

LES CAPTEURS EN INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE

Georges Asch • Bernard Poussery

LES CAPTEURS EN INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE

9^e ÉDITION

DUNOD

Collaborateurs initiaux

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

Mise à jour des 8^e et 9^e éditions

Bernard POUSSEY, ingénieur CNAM

Contributeur pour la 9^e édition

Jean Pierre AUGOYAT, ingénieur CNAM

Direction et conception graphistes : Nicolas Wiel – Elizabeth Riba (graphiste)

© Dunod, 1983, 2006, 2010, 2017, 2025

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

ISBN 978-2-10-088652-4

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XI
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	37
2.1 Les erreurs de mesure	37
2.2 Étalonnage du capteur	42
2.3 Limites d'utilisation du capteur	46
2.4 Sensibilité	47
2.5 Rapidité – Temps de réponse	59
2.6 Discrétion ou finesse	66
3 • Conditionneurs des capteurs passifs	75
3.1 Caractéristiques générales des conditionneurs de capteurs passifs	75
3.2 Montage potentiométrique	79
3.3 Les ponts	91
3.4 Les oscillateurs	116
3.5 Forme et spectre de fréquence du signal à la sortie du conditionneur	119
4 • Conditionneurs du signal	131
4.1 Adaptation de la source du signal à la chaîne de mesure	131
4.2 Linéarisation	133
4.3 Amplification du signal et réduction de la tension de mode commun	150
4.4 Isolation galvanique	157
4.5 Détection de l'information	162

5 • Capteurs optiques	171
5.1 La lumière – Propriétés fondamentales	171
5.2 Photométrie	173
5.3 La lumière, support d'information	176
5.4 Sources lumineuses	177
5.5 Caractéristiques métrologiques propres aux capteurs optiques	178
5.6 Cellule photoconductrice	183
5.7 Photodiode	195
5.8 Photodiode à avalanche	210
5.9 Phototransistor	213
5.10 Capteurs photoémissifs	222
5.11 Détecteurs thermiques	242
5.12 Capteurs d'images	253
5.13 Fibres optiques	261
6 • Capteurs de température	271
6.1 Les échelles de température	272
6.2 Température mesurée et température à mesurer	276
6.3 Thermométrie par résistance	289
6.4 Thermométrie par thermocouple	320
6.5 Thermométrie par diodes et transistors	345
6.6 Thermométrie par le bruit de fond	353
6.7 Thermométrie par quartz	355
6.8 Mesure de température sur des corps en mouvement	362
6.9 Pyrométrie optique et technique infrarouge	364
7 • Capteurs de position et déplacement	383
7.1 Potentiomètre résistif	383
7.2 Capteurs inductifs	396
7.3 Capteurs capacitifs	421
7.4 Capteurs digitaux	431
7.5 Capteurs à propagation d'ondes élastiques	437
7.6 Capteurs de proximité	442
7.7 Capteurs optiques de position	458
8 • Capteurs de déformation	463
<i>par G. Asch, P. Desgoutte et A. Mazeran</i>	
8.1 Définition des grandeurs mécaniques utiles	463
8.2 Principes généraux	464
8.3 Jauges résistives métalliques	466
8.4 Sensibilité transversale	468
8.5 Influence de la température sur la résistance d'une jauge fixée	469
8.6 Jauges résistives semi-conductrices, ou piézorésistances	472
8.7 Fonctionnement dynamique des jauges	479
8.8 Rosettes	480
8.9 Méthodes de mesure	481
8.10 Extensomètre à corde vibrante	490
8.11 Extensomètres pour hautes températures	492

9 • Capteurs tachymétriques	497
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
9.1 Tachymètres électromagnétiques de vitesse angulaire	498
9.2 Tachymètres électromagnétiques de vitesse linéaire	507
9.3 Tachymètres de vitesse angulaire à impulsions	509
9.4 Gyromètres	512
10 • Capteurs de force, pesage, couple	517
<i>par P. Desgoutte, P. Pairo et J.-C. Prigent</i>	
10.1 Capteurs piézoélectriques	518
10.2 Capteurs à magnétostriction	541
10.3 Capteurs à jauges d'extensométrie	546
10.4 Capteurs de force par mesure de déplacement	561
10.5 Capteurs de couple	563
10.6 Capteur tactile : peau artificielle	570
11 • Capteurs d'accélération, vibration, choc	573
<i>par P. André, J. Beaufront, P. Desgoutte et C. Jouvenot</i>	
11.1 Considérations générales	573
11.2 Accéléromètres piézoélectriques et piézorésistifs : caractéristiques communes	580
11.3 Accéléromètres piézoélectriques	592
11.4 Accéléromètres piézorésistifs	600
11.5 Accéléromètres utilisant une mesure de déplacement	611
11.6 Accéléromètres asservis	616
12 • Capteurs de vitesse, débit, masse volumique, niveau de fluides	623
12.1 Notions élémentaires de mécanique des fluides	623
12.2 Vitesse des fluides : capteurs et méthodes de mesure	632
12.3 Débitmétrie	649
12.4 Mesure de masse volumique	683
12.5 Mesure et détection de niveau	686
13 • Pression	703
<i>par U. Zelbstein et B. Poussery</i>	
13.1 Généralités	704
13.2 Principes de la mesure	705
13.3 Critères d'utilisation et caractéristiques métrologiques	710
13.4 Procédés de conversion	712
13.5 Organisation d'un capteur industriel	722
13.6 Étalonnage	735

14 • Capteurs de mesure du vide	739
<i>par A. Piquet</i>	
14.1 Rappel sur les propriétés physiques des gaz	739
14.2 Différents domaines du vide – Types de jauges	743
14.3 Jauges à déformation	744
14.4 Jauges à fil chaud	749
14.5 Jauges à ionisation	756
14.6 Appareils pour l'étalonnage des jauges à vide	765
15 • Capteurs acoustiques	769
<i>par M. Sunyach</i>	
15.1 Choix des grandeurs à mesurer	769
15.2 Généralités sur les microphones	772
15.3 Principaux types de microphones	775
15.4 Microphones à condensateur	783
15.5 Microphones électrodynamiques	795
15.6 Intensimétrie	799
16 • Détecteurs de rayonnements nucléaires	805
<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
16.1 Radioactivité – Notions élémentaires	805
16.2 Détecteurs à ionisation dans les gaz	818
16.3 Détecteurs à scintillation	824
16.4 Détecteurs semi-conducteurs	827
17 • Capteurs d'humidité	833
<i>par B. Crétinon et J. Mérigoux</i>	
17.1 Principales définitions relatives à l'air humide	834
17.2 Les hygromètres	837
17.3 Hygromètre à condensation	838
17.4 Hygromètre à sorption	841
17.5 Hygromètres à variation d'impédance pour la mesure de l'humidité relative	845
17.6 Hygromètre à variation d'impédance pour la mesure de la température de rosée	847
17.7 Hygromètre électrolytique	849
17.8 Psychromètre	852
17.9 Étalonnage des hygromètres	854
17.10 Hygrométrie des solides	858
18 • Capteurs électrochimiques	865
<i>par P. Livrozet et J. Tacussel</i>	
18.1 Classification des capteurs électrochimiques	865
18.2 Capteurs potentiométriques	867
18.3 Capteurs ampérométriques	890
18.4 Capteurs conductimétriques	892

19 • Capteurs de composition gazeuse	897
<i>par J. Fouletier</i>	
19.1 Capteurs à électrolyte solide	898
19.2 Capteurs à variation d'impédance	910
19.3 Capteur à quartz piézoélectrique	913
19.4 Capteurs catalytiques	914
19.5 Catharomètres	915
19.6 Capteurs paramagnétiques	916
19.7 Analyseurs optiques	920
19.8 GASFET	923
19.9 Réseau des capteurs	923
19.10 Conclusions	924
 20 • Biocapteurs	 929
<i>par J.L. Marty</i>	
20.1 Les biorécepteurs	930
20.2 Méthodes d'immobilisation	932
20.3 Les principaux types de biocapteurs	934
20.4 Caractéristiques des biocapteurs	942
20.5 Applications	944
 INDEX	 947

AVANT-PROPOS

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 calculateur. 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

traitement 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

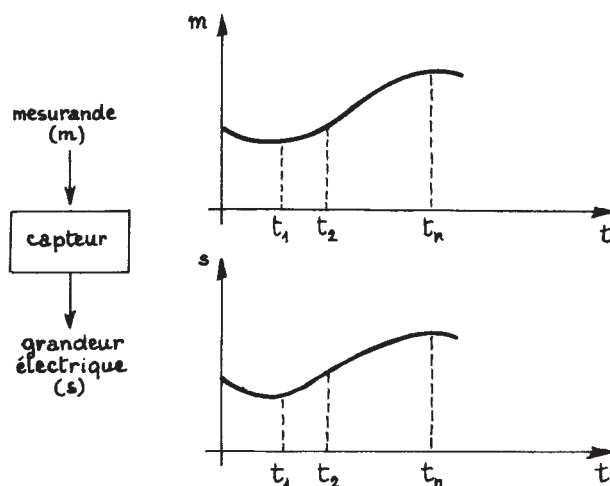


Figure 1.1 – Exemple d'évolution d'un mesurande m et de la réponse s correspondante du capteur.

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).

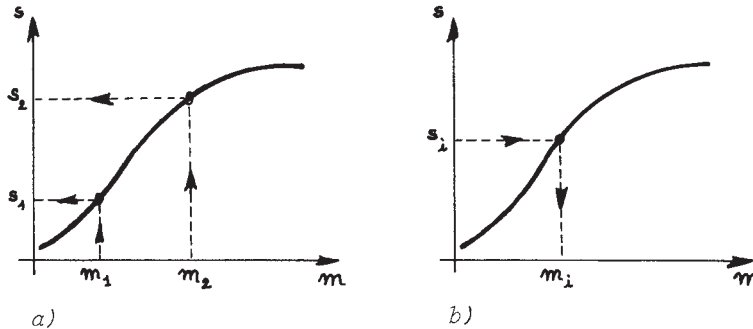


Figure 1.2 – Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m ; b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de la réponse s du capteur.

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°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.

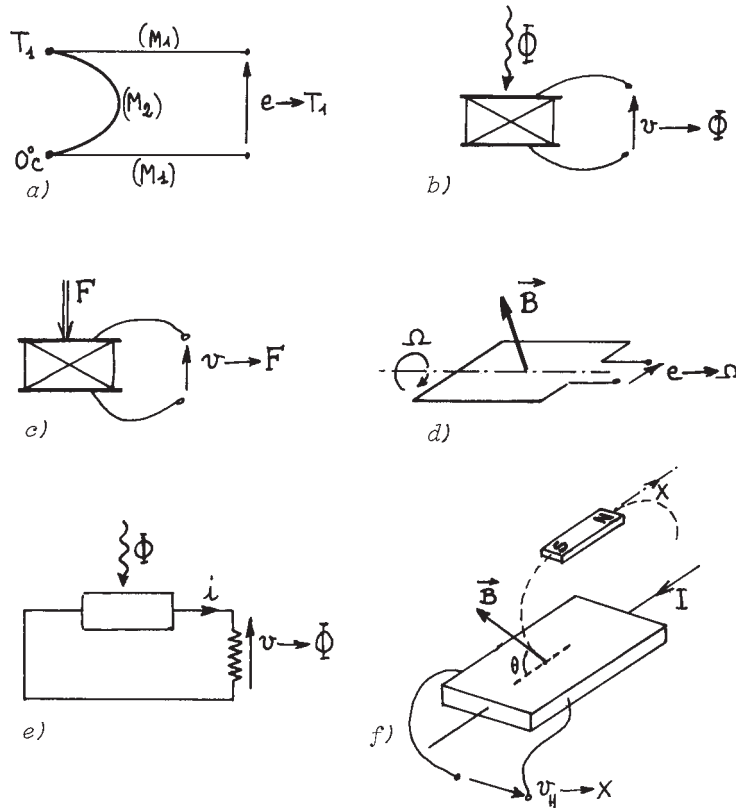


Figure 1.3 – Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs :
 (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall.

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, éclaircissement, 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 mesurands 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**.

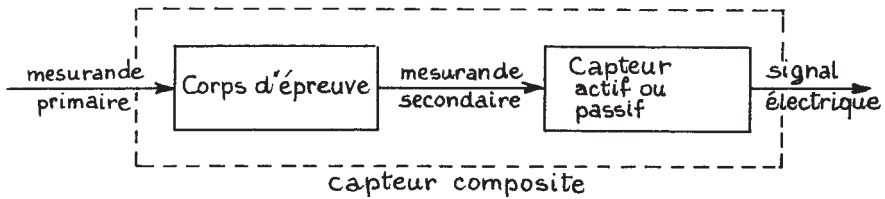


Figure 1.4 – Structure d'un capteur composite.

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 $g_1, g_2 \dots$ 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 :

$$s = F(m, g_1, g_2 \dots)$$

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 hygroscopie 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.

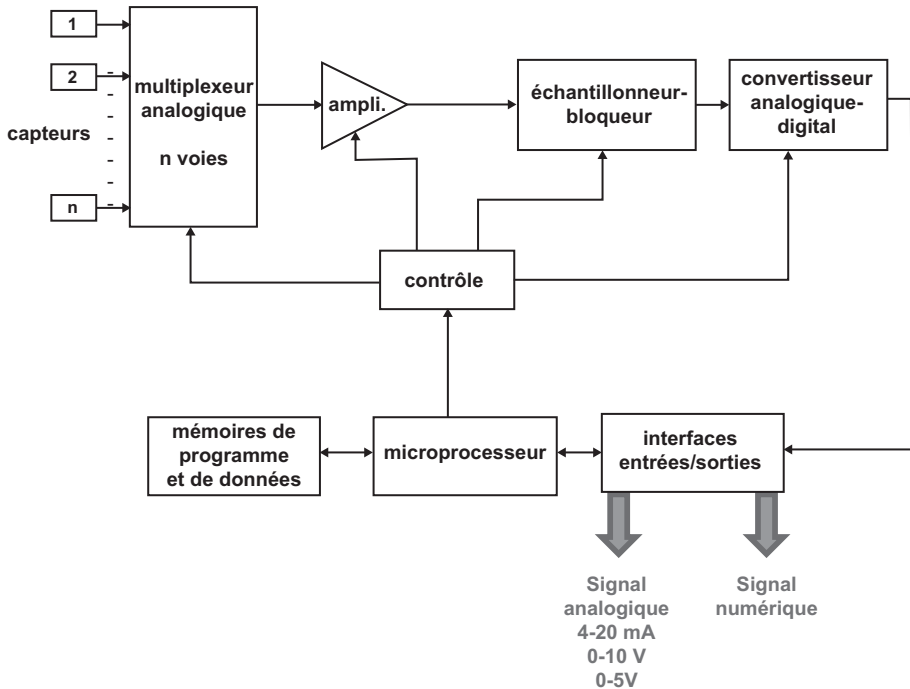


Figure 1.5 – Exemple de constitution de chaînes de mesure : chaîne contrôlée par microprocesseur.

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*).

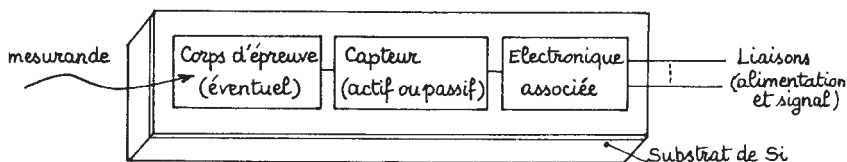


Figure 1.6 – Structure générale d'un capteur intégré.

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 cristallographiques : 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.

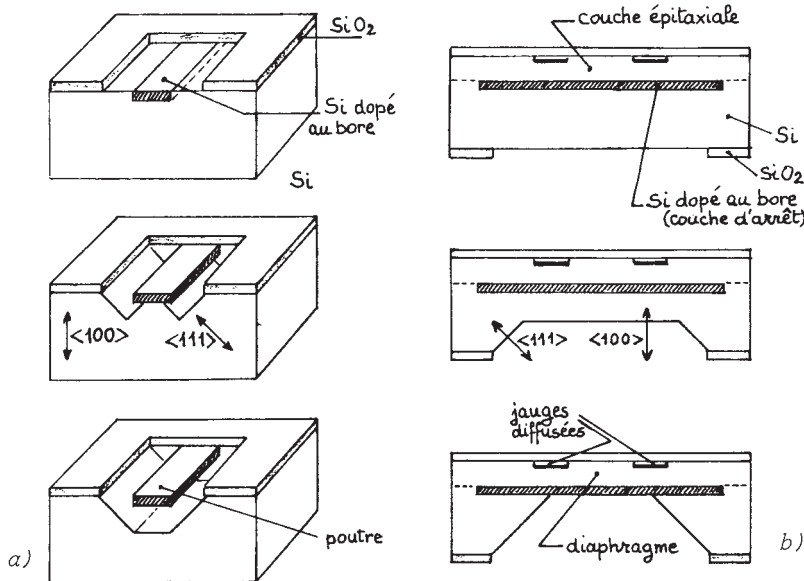


Figure 1.7 – Phases successives de la réalisation de corps d'épreuve par attaque chimique anisotrope : a) poutre (accéléromètre) ; b) diaphragme (capteur de pression).

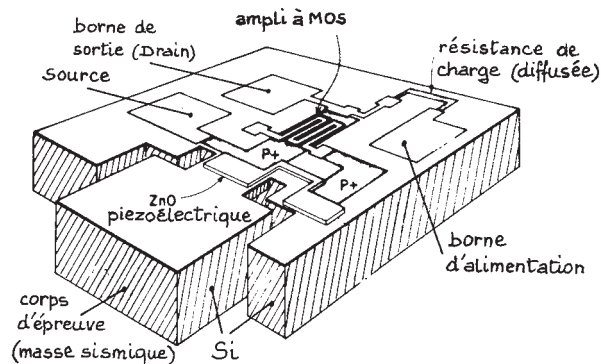


Figure 1.8 – Accéléromètre intégré (d'après Chen et al. – référence en Bibliographie).

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

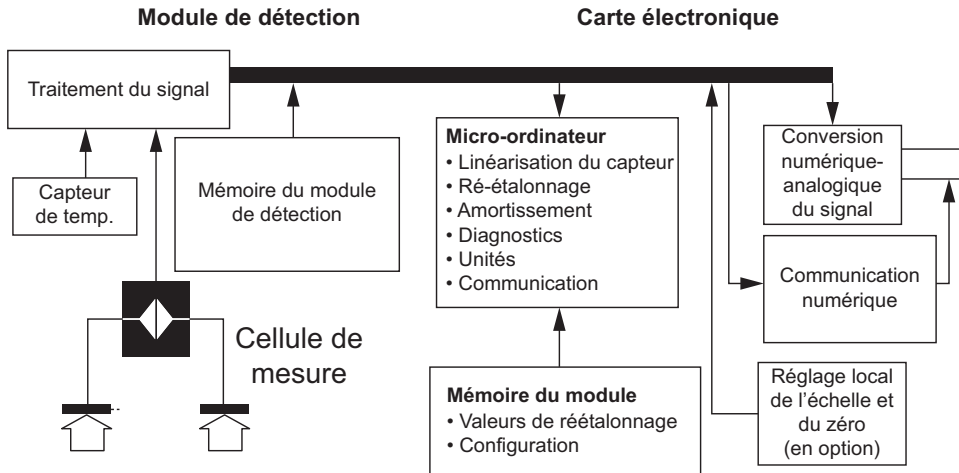


Figure 1.9 – Schéma de principe d'un capteur intelligent Rosemount modèle 2051.

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) ;

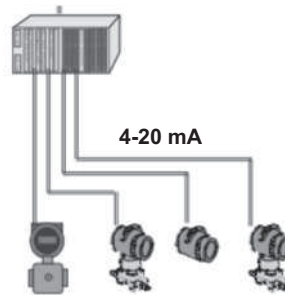


Figure 1.10 – Principe de raccordement de capteurs industriels sur un automate programmable ou un contrôleur d'un système numérique de contrôle-commande.

– 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.

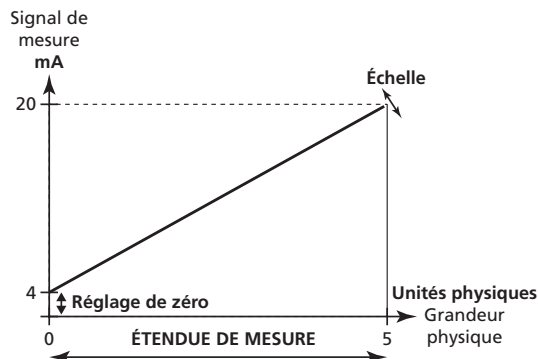


Figure 1.11 – Correspondance entre le signal normalisé 4-20 mA et l'étendue de mesure d'un capteur. La valeur 4 mA correspond au minimum de l'étendue d'échelle ; la valeur 20 mA correspond au maximum de l'étendue d'échelle. Deux réglages permettent d'ajuster le signal 4-20 mA à une étendue d'échelle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

1.9.1 Communication numérique

■ Introduction

Les capteurs modernes sont réalisés à partir de composants numériques, comme les microprocesseurs ou les microcontrôleurs. Les signaux délivrés par ces capteurs sont principalement analogiques. Cependant, l'exploitation des signaux des capteurs est réalisée par des systèmes de contrôle-commande qui, eux aussi, utilisent la technologie numérique. Comme le montre la figure ci-dessous, les constructeurs proposent également des capteurs délivrant des signaux numériques. Après des décennies de technologies analogiques, d'abord pneumatiques puis électroniques, aujourd'hui la majorité des capteurs est numérique. L'utilisation de microprocesseurs ou de microcontrôleurs apporte des fonctionnalités supplémentaires. Les capteurs deviennent configurables et disposent de diagnostics accessibles à distance.

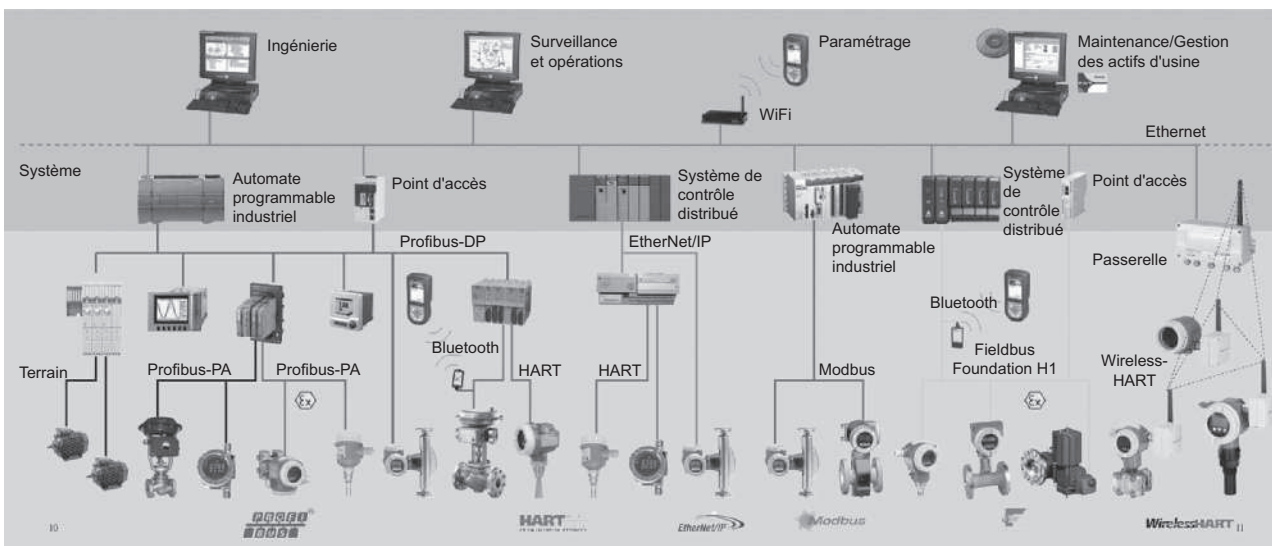


Figure 1.12 – Système de contrôle-commande utilisant la technologie numérique (Doc. Endress Hauser).

Les techniques numériques d'échanges utilisées dans les capteurs industriels sont les suivantes :

- Protocole HART.
- Liaison Modbus.
- Bus de terrains Fieldbus Foundation, Profibus PA.
- Wireless HART.
- Connection Bluetooth.

1.9.2 Protocole HART (*Highway Addressable Remote Transducer*)

Le protocole HART est l'association d'un signal analogique 4-20 mA et d'un signal numérique. Cette solution permet de conserver un signal traditionnel

d'instrumentation 4-20 mA tout en offrant l'accès aux fonctionnalités numériques. Ces fonctionnalités permettent d'une part, de configurer le capteur et d'autre part, d'apporter une aide importante au diagnostic. Pour les capteurs classiques, le signal analogique est un courant d'amplitude 4-20 mA qui est l'image de la grandeur mesurée ; pour les organes de réglage ce signal est la commande appliquée au dispositif. Dans le cas des instruments HART, au signal analogique 4-20 mA, est superposée une sinusoïde de faible amplitude, modulée en fréquence en application du standard de communication Bell 202). Comme le montre la figure 1.13, la fréquence de 1 200 Hz permet de coder les digits de valeur 1, celle de 2 200 Hz les bits à 0. La vitesse de transmission est de 1 200 bauds.

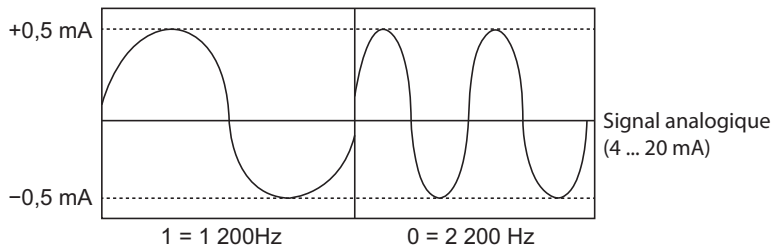


Figure 1.13 – Principe de la communication HART.

L'échange de données est de type maître-esclave. Utilisé sans maître de communication, le capteur HART se comporte comme un instrument classique, seul le signal analogique 4-20 mA est présent. Pour obtenir les informations numériques, il faut connecter un appareil maître qui générera les interrogations HART (figure 1.14).

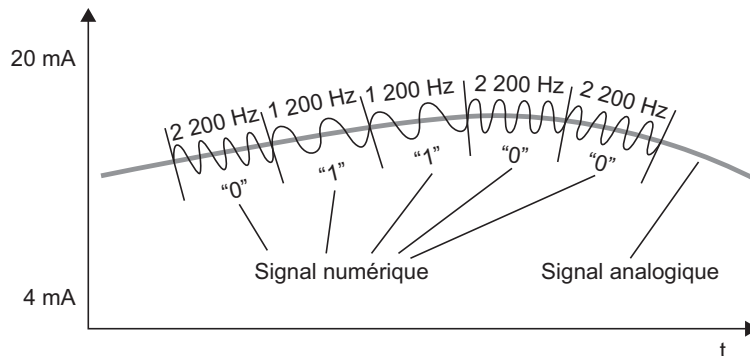


Figure 1.14 – Séquence de communication HART.

Cette composante numérique transporte les signaux de service permettant de lire les données du capteur ou de modifier son paramétrage. Par exemple, les mesures, commandes, informations de diagnostic, informations et commandes de configuration.

Le signal 4-20 mA ne permet de transporter qu'une grandeur. En revanche, les signaux numériques offrent la possibilité de transmettre des variables secondaires. Par

exemple, dans le cas d'un capteur de pression multivariable, le 4-20 mA transmettra la pression différentielle ; le HART permettra d'obtenir la pression statique et la température de la cellule.

Dans le cas le plus fréquent, le capteur HART est raccordé à son environnement, comme un capteur classique, c'est-à-dire en point à point : un capteur équivaut à un câble (*figure 1.15*).

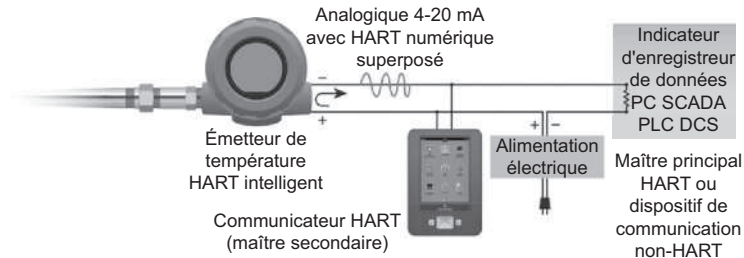


Figure 1.15 – Organisation d'une boucle HART (Doc. Emerson).

■ Les interfaces de communication HART

La communication avec les capteurs HART utilise deux types de solutions :

- des instruments dédiés appelés « pochettes » (*Figure 1.16*) ;
- des ordinateurs portables équipés d'un modem HART. (*Figure 1.17*).



Figure 1.16 – Exemple d'interfaces de configuration Emerson.

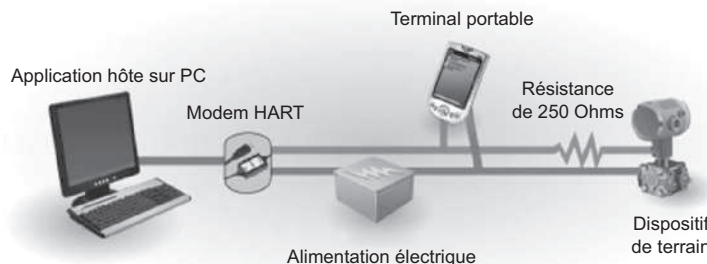


Figure 1.17 – Exemple d'une configuration d'un capteur HART à l'aide d'un PC.

Les interfaces HART dédiées sont utilisables directement. Il suffit de raccorder la pockette dans le circuit ; le point de connexion n'est pas critique. Lors de la connexion l'interface HART détecte le capteur raccordé. Un système de menu, appelé arborescence, permet, ensuite, d'accéder aux paramètres du capteur.

Lors de l'utilisation d'un PC, il faut charger un logiciel approprié. On trouve sur le marché différents produits. Les constructeurs mettent à disposition des logiciels permettant le dialogue avec leurs seuls capteurs ; ces logiciels sont généralement gratuits ou peu coûteux. Pactware représente une solution intéressante. Il s'agit d'un *freeware* téléchargeable sur le site Internet de différents constructeurs. Il faut ensuite télécharger sur le site du constructeur du capteur que l'on désire configurer le driver correspondant. Il existe aussi des logiciels plus développés qui offrent des fonctionnalités permettant non seulement de configurer le capteur mais également d'assurer le suivi métrologique et la gestion d'un parc d'instruments. Asset Management Software d'Emerson est un exemple de ce type de logiciel.

Remarque : pour que la communication HART fonctionne, il est impératif que la résistance de la boucle présente une résistance d'au moins 250 Ω .

Lorsque les capteurs sont raccordés à un système numérique de contrôle-commande, l'accès aux fonctionnalités HART est possible avec depuis les stations maintenance ou de configuration, sous réserve que les cartes d'entrées - sorties des contrôleurs reconnaissent le signal HART.

■ Les capteurs HART raccordés en bus de terrain

Le HART permet de connecter plusieurs capteurs sur un même câble et ainsi de constituer un embryon de bus de terrain. Dans ce cas, le signal analogique est figé à 4 mA et chaque instrument reçoit une adresse spécifique. L'échange de données se fait par le protocole HART.

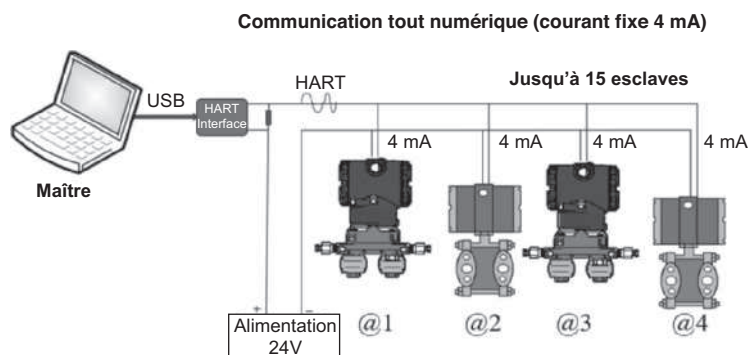


Figure 1.18 – Capteurs HART montés en bus de terrain.

Les apports de cette technologie :

- configuration et paramétrage à distance d'où une maintenance plus aisée ;
- fonctionnalités de diagnostic importantes ;
- remontée des plusieurs grandeurs non transmises par le signal analogique ;

- nombreux outils de configuration disponibles ;
- opération d'étalonnage et suivi des instruments grandement facilités.

Les capteurs HART sont très répandus dans le monde industriel : plus de cinq millions d'instruments sont installés dans le monde entier.

1.9.3 Capteurs en bus de terrain

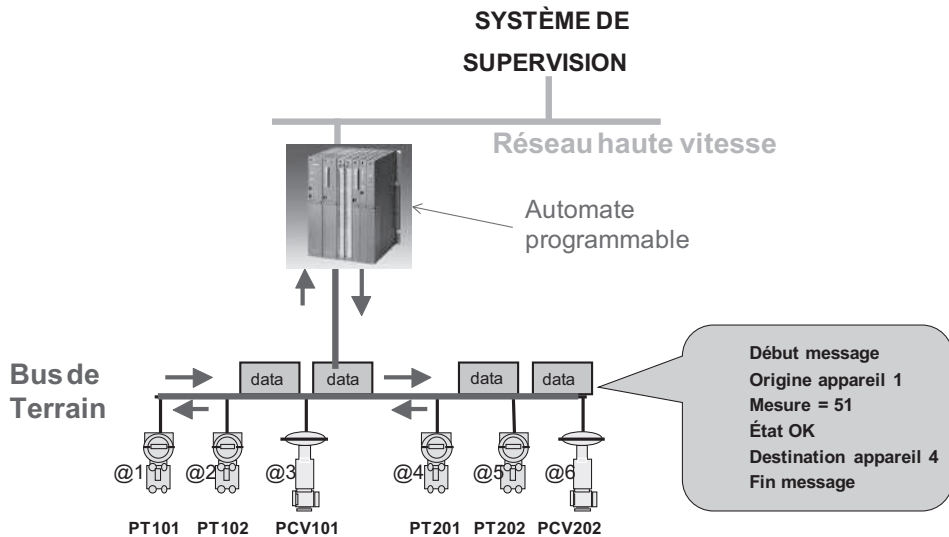


Figure 1.19 – Instruments en bus de terrain (automate programmable modèle Siemens S7-400 ou S7-300).

La seconde solution consiste à utiliser des bus de terrain qui permet le raccordement de capteurs entièrement numériques. Un bus de terrain est constitué d'un câble généralement à deux conducteurs sur lesquels vont circuler les données échangées par les différents capteurs. En zone sûre, la longueur du bus peut atteindre 1 900 m et supporter jusqu'à 32 capteurs ; le nombre effectif d'instruments dépend de la longueur du réseau, de sa topologie et de la consommation électrique des capteurs. Dans les zones présentant des atmosphères explosives (ATEX)¹ le nombre de capteurs ne dépasse pas huit. Dans le domaine des bus de terrain, plusieurs standards existent. Les bus utilisés pour le raccordement de capteurs industriels sont les suivants :

- Modbus ;
- Profibus-DP/PA ;
- Fieldbus Foundation.

1. Pour les problématiques ATEX, voir J.-M. Valance et B. Poussery, *Le carnet du régulateur*, 18^e ed., 2017, éditions Dunod.

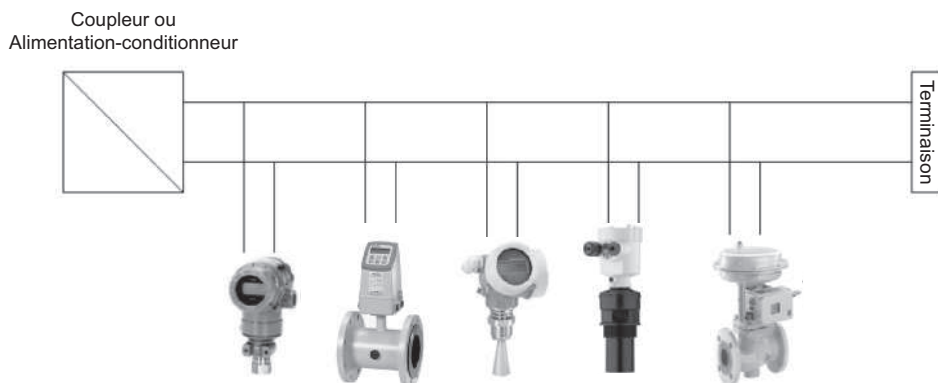


Figure 1.20 – Détails de raccordement d'instruments au moyen d'un bus de terrain (avec, de gauche à droite : capteur de pression 2051 Emerson, débitmètre électromagnétique Siemens modèle MAG 6000, niveau radar Endress Hauser FMR51, niveau ultrason VZGA modèle Vegason 62 et vanne Samson modèle 241).

■ Modbus

Le Modbus est la plus ancienne solution de communication numérique utilisée pour interconnecter des capteurs. Le Modbus est un protocole de communication introduit, en 1979, par le constructeur d'automates programmables industriels Modicon. Aujourd'hui, Modicon est une société du groupe Schneider Electric. C'est l'un des bus de terrain les plus utilisés dans le monde de l'automatisme industriel. Modbus se décline sous plusieurs versions : Modbus RS485, Modbus TCP et Modbus Ethernet TCP/IP.

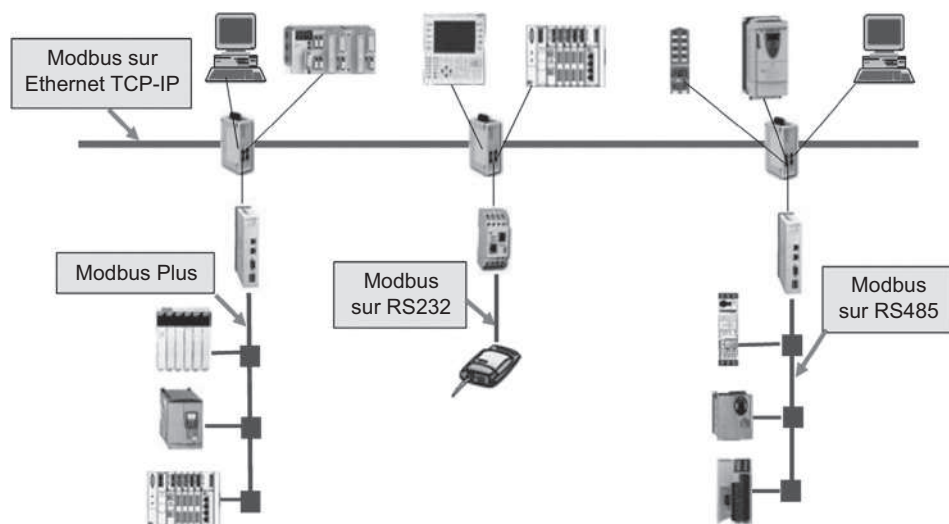


Figure 1.21 – Modbus, les variantes.

L'architecture utilisée en instrumentation est une structure hiérarchisée comprenant un maître, la carte E/S de l'automate et plusieurs esclaves, les capteurs. L'échange de

données est de type série, asynchrone ; la liaison est bidirectionnelle sous la norme RS485 (0 – 5 V). Longueur du réseau : jusqu'à 1 200 m.

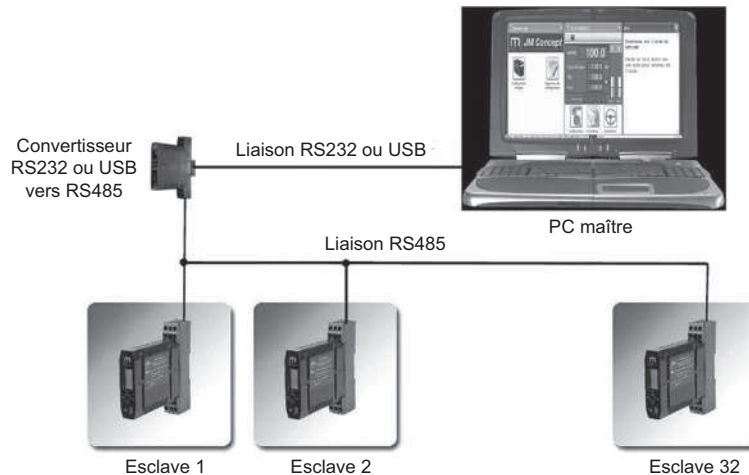


Figure 1.22 – Exemple de configuration de capteurs en Modbus (d'après JM Concept).

En mode RTU, les échanges sont constitués d'une trame contenant :

- l'adresse du destinataire, comprise entre 1 et 254 ;
- la fonction à traiter (lecture, écriture) ;
- la donnée à transmettre ;
- le code de vérification d'erreur (contrôle de redondance cyclique CRC).

Les caractéristiques de la liaison sont :

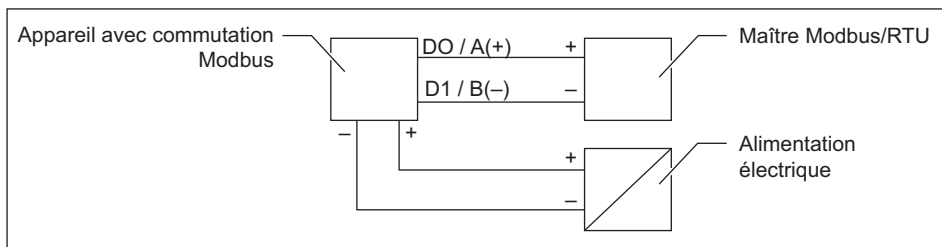
- vitesse de transmission : 9 600 ou 19 200 bits/seconde ;
- trame : 8 bits sans parité, 1 bit de stop.

Mode de transmission : half-duplex. Deux possibilités :

- le maître communique avec un esclave et attend sa réponse ;
- le maître communique avec l'ensemble des esclaves, sans attendre de réponse.

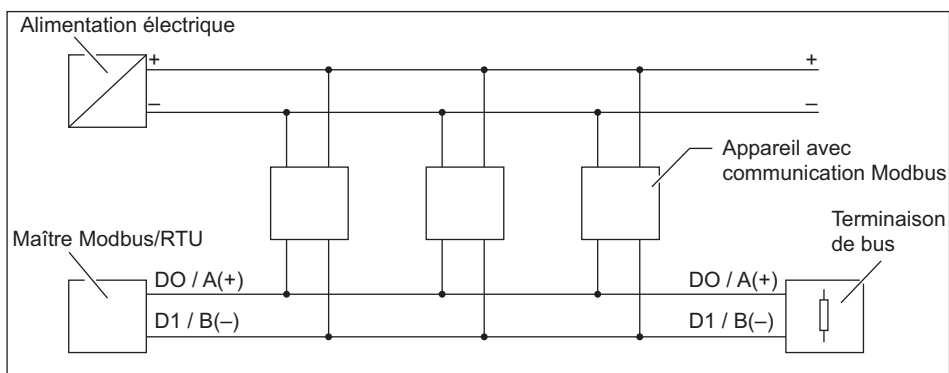
Un seul équipement peut émettre sur le réseau. Aucun esclave ne peut émettre un message sans une demande préalable au maître. Aucun dialogue n'est possible entre esclave.

- L'adresse de l'esclave est un numéro compris entre 1 et 255 codé sur 1 octet. Le numéro 0 indique que tous les esclaves sont concernés (diffusion générale).
- La donnée peut être composée de plusieurs mots, par exemple, adresse du premier mot (2 octets), puis nombre de mots (2 octets).



A0037751

Figure 1.23 – Exemple de connexion d'un capteur en Modbus (Doc. Endress+Hauser).



A0038149

Figure 1.24 – Exemple de réseau de capteurs (Doc. Endress+Hauser).

■ Bus de terrain Fieldbus Foundation (FF)



Figure 1.25 – Topologie d'un bus Fieldbus Foundation.

La solution Fieldbus Foundation a été développée à partir de 1994 par un groupement de sept constructeurs parmi lesquels ABB, Emerson, Honeywell, etc.

Aujourd'hui, ce bus de terrain est géré par la Fieldbus Foundation, organisation chargée de développer et de promouvoir un bus de terrain unique, international, interopérable, dédié au contrôle-commande de procédés industriels.

Le bus de terrain FF est un protocole ouvert, un système de communication numérique, de type série et bidirectionnel

Il assure l'interconnexion d'instruments industriels de mesure et de régulation fournis par différents constructeurs.

Le réseau est structuré en deux niveaux de vitesse : HSE (*high speed exchange*) avec une vitesse de communication de 100 Mbits/s, et H1 avec un débit de 31,25 Kbits/s. La majorité des applications industrielles ne mettent en œuvre que la couche H1.

Pour la partie *hardware*, le Fieldbus Foundation repose sur la norme IEC 1158-2. Les liaisons sont assurées par des câbles pairés-torsadés. Il existe quatre modèles de câbles : type A, B, C et D. Pour obtenir de bonnes performances, l'utilisation des câbles de type A (paire torsadée, blindée de section 0,8 mm²) est recommandée. Ce choix autorise une longueur de réseau de 1 900 m sans répéteur.

Hors zone à atmosphère explosive, le bus permet l'interconnexion de 32 capteurs mais seulement huit instruments en zone ATEX. L'alimentation des capteurs est assurée via le bus. Fieldbus Foundation supporte différentes topologies de réseau : linéaire, arborescente, étoile, etc.

□ Les éléments constitutifs

La réalisation physique d'un bus Foundation est très rapide ; elle met en œuvre des éléments préconditionnés : câbles, tés, briques, bouchons de terminaison (figure 1.26).

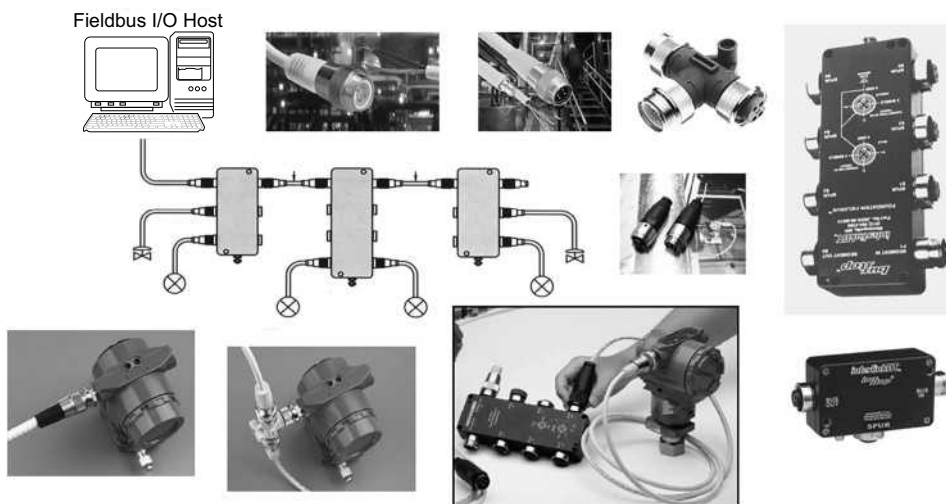


Figure 1.26 – Exemple de réalisation d'un Fieldbus Foundation (Doc. Turck).

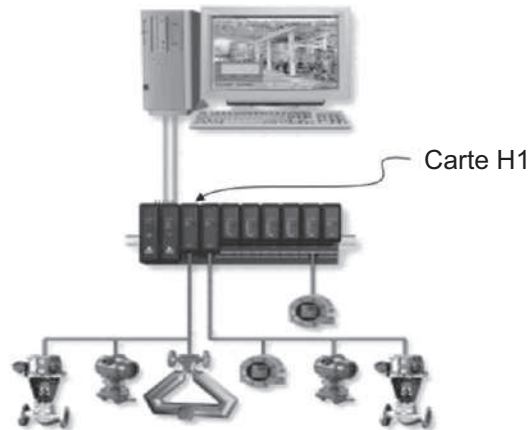


Figure 1.27 – Achitecture de principe d'un réseau Fieldbus Foundation.

□ La gestion des équipements d'un Fieldbus Foundation

Le bus FF est raccordé à une carte H1. Cette carte contient le gestionnaire de trafic déterministe nommé LAS (*Link Active Scheduler*). Le LAS émet périodiquement un signal d'horloge pour que chaque équipement puisse synchroniser le traitement des blocs de fonctions et de communication. La base de temps est commune à tous les abonnés au réseau. Cette horloge permet aussi un horodatage commun pour toutes les données des instruments du réseau. Un appareil ne peut envoyer des informations qu'avec la permission du LAS. Le LAS possède la liste de tous les instruments ayant accès au réseau. Il est possible de désigner un instrument *Backup Link Master* qui prend le contrôle du réseau en cas de dysfonctionnement du LAS ; le réseau peut ainsi continuer de fonctionner. Le LAS assure la transmission des trois types de données : variables cycliques (boucles de régulation), variables événementielles produites par un changement d'état (exemple : une alarme), messages non-temps réel (diagnostic de maintenance).

□ Les blocs logiciels des instruments

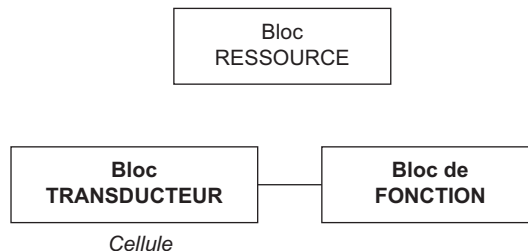


Figure 1.28 – Blocs logiciels d'un instrumentation Fieldbus Foundation.

La particularité d'un instrument FF est qu'il est organisé autour de trois blocs (figure 1.28).



Figure 1.29 – Composition des blocs de fonction logiciel d'un capteur Fieldbus Foundation.

□ Le bloc ressource

Il n'y a qu'un seul bloc ressource par instrument. Ce bloc contient les informations telles que le repère (tag), le constructeur, le modèle et le numéro de série.

Le bloc transducteur fournit les liens entre les blocs de fonctions AI (*analog input*) ou AO (*analog output*) et les traitements locaux d'entrées/sorties. Il contient les informations du capteur ou de la vanne, comme le type, les données d'étalonnage, le diagnostic et les informations.

□ Le bloc de fonctions Fieldbus

Les applications sont modélisées en utilisant des blocs de fonction qui peuvent être distribués entre équipements de terrain. L'exécution des blocs de fonction est synchronisée. Comme le montre la *figure 1.30* suivante, ces blocs de fonctions permettent la réalisation de traitement : acquisition, calcul, régulation, etc.

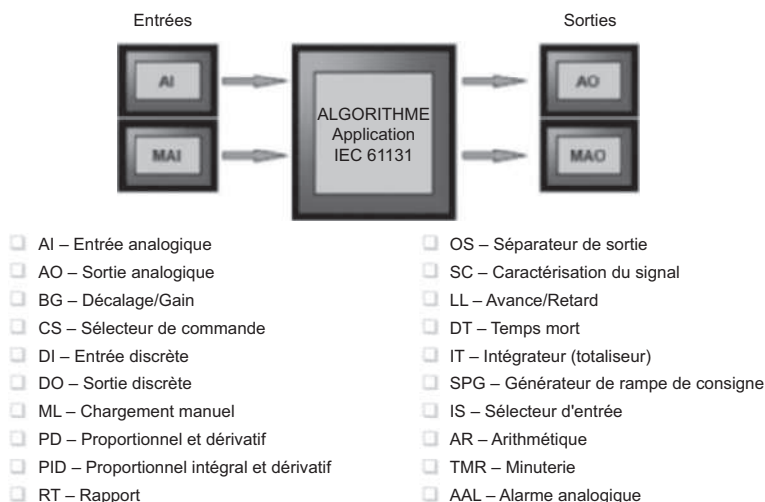


Figure 1.30 – Exemple de fonctions disponibles dans un instrument Fieldbus Foundation et agencement.

Le nombre et le type de blocs de fonction sont variables selon le capteur. Par exemple :

- Un capteur de pression Rosemount modèle 3051 dispose d'un bloc de régulation PID, un bloc intégration, un bloc arithmétique, un bloc de linéarisation de signal et un bloc sélection.
- Un transmetteur de température Rosemount model 3244 MV est un capteur multivariable avec deux mesures de température. Il comprend les blocs de fonction suivants : trois blocs d'entrée analogique (AI), un bloc sélection, un ou deux blocs de régulation PID, un bloc de linéarisation de signal et un bloc arithmétique.

En associant différents blocs de fonctions, il est possible de réaliser des schémas élaborés. La figure ci-dessous présente la réalisation d'une régulation cascade débit-température. Les blocs sont répartis dans trois instruments : le débitmètre, le transmetteur de température et enfin, le positionneur de la vanne.

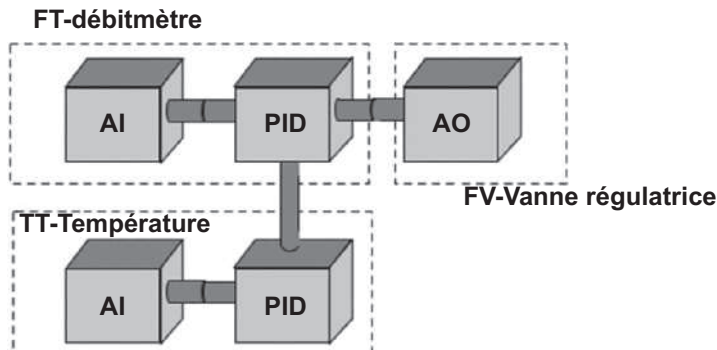


Figure 1.31 – Implémentation d'une régulation cascade dans des instruments Fieldbus Foundation.

L'utilisation d'instruments Fieldbus Foundation, permet de déporter les traitements dans les capteurs au lieu de les localiser dans le contrôleur du système de contrôle-commande.

□ Le bus de terrain Profibus-PA

Conçu en 1987 par sept constructeurs et instituts allemands, Profibus (Process Fieldbus) est un bus de terrain standard non-propriétaire ; il est très répandu en Europe ; il est notamment très utilisé sur les automates programmables industriels Siemens.

Profibus est construit autour de deux modèles d'architecture. Le premier, le Profibus-DP (*decentral periphery*), est le plus employé. Il permet une communication transversale entre des équipements périphériques décentralisés et des automatismes grâce à son taux de transfert de données rapide. Sa longueur peut aller jusqu'à 1 200 m lorsqu'il est utilisé avec des câbles constitués de paires torsadées blindées. Une longueur de plusieurs kilomètres est possible avec de la fibre optique. La vitesse de transmission va de 9,6 à 12 Mbits/s.

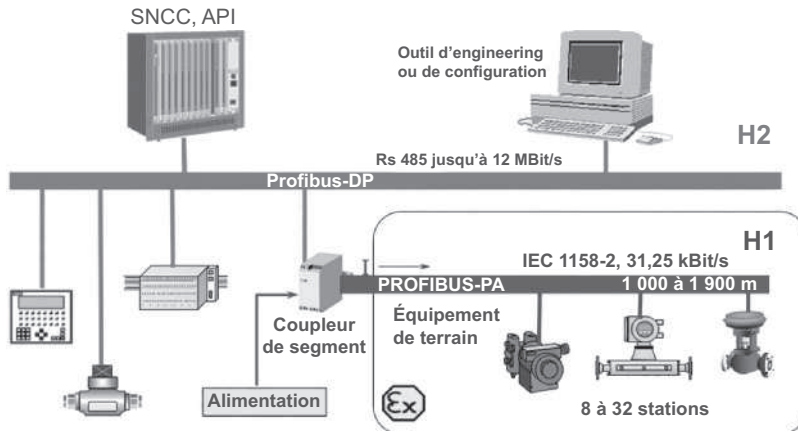


Figure 1.32 – l'architecture des réseaux Profibus.

Le second, Profibus-PA (*process automation*), a été développé à partir du Profibus-DP. Il est particulièrement destiné à l'automatisation de procédé et permet la mise en œuvre des capteurs.

Profibus est le protocole le plus mis en œuvre dans le monde pour les applications manufacturières et d'automatisation.

Le raccordement des capteurs d'instrumentation industrielle s'appuie sur le Profibus-PA. Contrairement au Fieldbus Foundation où le raccordement du bus s'effectue directement sur une carte H1, un réseau Profibus-PA se connectera à un Profibus-DP via un coupleur de segment. Les coupleurs de segments sont une simple conversion de vitesse de transmission. Le bus Profibus-PA peut être considéré comme une extension aux applications process, du réseau Profibus-DP.

Le hardware d'un Profibus-PA est également conforme à la norme IEC 1158-2. Le support de transmission est un câble torsadé à deux fils de cuivre avec un blindage. Les signaux sont en RS485 ; il est nécessaire d'installer une terminaison de bus à chaque extrémité du câble. L'alimentation des capteurs est délivrée par le câble réseau. La vitesse de transfert est de 31,25 KBauds sur des longueurs maximales allant jusqu'à 1 900 m en zone non explosives et seulement 1 000 m en zone ATEX. En zone sûre, le nombre d'instruments connectables sur un Profibus-PA est de 32. Pour des installations en zones ATEX la puissance électrique est obligatoirement plus faible ce qui porte le nombre de capteurs à huit maximums.

Profibus-PA est géré par l'organisation des utilisateurs Profibus. Les capteurs doivent être conformes au PA-Profile qui définit une spécification cadre valide pour tous les types d'instruments. Les échanges sur le Profibus sont gérés par un maître. Les caractéristiques sont organisées autour de blocs fonctionnels standardisés. La description du comportement de l'instrument est accomplie en définissant les variables standard, qui décrivent les propriétés de l'émetteur en détail. Chaque instrument doit avoir un GSD (*GeräteStammDaten/generic slave data*), fichier, qui contient les données spécifiques de l'instrument (*tableau 1.3*). Les valeurs mesurées sont traitées dans un bloc transducteur (TR) et transmises au gestionnaire du réseau Profibus

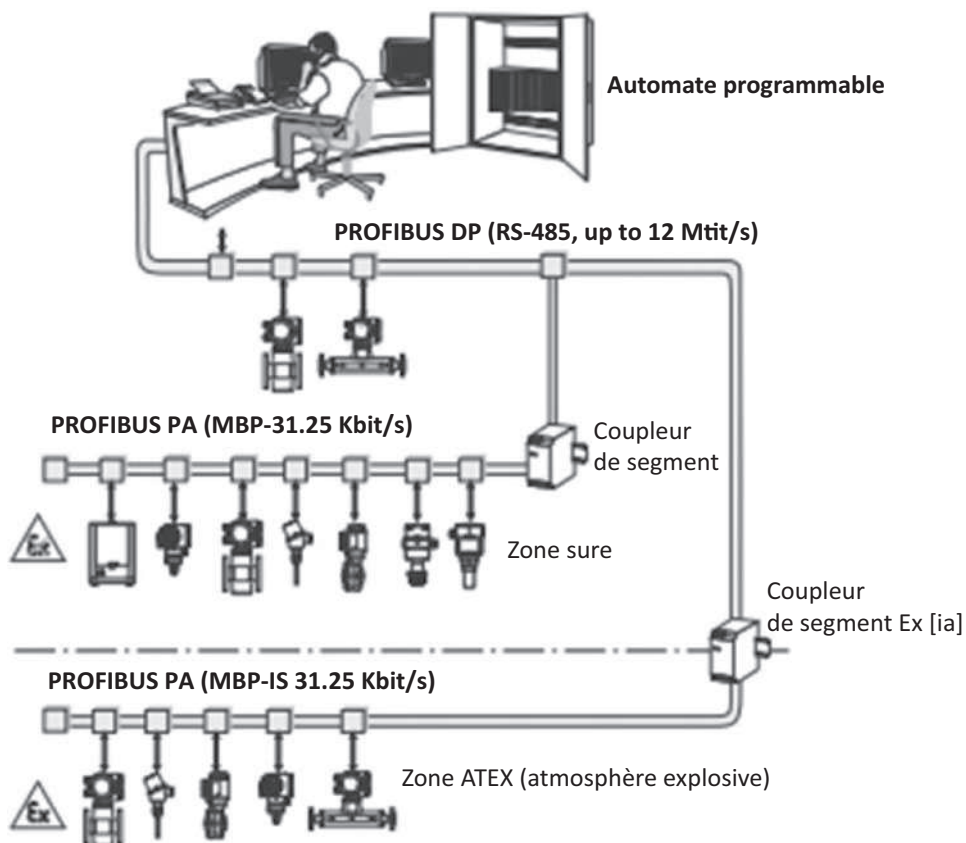


Figure 1.33 – Exemple de Bus de terrain Profibus-DP – Profibus-PA (Doc. E&H).

Tableau 1.3 – Paramètres définis d'un bloc AI dans les profils Profibus-PA.

Paramètre	Lecture	Écriture	Fonction
Out	•		Valeur mesurée réelle des variables de processus
PV_SCALE	•	•	Mise à l'échelle des variables de processus
PV_FTIME	•	•	Temps de montée du bloc de fonction – sortie en secondes
ALARM_HYS	•	•	Hystérésis de la fonction d'alarme en % ou en plage
HI_HI_LIM	•	•	Limite d'alarme haute supérieure
HI_LIM	•	•	Limite d'alarme haute
LO_LIM	•	•	Limite d'alarme basse
LO_LO_LIM	•	•	Limite d'alarme basse inférieure
HI_HI_ALM	•		État de la limite d'alarme haute supérieure avec horodatage
HI_ALM	•		État de la limite d'alarme haute avec horodatage
LO_ALM	•		État de la limite d'alarme basse avec horodatage
LO_LO_ALM	•		État de la limite d'alarme basse inférieure avec horodatage

(Profibus master) via un bloc AI (entrée analogique). Pour les actionneurs c'est un bloc AO (sortie analogique) qui est mis en œuvre.

Pour les différents paramètres, sont transmises, non seulement la valeur mesurée, mais aussi les informations d'alarme et d'avertissement sont transmises. La donnée numérique permet d'obtenir une plus grande précision, car il n'y a pas de conversion analogique- numérique de la mesure.

■ Logiciel de programmation

Pour les instruments des différents fabricants, un outil logiciel de configuration est disponible.

■ Choix d'un bus de terrain : Fieldbus Foundation contre Profibus

À l'origine Fieldbus Foundation était la solution préférée par les constructeurs tels que Emerson, Honeywell, etc., alors que Profibus était plutôt dans le giron de Siemens et plus largement de fabricants européens (Endress Hauser, Véga, Samson, etc.). Aujourd'hui, on trouve dans les catalogues de fournisseurs d'instrumentation aussi bien des capteurs HART, FF que Profibus.

Le choix est dicté par le système de contrôle-commande et les contraintes de connexion au niveau du procédé à instrumenter.

1.9.4 Transmetteurs *wireless*

De nombreux constructeurs proposent des solutions sans fil dites *wireless* (sans fil de liaison, par ondes électromagnétiques ou radio). L'avantage évident de cette nouvelle technologie est d'économiser le prix du câblage et de tout le matériel de support de ces dispositifs. Les signaux de transmission représentant les valeurs analogiques numérisées classiques (mesures, consignes, commandes), ainsi que les valeurs binaires (seuils, marche, arrêts, états) de l'instrumentation. Chaque transmission est évidemment vérifiée à l'aide de codes, plus ou moins élaborés, intégrés dans le message. Le récepteur vérifie donc la validité du mot envoyé et s'il y a un doute ou si la valeur est incorrecte, le récepteur redemande l'information... Suivant les constructeurs, l'émetteur peut changer la fréquence de la porteuse (possibilité pour certains de changer une dizaine de fois cette fréquence).

Si le signal ne passe pas bien (exemple : présence d'une masse magnétique comme un camion en stationnement entre l'émetteur et le récepteur), les capteurs étant intégrés dans un réseau maillé, l'émetteur va rechercher le transmetteur le plus proche qui n'est pas gêné par le camion, cet instrument va alors servir de relais et contournera la masse magnétique du véhicule.

La constitution des réseaux maillés est relativement simple à créer et l'adjonction d'un nouveau transmetteur dans la structure se fait automatiquement. Cependant, le nombre de nœuds et les distances sont limités et la vitesse d'échange dépend du nombre d'appareils dans le réseau maillé. On peut évidemment travailler sur un système numérique avec un grand nombre de réseaux maillés. L'architecture du réseau est définie par le fournisseur.

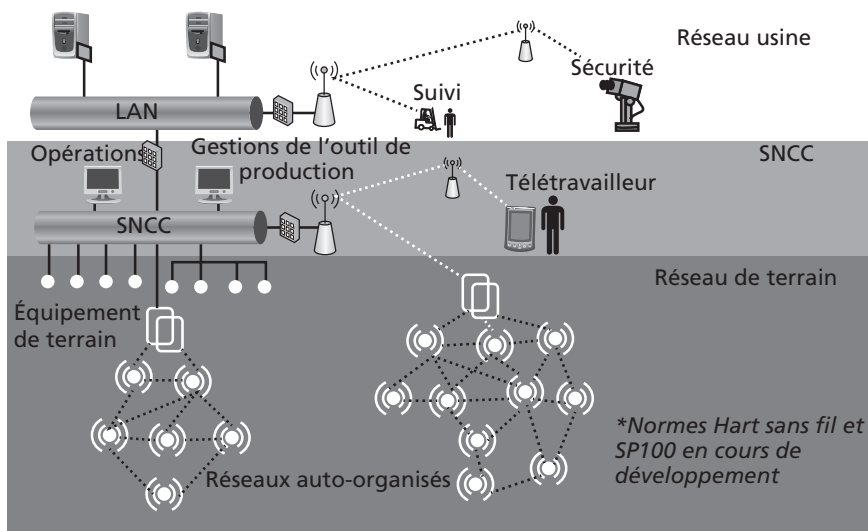


Figure 1.34 – Document Emerson.

Les vitesses de transmission sont relativement lentes... Ce qui, pour le moment, exclut dans la plupart des unités de production la mise en place de boucles de régulation. Les applications les plus fréquentes concernent la surveillance de paramètres évoluant lentement (gestions de bacs de stockage, etc.). Dans ces procédés, la salle de contrôle est souvent éloignée des points de mesures, d'où la très grosse économie réalisée par la suppression des câbles, des goulottes, caniveaux, passages de route, gaines techniques, etc.

Dans un procédé où une partie de l'installation est en rotation, les capteurs qui sont situés dans la partie tournante communiquent depuis des années en Wi-Fi.

Connexion de capteurs à distance

Certaines applications peuvent nécessiter de transmettre des mesures sur des distances importantes : plusieurs centaines de mètres voire plusieurs kilomètres. Les capteurs d'instrumentation industriels ne sont pas prévus pour cela. La démarche consiste alors à raccorder le ou les instruments sur un module d'entrée sortie lui-même connecté à une carte d'émission réception. Selon la distance à couvrir et le type d'informations à transmettre, différentes solutions sont envisageables : LoRaWAN, industrial Wlan, Trust wireless™ (Phoenix Contact), GSM, 4G, 5G, etc. Les fréquences utilisées sont de 868 MHz ou de 2,4 GHz (Wifi). Le choix de telles solutions demande d'avoir des compétences en matière de télécommunication.

1.9.5 Connection Bluetooth

Avec l'émergence des smartphones et des tablettes, le Bluetooth, solution standard de communication grand public permettant une connexion à distance entre appareils, devient un moyen de dialogue avec certains capteurs industriels. Plusieurs

constructeurs majeurs proposent des fonctionnalités de configurations et de diagnostics de leurs instruments via Bluetooth.

Quelques instruments actuellement mis en vente peuvent être équipés de la connexion Bluetooth. Pour des appareils plus anciens, des modules dédiés peuvent être rajoutés.

■ Caractéristiques techniques Bluetooth

Connexion sans fils définie par la norme IEEE 802.15.1, Bluetooth utilise la bande de fréquences ISM (applications industrielles scientifiques et médicales) de 2,4 GHz. Un point d'accès Bluetooth fonctionne dans cette plage où aucun cout de licence supplémentaire n'est supporté par l'entreprise. Selon la norme, des distances extérieures allant jusqu'à 250 m peuvent être couvertes. En instrumentation industrielle, la portée est plus limitée : de l'ordre de 50 m (en fonction des constructeurs et des capteurs). La portée est volontairement faible pour limiter des risques de cyberattaque ; il faut être à proximité du capteur pour pouvoir se connecter. La sécurité des données est garantie par un cryptage sophistiqué. Pour faire face aux risques de cyberattaque, les constructeurs ont été obligés de renforcer la sécurité de leurs connexions Bluetooth. Les équipements Bluetooth consomment peu d'énergie.

■ Mise en œuvre d'une connexion Bluetooth avec un instrument industriel

Condition *sine qua non* : le capteur doit posséder un circuit de communication Bluetooth. À partir du site du constructeur, l'utilisateur doit d'abord charger sur un smartphone ou une tablette (éventuellement un PC) l'application dédiée. Par exemple, VEGA Tools chez VEGA, SmartBlue chez E&H. Il faut ensuite établir la connexion entre l'interface et le capteur. Il suffit pour cela de scanner un QR code indiqué par le constructeur.

■ Notions générales

L'application Bluetooth permet de se connecter sur l'instrument et donne accès, temporairement, aux informations relatives à son fonctionnement, à sa configuration éventuelle.

□ Exemple d'illustration : application SmartBlue d'Endress Hauser

L'application *SmartBlue* d'Endress Hauser permet de dialoguer avec les appareils suivants :

- Capteurs de pression : Cerabar PMP71B, PMC71B, PMP51B, PMC51B et Deltabar PMD75B, PMD78B, PMD55B.
- Solutions de mesure de niveau : radars Micropilot FMR10/FMR20 et presque tous les autres radars de la Micropilot et Levelflex.
- Détection de seuil : le nouveau Liquiphant FTL51.
- Mesure de débit : débitmètre électromagnétique Picomag, Promag W800 et Pro-line 10.



Figure 1.35 – Écran de smartphone avec icône d'application *SmartBlue E&H*.



Figure 1.36 – Accès aux paramètres d'un capteur depuis l'application *SmartBlue E&H*.

- Température : transmetteurs TMT71, TMT72 et TMT142B.
- Analyse des liquides : Liquiline Compact CM82 et transmetteur Liquiline Mobile CML18.

Pour dialoguer avec un instrument, l'utilisateur doit être situé à quelques mètres de l'appareil. Si l'instrument Bluetooth avec lequel on veut travailler n'apparaît pas dans la liste des appareils connectables, il faut démarrer l'application *SmartBlue* pour afficher les instruments connectés.

Afin d'éviter toute connexion indésirable, l'accès au capteur est protégé par un mot de passe et un système de clés. Si le login est reconnu, l'utilisateur pourra accéder aux fonctionnalités disponibles.

L'application *SmartBlue* permet de visualiser l'état de l'instrument, puis, si nécessaire, d'effectuer sa configuration, son diagnostic. Pour des capteurs utilisés dans des



Figure 1.37 – Diagnostic d'un capteur de niveau depuis un smartphone à l'aide de l'application *SmartBlue E&H*.

applications de sécurité instrumentée les tests de validation peuvent être exécutés. Le suivi du fonctionnement de l'instrument est enregistré et un rapport de synthèse peut être obtenu.

■ Comparaison HART/Bluetooth

Autant le HART est une solution aujourd'hui universelle, l'approche Bluetooth est spécifique à chaque constructeur. Les principaux intérêts d'une application Bluetooth sont la convivialité et l'absence de chargements de drivers. Contrairement au HART, une connexion Bluetooth est temporaire et n'est destinée qu'à des interventions de maintenance. Elle ne permet de remonter de façon permanente les données mesurées. Les deux approches sont donc complémentaires.

Bibliographie

■ Ouvrages

- Considine D.M., *Process/Industrial Instruments and Controls Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1993.
- Elwenspoek M., Wiegrink R., *Mechanical Microsensors*, Springer, Berlin, 2002.
- Fraden J., *Handbook of modern sensors : physics, designs and applications*, Springer, Berlin, 1996.

- Haudend D., *Microcapteurs et Microsystèmes intégrés*, Hermès, Paris, 2000.
- Middelhoek S., Audet S.A., *Silicon Sensors*, Academic Press, Londres, 1991.
- Robert M., Marchandiaux M., Porte M., *Capteurs intelligents et méthodologie d'évaluation*, Hermès, Paris, 1993.
- Sze S. et al., *Semiconductor Sensors*, John Wiley & Sons, New York, 1994.

■ Périodiques et publications diverses

- Chen et al., « Integrated silicon microbeam Pi FET accelerometer », *IEEE Trans., ED* 29, 1982, p. 27.
- Favennec J.M., « Smart Sensors in industry », *J. Phys. E. : Sci. Instrum.*, 20, 1987, p. 1087.
- Fluitman J., « Microsystems technology : objectives », *Sensors and Actuators A*, 56, 1996, p. 151.
- Guckel H., « Surface micromachined physical sensors », *Sensors and Materials*, 4, 1993, p. 251.
- Petersen K.E., « Silicon as a mechanical material », *IEEE Proc.*, 79, 1982, p. 420.