



Aucun capteur n'est parfait dès sa sortie d'usine, et aucun ne le reste éternellement.

Avec le temps, les capteurs peuvent **dériver** en raison du vieillissement des composants, de l'exposition à des environnements difficiles (chaleur, produits chimiques, vibrations) ou de dommages physiques. La relation entre l'entrée physique et la sortie électrique définie par la **courbe d'étalonnage** peut changer.

Par conséquent, la gestion des capteurs n'est pas un événement ponctuel, mais un **cycle de vie** :

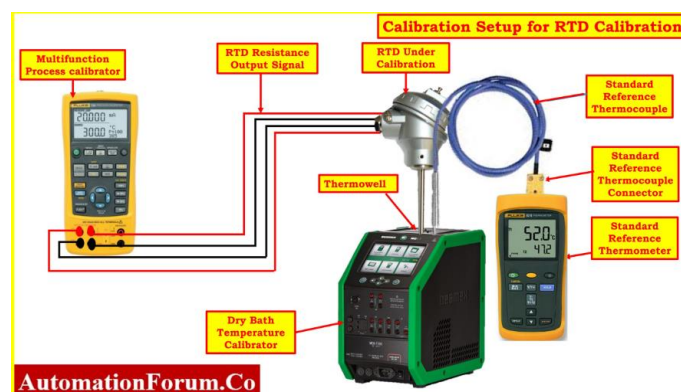
1. **Étalonnage Initial** : Établir la précision de référence à l'usine.
2. **Ré-étalonnage Périodique** : Vérifier et ajuster la sortie du capteur par rapport à une norme connue à intervalles planifiés.
3. **Surveillance Continue de l'État** : Utiliser l'auto-diagnostic pour détecter les problèmes au moment où ils se produisent, permettant une maintenance prédictive plutôt qu'une réaction aux pannes.

4. Étalonnage : L'Art et la Science de l'Établissement de la Vérité



L'étalonnage est le processus qui consiste à comparer la sortie du capteur à une **norme de référence plus précise** (une "vérité terrain") dans des conditions spécifiques et à ajuster la sortie du capteur pour minimiser l'erreur.

3.1. Le Processus d'Étalonnage



La procédure générale est la suivante :

1. **Appliquer une Entrée Connue** : À l'aide d'un étalonneur de haute précision (par exemple, un bain thermostaté, un vérificateur de pression à poids mort, une source de tension de précision), appliquez une série d'entrées connues au capteur sur toute sa plage de fonctionnement.
2. **Enregistrer la Sortie du Capteur** : Enregistrez la valeur numérique ou le signal de sortie du capteur pour chacun de ces points d'entrée connus.
3. **Déterminer la Relation** : Tracez la sortie du capteur en fonction de l'entrée connue pour créer une **courbe d'étalonnage**.
4. **Ajuster le Capteur (Trimming)** : Corrigez la sortie du capteur pour qu'elle corresponde à la norme de référence. Cela peut impliquer le calcul de nouveaux coefficients pour l'algorithme de linéarisation interne du capteur.

3.2. Techniques & Technologies d'Étalonnage

- **Étalonnage Manuel :**

- **Processus** : Un technicien apporte un étalonneur portable sur le terrain, le connecte au capteur et enregistre manuellement les valeurs d'entrée/sortie. Les ajustements sont effectués via l'interface locale du capteur ou un configurateur portatif.
- **Avantages** : Flexible, ne nécessite pas d'infrastructure supplémentaire.
- **Inconvénients** : Laborieux, sujet aux erreurs humaines, nécessite l'arrêt du processus et peut entraîner de longs intervalles entre les vérifications.

- **Étalonnage Automatique In-Situ :**

- **Processus** : Le système est conçu avec des capacités d'étalonnage intégrées. Par exemple, un transmetteur de pression intelligent peut avoir un capteur de pression de référence interne et de haute précision. Sur commande, il peut fermer ses vannes internes, comparer sa lecture à celle du capteur de référence et ajuster automatiquement ses propres coefficients d'étalonnage, le tout sans être retiré du processus.
- **Explication** : Il s'agit d'une fonction "intelligente" clé. Elle réduit considérablement les temps d'arrêt et les coûts de main-d'œuvre. Elle est courante dans les applications critiques où la précision est primordiale, comme dans les systèmes instrumentés de sécurité ou la fabrication pharmaceutique.

- **Gestion de l'Étalonnage Basée sur le Cloud :**

- **Processus** : Les capteurs intelligents avec communication numérique (par exemple, compatibles IIoT) transmettent leurs données opérationnelles et leurs informations d'auto-diagnostic à une plateforme cloud. La plateforme utilise l'analyse des données pour surveiller les signes de dérive et peut générer automatiquement des ordres de travail pour l'étalonnage lorsque cela est nécessaire, ou même suivre l'historique d'étalonnage et le certificat de chaque appareil.

- **Explication :** Cela fait passer l'étalonnage d'un calendrier basé sur le temps ("étalonner tous les 6 mois") à un calendrier basé sur l'état ("étalonner lorsque l'analyse indique le début d'une dérive"). C'est plus efficace et économique.
-

4. Auto-diagnostic : Le Système Immunitaire du Capteur

Si l'étalonnage corrige les dérives lentes, l'auto-diagnostic est conçu pour détecter les pannes ou défaillances soudaines. Un capteur intelligent surveille en permanence son propre état interne et l'intégrité de sa chaîne de signal.

4.1. Techniques de Diagnostic Courantes

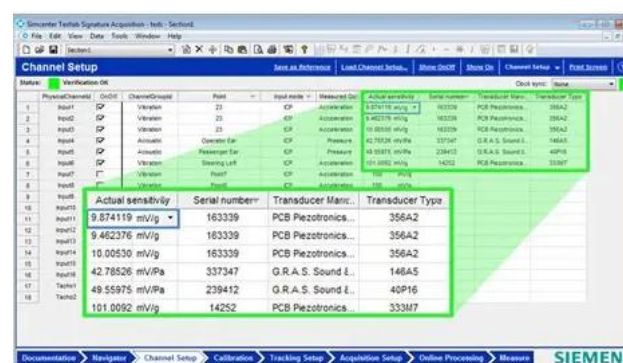
- **Contrôles d'Intégrité du Signal :**
 - **Détection de Circuit Ouvert/Court-Circuit :** Le capteur peut injecter un faible courant ou une faible tension de test et surveiller la réponse pour détecter un fil cassé (circuit ouvert) ou une intrusion d'eau (court-circuit) dans la connexion à l'élément de détection.
 - **Détection de Saturation du Signal :** Le signal de sortie est-il "bloqué" à sa valeur maximale ou minimale ? Cela pourrait indiquer une défaillance du capteur, un problème d'alimentation ou une valeur de processus dépassant la plage du capteur.
 -
- **Contrôles de Vraisemblance Spécifiques au Processus :**
 - **Surveillance du Taux de Variation :** Un capteur de température dans un grand réservoir peut avoir un taux de chauffage maximum connu. Si le capteur signale une augmentation de température plus rapide que ce qui est physiquement possible, il peut signaler une défaillance du capteur.
 - **Corrélation avec d'Autres Capteurs :** Dans un système à plusieurs capteurs, un capteur intelligent peut comparer sa lecture à celle des autres. Si un débitmètre indique zéro mais qu'un capteur de pression en aval indique un débit, une alarme de diagnostic peut être déclenchée.
 -
- **Diagnostics Matériel Interne :**
 - **Contrôles de Mémoire :** Le microprocesseur peut exécuter des contrôles sur sa mémoire programme (ROM) et sa mémoire de données (RAM) pour détecter toute corruption.
 - **Contrôles du CNA et de la Tension de Référence :** Le capteur peut vérifier ses références de tension internes et la fonctionnalité du CNA (Convertisseur Numérique-Analogique) pour garantir la précision du processus de conversion.

4.2. Le Rôle de la Redondance

Pour les applications les plus critiques (par exemple, dans l'aviation ou les systèmes instrumentés de sécurité), la redondance est la forme ultime de diagnostic.

- **Redondance Double** : Deux capteurs identiques mesurent la même variable. Le système compare leurs sorties. Un écart significatif déclenche une alarme.
- **Redondance Triple Modulaire (TMR)** : Trois capteurs identiques sont utilisés. Le système utilise une logique de "vote" (par exemple, 2 sur 3) pour déterminer la valeur correcte et isoler le capteur défaillant. Cela permet à la fois la détection de fautes et la tolérance aux pannes, permettant au système de continuer à fonctionner en toute sécurité même après la défaillance d'un capteur.

5. La Fiche Électronique de Transducteur (TEDS) Réexaminée



Physical Channel	Output	Channel Group	Port	Input mode	Measured by	Actual sensitivity	Serial number	Transducer Man.	Transducer Type	
1	Input1	CP	Vibration	23	CP	Acceleration	9.874119 mV/g	163339	PCB Piezotronics...	356A2
2	Input2	CP	Vibration	23	CP	Acceleration	9.874119 mV/g	163339	PCB Piezotronics...	356A2
3	Input3	CP	Vibration	23	CP	Acceleration	10.00530 mV/g	163339	PCB Piezotronics...	356A2
4	Input4	CP	Acoustic	Speaker Cab	CP	Pressure	42.78526 mV/Pa	337347	G.R.A.S. Sound E.	148A5
5	Input5	CP	Acoustic	Speaker Cab	CP	Pressure	49.55975 mV/Pa	239412	G.R.A.S. Sound E.	40P16
6	Input6	CP	Vibration	Steering Left	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
7	Input7	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
8	Input8	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
9	Input9	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
10	Input10	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
11	Input11	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
12	Input12	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
13	Input13	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
14	Input14	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
15	Input15	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
16	Input16	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
17	Tsk101	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7
18	Tsk102	CP	Vibration	Port	CP	Acceleration	101.0092 mV/g	14252	PCB Piezotronics...	333M7

Rappelez-vous la norme IEEE 1451 de la Conférence 3. La TEDS ne sert pas seulement au plug-and-play ; elle est aussi une pierre angulaire de l'étalonnage et du diagnostic intelligents.

- **Stocke les Données d'Étalonnage** : La TEDS contient les coefficients d'étalonnage uniques, la date du dernier étalonnage et la date d'échéance du prochain étalonnage.
- **Stocke les Limites de Diagnostic** : Elle peut stocker les paramètres utilisés pour les diagnostics, tels que les limites de taux de variation acceptables ou les facteurs de corrélation avec d'autres capteurs.
- **Explication** : Lorsqu'un technicien se connecte à un capteur intelligent, l'historique d'étalonnage et de diagnostic est instantanément disponible depuis la TEDS, rendant le processus de maintenance plus rapide, plus précis et entièrement documenté.

6. Exercice en Classe : Concevoir une Stratégie de Diagnostic Intelligente

Objectif : Appliquer les concepts d'auto-diagnostic à un scénario industriel réel.

Scénario : Vous spécifiez un **Capteur de Vibration Intelligent** pour la maintenance prédictive sur une **pompe centrifuge grande vitesse, critique et de grande taille**. Le capteur est un accéléromètre numérique basé sur MEMS qui fournit des données de vibration numériques. Une panne de cette pompe entraînerait un arrêt complet de l'usine, coûtant 10 000 \$ par heure.

Tâche :

Proposez une stratégie complète d'auto-diagnostic et d'étalonnage pour ce capteur. Pour chaque élément ci-dessous, précisez ce que vous vérifieriez et comment le capteur ou le système effectuerait la vérification.

1. **Contrôle d'Intégrité du Signal :** Proposez une méthode pour vous assurer que le capteur est physiquement connecté et fonctionne.
2. **Contrôle de Santé Interne :** Proposez une méthode pour que le capteur vérifie que son électronique interne est saine.
3. **Contrôle de Vraisemblance :** Proposez une méthode utilisant la connaissance du processus pour valider la lecture des vibrations.
4. **Stratégie d'Étalonnage :** Recommanderiez-vous un étalonnage manuel, automatique ou basé sur l'état ? Justifiez votre choix en fonction de l'importance de l'actif.

Questions de Discussion (après l'exercice) :

- Lequel de vos contrôles de diagnostic proposés pensez-vous être le plus précieux pour éviter une fausse alarme qui pourrait arrêter l'usine inutilement ?
 - Comment le système de gestion d'étalonnage basé sur le cloud pourrait-il utiliser les données de vibration elles-mêmes pour prédire quand le capteur pourrait dériver ?
-

7. Informations sur l'Examen Partiel et Préparation pour la Semaine Prochaine

- **Examen Partiel :** L'examen aura lieu à la fin de cette session. Il couvrira tout le matériel des Conférences 1 à 6, y compris :
 - Les fondamentaux et architectures des capteurs intelligents (C1, C3).
 - Les principes des capteurs et les métriques de performance (C2).
 - Le conditionnement du signal et les fondamentaux CNA (C4).
 - Les protocoles de communication (C5).

- L'étalonnage et l'auto-diagnostic (C6).
- L'examen sera composé de questions à choix multiples, de questions à réponse courte et d'un problème de conception/diagramme.
- **Sujet de la Semaine Prochaine : Capteurs Intelligents MEMS & Miniaturisés.**
- Après l'examen partiel, nous commencerons la seconde moitié du cours en explorant la technologie révolutionnaire qui a permis la prolifération des capteurs intelligents : les **Microsystèmes Électromécaniques (MEMS)**. Nous verrons comment de minuscules éléments mécaniques sont fabriqués sur des puces de silicium pour créer des accéléromètres, des gyroscopes et des capteurs de pression qui sont petits, peu coûteux et intelligents.
- **Réfléchissez à :** Comment la **miniaturisation** des capteurs, comme on en voit dans votre smartphone, permet-elle de nouvelles applications qui étaient impossibles avec les grands capteurs conventionnels ?