

Cours : Capteurs intelligents et instrumentation industrielle

Cours 2 : Fondamentaux des capteurs et des transducteurs

Durée : 90 minutes

Prof. Abdelmalek Bouhadjera

1. Accueil et récapitulatif de la semaine 1

Bienvenue à cette deuxième séance du cours.

Lors de la première semaine, nous avons établi une vue d'ensemble : la révolution des capteurs intelligents et leur rôle central dans l'Industrie 4.0.

Nous avons appris qu'un capteur intelligent n'est pas seulement un élément sensible, mais un système intégré doté de fonctions de traitement, de communication et d'autodiagnostic.

Cette semaine, nous approfondirons les bases et répondrons à deux questions fondamentales :

1. Comment les capteurs fonctionnent-ils réellement ? Quels sont les principes physiques derrière la mesure de grandeurs telles que la température, la pression ou le débit ?
2. Comment évaluer la qualité d'un capteur ? Que signifient réellement les spécifications techniques d'une fiche produit ?

La compréhension de ces fondements est essentielle pour choisir le bon capteur pour toute application industrielle, qu'il soit « intelligent » ou conventionnel.

2. Concept de base : qu'est-ce qu'un transducteur ?

Le terme *transducteur* est plus large que celui de *capteur* : c'est un concept universel.

- Un **transducteur** est tout dispositif qui convertit une forme d'énergie en une autre.
- Un **capteur** est un type particulier de transducteur qui convertit une grandeur physique (du monde réel) en un signal mesurable (souvent électrique).
- Un **actionneur** est l'inverse d'un capteur : il transforme un signal électrique en une action physique (par exemple, un moteur électrique convertit l'électricité en mouvement de rotation, un actionneur de vanne ouvre ou ferme une vanne).

La chaîne de mesure peut être résumée ainsi :

Grandeur physique → Élément sensible (transducteur) → Signal électrique →
Conditionnement du signal → Données traitées

Exemple illustratif :

Le microphone et le haut-parleur.

Le microphone est un capteur (il convertit les ondes sonores/pressions en tension électrique), tandis que le haut-parleur est un actionneur (il reconvertit une tension électrique en ondes sonores). Tous deux sont des transducteurs.

3. Principes de mesure des principales grandeurs industrielles

Explorons les principes physiques couramment utilisés pour mesurer quatre grandeurs industrielles essentielles.

3.1. Mesure de la température

La température est l'une des grandeurs les plus souvent mesurées. Le choix du capteur dépend de la plage, de la précision, de la rapidité et du coût souhaités.

a) Thermocouples

- **Principe** : Effet Seebeck. Deux fils métalliques différents reliés à leurs extrémités forment une boucle ; lorsqu'une jonction est chauffée, une tension (en mV) proportionnelle à la différence de température entre les deux jonctions est générée.
- **Avantages** : Très large plage de mesure (jusqu'à $\sim 1700^{\circ}\text{C}$), robuste, réponse rapide.
- **Inconvénients** : Faible tension de sortie et non-linéarité, nécessite la compensation de la jonction froide pour une mesure précise, moins précis que les RTD.

b) Détecteurs de température à résistance (RTD)

- **Principe** : La résistance électrique d'un métal pur (souvent le platine) augmente de manière prévisible et quasi linéaire avec la température. Le standard est le Pt100 ($100\ \Omega$ à 0°C).
- **Avantages** : Grande précision, excellente stabilité et reproductibilité dans le temps.
- **Inconvénients** : Plus coûteux que les thermocouples, réponse plus lente, moins robuste.

c) Thermistances

- **Principe** : Composant semi-conducteur dont la résistance varie fortement avec la température. La plupart sont à coefficient de température négatif (NTC) : leur résistance diminue lorsque la température augmente.
- **Avantages** : Très grande sensibilité, réponse rapide, faible coût.
- **Inconvénients** : Réponse très non linéaire, plage limitée (-50°C à 150°C), fragilité.

Remarque : Une thermistance NTC est idéale pour détecter de petites variations de température, par exemple sur une carte électronique, mais pas adaptée pour un four industriel.

3.2. Mesure de la pression

La pression est une force exercée par unité de surface.

En industrie, on mesure souvent la **pression relative** (par rapport à la pression atmosphérique).

a) Capteurs à jauges de contrainte

- **Principe** : Une membrane fine se déforme sous l'effet de la pression. Des jauges de contrainte collées sur cette membrane changent de résistance électrique selon la déformation. Ce changement est mesuré via un pont de Wheatstone.
- **Applications** : Mesure courante en hydraulique, pneumatique, niveau de cuve.

b) Capteurs piézoélectriques

- **Principe** : Certains cristaux (ex. quartz) génèrent une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique.
- **Applications** : Mesures de pressions dynamiques rapides (moteurs à combustion, vibrations). Inadaptés pour la pression statique (fuite de charge dans le temps).

c) Capteurs capacitifs

- **Principe** : Une membrane forme une plaque mobile d'un condensateur. La pression modifie l'écart entre les plaques, donc la capacité.
 - **Applications** : Haute précision, grande stabilité, idéals pour les faibles pressions ou pressions différentielles.
-

3.3. Mesure du débit

La mesure du débit (liquides ou gaz) est essentielle pour la régulation des procédés. Les méthodes varient selon la nature du fluide.

a) Mesure par pression différentielle (plaque à orifice)

- **Principe** : Une restriction dans la conduite crée une chute de pression proportionnelle au carré du débit.
- **Avantages** : Simplicité, pas de pièces mobiles.
- **Inconvénients** : Pertes de charge permanentes, dépendance aux propriétés du fluide.

b) Débitmètre à turbine

- **Principe** : Le fluide entraîne la rotation d'une turbine ; la vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse du fluide.
- **Avantages** : Bonne précision pour les fluides propres.
- **Inconvénients** : Pièces mobiles sujettes à l'usure, non adapté aux fluides sales ou corrosifs.

c) Débitmètre magnétique (magmètre)

- **Principe** : Loi de Faraday de l'induction électromagnétique. Un champ magnétique est appliqué à travers la conduite ; un fluide conducteur en mouvement induit une tension proportionnelle à sa vitesse.
- **Avantages** : Aucune obstruction, fonctionne avec des fluides chargés ou abrasifs.
- **Inconvénients** : Nécessite un fluide conducteur (pas d'huiles ni de gaz).

d) Débitmètre à effet Coriolis

- **Principe** : Le fluide traverse des tubes vibrants ; l'effet Coriolis provoque une torsion proportionnelle au débit massique.
 - **Avantages** : Très grande précision, mesure directe du débit massique, indépendant de la densité.
 - **Inconvénients** : Coût élevé.
-

3.4. Mesure de déplacement / position

Mesure de position linéaire ou angulaire, ou simple détection de présence.

a) Potentiomètre

- **Principe** : Résistance variable ; le curseur mobile modifie la tension de sortie.
- **Avantages** : Simple, économique.
- **Inconvénients** : Usure mécanique.

b) Transformateur différentiel linéaire (LVDT)

- **Principe** : Transformateur à noyau mobile ; le déplacement du noyau modifie le couplage magnétique et donc la tension différentielle de sortie.
- **Avantages** : Haute précision, sans contact mécanique, grande durée de vie.
- **Inconvénients** : Plus coûteux et complexe qu'un potentiomètre.

c) Capteurs de proximité

- **Inductifs** : Champ électromagnétique perturbé par les métaux. Très utilisés en automatisation.
 - **Capacitifs** : Champ électrostatique sensible à tout matériau modifiant la capacité (métal, plastique, liquide, bois). Utilisés pour la détection de niveaux ou d'objets non métalliques.
-

4. Le langage des performances : les paramètres caractéristiques d'un capteur

Pour comparer et choisir des capteurs, on se réfère à des grandeurs normalisées figurant sur leurs fiches techniques :

1. **Plage de mesure** : Intervalle entre les valeurs minimale et maximale mesurables.
2. **Précision (exactitude)** : Écart maximal attendu entre la valeur mesurée et la valeur réelle, souvent en % de l'échelle complète.
3. **Répétabilité** : Capacité à fournir le même résultat dans des conditions identiques.
4. **Sensibilité** : Variation du signal de sortie par unité de variation de la grandeur d'entrée (pente de la courbe d'étalonnage).
5. **Résolution** : Plus petite variation détectable de la grandeur mesurée.

6. **Temps de réponse** : Délai pour atteindre un pourcentage donné (souvent 63,2 % ou 90 %) de la valeur finale après une variation brusque de l'entrée.
 7. **Hystérésis** : Différence de sortie pour une même entrée selon le sens de variation.
 8. **Linéarité** : Écart par rapport à une droite idéale (souvent exprimé en % de l'échelle).
-

5. La courbe d'étalonnage : l'« empreinte » du capteur

Graphique fondamental représentant la sortie du capteur (axe y) en fonction de l'entrée appliquée (axe x).

Elle indique :

- la **sensibilité** (pente),
- la **plage de fonctionnement**,
- l'**offset** (valeur de sortie pour une entrée nulle),
- la **linéarité**,
- l'**hystérésis** (écart entre courbes montante et descendante).

Capteur linéaire idéal :

Sortie = (Sensibilité) × Entrée + Offset

Remarque : Un capteur intelligent linéarise automatiquement le signal brut non linéaire de son élément sensible grâce à son microprocesseur interne.

6. Exercice en classe : analyse de courbes d'étalonnage

Objectif : Comprendre le comportement d'un capteur à partir de données expérimentales.

Tâches :

1. Tracer la courbe Sortie vs Entrée.
2. Analyser :
 - Plage de fonctionnement ?
 - Réponse linéaire ou non ?
 - Si linéaire : calculer la sensibilité (pente) et l'offset.
 - Si non linéaire : décrire l'évolution de la sensibilité.

Jeu de données A : Transducteur de pression

Entrée (PSI) : 0, 5, 10, 15, 20

Sortie (mV) : 1.0, 51.5, 102.0, 152.5, 203.0

Jeu de données B : Thermistance NTC

Entrée (°C) : 0, 10, 20, 30, 40

Sortie (kΩ) : 29.50, 18.05, 11.40, 7.40, 4.95

Questions de discussion :

- Quel capteur est le plus facile à interfacer avec un système numérique simple ? Pourquoi ?
 - Quelles sont les conséquences pratiques de la non-linéarité de la thermistance ?
-

7. Lecture et préparation pour la semaine prochaine

Lecture obligatoire :

Patranabis, *Sensors and Transducers*, chapitres 2–3.

→ Approfondir les principes des transducteurs et leurs caractéristiques électriques.

Accordez une attention particulière aux circuits associés (ponts de Wheatstone, etc.).

Sujet de la prochaine séance : Architectures des capteurs intelligents.