

Étalonnage d'un dynamomètre

Dans cette partie, seul est traité l'étalonnage d'un capteur avec des forces statiques. L'aspect dynamique n'est pas abordé.

La relation entre la force appliquée à un dynamomètre et la mesure de son signal de sortie ne pouvant pas être déterminée avec précision lors de sa fabrication ou par calcul, il est nécessaire, d'effectuer un **étalonnage** du dynamomètre. Cette opération consiste à établir la relation précise entre la force appliquée au dynamomètre –"grandeur d'entrée"- et le signal électrique qu'il délivre –"grandeur de sortie"-. Concrètement l'opération s'effectue en appliquant au dynamomètre des forces connues avec précision et à relever les valeurs fournies par un équipement électronique associé au capteur. Les résultats obtenus sont donnés sous la forme d'un tableau de valeurs ou d'un polynôme mathématique qui permettent à l'utilisateur du dynamomètre de connaître la valeur de la force à partir de l'indication fournie par l'équipement électronique associé. La détermination de l'incertitude associée fait également partie de l'étalonnage. Celle-ci est établie conformément au "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure" établi par le Bureau International des Poids et Mesure (BIPM).

L'étalonnage est généralement effectué en appliquant le protocole défini par la norme internationale **ISO 376**. La norme **ASTM E 74** constitue également un protocole propre aux Etats-Unis. D'autres protocoles d'étalonnage peuvent être définis en fonction de l'utilisation du dynamomètre et du niveau d'incertitude recherché.

L'étalonnage d'un dynamomètre doit être effectué avec des forces référencées à l'unité de force –le newton- tel que défini par le Système International des Unités (SI). La traçabilité à ce système d'unités n'est formellement garantie que pour les laboratoires d'étalonnage appliquant la norme ISO 17025 et accrédités par un des organismes nationaux d'accréditation (SMB, COFRAC, DKD, UKAS...).

APPLICATION DES EFFORTS AU CAPTEUR

Le banc d'étalonnage doit pouvoir appliquer des forces uni-directionnelles dans l'axe d'effort du capteur. A cet effet, l'axe selon lequel les forces sont appliquées par le banc doit être matérialisé et le capteur doit être centré sur cet axe. Ceci est assuré par un montage mécanique rigoureux du capteur sur le banc d'étalonnage.

Quelque soit sa qualité métrologique, un banc d'étalonnage n'engendre jamais des efforts parfaitement uni-directionnels. Des composantes d'effort et des couples parasites, dues aux imperfections du banc sont également appliqués au capteur. Les indications fournies par le dynamomètre s'en trouvent affectées selon la sensibilité du capteur à ces efforts. Le signal électrique est augmenté ou diminué selon la direction de ces composantes parasites. Or la direction de celles-ci sont généralement constantes pour une force donnée du banc d'étalonnage. L'importance de l'interaction entre le dynamomètre étalonné et les efforts parasites engendrés par le banc d'étalonnage est mise en évidence par une procédure particulière. Plusieurs séries d'application des efforts sont effectuées et entre chaque série le capteur est tourné autour de son axe d'effort d'un angle représentant un tour complet divisé par le nombre de séries de mesure, soit un angle de 180° pour 2 séries, 120° pour 3 séries ou 90° pour 4 séries. La moyenne des résultats obtenus à un palier de charge donné supprime une grande partie de l'influence des efforts parasites et leur dispersion -ou reproductibilité- et un bon indicateur de cette influence.

Enfin la réponse du capteur à des sollicitations dépend grandement de la façon dont les contraintes appliquées se répartissent à l'intérieur du capteur. A cet effet, les caractéristiques géométriques et

fonctionnelles des pièces mécaniques de liaison avec le banc d'étalonnage sont essentielles et conditionnent les résultats de l'étalonnage. Elles doivent donc être définies et décrites avec précision.

DISPOSITIF ELECTRIQUE ASSOCIE AU CAPTEUR

Deux cas sont à considérer selon que le capteur est fourni avec son dispositif électrique associé ou non.

Dans le premier cas, les conditions de réglage de la chaîne de mesure doivent être définies. Si cette chaîne est munie d'un dispositif de calibrage, celui-ci doit être actionné, relevé et éventuellement réglé en fonction des besoins de l'utilisateur. Si un réglage du calibrage est effectué cela entraîne une perte de la traçabilité des mesures effectuées avec le dynamomètre et les valeurs du calibrage obtenues avant et après son réglage doivent être relevées. Une modification du calibrage après l'étalonnage invalide cet étalonnage.

Lorsque le capteur seul est à étalonner, le laboratoire d'étalonnage lui associe un dispositif de mesure qui permet d'alimenter électriquement le capteur et d'en mesurer le signal de sortie. Les caractéristiques et les réglages de ces dispositifs d'alimentation et de mesure doivent être définies précisément en accord avec l'utilisateur du capteur. Les liaisons électriques réalisées doivent être précisées. La traçabilité des mesures électriques au Système International d'Unités (SI) doit être garantie. Les résultats de l'étalonnage ne seront applicables que si l'utilisateur associe ensuite au capteur une chaîne de mesure présentant des caractéristiques et des réglages similaires à ceux obtenus lors de l'étalonnage et avec une garantie similaire de la traçabilité électrique. Dans tous les cas l'utilisateur du dynamomètre doit intégrer au calcul d'incertitude des forces mesurées à l'aide de ce dynamomètre des composantes qui prennent en compte le remplacement du dispositif électrique associé au capteur.

PRINCIPAUX PARAMETRES D'ÉTALONNAGE D'UN DYNAMOMETRE

Les principaux paramètres nécessaires à la définition d'un étalonnage sont les suivants :

- L'identification du capteur et de l'instrumentation associée au capteur, y compris les câbles de liaison
- Le sens de sollicitation du capteur : Traction et/ou Compression
- La nature et les caractéristiques des interfaces mécaniques utilisées pour appliquer les forces
- Le domaine d'étalonnage défini par les forces maximales et minimales appliquées
- Application de charges croissantes uniquement ou croissantes et décroissantes
- Les conditions de mise en charge du capteur : pré-charges éventuelles, temps d'attente pour stabiliser la force, temps de relaxation entre deux séries de charge...etc.
- L'incertitude d'étalonnage ou la classe de précision recherchée

CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

Les principales caractéristiques métrologiques relevées lors d'un étalonnage sont les suivantes :

- La résolution du dynamomètre. Celle-ci correspond au plus petit incrément de lecture de l'indication
- La répétabilité des mesures. Celle-ci caractérise la dispersion des indications obtenues au cours de plusieurs séries de mesures pour un même palier de charge et effectuées **sans modifier** la position du capteur sur le banc d'étalonnage
- La reproductibilité des mesures. Celle-ci caractérise la dispersion des indications obtenues au cours de plusieurs séries de mesures pour un même palier de charge et effectuées **en modifiant** la position angulaire du capteur entre les séries de mesures.
- La réversibilité ou hystérésis. Elle caractérise la différence des indications obtenues à un même palier de charge par chargement croissant puis décroissant.
- Erreur de conformité, d'interpolation ou de linéarité. Les indications obtenues en fonction des charges appliquées peuvent être modélisées par un polynôme qui permet de calculer du signal délivré par le

dynamomètre pour une valeur quelconque de la force dans le domaine d'étalonnage. Les écarts constatés entre les valeurs moyennes des indications relevées à chaque palier de charge et celles données par le polynôme définissent les erreurs de conformité ou d'interpolation, appelées également erreur de non linéarité si la modélisation est une droite.

- Fluage sous charge. Cette caractéristique traduit le fait que l'indication relevée sous une charge maintenue constante évolue lentement du fait d'un comportement imparfaitement élastique du matériau et des éléments détecteur du capteur. Ceci entraîne une indécision quand à l'indication à relever. Pour pallier cet inconvénient des durées de maintien de la charge et d'attente après suppression de cette charge sont définies. Une évaluation de l'importance de ce phénomène est effectuée en relevant dans des conditions précises l'indication à force nulle à la fin de chaque série d'application des forces au capteur. Cette caractéristique est très importante car elle conditionne largement la qualité de l'étalonnage.

RESULTAT ET INCERTITUDE D'ETALONNAGE

La meilleure façon de donner le résultat de l'étalonnage est de fournir à l'utilisateur du capteur un polynôme de degré 1, 2 ou 3 lui permettant de calculer la force en fonction de l'indication fournie par le dynamomètre. Par exemple dans le cas du degré 2 ce résultat est de la forme :

$$F = a.D^2 + b.D + c$$

Dans lequel

F est la force appliquée au dynamomètre en unité de force (mN, daN, kN, MN)

a , b et c sont des constantes

$D = I_F - I_0$ est la déformation du dynamomètre pour la force F

I_F = Indication à la force F

I_0 = Indication à la force nulle

De même la meilleure expression de l'incertitude d'étalonnage est de la forme :

$$U(F) = A + B.F$$

U = incertitude élargie sur la force F avec un facteur d'élargissement $k = 2$

A = constante exprimée en unité de force

B = constante sans dimension

L'incertitude d'étalonnage est calculée en prenant en compte au moins les composantes suivantes :

- incertitude sur les forces appliquées au capteur
- résolution de l'indication
- répétabilité des indications
- reproductibilité des indications
- l'écart d'indication à force nulle avant et après l'application d'une série de charges
- la température et ses fluctuations au cours de l'étalonnage
- erreur d'interpolation

Ces différentes composantes sont évaluées pour chaque palier de force et l'incertitude combinée correspondante calculée. Une régression linéaire en fonction de la force est ensuite appliquée à ces incertitudes combinées et le résultat est élargi avec le facteur d'élargissement égal à 2.

Lorsque le dynamomètre fournit des indications directement en unité de force, les résultats de l'étalonnage sont généralement donnés sous la forme d'erreurs d'indication pour chaque palier de force avec son incertitude associée établie en prenant en compte les composantes citées ci-dessus.

Les résultats de l'étalonnage d'un dynamomètre doivent être accompagnés de tous les éléments nécessaires à leur compréhension et à une bonne utilisation du dynamomètre. Tous les paramètres d'étalonnage doivent être précisés. Ceci inclus en particulier le montage mécanique d'application des efforts et les réglages du dispositif indicateur associé au capteur.

UTILISATION D'UN DYNAMOMETRE

L'utilisation d'un dynamomètre doit se faire en respectant les paramètres définis lors de son étalonnage. Tout changement significatif par rapport à ces conditions est de nature à invalider les résultats de l'étalonnage.

L'incertitude sur la force mesurée à l'aide d'un dynamomètre étalonné doit être évaluée en prenant en compte :

- l'incertitude d'étalonnage du dynamomètre
- les composantes caractérisant le dynamomètre et la mesure effectuée : résolution, répétabilité et reproductibilité des mesures, effet de la température, fluage...etc.
- les composantes résultant d'une différence éventuelle par rapport aux conditions d'étalonnage : changement d'indicateur de mesure, procédure de mise en charge ou application des forces différentes...etc.
- une composante faisant intervenir l'évolution de la sensibilité du dynamomètre depuis le précédent étalonnage

La stabilité dans le temps de la sensibilité d'un dynamomètre n'étant pas garantie, il est nécessaire de faire procéder régulièrement à son ré-étalonnage avec une périodicité qui dépend essentiellement du capteur et de l'utilisation qui en est faite. A titre indicatif, la norme ISO 376 recommande une périodicité qui n'excède pas 2 ans.