

**Georges Asch
Bernard Poussery**

LES CAPTEURS EN INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE

Préface de Marc Desjardins,
ancien président du comité « Capteurs » au ministère
de la Recherche et de l'Industrie

8^e édition

DUNOD

Collaborateurs

Pierre DESGOUTTE, docteur ès sciences
Pierre ANDRÉ, ingénieur
Jacques BEAUFONT, directeur d'études
Georges CHARNAY, chercheur au CNRS
Geneviève COMTE-BELLOT, professeur émérite
Bernard CRÉTINON, responsable de laboratoire
Jacques FOULETIER, professeur des universités
Nicole JAFFREZIC, chercheur au CNRS
Claude JOUVENOT, ingénieur
Stéphane LAUDREL, ingénieur
Pierre LIVROZET, ingénieur
Jean-Louis MARTY, professeur des universités
Alain MAZERAN, ingénieur
Jacques MÉRIGOUX, ingénieur
Patrick PAIROT DE FONTENAY, ingénieur
Alain PIQUET, docteur ès sciences
Jean-Claude PRIGENT, ingénieur
Jean-Paul SCHON, professeur des universités
Michel SUNYACH, professeur des universités
Jacques TACUSSEL, ingénieur
Uri ZELBSTEIN, ingénieur

Photo de couverture : © curraheeshutter – istockphoto.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 1983, 2006, 2010, 2017

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-076020-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE

Ce monde est pénétré des applications de la mesure ; toute connaissance, non mesurable, est frappée d'un jugement de dépréciation. Le nom de « science » se refuse de plus en plus à tout savoir intraduisible en chiffre.

Paul Valéry

Paul Valéry ne savait probablement pas combien son affirmation serait, en 1982, d'actualité. Notre monde est, et sera, en effet de plus en plus pénétré des applications de la mesure.

À l'évidence, nous savons que seule la mesure permet de conduire le progrès scientifique et d'accroître la connaissance de ce qui nous entoure ; les limites ne sont pas atteintes et ne le seront jamais. Il nous apparaît, à ce jour, que la mesure joue un rôle de plus en plus fondamental dans le développement des activités industrielles avec la sophistication des automatismes, la robotique, le contrôle de la qualité, les économies d'énergie, la lutte contre la pollution, etc. De plus, la mesure, au travers de l'automatisme, trouve maintenant des applications nombreuses dans la conception et la réalisation des biens de consommation, l'électroménager, l'automobile, les jouets, etc.

La mesure devient un facteur essentiel de l'économie ; elle doit être traitée avec une attention particulière et soutenue.

Et rien ne se fera sans le « capteur » qui se trouve à la base de l'édifice « Mesure ». Lui seul permet de prolonger et d'affiner les sens de l'homme.

La parution d'un ouvrage technique, traitant des « capteurs » en général, est donc un événement important qu'il convient de souligner. De nombreux livres français et étrangers ont déjà traité, directement ou indirectement, de ce sujet, mais le rythme des évolutions technologiques est tel qu'il s'avérerait nécessaire de compléter et de rassembler les connaissances actuelles du domaine. En 1982, un tel ouvrage manquait dans la bibliothèque des enseignants, des étudiants, des ingénieurs et techniciens concernés par la mesure.

Les auteurs ont brillamment réussi dans une entreprise particulièrement difficile, car ce domaine spécifique de l'instrumentation est d'un abord délicat. La conception d'un capteur fait appel à toutes les ressources offertes par des disciplines scientifiques et techniques aussi variées que la mécanique, l'électromécanique, la micro-électronique, l'optique, la micro-informatique, la chimie, la physico-chimie et tout récemment la biologie.

Il était indispensable, pour rédiger ce livre, de posséder un savoir scientifique étendu et du talent pour rassembler, trier et finalement présenter clairement les informations recueillies.

Le livre traite d'une façon approfondie des nécessaires définitions du capteur, de ses caractéristiques métrologiques, des électroniques associées et pour l'essentiel présente un panorama complet de tous les types existants. Pour chaque principe permettant la transformation de la grandeur à mesurer en un signal exploitable par l'homme, nous trouvons, d'une part, un rappel théorique expliquant le fonctionnement, sans abuser de l'habillage mathématique, et, d'autre part, des informations originales sur les technologies utilisées et leurs limites de performances. Le professeur Asch et ses collaborateurs ont eu le souci de rendre vivant et concret l'ouvrage en usant largement de l'illustration et de la présentation photographique de produits existants et commercialisés.

Le présent traité est remarquable par son niveau d'actualité. Les dispositifs les plus récemment étudiés, et encore en cours d'expérimentation dans les laboratoires de recherche, ne manquent pas à l'appel. Le spécialiste de la mesure sera surpris de découvrir, à la lecture, des nouveautés qui n'étaient pas encore parvenues à sa connaissance.

Nous ne saurions trop remercier le professeur Asch et ses collaborateurs de mettre à la disposition du corps enseignant et de la communauté scientifique et technique une œuvre aussi complète et utile.

Marc Desjardins
Ancien président du Comité « Capteurs »
au ministère de la Recherche et de l'Industrie

TABLE DES MATIÈRES

Préface	V
Avant-propos	XIII
1 • Principes fondamentaux	1
<i>par G. Asch, P. Desgoutte et B. Poussery</i>	
1.1 Définitions et caractéristiques générales	1
1.2 Capteurs actifs	3
1.3 Capteurs passifs	5
1.4 Corps d'épreuve. Capteurs composites	7
1.5 Grandeurs d'influence	9
1.6 La chaîne de mesure	10
1.7 Capteurs intégrés	12
1.8 Capteurs intelligents	15
1.9 Les signaux des capteurs d'instrumentation industrielle	15
2 • Caractéristiques métrologiques	23
2.1 Les erreurs de mesure	23
2.2 Étalonnage du capteur	28
2.3 Limites d'utilisation du capteur	32
2.4 Sensibilité	33
2.5 Rapidité – Temps de réponse	45
2.6 Discrétion ou finesse	52
3 • Conditionneurs des capteurs passifs	61
3.1 Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs	61
3.2 Montage potentiométrique	65
3.3 Les ponts	77
3.4 Les oscillateurs	96
3.5 Forme et spectre de fréquence du signal à la sortie du conditionneur	99
4 • Conditionneurs du signal	111
4.1 Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure	111
4.2 Linéarisation	113
4.3 Amplification du signal et réduction de la tension de mode commun	130
4.4 Détection de l'information	137

5 • Capteurs optiques	147
5.1 La lumière – Propriétés fondamentales	147
5.2 Photométrie	149
5.3 La lumière, support d'information	152
5.4 Sources lumineuses	153
5.5 Caractéristiques métrologiques propres aux capteurs optiques	154
5.6 Cellule photoconductrice	159
5.7 Photodiode	171
5.8 Photodiode à avalanche	185
5.9 Phototransistor	189
5.10 Capteurs photoémisifs	198
5.11 Détecteurs thermiques	218
5.12 Capteurs d'images	229
5.13 Fibres optiques	237
6 • Capteurs de température	247
6.1 Les échelles de température	248
6.2 Température mesurée et température à mesurer	252
6.3 Thermométrie par résistance	265
6.4 Thermométrie par thermocouple	294
6.5 Thermométrie par diodes et transistors	318
6.6 Thermométrie par le bruit de fond	326
6.7 Thermométrie par quartz	328
6.8 Mesure de température sur des corps en mouvement	335
6.9 Pyrométrie optique	337
7 • Capteurs de position et déplacement	355
7.1 Potentiomètre résistif	355
7.2 Capteurs inductifs	368
7.3 Capteurs capacitifs	393
7.4 Capteurs digitaux	403
7.5 Capteurs à propagation d'ondes élastiques	409
7.6 Capteurs de proximité	414
7.7 Capteurs optiques de position	430
8 • Capteurs de déformation	435
<i>par G. Asch, P. Desgoutte et A. Mazeran</i>	
8.1 Définition des grandeurs mécaniques utiles	435
8.2 Principes généraux	436
8.3 Jauges résistives métalliques	438
8.4 Sensibilité transversale	440
8.5 Influence de la température sur la résistance d'une jauge fixée	441
8.6 Jauges résistives semi-conductrices, ou piézorésistances	444
8.7 Fonctionnement dynamique des jauges	451
8.8 Rosettes	452
8.9 Méthodes de mesure	453
8.10 Extensomètre à corde vibrante	462

8.11	Extensomètres pour hautes températures	464
9	• Capteurs tachymétriques	469
	<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
9.1	Tachymètres électromagnétiques de vitesse angulaire	470
9.2	Tachymètres électromagnétiques de vitesse linéaire	479
9.3	Tachymètres de vitesse angulaire à impulsions	481
9.4	Gyromètres	484
10	• Capteurs de force, pesage, couple	489
	<i>par P. Desgoutte, P. Pairo et J.-C. Prigent</i>	
10.1	Capteurs piézoélectriques	490
10.2	Capteurs à magnétostriction	513
10.3	Capteurs à jauges d'extensométrie	518
10.4	Capteurs de force par mesure de déplacement	533
10.5	Capteurs de couple	535
10.6	Capteur tactile : peau artificielle	542
11	• Capteurs d'accélération, vibration, choc	545
	<i>par P. André, J. Beaufront, P. Desgoutte et C. Jouvenot</i>	
11.1	Considérations générales	545
11.2	Accéléromètres piézoélectriques et piézorésistifs : caractéristiques communes	552
11.3	Accéléromètres piézoélectriques	564
11.4	Accéléromètres piézorésistifs	572
11.5	Accéléromètres utilisant une mesure de déplacement	583
11.6	Accéléromètres asservis	588
12	• Capteurs de vitesse, débit, masse volumique, niveau de fluides	595
	<i>par G. Asch, G. Charnay, J.-P. Schon, G. Comte-Bellot et B. Poussery</i>	
12.1	Notions élémentaires de mécanique des fluides	595
12.2	Vitesse des fluides : capteurs et méthodes de mesure	604
12.3	Débitmétrie	621
12.4	Mesure de masse volumique	654
12.5	Mesure et détection de niveau	658
13	• Pression	675
	<i>par U. Zebstein et B. Poussery</i>	
13.1	Généralités	676
13.2	Principes de la mesure	677
13.3	Critères d'utilisation et caractéristiques métrologiques	682
13.4	Procédés de conversion	684
13.5	Organisation d'un capteur industriel	694
13.6	Étalonnage	707

14 • Capteurs de mesure du vide	711
<i>par A. Piquet</i>	
14.1 Rappel sur les propriétés physiques des gaz	711
14.2 Différents domaines du vide – Types de jauges	715
14.3 Jauges à déformation	716
14.4 Jauges à fil chaud	721
14.5 Jauges à ionisation	728
14.6 Appareils pour l'étalonnage des jauges à vide	737
15 • Capteurs acoustiques	741
<i>par M. Sunyach</i>	
15.1 Choix des grandeurs à mesurer	741
15.2 Généralités sur les microphones	744
15.3 Principaux types de microphones	747
15.4 Microphones à condensateur	755
15.5 Microphones électrodynamiques	767
15.6 Intensimétrie	771
16 • Détecteurs de rayonnements nucléaires	777
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
16.1 Radioactivité – Notions élémentaires	777
16.2 Détecteurs à ionisation dans les gaz	790
16.3 Détecteurs à scintillation	796
16.4 Détecteurs semi-conducteurs	799
17 • Capteurs d'humidité	805
<i>par B. Crétinon et J. Méricoux</i>	
17.1 Principales définitions relatives à l'air humide	806
17.2 Les hygromètres	809
17.3 Hygromètre à condensation	810
17.4 Hygromètre à sorption	813
17.5 Hygromètres à variation d'impédance pour la mesure de l'humidité relative	817
17.6 Hygromètre à variation d'impédance pour la mesure de la température de rosée	819
17.7 Hygromètre électrolytique	821
17.8 Psychromètre	824
17.9 Étalonnage des hygromètres	826
17.10 Hygrométrie des solides	830
18 • Capteurs électrochimiques	837
<i>par P. Livrozet et J. Tacussel</i>	
18.1 Classification des capteurs électrochimiques	837
18.2 Capteurs potentiométriques	839
18.3 Capteurs ampérométriques	862
18.4 Capteurs conductimétriques	864

19 • Capteurs de composition gazeuse	869
<i>par J. Fouletier</i>	
19.1 Capteurs à électrolyte solide	870
19.2 Capteurs à variation d'impédance	882
19.3 Capteur à quartz piézoélectrique	885
19.4 Capteurs catalytiques	886
19.5 Catharomètres	887
19.6 Capteurs paramagnétiques	888
19.7 Analyseurs optiques	892
19.8 GASFET	895
19.9 Réseau des capteurs	895
19.10 Conclusions	896
20 • Biocapteurs	901
<i>par J.L. Marty</i>	
20.1 Les biorécepteurs	902
20.2 Méthodes d'immobilisation	904
20.3 Les principaux types de biocapteurs	906
20.4 Caractéristiques des biocapteurs	914
20.5 Applications	916
Index	919

La connaissance scientifique s'est développée par un double effort :

- d'une part, la réflexion sur les mécanismes c'est-à-dire sur la nature des interactions entre grandeurs physiques liées aux phénomènes ; cette réflexion se concrétise grâce à l'outil mathématique par les lois de la physique, relations abstraites entre grandeurs physiques ;
- d'autre part, l'expérimentation qui repose sur la mesure des grandeurs physiques et qui, en leur associant une valeur numérique permet de définir quantitativement les propriétés des objets, de vérifier numériquement les lois physiques ou d'en établir empiriquement la forme.

Alors que la science cherche à saisir puis à exprimer mathématiquement dans des théories cohérentes les lois régissant les rapports des grandeurs physiques, la technique utilise ces lois et les propriétés de la matière pour créer de toute pièce des dispositifs ou des matériaux nouveaux qui permettent à l'homme d'accroître ses moyens d'action afin de mieux assurer sa subsistance, de faciliter ses échanges et de réduire sa peine.

Si, dans un premier temps, la technique fut un recueil de procédés empiriques, fruits de l'observation, de tâtonnements aléatoires ou d'essais successifs, la connaissance des lois de la nature a permis à la technique de rationaliser sa démarche et de devenir une science de la réalisation. La mesure y joue dès lors un rôle capital. La construction d'une machine ou la mise au point de matériaux nouveaux exigent de donner à leurs éléments constitutifs des caractéristiques que la mesure permet d'ajuster aux valeurs appropriées. Le fonctionnement d'une machine ou d'un appareillage doit être contrôlé afin que soient assurées la qualité des fabrications et la sécurité des hommes et des installations : or, contrôler c'est d'abord vérifier par la mesure qu'un certain nombre de grandeurs physiques ont les valeurs assignées.

Dans les laboratoires de recherche scientifique comme dans les installations industrielles l'une des tâches principales du chercheur comme du technicien est donc d'effectuer les mesures des grandeurs physiques variées qui déterminent leurs expériences ou conditionnent le déroulement correct de leurs fabrications.

Afin d'être menée à bien, l'opération de mesure nécessite généralement que l'information qu'elle délivre soit transmise à distance du point où elle est saisie, protégée contre l'altération par des phénomènes parasites, amplifiée, avant d'être exploitée de diverses manières : affichée, enregistrée, traitée par ordinateur. L'électronique offre à cet égard des moyens divers et puissants : pour en tirer le meilleur parti et qu'en bénéficient les mesures de tous types de grandeurs physiques, comme leur traite-

ment et leur exploitation, il est très souhaitable de transposer immédiatement sous la forme d'un signal électrique chacune des grandeurs physiques intéressantes. C'est le rôle du capteur que d'assurer cette duplication de l'information en la transférant, au point même où se fait la mesure, de la grandeur physique (non électrique) qui lui est propre, sur une grandeur électrique : courant, tension, charge ou impédance.

Cet ouvrage se propose de décrire, pour les grandeurs physiques les plus couramment mesurées dans les laboratoires et les installations industrielles les divers types de capteurs utilisables.

Un capteur est d'abord le résultat de l'exploitation ingénieuse d'une loi physique : c'est pourquoi une place importante est donnée dans ce livre aux principes physiques qui sont à leur base. C'est d'eux en effet que découlent les propriétés spécifiques de chaque type de capteur : performances, domaine d'application et règles de bonne utilisation. Il en est de même des caractéristiques électriques du capteur qui imposent à l'utilisateur le choix de circuits électriques associés parfaitement adaptés afin que le signal délivré soit obtenu et puisse être traité dans les meilleures conditions.

Principes physiques, propriétés spécifiques, montages électriques associés sont les trois aspects principaux sous lesquels sera étudié chaque type de capteur.

« On devrait toujours en commençant un livre se demander en son âme et conscience si la rédaction vous en apparaît comme indispensable » écrivait Lecomte du Noüy au début de *L'Homme devant la Science*. Cette interrogation était sans cesse présente à notre esprit. Si cet ouvrage aide l'expérimentateur confronté à l'infinie diversité des problèmes de mesure à choisir rationnellement le capteur et à l'utiliser judicieusement nous aurons fait œuvre, non peut-être indispensable, mais du moins utile.

Remerciements

A. Deguin, maître-assistant, A. Dolce, chef de travaux à l'université de Lyon 1, ont contribué par leurs critiques et leurs conseils à la bonne réalisation de cet ouvrage. Les secrétaires, en particulier Madame B. Chanut, ont, avec patience et compétence, dactylographié les versions souvent successives de ce texte.

1 • PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.1 Définitions et caractéristiques générales

La grandeur physique objet de la mesure : déplacement, température, pression, etc. est désignée comme le **mesurande** et représentée par m ; l'ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande constitue son **mesurage**. Lorsque le mesurage utilise des moyens électroniques de traitement du signal, il est nécessaire de produire à partir du mesurande une grandeur électrique qui en soit une représentation aussi exacte que possible : ceci signifie que la grandeur électrique et ses variations apportent toute l'information nécessaire à la connaissance du mesurande. Le **capteur** est le dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s et qui est fonction du mesurande :

$$s = F(m)$$

s est la **grandeur de sortie** ou **réponse du capteur**, m est la **grandeur d'entrée** ou **excitation**. La mesure de s doit permettre de connaître la valeur de m (figure 1.1). La relation $s = F(m)$ résulte dans sa forme théorique des lois physiques qui régissent

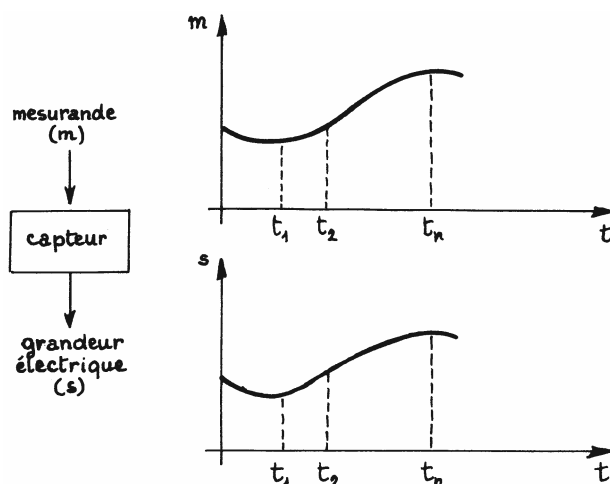


Figure 1.1 – Exemple d'évolution d'un mesurande m et de la réponse s correspondante du capteur.

le fonctionnement du capteur et dans son expression numérique de sa construction (géométrie, dimensions), des matériaux qui le constituent et éventuellement de son environnement et de son mode d'emploi (température, alimentation). Pour tout capteur la relation $s = F(m)$ sous sa forme numériquement exploitable est explicitée par **étalonnage** : pour un ensemble de valeurs de m connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de s ce qui permet de tracer la courbe d'étalonnage (*figure 1.2a*) ; cette dernière, à toute valeur mesurée de s , permet d'associer la valeur de m qui la détermine (*figure 1.2b*).

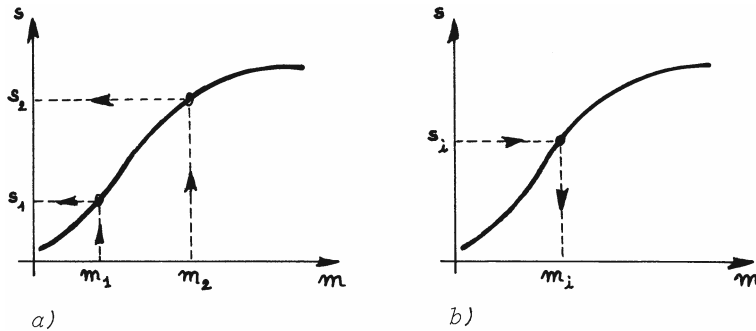


Figure 1.2 – Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m ; b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de la réponse s du capteur.

Pour des raisons de facilité d'exploitation on s'efforce de réaliser le capteur, ou du moins de l'utiliser, en sorte qu'il établisse une relation linéaire entre les variations Δs de la grandeur de sortie et celles Δm de la grandeur d'entrée :

$$\Delta s = S \cdot \Delta m$$

S est la **sensibilité du capteur**.

Un des problèmes importants dans la conception et l'utilisation d'un capteur est la constance de sa sensibilité S qui doit dépendre aussi peu que possible :

- de la valeur de m (**linéarité**) et de sa fréquence de variation (**bande passante**) ;
- du temps (**vieillesse**) ;
- de l'action d'autres grandeurs physiques de son environnement qui ne sont pas l'objet de la mesure et que l'on désigne comme **grandeurs d'influence**.

En tant qu'élément de circuit électrique, le capteur se présente, vu de sa sortie :

- soit comme un générateur, s étant une charge, une tension ou un courant et il s'agit alors d'un **capteur actif** ;
- soit comme une impédance, s étant alors une résistance, une inductance ou une capacité : le **capteur est alors dit passif**.

Cette distinction entre capteurs actifs et passifs basée sur leur schéma électrique équivalent traduit en réalité une différence fondamentale dans la nature même des phénomènes physiques mis en jeu.

Le signal électrique est la partie variable du courant ou de la tension qui porte l'information liée au mesurande : amplitude et fréquence du signal doivent être liées

sans ambiguïté à l'amplitude et à la fréquence du mesurande. Un capteur actif qui est une source, délivre immédiatement un signal électrique ; il n'en est pas de même d'un capteur passif dont les variations d'impédance ne sont mesurables que par les modifications du courant ou de la tension qu'elles entraînent dans un circuit par ailleurs alimenté par une source extérieure. Le circuit électrique nécessairement associé à un capteur passif constitue son **conditionneur** et c'est l'ensemble du capteur et du conditionneur qui est la source du signal électrique.

1.2 Capteurs actifs

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Les plus importants parmi ces effets sont regroupés *tableau 1.1* ; dans la suite du paragraphe, on en donne une description sommaire destinée à éclairer leur mode d'application.

Tableau 1.1 – Capteurs actifs : principes physiques de base.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Effet thermoélectrique

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice $e(T_1, T_2)$.

Application : détermination à partir de la mesure de e d'une température inconnue T_1 lorsque T_2 ($0\text{ }^\circ\text{C}$ par exemple) est connue (*figure 1.3a*).

Effet pyroélectrique

Certains cristaux dits pyroélectriques, le sulfate de triglycine par exemple, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température ; ils portent en

surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : un flux de rayonnement lumineux absorbé par un cristal pyroélectrique élève sa température ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension aux bornes d'un condensateur associé (*figure 1.3b*).

Effet piézoélectrique

L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques, le quartz par exemple, entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : mesure de forces ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézoélectrique les variations de sa charge (*figure 1.3c*).

Effet d'induction électromagnétique

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une f.é.m. proportionnelle au flux coupé par unité de temps, donc à sa vitesse de déplacement.

De même, lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction variable du fait de son déplacement ou de celui de la source de l'induction (aimant par exemple), la f.é.m. dont il est le siège est égale (et de signe contraire) à la vitesse de variation du flux d'induction.

Application : la mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine (*figure 1.3d*).

Effets photoélectriques

On en distingue plusieurs, qui diffèrent par leurs manifestations mais qui ont pour origine commune la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau.

Effet photoémissif

Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique.

Effet photovoltaïque

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction de semi-conducteurs P et N illuminée; leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

Effet photoélectromagnétique

L'application d'un champ magnétique perpendiculaire au rayonnement provoque dans le matériau éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement.

Applications. Les effets photoélectriques qui permettent d'obtenir courant ou tension fonction de l'éclairement d'une cible sont à la base de méthodes de mesure des grandeurs photométriques d'une part, et ils assurent d'autre part, la transposition en signal électrique des informations dont la lumière peut être le véhicule (*figure 1.3e*).

Effet Hall

Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension v_H qui a pour expression :

$$v_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$$

où K_H dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.

Application : un aimant lié à l'objet dont on veut connaître la position détermine les valeurs de B et θ au niveau de la plaquette : la tension v_H , qui par ce biais est fonction de la position de l'objet en assure donc une traduction électrique (*figure 1.3f*).

Remarque : les capteurs basés sur l'effet Hall peuvent être classés parmi les capteurs actifs puisque l'information est liée à une f.é.m. ; ce ne sont cependant pas des convertisseurs d'énergie car c'est la source du courant I et non le mesurande qui délivre l'énergie liée au signal.

1.3 Capteurs passifs

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés :

- d'une part à sa géométrie et à ses dimensions ;
- d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ .

La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande :

- soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles ;
- soit sur les propriétés électriques des matériaux ;
- soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable.

Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position ; c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement : potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile.

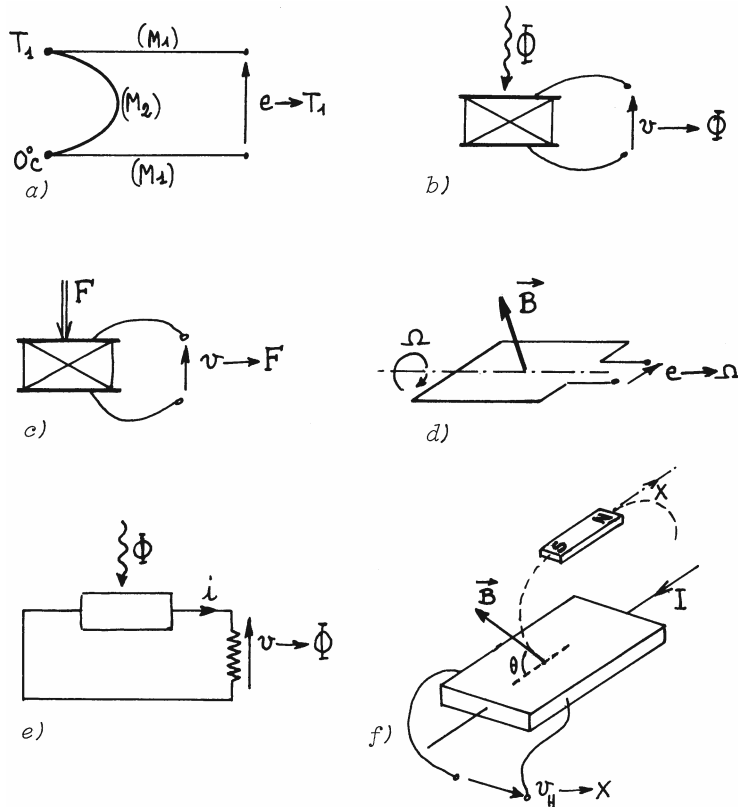


Figure 1.3 – Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs : (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall.

Dans le second cas, la déformation résulte de forces – ou de grandeurs s'y rattachant (pression, accélération) – appliquées soit directement soit indirectement au capteur : armature d'un condensateur soumise à une pression différentielle, jauge d'extensométrie liée rigidement à une structure soumise à contrainte. La modification d'impédance qu'entraîne la déformation du capteur est liée aux efforts auxquels celui-ci ou la structure intermédiaire se trouve soumis et elle en assure une traduction électrique.

Les propriétés électriques des matériaux, selon la nature de ces derniers, peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées : température, éclairage, pression, humidité... Si l'une seule de ces grandeurs est susceptible d'évolution, toutes les autres étant maintenues constantes il s'établit une correspondance univoque entre la valeur de cette grandeur et celle de l'impédance du capteur. La courbe d'étalonnage traduit cette correspondance et permet, à partir de la mesure de l'impédance de déduire la valeur de la grandeur physique agissante qui est le mesurande.

Le *tableau 1.2* donne un aperçu des divers mesurandes susceptibles de modifier les propriétés électriques de matériaux employés pour la réalisation de capteurs passifs ; on y remarque, en particulier, la place importante des capteurs résistifs.

Tableau 1.2 – Capteurs passifs : principes physiques et matériaux.

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre. Semi-conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliages ferromagnétiques.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants : bismuth, antimoniure d'indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants.

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur. Les types de conditionneurs le plus généralement utilisés sont :

- le montage potentiométrique : association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non de même type ;
- le pont d'impédances dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance ;
- le circuit oscillant qui contient l'impédance du capteur et qui est partie d'un oscillateur dont il fixe la fréquence ;
- l'amplificateur opérationnel dont l'impédance du capteur est l'un des éléments déterminants de son gain.

Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est, en effet, l'association capteur-conditionneur qui détermine le signal électrique ; de la constitution du conditionneur dépendent un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sensibilité, linéarité, insensibilité à certaines grandeurs d'influence. L'étude approfondie des conditionneurs est l'objet du chapitre 3.

1.4 Corps d'épreuve. Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible au mesurande mais à l'un de ses effets. Le **corps d'épreuve** est le dispositif qui, soumis au mesurande étudié en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique, le **mesurande secondaire**, qu'un capteur adéquat traduit alors en grandeur électrique (*figure 1.4*).

L'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif constitue un **capteur composite**.

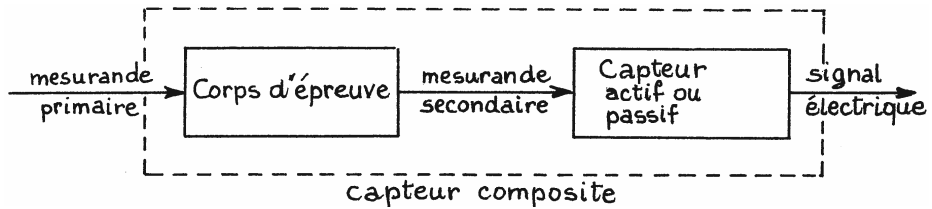


Figure 1.4 – Structure d'un capteur composite.

Les corps d'épreuve sont très utilisés pour la mesure de grandeurs mécaniques : celles-ci imposent au corps d'épreuve des déformations ou des déplacements auxquels un capteur approprié est sensible.

Ainsi, par exemple, une traction F exercée sur une barre (longueur L , section A , module d'Young Y) entraîne une déformation $\Delta L/L$ qui est mesurable par la variation $\Delta R/R$ de la résistance d'une jauge collée sur la barre ; connaissant :

- d'une part, l'équation du corps d'épreuve qui lie la traction, mesurande primaire, à la déformation, mesurande secondaire :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{Y} \cdot \frac{F}{A}$$

- et d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation, à sa réponse électrique $\Delta R/R$ soit :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad K \text{ étant le facteur de jauge,}$$

on en déduit la relation entre traction et variation de résistance :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{Y} \cdot \frac{F}{A}$$

De même, une pression est mesurable au moyen d'une membrane, corps d'épreuve, dont la déformation est traduite électriquement par une jauge de contrainte. La membrane d'un microphone électrodynamique est un corps d'épreuve car c'est de son mouvement, conséquence de la pression acoustique à laquelle elle est soumise, que résulte le signal électrique. Dans un accéléromètre, la masse sismique est le corps d'épreuve qui convertit l'accélération, mesurande primaire, en une force d'inertie, mesurande secondaire auquel est sensible un capteur piézoélectrique.

La relation qu'établit le corps d'épreuve entre les mesurandes primaire et secondaire est très souvent linéaire : c'est le cas en particulier pour les déplacements et déformations résultant de contraintes mécaniques, à condition que ne soit pas dépassée la limite d'élasticité du corps d'épreuve. Les performances de l'association corps d'épreuve-capteur doivent être déterminées par un étalonnage global de l'ensemble qu'ils constituent afin qu'il soit tenu compte des modifications éventuelles que leur montage et leur liaison apportent à leurs caractéristiques individuelles « à vide ».

1.5 Grandeurs d'influence

Le capteur, de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ces grandeurs physiques « parasites » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influence. Ainsi, par exemple :

- la température est grandeur d'influence pour un capteur optique comme la résistance photoconductrice ;
- il en est de même pour le champ magnétique vis-à-vis d'un capteur thermométrique comme la résistance de germanium.

Les principales grandeurs d'influence sont :

- la température, qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur ;
- la pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- l'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement ;
- les champs magnétiques variables ou statiques ; les premiers créent des f.é.m. d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique, comme la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnétorésistant ;
- la tension d'alimentation – amplitude et fréquence – lorsque, comme pour le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur.

Si l'on désigne par $g_1, g_2...$ les grandeurs d'influence, la relation entre grandeur électrique de sortie s et mesurande m , qui dans le cas idéal serait :

$$s = F(m)$$

devient :

$$s = F(m, g_1, g_2...)$$

Afin de pouvoir déduire de la mesure de s la valeur de m , il est donc nécessaire :

- soit de réduire l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat : supports antivibratoires, blindages magnétiques ;
- soit de stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement : enceinte thermostatée ou à hygroscopecie contrôlée, sources d'alimentation régulées ;

- soit enfin d'utiliser des montages qui permettent de compenser l'influence des grandeurs parasites : pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur de mesure (§ 3.3.1.3).

1.6 La chaîne de mesure

La chaîne de mesure est constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possible, dans les meilleures conditions, la détermination précise de la valeur du mesurande.

À l'entrée de la chaîne, le capteur soumis à l'action du mesurande permet, directement s'il est actif ou par le moyen de son conditionneur s'il est passif, d'injecter dans la chaîne le signal électrique, support de l'information liée au mesurande.

À la sortie de la chaîne, le signal électrique qu'elle a traité est converti sous une forme qui rend possible la lecture directe de la valeur cherchée du mesurande :

- déviation de l'aiguille d'un instrument analogique ;
- affichage sur un écran ;
- enregistrement sous forme de courbe.

C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui permet d'attribuer à chaque indication en sortie la valeur correspondante du mesurande agissant à l'entrée.

Sous sa forme la plus simple la chaîne de mesure peut se réduire au capteur, et à son conditionneur éventuel, associé à un appareil de lecture :

- thermocouple et voltmètre ;
- jauge de contrainte placée dans un pont de Wheatstone, avec pour instrument de lecture un afficheur numérique.

Cependant les conditions pratiques de mesure telles qu'elles sont imposées par l'environnement d'une part et par les performances exigées pour une exploitation satisfaisante du signal d'autre part amènent à introduire dans la chaîne des blocs fonctionnels destinés à optimiser l'acquisition et le traitement du signal :

- circuit de linéarisation du signal délivré par le capteur ;
- amplificateur d'instrumentation ou d'isolement destiné à réduire les tensions parasites de mode commun ;
- multiplexeur, amplificateur d'instrumentation programmable, échantillonneur bloqueur, convertisseur analogique – pour que l'information soit traitée par un microprocesseur ou un microcontrôleur (*figure 1.5*).

Certains de ces dispositifs sont l'objet d'une étude approfondie au chapitre 4.

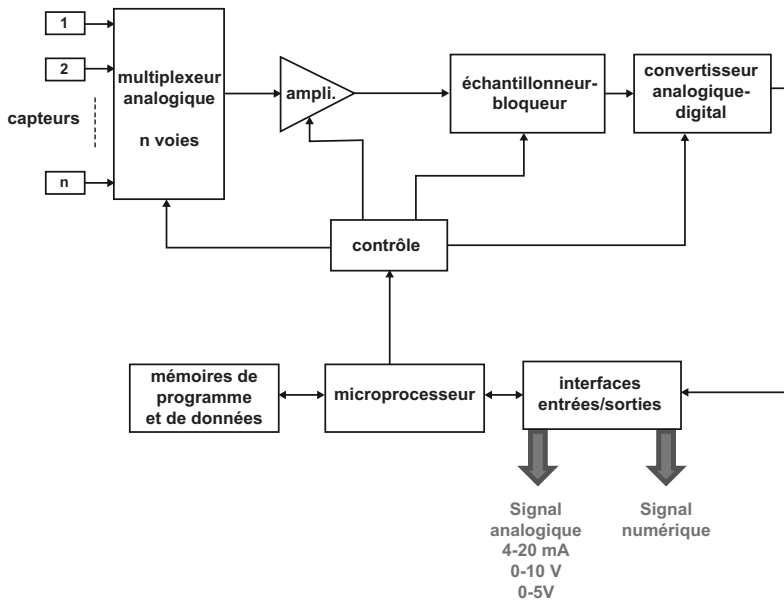


Figure 1.5 – Exemple de constitution de chaînes de mesure : chaîne contrôlée par microprocesseur.

Il y a lieu d'insister ici sur les fonctions multiples et importantes qui sont dévolues au système de traitement numérique (microprocesseur ou microcontrôleur) associé à la chaîne de mesure et qui peuvent être regroupées sous deux rubriques :

- gestion de l'acquisition d'une part ;
- traitements du signal requis par la précision et par la nature de l'information cherchée d'autre part.

Le système de traitement numérique est le chef d'orchestre de la chaîne d'acquisition ; il délivre les séquences de signaux de commande activant de façon ordonnée les divers dispositifs concourant à l'obtention de la valeur du mesurande particulier dont la connaissance à un instant donné est nécessaire au déroulement de l'application :

- sélection d'une voie d'entrée par envoi d'adresse au multiplexeur ;
- fixation du gain de l'amplificateur programmable ;
- échantillonnage puis blocage du signal ;
- déclenchement de la conversion analogique-numérique ;
- lecture de la donnée numérique à réception du signal de fin de conversion délivré par le convertisseur analogique-numérique.

Dans le contexte industriel actuel, l'information est reliée à une carte d'entrée d'un automate programmable ou d'un système numérique de contrôle-commande. Selon les besoins, cette information peut être délivrée sous forme analogique (signal 4-20 mA, 0-5 V, 0-10 V) ou numérique.

La possibilité offerte par les microprocesseurs d'effectuer des opérations mathématiques sur le signal numérisé est exploitée à deux fins : corriger le signal reçu d'une part, analyser le signal corrigé d'autre part.

Les traitements numériques correctifs sont destinés à compenser certaines imperfections de la chaîne de mesure :

- correction des dérives de zéro et de sensibilité, causées par les grandeurs d'influence, température en particulier ;
- correction de la non-linéarité des capteurs afin d'obtenir une donnée proportionnelle au mesurande (§ 4.2.3).

Il y a lieu de noter que ces corrections peuvent aussi être effectuées par voie analogique mais au prix, souvent, d'un matériel spécifique supplémentaire (§ 4.2.1 et 4.2.2). Les traitements numériques analytiques permettent d'extraire, à partir des données, les informations particulières dont la connaissance est nécessaire pour l'exploitation qui doit être faite :

- traitement statistique ;
- filtrage numérique ;
- analyse spectrale...

1.7 Capteurs intégrés

Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun le capteur proprement dit, le corps d'épreuve éventuel, des circuits électroniques de conditionnement du signal (figure 1.6).

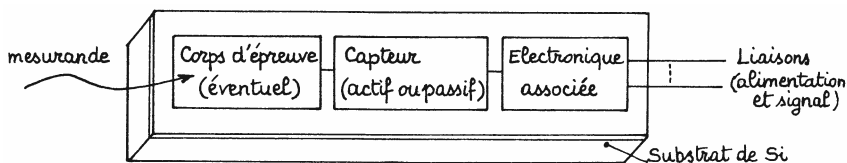


Figure 1.6 – Structure générale d'un capteur intégré.

L'intégration apporte de multiples avantages : miniaturisation, diminution des coûts par la fabrication en grande série, accroissement de la fiabilité par suppression de nombreuses connexions soudées, interchangeabilité améliorée, meilleure protection vis-à-vis des parasites, le signal étant conditionné à sa source.

L'utilisation du silicium impose cependant une limitation de la plage d'emploi de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ.

Le capteur proprement dit met généralement à profit la sensibilité du silicium à diverses grandeurs physiques ; cette sensibilité, par ailleurs déjà souvent exploitée

pour la réalisation de capteurs isolés, peut être mise en œuvre sous forme de capteurs résistifs, capacitifs ou au moyen de diodes et de transistors.

Exemples de capteurs à base de silicium :

- résistances thermométriques (§ 6.3.7) ; jauges extensométriques (§ 8.6) ; photo-capacités (§ 5.12.2.2) ; plaquettes à effet Hall (§ 7.6.3) ; photodiodes (§ 5.7) et phototransistors (§ 5.9) ; diodes de détection nucléaire (§ 16.4) ; transistors thermométriques (§ 6.5) ; ISFET (§ 18.2.5) ; GASFET (§ 19.8).

Le capteur peut aussi être réalisé en déposant sur le substrat de silicium un film mince d'un matériau plus approprié que le silicium au mesurande considéré mais compatible avec le processus technologique de fabrication des circuits intégrés : ZnO piézoélectrique, InSb magnétorésistant, polymères hygroscopiques (§ 17.5.2.1), couple thermoélectrique Bi/Sb.

Lorsque le capteur doit être un capteur composite, le corps d'épreuve est réalisé à partir du substrat de silicium support de l'ensemble du capteur intégré.

L'emploi de corps d'épreuve en silicium est justifié par les propriétés mécaniques excellentes du cristal : domaine élastique étendu, module d'Young comparable à celui de l'acier et limite de fatigue très élevée.

La fabrication des corps d'épreuve est rendue possible grâce aux techniques de micro-usinage chimique.

Le silicium est attaquant par divers produits chimiques, en particulier :

- le mélange éthylène diamine, pyrocatechol et eau (EDP) ;
- la solution potasse (KOH) – eau.

La zone à attaquer est délimitée par une ouverture faite dans une couche superficielle de SiO₂ qui n'est pas attaquée. La vitesse d'attaque dépend des directions cristallo-graphiques : pour EDP et KOH, elle est respectivement 35 et 400 fois supérieure dans la direction 100 que dans la direction 111. La vitesse d'attaque dépend aussi du dopage : elle est considérablement réduite par un fort dopage de bore ce qui permet d'arrêter l'attaque au niveau voulu.

Les *figures 1.7a et 1.7b* représentent la procédure de réalisation d'une poutre et d'un diaphragme par attaque chimique.

Dans ces deux cas, la déformation du corps d'épreuve sous l'action du mesurande (accélération pour la poutre, pression pour le diaphragme) peut être convertie en signal électrique au moyen d'un pont de jauges piézorésistives implantées dans des zones adéquates (§ 13.5.1.4) ou au moyen d'un dépôt de ZnO piézoélectrique subissant une contrainte sous l'action de la déformation du corps d'épreuve (*figure 1.8*).

Les circuits électroniques associés au capteur sont réalisés selon les techniques classiques de fabrication des circuits intégrés : ils comportent selon les cas : des circuits de compensation thermique, de linéarisation, d'amplification, de transmission par conversion tension-fréquence, ou tension-courant, des registres de type DTC – Dispositif à Transfert de Charges – (§ 5.12.2) pour le stockage et le transfert des informations.

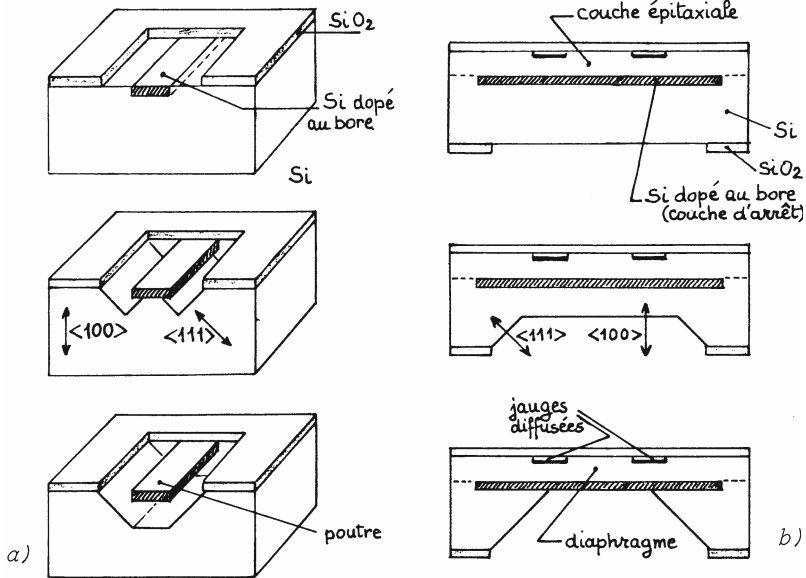


Figure 1.7 – Phases successives de la réalisation de corps d'épreuve par attaque chimique anisotrope : a) poutre (accéléromètre) ; b) diaphragme (capteur de pression).

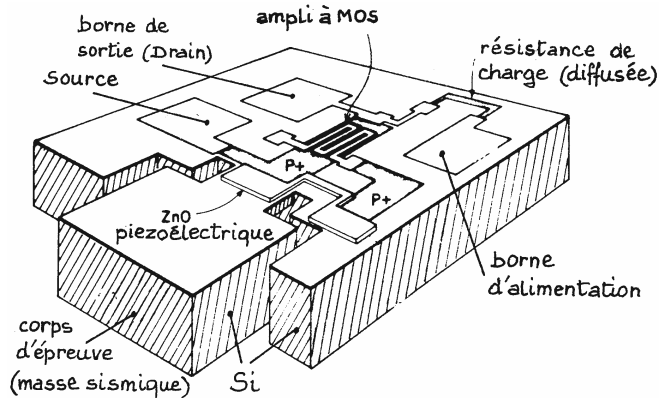


Figure 1.8 – Accéléromètre intégré (d'après Chen et al. – référence en Bibliographie).

La réalisation des capteurs intégrés pose, dans certains cas, des problèmes spécifiques délicats dus à la proximité du capteur et de l'électronique associée :

- les circuits électroniques doivent être découplés vis-à-vis des contraintes exercées sur le capteur par un mesurande de type mécanique ;
- l'encapsulation doit permettre le contact du capteur avec un milieu extérieur souvent hostile (mesures de pH, de composition gazeuse, de débit) tout en protégeant efficacement les composants électroniques.

1.8 Capteurs intelligents

Le terme de capteur intelligent – on parle quelquefois de capteur smart – désigne un instrument en technologie numérique. L'appareil est doté :

- d'une cellule de mesure permettant d'acquérir le mesurande ;
- d'un ou de plusieurs capteurs permettant de mesurer les grandeurs d'influence.

CAPTEUR

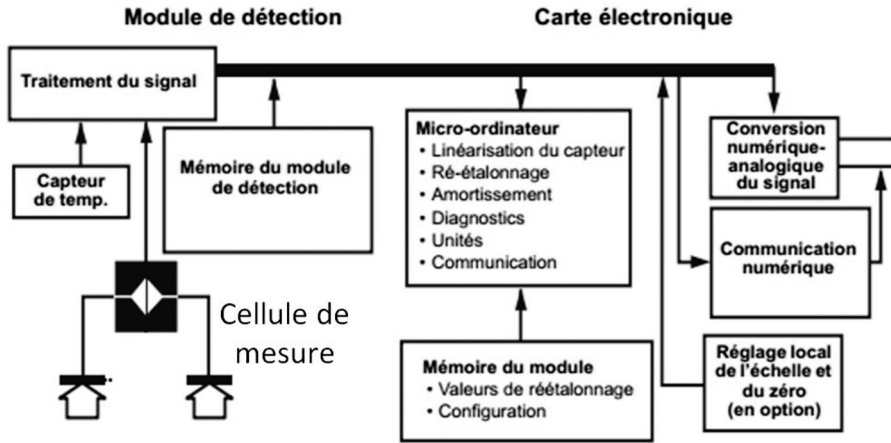


Figure 1.9 – Schéma de principe d'un capteur intelligent Rosemount modèle 2051.

Les caractéristiques de la cellule de mesure sont relevées avec précision lors de sa fabrication en usine ; elles ont ensuite stockées dans une mémoire PROM (*Programmable Read Only Memory* : mémoire programmable à lecture seule).

Après acquisition des grandeurs analogiques et conversion en informations numériques, le microprocesseur utilise les données stockées dans la mémoire morte pour corriger la valeur du mesurande en fonction des grandeurs d'influence.

L'information délivrée par un capteur intelligent peut être, suivant la version :

- analogique 4-20 mA + protocole HART ;
- numérique pour être utilisée dans un contexte bus de terrain.

1.9 Les signaux des capteurs d'instrumentation industrielle

Le raccordement des capteurs industriels s'effectue selon deux schémas :

- liaison point à point ;
- liaison en bus de terrain.

Dans le premier cas, le signal délivré par l'instrument est analogique de type :

- 4-20 mA (standard industriel) ;

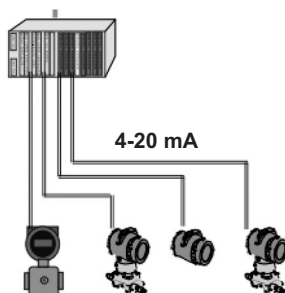


Figure 1.10 – Principe de raccordement de capteurs industriels sur un automate programmable ou un contrôleur d'un système numérique de contrôle-commande.

– éventuellement :

- 0-20 mA ;
- 0-10 V ;
- 0-5 V.

Le signal 4-20 mA est, encore aujourd'hui, une solution très utilisée dans les applications industrielles de mesure et de régulation. Selon les cas, il sert de vecteur au transport d'une grandeur physique ou pour commander un organe de réglage.

Ce signal présente une très bonne immunité aux parasites. Il peut être transporté sur des distances importantes et simplifie le raccordement des capteurs : un simple câble biconducteur permet d'acheminer la tension d'alimentation et le signal de mesure. Le 4-20 mA permet la détection des dysfonctionnements : si le signal est en dehors de cette plage – inférieur à 4 mA ou supérieur à 20 mA – il y a anomalie.

La portion entre 0 et 4 mA sert au passage de l'énergie d'alimentation.

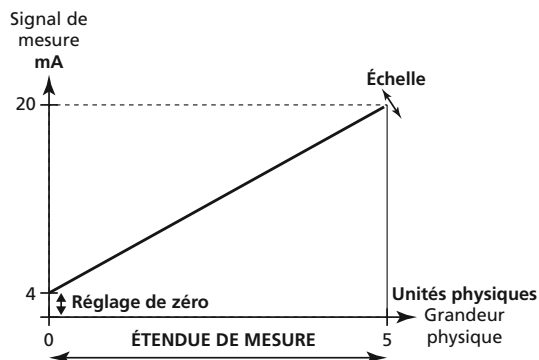


Figure 1.11 – Correspondance entre le signal normalisé 4-20 mA et l'étendue de mesure d'un capteur. La valeur 4 mA correspond au minimum de l'étendue d'échelle ; la valeur 20 mA correspond au maximum de l'étendue d'échelle. Deux réglages permettent d'ajuster le signal 4-20 mA à une étendue d'échelle : le réglage de zéro et le réglage d'échelle.