



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique**  
**Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi**  
**Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées**  
**Département de Génie Electrique**  
**Année ; Master I /ESE**  
**Matière ; Capteurs intelligents et MEMS**



## **Chapitre2: Capteurs Intelligents**

### **1. Définition et structure interne d'un capteur intelligent:**

Le capteur intelligent correspond principalement à l'intégration dans le corps du capteur d'un organe de calcul interne (microprocesseur, microcontrôleur), d'un système de conditionnement du signal (programmable ou contrôlé) et d'une interface de communication... Plus largement, le concept de capteur intelligent se décompose ainsi:

Un ou plusieurs transducteur(s).

Des conditionneurs spécifiques.

D'une mémoire.

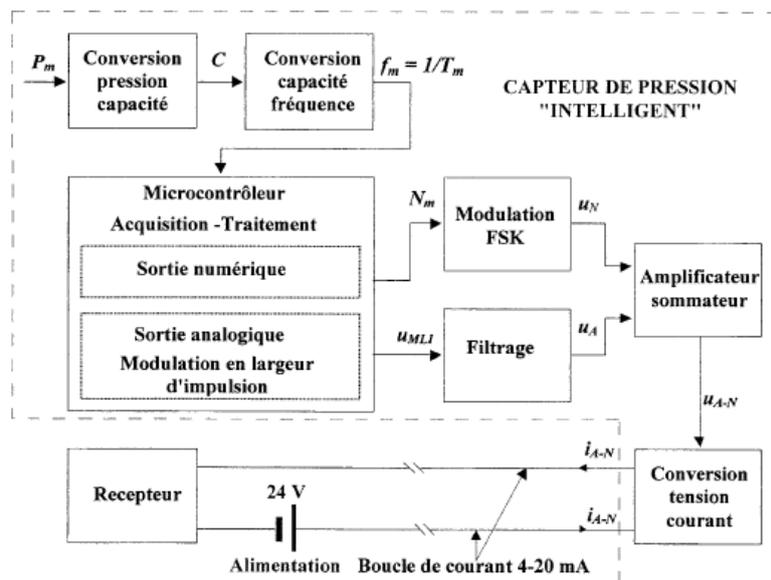
D'une alimentation.

D'un organe intelligent interne permettant un traitement local et l'élaboration d'un signal numérique.

D'une interface de communication.

Deux définitions de capteur intelligent semblent être répandues. La première fait référence à la présence d'un microprocesseur embarqué. Celui-ci peut avoir comme objectif de modifier le comportement interne du capteur afin d'optimiser sa capacité à collecter les données [1,3], ou simplement pour effectuer localement des traitements et des calculs [3]. La seconde définition se focalise sur la capacité de communication bidirectionnelle du capteur, avec des systèmes extérieurs et des opérateurs humains [10]. Le capteur reçoit et traite des commandes extérieures, et envoie des mesures et des informations de statut [7]. En anglais, une différence entre smart sensor (éventuellement traduit en français par futé ) et intelligent sensor a parfois été proposée. L'exploitation d'un micro-processeur embarquée suffirait alors à qualifier un capteur de smart [5,7]. En revanche, c'est sa capacité à participer pleinement au système de contrôle (validation des mesures, diagnostic avancé, reconfiguration dynamique), permis par la communication bidirectionnelle, qui le rendrait, en plus, intelligent [6]. Cette distinction n'est cependant pas universelle [6] et il semblerait que ces deux qualificatifs soient maintenant couramment employés comme synonymes. L'ensemble transduction est composé d'un ou de plusieurs transducteurs utilisés pour générer des signaux électriques représentatifs

des grandeurs principales mesurandes que l'on cherche à observer ; un ou plusieurs transducteurs auxiliaires chargés de surveiller les grandeurs d'influence internes ou externes i.e. grandeurs qui impactent sur les résultats de mesure ou les indications du capteur (température, pression, tension d'alimentation, gaz poisons etc.) ; des conditionneurs de signaux (multiplexeurs, amplificateurs, filtres, convertisseurs analogique- numérique) ; une mémoire pour le stockage de données relatives aux transducteurs (numéro d'identification, grandeur mesurée, caractéristiques métrologiques) utilisées dans les traitements numériques ; des organes actifs comme des commutateurs pour effectuer certaines procédures d'auto-ajustage, d'autodiagnostic ou de reconfiguration. L'ensemble unité de traitement contient les logiciels ; stocke en mémoire les paramètres métrologiques et fonctionnels (avec une datation permise par l'horloge interne) ; assure les traitements des données, les calculs et les fonctionnalités du capteur à l'aide de son microprocesseur. L'unité de traitement commande généralement les autres sous-ensembles. L'ensemble communication intègre plusieurs sous-ensembles. La transmission du signal de mesure peut être analogique (avec un convertisseur numérique-analogique) ou numérique. Des informations de diagnostic, transmises par le sous-ensemble communication système, viennent généralement compléter les résultats. La sortie analogique en 4-20mA, proportionnelle à la grandeur mesurée, est la plus répandue dans l'industrie. Pour y inclure des diagnostics en cas d'erreurs, une plage étendue à 0-24mA est souvent utilisée (par exemple, 0mA pour un problème d'alimentation, 1mA pour des facteurs d'influence hors limites, 24mA lors un dépassement de seuil etc.). La technologie HART [7,9] utilise le câblage standard en 4-20mA comme support à une communication numérique. Les résultats de mesure sont transmis analogiquement et les informations de diagnostic sont superposées numériquement grâce à un codage de fréquences. Le courant porteur en ligne (CPL) peut également être utilisé pour transmettre des informations de diagnostic tout en évitant des câblages supplémentaires [3,7,10].



**Figure1. Structure interne d'un capteur intelligent de pression [3,7]**

## **2. Le capteur intelligent est un dispositif communicant:**

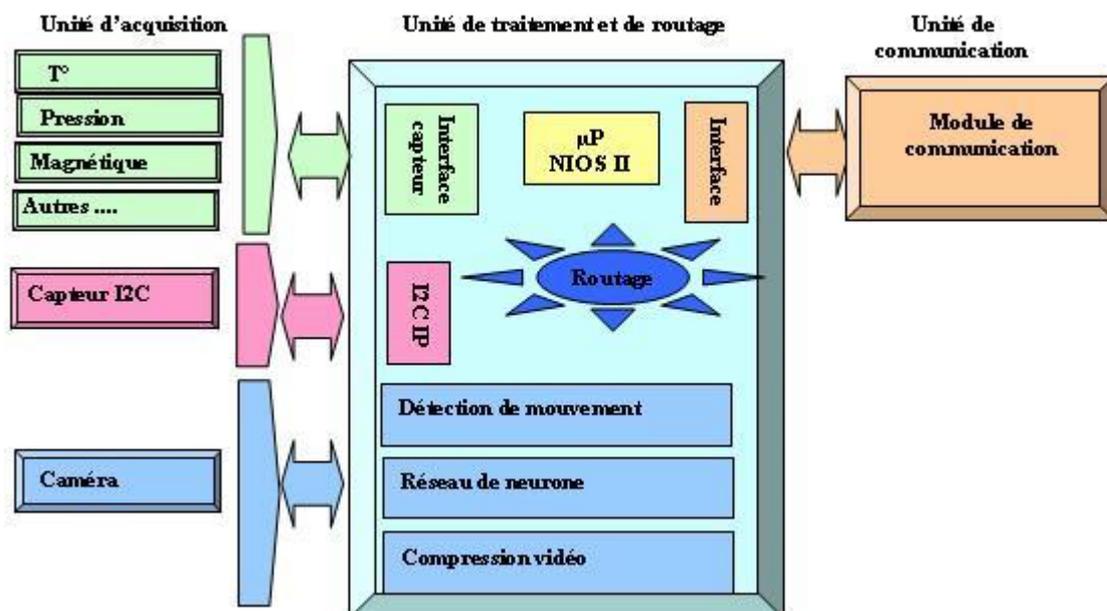
Cette notion de communication constitue probablement l'élément clé du concept de capteur intelligent. Reste que pour qu'un capteur puisse communiquer, il est nécessaire de définir un protocole de communication. Ce dernier réside dans une puce implantée dans chaque capteur et permet aux différents organes d'être compris par toutes les entités du système de communication. Toutefois, aussi paradoxal que cela puisse paraître, il n'existe pas réellement de standard de communication aujourd'hui : les protocoles sont disparates d'un constructeur à l'autre, si bien que les équipements d'origines différentes ne peuvent communiquer [3].

Une (ou plusieurs) voie de mesure, à laquelle est connecté un élément sensible à une grandeur physique à mesurer ; un accéléromètre, une jauge, un thermocouple, un MEMS en sont des exemples ;

pour chaque voie de mesure, un étage qui met en forme l'information analogique (électrique, optique, mécanique) du senseur et la convertit en une information numérique (octets, niveaux logiques) ;

un processeur dont la fonction minimale est d'acquérir les données issues de chaque voie de mesure; ce processeur a une capacité d'intégrer et d'exécuter des algorithmes métier, voire d'héberger un système d'exploitation; ce peut être, selon le cas, un simple microcontrôleur 8 bits ou un processeur dédié au traitement de signal tel un Digital Signal Processor (DSP); dans certains cas, le processeur assure également une gestion évoluée de l'énergie électrique dont dispose le capteur ; éventuellement une capacité de mémorisation externe au processeur lorsque sa mémoire interne ne suffit pas à répondre au besoin de stockage des données et des programmes; les mémoires RAM ou FLASH en sont des exemples; un étage de communication permettant au processeur de dialoguer avec le système de supervision, voire avec d'autres capteurs; cette communication peut être filaire (liaison série point à point de type RS232, Bus série de type RS485, Ethernet ; etc.) ou sans-fil (Wifi, Zigbee, Bluetooth, ISM, etc.) [3,5,7,8].

La figure 2 représente le synoptique d'un capteur intelligent complet de plusieurs grandeurs physiques avec une module de communication avec l'environnement extérieur.



**Figure2. Schéma synoptique d'un capteur intelligent avec unité de communication [3]**

### **3.1. Auto-adaptabilité:**

Capacité du capteur intelligent à s'adapter au signal mesuré.

#### Exemples:

Amplificateur à gain variable.

Filtre à fréquence de coupure variable.

### **3.2. Remplacement des données manquantes:**

Défaillance ponctuelle du capteur => données non disponible à un temps t.

Technique permettant d'estimer les données manquantes à partir des données disponibles.

### **3.3. Précision et validation des mesures:**

Précision => prise en compte et compensation des grandeurs d'influence (température, pression ...).

Validation des mesures => évaluation de la qualité de la mesure, détection de mesures aberrantes.

### **3.4. Traitement du signal:**

Mise en place à proximité de la source de données d'un système de traitement de l'information  
=> Filtrage des résultats pour n'obtenir que l'information utile.

### **3.5. Fonctionnalités de maintenance:**

#### **3.5.1. Configuration à distance:**

Communication bidirectionnelle + traitement numérique des données => flexibilité instrumentale.

Transmission d'un fichier d'initialisation ou d'un programme de traitement approprié [3,7].

#### **3.5.2. Exploitation, détection de défaut, recherche de diagnostic:**

Après configuration, le système est autonome avec transmission de l'information utile.

#### **3.5.3. Surveillance de processus:**

Détection d'anomalie => déclenchement d'une alarme.

#### **3.5.4. Détection de défaut, recherche de diagnostic:**

Étude des relations de cause à effet, entre l'anomalie et sa cause.

#### **3.5.5. 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.

### **3.6. Auto-diagnostic des capteurs :**

Capacité d'un capteur à effectuer l'évaluation de son état de fonctionnement et de diagnostiquer l'élément éventuellement en dysfonctionnement.

Difficile, car il faudrait appliquer au capteur une grandeur physique d'amplitude connue [7,8].

#### **Questions:**

- La grandeur mesurée est-elle comprise dans l'étendue de mesure?
- La grandeur mesurée est-elle compatible avec l'historique?
- La rapidité de variation de la grandeur mesurée est-elle raisonnable?
- Est-ce que la grandeur mesurée fluctue?

**Solution simple:** Duplication ou Triplification des capteurs [3].

## **4. Structure de software:**

### **4.1. Langages:**

Dans la plupart des cas, on utilise le langage machine propre au micro-processeur (Texas, Motorola...), sinon on utilise le C.

Avantages du langage machine : optimisation en vitesse et en mémoire.

Avantages du C : Langage généraliste, code portable [1,3].

### **4.2. Mode de traitement des données:**

- Bloc : attente d'un certain nombre de données avant de lancer un traitement
- Flux : traitement des données à l'arrivée de chaque donnée [3].

### **4.3. Exemple d'applications classiques:**

Exemple : moyenne statistique sur les 100 dernières valeurs.

Exemple : test de validité des données.

- Transformée de Fourier.
- Filtrage avec étude de l'onde de forme (classification, reconnaissance) [3,8].

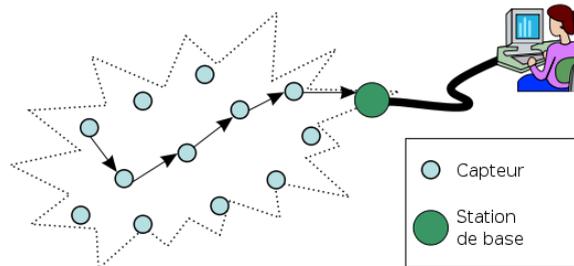
## **5. Réseaux de capteurs:**

Les besoins des structures en instrumentation massive et diversifiée incitent le concepteur à développer des systèmes dont les nœuds (les capteurs) peuvent être organisés en de multiples topologies, c'est-à-dire selon des configurations qui permettent à l'utilisateur de faire correspondre physiquement l'instrumentation déployée sur le terrain à la vision logique qu'il en a depuis la supervision [3].

Le développement des capteurs intelligents et des capteurs sans-fil répond tout naturellement à ce besoin en étendant à l'infini le champ des topologies possibles. En effet, la déconnexion physique inhérente au sans-fil permet a priori à chaque capteur de communiquer avec tout autre capteur présent dans sa sphère d'influence radio. Par ailleurs, un capteur intelligent est

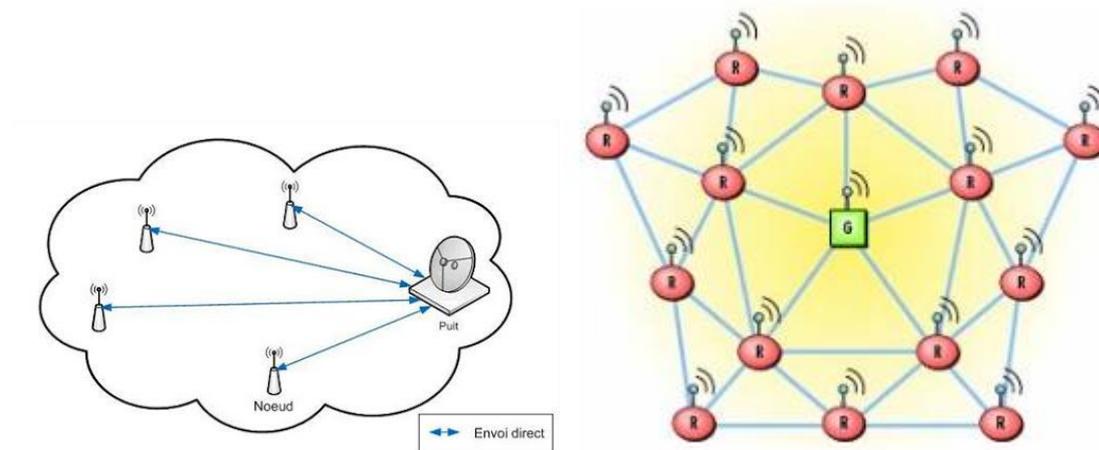
systématiquement un capteur identifié ou identifiable, de sorte que, si l'on associe les données captées à la source à l'identifiant du capteur, les octets peuvent transiter par n'importe quel chemin du réseau sans que les données perdent la mémoire de leur origine.

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau ad hoc avec un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée «champ de captage » correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté (Figure3) [3,7,10].



**Figure3. Réseau de capteurs ad hoc [7]**

On va présenter ici deux topologies de réseaux de capteurs intelligents présentées en figures suivantes:



**Figure4. Exemples de réseaux de capteurs intelligents [3,7]**

## **6. Conclusions:**

Le développement et l'utilisation de capteur intelligent est en plein essor.

=>développements d'application.

=>miniaturisation et augmentation de la puissance des composants.

électroniques (déportation du module de traitement du signal).

=>Communication haut débit et évolué (réseaux de terrain).

Intégration de capteurs intelligents dans les systèmes d'information [3].

## **Références bibliographiques:**

1. Lin, Y.-L., Kyung, C.-M., Yasuura, H., Liu, Y., Smart Sensors and Systems.
2. Ian R. Sintclair, Sensors and transducers, Newnes, 2001.
3. M. Bayart, B. Conrard, A. Chovin, M. Robert, Capteurs et actionneurs intelligents, 2005.
4. Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim, Microsensors, MEMS, and Smart Devices Hardcover, 2001.
5. Randy Frank, Understanding Smart Sensors, 2nd ed. Edition, Artech House.
6. Vijay K. Varadan, K. J. Vinoy, S. Gopalakrishnan, Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies.
7. G. Amendola, P. Poulichet, L. Sevely, L. Valbin, Les capteurs MEMS, principes de fonctionnement, Techniques de l'Ingénieur.
8. G. Amendola, P. Poulichet, L. Sevely, L. Valbin, Capteurs MEMS, techniques de mesure, Techniques de l'Ingénieur.
9. Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Craft, Neil White, MEMS Mechanical Sensors, Artech House, 2000.
10. K. J. Vinoy, G. K. Ananthasuresh, RudraPratap, S. B. Krupanidhi, Micro and Smart Devices and Systems.

