

## Chapitre 1 Rappels sur les capteurs

(Suite)

D'autres classifications peuvent être considérées et cela par rapport à l'intégration de l'électronique associée, à son intelligence artificielle et à la complexité du capteur.

### 3. Classifications par rapport à l'électronique associée

#### 3.1. Capteur composite

Lorsqu'un corps d'épreuve est nécessaire dans un capteur, le capteur résultant est dit « capteur composite » comme le représente la figure 1 et remontré dans la figure 2.

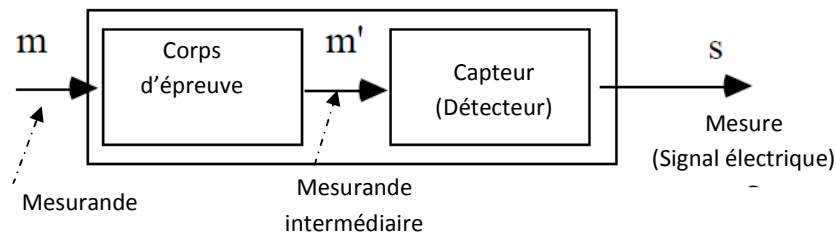


Figure 2. Capteur composite

#### 3.2. Capteur intégré

Lorsque l'électronique associée au capteur (détecteur ou corps d'épreuve + détecteur) est portée sur le même circuit intégré, le capteur est dit « capteur intégré » comme le représente la figure 3.

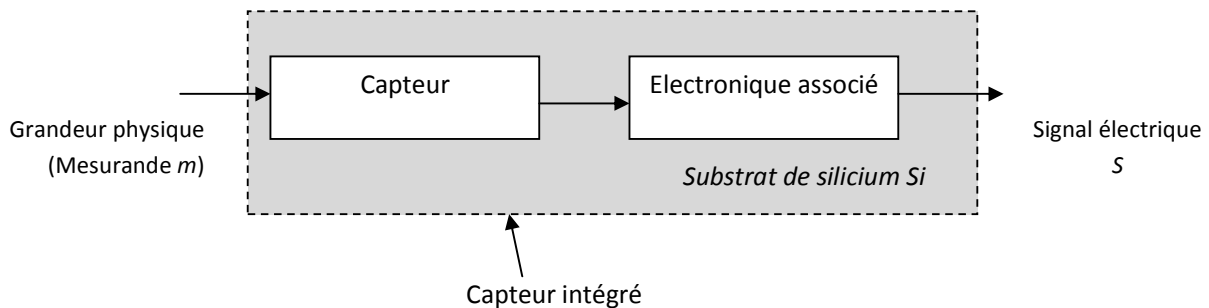


Figure 3. Capteur intégré

### 4. Classifications par rapport à l'intelligence artificielle

#### 4.1. Capteur classique

Les capteurs qui ne comportent pas de microprocesseur sont appelés capteurs classiques. Donc il s'agit de tous types de capteurs déjà vus.

#### 4.2. Capteur intelligent

Dans ce type de capteurs un microprocesseur et une interface de communication bidirectionnelle sont présent dans le circuit global du capteur.

### 5. Classifications par rapport à la complexité du capteur

#### 5.1. Capteur en forme simple

Dans la forme de base de ce type de capteur peut se trouver un détecteur (transducteur) est un outil de mesure tel que : voltmètre. Les différents blocs qui le constituent sont placés en cascade (en boucle ouverte) et il n'y a aucune rétroaction (pas de boucle fermée) pour ajuster la lecture de la grandeur physique. Les capteurs composites et les capteurs intégrés font partie de ce type.

**5.2. Capteur en forme complexe**

Dans ce type de capteur plusieurs grandeurs physiques sont à détecter et l'ajustement des lectures des grandeurs physiques sont possible via l'emploi d'une boucle fermé reliant la sortie du capteur à sont entrée. Il peut être aussi composé d'une unité de contrôle, d'un microprocesseur, d'une interface bidirectionnelle de communication.

**6. Grandeurs d'influences**

Les grandeurs d'influence  $g_1, \dots, g_n$  sont des grandeurs externes au mesurande  $m$  qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur les mesures effectuées par les capteurs. C'est une cause d'erreurs influant sur le signal de sortie. Parmi les grandeurs d'influence sont: la température, la pression environnante, les vibrations mécaniques ou acoustiques, l'humidité, ...

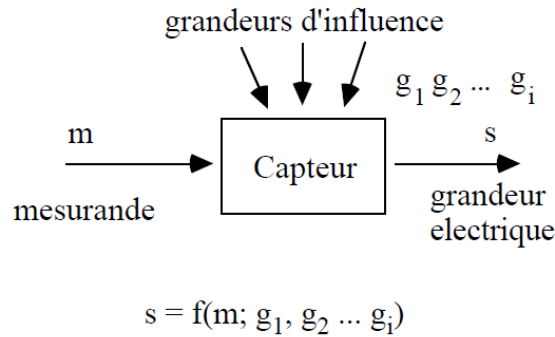


Figure 4. Grandeurs d'influence

**7. Chaîne de mesure**

La chaîne de mesure est constituée d'une association d'éléments montés en chaîne (en cascade) comme représenté dans la figure 5, dont certains sont optionnels selon les besoins.

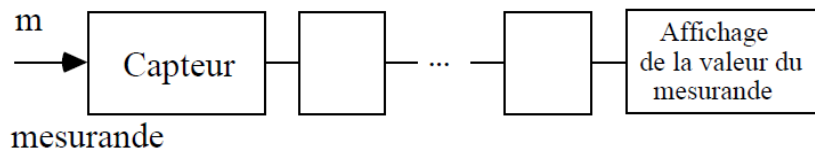


Figure 5. Chaîne de mesure

Les différents éléments qui peuvent être présents dans la chaîne de mesure sont :

- Un corps d'épreuve qui soumis au mesurande primaire fournit un mesurande secondaire qui peut être traduit en signal électrique par un capteur,
- Un capteur qui soumis à l'action du mesurande (primaire ou secondaire), injecte à l'entrée de la chaîne le signal électrique porteur de l'information du mesurande. Nous venons de voir que ce signal est produit soit directement par le capteur actif, soit par l'intermédiaire du conditionneur du capteur passif.
- Un circuit de linéarisation du signal
- Un circuit amplificateur d'instrumentation ou d'isolement pour réduire les tensions parasites de mode commun
- Un multiplexeur analogique chargé de sélectionner l'un des signaux électriques disponibles dans le cas d'un dispositif comprenant plusieurs capteurs
- Un circuit d'amplification du niveau du signal
- Un circuit de filtrage analogique pour limiter la bande passante aux fréquences significatives du signal
- Un échantillonneur-bloqueur pour mémoriser le niveau analogique pendant le temps nécessaire à son traitement
- Un convertisseur analogique-digital pour fournir une information numérique
- Un calculateur qui peut remplir une ou plusieurs des 3 tâches suivantes : l'orchestration de la chaîne de mesure (sélection des voies, des gains, des filtres), des opérations mathématiques de traitement du signal (filtrage, correction) et d'analyse des données (statistique), la production du résultat de la mesure sur une interface d'entrée-sortie informatique (afficheur, mémoire de masse, circuit de communication).

## Chapitre 2 Capteurs intelligents

### 1. Introduction

Les capteurs intelligents trouvent une vaste application dans différents domaines : transports et logistiques, systèmes de contrôle d'énergie, prendre soins des autres (domaine médical), surveillance et sécurité, applications industrielles, agriculture de précision, ...

Dans le domaine d'énergie, l'emploi d'un capteur intelligent auprès des consommateurs permet le suivi instantané de la consommation de l'énergie par conséquent l'approvisionnement adéquat et instantané sera envisagé sans avoir face à un surplus d'énergie ou un déficit. Ce smart meter permet aussi de mettre la main sur les points du réseau qui subissent un vol d'énergie pour intervenir en temps réel.

### 2. Définition

Un capteur intelligent possède en plus d'un capteur classique une sorte d'intelligence qui permet de:

- connaître (par les transducteurs)
- s'adapter aux situations (avec des organes internes de calcul)
- communiquer (par des interfaces de communication)

Ces caractéristiques associent le qualificatif *intelligent* à ce type de capteur.

Les fonctions principales d'un *capteur intelligent* sont de :

- Modifier le comportement interne du capteur afin d'optimiser sa capacité à collecter les données, ou simplement pour effectuer localement des traitements et des calculs
- Assurer la communication bidirectionnelle du capteur, avec des systèmes extérieurs et des opérateurs humains.

En outre, un capteur intelligent reçoit et traite des commandes extérieures, et envoie des mesures et des informations de statut.

Ces derniers combinent le traitement des données électriques qui sont exécutées normalement par une unité de traitement extérieure et le transducteur (capteur) sur la même structure.

Par conséquent, un capteur intelligent doit comporter un:

- Microprocesseur embarqué.
- Interface de communication bidirectionnelle.

### 3. Propriétés d'un capteur

#### 3.1. Propriété statiques

##### 3.1.1. Justesse :

Un capteur est juste si ses valeurs ne changent pas quand on les compare à des valeurs étalon, ou à des valeurs données par d'autres capteurs normalisés.

##### 3.1.2. Sensibilité $S_c$

C'est le coefficient qui lie la grandeur physique d'entrée à mesurer à la grandeur électrique de sortie.  $S = M_{\text{mesure}}/M_{\text{mesurande}}$

Exemple : Capteur de pression:  $V(P) = S.P + V_0$  avec P étant la pression et V la tension mesurée d'où  $S = dV/dP = A$  et si  $A = 1\text{mV/Pa}$  alors le capteur peut mesurer 1Pa et il le montre comme 1mV.

##### 3.1.3. Linéarité

Un capteur est linéaire si sa sensibilité est constante. La relation entre grandeur physique à mesurer et grandeur électrique est alors linéaire (équation d'une droite).

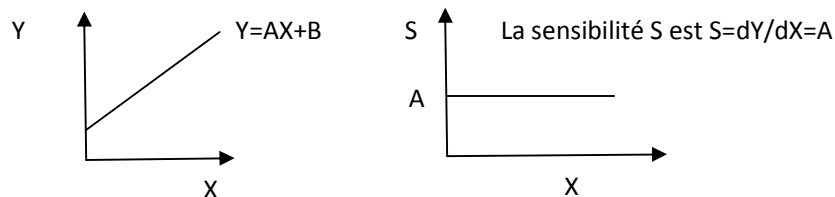


Figure 6. Sensibilité du mesurande X à la mesure Y.

##### 3.1.4. Fidélité

Un capteur est fidèle si ses valeurs ne changent pas au cours du temps (mesures reproductibles) : si on mesure deux fois (1000fois) la même grandeur à deux moments différents, on doit obtenir deux fois (1000 fois) la même valeur.

##### 3.1.5. Plage de mesure

Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur.

La plage de mesure où limites d'utilisation est la gamme des valeurs d'entrée qu'il peut traiter sans dégrader son fonctionnement. Exemple : La Pt100 à base du nickel peut mesurer des températures allant de  $-60^{\circ}\text{C}$  à  $180^{\circ}\text{C}$ . En dehors de cette plage il ne faut pas compter sur le capteur pour la délivrance de mesures correctes.

### 3.1.6. Finesse

C'est une spécification qui permet à l'utilisateur d'estimer l'influence *que la présence du capteur* et de ses liaisons peut avoir sur la valeur du mesurande.

Exemple : Soit une température à mesurer de  $-50^{\circ}\text{C}$ . L'insertion d'un capteur de température peut varier la température du point à mesurer et par conséquent il délivre une fausse mesure. D'où il est nécessaire d'estimer l'effet de l'insertion de ce capteur (dans le milieu pour lequel la température est à mesurer) pour le prendre en compte afin d'en tirer la bonne mesure de température.

### 3.1.7. Etalonnage

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie.

#### 3.1.7.1. Etalonnage simple

Il s'applique à une mesurande défini par une grandeur physique scalaire et à un capteur non sensible ou non soumis à des grandeurs d'influence. Il s'agit en particulier de mesurandes statiques, c'est-à-dire à valeur constante; par exemple: mesure d'une distance fixe à l'aide d'un capteur potentiométrique dont l'indication ne dépend pas de la température.

#### 3.1.7.2. Etalonnage multiple

Lorsque le mesurande à lui seul ne permet pas de définir la réponse du capteur, il faut que soit précisée, par une série d'étalonnages successifs l'influence de chacun des paramètres actifs additionnels. Dans le cas où le capteur est constitué de composants susceptibles de présenter de l'hystérésis, mécanique ou magnétique, la valeur de la grandeur de sortie dépend non seulement de la valeur actuelle du mesurande mais aussi de la suite de ses valeurs antérieures.

#### 3.1.7.3. Validité d'un étalonnage

Il s'agit de l'évaluation de la confiance que l'on peut accorder aux résultats d'un étalonnage lorsque ces résultats sont utilisés ultérieurement. Les résultats peuvent être fournis par un capteur déjà étalonné ou par un autre capteur de la même fabrication.

##### 3.1.7.3.1. Répétabilité

La répétabilité est la qualité du capteur qui assure l'utilisateur de l'identité de la grandeur de sortie, dans les limites spécifiées, chaque fois que ce même capteur est utilisé dans des conditions identiques : même mesurande et mêmes paramètres additionnels.

##### 3.1.7.3.2. Interchangeabilité

L'interchangeabilité d'une série de capteurs d'un même type est la qualité de cette série qui garantit à l'utilisateur des résultats identiques, aux tolérances près, chaque fois qu'un quelconque capteur de cette série est utilisé dans des conditions identiques.

## 3.2. Propriétés dynamiques

### 3.2.1. Rapidité/temps de réponse :

Le temps de réponse  $T_r(\epsilon\%)$  permet de qualifier la rapidité du capteur.  $T_r$  est composé d'un temps de retard à la montée  $\theta$  et d'un temps de montée  $T_m$ . La grandeur d'entrée normalisée  $G_m$  est un échelon et le signal de sortie est  $S_m$ .

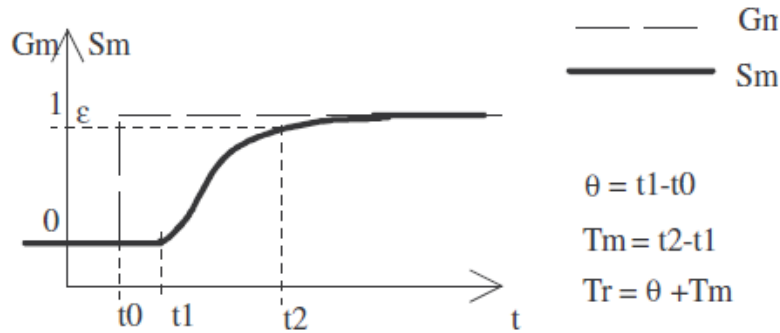


Figure 7. Temps de réponse d'un capteur à une grandeur du type échelon.

**3.2.2. Bande passante :**

La bande passante est la plage de fréquence dans laquelle le capteur fonctionne correctement. Pour déterminer la bande passante d'un capteur donné, une variation périodique de la grandeur physique d'entrée est appliquée. Ensuite une mesure de la sortie associée est effectuée et la sensibilité du capteur en fonction de la fréquence est tracée (sensibilité dynamique).

La bande passante est la plage de fréquence couvrant l'intervalle où la sensibilité du capteur est au dessous de -3 dB.

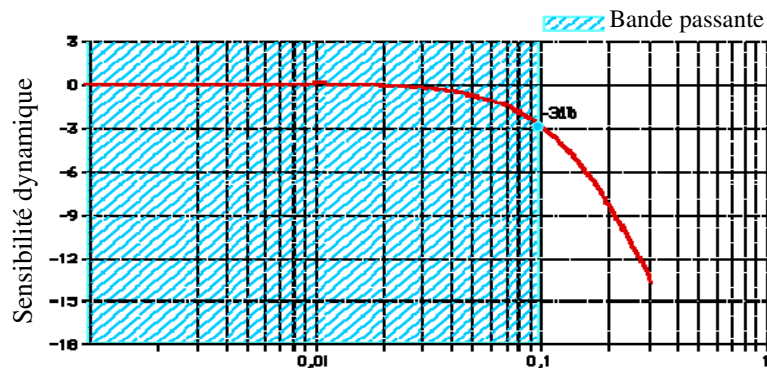


Figure 8. Bande passante de 0.1Hz à -3dB d'un capteur donné.

**4. Structure interne d'un capteur intelligent**

La figure 9 montre la structure de base d'un capteur intelligent. Elle est constituée d'un ensemble de capteurs pour détecter des grandeurs physiques à mesurer  $m_1, m_2, \dots, m_i$  influencées par les grandeurs d'influence  $g_1, g_2, \dots, g_k$ . Une fois collectés par les capteurs, le circuit conditionnement et d'amplification intervient pour les rendre les signaux électriques prêts à être traités. Un convertisseur analogique numérique CAN transforme le signal électrique analogique en format qui peut être traité numériquement. Le signal numérique arrive l'organe de traitement et de calcul qui est composé principalement d'un microprocesseur pour effectuer les traitements et les calculs nécessaires. Via le bus bidirectionnel une communication possible avec le calculateur central afin de prendre une ou plusieurs décisions adéquates à la situation en question et en activant les actionneurs convenables des changements physiques sur le terrain vont être apportés.

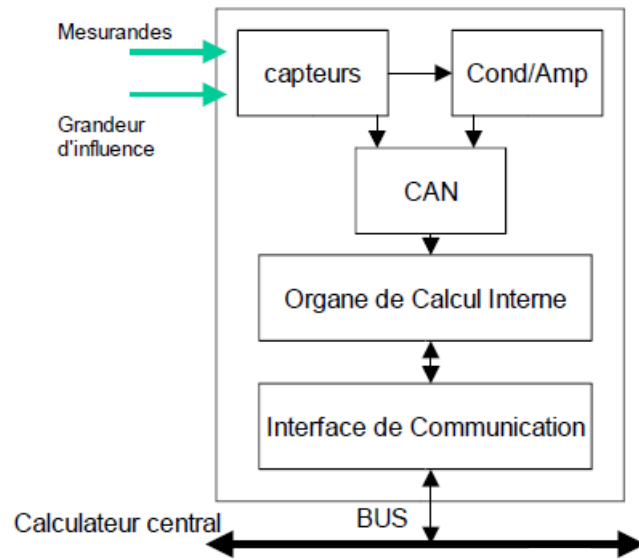


Figure 9. Architecture de base d'un capteur intelligent

Le capteur intelligent peut avoir une structure simple ou une structure complexe.

#### 4.1. Structure simple du capteur intelligent

Ce type de capteur est composé principalement d'un capteur et le circuit compensation de compensation aux grandeurs d'influences associées (exemple : température) et une unité de calcul tel qu'il est représenté dans la figure 10.

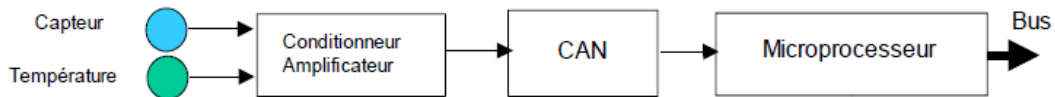


Figure 10. Structure simple d'un capteur intelligent

#### 4.2. Structure complexe du capteur intelligent

Dans ce type de capteur un ajout d'une boucle fermé pour l'ajustement de paramètres tel que le gain d'un amplificateur est essentiel. Cette structure est montrée dans la figure 11.

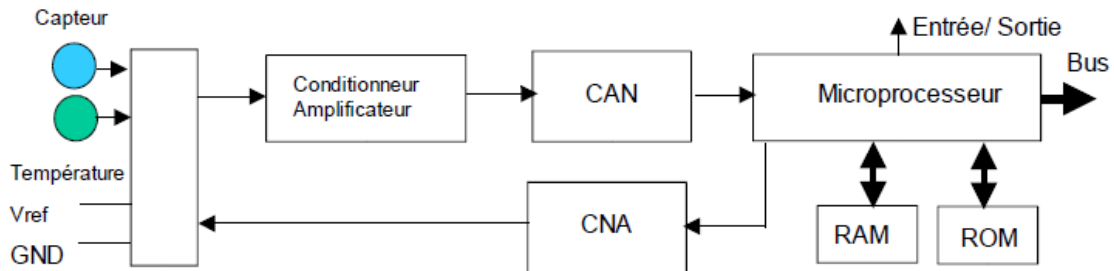


Figure 11. Structure complexe d'un capteur intelligent

*Remarque : Dans l'absence de l'Unité de Traitement et de Calcul UTC de l'architecture du capteur il est automatiquement appelé « capteur classique ». La présence de l'UTC rend le capteur intelligent.*

4.3. Architecture matérielle applicable à la plupart des capteurs intelligents est proposée sur la figure 12.

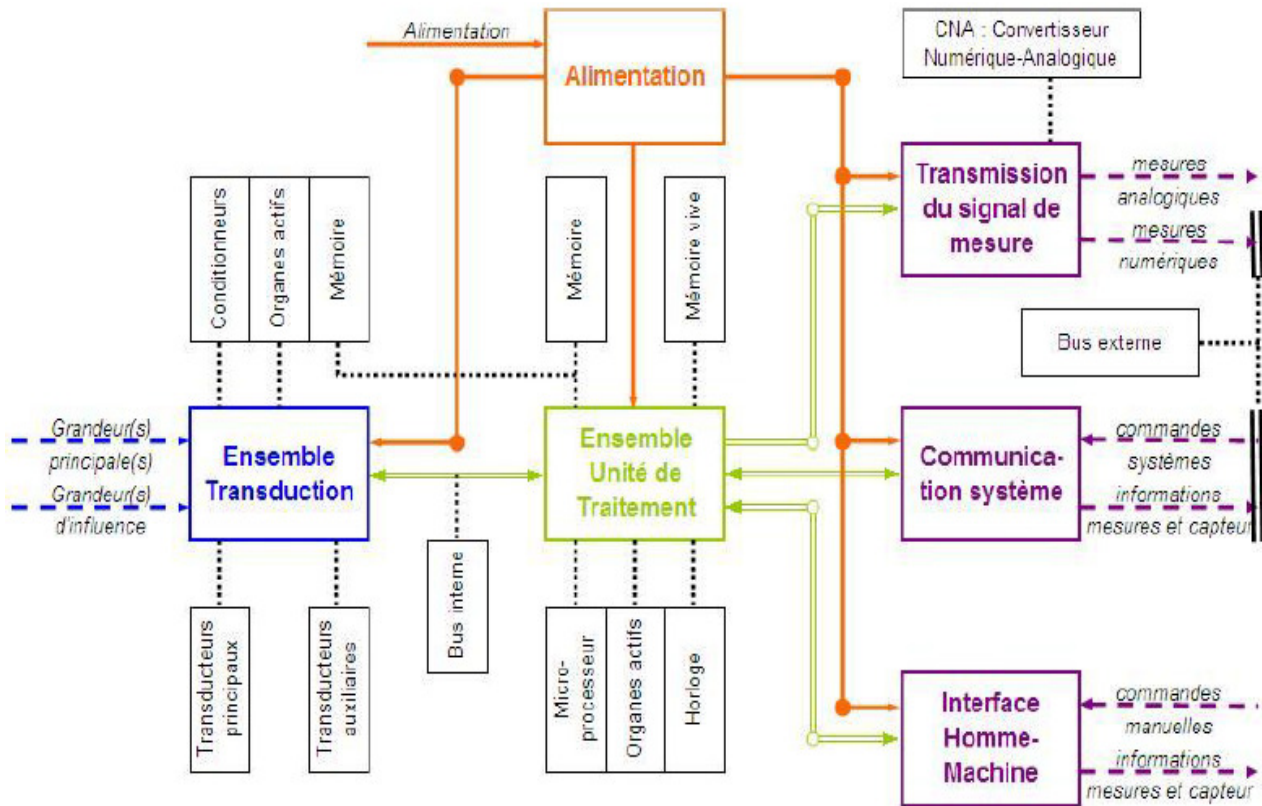


Figure 12. Architecture matérielle d'un capteur intelligent

Ces capteurs intelligents ont de nouvelles fonctionnalités telles que :

- Corrections des erreurs de mesure.
- Auto-ajustage.
- Auto-diagnostique.
- Reconfiguration.
- Communications numériques bidirectionnelles.

Ces fonctionnalités sont schématisées dans la figure 13.



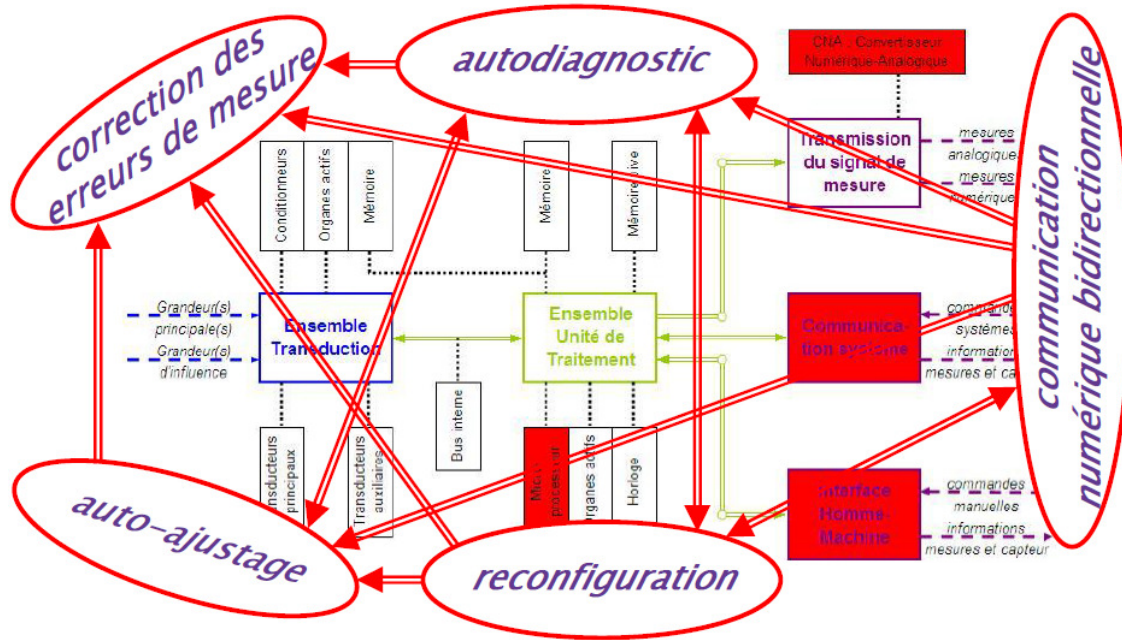


Figure 13 Nouvelles fonctionnalités des capteurs intelligents

**4.4. Circuits de conditionnement,**

Le circuit de conditionnement (conditionneur ou électronique de conditionnement) est l'environnement du capteur qui lui permet de produire le signal numérique qui est une image de la mesure. Les différents éléments de la chaîne doivent être choisis et associés de sorte à satisfaire aux conditions de mesure:

- La résolution.
- La rapidité.
- L'immunité aux parasites et aux grandeurs d'influences.

L'élément de transduction (détecteur) peut générer des signaux de plus ou moins grande amplitude. Si l'élément de transduction génère un signal de sortie variant, par exemple, de 0V à 5V, le circuit de conditionnement (module électronique de conditionnement) est inutile puisque ce signal de sortie est facilement exploitable. Par contre, si l'élément de transduction génère un signal variant de 0mV à 20mV, le circuit de conditionnement est nécessaire, car un signal aussi faible peut-être affecté par le bruit électromagnétique présent en environnement industriel. Un bruit électromagnétique de 1 mV est beaucoup plus nuisible sur un signal de 20 mV que sur un signal de 5 V (5 % d'erreur sur 20 mV vs 0.02 % sur 5 V).

Le module circuit de conditionnement devra donc amplifier les signaux de faibles intensités en provenance de l'élément de transduction. Certains éléments de transduction génèrent simplement des variations d'impédance. Dans ces cas, il faut alimenter ces éléments de transduction avec une alimentation électrique. Cela permet de traduire la variation d'impédance en une variation de courant ou de tension électrique. Ainsi, le module circuit de conditionnement fournira l'alimentation électrique à l'élément de transduction et amplifiera le signal électrique en provenance de ce dernier.

Les types de conditionneurs les plus utilisés sont :

- Le montage potentiométrique qui est l'association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non du même type. C'est un montage simple dont l'inconvénient majeur est sa sensibilité aux parasites.
- Le pont d'impédances dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur et/ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance. C'est donc un double potentiomètre. Le caractère différentiel de la mesure permet de réduire de façon importante l'influence des parasites.
- Le circuit oscillant où est inclus l'impédance du capteur qui fixe la fréquence.
- L'amplificateur opérationnel dont le gain sera déterminé par l'impédance du capteur.

**4.4.1. Principaux types de conditionneurs de capteurs passifs**

Les variations de l'impédance  $Z_c$  d'un capteur passif liées aux évolutions du mesurande sont traduites en signal électrique en associant au capteur une source de tension  $e_i$  ou de courant  $i_i$  et d'autres impédances  $Z_k$  qui constituent le circuit de conditionnement du capteur.

Deux groupes essentiels constituent l'ensemble des conditionneurs passifs :

- L'information transférée est liée aux variations de l'amplitude du signal de mesure :  $V_m = e_i f(Z_k, Z_c)$  ou  $i_m = i_i f(Z_k, Z_c)$ , c'est le cas des montages potentiométriques et des ponts.

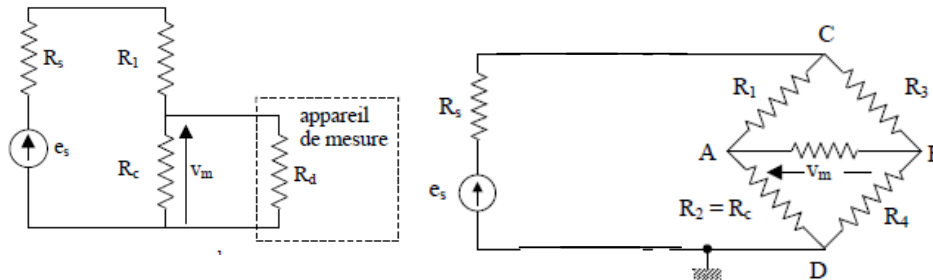


Figure 14. Montage potentiométrique et ponts

- L'information transférée est liée aux variations de la fréquence du signal de mesure ;  $f_m = g(Z_k, Z_c)$ , C'est le cas des oscillateurs qui délivrent un signal dont la fréquence est modulée par l'information collectée du capteur. Le signal électrique issu du conditionneur est caractérisé principalement par deux avantages :
  - Assure une bonne protection contre les parasites.
  - Facilite la conversion de l'information sous forme numérique puisqu'il suffit de compter les périodes.

**4.4.2. Principaux types de conditionneurs de capteurs actifs**

L'information transférée vers la sortie des conditionneurs actifs est liée aux mesurandes qui sont la tension  $v_m$ , le courant  $i_m$  ou la charge  $q_m$ . Dans ce type de circuits de conditionnement, les amplificateurs opérationnels (Ampli-Op ou AO) interviennent en :

- Suiveur ou en suiveurs amplificateurs pour transférer la tension  $v_m$  en son sortie.

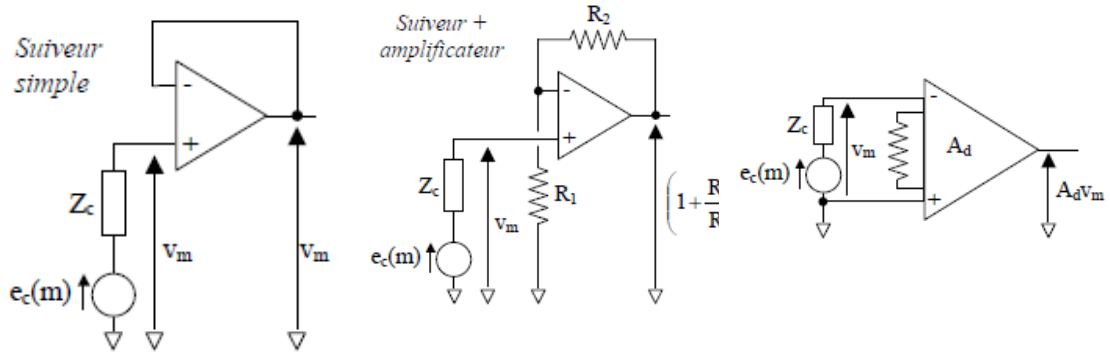


Figure 15. Suiveurs et suiveurs amplificateurs

- Convertisseur courant/tension pour transférer le courant  $i_m$  en son sortie.

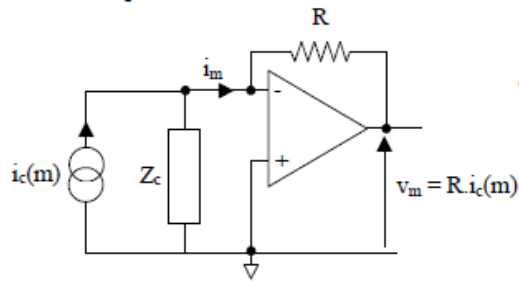


Figure 16. Convertisseur courant/tension

- Amplificateur de charge pour transférer la charge  $q_m$  en son sortie.

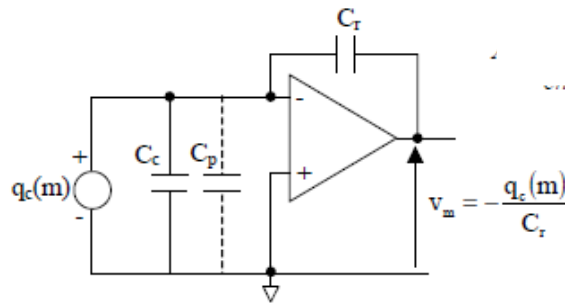


Figure 17. Amplificateur de charge

## 5. Fonctionnalités des capteurs intelligents

Un capteur intelligent n'est qu'un capteur fournissant une mesure et autres services. Les fonctionnalités nécessaires à une instrumentation industrielle sont :

### 5.1 Fonctionnalités Métrologiques

Cette fonctionnalité comprend :

#### 5.1.1. Auto-adaptabilité

L'auto adaptabilité est la capacité du capteur intelligent à s'adapter au signal mesuré.

*Exemples*

- **Amplificateur à gain variable**

Dans cet exemple, le gain de l'amplificateur est variable pour s'adapter au signal mesuré comme le montre la figure 18.

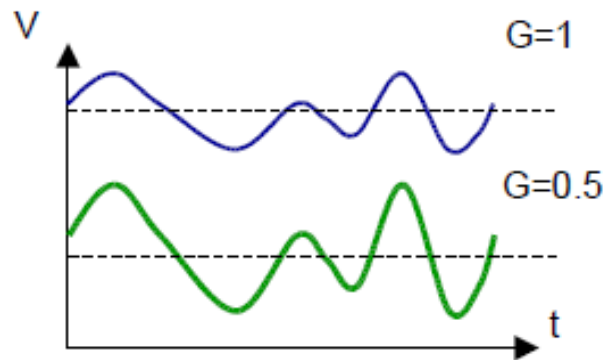


Figure 18 Gain variable d'un amplificateur.

- **Filtre à fréquence de coupure variable**

Dans cet exemple, la fréquence de coupure du filtre varie en fonction de la fréquence du signal mesuré pour détecter entièrement sa bande de fréquence comportant des informations nécessaires du signal mesurés pour un traitement ultérieur.

#### 5.1.2. Remplacement des données manquantes

Une défaillance ponctuelle du capteur implique des données non disponibles à un temps  $t$ . D'où une technique permettant d'estimer les données manquantes à partir des données disponibles est indispensable. Des algorithmes intelligents peuvent faire ce travail.

*Exemple :* une donnée de température qui est en dehors de l'intervalle de fonctionnement du capteur de température est une donnée manquante. Dans cette situation cette donnée doit être remplacée en faisant appel à un algorithme intelligent (algorithme génétique, réseaux de neurones, ...) dont l'apprentissage des données est fait à partir de l'historique des données issues de ce capteur. Par conséquent, les données manquantes sont ou bien en dehors de l'intervalle de fonctionnement du capteur qui signifie en premier ordre un dysfonctionnement du capteur ou des données réellement manquantes dans le cas de l'arrêt définitif du capteur.

### 5.1.3. Précision et validation des mesures

La précision est la prise en compte et la compensation des grandeurs d'influence telles que la température, la pression ...C'est les facteurs externes par rapport à la grandeur à mesurer. Autrement dit cette fonctionnalité permet de récupérer le signal réel mesuré.

La validation des mesures signifie l'évaluation de la qualité de la mesure et la détection de mesures aberrantes (Mesures aberrantes telles que des mesure en dehors de l'intervalle de fonctionnement du capteur, même série de mesures pour une durée de temps,...).

### 5.1.4. Traitement du signal

Mise en place d'un système de traitement de l'information à proximité de la source de données pour le filtrage des résultats pour n'obtenir que l'information utile. L'information inutile peut être l'information une information aberrante à écarter du traitement.

## 5.2. Fonctionnalités de maintenance

Ces fonctionnalités comportent : la configuration distance, l'exploitation, la détection de défaut, et la recherche de diagnostic.

### 5.2.1. Configuration à distance

Dans un capteur intelligent la présence de la communication bidirectionnelle en conjonction avec le traitement numérique des données mènent à une flexibilité instrumentale. D'où la fonctionnalité de configuration à distance est possible.

#### *Exemples*

La transmission d'un fichier d'initialisation ou d'un programme de traitement approprié sont deux exemples de la fonctionnalité « *Configuration à distance* » .

### 5.2.2. Exploitation, détection de défaut, recherche de diagnostic

Après configuration, le système à exploiter est autonome et l'information qu'il transmettera est utile.

- *Surveillance de processus*

La fonctionnalité « surveillance à distance » permet la détection d'anomalie pour ordonner le déclenchement d'une alarme.

- *Détection de défaut, recherche de diagnostic*

Dans cette fonctionnalité la détection de défaut alimente la recherche de diagnostic approprié via l'étude des relations de *cause à effet*, entre l'*anomalie* et sa *cause*.

Analyse statistique : test d'hypothèses, calcul d'estimée et comparaison avec des données réelles

La connaissance des propriétés statistiques du bruit est importante puisqu'elle permet de mieux modéliser les aléas du signal.

## 6. Capteurs intelligents et réseaux

Le capteur intelligent est un dispositif communicant. Il est ainsi important puisqu'il permet :

- La conversation avec l'unité de calcul central et/ou l'organe de supervision.
- Plusieurs fonctionnalités d'être clients du service de communication.
- La transmission de donnée (transfert des mesures, commandes, communication des résultats de traitement du signal)
- La configuration et contrôle à distance ( auto-diagnostic, transfert de fichier de configuration)

Exemple

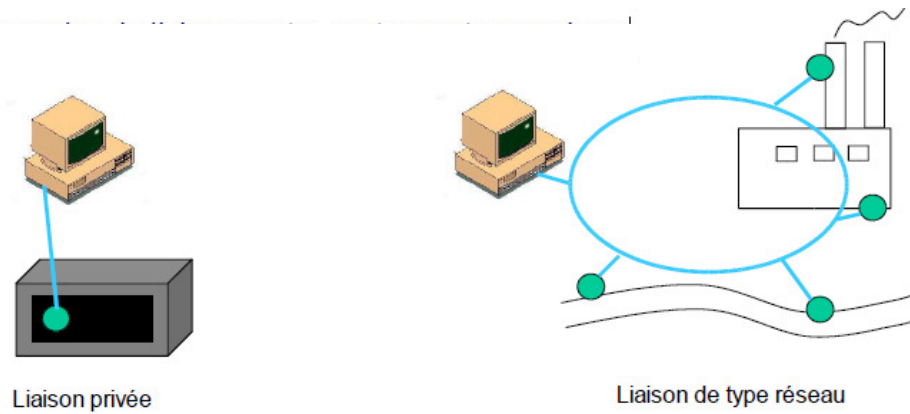


Figure 19 Liaisons entre capteurs et superviseur

- Une fois les semaines allouées à cette partie du chapitre 2 s'approchent d'être épuisées (dans 7 jours), le chargement sur site du dernier chapitre (**chapitre 3**) sera effectué.