

# Étalonnage de masses “spéciales”, comment répondre aux besoins des clients ?

Laure Domenech<sup>1\*</sup>, David Benhamou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CT2M, 13 250 Saint Chamas, France

**Abstract.** Le présent article décrit de retour d'expérience du laboratoire d'étalonnage de masses du CT2M concernant l'étalonnages de masses dites « spéciales ». Dans un cadre de métrologie scientifique, les besoins des laboratoires et des industriels sont très diversifiés et nous ont amené à étalonner des masses de caractéristiques diverses et bien différentes des spécifications de l'OIML R111 [1], principal texte de référence en métrologie légale concernant l'étalonnage des poids et masses étalons.

## 1 Rappel du référentiel réglementaire

L'étalonnage d'une masse consiste à déterminer sa masse conventionnelle.

La notion de « masse conventionnelle » est développée dans le document OIML D28 [2] qui le définit comme étant « pour un poids pris à la température de référence de 20 °C, la masse conventionnelle est la masse d'un poids de référence d'une densité de 8000 kg m<sup>-3</sup> qu'elle équilibre dans un air de masse volumique de 1,2 kg.m<sup>-3</sup> ».

Dans un cadre de métrologie légale, les poids étalons utilisés auront donc des caractéristiques conformes à l'OIML R111, notamment en termes de masse volumique (s'approchant au maximum de 8000 kg.m<sup>-3</sup>) mais également de forme, de matériau utilisé, d'état de surface, de marquage et de présentation.

Tout classement selon ce texte nécessite donc un strict respect de ces exigences, sauf si le constructeur a obtenu une approbation de modèle pour son poids.

Même si beaucoup de laboratoires et d'industriels qui n'ont pas d'obligation en termes de métrologie légale utilisent l'OIML R111 comme référentiel, de plus en plus axent leur métrologie sur les besoins spécifiques et contraintes propres à leur activité.

## 2 Des masses spéciales aux spécificités très diverses

Afin de contrôler leurs balances, les laboratoires et industriels ont tout intérêt à adapter les moyens de contrôles aux besoins qu'ils ont, aux types d'objets pesés et/ou aux contraintes liées au processus de pesée.

Par conséquent, les objets étalonnés peuvent s'éloigner des spécifications de l'OIML R11 en termes :

- de valeur nominale
- de forme
- de matière

### 2.1 Valeur nominale

L'OIML R111 précise que les masses ont des valeurs correspondant à des multiples de 1, 2 et 5.

Or, en fonction des besoins des clients, des valeurs nominales différentes peuvent être choisies par les utilisateurs. Il est en effet plus pertinent de contrôler une balance au point correspondant à la masse des objets pesés.

Par conséquent, des masses de 250 g, de 30 kg ou de 60 kg sont régulièrement étalonnées.

Certaines masses possèdent également des valeurs correspondant à des forces (en Newton) afin d'étalonner des dynamomètres.

Enfin, certains utilisateurs font étalonner des objets, non pas pour en faire un moyen de contrôle de leur balance, mais parce qu'ils ont besoin de connaître précisément leur poids.

### 2.2 Forme

L'OIML R111 définit des formes bien spécifiques pour les masses et poids étalons. En fonction des valeurs nominales et des classes, les formes autorisées sont précisément décrites : ce sont principalement des formes cylindriques et des formes de type « valise ».

La spécificité des formes des masses spéciales est directement liée à leur utilisation.

Ainsi, les masses peuvent avoir des formes de disques, de boule, de cuve, de chariot...

\* Corresponding author: [ldomenech@ct2m.fr](mailto:ldomenech@ct2m.fr)



Fig. 1. Exemple de chariot étalon



Fig. 2. Exemple de "boule de billard étalon"

### 2.3 Matière

L'OIML R111 définit les caractéristiques en termes de matière qui permettent, dans un premier temps, d'assurer la pérennité de la valeur de la masse (état de surface, résistance à l'usure, dureté, ...) mais également de s'approcher, au plus, de la densité de  $8000 \text{ kg.m}^{-3}$ , conformément à la définition de la masse conventionnelle.

Les matières principalement utilisées sont l'acier inoxydable, le laiton, la fonte.

Mais d'autres matériaux peuvent être utilisés pour la fabrication de masses spéciales, dans la mesure où ils assurent la pérennité de la masse.

## 3 Des étalonnages adaptés aux spécificités des masses spéciales et aux besoins des clients

### 3.1 Une adaptation des moyens d'étalonnage

Chaque demande d'étalonnage fait l'objet d'une étude concernant sa faisabilité opérationnelle : étalon(s) utilisé(s), nécessité de mise en place d'un support, choix du comparateur en fonction des dimensions, ....

#### 3.1.1 Choix des étalons

L'étalonnage de masses spéciales a nécessité d'adapter les procédures du laboratoire.

Le principe de l'étalonnage consiste en une double pesée de Borda, c'est-à-dire, la réalisation de cycle(s) de type EMME : pose de l'étalon (E), puis de la masse à étalonner (M), à nouveau de la masse (M) puis de l'étalon (E).

La masse à étalonner et l'étalon doivent avoir une valeur conventionnelle proches afin de pouvoir négliger les effets de non linéarité des comparateurs. Par conséquent, dans le cadre de masses ayant des valeurs

nominales « non standard », il est nécessaire d'adapter les moyens d'étalonnage :

Par exemple, une masse de 60 kg sera étalonnée à partir d'un assemblage de 2 étalons : un étalon de 50 kg et un étalon de 10 kg. La valeur conventionnelle de l'assemblage sera égale à la somme des valeurs conventionnelles des 2 étalons.



Fig. 3. Exemple d'assemblage d'étalons pour l'étalonnage d'une masse de 60 kg

On essaiera de limiter le nombre de masses additives utilisées afin d'éviter tout risque de chute et de détérioration des étalons. Dans la mesure du possible, un maximum de 2 masses sera utilisé.

Ainsi, dans certains cas, il n'est pas possible de s'approcher de la valeur nominale avec 2 étalons uniquement : par exemple, une masse de 180 mg devrait être étalonnée avec un assemblage de 100 mg + 50 mg + 20 mg + 10 mg, soit 4 masses étalon.

Cette manipulation n'étant pas aisée, il a été choisi de plutôt procéder par ajout d'une masse additive à la masse du client : cela consiste à étalonner un assemblage composé de la masse du client et d'un étalon afin d'obtenir une masse totale proche de la valeur d'un étalon.

Dans le cas de la masse de 180 mg, une masse additive de 20 mg permet d'obtenir un assemblage de 200 mg et d'étalonner ainsi le tout par rapport à notre étalon de 200 mg. A l'issue de l'étalonnage, la valeur conventionnelle de l'assemblage est déterminée et la valeur conventionnelle de la masse spéciale est déduite, puisque l'on connaît la valeur conventionnelle de l'étalon ajouté.

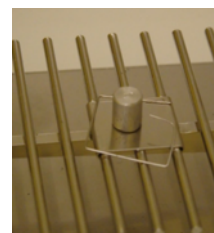


Fig. 4. Exemple d'assemblage sous forme de masse additive (180 mg + 20 mg)

#### 3.1.2 Mise en place d'un support

Certaines masses ne permettent pas d'être positionnées de manière stable sur les comparateurs. C'est le cas des boules et de masses cylindriques à doubles crochets.

Il a donc été nécessaire de développer des supports spécifiques à chaque masse permettant un étalonnage dans des conditions optimales, sans risque de chute.

L'exemple suivant montre le support fabriqué pour l'étalonnage de masses cylindriques à double crochet de 5 et 10 et 20 kg.



**Fig. 5.** Exemple d'assemblage sous forme de masse additive (180 mg + 20 mg)

### 3.1.3 Utilisation d'un comparateur adapté

Les dimensions de certaines masses spéciales ne permettent pas, dans certains cas, de réaliser l'étalonnage car elles n'entrent pas dans la cage de pesée. Il est donc nécessaire de choisir un comparateur dont la cage de pesée sera plus grande.

### 3.2 Une incertitude d'étalonnage adaptée

L'incertitude d'étalonnage demandée par les clients sur une masse spéciale est rarement une incertitude s'approchant des meilleures incertitudes du laboratoire (de type F1).

Pour autant, chaque demande d'étalonnage fait l'objet d'un calcul d'incertitude intégrant les différents facteurs d'influence. La méthodologie générale de calcul de l'incertitude mise en œuvre est décrite dans le document COFRAC LAB GTA 22 [3].

Les facteurs d'influence suivants sont pris en compte :

- incertitude de fidélité de l'étalonnage  $u_f$
- incertitude liée à la résolution du comparateur  $u_r$
- incertitude liée à la valeur conventionnelle de l'étalon utilisé  $u_{E\_conv}$
- incertitude liée à la pérennité de la valeur conventionnelle de l'étalon utilisé  $u_p$
- incertitude liée à la poussée de l'air  $u_{pa}$
- incertitude liée à la linéarité du comparateur  $u_l$

Par rapport à un étalonnage standard, les incertitudes type qui sont impactées lors d'un étalonnage de masse spéciale peuvent être les suivantes.

#### 3.2.1 Incertitude sur la valeur conventionnelle de l'étalon

L'incertitude liée à la valeur conventionnelle de l'étalon (dans le cas d'un assemblage de plusieurs étalons ou l'utilisation d'une masse additive et d'un étalon) est alors la somme des incertitudes individuelles des étalons (conformément au § C 6.2.2) :

$$u_{E\_conv} = \sum u_{E\_conv\_i} \quad (1)$$

Hypothèse d'un facteur de corrélation égal à 1 entre les incertitudes des différentes masses étalon.

#### 3.2.2 Incertitude sur la pérennité de l'étalon

L'incertitude liée à la pérennité des étalons, conformément au LAB GTA 22, elle est au moins égale à  $u_{E\_conv}$

$$u_p = u_{E\_conv} \quad (2)$$

#### 3.2.3 Incertitude sur la correction de poussée de l'air

Cette composante sera d'autant plus importante que le matériaux dans lequel est fabriqué la masse spéciale a une masse volumique qui s'éloigne des 8000 kg.m<sup>3</sup>.

Conformément au document OIML R 111 (§ C.5.1), la correction de poussée de l'air C à appliquer est :

$$C = (\rho_{air} - \rho_0) \left( \frac{1}{\rho_M} - \frac{1}{\rho_E} \right) \quad (3)$$

Avec  $\rho_{air}$  la masse volumique de l'air,

$\rho_0$  la masse volumique de référence (1,2 kg.m<sup>3</sup>),

$\rho_M$  la masse volumique de la masse à étalonner

$\rho_E$  la masse volumique de l'étalon.

Le document OIML R111 précise également que cette correction peut être négligée si elle est inférieure au tiers de l'incertitude relative, soit :

$$|C| \leq \frac{1}{3} \frac{U}{m_0} \quad (4)$$

Avec U : l'incertitude de l'étalonnage standard pour la masse considérée

$m_0$  la valeur nominale de la masse.

Si la correction de poussée de l'air est négligeable :

$$u_{pa} = \sqrt{u_b^2 + (m_{cr} \times C)^2} \quad (\text{selon l'OIML D28}) \quad (5)$$

Si la correction de poussée de l'air n'est pas négligeable, cette correction doit être appliquée selon le facteur C défini ci-dessus et :  $u_{pa} = u_b$

Selon l'équation (3), la correction de poussée de l'air dépend donc principalement de la masse volumique de la masse étalonnée puisque les conditions ambiantes du laboratoire sont maîtrisées et ne s'écartent pas de plus de 5% de la masse volumique de référence. Par conséquent, plus la masse volumique de la masse à étalonner s'écarte de la masse volumique de référence (8000 kg.m<sup>3</sup>), plus la correction sera importante.

Par expérience, dans la majorité des cas, la correction de poussée de l'air sera négligeable.

D'après l'OIML R111, ub se calcule de la manière suivante :

$$u_b^2 = m_{cr}^2 \left[ \left( \frac{1}{\rho_E} - \frac{1}{\rho_M} \right)^2 \times u_{\rho_{air}}^2 + \left( \frac{\rho_{air} - \rho_0}{\rho_M^2} \right)^2 \times u_{\rho_M}^2 + (\rho_{air} - \rho_0) \left[ (\rho_{air} - \rho_0) - 2 \times (\rho_{air1} - \rho_0) \right] \times \frac{u_{\rho_E}^2}{\rho_E^4} \right] \quad (6)$$

Avec  $m_{cr}$  la valeur conventionnelle de la masse étalon  
 $\rho_{air}$  la masse volumique de l'air durant l'étalonnage  
 $\rho_E$  la masse volumique de l'étalon  
 $\rho_M$  la masse volumique de la masse à étalonner  
 $\rho_0$  la masse volumique de l'air de référence (1,2 kg.m<sup>3</sup>)  
 $\rho_{air1}$  la masse volumique de l'air durant l'étalonnage de la masse étalon  
 $u_{\rho_{air}}$  l'incertitude sur la masse volumique de l'air durant l'étalonnage  
 $u_{\rho_M}$  l'incertitude sur la masse volumique de la masse étalonnée  
 $u_{\rho_E}$  l'incertitude sur la masse volumique de l'étalon

La masse volumique de l'air étant maîtrisée, enregistrée et suivie dans le laboratoire, on prendra  $\rho_{air} = \rho_{air1} = \rho_0 = 1,2 \text{ kg.m}^3$ .

L'équation (6) se simplifie donc :

$$u_b = m_{cr} \times \sqrt{\left( \frac{1}{\rho_E} - \frac{1}{\rho_M} \right)^2} \times u_{\rho_{air}} \quad (7)$$

Avec  $\rho_E$  la masse volumique de nos étalons  
 $\rho_M$  la masse volumique de la masse à étalonner établie à partir des données de l'OIML R111  
 $u_{\rho_{air}}$  l'incertitude sur la masse volumique de l'air durant l'étalonnage.

### 3.2.4 Incertitude sur la linéarité du comparateur

Dans le cas où la masse étalonnée a une valeur conventionnelle différente de la masse étalon, il est nécessaire de prendre en compte dans l'incertitude d'étalonnage, un éventuel défaut de linéarité du comparateur.

Cette caractéristique est évaluée périodiquement dans le cadre des essais réalisés sur les comparateurs au sein du laboratoire par la dépose d'une surcharge représentant l'écart entre la masse étalon et la masse à étalonner. L'erreur de linéarité est comparée à une tolérance ( $EMT_{linéarité}$ ). La conformité du comparateur à cette EMT de linéarité nous permet d'évaluer l'incertitude associée sur la base d'une loi uniforme d'étendue égale à 2 x  $EMT_{linéarité}$  :

$$u_l = \frac{2 \times EMT_{linéarité}}{2 \times \sqrt{3}} = \frac{EMT_{linéarité}}{\sqrt{3}}$$

### 3.2.5 Incertitude type composée et élargie

Les différents facteurs d'influence étant supposés indépendants, l'incertitude-type composée s'obtient en effectuant la somme quadratique des incertitudes

$$u_c = \sqrt{\sum_i u_i^2}$$

L'incertitude élargie est ensuite obtenue en multipliant l'incertitude-type composée par le facteur d'élargissement  $k=2$  soit

$$U = 2 u_c$$

## 4 Conclusion

Le laboratoire d'étalonnage de masse du CT2M a mis en place un processus de gestion des masses spéciales qui permet de répondre au mieux au besoin du client en lui proposant une prestation individualisée.

Une étude préalable sur la faisabilité est effectuée lors de la revue de contrat, puis une vérification à réception des masses permet d'affiner les conditions d'étalonnages et le calcul d'incertitude.

Les conditions d'étalonnages sont formalisées sur le certificat d'étalonnage qui reprend la totalité des informations nécessaires à la traçabilité de ces étalonnages spécifiques (nombre de cycles, étalons utilisés, comparateur utilisé, incertitude spécifique, ...).

Un projet de développement de logiciel d'étalonnage de masses permettant, notamment, d'automatiser l'émission de ce type de certificat est en cours.

## Références

1. OIML R111-1 : Poids des classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3et M3. Partie 1 : Exigences métrologiques et techniques, **77** (2004)
2. OIML D28 Valeur conventionnelle de la pesée dans l'air, **11** (2004)
3. LAB GTA 22 Guide technique d'accréditation Métrologie des Masses, révision 1, **17** (2012)