

Cours : Capteurs et Mesures en Télécommunications

Conférence 2 : Caractéristiques Statiques d'un Système de Mesure

Durée : 1 Heure 30 Minutes

Prof. Abdelmalek Bouhadjera

1. Introduction et Objectifs d'Apprentissage

Lors de la conférence précédente, nous avons appris comment un système de mesure *acquiert* un signal. Maintenant, nous posons une question critique : "**Cette mesure est-elle de bonne qualité ?**" La réponse se trouve dans la compréhension des **caractéristiques** qui définissent la qualité et les performances de tout instrument.



Ces caractéristiques sont divisées en deux catégories principales :

- **Caractéristiques Statiques** : S'appliquent lorsque la grandeur mesurée est constante ou varie très lentement dans le temps.
- **Caractéristiques Dynamiques** : S'appliquent lorsque la grandeur mesurée change rapidement. (Nous les aborderons dans une future conférence).

Objectifs d'Apprentissage d'Aujourd'hui :

À la fin de cette session, vous serez capable de :

- Définir et distinguer la **Justesse, la Fidélité et la Résolution**.
- Comprendre les concepts de **Domaine de Mesure et d'Étendue de Mesure**.
- Expliquer la **Sensibilité** et la **Linéarité**, et comprendre l'impact de la **Non-Linéarité**.
- Décrire l'**Hystérésis** et la **Zone Morte** ainsi que leurs causes.

2. Caractéristiques Statiques : Définir la "Qualité" pour les Mesures en Régime Etabli

Les caractéristiques statiques décrivent la performance d'un instrument lors de la mesure d'une grandeur qui ne change pas. Elles sont fondamentales pour sélectionner le bon outil et interpréter correctement ses données.

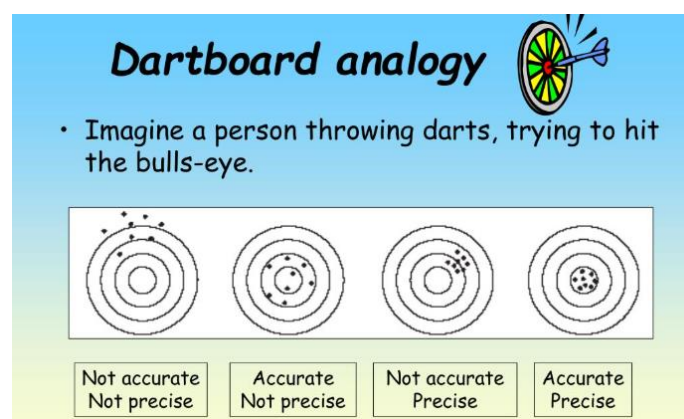
a) Justesse (Exactitude) vs. Fidélité (Précision)

C'est la distinction la plus cruciale en métrologie.

- **Justesse (Accuracy en anglais) :** Le degré de concordance entre la valeur mesurée et la **valeur vraie (ou une valeur de référence acceptée)**.
 - *En termes simples : Votre réponse est-elle correcte ?*
 - Elle indique le **trueness** (justesse) de la mesure.
 - Une faible justesse est causée par des **erreurs systématiques** (des erreurs constantes et reproductibles). Exemples : un capteur mal étalonné, un décalage constant.
- **Fidélité (Precision en anglais) :** Le degré de concordance entre des mesures répétées de la même grandeur, effectuées dans les mêmes conditions.
 - *En termes simples : Vos résultats sont-ils reproductibles ?*
 - Elle indique la **dispersion** des mesures.
 - Une faible fidélité est causée par des **erreurs aléatoires** (fluctuations imprévisibles). Exemples : bruit électrique, vibrations mécaniques.

Développement : L'Analogie du Jeu de Fléchettes

Imaginez lancer des fléchettes sur une cible.



- **Bonne Justesse, Mauvaise Fidélité :** Les fléchettes sont dispersées, mais leur position moyenne est le centre de la cible. Les mesures sont correctes en moyenne, mais pas reproductibles.

- **Mauvaise Justesse, Bonne Fidélité** : Les fléchettes sont regroupées en un tas serré, mais loin du centre. Les mesures sont très reproductibles, mais constamment fausses (cela indique une erreur systématique).
- **Bonne Justesse, Bonne Fidélité** : Les fléchettes sont regroupées en un tas serré dans le centre de la cible. C'est le scénario idéal pour tout système de mesure.

b) Résolution

- **Définition** : Le plus **petit changement** de la grandeur d'entrée qu'un instrument peut **détecter** et afficher.
- *En termes simples* : Quel est le plus petit pas que l'instrument peut "voir" ?
- **Exemples** :
 - Une règle avec des marques au mm a une résolution de 1 mm.
 - Un multimètre numérique affichant 12,05 V a une résolution de 0,01 V.
- **Point Clé** : Un instrument peut être très fidèle (reproductible) sans avoir une bonne résolution, et vice-versa. Cependant, une grande justesse est difficile à atteindre si la résolution est médiocre.



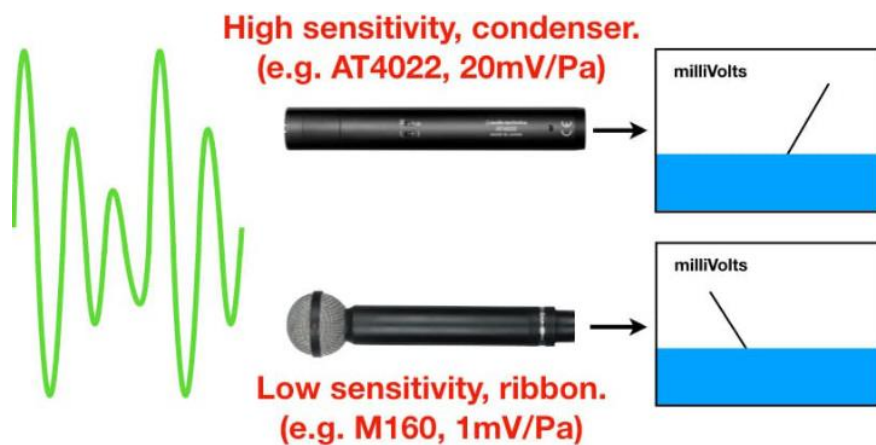
c) Domaine de Mesure et Étendue de Mesure

- **Domaine de Mesure (Range)** : L'ensemble des valeurs, comprises entre une **limite inférieure** et une **limite supérieure**, qu'un instrument est conçu pour mesurer. Il est exprimé par [Limite Inférieure] à [Limite Supérieure].
 - *Exemple* : Un capteur de pression avec un domaine de mesure de **0 à 100 kPa**.
- **Étendue de Mesure (Span)** : La différence algébrique entre les valeurs supérieure et inférieure du domaine de mesure.
 - *Exemple* : Pour le capteur 0-100 kPa, l'étendue de mesure est de **100 kPa**.

Développement : Pourquoi est-ce important ? Utiliser un instrument en dehors de son domaine spécifié peut l'endommager et conduira certainement à des données non valides. Sélectionnez toujours un capteur dont le domaine de mesure englobe confortablement les valeurs attendues de la grandeur à mesurer.

d) Sensibilité

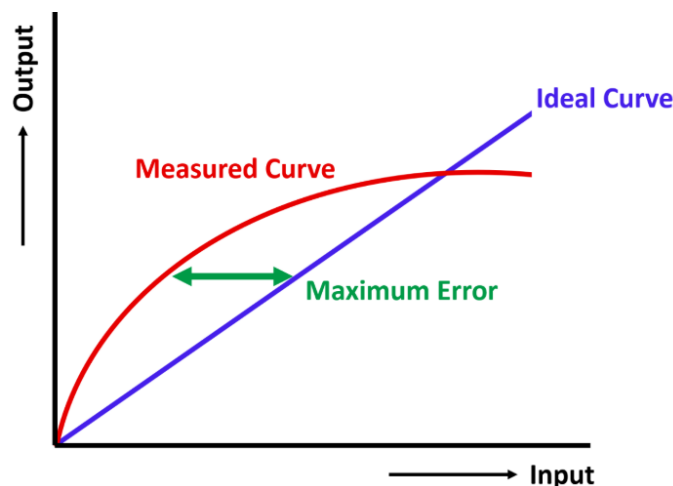
- **Définition** : Le rapport entre la variation du **signal de sortie** et la variation de la **grandeur physique d'entrée**. Elle indique à quel point la sortie "réagit" à un changement d'entrée.
- **Formule** : $\text{Sensibilité} = (\text{Changement de Sortie}) / (\text{Changement d'Entrée})$
- **Unités** : Par exemple, la sensibilité d'un microphone peut être donnée comme 10 mV/Pa. Cela signifie que pour chaque changement de 1 Pascal de la pression acoustique, la tension de sortie change de 10 millivolts.



- **Point Clé** : Une sensibilité élevée est généralement souhaitable, car elle fournit une sortie plus grande et plus facilement mesurable pour un petit changement d'entrée.

e) Linéarité et Non-Linéarité

- **Comportement Idéal** : Dans un monde parfait, la relation entre l'entrée et la sortie d'un instrument est une ligne droite. C'est la **linéarité**.
- **Comportement Réel** : En réalité, aucun capteur n'est parfaitement linéaire. L'écart maximal de la courbe de sortie réelle par rapport à la droite d'ajustement optimale est l'**Erreur de Non-Linéarité**.



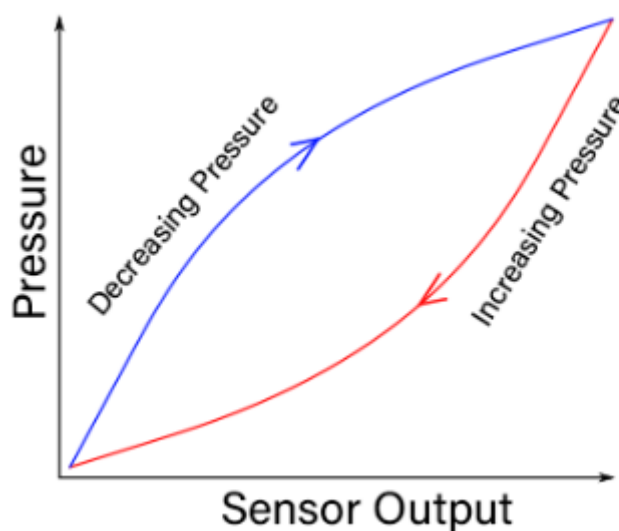
Développement : Compréhension Graphique

Imaginez un graphique avec l'Entrée sur l'axe des X et la Sortie sur l'axe des Y.

- La **Ligne Idéale** est une droite diagonale parfaite.
- La **Courbe Réelle** de la réponse du capteur oscillera autour de cette ligne idéale.
- L'**Écart Maximal** entre la courbe réelle et la ligne idéale est l'erreur de non-linéarité, souvent exprimée en pourcentage de la **Pleine Échelle de Sortie (PES ou FSO)**.
- *Exemple* : Un capteur avec une PES de 10V et une erreur de non-linéarité de $\pm 0,1\%$ a un écart maximal de $\pm 0,01V$ par rapport à la ligne idéale.

f) Hystérésis

- **Définition** : La différence de sortie pour la *même valeur d'entrée* en fonction du **sens de variation** (valeurs croissantes ou décroissantes).
- *En termes simples* : L'instrument se "souvient" d'où il vient, donnant une lecture différente lorsque l'on approche une valeur par le bas par rapport au haut.
- **Causes** : Frottement, effets magnétiques ou jeu mécanique dans les composants du capteur.
- **Exemple** : Dans un capteur de pression, la sortie à 50 kPa pourrait être de 4,95 V lorsque la pression augmente, mais de 5,05 V lorsque la pression diminue à partir d'une valeur plus élevée. L'hystérésis est la différence maximale observée sur l'ensemble du domaine.



g) Zone Morte (ou Bande Morte)

- **Définition** : La plage de valeurs d'entrée pour laquelle l'instrument ne montre **aucun changement de sortie**. L'instrument est "mort" aux changements dans cette bande.
- **Cause** : Souvent liée au frottement ou à la nécessité d'une force minimale pour initier un mouvement. Elle est communément associée aux capteurs présentant une hystérésis.

- **Exemple :** Un joystick sur une manette de jeu peut avoir une petite zone morte au centre où de petits mouvements ne sont pas enregistrés, pour éviter des entrées involontaires.

3. Récapitulatif des Termes Clés

Caractéristique	La Question à laquelle elle Répond	Cause Courante d'Erreur
Justesse	À quel point est-elle proche de la valeur vraie ?	Erreurs Systématiques (ex: mauvais étalonnage)
Fidélité	Quelle est la reproductibilité des mesures ?	Erreurs Aléatoires (ex: bruit)
Résolution	Quel est le plus petit changement qu'elle peut voir ?	Numérisation, limites mécaniques
Domaine/Étendue	Quelles sont ses limites min et max ?	Conception et construction du capteur
Sensibilité	De combien la sortie change-t-elle par input ?	Conception du transducteur et gain
Linéarité	La courbe entrée-sortie est-elle droite ?	Propriétés physiques de l'élément sensible
Hystérésis	Cela importe-t-il si l'entrée monte ou descend ?	Frottement, histoire magnétique, jeu mécanique
Zone Morte	Y a-t-il une plage d'entrée où rien ne se passe ?	Frottement statique

4. Pour Résumer : Un Exemple Pratique en Télécom

Scénario : Sélection d'un capteur de puissance pour surveiller la sortie d'un amplificateur de station de base cellulaire.



1. **Domaine de Mesure :** Le capteur doit avoir un domaine qui couvre la puissance de sortie de l'amplificateur (ex: 0 à 50 Watts). Utiliser un capteur 0-10W l'endommagerait.
2. **Justesse :** Le capteur doit être très juste pour s'assurer que l'amplificateur fonctionne dans les limites légales et de sécurité. Une erreur systématique (manque de justesse) pourrait entraîner une violation des réglementations.
3. **Fidélité :** Il doit être fidèle pour détecter de manière fiable les petites fluctuations de puissance pouvant indiquer un défaut.
4. **Résolution :** Il doit avoir une résolution suffisante pour mesurer de petits ajustements de puissance (ex: pas de 0,1 W).
5. **Linéarité :** Le capteur doit être linéaire pour qu'un changement de 1 dB de la puissance d'entrée se traduise par un changement cohérent et prévisible de la tension de sortie, quel que soit le niveau de puissance absolu.

En évaluant ces caractéristiques statiques, un ingénieur en télécommunications peut choisir le bon capteur et avoir confiance dans les données qu'il fournit.

5. Perspective

Conférence Suivante : Nous continuerons avec la **Classification des Capteurs**. Nous explorerons comment les capteurs sont classés en **Passifs ou Actifs**, et ce que nous entendons par **Capteurs Logiciels (Software Sensors)** dans le contexte des télécommunications modernes.

6. Questions pour l'Étude Personnelle

1. Un thermomètre numérique affiche 25,1°C, 25,2°C et 24,9°C lors de trois mesures consécutives du même bain-marie. Si la température vraie est de 26,0°C, commentez la justesse et la fidélité de l'instrument.
2. Un capteur de force a un domaine de mesure de 0-100 N et une sortie de 0-5 V. Si la sortie change de 0,05 V pour un changement de force de 1 N, quelle est sa sensibilité ?
3. Expliquez une situation réelle en télécommunications où l'hystérésis d'un capteur pourrait poser problème. (Indice : Pensez à une pièce mobile dans un système de positionnement d'antenne).