

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

Cours 4 : Conditionnement et Traitement du Signal

Durée : 90 minutes

Prof. Abdelmalek Bouhadjera

1. Accueil et Rappel de la Semaine 3

Bienvenue à notre quatrième séance. La semaine dernière, nous avons déconstruit le capteur intelligent en ses blocs architecturaux essentiels.

Nous avons appris qu'un capteur intelligent est un système intégré comprenant :

- un **élément sensible**,
- un **conditionnement du signal**,
- un **convertisseur analogique-numérique (CAN)**,
- un **microprocesseur**,
- et une **interface de communication**.

Nous avons également exploré la **norme IEEE 1451** et son concept révolutionnaire de la **Transducer Electronic Data Sheet (TEDS)**, permettant l'interopérabilité plug-and-play.

Cette semaine, nous allons nous concentrer sur l'un des maillons les plus critiques de cette architecture : **le conditionnement et le traitement du signal**.

C'est le « **pont électronique** » qui transforme le signal brut, souvent faible et bruité, provenant du monde physique en un signal propre et robuste, prêt à être numérisé.

Une défaillance à cette étape équivaut à l'échec complet du capteur, peu importe l'intelligence du microprocesseur.

2. Concept Fondamental : Pourquoi Conditionner un Signal ?

Le signal issu directement d'un élément sensible n'est que rarement exploitable tel quel. Il est souvent :

- **Trop faible** : un thermocouple produit des millivolts, une jauge de contrainte modifie sa résistance d'à peine quelques pourcents.
- **Trop bruité** : les environnements industriels sont saturés de parasites électriques (moteurs, ondes radio, lignes d'alimentation).
- **Sous une mauvaise forme** : il peut s'agir d'une variation de résistance, de capacité ou de charge, alors que l'on souhaite une tension.
- **Non linéaire** : la relation entre la grandeur physique et la sortie électrique n'est pas une droite.

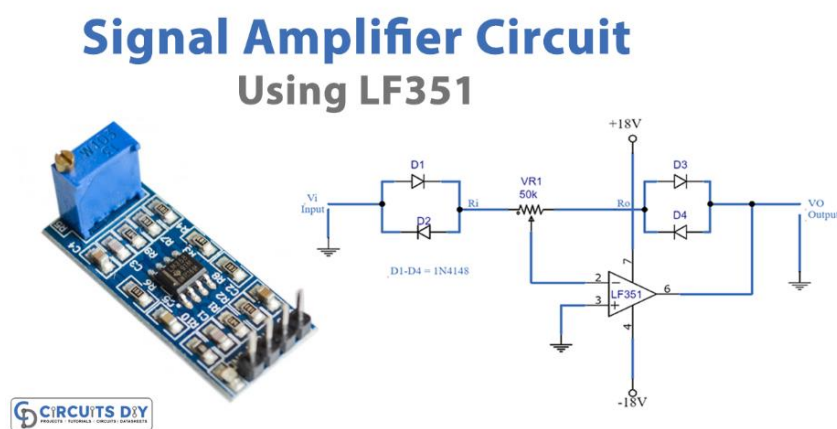
Le **conditionnement du signal** regroupe donc les opérations électroniques destinées à résoudre ces problèmes.
Son rôle est d'**amplifier, filtrer, linéariser** et **convertir** la sortie du capteur en une tension analogique standardisée et de haute qualité, pouvant être **fidèlement numérisée** par le CAN.

3. La Boîte à Outils du Conditionnement du Signal



Explorons les principaux circuits et techniques électroniques utilisés dans le conditionnement du signal.

3.1. Amplification : Rendre le Signal Exploitable



- **Fonction** : augmenter l'amplitude d'un signal capteur faible jusqu'à une plage utilisable, typiquement 0–5 V ou 0–10 V.
Cela améliore également le **rapport signal/bruit**.
- **Composant clé** : l'**amplificateur opérationnel (AOP)** — véritable cheval de bataille de l'électronique analogique. C'est un amplificateur différentiel à gain élevé, amplifiant la différence de tension entre ses deux entrées.
- **L'amplificateur d'instrumentation (In-Amp)** : c'est la référence pour les applications capteurs. Il offre :
 1. **Une impédance d'entrée élevée** – n'affecte pas le capteur, évitant toute distorsion du signal.
 2. **Un excellent taux de réjection du mode commun (CMRR)** – sa « superpuissance ».Il amplifie le petit signal différentiel d'un capteur (comme un pont de jauges)

tout en rejetant les tensions parasites communes aux deux fils d'entrée (par exemple, les interférences secteur).

Illustration :

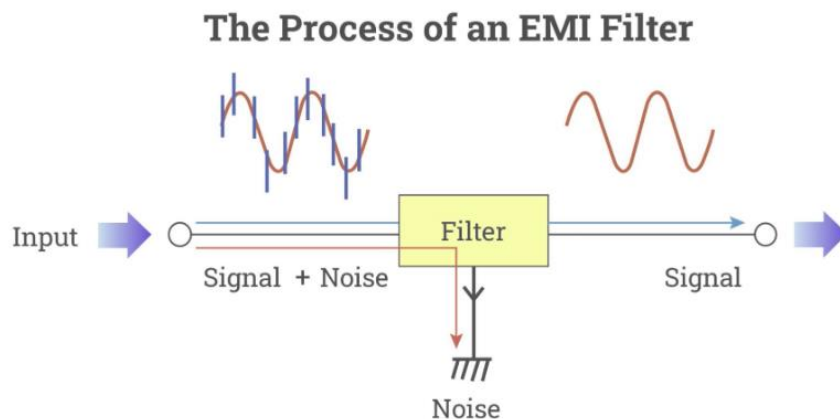
Imaginez que vous essayez d'entendre un murmure dans une salle bruyante.

Un amplificateur ordinaire rend le murmure plus fort.

Un **amplificateur d'instrumentation** rend le murmure plus fort **tout en annulant le bruit de fond**.

C'est pourquoi il est indispensable avec les thermocouples ou les jauges de contrainte, où le signal est minuscule et le milieu électriquement perturbé.

3.2. Filtrage : Supprimer le Bruit Indésirable



- **Fonction** : éliminer certaines composantes fréquentielles d'un signal.
En conditionnement de capteurs, on cherche presque toujours à **supprimer le bruit haute fréquence** tout en préservant la composante utile à basse fréquence.
- **Filtre passe-bas (LPF)** : le plus courant. Il laisse passer les signaux de basse fréquence et atténue les signaux dont la fréquence est supérieure à une fréquence de coupure f_{c_cfc} .
- **Principe** : un simple filtre passe-bas passif peut être réalisé avec une **résistance** et un **condensateur** (circuit RC).

La fréquence de coupure est donnée par :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

- **Analogie** : un filtre passe-bas agit comme un **tamis électronique**.
Si votre signal de pression varie lentement, mais qu'un moteur proche génère un sifflement haute fréquence, le filtre laisse passer la variation lente et bloque le « bruit rapide ».
Le choix correct de f_{c_cfc} est crucial : trop bas, vous perdez de vraies informations ; trop haut, vous laissez passer le bruit.

3.3. Conditionnement Analogique vs. Numérique : Où Faire le Travail ?

Caractéristique	Conditionnement analogique	Conditionnement numérique
Définition	Traitement du signal à l'aide de composants électroniques (AOP, résistances, condensateurs) avant le CAN.	Traitement du signal numérisé via des algorithmes dans le microprocesseur.
Avantages	- Gère les signaux véritablement analogiques (ex. microphone). - Très rapide, sans délai de traitement. - Indispensable pour le filtrage anti-repliement (anti-aliasing).	- Très flexible (modifications par logiciel). - Permet des filtres complexes et non linéaires. - Pas de dérive des composants dans le temps.
Inconvénients	- Peu flexible (nécessite une refonte matérielle). - Les composants dérivent avec la température et le vieillissement.	- Limité par la résolution et la fréquence d'échantillonnage du CAN. - Introduit un léger délai. - Ne peut pas corriger un signal déjà déformé avant numérisation.

Conclusion :

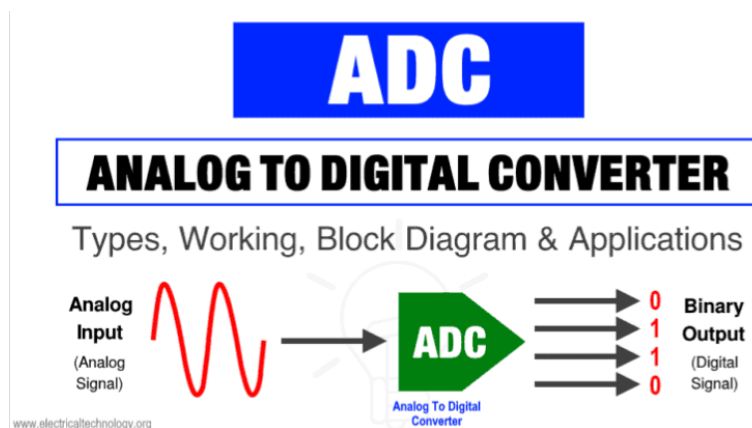
Un système bien conçu combine **les deux**.

- Le **conditionnement analogique** (amplification + filtre passe-bas anti-repliement) prépare un signal propre pour le CAN.
 - Le **conditionnement numérique** (moyenne, linéarisation logicielle) affine ensuite les données.
- Un bruit non éliminé **avant** la conversion ne peut jamais être corrigé **après**.

4. Le Passage au Numérique : Conversion Analogique–Numérique (CAN)

Le CAN est le pont critique entre le monde physique et le monde numérique.

Il échantillonne la tension analogique conditionnée et la convertit en une valeur numérique.



4.1. Concepts Clés

- **Résolution** : finesse de la mesure, exprimée en bits.
Exemple : un CAN de 10 bits sur 0–5 V a une résolution de

$$\frac{5}{2^{10}} = 4,88 \times 10^{-4} \text{ V} = 4,88 \text{ mV}$$

Un CAN de 16 bits donne

$$\frac{5}{65536} = 76 \times 10^{-6} \text{ V} = 76 \mu\text{V}$$

→ Sensibilité bien supérieure.

- **Taux d'échantillonnage** : nombre de conversions par seconde.
Selon le **théorème de Nyquist-Shannon**, il faut échantillonner au moins **deux fois la fréquence maximale du signal** pour éviter le **repliement de spectre (aliasing)**.

4.2. Rôle Crucial du Filtre Anti-Repliement



- **Aliasing** : si un signal contient des composantes au-delà de la moitié du taux d'échantillonnage, le CAN les interprétera comme des fréquences plus basses, créant des **distorsions irréversibles**.
- **Solution** : un **filtre passe-bas anti-repliement**, placé juste avant le CAN, élimine rigoureusement toutes les fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist.
- **Analogie** : filmer une roue qui tourne trop vite : elle semble tourner à l'envers — c'est l'aliasing.
Le filtre anti-repliement agit comme un flou optique qui élimine les détails impossibles à capturer, assurant une représentation fidèle du mouvement.

5. Exercice en Classe : Conception d'une Chaîne de Signal

Objectif : concevoir les étapes de conditionnement et de conversion pour un capteur de pression à jauge de contrainte.

Données :

- Plage de pression : 0–100 psi

- Sortie pleine échelle : 2 mV/V
→ Pour une excitation de 5 V :
 $5V \times 0,002 = 10mV$ $5V \times 0,002 = 10mV$
- Le signal est contaminé par du bruit haute fréquence provenant d'un variateur de vitesse voisin.

Tâches :

1. **Excitation** : quelle tension appliquerez-vous au pont de jauges ?
2. **Amplification** :
 - Quelle est la sortie pleine échelle du capteur ?
 - Vous devez l'amplifier à 0–5 V pour un CAN 5 V. Calculez le gain requis.
 - Quel type d'amplificateur est essentiel et pourquoi ?
3. **Filtrage** :
 - Quel type de filtre utilisez-vous ?
 - Quel est son objectif principal ici ?
4. **Sélection du CAN** :
 - Si la pression varie jusqu'à 50 Hz, quel est le **taux d'échantillonnage minimal** ?
 - Vous souhaitez détecter des variations de 0,1 psi. Quelle **résolution minimale (en bits)** faut-il ? (Indice : calculez d'abord la résolution en tension.)

Questions de discussion :

- Pourquoi un amplificateur d'instrumentation est-il préférable à un AOP standard ?
- Que se passerait-il si vous oubliez le filtre anti-repliement ?

6. Lecture et Préparation pour la Semaine Prochaine

- **Lecture obligatoire** :
Pallás-Areny & Webster, Sensors and Signal Conditioning — Chapitre sur les amplificateurs et filtres.
(Pour une compréhension mathématique et circuitale plus approfondie.)
- **Sujet de la semaine prochaine** :
Communication et Réseautage : Faire Parler le Capteur.
Nous aborderons le **Bloc 5 : Interface de Communication**.
Nous explorerons les protocoles numériques industriels — des bus câblés simples comme **Modbus** et **PROFIBUS** aux standards **sans fil** tels que **Zigbee** et **LoRaWAN**, essentiels à l'IIoT.
- **Réflexion** :
Pour le capteur de pression conçu dans l'exercice :
 - Quel protocole de communication choisiriez-vous s'il était installé sur une cuve d'eau **éloignée et alimentée par batterie** ?
 - Et s'il était monté sur un **bras robotique à grande vitesse** ?
 - Quels compromis cela impliquerait-il ?

