Chapitre 3 - Précision de la chaîne de mesure, Calibrage et Etalonnage

J. Unger – janvier 2005

Modèle linéaire

- Réponse linéaire Y = GX + Of
  - G = Gain (pente de la droite)
  - Of = Décalage (ordonnée à l'origine)
- Le fabricant indique les valeurs nominales
  - G_n et Of_n
- Les grandeurs d'influence et l'effet de charge modifient G et Of. Bruit, perturbations et écarts du modèle math s'ajoutent à Y
- Le calcul est une estimation de X: $X_m = \frac{Y - Of_n}{G_n}$

Erreur

- **Erreur absolue** (e) : Écart entre la valeur mesurée et la vraie valeur

  L'erreur a donc un signe, positif ou négatif !! $e = X_m - X$

- **Erreur relative** (ε) : Quotient entre erreur absolue et vraie valeur

  $\varepsilon = \frac{e}{X} \approx \frac{e}{X_m}$

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Formulation de l'erreur

- Réponse réelle : $Y = G_r \cdot X + Of_r + L(X,t)$
- erreur :

$$e = X_m - X = \frac{Y - Of_n}{G_n} - X = \frac{G_r X + Of_r + L - Of_n}{G_n} - X$$

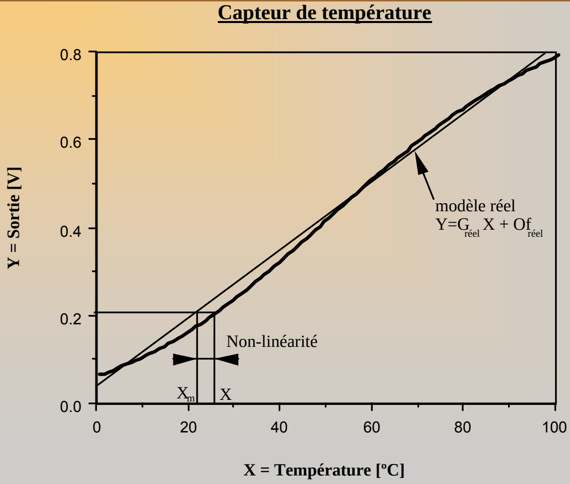
$$e = X \cdot \frac{G_r - G_n}{G_n} + \frac{Of_r - Of_n}{G_n} + \frac{L(X,t)}{G_n} = \alpha \cdot X + D + NL$$

Composantes de l'erreur

- Erreur systématiques *(prédictibles)*:
  - Erreur de gain $\alpha = \frac{G_r - G_n}{G_n}$
  - Erreur de décalage $D = \frac{Of_r - Of_n}{G_n}$
- Erreurs aléatoires: $NL = \frac{L(X,t)}{G_n}$
  - Non-linéarité : écart entre la réponse et la droite
  - Bruit et perturbations

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Non-linéarité



Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

Incertitude

- Incertitude = limite maximum de l'erreur
  - Valeur limite que peut prendre l'erreur (en valeur absolue), avec un certain degré de confiance, en général 99 %.
  - $I > |e|$ *(99 fois sur 100)*
- Une partie proportionnelle à la mesure X
  - α en % lect (10^{-2}) ou ‰lect (10^{-3}) ou ppm lect (10^{-6})
- Une partie indépendante de X
  - B [unités de X] = limite de (D+NL)

Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

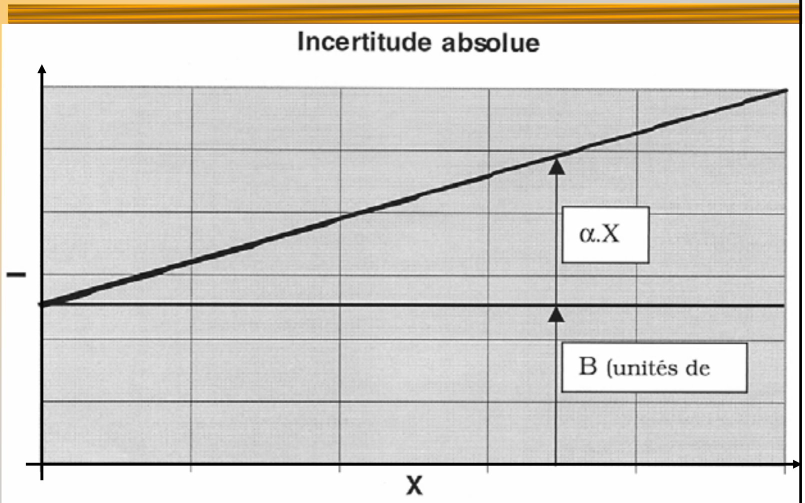
Spécification de l'incertitude indépendante de X

- B en [unités de X]
- B' en unités d'affichage [unités de Y]
  - Analogique : div = divisions de l'échelle
  - Numérique : digit = LSB = résolution de mesure
- β proportion relative à une référence
  - Gamme de mesure (range)
  - « pleine échelle » (pe ou fs)

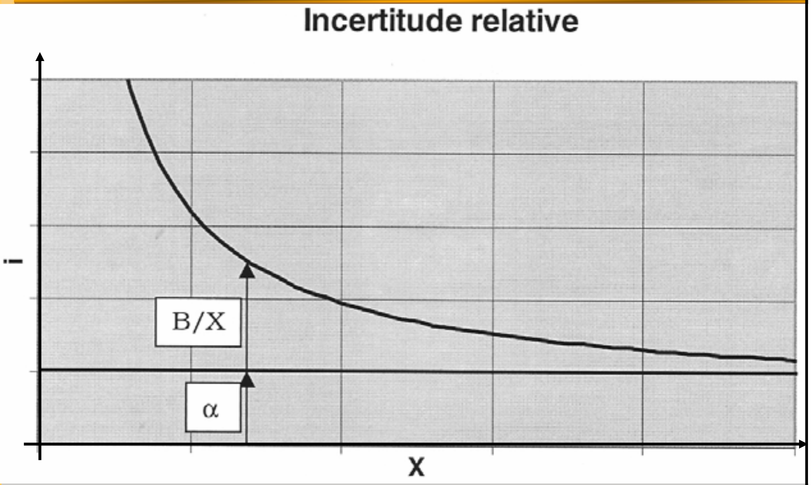
Calcul de l'incertitude

- Convertir la spécification B' ou β en unités de X (→ B)
  - B = B'·LSB
  - B = β· gamme
- Calculer en fonction de la valeur affichée
  - $I = \alpha \cdot X_m + B$
- Incertitude relative : $i = \frac{I}{X_m} = \alpha + \frac{B}{X_m}$

Incertitude absolue



Incertitude relative (dans une gamme)



Calibrage et étalonnage

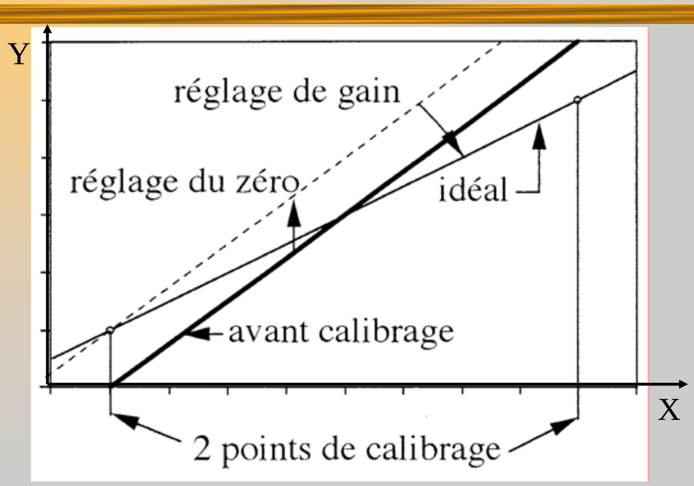
- Calibrage = ajuster pour la meilleure réponse possible
  - Compenser les effets des grandeurs d'influences actuelles (en particulier le vieillissement)
- Etalonnage = déterminer les erreurs actuelles
  - Détermination des marges d'incertitude
- Imposer un mesurande X connu – relever ou ajuster la réponse

Moyens d'imposer un X connu

- Définition du mesurande
  - Court-circuit, circuit ouvert, absence de masse…
  - Très rares, sans incertitude (sauf bruit)
- Etalon
  - Pile étalon, masse étalon, R-étalon …
  - Faible incertitude, peu de valeurs différentes
- Source ajustable et appareils de précision
  - Exige des appareils à incertitude 10x plus petite
  - Utilisé dans la majorité des cas
- Simulation du capteur ou du transmetteur
  - Le moins précis, ne tient pas compte du capteur !!

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Calibrage -méthode



Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

Calibrage - méthode

- Droite par 2 point X_o et X_1
- Calcul de Y_o et Y_1 par l'équation nominale
- Imposer X_o, ajuster Of *(« zéro »)* pour obtenir Y_o
- Imposer X_1, ajuster G *(« Gain » ou « Span »)* pour obtenir Y_1
- Répéter les 2 ajustages (indépendance des 2 réglages)

Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

Incertitudes résiduelles de calibrage

- Relever les incertitudes du mesurande
    - ΔX_o et ΔX_1
- Déterminer les incertitudes d'ajustage
    - Potentiomètre, bruit, frottement…
        - ΔY_o et ΔY_1
        - Écart max de l'affichage par rapport aux valeurs nominales
        - Numérique minimum 0.5digit

Incertitudes résiduelles

- Calcul du gain

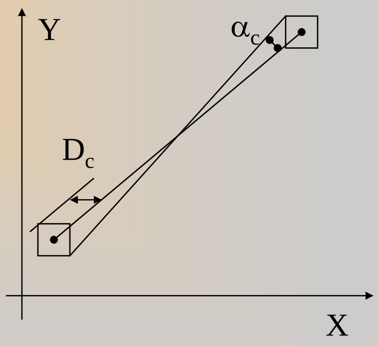
$$G_n = \frac{Y_1 - Y_o}{X_1 - X_o}$$

- Décalage initial

$$D_c = \Delta X_o + \frac{\Delta Y_0}{G_n}$$

- Err. de gain initiale

$$\alpha_c = \frac{D_c + \Delta X_1 + \dfrac{\Delta Y_1}{G_n}}{X_1 - X_o}$$



Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Avantages du calibrage

- A intervalles réguliers (6 mois, 1 an …)
  - Compense le vieillissement
- Juste avant une série de mesures
  - Les grandeurs d’influences changent peu pendant la série
  - On compense alors les effets des grandeurs d’influence (éventuellement effet de charge)
  - Ne restent que les non-linéarités + bruits et perturbations

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Linéarité - Conformité

- Relever la courbe de réponse
  - Nombre N de point élevés (≥30 … 100)
    - Pour mieux approcher l'écart max (statistiques)
  - Aller-retour sur la courbe
    - Mise en évidence de l'hystérèse
  - Plusieurs aller-retour
    - Mise en évidence de la répétabilité
- Tableau des mesures X[i], Y[i], i = 0..N-1

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Optimiser le modèle actuel

- Déterminer l'étendue de mesure (FSR)
    - Pas de saturations, zone de validité du modèle mathématique
- Généralement par la méthode des moindres carrés
  - somme minimale du carré des erreurs (régression, curve - fitting, best fit)
    - Régression linéaire (« meilleure » droite)
    - Régression polynomiale
    - Régression non-linéaire
- Linéaire : droite par deux des points mesurés
    - Extrémités (end-point linearity)
    - Zéro et xxx %(étendue de mesure)

Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

Comparer les modèles actuels et nominal

- Dans le cas linéaire
  - Erreur de gain $\alpha = \frac{G_r - G_n}{G_n}$
  - Erreur de décalage $D = \frac{Of_r - Of_n}{G_n}$
- Il s'agit des erreurs actuelles, elles ont donc un signe
  - Pour déterminer les incertitudes il faudrait refaire des étalonnages dans tout le domaine des grandeurs d'influence et rechercher la val abs. maximum

Chapitre 3 : Précision de la chaîne

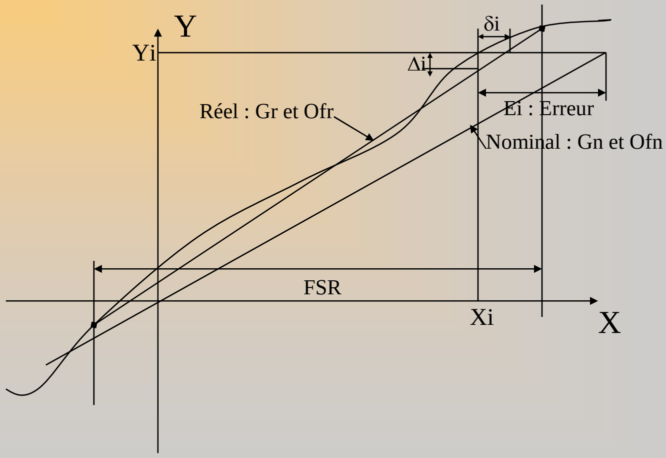
Calibrage et Etalonnage

Composantes supplémentaires

- Composantes indépendantes de la mesure
  - Spécification : écart maximum en unités de X
    - Cas particulier d'un composant de la chaîne: peut parfois se spécifier en unités de Y (par ex A/D)
  - Correspond à un incertitude (borne supérieure de l'écart) donc sans signe
  - Se détermine par rapport au modèle actuel
    - Ne pas confondre avec l'erreur totale (par rapport au modèle nominal)

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Erreur totale ≠ Composantes



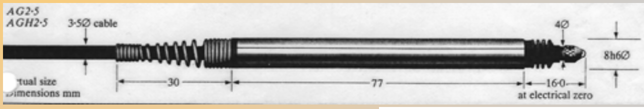
Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Non-Linéarité – Non conformité

- Pour chaque point mesuré, déterminer l’écart entre la courbe et le modèle réel
  - Vertical (unités de Y) : $\Delta i = Yi - (GrXi + Ofr)$
  - Horizontal (unités de X) : $\delta i = Xi - (Yi - Ofr)/Gr$
- Rechercher la spécification d’incertitude
  - $NL = \max\{|\Delta i|/Gr\} = \max\{|\delta i|\}$
- Méthode analogue pour Hystérèse et Répétabilité

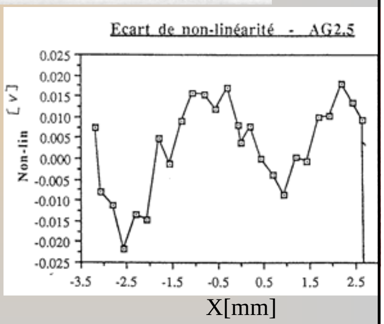
Exemple: étalonnage d'un palpeur LVDT

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibr



Mechanical	
LVDT type	*AG2·5*
Half-bridge type	*AGH2·5*
Linear stroke	±2·5mm
Maximum stroke	6·0mm
Spring rate	13g/mm
Force at electrical zero	90g
Non-repeatability	<0·15µm
Temperature range	−40 to +100°C
Temperature coefficient	
Zero	<0·005%/°C
Sensitivity	<0·005%/°C
Non-linearity	0·1, 0·3, 0·5%

Electrical	
LVDT type	*AG2·5*
Current	10mA
Input/output phase shift	2°
Zero phase frequency	4kHz
Sensitivity, typical	150mV/V/mm
Calibrated at 5V rms 5kHz into 100kΩ	
Half-bridge type	*AGH2·5*
Current	8mA
Input/output phase shift	5°
Zero phase frequency	20kHz
Sensitivity, typical	84mV/V/mm
Calibrated at 5V rms 10kHz into 1kΩ	



Ofr = -4.61 mV |Δ|max = 22 mV

Gr = 2.0311 V/mm NL = 11 µm

Auto-zéro et auto-calibrage

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

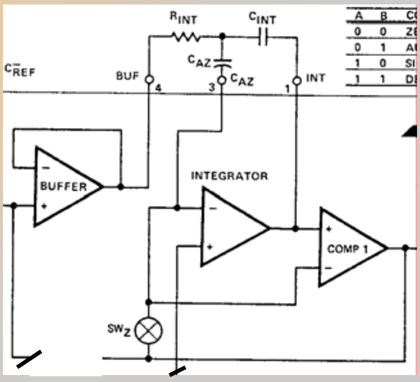
✶ Calibrage automatique avant les mesures
- Gain évident de performances
- Compléter le circuit avec des interrupteurs (FET) pour débrancher l'entrée, et la remplacer par un court-circuit (auto-zéro), puis par une tension de référence précise (auto-calibrage complet).
- Mémorisation des termes de correction de calibrage (analogique ou numérique).

Auto-zéro analogique

Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

- Les interrupteurs créent une contre-réaction permettant de charger un condensateur Caz à égalité avec les offsets du circuit. Ce condensateur est ensuite utilisé en série avec la tension à mesurer
- Exemple TSC500 circuit de conversion double-rampe



Auto-calibrage numérique

Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

- Mémorisation de l'indication pour une entrée nulle Yo (Of_r = Yo)
- Mémorisation de l'indication pour l'entrée de référence Vréf : Y_1, puis calcul du gain

$$G_r = \frac{Y_1 - Yo}{Vréf - 0}$$

- Pas d'ajustage, donc exige un calibrage manuel à intervalles réguliers (vieillissement).

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Compensation des erreurs systématiques dans tout le domaine

- Principe:
  - Identifier l'effet de la grandeur d'influence Zi
  - Mesure auxiliaire de Zi
  - Correction de l'équation mathématique en fonction de Zi
- Exemples capteurs pièzo-électriques

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Coefficients d'influence

- Hypothèse : variation linéaire dans le domaine – étalonnages aux deux valeurs extrêmes de Z_i : Z_{i1} et Z_{i2}
- Coef. de gain :

$$\frac{d\alpha}{dZ_i} = \frac{dG_r / G_r}{dZ_i} \cong \frac{G_r(Z_{i1}) - G_r(Z_{i2})}{G_n \cdot (Z_{i1} - Z_{i2})}$$

- Coef. de décalage :

$$\frac{dD}{dZ_i} = \frac{dOf_r / G_r}{dZ_i} \cong \frac{Of_r(Z_{i1}) - Of_r(Z_{i2})}{G_n \cdot (Z_{i1} - Z_{i2})}$$

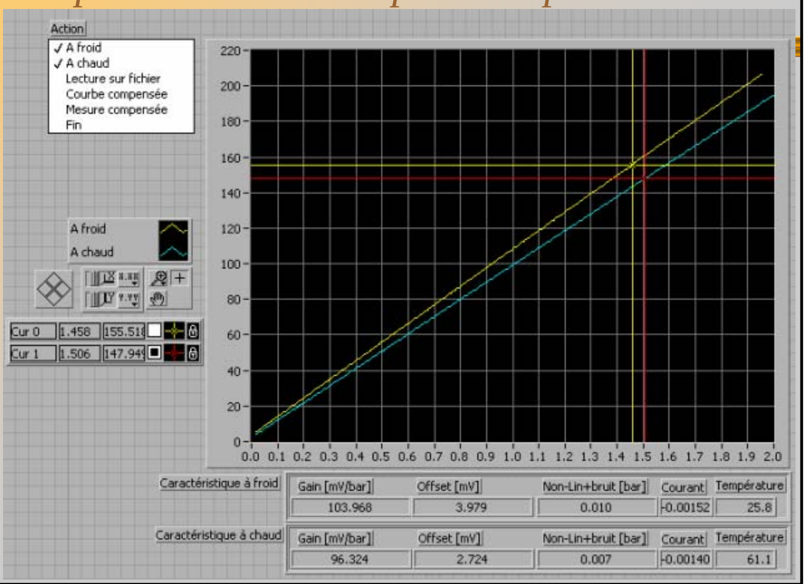
Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Correction en cours de travail

- Lire Zi et Y (sortie de la chaîne)
- Calcul de Gr et Ofr, à partir de Gr1, Ofr1, de la variation de Zi : (Zi-Zi1), et des coefficients d'influence (dα/dZ et dD/dZ)
- Calcul de Xm, à l'aide de Gr, Ofr et de la sortie Y de la chaîne

Chapitre 3 : Précision de la chaîne
Calibrage et Etalonnage

Exemple d'identification de l'influence de la température sur un capteur de pression



Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

Généralisation: Moteur de correction IEEE 1451-1

- On calcule par des fonctions polynomiales multivariables (mesurande et grandeurs d'influence)

$$\sum_{i=0}^{D(1)}\sum_{j=0}^{D(2)}\cdots\sum_{p=0}^{D(n)} C_{i,j,\cdots,p}[X_1 - H_1]^i[X_2 - H_2]^j\cdots[X_n - H_n]^p$$

  - X_1 .. X_n correspondent aux sorties des chaînes de mesure
  - Les degrés de chaque variable sont donnés par D(1..n)
  - Le polynôme permet d'exprimer les contributions de chaque variable (influences croisées)
  - L'effet de chaque variable est donné par sa variation par rapport à une référence $H_{1..n}$

jan 2005 HES-SO - EIVD - J. Unger 33

Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

Exemple linéaire à 2 variables

- Le mesurande et la grandeur d'influence ont seulement des termes de 1er degré. Soit X_1 le mesurande et X_2 la grandeur d'influence
- $X_m = C_{00} + C_{10}\cdot(X_1-H_1)+C_{01}\cdot(X_2-H_2) + C_{11}\cdot(X_1-H_1)\cdot(X_2-H_2)$
  - … en supposant également $H_1 = H_2 = 0$:
- $X_m = \underbrace{C_{00}}_{D} + \underbrace{C_{01}\cdot X_2}_{\Delta D(X_2)} + X_1\cdot(\underbrace{C_{10}}_{G} + \underbrace{C_{11}\cdot X_2}_{\Delta G(X_2)})$

jan 2005 HES-SO - EIVD - J. Unger 34

Chapitre 3 : Précision de la chaîne

Calibrage et Etalonnage

Segmentation

- But: Limiter le degré des polynômes (coefficients à mémoriser + temps de calcul)
- Chaque variable est décomposée en segments
- Dans chaque cellule on utilise des polynôme plus simples