

Cours : Introduction aux capteurs intelligents et à l'instrumentation industrielle

Conference 3 : Architectures des capteurs intelligents Durée : 90 minutes

Prof. Abdelmalek Bouhadjera

1. Accueil et récapitulatif de la semaine 2

Bienvenue à cette troisième séance.

Lors de la semaine 2, nous avons posé une base solide en explorant les principes fondamentaux du fonctionnement des capteurs et les paramètres critiques utilisés pour évaluer leurs performances. Nous avons étudié les principes de transduction appliqués à la température, à la pression, au débit et au déplacement, et discuté de l'importance des courbes d'étalonnage, de la précision et de la résolution.

Cette semaine, nous franchissons une étape essentielle : **comment construire de l'intelligence autour d'un élément sensible de base ?**

Nous passerons de la compréhension d'un transducteur simple à la conception d'un système complet de capteur intelligent. Nous allons décomposer le capteur intelligent en ses **blocs fonctionnels fondamentaux**, et introduire une norme clé — **l'IEEE 1451** — qui vise à rendre ces dispositifs *plug-and-play* (prêts à l'emploi).

2. Concept fondamental : du composant « muet » au nœud intelligent

Souvenez-vous de la chaîne de mesure traditionnelle présentée au premier cours :
Élément sensible → Conditionneur de signal séparé → Convertisseur analogique-numérique (CAN) séparé → Contrôleur séparé

Cette approche est lourde et peu flexible.

Un **capteur intelligent** intègre tous ces composants au sein d'un même dispositif cohérent. Le changement fondamental est le passage d'un simple composant fournissant un signal brut à un **nœud intelligent** capable de délivrer des informations fiables et exploitables sur un réseau.

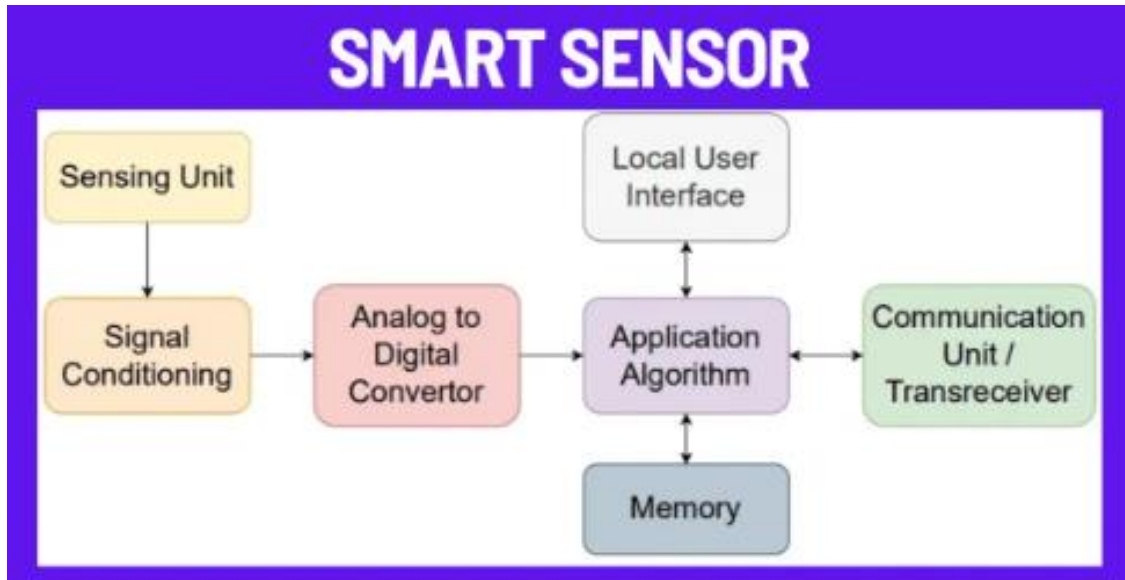
Le mot « **intelligent** » dans *capteur intelligent* implique :

- **Intégration** : plusieurs fonctions réunies dans un seul boîtier.
 - **Communication** : capacité à dialoguer numériquement avec un réseau.
 - **Traitement** : aptitude à manipuler et interpréter les données localement.
 - **Auto-surveillance** : capacité à suivre son propre état de santé et ses performances.
-

3. Anatomie d'un capteur intelligent : décomposition des blocs fonctionnels

Tout capteur intelligent — du simple nœud IoT de température au débitmètre Coriolis complexe — peut être décomposé en **cinq blocs fonctionnels clés**.

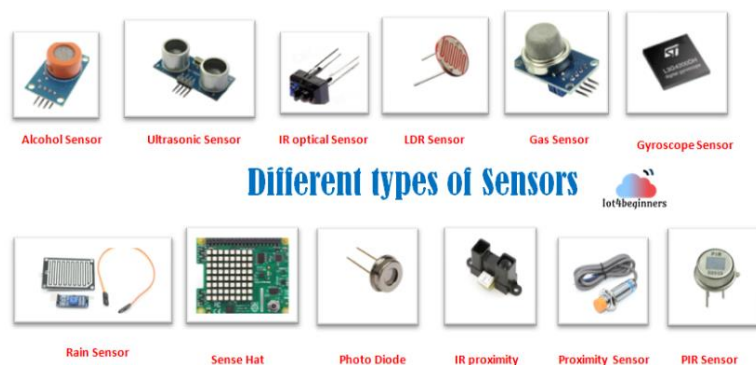
Comprendre cette architecture est essentiel pour concevoir, choisir et utiliser efficacement des capteurs intelligents.



Chaîne du signal :

Grandeur physique → [Élément sensible] → [Conditionnement du signal] → [Convertisseur A/N] → [Microprocesseur] → [Interface de communication] → Réseau

3.1. Bloc 1 : L'élément sensible



Fonction : C'est le transducteur proprement dit — la partie étudiée la semaine dernière. Il convertit une grandeur physique (pression, température, etc.) en un signal électrique (variation de résistance, de capacité, ou de tension).

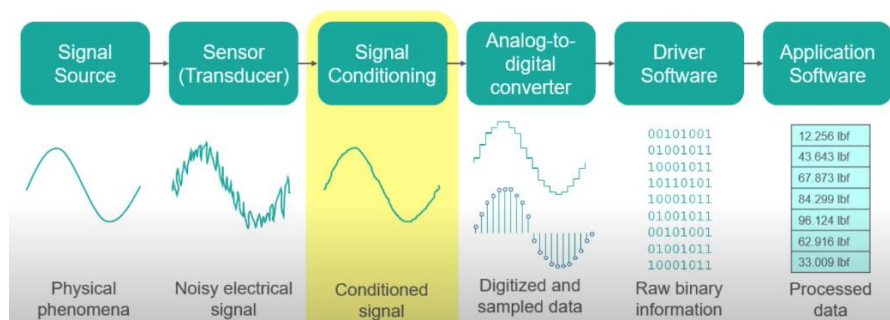
Exemples : le fil de RTD, la jauge de contrainte sur une membrane, la plaque capacitive MEMS, la jonction de thermocouple.

Remarque : Cet élément est la « première ligne ». Sa qualité et ses caractéristiques intrinsèques (non-linéarité, sensibilité aux conditions ambiantes) fixent la limite ultime de performance du système.

Le dicton « *Garbage In, Garbage Out* » reste vrai : aucune intelligence numérique ne peut compenser un élément sensible de mauvaise qualité.

Les blocs suivants ont pour mission de **préserver et améliorer** fidèlement le signal provenant de ce premier maillon.

3.2. Bloc 2 : Le conditionnement du signal



Fonction : Nettoyer, amplifier et préparer le signal brut, souvent faible et bruité, pour une conversion numérique précise.

Opérations clés :

- **Amplification :**
Les signaux de nombreux capteurs (thermocouples, jauges de contrainte) sont de l'ordre du millivolt.
Un amplificateur de précision — souvent un **amplificateur d'instrumentation** — augmente ce signal jusqu'à quelques volts (ex. 0–5 V), améliorant ainsi le rapport signal/bruit et la résistance aux interférences.
- **Filtrage :**
Les environnements industriels sont bruyants électriquement.
Des filtres, notamment **passe-bas**, éliminent les composantes de haute fréquence parasites tout en laissant passer le signal utile.
- **Isolation :**
Protège les circuits sensibles et les opérateurs contre les tensions élevées ou les boucles de masse.
L'isolation est souvent assurée par des **opto-coupleurs** ou **transformateurs**, permettant au signal de passer sans transmettre les tensions dangereuses.

Remarque : Ce bloc est le héros discret de la précision du capteur.

Un bon conditionneur garantit que le convertisseur A/N reçoit une version propre et fidèle du signal physique.

3.3. Bloc 3 : Le convertisseur analogique-numérique (CAN / ADC)

Fonction : Faire le pont entre le monde analogique et le monde numérique.

Il transforme la tension analogique conditionnée en une valeur numérique discrète (une suite de 1 et de 0) que le microprocesseur peut interpréter.

Paramètres clés :

- **Résolution :** Définie par le nombre de bits (12, 16, 24 bits, etc.).
Un CAN 12 bits peut coder $2^{12} = 4096$ niveaux distincts ; un 16 bits, 65 536 niveaux.
Plus la résolution est élevée, plus le capteur peut détecter de petites variations du signal.
- **Fréquence d'échantillonnage :** Nombre d'échantillons par seconde (SPS).
Doit être suffisante pour capter correctement les variations rapides du signal, selon le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon.

Remarque : La résolution du CAN doit être adaptée à la qualité et au bruit du signal issu du capteur.

Un CAN 24 bits n'apporte rien si le signal d'entrée est bruité — on numériserait le bruit avec une grande précision !

3.4. Bloc 4 : Le microprocesseur (µC / MCU)

Fonction : C'est le *cerveau* qui confère l'intelligence au capteur.

Il transforme les données numériques brutes en informations exploitables.

Fonctions intelligentes principales :

- **Linéarisation et compensation numériques :**
Le microprocesseur corrige la non-linéarité et l'hystérésis du capteur à l'aide d'algorithmes ou de tables de calibration.
Il peut aussi compenser les sensibilités croisées (ex. corriger la pression en fonction de la température ambiante).
- **Conversion d'unités :**
Transforme le nombre numérique brut en unité d'ingénierie significative (°C, bar, m³/h...).
- **Filtrage et moyennage numériques :**
Applique des algorithmes de lissage des données.
- **Auto-diagnostic et surveillance de santé :**
Détection des dérives, circuits ouverts/courts, erreurs internes, avec génération d'alertes.
- **Prise de décision locale :**
Comparaison à des seuils, déclenchement d'alarmes, voire exécution d'un contrôle simple.

Remarque : C'est ce bloc qui fait réellement d'un capteur un **capteur intelligent**, en transformant des données brutes en **informations contextualisées et fiables**.

3.5. Bloc 5 : Interface de communication



Fonction : Transmettre les données traitées et recevoir les commandes ou configurations du réseau ou du contrôleur hôte.

Types d'interfaces :

- **Protocoles filaires de terrain (Fieldbus) :** PROFIBUS, Modbus, CAN bus — réseaux robustes à longue portée pour l'automatisation industrielle.
- **Protocoles point-à-point filaires :** HART (signal numérique superposé à la boucle 4–20 mA), IO-Link (standard simple et économique pour capteurs et actionneurs).
- **Bus internes courte distance :** I²C, SPI — utilisés à l'intérieur du capteur (communication entre puce MEMS, CAN, et microcontrôleur).
- **Protocoles sans fil :** Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN — essentiels pour les applications IIoT où le câblage est difficile.

Remarque : Ce bloc définit la manière dont le capteur intelligent s'intègre dans un système global.

Le choix du protocole dépend de la vitesse, de la portée, de la consommation énergétique, du coût et de l'infrastructure existante.

4. La norme IEEE 1451 : un cadre pour l'interopérabilité

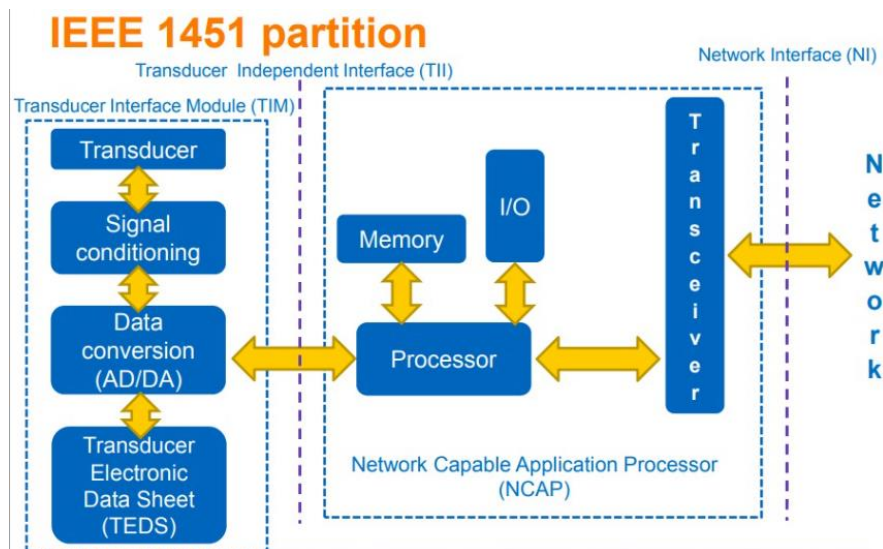
4.1. Le problème : l'absence de plug-and-play

Imaginons un système de contrôle qui doit intégrer un capteur de pression (fournisseur A), un capteur de température (fournisseur B) et un débitmètre (fournisseur C).

Sans standard commun, chaque appareil utilise son propre protocole : il faut des pilotes spécifiques, des logiciels de configuration dédiés, et beaucoup de temps d'ingénierie — coûteux et complexe à maintenir.

4.2. La solution : un langage commun pour les transducteurs

La famille de normes **IEEE 1451** a été créée pour résoudre ce problème en rendant les transducteurs intelligents (capteurs et actionneurs) **plug-and-play**. Son principe central est de **séparer les fonctions du transducteur intelligent de la technologie réseau**.



4.3. L'innovation clé : la fiche de données électronique du transducteur (TEDS)

Définition : une petite mémoire normalisée (EEPROM) intégrée au capteur intelligent. Elle contient la « fiche technique numérique » du capteur, comprenant :

- **Données d'identification :** fabricant, modèle, numéro de série.
- **Données d'étalonnage :** coefficients, date d'étalonnage.
- **Données de performance :** plage, sensibilité, unités, précision, fréquence d'échantillonnage.
- **Données de compensation :** algorithmes ou coefficients de linéarisation et de correction thermique.

Remarque : Lorsqu'un capteur conforme à IEEE 1451 est connecté à un réseau compatible, le contrôleur lit automatiquement la TEDS et reconnaît instantanément le dispositif — éliminant les erreurs de configuration manuelle et réduisant considérablement le temps de mise en service.

4.4. L'architecture : STIM, NCAP et TII

La norme définit une architecture modulaire :

- **STIM (Smart Transducer Interface Module) :** côté capteur. Contient l'élément sensible, le conditionnement du signal, le CAN et la TEDS.
- **NCAP (Network Capable Application Processor) :** côté réseau. Dialogue avec le STIM d'un côté et le réseau industriel (Ethernet, Wi-Fi, PROFIBUS, etc.) de l'autre.
- **TII (Transducer Independent Interface) :** interface numérique standardisée reliant le STIM et le NCAP (connecteurs, broches et protocole définis).

Vue d'ensemble : Cette séparation permet à un fabricant de développer un STIM unique adaptable à divers réseaux grâce à des modules NCAP interchangeables.
Résultat : **interopérabilité, flexibilité et réduction des coûts.**

5. Exercice en classe : concevoir votre propre capteur intelligent

Objectif : Appliquer les connaissances acquises pour concevoir un schéma fonctionnel de capteur intelligent.

Scénario :

Votre équipe doit concevoir un **transmetteur de pression intelligent industriel** mesurant de 0 à 100 psi, offrant une sortie numérique et des fonctions avancées de maintenance.

Tâches :

Concevez un **diagramme fonctionnel détaillé** comprenant les cinq blocs suivants :

1. **Élément sensible :** principe utilisé (ex. jauge de contrainte, capacitif).
2. **Conditionnement du signal :** au moins deux fonctions précises à indiquer.
3. **CAN :** résolution proposée (12 bits, 16 bits...) avec justification.
4. **Microprocesseur :** au moins deux fonctions « intelligentes » (ex. compensation, diagnostic).
5. **Interface de communication :** protocole numérique choisi (Modbus, IO-Link, WirelessHART...).

Défi supplémentaire :

Indiquez sur le schéma où se situe la mémoire TEDS et les informations qu'elle doit contenir.

Questions de discussion :

- Comment votre conception réduit-elle le coût global de possession par rapport à un capteur de pression traditionnel ?
 - Quelle fonction « intelligente » de votre microprocesseur apporte le plus de valeur en maintenance prédictive ?
-

6. Lecture et préparation pour la semaine prochaine

Lecture recommandée :

Consultez la présentation en ligne de la famille de normes **IEEE 1451** (lien disponible sur le portail du cours).

Concentrez-vous sur la compréhension des concepts de **STIM** et **TEDS**.

Sujet de la prochaine séance :

Conditionnement et traitement du signal : le pont électronique.

Maintenant que nous comprenons l'architecture globale, nous approfondirons le **bloc 2 (conditionnement du signal)** : circuits amplificateurs à amplificateurs opérationnels, filtrage, et processus de conversion analogique-numérique.

Réflexion préparatoire :

Dans votre conception du capteur de pression, quel type d'amplificateur serait le plus approprié pour un pont de jauges de contrainte, et pourquoi ?

Quelle serait la principale source de bruit électrique à filtrer ?