

Cours : Introduction aux Capteurs Intelligents et à l'Instrumentation Industrielle

Leçon 5 : Communication & Réseaux

Durée du cours : 90 minutes

Prof. Abdelmalek Bouhadjera

1. Accueil & Rappel de la Semaine 4

Bienvenue à notre cinquième cours. La semaine dernière, nous avons étudié les éléments essentiels du **conditionnement et du traitement du signal**. Nous avons vu comment l'amplification, le filtrage et la conversion analogique-numérique transforment un signal capteur brut, faible et bruité en une valeur numérique propre, robuste et prête à être traitée intelligemment. Tout cela se passe à **l'intérieur de l'architecture du capteur intelligent**.

Cette semaine, nous abordons l'étape suivante : **comment ces données numériques sortent du capteur** pour rejoindre le reste du système.

Nous explorerons les protocoles de communication et normes de réseau qui permettent aux capteurs intelligents de s'intégrer dans des systèmes de contrôle, des SCADA, et dans l'Internet Industriel des Objets (IIoT).

Le choix de la méthode de communication est une décision fondamentale qui impacte le coût, la performance et l'architecture d'un système d'automatisation entier.

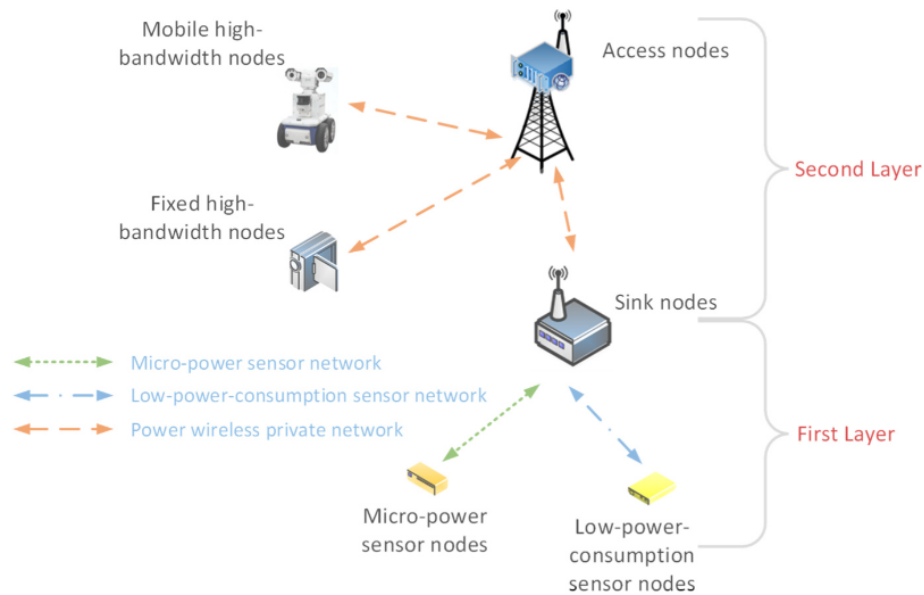
2. Concept Fondamental : Le Réseau comme Squelette du Système

Dans les systèmes analogiques traditionnels 4-20 mA, chaque capteur disposait d'une paire de fils dédiée jusqu'au contrôleur — une architecture point-à-point. Simple, mais extrêmement coûteuse et complexe lorsqu'on doit gérer des centaines ou milliers de capteurs.

Les capteurs intelligents utilisent des **réseaux de communication** : plusieurs capteurs peuvent partager un même câble ou canal sans fil, réduisant drastiquement câblage et complexité.

Le réseau devient alors **le système nerveux digital de l'usine** : les capteurs jouent le rôle des sens, les contrôleurs celui du cerveau, et les actionneurs celui des muscles.

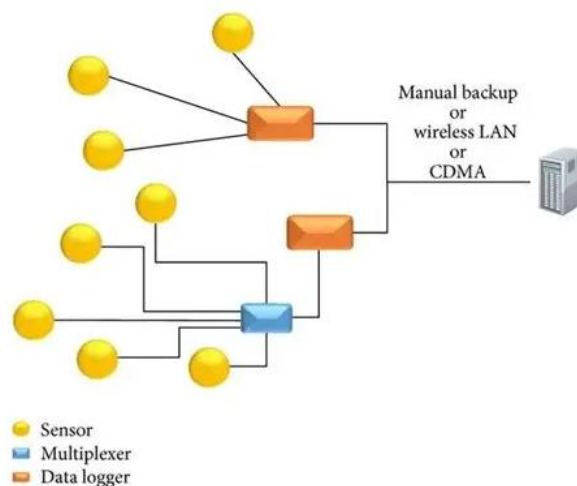
3. La Pile de Communication : Une Approche en Couches



Pour gérer la complexité, les ingénieurs utilisent un modèle en couches, comme l'OSI. Ici, nous adoptons une version simplifiée à trois niveaux :

1. **Couche Physique** : matériel – fils, connecteurs, niveaux électriques, radiofréquences.
2. **Couche Liaison de Données** : règles d'accès au média, structure des trames, détection d'erreurs.
3. **Couche Application** : signification des données (« lire la pression », « identité du dispositif », « définir une limite d'alarme »).

4. Le Paysage des Protocoles Filaire



Les protocoles filaires sont la base de l'automatisation industrielle : fiables, rapides et robustes. Ils se classent selon leur niveau d'application et leur topologie.

4.1. Bus de Niveau Dispositif (courte portée, puce-à-puce)

Utilisés à l'intérieur d'un appareil ou pour connecter des capteurs simples à une passerelle locale.

- **I²C (Inter-Integrated Circuit)**

- **Principe** : bus série à deux fils (données + horloge), architecture maître-esclave.
- **Avantages** : coût faible, simplicité, largement utilisé pour connecter microcontrôleurs à mémoires, ADC, petits capteurs.
- **Inconvénients** : faible vitesse, distance limitée, pas de vérification d'erreur.

- **SPI (Serial Peripheral Interface)**

- **Principe** : bus à quatre fils (data in, data out, horloge, sélection de puce).
 - **Avantages** : très haute vitesse, matériel simple, idéal pour cartes SD, écrans, capteurs MEMS rapides.
 - **Inconvénients** : nécessite plus de fils (une ligne CS par esclave), pas d'adressage natif.
-

4.2. Fieldbus (Capteurs au Niveau Usine → Contrôleurs)

Conçus pour connecter des dizaines ou centaines de capteurs/actionneurs à un PLC ou DCS.

- **Modbus**

- **Principe** : protocole application simple, ouvert, très répandu. Fonctionne via RS-485 ou TCP/IP.
- **Avantages** : standard ouvert, universel, facile à implémenter.
- **Inconvénients** : pas de sécurité intégrée, pas de découverte automatique.

- **PROFIBUS**

- **Principe** : standard allemand robuste et haut débit (IEC 61158).
- **Avantages** : vitesse élevée, déterministe, très complet.
- **Inconvénients** : plus complexe, coût plus élevé, outils propriétaires.

- **Bus CAN (Controller Area Network)**

- **Principe** : bus très robuste, multi-maître, orienté message (automobile à l'origine).
- **Avantages** : excellente détection d'erreur, faible coût, très fiable.
- **Inconvénients** : débit inférieur aux systèmes basés Ethernet.

- **IO-Link**

- **Principe** : communication point-à-point pour capteurs/actionneurs simples.
 - **Avantages** :
 - Utilise le câblage standard 3 fils,
 - Transmet valeurs, paramètres, diagnostics,
 - Simplifie le câblage en éliminant cartes I/O analogiques.
 - **Note** : IO-Link est un pont vers des réseaux supérieurs comme PROFINET ou EtherNet/IP.
-

4.3. Le Hybride : HART (Highway Addressable Remote Transducer)

- **Principe** : superpose un signal digital sur le courant analogique 4-20 mA.
 - **Fonctionnement** :
 - 4-20 mA → variable de procédé en temps réel
 - signal digital → configuration, calibration, diagnostics
 - **Avantage clé** : migration douce vers les capteurs intelligents sans changer l'infrastructure existante.
-

5. La Révolution Sans Fil



Élimine totalement les câbles, idéale pour installations éloignées ou mobiles.
Compromis : fiabilité, consommation d'énergie, latence.

- **Zigbee**

- Réseau maillé basse consommation (IEEE 802.15.4).
- **Avantages** : très faible consommation, maillage auto-réparant.
- **Inconvénients** : faible débit, portée courte par nœud.
- **Applications** : bâtiments, réseaux de capteurs peu fréquents.

- **LoRaWAN**

- Longue portée, basse consommation.
- Avantages : portée de plusieurs kilomètres, très faible énergie.
- Inconvénients : très faible débit, pas pour le temps réel.
- Applications : agriculture, villes intelligentes, suivi d'actifs.

- **WirelessHART**

- Version sans fil de HART, réseau maillé robuste 2,4 GHz.
- Avantages : très fiable, sécurisé, basé sur un standard éprouvé.
- Inconvénients : débit limité.
- Applications : industries de procédé (pétrole, chimie).

- **Wi-Fi & Bluetooth**

- **Wi-Fi** : haut débit, forte consommation.
- **Bluetooth LE** : faible énergie, débit modéré.

6. Exercice en Classe : Associer Protocole & Application

Objectif : sélectionner le protocole le plus adapté à chaque scénario.

Liste de Protocoles : I²C, SPI, Modbus RTU (RS-485), PROFIBUS, IO-Link, HART, WirelessHART, LoRaWAN.

Scénarios :

1. **Ligne d'emballage haute vitesse** :
50 capteurs de proximité → haute fiabilité, temps déterministe, 20 m → ?
2. **Monitoring de réservoirs distants** :
10 réservoirs à plusieurs km, données 1 fois/heure, alimentation solaire → ?
3. **Retrofit d'une raffinerie** :
Transmetteur 4-20 mA existant → doit devenir intelligent sans changer le câblage → ?
4. **Conception d'un circuit imprimé** :
MEMS accéléromètre → communication très haut débit avec microcontrôleur sur la même carte → ?

Questions de discussion :

- Pour le Scénario 1, pourquoi ne pas choisir WirelessHART ou LoRaWAN ?
 - Pour le Scénario 3, quelle caractéristique clé de HART en fait le seul choix possible ?
-

7. Lecture & Préparation pour la Semaine Prochaine

- **Lecture recommandée :** Guide de démarrage rapide Modbus (fonction codes, registres).
- **Sujet de la semaine prochaine :** Calibration & Auto-Diagnostics (Examen de mi-semestre).
 - Calibration manuelle, automatique, cloud-based
 - Détection d'erreur, auto-surveillance
- **Examen mi-semestre :** portera sur les Leçons 1–5.

Réflexion :

Dans un réseau de capteurs sans fil, comment un capteur pourrait-il diagnostiquer un problème comme une batterie faible ou un port de mesure bloqué ?