisables entre - 55 °C et + 120 °C ;
- dérive thermique de sensibilité : 0,04 % / °C.

2.2.1.2 Magnétostriction

Les courbes d'aimantation de certains matériaux, tels le nickel ou les alliages nickel-fer (*Permalloy*), se modifient lorsqu'ils sont soumis à des contraintes. Il est donc possible de faire varier la réluctance d'un circuit magnétique en exploitant les variations d'induction rémanente ou de perméabilité d'un corps d'épreuve. À cause de leur faible sensibilité (la perméabilité ne varie que de 10 % pour une variation de pression de 50 MPa), ces dispositifs, exacts à environ 2 %, sont plutôt destinés à la mesure de pressions très élevées. Ils sortent du cadre de cet article.

2.2.1.3 Transformateur différentiel LVDT

Le transformateur différentiel LVDT (abréviation anglo-saxonne de *Linear Variable Differential Transformer*) est avant tout un capteur de déplacement. Attelé par sa tige de détection au corps d'épreuve d'un manomètre mécanique, il délivre un signal de sortie directement proportionnel au déplacement millimétrique induit par la pression.

Le LVDT comporte un enroulement primaire et deux enroulements secondaires, symétriques par rapport au primaire, bobinés autour de l'axe de déplacement rectiligne. L'échange d'énergie entre le primaire (alimenté par une source de tension alternative) et les deux secondaires s'effectue par un noyau magnétique lié à la tige amagnétique qui modifie le couplage entre le primaire et chacun des secondaires en se déplaçant le long de l'axe des enroulements. Les supports de bobinage varient par la forme (mandrins, carcasses, etc.) et les matériaux (matières plastiques, métaux amagnétiques, époxydes, etc.). Le bobinage est généralement protégé par un manchon métallique qui assure en même temps la protection contre les champs électromagnétiques extérieurs.

Lorsque le noyau se trouve en position centrale par rapport aux deux secondaires, les tensions à leurs bornes sont égales et opposées. Lorsque le noyau se déplace vers l'un des deux secondaires, la tension aux bornes de celui-ci augmente du fait que le flux d'induction qui le traverse augmente, tandis que la tension aux bornes de l'autre secondaire diminue de la même quantité, le flux d'induction qui le traverse ayant diminué d'autant.

La tension aux bornes du circuit constitué par les deux secondaires, branchés de telle sorte que les f.é.m. induites soient en opposition, est une fonction linéaire du déplacement dans une limite de course fixée ; elle est nulle si le noyau est placé symétriquement par rapport aux deux secondaires (considéré comme point origine des déplacements x du noyau). Cette tension (V_m), qui constitue la sortie du capteur, est une fonction biunivoque, en amplitude et en phase, de la position du noyau. En d'autres termes, si l'on réfère la phase Φ du signal à celle du primaire, on a :

$$\Phi = 0 \text{ pour } x > 0$$

et

$$\Phi = \pi \text{ pour } x < 0$$

avec $V_m(x) = V_m(-x)$.

Le signal de sortie des secondaires peut également être traité sous sa double identité tension-phase de façon à offrir à l'utilisateur un signal de tension bidirectionnel (par exemple, variant de - 5 V à + 5 V), le signe étant lié à celui du déplacement x .

Exemple : si un oscillateur fournit un signal carré, synchrone du signal sinusoïdal qui alimente le capteur, le signal V_m est recueilli par un redresseur synchrone, piloté par le signal carré de l'oscillateur. Le signal V_m étant soit en phase, soit en opposition de phase avec le signal carré, il s'ensuit que le redresseur synchrone produit un signal alternatif redressé, respectivement positif ou négatif, et dont l'amplitude crête est proportionnelle à x . Le redresseur synchrone est en général complété par un filtre passe-bas qui délivre *in fine* un signal de sortie en tension continue. L'électronique peut alors être complétée par un circuit de réglage de gain et un réglage du zéro.



Sa capsule en alliage nickel-chrome est entièrement soudée. Le flasque de base est démontable pour l'inspection et le nettoyage. La prise de référence qui communique avec la cavité intérieure de la capsule est obturable par un bouchon (version absolue). Un filtre limite l'entrée des contaminants sur les versions relatives. La pression relative, ou absolue, à mesurer est appliquée à l'extérieur de la capsule. Le noyau de faible masse se déplace librement avec un jeu restreint dans les bobines suivant leur axe commun. Le faible jeu minimise les effets de vibration et de la gravité.

Figure 29 – Détection LVDT sur un transmetteur de basses pressions relatives à capsule (doc. P 3 000 Schaevitz)

Ces appareils présentent des qualités de robustesse et de légèreté dans le domaine des faibles pressions. Leur niveau de sortie est élevé (quelques volts ou 4 + 20 mA). L'isolement galvanique entre l'enroulement primaire et les enroulements secondaires permet de protéger le circuit de traitement du circuit d'alimentation. La séparation physique totale entre l'équipage mobile et le transformateur convient aux applications en environnement difficile. Ils sont utilisables en environnement nucléaire. Leur consommation électrique est faible (quelques milliwatts). Leur coût est relativement modéré. Cependant, ils ont l'inconvénient de perdre leur linéarité au passage au zéro électrique et d'être sensibles aux variations de fréquence du signal d'alimentation. Ils sont sensibles aux vibrations et aux chocs. La masse des pièces en mouvement et l'électronique limitent la réponse dynamique, qui peut aller de quelques hertz à environ un kilohertz selon l'étendue de mesure et la fréquence porteuse.

Dans le domaine de la mesure des pressions par capteur-transmetteur LVDT, le modèle P3000 du constructeur Schaevitz peut servir de référence à bien des égards (figure 29).

Performances d'un transmetteur LVDT (Schaevitz P 3 000) :

- gamme des étendues de mesure : 0 + 500 Pa à 0 + 0,7 MPa ;
- erreur combinée : < ± 0,5 % de l'EM (sur option 0,25 %) ;
- capteurs utilisables entre - 40 °C et + 80 °C ;
- dérive thermique de sensibilité : ± 0,035 % / °C ;
- dérive thermique du zéro : ± 0,035 % de l'EM / °C
- masse : 450 g.

2.2.1.4 Courants de Foucault

Une bobine parcourue par un courant de haute fréquence produit dans l'environnement de ses extrémités un champ électromagnétique variable. Une cible métallique (non ferromagnétique) placée dans cette zone est le siège de courants de Foucault qui, d'après la loi de Lenz, s'opposent à la cause qui leur donne naissance. L'impédance du circuit primaire d'excitation (bobine) est modifiée par son couplage au circuit secondaire (cible). On associe généralement à

l'inductance de mesure une seconde inductance placée dans le bras contigu d'un pont, de façon à compenser les effets des grandeurs d'influence. La seconde inductance peut être soit une inductance de référence, soit une inductance variable montée en push-pull.

Ce dispositif permet de détecter les faibles déplacements des capsules et des plaques bien en deçà de leurs limites d'élasticité et de fatigue.

Exemple : dans le transmetteur de pression absolue EFFA (figure 30 a) la capsule en *Inconel X 750* scellée sous vide déplace une cible sous l'effet de la pression. Les courants de Foucault générés dans la cible entraînent une variation de l'inductance apparente de la bobine située immédiatement face à elle. Les variations d'inductance sont mesurées relativement à l'inductance de référence, formée par la deuxième bobine.

Sur les modèles destinés aux mesures de pressions différentielles ou relatives (figure 30 b) l'espace de mesure est partagé en deux chambres par une plaque munie en son centre de la cible métallique. En fonction de la différence de pression existant entre les deux chambres, la membrane se déplace dans un sens ou dans l'autre, décrivant une course inférieure à 0,2 mm pour la pleine échelle. Le détecteur inductif à courants de Foucault associe les variations opposées d'inductance de deux bobines placées de part et d'autre de la cible.

Aucune connexion mécanique ou électrique n'étant requise entre le détecteur et le corps d'épreuve, les bobines sont isolées du fluide de mesure par une membrane métallique. L'espace de détection est donc entièrement « sec » : il n'y a aucune présence d'huile qui risque éventuellement de s'enflammer ou de polluer le process en cas d'incident.

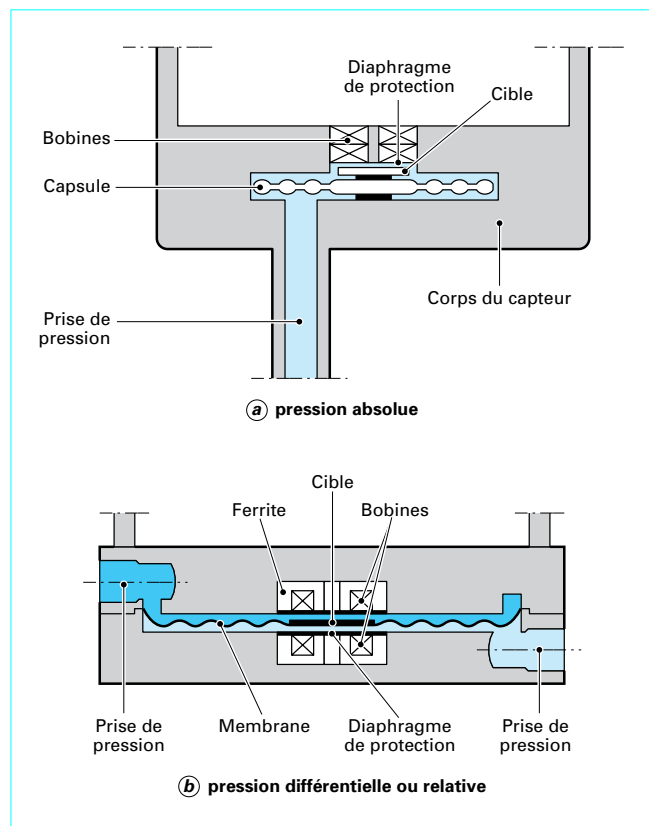


Figure 30 – Transmetteurs EFFA à courants de Foucault

Ces capteurs et transmetteurs sont réputés être robustes, adaptés aux environnements sévères (très bonne tenue en température et aux rayonnements ionisants) et relativement insensibles aux chocs et aux vibrations. Ils ont des faibles dérives thermiques et une bonne stabilité dans le temps.

Performances d'un transmetteur de pression différentielle (EFFA série GA) :

- gamme des étendues de mesure : ± 10 Pa à ± 2 MPa ;
- pression de ligne admissible : 0 à 20 MPa ;
- tension d'alimentation : 10 à 30 V ;
- signal de sortie : 12 ± 8 mA ;
- erreur combinée : $< \pm 0,1$ % de l'EM ;
- capteurs utilisables entre -40°C et $+110^\circ\text{C}$;
- dérive thermique de sensibilité : $< 0,6$ % par variation de 60°C ;
- dérive thermique du zéro : $< 0,5$ % de l'EM par variation de 60°C ;
- stabilité à long terme (zéro et sensibilité) : $\pm 0,2$ % de l'EM sur 1 an à température stabilisée ;
- temps de réponse : 10 ms ;
- volume mort : 3 à 7 cm^3 selon l'EM ;
- volume de respiration : $< 0,05\text{ cm}^3$.

2.2.2 Capteurs et transmetteurs à effet Hall

Un aimant permanent, solidaire du corps d'épreuve (généralement un tube manométrique) se déplace devant une sonde constituée d'une plaquette semi-conductrice fixe, parcourue par un courant. Par principe, la tension Hall obtenue est proportionnelle à la composante d'induction normale à la sonde et au courant qui la parcourt ; elle est, par ailleurs, inversement proportionnelle à son épaisseur.

Exemple : à titre indicatif, une sonde d'antimoine d'indium, d'épaisseur 0,1 mm, qui serait parcourue par un courant de 1 mA et placée dans une induction normale de 1 Wb/m^2 , délivrerait une tension Hall égale à 3,8 mV pour une constante de Hall de $-3,8 \times 10^{-4}\text{ m}^3\cdot\text{C}^{-1}$.

Le signal du détecteur est amplifié ensuite en un signal normalisé (4 + 20 mA, par exemple). Comme pour les transmetteurs précédents, il est possible de séparer hermétiquement les circuits électriques et le fluide en disposant un opercule non ferromagnétique entre la sonde et le corps d'épreuve.

Caractéristiques générales des capteurs à effet Hall :

- gammes des étendues de mesure : $-0,1 + 0$ MPa à $-0,1 + 1,5$ MPa et $0 + 0,1$ MPa à $0 + 60$ MPa ;
- erreur combinée : ± 1 % de l'EM ;
- température d'utilisation - 25 à $+60^\circ\text{C}$;
- dérive thermique de sensibilité : $< 0,04$ % / $^\circ\text{C}$;
- dérive thermique du zéro : $< \pm 1,6$ % de l'EM sur la plage d'utilisation en température ;
- réponse en fréquence peu élevée liée au type de corps d'épreuve utilisé ainsi qu'à la masse ajoutée de l'aimant.

2.2.3 Capteurs et transmetteurs à variation de capacité

Une variation de capacité d'un condensateur est susceptible d'être engendrée par une armature mobile, solidaire des déplacements de solide ou de déformation d'un corps d'épreuve. La distance entre les armatures, la surface de recouvrement ou encore la permittivité du diélectrique, quoique cette dernière soit rarement appliquée à la mesure des pressions, peuvent être ainsi modifiées. Pour obtenir un signal électrique de mesure [1] et [5], il suffit d'introduire la capacité variable dans un circuit oscillant ou dans un pont d'impédances qui comporte une seconde capacité, variable ou non, sur un bras adjacent.

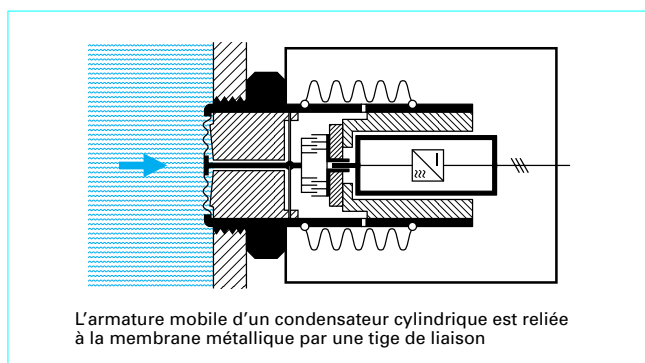


Figure 31 – Capteur (resp. transmetteur) capacitif à variation d'aires de surfaces cylindriques (doc. Vega)

■ Le condensateur à variation de surface est constitué d'armatures cylindriques ou planes. Le déplacement axial de l'armature mobile du condensateur cylindrique (figure 31) entraîne une modification de l'aire de recouvrement des électrodes. Dans un condensateur plan, c'est une armature rotative qui infère la variation. Dans les deux cas, la capacité varie proportionnellement au déplacement angulaire ou linéaire. Dans les manomètres télétransmetteurs capacitifs (exemple Wika), les rotations de l'aiguille peuvent être détectées, sur une plage de 0 à 270° , par un condensateur plan différentiel en combinaison avec un amplificateur transistorisé branché en compensateur électronique de capacité. Les détecteurs capacitifs à variation d'aire de surface sont utilisés de préférence en statique, avec des instruments à faibles forces de positionnement (la conversion s'effectue sans contact et pratiquement sans réaction).

■ La capacité du condensateur à écartement variable varie avec la distance entre les armatures. La sensibilité d'un tel condensateur est beaucoup plus élevée que dans le cas précédent et augmente lorsque la distance entre les armatures diminue. Lorsqu'on utilise, comme armatures d'un condensateur, une électrode fixe, isolée et, face à celle-ci, une armature déformable, électrode « mobile », telle une plaque, la linéarité du détecteur est fixée par le déplacement qui doit rester petit vis-à-vis de la distance D séparant les plaques au repos ; une erreur de linéarité n correspond à une flèche de plaque inférieure à $2nD$. Cela représente, par exemple, une flèche de $0,5\text{ }\mu\text{m}$ pour $D = 50\text{ }\mu\text{m}$ et $n = 0,5$. Il est toujours possible d'améliorer la linéarité en insérant un condensateur double dans un pont alimenté par une tension alternative sinusoïdale, notamment pour les capteurs différentiels.

Dans la gamme des étendues de mesure de 0 à 14 MPa, on trouve fréquemment des cellules de mesure réalisées entièrement en céramique à base d'alumine (figure 32 a). L'écartement nominal correct ($D < 50\text{ }\mu\text{m}$) entre la plaque et l'embase de la cellule (substrat) est réalisé au moyen du cordon de scellement au bord de la plaque. Les électrodes sont réalisées par une très fine couche métallique déposée sur la plaque et l'embase (exemple : couche d'or de 3 à $5\text{ }\mu\text{m}$). L'électrode d'embase est recouverte d'une couche de passivation en verre qui empêche les courts-circuits en cas de contact avec la plaque dans les conditions de surcharge. L'étendue de mesure de la cellule est directement corrélée à l'épaisseur de la plaque [cf. (§ 1.3.2)] : plus la plaque est épaisse, plus la pression requise pour la déformer est élevée et inversement. Les épaisseurs peuvent varier de $0,4$ mm pour un capteur basse pression à 5 mm pour les pressions les plus élevées. Les tolérances à respecter sur les épaisseurs et la planéité sont rigoureuses (la tolérance totale permise vaut $5\text{ }\mu\text{m}$). Dans toute la gamme des étendues de mesure, tous les senseurs sont conçus en principe pour une déflexion de plaque identique (même variation de capacité), de sorte que les circuits électroniques de mesure peuvent être standardisés. Le circuit hybride de mesure est directement intégré à l'arrière de l'embase. On limite ainsi les capacités parasites tout en conservant un environnement thermique uniforme. La figure 32 b montre les variations de capacité typiques dans toute une gamme d'étendue de mesure.

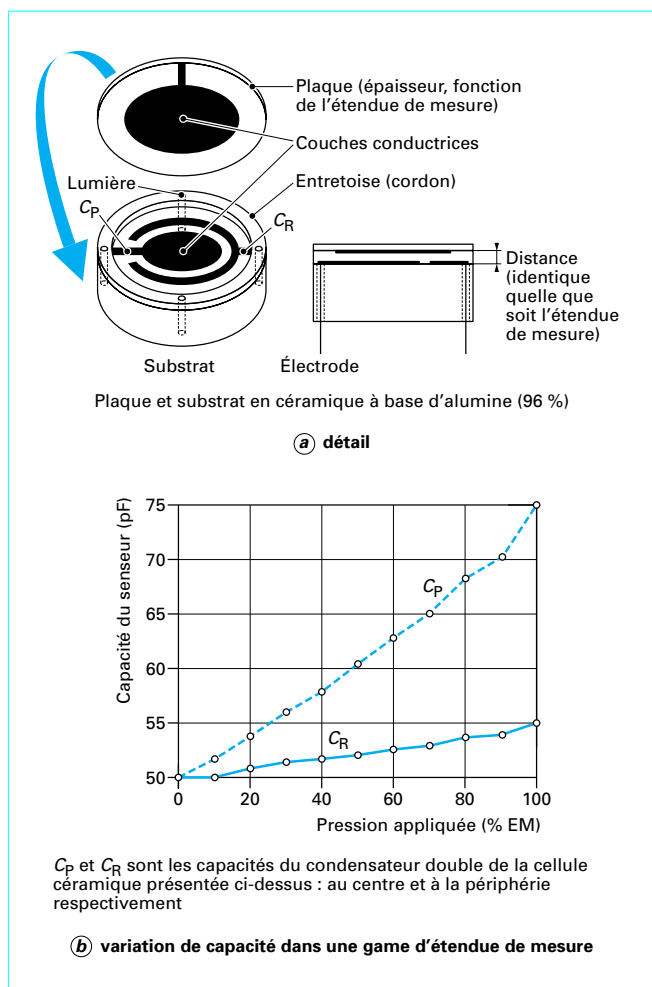


Figure 32 – Cellule de mesure céramique (doc. Kavlico)

■ Les **cellules céramiques** sont conçues aussi bien pour la mesure des pressions absolues, relatives ou différentielles (figure 33 a) ; leur fabrication est relativement économique. Des cellules métalliques sont également proposées (figure 33 b). Leur procédé de fabrication étant moins automatisé, leur coût est généralement plus élevé. De façon générale, le recours aux membranes séparatrices, céramique ou métallique, est recommandé lorsque la température du milieu devient ou trop haute ou trop basse.

■ L'**erreur combinée** d'un capteur capacitif est de l'ordre de $\pm 0,2 \%$. Les signaux de sortie sont standards, $4 + 20 \text{ mA}$ ou 0 et 10 V , sous une alimentation de 10 à 30 V . Il est possible d'utiliser ces capteurs dans la plage de température ambiante située entre -40 et $+125 \text{ }^\circ\text{C}$, mais plus couramment entre -20 et $+80 \text{ }^\circ\text{C}$. Les cellules céramiques autorisent des surpressions importantes et confèrent à ces instruments une très bonne stabilité à long terme ($\pm 0,25 \%$ de l'EM sur un an) ainsi qu'une bonne longévité sous charge cyclique. Les capteurs capacitifs sont principalement sensibles aux variations de température : l'influence de la température est de l'ordre de 1% sur la sensibilité et de 1% de l'EM sur le zéro. Ils sont également affectés par l'hygrométrie qui joue sur la constante diélectrique, les vibrations (risque de résonance des armatures) et les capacités parasites, ce qui nécessite des précautions d'emploi. Dans certains modèles, les gaz conducteurs peuvent créer des difficultés de mesure. La

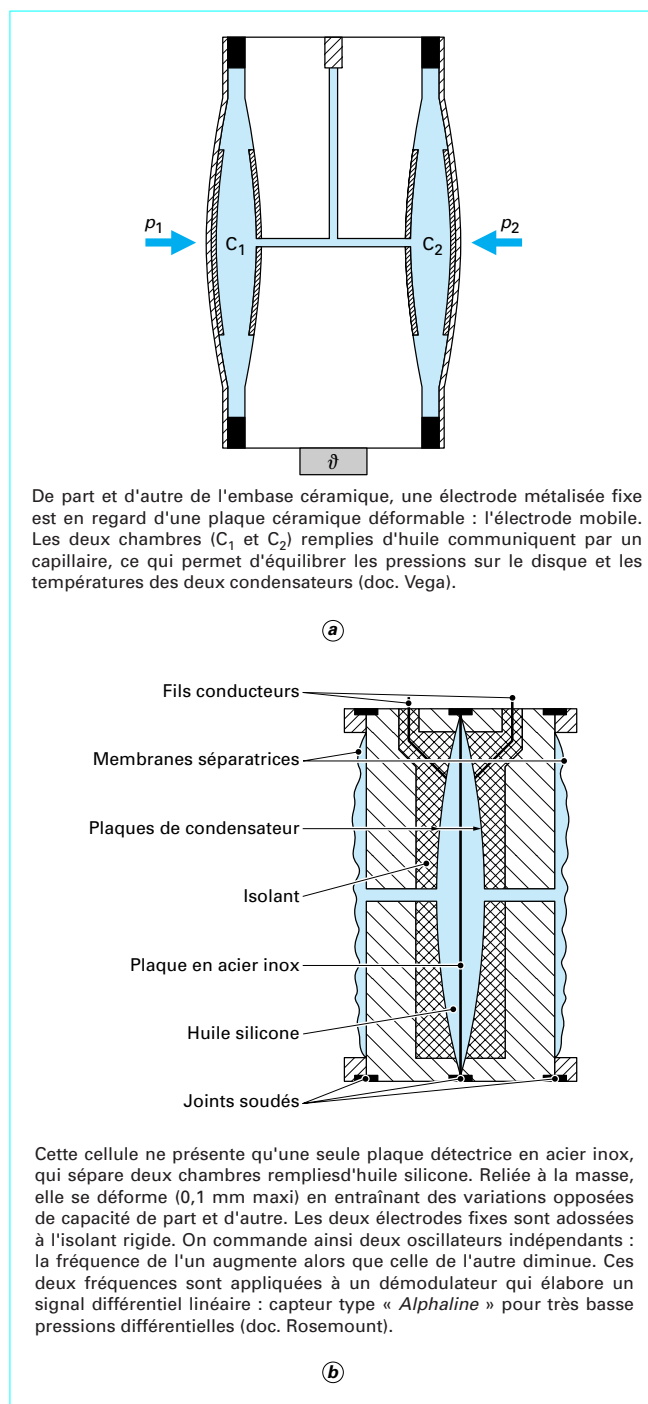


Figure 33 – Capteurs capacitifs différentiels

réponse dynamique des condensateurs à écartement variable peut être excellente (fréquence propre de plaque élevée) ; les capteurs de ce type sont donc bien adaptés à la mesure des pressions rapidement variables. Mais alors, la réponse en fréquence du capteur est principalement déterminée par la fonction de transfert des conditionneurs associés.

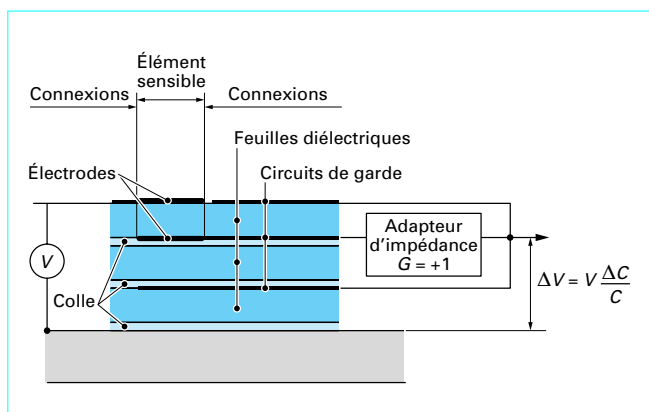


Figure 34 – Capteur pelliculaire à diélectrique solide (d'après doc. Onera)

Remarque :

— les capteurs capacitifs à **trame pelliculaire** ne font pas l'objet d'une utilisation courante ; ils ont été développés par l'ONERA pour instrumenter des profils aérodynamiques. Il existe deux types de capteurs : les capteurs à diélectrique solide élastique (*Kapton*, par exemple) et les capteurs à diélectrique gazeux (air contenu dans des alvéoles, par exemple). Collés sur les profils, leur épaisseur ne dépasse guère 80 μm , pour une surface de détection de $4 \times 6 \text{ mm}^2$ (figure 34). Leur sensibilité vaut environ $10^{-9} (\Delta C/C) \cdot \text{Pa}$ pour les premiers et $2 \times 10^{-7} (\Delta C/C) \cdot \text{Pa}$ pour les seconds ;

— seule une catégorie particulière de capteurs capacitifs évite l'emploi d'une source extérieure d'alimentation grâce à l'utilisation d'une membrane conservant une polarisation électrique constante, les capteurs à **effet électret**. Un film mince de polyester, de quelques μm d'épaisseur, constitue la membrane. Cette membrane métallisée sur sa face supérieure repose de l'autre côté sur une électrode métallique gaufrée (alvéoles remplies d'air). Le condensateur ainsi réalisé a une sensibilité, variable en fonction de la température, qui se situe entre $0,01$ et $0,2 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$ selon le modèle (ONERA), pour un diamètre inférieur à 5 mm et une épaisseur de l'ordre du millimètre. Ces capteurs doivent être associés à des adaptateurs d'impédance comportant, par exemple, des transistors à effet de champ ;

— de nombreux capteurs de pression différentielle vrais sont de type capacitif ou inductif. Ces principes de détection favorisent des réalisations techniques symétriques autour du détecteur ou du corps d'épreuve ; ils sont susceptibles de mesurer des déplacements de part et d'autre d'une position d'équilibre sans lien matériel, mécanique ou électrique, entre détecteur et corps d'épreuve. Les solutions mécaniques simples, qui en résultent, permettent généralement un comportement dynamique optimal.

2.2.4 Capteurs et transmetteurs à effet piézoélectrique

■ Les matériaux piézoélectriques possèdent une structure cristalline asymétrique qui autorise des déplacements de charge électrique sous chargement mécanique. Des charges positives et négatives proportionnelles à la pression apparaissent en certains endroits de leur surface lorsqu'ils sont comprimés dans des directions particulières. Les charges disparaissent lorsque la pression est supprimée. La conversion de l'intégralité des charges nécessite l'emploi de matériaux piézoélectriques particulièrement isolants : des cristaux simples (quartz ou tourmaline) ou des céramiques ferro-

électriques. Un cristal donné doit être taillé dans une direction particulière pour parvenir à l'effet piézoélectrique spécifique recherché. Dans les céramiques ferroélectriques, on obtient un alignement des différents axes piézoélectriques des régions cristallines par polarisation. Ces matériaux ont une sensibilité piézoélectrique élevée et peuvent être fabriqués à la demande, contrairement aux cristaux simples.

Les trois directions orthogonales d'un élément piézoélectrique de forme parallélépipédique constituent le système d'axes de référence 1, 2 et 3 du détecteur. Sur les deux facettes perpendiculaires à un axe i on peut recueillir une charge électrique $Q_i = k_{ij} F_j$ consécutive à un chargement mécanique F_j de direction d'axe j . Le coefficient k_{ij} représente la quantité de charge générée par unité de force ; il est exprimé en picocoulombs par newton. Le tableau 3 donne différents coefficients de charge suivant les matériaux employés. La tension produite entre les deux facettes métallisées (électrodes) est :

$$U = Q_i / C$$

avec C capacité du condensateur ainsi réalisé.

La permittivité relative de l'élément piézoélectrique est elle-même fonction de la direction i ; elle augmente rapidement avec la température, présente un maximum au point de Curie et, ensuite, décroît rapidement.

Tableau 3 – Comparaison de matériaux piézoélectriques

Matériau	Constante diélectrique	Charge (pC/N)	Point de Curie (°C)
Quartz (P-2)	4	2	560
Tourmaline	7	2	
Céramique (P-14)	160	20	680

■ Pour constituer le senseur d'un **capteur de pression piézoélectrique**, il suffit, en principe, de précontraindre une plaquette de matériau piézoélectrique (corps d'épreuve) entre deux électrodes. La plaquette a la forme d'une rondelle ou d'un disque : elle n'est sensible qu'à une seule direction bien définie de la force, par exemple $Q_1 = k_{11} F_1$. Dans ce cas, la force F_1 résulte des forces de pression. La précontrainte initiale permet d'effectuer des mesures de pression relative : toute dépression est alors mesurée comme une diminution de la précontrainte. La taille des plaquettes et leur nombre (plusieurs éléments peuvent être empilés et connectés) déterminent la sensibilité du senseur.

Nota : pour le quartz taillé perpendiculairement à l'une des trois diagonales de la section hexagonale et chargé suivant cet axe, la sensibilité est $0,51 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

L'étendue de mesure maximale dépend directement de la contrainte maximale admissible par l'élément piézoélectrique (950 MPa pour le quartz). Cette limite est fortement affectée par la qualité des contacts, notamment entre le cristal et l'électrode : parallélisme meilleur que $10 \mu\text{m}$ et planéité meilleure que $1 \mu\text{m}$. Seuls le poli optique et le rodage soigné des surfaces suppriment les irrégularités pouvant entraîner des concentrations de contrainte dépassant la charge de rupture. La forme tubulaire permet d'accroître la charge en simplifiant le mode d'association des éléments (métallisation des surfaces cylindriques, interne et externe, de l'élément piézoélectrique).

La figure 35 a représente un capteur en coupe. Dans cet exemple, l'élément piézoélectrique est composé de deux disques de quartz comprimés entre une base et une pièce terminale à l'aide d'un dispositif de préchargement (une vis dans cet exemple, on trouve aussi parfois des ressorts). Une plaque séparatrice, très fine, en acier inoxydable, soudée au boîtier, supporte la pièce terminale ; elle comprime l'élément détecteur actif (les deux disques) lorsque la pression s'exerce sur elle. Ce type de senseur est sensible aux vibrations mécaniques ou acoustiques.

Un tel capteur piézoélectrique peut être compensé en accélération. Une masse sismique et un ensemble de disques de polarité inversée complètent alors la pile initiale de plaquettes (figure 35 b). La sensibilité de cet accéléromètre est ajustée de manière à annuler complètement les effets d'inertie de la pièce terminale et de la plaque induits par des accélérations. Il en résulte un senseur qui est compensé en accélération, c'est-à-dire qui ne produit pas de signaux perturbés par des chocs ou des vibrations.

■ Un senseur piézoélectrique a l'avantage d'être **autogénérateur** (principe actif), mais il nécessite des précautions particulières dans le conditionnement du signal de sortie. En effet, il offre au conditionneur une très haute impédance interne, principalement capacitive. Considéré comme une source de tension en série avec une capacité (celle du câble de liaison et celle d'entrée de l'amplificateur), le senseur est simple à utiliser a priori, mais à condition que l'amplificateur soit utilisé dans une installation à configuration immuable (le senseur et son câble sont indissociables) comme, par exemple, dans les capteurs à électronique intégrée. Par contre, les mesures aux très basses fréquences sont aléatoires, voire impossibles.

L'amplificateur de charge, où le senseur est assimilé à un générateur de charge en parallèle avec une capacité, est préférable. Le conditionneur comporte un convertisseur de charge, constitué d'un amplificateur opérationnel avec un réseau intégrateur en contre-réaction (cf. 4.44 de la référence [1]), et un amplificateur de tension. Non seulement la tension de sortie est alors indépendante de la capacité du câble de liaison (utile pour les capteurs non intégrés), mais surtout il est possible de réaliser des mesures correctes en très basse fréquence. La résistance d'isolement entre les armatures du capteur n'étant pas infinie, il n'est pas possible d'assurer la mesure de phénomènes rigoureusement statiques. Cependant, avec un amplificateur de charge et en prenant de grandes précautions d'isolement pour le capteur et son électronique, il est possible d'obtenir des constantes de temps de décharge de l'ordre de l'heure correspondant à une fréquence de coupure inférieure à 1 mHz (mesures quasi statiques).

Au-delà du principe actif, certains instruments sont dotés d'un amplificateur convertisseur d'impédance alimenté en continu ; ils délivrent un signal de sortie sur basse impédance modulé par la tension aux bornes du cristal (figure 35 c)

Les capteurs piézoélectriques sont très rigides ; assimilables à un système masse-ressort du second ordre avec un amortissement pratiquement nul, ils possèdent une fréquence propre élevée. Ils autorisent des performances de sensibilité et de bande passante difficiles à obtenir par d'autres moyens. Des événements avec des temps aussi rapides que 1 µs et des fréquences de centaines de kilohertz peuvent être mesurés dans une large gamme d'étendues de mesure (100 Pa à 1 GPa). Ils sont extrêmement stables et robustes. L'écart de linéarité va de ± 0,1 % à ± 1 % et l'erreur d'hystérésis est inférieure à 10⁻⁴ %. Ces instruments sont utilisables dans des conditions de températures extrêmes (de -196 °C à +350 °C). Les capteurs à céramiques sont sensibles à la température et présentent quelques difficultés d'étalonnage ; par contre, leur sensibilité est bien supérieure à celle des capteurs à quartz. Les effets pyroélectriques sont négligeables avec le quartz.

2.2.5 Capteurs et transmetteurs à variation de fréquence

■ Le **senseur comporte un oscillateur électromécanique** sensible aux forces ou aux contraintes qui lui sont appliquées. En agissant sur l'élément vibrant, la force de pression, directement ou indirectement, altère la fréquence d'oscillation. Il en résulte une sortie en fréquence (mode de détection pseudo-numérique) qui peut être appréciable dans de multiples situations : meilleure immunité aux bruits et aux parasites, protection de l'information vis-à-vis de l'atténuation de transmission, facilité de conversion sous forme numérique.

Le détecteur, c'est-à-dire l'élément vibrant, ne se différencie pas toujours du corps d'épreuve : par exemple, le tube vibrant qui est, en fait, un tube borgne. Dans les autres cas, le détecteur est soumis

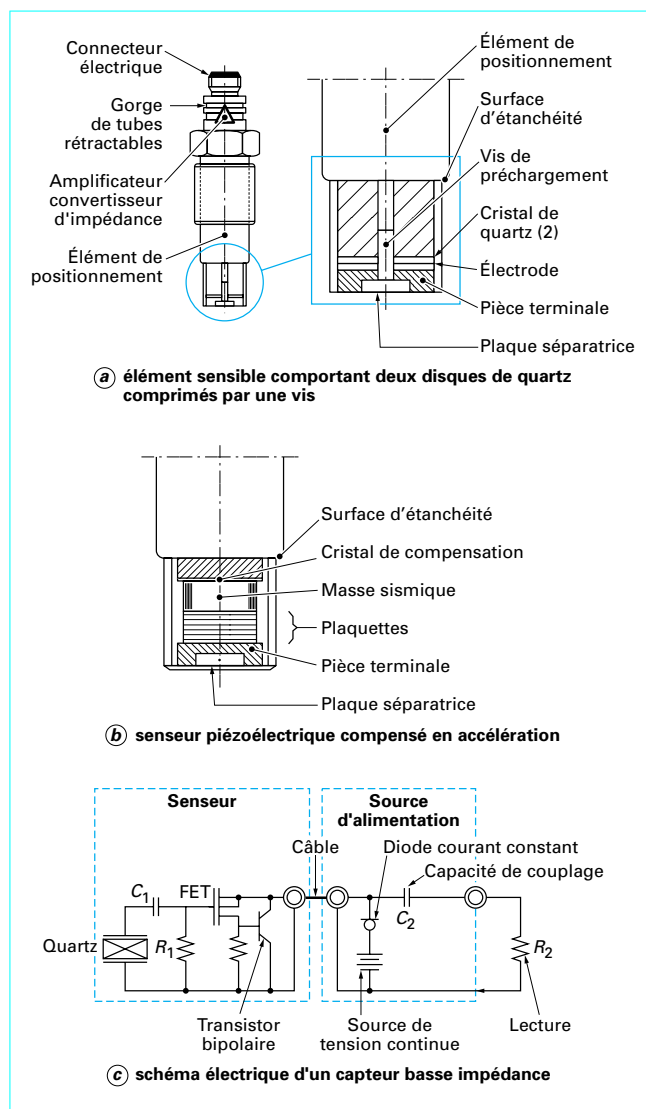


Figure 35 - Capteur de pression piézoélectrique (doc. Omégadyne)

aux efforts transmis par un dispositif intercalé entre lui (lame ou corde tendue) et le corps d'épreuve (plaque ou soufflet). Les déformations du corps d'épreuve sont généralement très faibles, la respiration du senseur est donc négligeable.

Sur le capteur de pression type P51 de Sextant Avionique une lame piézoélectrique taillée dans un monocristal de quartz (figure 36) est entretenue en vibration sur sa fréquence de résonance. La pression à mesurer est appliquée à un soufflet qui la convertit en une force exerçant une contrainte sur le résonateur dont la fréquence, qui varie en fonction de la contrainte appliquée, constitue l'information de sortie du senseur. La force développée par le soufflet est transmise à la lame de quartz par un fléau équilibré au moyen de deux masselottes mobiles (figure 37 a). De ce fait, on arrive à éliminer pratiquement les forces dues aux vibrations et accélérations extérieures. Sur des capteurs de conception antérieure très voisine (Digiquartz de Paroscientific), la sensibilité aux accélérations est ainsi ramenée à ± 0,0038 % l'EM/g (série 2000). Le vide de référence des capteurs absolus est réalisé dans l'enceinte contenant le résonateur. Pour la mesure des pressions différen-

tielles, une cloison étanche et souple permet d'appliquer une pression différente de part et d'autre du soufflet tout en permettant le fonctionnement du résonateur dans le vide. Les extrémités de la lame de quartz, formant un filtre mécanique passe-bas, éliminent tout transfert d'énergie de la lame vers la structure. Par cet artifice et, aussi, du fait que la lame est placée dans le vide, le coefficient de surtension est très élevé. Les erreurs de répétabilité et d'hystérésis sont de $\pm 0,005\%$ de l'EM chacune sur le capteur *Digiquartz*.

■ La fréquence de vibration f est liée à la pression p par une relation polynomiale du second ou du troisième ordre, du type :

$$p = K_0 + K_1f + K_2f^2 + K_3f^3.$$

La fréquence de vibration dépendant de la température, un second cristal, non affecté par la pression, sert de référence thermique et garantit une meilleure précision de la valeur calculée. Les paramètres K_i , caractéristiques de chaque capteur et fonctions de la température, sont stockés dans une mémoire associée. Le signal de pression varie de 10 % sur une fréquence nominale comprise entre 30 et 42 kHz. Les dérives en fonction de la température sont respectivement de 0,0002 % de EM/°C pour le zéro et de $\pm 0,0008\%$ / °C pour la sensibilité sur une plage d'utilisation et de compensation en température de -54° à $+107^\circ$ C (*Digiquartz*). La stabilité à long terme est remarquable et l'exactitude de la mesure peut atteindre 0,01 % de l'EM, y compris les dérives en température. La méthode d'exploitation du principe (figure 37b) permet d'obtenir une résolution jusqu'à 10^{-8} de l'EM. Ce type de capteur est adapté à des applications tant aéronautiques que métrologiques nécessitant de hautes performances dans des gammes d'étendue de mesure couvrant largement les mesures de pression usuelles. Pour des faibles pressions (entre 1 et 100 kPa), l'encombrement du P51 est de (75 x 58 x 44 mm) et sa masse de 350 g.

■ Le capteur à tube vibrant est basé sur un principe équivalent : la fréquence propre du cylindre est modulée par les variations de pression. On citera enfin, pour mémoire, le capteur fabriqué par Telemac qui illustre une mise en œuvre du principe de la corde vibrante tendue entre un point fixe du boîtier et le corps d'épreuve.

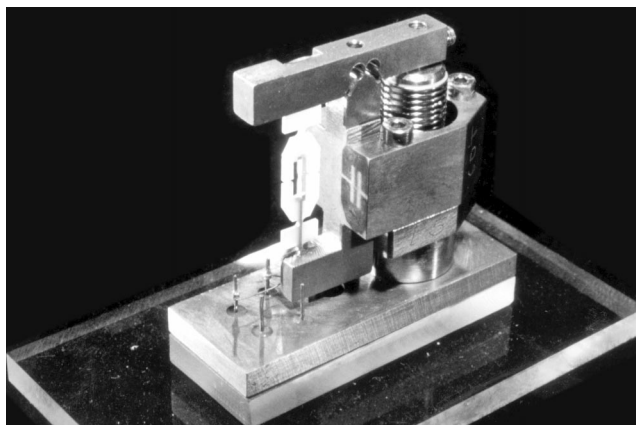


Figure 36 – Capteur de pression à quartz résonnant (doc. Sextant Avionique)

2.2.6 Capteurs et transmetteurs à variation de flux lumineux (optique)

■ Le principe de base des instruments repose sur les modulations d'amplitude et de phase de la lumière. Une fibre optique (ou plusieurs) entre généralement dans la composition de la plupart des appareils, appelés pour cette raison : capteurs à fibres optiques [6]. On trouve des capteurs dans lesquels les pressions sont directement répercutées sur la fibre, engendrant de la sorte une augmentation d'atténuation. Une autre solution consiste à provoquer des pertes dans une fibre possédant des microcourbures longitudinales, très localisées, liées à la pression.

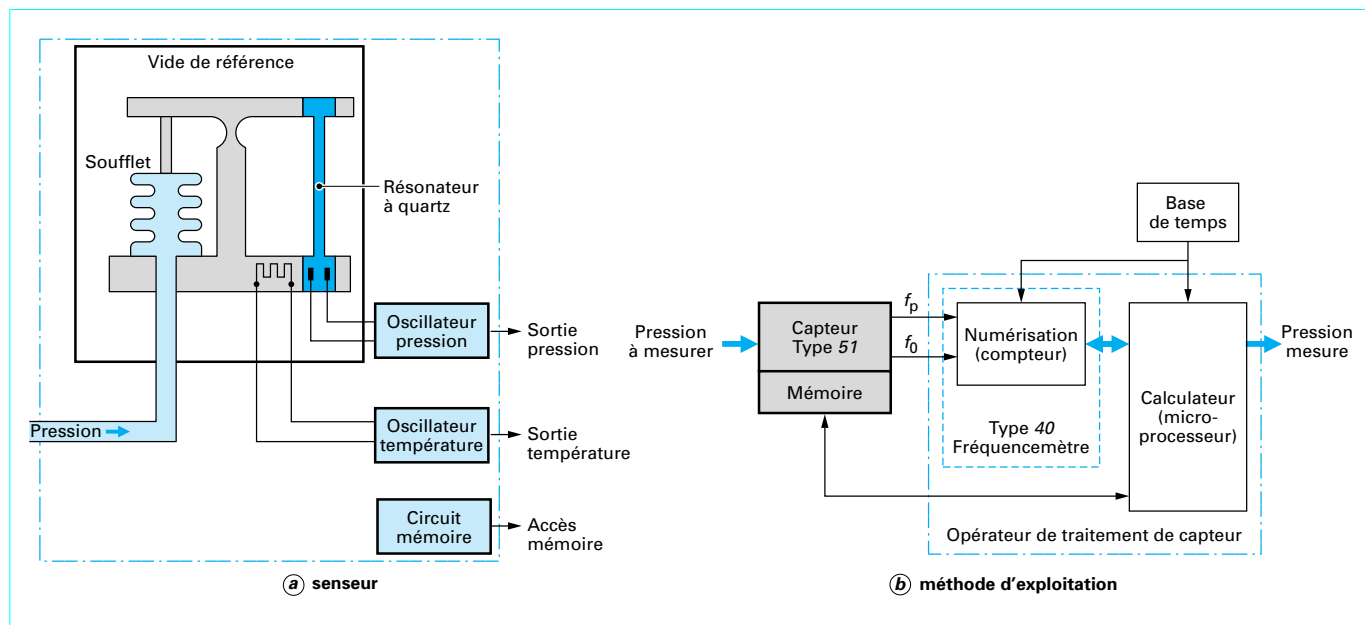


Figure 37 – Principe du capteur de pression à quartz résonnant type 51 (doc. Sextant Avionique)

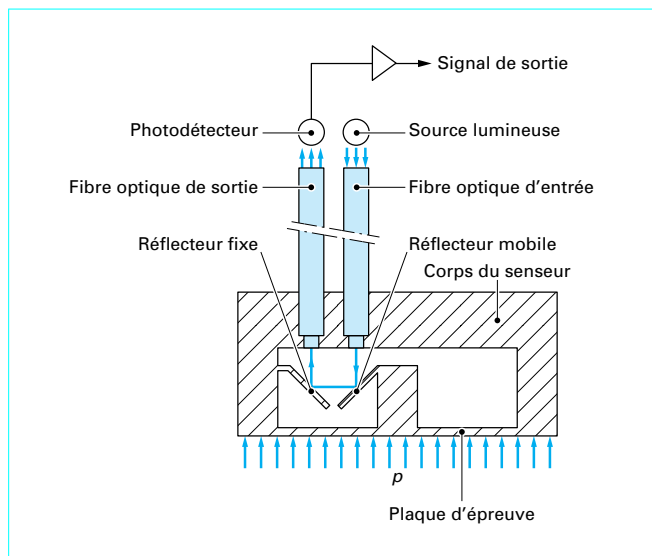


Figure 38 – Transmetteur à fibre optique Dynisco OPT700

Exemple : transmetteur Dynisco (figure 38).

Des fibres optiques d'entrée et de sortie sont ancrées sur le corps du capteur. Le rayon lumineux transmis par la fibre d'entrée passe par une ouverture et tombe en incidence sur le réflecteur mobile puis sur le réflecteur fixe. Il passe ensuite à travers une seconde ouverture et continue via la fibre optique de sortie jusqu'à un photodétecteur. L'intensité du rayon transmis est déterminée par la déflexion linéaire du réflecteur mobile entraîné par le corps d'épreuve. Ce déplacement est directement proportionnel à la pression qui est détectée au bout de la fibre de sortie par le dispositif photosensible.

Caractéristiques d'un capteur à variation de flux lumineux (Dynisco OPT700) :

- gammes des étendues de mesure : 0 + 1 MPa à 0 + 140 MPa ;
- erreur combinée : ± 0,5 % de l'EM ;
- température maximale du corps d'épreuve : 400 °C ;
- température maximale du boîtier : 60 °C ;
- dérive thermique de sensibilité : < 0,04 % / °C ;
- dérive thermique du zéro : < ± 0,01 % de l'EM / °C.

■ Les variations de phase entre deux faisceaux lumineux sont détectées dans les capteurs interférométriques (bien adaptés à la mesure de phénomènes alternatifs).

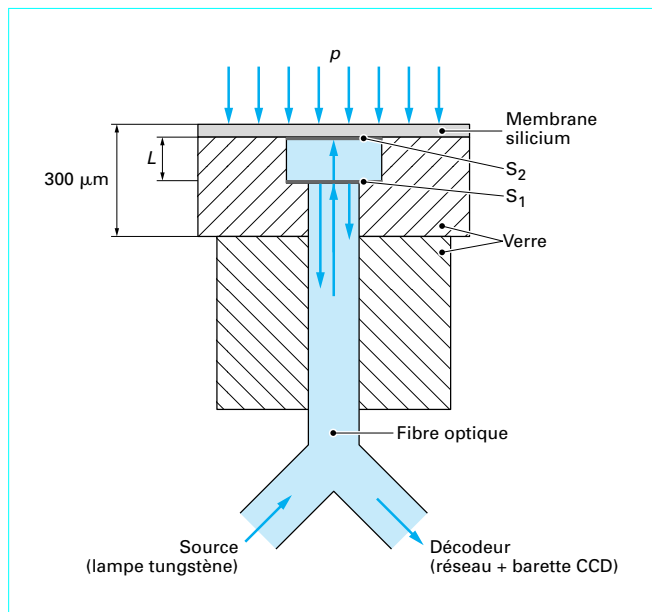


Figure 39 – Capteur Metricor à interféromètre Fabry-Pérot (doc. Photonetics)

Exemple : capteur Metricor 2000 (Photonetics).

Le procédé de transduction optique est basé sur le principe de l'interférométrie Fabry-Pérot. La lumière est amenée dans une cavité de hauteur L par une fibre optique, à partir d'une jonction Y, (figure 39). La cavité est creusée par gravure chimique dans un bloc de verre de dimensions $500 \times 500 \times 300 \mu\text{m}$. La pression s'exerce sur une membrane de silicium, collée sur le substrat de verre, et affecte la hauteur L . La face S_1 du fond de la cavité et la face S_2 au-dessous de la membrane sont revêtues d'une couche partiellement réfléchissante. Une fraction de la lumière incidente apportée par la fibre se réfléchit sur S_1 ; l'autre fraction traverse la cavité et se réfléchit en S_2 . La différence de phase entre les deux faisceaux réfléchis, modulée par L , est :

$$\phi = 2kL + \pi$$

avec $k = 2\pi/\lambda$ vecteur d'onde.

L'intensité lumineuse dirigée vers le détecteur, résultant de l'interférence des deux faisceaux, est ainsi :

$$I = I_c(1 - C \cos 4\pi L/\lambda_n)$$

avec C coefficient de contraste,

$$\lambda_n = 2L/n,$$

n entier (figure 40).

Le choix de conception, $L_0 = 2,5 \mu\text{m}$, donne dans le domaine visible une longueur d'onde $\lambda_6 = 833 \text{ nm}$ et une étendue de mesure entre deux modes $\Delta\lambda = 120 \text{ nm}$, correspondant à $\Delta L_{\text{max}} = 0,36 \mu\text{m}$. La détection sur une barette CCD de 256 pixels, avec une largeur moyenne de raie de 25 nm , permet une résolution de $0,1 \text{ nm}$. La réjection en sortie des modes adjacents (λ_5 et λ_7) est effectuée par un réseau dont l'angle est calculé pour couvrir l'intervalle $833 \pm 60 \text{ nm}$. L'ajustement de la déflexion de la membrane, pour une étendue de mesure de pression donnée, est fait par amincissement de la paroi de silicium, à partir d'un calcul par la formule de déformation. La source choisie est une lumière blanche fournie par une lampe de tungstène, dont l'intérêt réside dans :

- son spectre plat (ne nécessitant pas de correction d'intensité avec la longueur d'onde) ;
- la largeur du spectre (l'ouverture spectrale d'une LED, au mieux de 35 nm , limiterait l'étendue de mesure) ;
- sa faible dérive thermique.

La résolution du capteur est ainsi de 10^2 Pa .

■ Des détecteurs optiques à modulation d'amplitude mesurant les déplacements ou les déformation du corps d'épreuve sont également mis en œuvre ; dans ce cas, la pression agit sur le faisceau lumineux en dehors de la fibre, (capteurs extrinsèques). Dans ces capteurs, on cherche à obtenir une variation de couplage entre une (des) fibre(s) émettrice(s) et une (des) fibre(s) réceptrice(s). Le signal de retour est fonction de la distance entre fibre(s) et réflecteur.

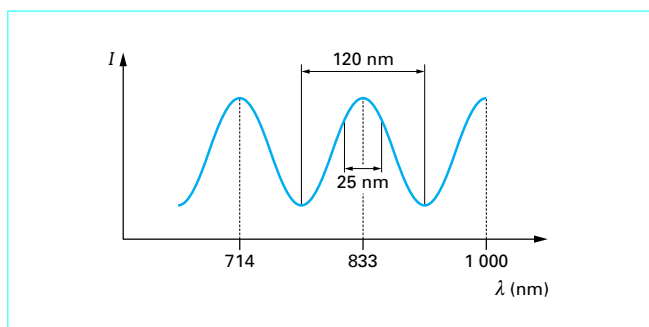


Figure 40 – Modes de la cavité Fabry-Pérot

■ Les capteurs à fibres optiques **présentent des avantages certains** : immunité aux champs électromagnétiques, insensibilité électrique (parasites et haute tension), possibilité d'une large bande passante, faible masse, dimensions réduites, possibilité de fonctionner à haute température, en milieu corrosif ou explosif, grande sensibilité, inertie chimique.

Un gros effort porte sur la réalisation de réseaux de tels capteurs, ce qui pose évidemment le problème du mode de multiplexage sur la fibre optique de transmission (multimode à gradient d'indice), division de temps, division de fréquence, ou compensation d'impulsions. En supposant que chaque capteur requiert une bande passante de 10 à 100 kHz, plus 1 kHz pour la position, le nombre de capteurs branchés sur une même fibre de transmission portant 1 GHz peut être rendu important.

2.3 Microcapteurs, microtechnologies

Cette catégorie de capteurs, où l'on cherche davantage à tirer profit de nouveaux outils de production que de nouveaux principes, allie étroitement les procédés de fabrication de la microélectronique à ceux de la micromécanique. Cette évolution, sous-tendue par la nécessité de produire à faible coût des capteurs intégrés, petits et fiables, est apparue il y a quelques années avec la réalisation des premiers senseurs à jauges intégrées [cf. (§ 2.1.2.3)] et l'objectif de fabriquer en grande quantité des composants mariant des fonctions électroniques et mécaniques, voire optiques [cf. (§ 2.2.6)], sur un même substrat. Les procédés de transformation et d'assemblage des matériaux, verre, métaux, céramiques, semi-conducteurs et surtout silicium, sont au cœur même du développement de cette dernière génération de capteurs.

Remarque : on rappelle ici les principaux procédés de transformation et d'assemblage :

- **procédés d'apport de matière** comme l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, la CVD (*Chemical Vapor Deposition*), l'implantation ionique, pénétrant plus ou moins le substrat et conduisant à des films minces (de quelques nm à 1 mm d'épaisseur) de toutes compositions et de toutes natures (monocristallin, polycristallin ou amorphe), mais aussi la lithographie synchrotron et l'électrodéposition (procédé LIGA : pour *Lithograph Galvanoforming Abforming*) ainsi que la stéréolithographie permettant la réalisation de moules 3D ;

- **procédés physico-chimiques** d'enlèvement de matière (gravure chimique, gravure ionique réactive, usinage ionique) ;

- **procédés d'assemblages** qualifiés aussi d'opérations d'hétéroassemblages pour marquer qu'il s'agit de l'association intime de deux matériaux différents soit par collage (dépôt en couche d'un matériau intermédiaire), soit par soudage (association de matériaux à sec après traitements adéquats de surface).

2.3.1 Le silicium

La production du silicium monocristallin tel qu'utilisé par l'industrie électronique est relativement complexe. Dans des fours de tirage chargés de silicium pur, on fait pousser de grands monocristaux, des barreaux cylindriques (\varnothing : 125 mm), que l'on découpe en fines tranches. Rectifiées ou rodées, les tranches sont utilisées telles quelles sur les lignes de fabrication. Très adapté à la fabrication des circuits microélectroniques, le silicium monocristallin présente des propriétés mécaniques intéressantes. En effet, si ce matériau est cassant, il est toutefois plus dur que la plupart des métaux et résiste très bien aux contraintes mécaniques ; sa limite élastique en tension comme en compression est supérieure à celle de l'acier, mais il se disloque au-delà. Il résiste bien aux sollicitations alternées. Si le silicium s'oxyde plus facilement que les autres semi-conducteurs, sa couche d'oxyde (silice : SiO_2) est chimiquement inerte et électriquement isolante ; on tire profit de cette propriété pour protéger et masquer certaines zones du silicium au cours des opérations de fabrication, tant en microélectronique qu'en micro-usinage, ou pour isoler différentes couches.

Le silicium monocristallin présente un motif cubique emboîté à faces centrées semblable à celui du diamant, les forces interatomiques de liaison y sont toutefois plus faibles. Les atomes occupent les sommets du cube, le centre de chacune des faces et le quart des diagonales intérieures. Les cubes s'emboîtent de sorte que plusieurs atomes de cubes voisins se trouvent dans le cube unité.

Cette structure de cubes emboîtés à faces centrées peut servir de base à un système d'axes orthogonaux (x_1, x_2, x_3) : on prend comme origine du système d'axes un atome quelconque et comme axes les arêtes du cube auquel cet atome appartient ; l'unité de distance est la longueur de l'arête d'un cube. On décrit une direction dans le cristal par les trois coordonnées d'un vecteur directeur et l'on désigne ces coordonnées sous le nom d'indices de Miller ; par le vecteur [110] par exemple, on décrit la diagonale d'une face du cube. On utilise également les indices de Miller d'une direction pour désigner l'ensemble des plans atomiques perpendiculaires à cette direction. Ainsi, la notation (100) désigne tous les plans perpendiculaires à l'axe x_1 . Comme le cristal possède une structure symétrique, selon les trois directions x_1, x_2 et x_3 , on peut introduire d'autres notations pour représenter de façon plus générale les directions et les ensembles de plans équivalents. On désigne par la notation $\langle 110 \rangle$ toutes les diagonales des faces du cube unité et par la notation {110} l'ensemble des plans perpendiculaires aux diagonales $\langle 110 \rangle$. L'orientation cristalline est importante pour la fabrication des dispositifs micromécaniques car certains agents corrosifs ont des vitesses d'attaque qui dépendent de la direction dans le cristal.

Nota : pour de plus amples renseignements, le lecteur se reportera aux articles sur la Cristallographie dans les Techniques de l'Ingénieur.

2.3.2 Structures micro-usinées

Le **micro-usinage** permet de fabriquer avec la résolution des procédés microélectroniques des ensembles de détection tridimensionnels tels que cavités, poutres en surplomb, cloisons, etc. Les formes désirées sont obtenues soit directement par gravure, soit par élimination sélective de couches minces réalisées alternativement sur quelques micromètres d'épaisseur à la surface du substrat. Les couches sacrifiées sont alors attaquées par des procédés chimiques sélectifs qui laissent intactes les autres couches. Par exemple, dans le cas de la figure 41, la poutre est obtenue après élimination de la couche de SiO_2 .

La gravure dans la masse requiert un contrôle des directions d'attaque. Cette directivité peut être induite soit par le substrat monocristallin, soit par l'agent de gravure lui-même. Par exemple, les agents chimiques en phase liquide réagissent plus ou moins vite selon les axes cristallins : on parle dans ce cas de gravure chimique anisotrope. Lorsque l'agent de gravure est un plasma et que l'attaque est stimulée par un bombardement ionique directif, on

parle de gravure ionique réactive RIE. La RIE permet une gravure anisotrope indépendamment de la structure cristalline du substrat et, donc, une grande variété de formes. La difficulté de ce procédé réside dans le fait qu'il faut attaquer le masque de gravure beaucoup moins vite que le substrat, ce qui nécessite un compromis entre rapidité, rapport d'anisotropie et sélectivité.

La gravure chimique anisotrope des monocristaux (principalement le silicium) est de loin la plus utilisée (voir, par exemple les formes obtenues par attaque lente (111) et $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ des pastilles (100) et (110) de silicium sur la figure 42). Ce procédé présente non seulement un caractère général (le quartz peut remplacer le silicium), mais aussi l'avantage d'être « facilement » reproductible : en effet, les géométries sont directement liées à la structure cristalline du matériau. On peut ainsi réaliser des corps d'épreuve de 10 à 50 micromètres d'épaisseur par simple attaque minütée et obtenir des microplaques encore plus fines en ayant recours à des couches dopées inhibitrices de l'attaque (figure 43).

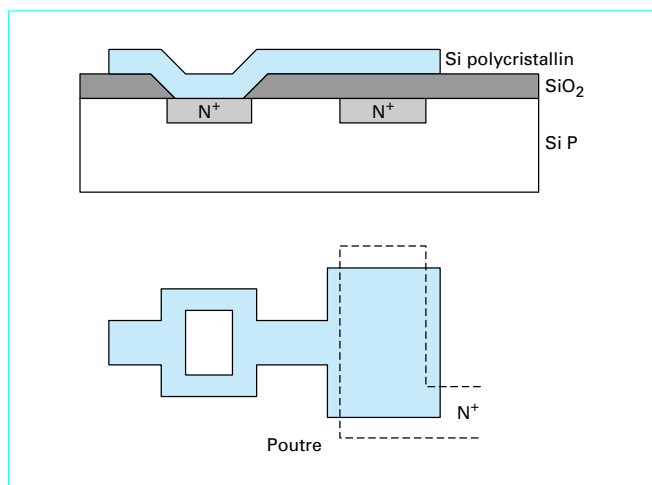


Figure 41 – Réalisation d'une poutre en silicium polycristallin par couche sacrificiée de SiO₂

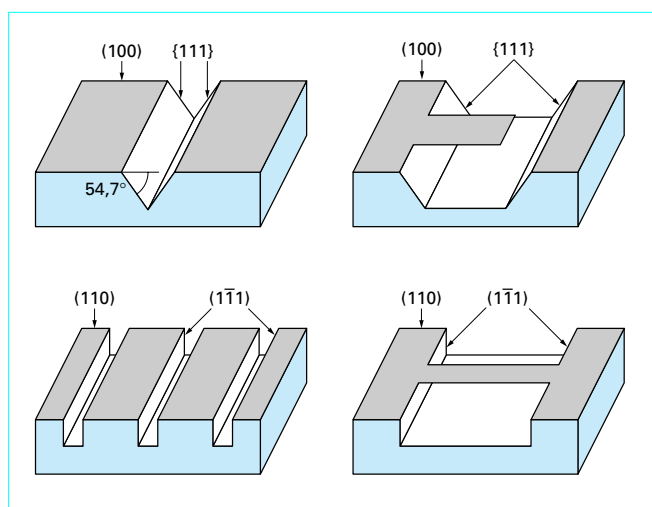


Figure 42 – Exemples d'attaques anisotropes

Remarque : ordre de grandeur des vitesses de gravure

Avec l'agent de gravure EDP (mélange d'éthylènediamine, de pyrocatechol et d'eau) à 100 °C, les vitesses d'attaque sont respectivement de 50, 30 et 3 µm/h pour les plans cristallins {100}, {110}, {111}. La vitesse d'attaque de l'oxyde de silicium est de 200 Å/h. Le silicium dopé P⁺ est peu attaqué.

Grâce aux méthodes d'usinage chimique non génératrices d'amorces de rupture, les senseurs au silicium micro-usinés peuvent supporter des limites élastiques jusqu'à 20 fois supérieures à celles qu'ils peuvent supporter après usinage mécanique.

2.3.3 Assemblage des microstructures

On a recours à l'assemblage de microstructures lorsqu'il est nécessaire de réaliser des cavités de dimensions très précises (figure 44 a) ou un empilement [9] sur plusieurs couches de sous-ensembles micro-usinés (figure 44 b). Les assemblages effectués par adjonction d'un matériau intermédiaire (collage) ou par association directe des matériaux (soudage) offrent souvent des solutions originales vis-à-vis de la microélectronique classique ; toutefois, ces techniques ne doivent pas nécessiter des températures supérieures à environ 500 °C, lorsqu'elles sont réalisées après l'intégration des circuits.

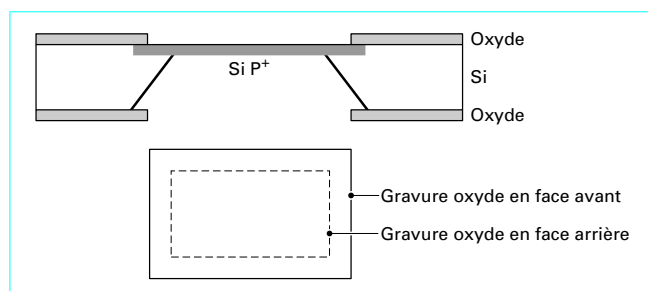


Figure 43 – Microplaque rectangulaire obtenue par inhibition d'attaque

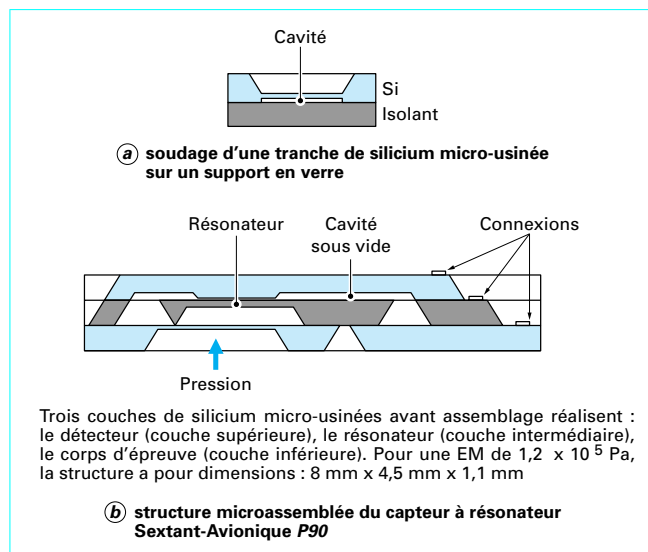


Figure 44 – Assemblage de microstructures

Le silicium et le verre sont assemblés par soudage électrostatique (soudure anodique). La technique consiste à mettre en contact sous pression les deux plaquettes initialement polies, à chauffer à environ 400 °C et à polariser électriquement le contact silicium-verre (environ 300 V). Le verre doit avoir des propriétés thermiques proches de celles du silicium : on utilise par exemple un borosilicate Corning (7740 ou 1729). La transparence du verre facilite les procédures de positionnement et d'alignement des pièces. La température de chauffage, relativement basse, laisse la possibilité d'utiliser de l'aluminium et évite la diffusion supplémentaire d'impuretés dans le silicium. La dilatation différentielle des matériaux reste cependant gênante pour les applications sensibles. On peut y remédier en assemblant directement deux plaquettes de silicium. La soudure SiO₂ obtenue nécessite des températures élevées (> 800 °C) ; elle s'apparente à un traitement thermique. Contrairement au couple Si-verre qui minimise les capacités parasites, on réalise ici une capacité Si/SiO₂/Si. Des assemblages silicium-silicium par soudage électrostatique et par l'intermédiaire d'une couche mince de verre peuvent également être réalisés.

Remarque : parallèlement à l'aspect purement micromécanique qui vient d'être exposé, on réalise des ensembles multicouches par dépôt de couches minces, épitaxie polycristalline sur SiO₂, implantation de barrières d'oxyde. L'objectif est de parvenir à l'intégration et à l'isolement des différents circuits spécifiques aux fonctions de détection et de traitement du signal. Ce point sera abordé dans le paragraphe suivant.

2.3.4 Circuits

2.3.4.1 Technologies

Les technologies bipolaires d'intégration des jauges sont largement utilisées dans les capteurs à semi-conducteurs (cf. (§ 2.1.2.3)), mais il existe également des technologies alternatives, dites SOI (*silicium on insulator*), qui se sont développées avec les capteurs micro-usinés de la microélectronique. Plutôt que de réaliser un isolement par jonction P-N, le circuit de jauges repose sur une fine couche de SiO₂ qui fait office de barrière d'isolement. Ces barrières d'oxyde peuvent être enterrées (substrat SIMOX), noyées entre deux plaquettes scellées oxyde contre oxyde (*Si/Si/bounding*), ou tout simplement en surface de substrat prêtes à recevoir un dépôt de polysilicium lorsque l'on peut renoncer à utiliser des jauges monocristallines (PSOI).

■ Dans le **procédé PSOI** [10] et [11], on dépose du polycristal de silicium (poly-Si) sur la couche de SiO₂ puis on grave en ne laissant subsister que les jauges (figure 45). On continue ensuite la gravure de l'autre côté pour façonner la cellule. À niveau de dopage équivalent, le facteur de jauge du poly-Si est sensiblement inférieur à celui d'un monocristal. Le senseur PSOI est très attractif pour son excellent comportement sur une large échelle de température (jusqu'à environ 200 °C).

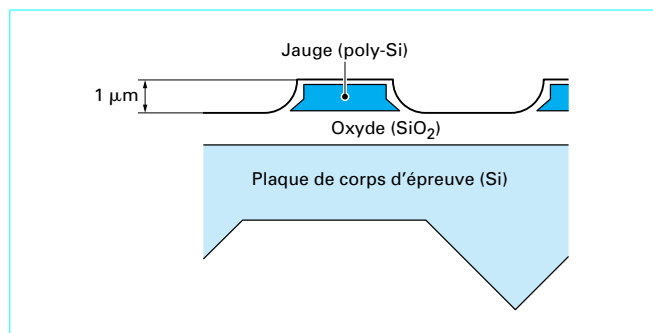


Figure 45 – Jauge de poly-Si à la surface d'une plaquette de silicium micro-usinée

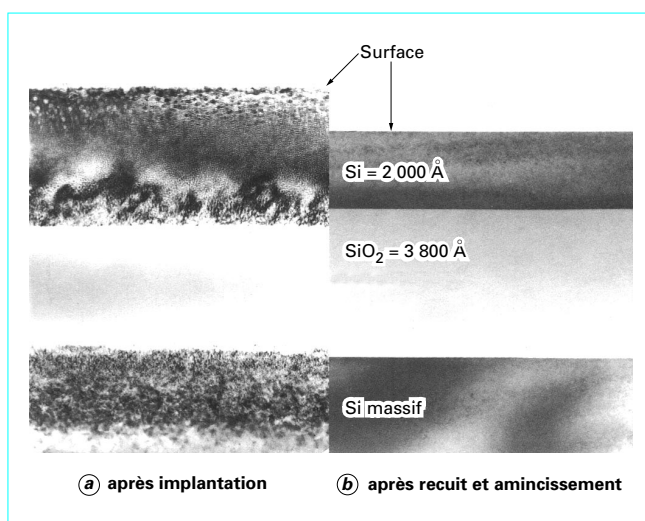


Figure 46 – Caractérisation XTEM d'une plaque SIMOX (doc. Leti)

■ Les **substrats SIMOX** du Leti (séparation par implantation d'oxygène) sont réalisés à partir de substrats standards de silicium. La première phase de fabrication consiste en une implantation d'une très forte dose d'oxygène, à fort courant et haute température. Les conditions standards sont les suivantes (dose : $1,8 \times 10^{18}$ ions/cm² ; courant : 100 mA ; énergie : 200 keV ; température > 600 °C ; durée d'implantation : 6 h). La seconde phase consiste en un recuit à très haute température (6 heures à 1320 °C) qui permet l'élimination des défauts d'implantation et des précipités de SiO₂ et la ségrégation totale de l'oxygène implanté dans la couche d'oxyde enterrée. Les interfaces Si/SiO₂ sont très abruptes et il y a formation d'une structure Si sur isolant (SOI) parfaite (figure 46). L'épaisseur du film de silicium peut être ajustée par oxydation sacrificielle, ou épitaxie. Tels quels, ces substrats constituent « une matière première » pour les usinages et des circuits de l'industrie du capteur.

■ Dans la technologie **Si/Si/bounding**, deux plaquettes présentant une fine couche d'oxyde sont soudées l'une contre l'autre, oxyde contre oxyde, à haute température. Une des deux faces est micro-usinée tandis que l'autre est de nature à recevoir un circuit intégré de jauges, bipolaire ou CMOS.

2.3.4.2 Intégration

Trois approches complémentaires sont suivies actuellement : l'intégration monolithique homogène, l'intégration monolithique hétérogène, l'intégration hybride.

■ Dans l'**intégration monolithique homogène**, les différentes phases de réalisation du détecteur s'incorporent entièrement aux opérations de fabrication du substrat (cf. capteurs Sagem ou Schlumberger et Nova-Sensor) où la microplaque est usinée à l'épaisseur requise après réalisation des jauges).

■ Dans une **approche monolithique hétérogène**, parallèle à l'évolution de la microélectronique, on associe plusieurs couches actives de matériaux différents. Cette voie s'impose lorsque l'on domine les propriétés thermoélastiques des différents matériaux et lorsqu'elle permet une nouvelle mise en œuvre de principes de détection (l'effet photomécanique d'une couche de ZnO déposée sur SiO₂ par exemple [12]).

■ Dans l'**approche hybride**, on interconnecte différents dispositifs sur un substrat commun (une interconnexion en assemblage 3D est envisageable). Ce moyen d'intégration est parfois nécessaire lorsque le senseur n'est pas un composant électronique de type VLSI, ce qui est le cas lorsqu'il doit impérativement fonctionner dans le milieu ambiant de mesure, ou encore lorsque les encombrements respectifs des fonctions mécaniques et électroniques sont par trop différents.

Remarque :

- l'hybridation puce à puce préserve tout le potentiel de miniaturisation tout en laissant beaucoup de souplesse dans le mariage des différentes technologies ;
- la technologie bipolaire (jonction PN) est adaptée aux impératifs d'intégration, mais la technologie Si sur isolant (dérivée des procédés CMOS) est aussi compatible CMOS. Les technologies CMOS permettent d'obtenir des capteurs très simples à 0,1 % de précision.

2.3.5 Microsenseurs

Qu'ils soient piézorésistifs, capacitifs (condensateur à air) ou à variation de fréquence (résonateur), les microsenseurs sont principalement élaborés autour de microplaques et de micropoutres. Le plus grand nombre appartient cependant à la catégorie des microsenseurs piézorésistifs à microplaques. Peu encombrants et bien adaptés à l'intégration de circuits, ces senseurs sont mécaniquement performants (grande sensibilité, excellente linéarité et hystérésis négligeable). Lorsqu'ils sont produits en gros volume, ils peuvent atteindre un coût de production très faible comparativement à celui de leurs homologues électromécaniques traditionnels. On commence à voir émerger des microsenseurs, compensés ou non, et leurs capteurs dérivés dans des applications où seuls des capteurs faibles coûts sont envisageables, comme dans l'industrie médicale et automobile (Motorola, Honeywell, Sensym, etc.).

2.3.5.1 Microsenseurs piézorésistifs

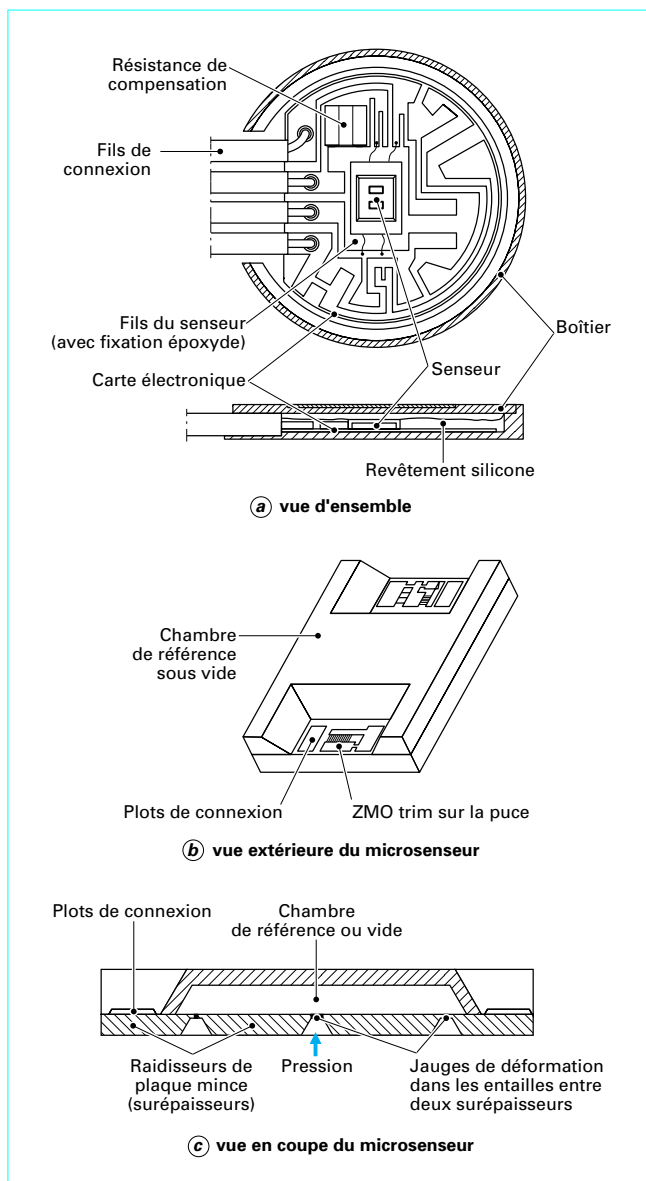
La localisation des jauges sur la plaque, leur orientation par rapport à la structure cristalline et le montage du pont déterminent en principe la sensibilité du senseur. Dans les configurations courantes, on intègre, par exemple, des jauges de type P suivant une des directions <110> d'une plaque en monocristal de silicium (100) de type N. Les facteurs de jauge longitudinaux et transversaux sont alors pratiquement égaux et opposés : $K_\ell \approx -K_t$. Des jauges transversales ou/et longitudinales peuvent donc contribuer de façon équivalente à la sensibilité du senseur selon que les contraintes maximales sont de même signe ou de signe contraire. Dans le cas des microplaques rectangulaires, cela entraîne que les jauges soient disposées parallèlement et perpendiculairement aux bords [cf. (§ 2.1.2.3) : figure 12].

Dans le cas des jauges PSOL, seul le facteur de jauge longitudinal dominant K_ℓ est utilisé. Cette condition impose l'utilisation de structures mécaniques présentant des zones de déformations quasi uniaxiales et des signes de déformation opposés pour les jauges adjacentes du pont. Dans l'exemple des plaques rectangulaires, l'influence de la composante de déformation transversale devenant négligeable à partir d'un rapport d'aspect d'environ 2, deux jauges sont disposées près du centre et deux autres sont placées au milieu des deux bords les plus longs.

■ Le capteur extra-plat 8515C Endevco se présente comme un bouton de 6,3 mm de diamètre et 0,76 mm d'épaisseur qui se prolonge par un câble plat de 4 fils (figure 47 a). Il est conçu pour mesurer des pressions absolues dans l'air en montage de surface (instrumentation des profils aérodynamiques par exemple). Le cœur du capteur est un microsenseur piézorésistif micro-usiné. La cavité de référence au vide est une chambre parallélépipédique dont la section rectangulaire mesure environ 1,5 mm par 1,3 mm (figure 47 b). La partie sensible de la structure présente deux surépaisseurs qui délimitent trois fines entailles de concentration de contrainte au-dessus desquelles sont alignées les jauges (implantation ionique) (figure 47 c). Ces jauges détectent ainsi les contraintes maximales qui, elles, sont perpendiculaires aux entailles (facteur de jauge utilisé K_t). Cette solution permet notamment d'améliorer le niveau de sortie dans les faibles étendues de mesure. Un circuit de compensation de dérive thermique de zéro directement implanté sur la puce complète le senseur. Le senseur est monté sur une fine carte de circuit Kapton à l'intérieur d'un corps en acier. La masse de l'ensemble ne dépasse pas 0,1 g.

Caractéristiques d'un microsenseur piézorésistif (capteur 8515C-15 Endevco :

- étendue de mesure : 0 + 100 kPa ;
- signal de sortie : 200 mV pleine échelle sous 10 V d'alimentation ;
- erreur combinée : 0,5 % de l'EM ;
- capteur utilisable entre - 54 °C et + 121 °C ;
- dérive thermique maximale de sensibilité entre - 18 °C et + 93 °C : ± 3 % ;
- dérive thermique maximale du zéro entre - 18 et + 93 °C : ± 2,5 % de l'EM ;
- fréquence de résonance du senseur : 180 kHz ;
- pression limite : 5 x 100 kPa.



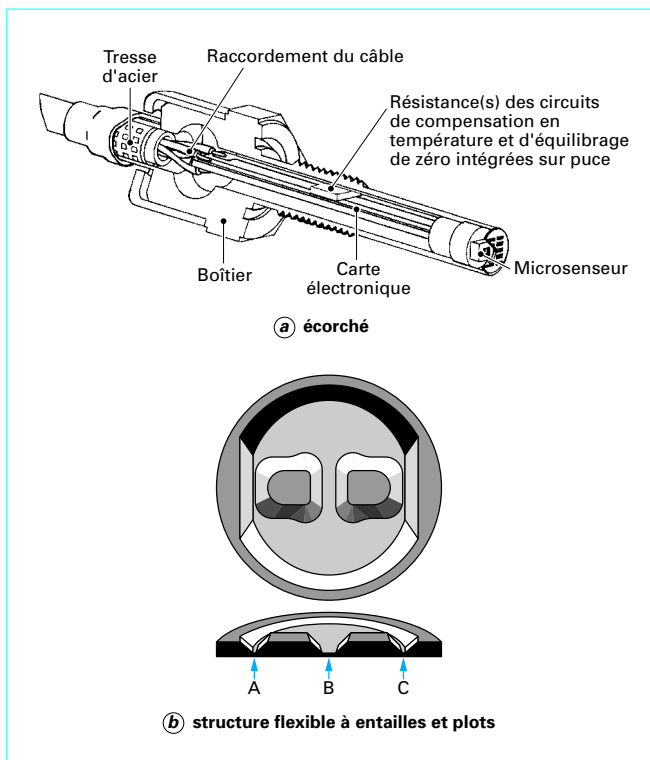


Figure 48 – Capteur miniature avec microsenseur (doc. Endevco)

■ La série 8540 des capteurs miniatures Endevco (étendues de 10^5 Pa à 35×10^5 Pa) a été conçue pour mesurer des pressions absolues avec compensation thermique sur une plage unique de température allant de $-34\text{ }^\circ\text{C}$ à $+260\text{ }^\circ\text{C}$. Le microsenseur est constitué principalement d'une structure flexible de section ovale comportant un pont de jauges PSOI [cf. (§ 2.3.4.1)]. Cet ensemble prend place à l'extrémité d'une enveloppe cylindrique d'environ 4 mm de diamètre (figure 48 a). La forme ovale est obtenue dans la masse par gravure anisotrope d'une pastille de Si de 1 mm de diamètre. La gravure laisse subsister sur le plus petit axe deux plots raidisseurs qui, comme dans l'exemple précédent, délimitent trois fines entailles (figure 48 b) au-dessus desquelles on vient disposer les jauges. Il faut souligner ici que, contrairement à l'intégration de jauges par jonctions P-N, la technologie PSOI permet d'atteindre des variations linéaires de tension d'offset ou de sensibilité avec la température, ce qui a pour avantage de simplifier les compensations de dérive thermique. Un autre avantage de la technologie PSOI est sa moindre sensibilité à la lumière : propriété requise dans l'étude de certains phénomènes générateurs de lumière. La réponse à un flash lumineux situé à 60 cm du capteur est par exemple équivalente à 2750 Pa.

Caractéristiques du capteur 8540-15 Endevco :

- étendue de mesure : 0 + 100 kPa ;
- signal de sortie : 300 mV pleine échelle sous 10 V d'alimentation ;
- erreur combinée : 0,5 % de l'EM ;
- dérive thermique maximale de sensibilité entre $-34\text{ }^\circ\text{C}$ et $+260\text{ }^\circ\text{C}$: $\pm 4\%$;
- dérive thermique maximale du zéro entre $-34\text{ }^\circ\text{C}$ et $+260\text{ }^\circ\text{C}$: $\pm 3\%$ de l'EM ;
- fréquence de résonance du capteur : 140 kHz ;
- pression limite : 2×100 kPa.

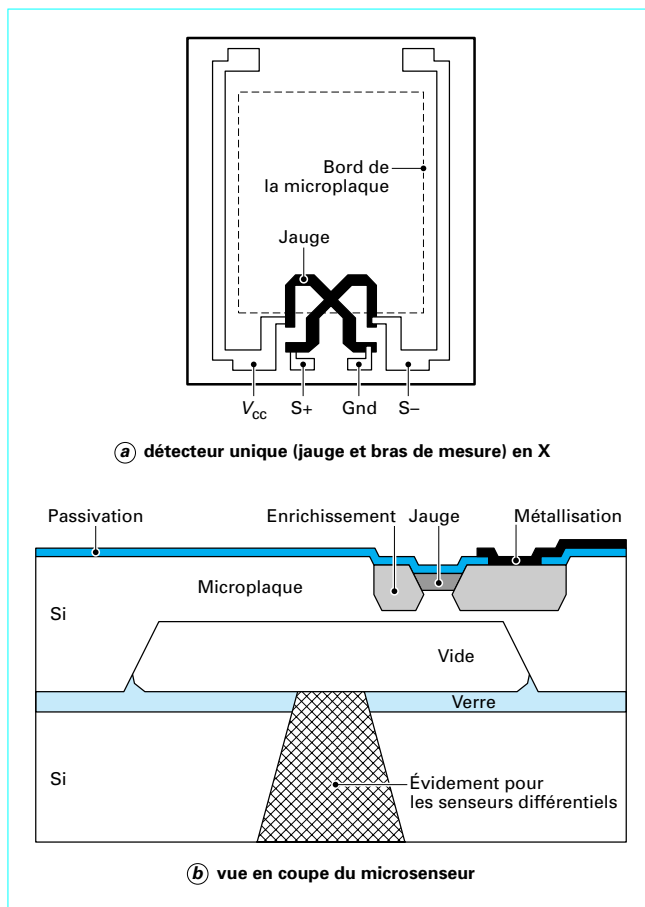


Figure 49 – « X-ducer » Motorola

■ Motorola [13] utilise un circuit de détection quelque peu différent de la configuration à quatre jauges en pont de Wheatstone : il s'agit d'un détecteur en forme de X diffusé sur le bord de la microplaque et faisant avec celui-ci un angle de 45° (figure 49). La jauge piézo-résistive unique, sensible aux contraintes de cisaillement, modifie la différence de tension induite aux bornes de deux bras de mesure par un phénomène d'effet de champ (naissance d'une tension perpendiculairement à la direction du courant). Cette solution, malgré une sensibilité moindre, permet de s'affranchir des difficultés d'appariement des quatre résistances du pont de Wheatstone dont dépendent la linéarité et la dérive thermique. La partie sensible du microsenseur est typiquement une microplaque rectangulaire de $25\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur pour une EM de 100 kPa ; elle est généralement soudée sur une contre-plaque d'isolement mécanique qui permet accessoirement la réalisation de la cavité de référence au vide des microsenseurs absolus. Ces microsenseurs ont une bonne linéarité dans les faibles étendues de mesure ($\pm 0,1\%$ EM max.) ; ils délivrent un signal de sortie pleine échelle de 60 mV sous 3 V d'alimentation.

Dans leur version compensée en température, un réseau de résistances et de thermorésistances est implanté sur les bords de l'élément sensible, les valeurs sont ajustées au laser pour une température donnée dans une fourchette de fonctionnement admissible ; les dérivées résiduelles d'offset et de sensibilité valent respectivement 2,5 % EM et 1 % environ (figure 50). Sur cette figure, on peut voir que les résistances R_{s1} , R_{s2} et R_p permettent de jouer sur la tension effective d'excitation et, par ce biais, sur la sensibilité, réalisant ainsi la compensation thermique de la sensibilité ; les autres résistances sont implantées pour calibrer et compenser

l'offset ; la sensibilité des microsenseurs compensés est plus faible que celle des non compensés (abaissement de tension d'excitation lié aux résistances) ; la dérive résiduelle d'offset et de sensibilité n'est pas linéaire avec la température.

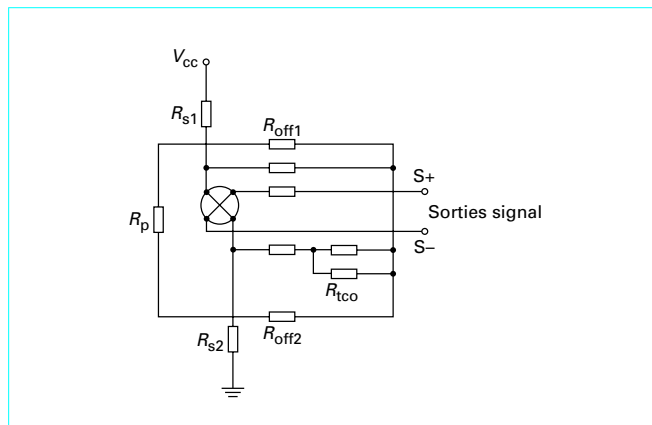


Figure 50 - Circuit de compensation du microsenseur Motorola

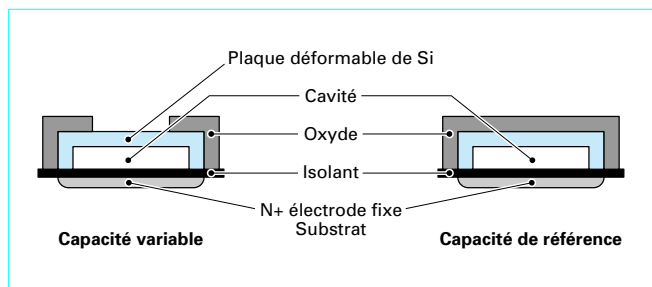


Figure 51 - Éléments de base d'un microsenseur capacitif [14]

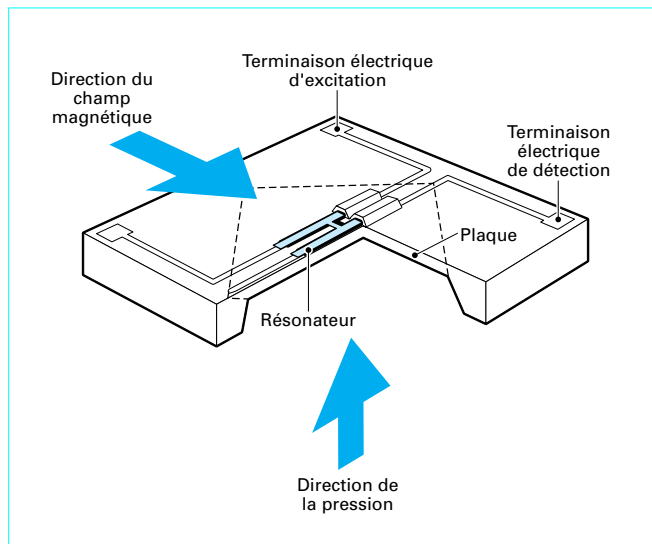


Figure 52 - Microsenseur à résonateur de Yokogawa

2.3.5.2 Microsenseurs capacitifs

L'exemple de la figure 51 montre la capacité variable et le condensateur de référence que l'on utilise dans la méthode de comparaison des tensions aux bornes. Cette méthode a l'avantage de réduire l'influence parasite de la température et des capacités de liaison. La capacité variable est constituée d'une électrode fixe (couche N⁺ diffusée dans le substrat) et d'une électrode Si déformable sous l'effet de la pression. L'élément de référence est réalisé de la même façon, mais l'électrode déformable est rendue pratiquement insensible à la pression. Les cavités sont obtenues grâce à une couche de SiO₂ sacrifiée par attaque chimique. Pour augmenter la sensibilité du microsenseur, on réalise généralement un réseau de capacités en parallèle. On obtient ainsi des capacités de l'ordre de quelques dizaines de picofarads et une modulation de capacité, non linéaire, typiquement de 10 % de la valeur au repos. La sortie doit être linéarisée et diffère d'un capteur à l'autre ; la dérive en température est moins importante que pour un capteur piézorésistif, mais elle est plus difficilement quantifiable. Ces microsenseurs présentent une hystérésis négligeable et une répétabilité remarquable.

2.3.5.3 Microsenseurs à variation de fréquence

Dans le senseur Yokogawa, une micropoutre, placée dans un champ magnétique, est excitée autour de sa fréquence de résonance. Ce détecteur en forme de « H » repose en ses quatre extrémités sur une microplaque qui provoque, en fonction de la pression à mesurer, des modifications de fréquence. Les variations de fréquence induisent à leur tour des variations de courant dans la branche du circuit de détection (figure 52). De tels microsenseurs sont intégrés aux transmetteurs de pression différentielle *DPharp* du même constructeur : classe d'exactitude $\pm 0,1\%$ de l'EM pour une gamme des étendues de mesure comprise entre ± 10 kPa et $-0,098 + 14$ MPa. L'influence de la température ambiante sur les écarts de mesure est chiffrée globalement à environ $\pm 0,4\%$ de l'EM pour une plage de variation de température de 50 °C. En règle générale, les senseurs à variation de fréquence permettent de réaliser des instruments très performants, qui plus est, adaptés aux traitements numériques. Le capteur à résonateur *P90* de Sextant Avionique (fréquence de résonance : 50 kHz ; variation de fréquence maximale : 20%), dont la microstructure a été décrite au paragraphe 2.3.3, compte, par exemple, parmi le petit nombre des instruments de classe d'exactitude 0,01 % de l'EM.

2.3.6 Microcapteurs intégrés (intégration du conditionnement)

La puce de silicium d'un microcapteur intégré réunit à la fois les circuits de détection et le dispositif électronique complet de traitement du signal. Par essence, ces instruments sont simples d'emploi et bien protégés du bruit et des pertes ; ils sont donc utilisables dans de mauvaises conditions d'environnement (par exemple, sous le capot d'une automobile). À la pointe des développements actuels, ils se situent encore dans la classe d'exactitude de 1 à 2 % EM pour des EM relativement faibles.

2.3.6.1 Microcapteurs intégrés piézorésistifs

Les caractéristiques de sensibilité et d'offset sont très différentes d'un senseur non compensé à l'autre ; elles dépendent notamment de la précision de fabrication des microplaques (épaisseur), de l'appariement et du positionnement des résistances du pont et des facteurs de température individuels. Le senseur nécessite par conséquent une calibration et une compensation de température intrinsèques auxquelles s'ajoute l'amplification du signal utile : une différence de tension. Dans l'exemple Motorola [14], un amplificateur différentiel assurant une bonne réjection de mode commun (afin de minimiser l'offset rajouté par l'étage d'amplification) est implanté sur la puce. La sortie est directement interfaçable avec un microcontrôleur. En dehors des méthodes habituelles (cf. § 2.3.5.1), on peut envisager de calibrer et de compenser le capteur de façon entièrement logicielle ; après amplification, la sortie du capteur est corrigée

grâce aux données de calibration et à la mesure de température du capteur. Les linéarités étant remarquables dans ce type de capteur, tout du moins au niveau de la plupart des applications envisagées, quatre coefficients de calibration suffisent : deux pour la pression et deux pour la température. Le traitement et la correction requièrent donc deux convertisseurs analogiques-numériques au niveau du microcontrôleur (un pour la lecture de température et un pour la lecture de pression). Les données de calibration sont lues dans la mémoire EEPROM du microcontrôleur. Une autre méthode de calibration s'inscrit dans une approche modulaire. Elle consiste, après amplification du signal, à superposer une tension analogique de compensation d'offset avant d'attaquer un second étage d'amplification à gain variable destiné à corriger les dispersions et la dérive de sensibilité. Les corrections de gain et de tension d'offset sont contrôlées par le microcontrôleur en fonction des données de calibration et de la température mesurée. Le principal défi pour réaliser un capteur piézorésistif monopuce est d'ordre technologique : il est indispensable de concilier les nouveaux procédés de fabrication micromécanique (en gros volume) avec les procédés de fabrication des microcircuits CMOS.

2.3.6.2 Microcapteurs intégrés capacitifs

Le conditionnement d'un capteur capacitif est plus complexe, car il s'agit de convertir une modulation de capacité en tension analogique. On utilise pour cela un amplificateur à capacités commutées suivi d'un étage échantillonneur-bloqueur. L'échantillonneur-bloqueur synchronisé sur une horloge permet ensuite d'obtenir une sortie analogique proportionnelle au rapport de la capacité sensible et de la capacité de référence. D'autres schémas reposent sur une mesure capacitif différentielle. Dans le premier cas, le signal de sortie peut être approché avec une bonne approximation par un polynôme du second degré : la variation de capacité avec la pression n'est pas linéaire. Chaque instrument nécessite alors trois points pour sa propre calibration (3 coefficients du polynôme) ; la correction ne peut se faire que par logiciel. Dans le second cas, lorsque l'interface délivre l'information de pression sous forme d'une différence entre la capacité sensible et la capacité de référence, la sortie est quasi linéaire : deux coefficients de calibration suffisent. Les corrections d'offset et de sensibilité peuvent être effectuées de façon logicielle, mais on peut aussi envisager l'approche modulaire précédente [cf. (§ 2.3.6.1)] Malheureusement, quel que soit le schéma, la dérive en température est difficilement quantifiable, car difficilement quantifiable (dérive de coefficients non linéaire). Le comportement en température de tels capteurs n'est, à l'heure actuelle, pas suffisamment maîtrisé pour permettre une compensation en température simple. En outre, cette technologie n'est pas encore mûre pour permettre la fabrication de capteurs différentiels. Il n'en reste pas moins que, sur le plan technologique, les capteurs capacitifs semblent assez bien adaptés à une intégration avec un microprocesseur.

2.3.7 Capteurs montables sur circuits imprimés et cartes PC

Aux deux bouts de l'offre, destinée principalement à l'intégration OEM, on trouve à la fois les microsenseurs non compensés et les capteurs entièrement conditionnés prêts à être installés sur les cartes. Ces composants de petites dimensions sont conçus pour être raccordés facilement aux tubes de pression [tubes souples : *Tygon* (matériau plastique éther-base polyuréthane, marque déposée Norton Plastics) ou silicone] et fixés rapidement aux cartes (clips plastiques ou vis). Les fiches électriques sont aux normes de connexion de la carte. Les conditionnements sont divers : depuis la simple carte support jusqu'aux boîtiers aciers TO-5 (TO-8) ou plastiques parallélépipédiques extra-plats. Ces capteurs couvrent largement la gamme des étendues de mesure allant de 0 + 2 kPa à 0 + 1 MPa. Ils permettent des mesures de pression absolue, relative et différentielle (de préférence unidirectionnelle) dans les fluides compatibles avec les différents matériaux constitutifs du senseur (par exemple : silicium, nylon, aluminium, gel de silicone, joint RTV, plastique). La figure 53 montre un exemple typique de ce type de capteur conçu autour d'un microsenseur piézo-

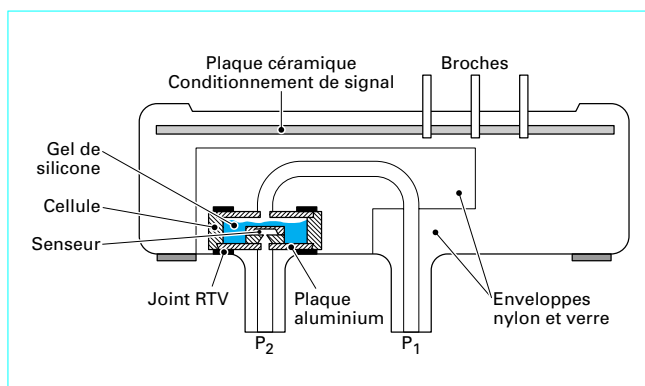


Figure 53 – Capteur montable sur carte PC (capteur 142SC Sensym)

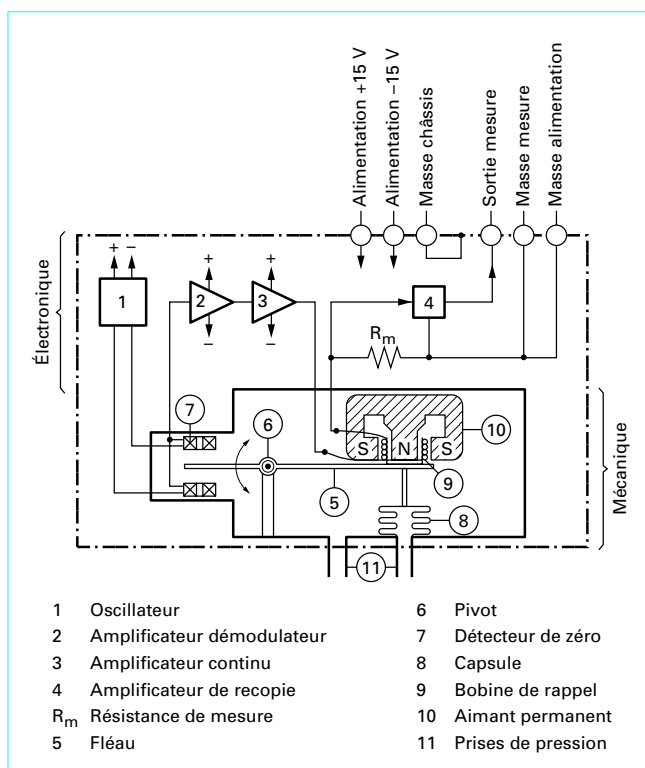


Figure 54 – Capteur électrodynamique (Sextant Avionique - Crouzet, type 44)

résistif micro-usiné, standard, et des circuits de conditionnement séparés sur céramique. Ces capteurs présentent généralement deux ports de pression P_1 et P_2 . Dans les capteurs absolus seul le port P_1 est actif ; il reste ouvert à l'atmosphère dans les capteurs relatifs. Dans les capteurs différentiels, il est relié à la pression la plus basse.

Performances caractéristiques de la série 142SC de Sensym :

- dimensions : 18 x 60 x 30 mm ;
- tension d'alimentation : 7 à 16 V ;
- signal de sortie : 1 à 6 V ;
- linéarité : 0,5 à 1,5 % EM si $P_2 > P_1$ et 0,2 à 0,75 % si $P_2 < P_1$;
- répétabilité et hystérésis : 0,2 % EM ;
- dérive thermique : 0,5 à 1 % EM entre -19 °C et + 63 °C ;
- temps de réponse : 0,1 à 1 ms.

2.4 Capteurs et transmetteurs à zéro asservi (ou à détection de zéro)

Le principe consiste à appliquer à l'organe de mesure une force antagoniste, ou contre-réaction, égale à la force exercée par la pression à mesurer, de façon à maintenir cet organe de mesure en équilibre constant (comme dans une balance manométrique). Cela présente un certain nombre d'avantages :

- l'organe de mesure est pratiquement statique, d'où réduction de la fatigue, de l'usure et de l'hystérésis ;
- la variation de volume de la chambre de pression est pratiquement nulle ;
- la force antagoniste est en général produite par un courant électrique facile à mesurer, à transmettre et à utiliser ;
- il est facile de rendre l'ensemble étanche, aussi bien dans les mesures de pressions différentielles ou absolues que dans les mesures de pressions relatives ;
- en l'absence d'organe mobile libre, la résistance aux chocs et aux vibrations est bonne.

■ Dans la série P40 des capteurs Crouzet (Sextant Avionique) (figure 54), la pression à mesurer exerce une force par l'intermédiaire d'un soufflet de mesure (allongement total de l'ordre de 0,2 μm). Cette force appliquée à un fléau est contrebalancée par une force de rappel électrodynamique engendrée par un courant traversant une bobine placée dans l'entrefer d'un aimant permanent. Un circuit électronique d'asservissement maintient en permanence cet équilibre. Le courant dans la bobine de rappel représente la pression mesurée ; il traverse une résistance de mesure aux bornes de laquelle apparaît une tension proportionnelle à la pression. Un cir-

cuit d'amplification et de filtrage permet de sortir sur une impédance très basse (1 Ω) et d'adapter la bande passante à quelques hertz en fonction de l'application envisagée (-3 dB à 13 Hz standard). Ces capteurs permettent de mesurer des pressions absolues ou différentielles dans plusieurs gammes de 0 + 10 kPa à 0 + 150 kPa. Leur masse est inférieure à 400 g et les dimensions hors tout sont de 62 x 63 x 77 mm. Typiquement, la tension de sortie est continue et positive par rapport à la masse, avec un facteur d'échelle de +5 V pour l'étendue de mesure. L'écart de linéarité de ces instruments est inférieur à 0,01 % pour une erreur globale de 0,05 % à 0,1 % de l'EM suivant, notamment, les contraintes d'environnement appliquées. Ces performances sont obtenues dans un environnement de type aéronautique et, en particulier, pour des températures maximales d'utilisation pouvant varier entre -55 °C et 100 °C.

■ Dans certains types de balances manométriques [2] les poids de mesure sont remplacés par un électrodynamomètre de précision qui fonctionne sur le principe du zéro asservi. Dans la balance Huber Instrumente (figure 55) à la place du plateau se trouve une superstructure qui porte le corps d'épreuve, un soufflet, de surface effective connue. Les changements de pression conduisent à un léger déplacement du fléau qui est enregistré optoélectroniquement. Cette information est utilisée par un régulateur PID qui, en modifiant sa tension de sortie, ramène la bobine du dynamomètre à sa position initiale. L'erreur maximale équivaut à ± 0,03 % de l'EM dans des gammes comprises entre 0 + 10 kPa et 0 + 30 MPa. Ces instruments offrent la possibilité d'être recalibrés facilement. Un programme fait correspondre automatiquement la force générée par la suspension d'une masse de référence à une valeur initiale d'étalonnage mémorisée dans une EPROM, en tenant compte de la gravité et de la masse volumique de l'air au lieu d'utilisation.

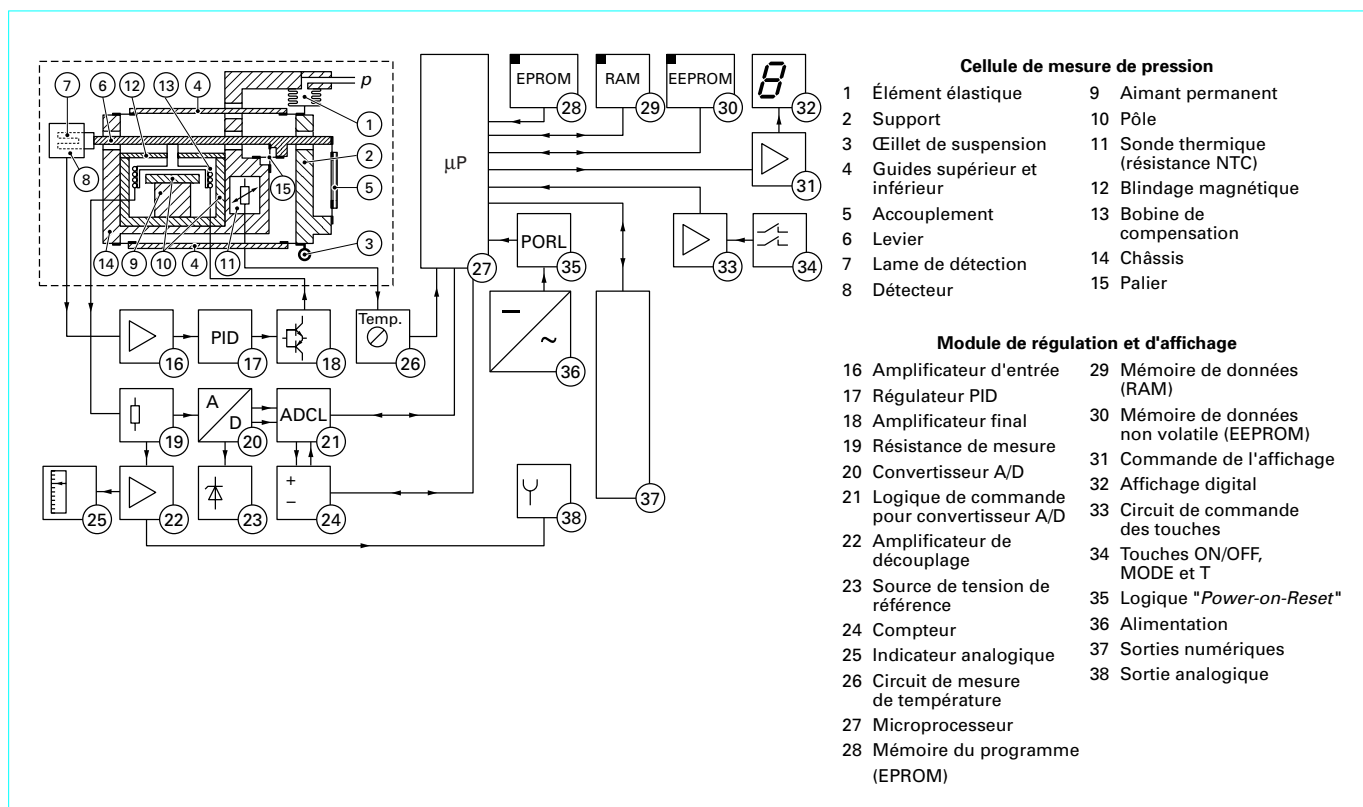


Figure 55 – Balance de précision à compensation électronique de force (doc. Huber Instrumente)

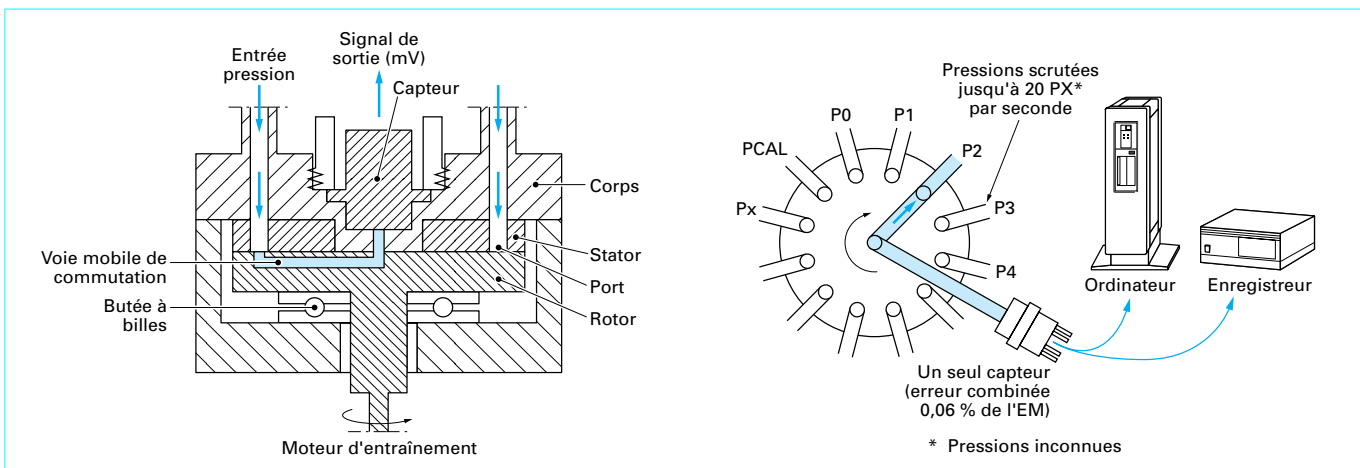


Figure 56 – Distributeur rotatif d'un commutateur Scanivalve®

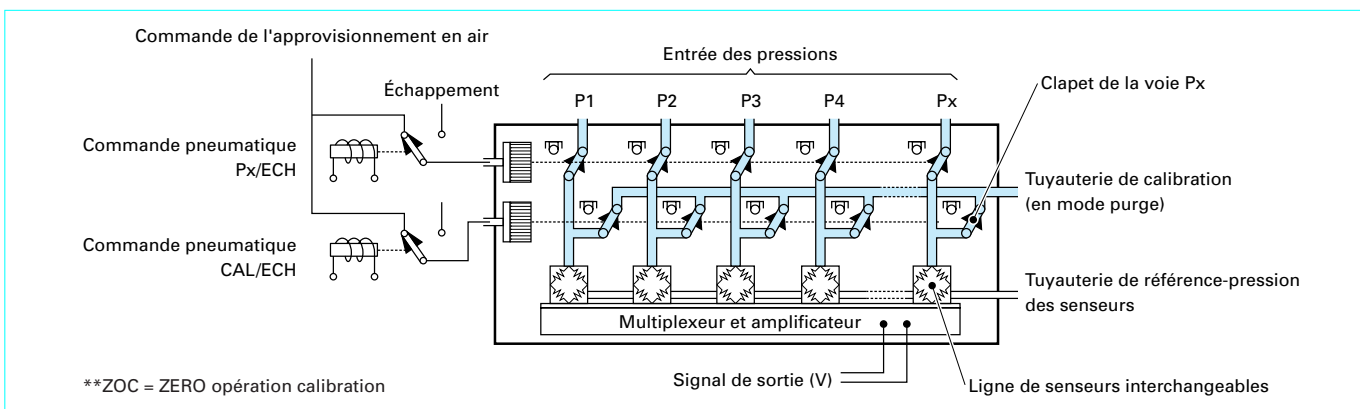


Figure 57 – Schéma du système Zoc®

2.5 Commutateurs de voies de mesure

2.5.1 Commutateurs de voies d'entrée d'un capteur

Ils sont destinés aux essais de turbines à gaz ou à vapeur, de moteurs à réaction, de compresseurs et, plus généralement, dans tous domaines où l'on se trouve en présence d'un grand nombre de points de mesure. Ils permettent notamment un remplacement avantageux des bancs de manomètres par l'emploi d'un seul capteur en temps partagé. La commutation mécanique des voies est assurée par un distributeur, rotatif ou oscillant, entraîné par un moteur (figure 56). Le positionnement précis du distributeur, autrement dit l'identification des voies, est obtenu grâce à un codeur couplé à l'arbre d'entraînement. Dans le cas du partage d'un capteur de pression différentielle, deux distributeurs synchrones de voies sont requis. Un multiplexage de 48 voies de pressions (voire 64) à la vitesse de scrutation de 10 voies par seconde est réalisable avec les produits Scanivalve®. Un seul capteur étant utilisé, l'étalonnage s'en trouve extrêmement simplifié puisqu'une voie de référence permet d'étalonner à chaque cycle l'ensemble du système de mesure. En version standard, ce système commute des pressions absolues pouvant aller jusqu'à 3,5 MPa ; il peut aussi regrouper plusieurs unités modulaires (jusqu'à 12) toutes entraînées par un seul moteur associé à un seul codeur de position (pour 12 x 64 voies).

2.5.2 Commutateurs de voies de sortie d'un système multicapteur

On peut également recourir à des réseaux de capteurs regroupés par blocs (figure 57). Les dérives de zéro et de sensibilité de chaque capteur peuvent être corrigées par microprocesseur. Grâce à l'électronique incorporée, le signal de sortie des capteurs est multiplexé et numérisé au régime de 50 000 voies par seconde en assurant, en outre, la remise à zéro et la calibration des capteurs à intervalles réguliers. Enfin, une combinaison des deux types de commutation, en entrée et en sortie, est également envisageable.

3. Capteurs et transmetteurs numériques

3.1 Sortie numérique

Dans les systèmes intégrés, le « tout numérique » nécessite de recourir de plus en plus à une instrumentation à base de microprocesseur. Une conversion du signal analogique délivré par le capteur est donc indispensable (souvent au détriment de sa rapidité). La

solution la plus simple consiste à interposer un convertisseur analogique-numérique entre le capteur et l'équipement numérique associé (carte entrée/sortie ou module de conversion/transmission au format ASCII). Des capteurs-convertisseurs conçus comme des équipements terminaux de transmission de données existent également. Ces instruments sont munis de codeurs numériques intégrés et comportent des circuits de jonction aux standards des transmissions séries ou parallèles (*RS232C*, *RS485/422*, *IEEE488*, *BCD*) ; en ce sens, ils constituent de véritables transmetteurs à sortie numérique.

- Exemple** : transmetteur à sortie numérique Scaime, type *DTM* :
- sortie numérique série *RS232C* pour liaison directe PC, transmission à 4 800 bauds, taille du message 8 bits, temps de transmission d'un message 40 ms max. (à 4 800 bauds), mesure transmise sur 2 fils, distance maximale de transmission 15 m ;
 - sortie numérique série *RS485* pour montage en réseau, transmission à 38 400 bauds maxi., possibilité de monter 32 capteurs du même type sur le bus, adressage possible de 0 à 255, protocole standard avec carte interface *RS485* sur PC XT/AT, distance maximale de transmission 1 500 m ;
 - temps de conversion 12 à 35 ms.

3.2 Transmetteurs de réseau

Dans les industries à procédés continus, telles que la métallurgie, la pétrochimie, la cimenterie, l'agroalimentaire ou la chimie, on rencontre de plus en plus de transmetteurs numériques incorporant des microprocesseurs. Si, jusqu'à présent, les différents dispositifs numériques de contrôle-commande n'ont pas vraiment bouleversé l'architecture des automatismes, des changements en profondeur sont prévisibles avec l'intégration des microprocesseurs et des microcontrôleurs au niveau des transmetteurs. Très différents des équipements classiques que l'on trouve aujourd'hui dans toutes les usines et qui transmettent leurs signaux sous forme analogique (4-20 mA), ce sont de véritables unités de traitement et de gestion de l'information. Dotés de fonctions de communication, ces transmetteurs dits de réseau plutôt que transmetteurs intelligents constituent entre eux une base de données répartie ; ils devraient permettre aux logiciels informatiques d'accéder au niveau le plus bas des systèmes intégrés.

3.2.1 Caractéristiques générales

Le transmetteur de réseau se caractérise par un module de détection multisensoriel et une interface adaptée à un support externe de communication. Le module de détection comporte, outre le capteur de pression, un ou plusieurs capteurs destinés spécifiquement à la mesure des grandeurs d'influence (par exemple, un capteur de température tel un thermocouple). L'interface de communication permet en principe un échange d'informations bidirectionnel, notamment l'adressage, via la ligne de transmission. Les signaux analogiques provenant des détecteurs sont convertis (souvent par un DSP) en une information binaire qui peut être traitée par un microprocesseur. Le microprocesseur coordonne le fonctionnement d'ensemble de l'électronique numérique, logique, associée, incluant mémoire morte (ROM), mémoire vive (RAM), mémoire réinscriptible (PROM). Le transmetteur de réseau est donc capable de procéder à des traitements numériques locaux, autrement dit, d'effectuer des tâches jusque-là dévolues à un calculateur externe. Cette description est résumée sur la figure 58.

La mesure de température, principale grandeur perturbatrice d'entrée, permet de compenser mathématiquement les dérives thermiques de l'instrument, à condition, toutefois, d'en connaître les lois de variation. Le procédé consiste à enregistrer dans une mémoire les données caractéristiques de ces fonctions pour que le microprocesseur puisse en tenir compte au moment de l'élaboration de la valeur de pression opérationnelle. S'agissant du resserrement des intervalles d'erreurs et de l'élargissement des étendues de

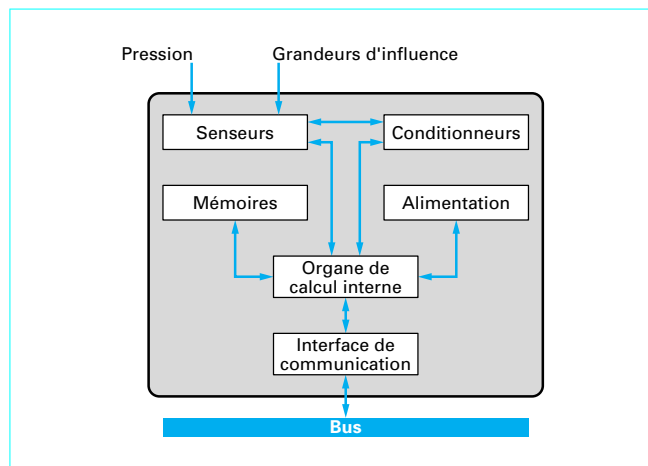


Figure 58 - Architecture générale d'un transmetteur de réseau

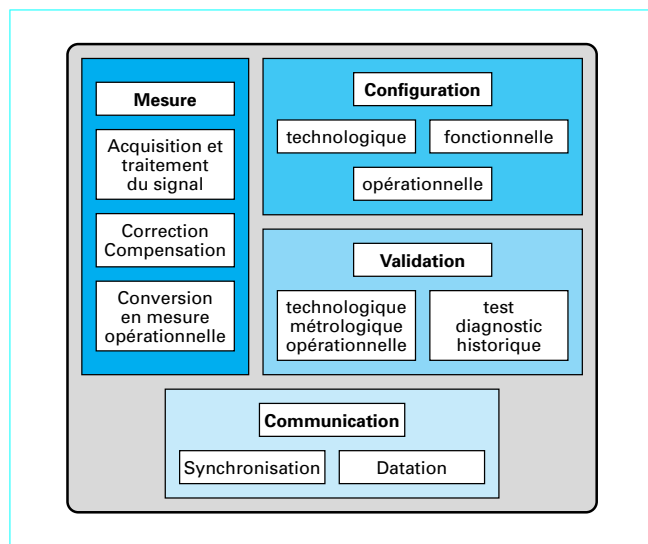


Figure 59 - Schéma fonctionnel du transmetteur de réseau

mesure ainsi permis, le traitement de cette information auxiliaire améliore nettement les performances métrologiques des transmetteurs. De la même façon, un traitement numérique peut compenser mathématiquement la mauvaise linéarité d'un capteur.

Du fait même des traitements numériques, les transmetteurs de réseau sont en principe plus lents que les transmetteurs analogiques. Leur temps de réponse est dans un rapport de 3 à 4 avec celui des transmetteurs analogiques (70 ms pour un courant 4-20 mA). Notons que les temps de réponse couramment impartis aux transmetteurs de pression par les procédés continus sont de l'ordre de 150 ms.

3.2.2 Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel du transmetteur de réseau (figure 59) présente un minimum de quatre fonctions cardinales : mesurage, validation, configuration, communication [15] et [16]. Naturellement, le mesurage inclut l'acquisition et le traitement du signal de

l'information primaire, mais également la correction via les mesures auxiliaires. Une conversion débouche sur une mesure opérationnelle, validée par référence à des modèles, et transmissible sur le support de communication (une mesure est concernée par un grand nombre de variables d'autocontrôle). Les solutions de validation sont multiples, elles peuvent faire appel à diverses méthodes (ou techniques) : redondance, rupture de modèles analytiques, logique. Leur intégration à différents niveaux permet de détecter, en ligne, les dysfonctionnements, de les signaler et d'envisager une exploitation de l'instrument en marche dégradée, voire en mode repli. Différentes configurations sont réalisables à chaque étape de la vie du transmetteur. Elles sont toutes le résultat d'un ensemble d'actions et de validations qui visent à intégrer le transmetteur dans son environnement physique (configuration technologique), à le rendre utilisable et communicant (configuration fonctionnelle), à l'adapter, enfin, à chaque application (configuration opérationnelle). Les valeurs des différents paramètres de configuration doivent appartenir à un intervalle de définition et avoir la même signification au sein du même instrument : les tests de cohérence sont en principe du ressort du constructeur. Par contre, au niveau du processus, la cohérence doit être vérifiée par l'utilisateur et l'intégrité des informations contenues dans la base de données distribuée doit être respectée. La communication assure l'échange d'informations entre le transmetteur et les autres équipements. Elle doit décoder et interpréter les requêtes et messages qui parviennent au transmetteur et, en conséquence, déclencher les actions correspondantes. Elle a également en charge la mise en forme des informations à transmettre vers le monde extérieur ; elle doit assurer, en particulier, la synchronisation des échanges et la datation des informations.

Ces transmetteurs ne nécessitant pas, en principe, une maintenance électronique systématique, les démontages sont moins fréquents et, à l'usage, leur taux de panne se révèle moins important qu'avec des instruments classiques.

3.2.3 Réseau de terrain

Diverses informations provenant de différents équipements circulent sans risque de confusion sur un réseau de terrain. Chaque signal est identifié et permet de faire communiquer les équipements entre eux sans nécessairement devoir remonter jusqu'aux niveaux supérieurs constitués par les calculateurs de gestion. Les informations de mesure, d'état, de maintenance, etc. du transmetteur sont ainsi véhiculées par le réseau et il est possible d'interroger, d'inhiber ou de valider un équipement à distance. L'interchangeabilité et surtout l'interopérabilité des équipements n'est pas encore assurée. De nombreux produits se sont affirmés comme des standards *de facto* suffisamment développés et expérimentés pour servir de base à une norme comme Worldfip (protocole FIP) ou ISP (protocole Profibus). Peuvent être également cités différents bus de terrain tels que Interbus-S, Sensoplex, Seriplex, M-Net, etc. Pour la connexion de composants simples, Allen-Bradley propose le Device-Net, réseau de terrain bâti sur la technologie des circuits CAN (*Controller Area Network*) sans oublier la technologie concurrente Lon-Works.

3.2.4 Exemples

Les constructeurs américains (Honeywell, Bailey Controls, Rosemount, etc.) et japonais (Fuji, etc.) ont été les premiers à se positionner sur le marché des transmetteurs de pression de réseau [17]. Compte tenu du fait que les systèmes de contrôle-commande reposent encore en grand nombre sur la traditionnelle boucle de courant 4-20 mA, les transmetteurs présentent bien souvent une sortie analogique 4-20 mA. Néanmoins, un signal numérique peut être superposé ; le signal 4-20 est alors modulé par une fréquence capable de prendre 2 états : 1200 Hz pour 1 et 2200 Hz pour 0 (Rosemount). Bien que ces informations supplémentaires soient transpa-

rentes pour le système de contrôle-commande, on peut y accéder en branchant une console portable de communication en un point quelconque de la boucle. Les échanges se font selon des protocoles de communication propres à chaque constructeur à des vitesses relativement basses (1 200 à 2 400 bauds). Lorsque l'instrument est configurable en mode numérique, le transmetteur délivre alors un signal entièrement numérique (des cartouches mémoires enfichables sur la console de communication permettent de sauvegarder les configurations des transmetteurs). En mode réseau de terrain, on peut, par exemple, relier au système jusqu'à 15 transmetteurs sur une simple paire de fils (Série *Platinum* de Bailey) et faire appel à des protocoles plus rapides, tels que Modbus, atteignant 38 400 bauds. L'opérateur peut à distance, par console portable interposée, lire les mesures, mais aussi réaliser une identification interne du transmetteur, paramétrer, ordonner un autodiagnostic, vérifier la calibration et, si nécessaire, ajuster le zéro et l'échelle. L'intervalle de mesure est également réglable (en proportion de l'intervalle nominal), voire automatiquement adaptable à la valeur du signal détecté.

D'autres fonctions déportées existent, par exemple le transmetteur de pression de Hartmann et Braun intègre des algorithmes de régulation. Cette fonction logicielle est implantée sur le microprocesseur et peut être utilisée pour réaliser la boucle de régulation locale d'une vanne sans passer par un régulateur extérieur.

Face aux robustes et volumineux transmetteurs de procédé (environ 200 x 100 x 150 mm³ pour un transmetteur de pression différentielle), les microtechnologies permettent d'envisager des dimensions mieux adaptées aux applications de laboratoire, de l'électroménager ou de l'automobile (§ 2.3.6). Dans cette voie, la division Transinstruments d'IMO Industries présente un transmetteur, le *DC10* (diamètre 30, longueur 145 mm), avec une sortie numérique *RS485* comportant jusqu'à 32 abonnés ou points de mesure (communication en contrôle d'accès centralisé et exploitation semi-duplex). Le microcontrôleur compense les défauts de linéarité et les dérives thermiques : un senseur de température auxiliaire est intégré (erreur totale de $\pm 0,1\%$ entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$). Si les fonctionnalités sont plus restreintes, il est toutefois possible via la *RS485* d'accéder à l'adresse, la date de calibration, l'échelle de mesure et d'ajuster le zéro à distance (à l'aide d'un PC par exemple).

4. Choix des capteurs et transmetteurs

La mesure des pressions usuelles recouvre deux domaines distincts de gammes d'étendues de mesure : le domaine des basses pressions de 0 à 70 - 100 - 150 - 200 - 250 - 350 kPa et le domaine des hautes pressions de 0 à 0,5 - 0,7 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3,5 - 5 - 7 - 10 - 15 - 20 - 25 - 35 - 50 MPa, avec des fréquences qui ne dépassent guère 1 kHz et des températures comprises couramment entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il existe à l'évidence un nombre important de possibilités lors d'un choix de capteur ou de transmetteur. Il est donc nécessaire d'établir un cahier des charges qui permettra de définir une solution optimale au problème de la mesure de pression usuelle posé. Seulement, il faut garder à l'esprit que les exigences doivent être limitées au strict nécessaire en fonction du besoin métrologique. En effet, plus il y a de clauses sévères au cahier des charges, plus l'instrument risque d'être coûteux tant en prix qu'au détriment de la qualité des autres domaines. Le bon choix doit donc résulter d'un bon compromis, notamment entre les points suivants.

■ Définir ce que l'on veut mesurer

Tout d'abord, il faut définir les caractéristiques de la mesure proprement dite dans les conditions de l'application (mesure de pression relative, positive ou négative, différentielle dans les

liquides ou/et les gaz), mais aussi les caractéristiques de la grandeur. En effet, les valeurs prises par la pression (normales ou anormales) conditionnent l'étendue de mesure et les domaines de non-détérioration et de non-destruction de l'instrument.

■ **Déterminer le niveau d'exactitude nécessaire**

Calculée dans les conditions d'utilisation et d'après les spécifications du constructeur, l'erreur globale de l'instrument doit être compatible avec les exigences d'exactitude de la mesure, c'est-à-dire être inférieure à l'erreur maximale tolérée pour l'instrument, et cela indépendamment de son montage et des autres maillons de la chaîne. C'est le point fondamental et souvent difficile à déterminer correctement. Il ne faut pas perdre de vue qu'un niveau d'exactitude de 0,5 % à 0,2 % est déjà bon (exigence courante dans le domaine des procédés : 0,5 %), que peu de capteurs (au sens large) donnent 0,2 % à 0,1 % (exigence habituelle en aéronautique : 0,1 %) et qu'il est exceptionnel d'atteindre 0,01 %. Dans un ensemble de mesures où la plupart des grandeurs principales sont connues avec un même niveau d'exigence, il est souvent préférable de privilégier l'homogénéité en choisissant un instrument de qualité équivalente. D'autre part, lorsque la pression est susceptible de varier dans de très larges proportions, il est parfois avantageux de prévoir deux ou plusieurs instruments chargés d'explorer chacun un domaine plus restreint plutôt qu'un seul instrument couvrant l'ensemble de la variation. Il n'est pas inutile non plus, au préalable, de vérifier si le niveau de qualité est requis pour toute l'EM ou bien seulement autour d'une valeur. Pour permettre une éventuelle discrimination des faibles valeurs du signal, penser à analyser les possibilités de filtrage et de protection contre le bruit. Ne pas oublier non plus qu'un traitement statistique de la mesure peut améliorer la qualité d'exactitude des résultats. Il faut, dans ce cas, se préoccuper de la possibilité d'enregistrer la mesure sur un temps suffisamment long. Pour les mesures de très longue durée, il faut davantage se focaliser sur les performances de dérive et de fiabilité de l'instrument.

■ **Bien choisir la sensibilité et le temps de réponse**

Les mesures dynamiques nécessitent de chiffrer à la fois l'amplitude des pressions et leur variation instantanée. De manière générale, l'amplitude impose la structure du senseur et l'évolution temporelle impose une limite supérieure au temps de réponse à l'échelon ou une valeur minimale de la bande passante ou de la fréquence propre acceptable par l'instrument. Dans le choix qu'il faut faire, les exigences de sensibilité et de rapidité doivent être soigneusement analysées et discutées, car elles peuvent être contradictoires : un senseur conventionnel très sensible est rarement rapide, car très compliant.

■ **Définir les perturbations extérieures et leurs effets**

Parmi les grandeurs d'influence, il faut systématiquement tenir compte de la température, en prenant garde à la distinction entre température d'utilisation ambiante, température du fluide et température de stockage. Il faut notamment examiner les dérives thermiques de zéro et de sensibilité et ne pas oublier de vérifier les domaines d'emploi, de non-détérioration, de non-destruction, ainsi que les réponses à un gradient éventuel de température. Il ne faut pas omettre non plus de contrôler les effets induits par les efforts de

serrage, les niveaux de vibration et les diverses perturbations électromagnétiques possibles. Penser également que, dans les zones proches des limites de spécification des grandeurs d'influence, les variations de caractéristique peuvent être rapides, car non linéaires. En règle générale, aucun facteur potentiel ne doit être écarté. Par exemple, des expositions continues ou intermittentes à des fluides corrosifs (substances chimiques, diluants, etc.) peuvent avoir des effets notables sur les performances d'un instrument réputé compatible. En effet, la résistance aux attaques chimiques varie avec la concentration de la substance dans le mélange, mais aussi avec la température et la durée d'exposition. Un matériau peut très bien résister à basse température et être attaqué aux températures élevées. Le type d'exposition est également à prendre en compte : immersion, éclaboussures, aérosols ou fumées, etc.

■ **Adapter l'instrument à la chaîne de mesure et à l'application**

Il va de soi que l'instrument doit être adapté électriquement et fonctionnellement aux appareils et aux applications qui le suivent, tout du moins : le type et le niveau de sortie du signal (continu ou discrétisé), le mode d'exploitation (continu ou intermittent), le type de connexion. Le choix peut donc porter tout aussi bien sur un simple capteur non compensé, un capteur avec sortie amplifiée, un transmetteur numérique, voire un manomètre à détection électrique de seuil si l'information requise se limite à l'observation d'une seule valeur. La destination des matériels est de plus en plus soumise à des contraintes normatives ou réglementaires auxquelles il faut se conformer ; les constructeurs proposent des produits adaptés. Ce point sera abordé plus en détail dans l'article [R 2 043] de ce traité.

■ **Les contraintes d'implantation**

Quel que soit le type de montage projeté (montage de surface, affleurant, en cavité, en ligne, avec ou sans séparateur : cf. article [R 2 043]), l'espace disponible, incluant l'espace nécessaire à la connexion et au cheminement des câbles, engendre des contraintes d'encombrement de premier ordre sur le choix de l'instrument. La solution retenue doit privilégier l'accessibilité et la commodité de démontage en prévision des étalonnages et de la maintenance. Si les grandeurs d'influence sont très contraignantes à l'emplacement prévu, il faudra peut être envisager une protection (écran, suspension, isolation thermique, etc.) avant de choisir un instrument plus performant. Enfin, dernier point, mais pas le moindre, la distance qui sépare l'instrument choisi des autres éléments de la chaîne affecte grandement la réponse dynamique.

■ **S'assurer que l'instrument mesure bien ce que l'on désire**

On veut rappeler ici que l'instrument, aussi perfectionné et exact soit-il, n'est qu'un maillon de la chaîne qu'il faut raccorder d'une part au point de mesure (la notion de discrétion du raccordement entre ici en ligne de compte) et, d'autre part, au système d'enregistrement (ou de contrôle-commande). Pour les instruments destinés aux mesurages dynamiques, il est prudent de tester la fonction de transfert de la chaîne sur la base de modèles de description ou de simulation avant d'arrêter un choix définitif. Le choix fait, il faudra, bien évidemment, le valider sur le site proprement dit. Ces points seront abordés dans l'article [R 2 043].