

Métrologie

Procédure d'étalonnage et de vérification des Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique (IPFNA)

Partie 2 : Étalonnage

E : Metrology — Calibration and verification procedure for non-automatic weighing instruments — Part 2 : Calibration
 D : Metrologie — Eichnungs- und Kontrollverfahren der nichtselbsttätigen Waagen — Teil 2 : Eichung

Fascicule de documentation

publié par l'AFNOR en décembre 1997.

Correspondance

À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux européens ou internationaux traitant du même sujet.

Analyse

Le présent document complète la norme NF X 07-010 «Métrologie — La fonction métrologique dans l'entreprise». Il constitue un guide à l'usage de ceux qui doivent rédiger les procédures d'étalonnage d'Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique (IPFNA).

Le présent document applique à ce genre d'instruments les recommandations générales données dans le fascicule de documentation X 07-016 quant aux modalités pratiques pour l'établissement des procédures d'étalonnage et de vérification des moyens de mesure.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : métrologie, instrument de mesurage, instrument de pesage, étalonnage, vérification, contrôle métrologique, mode opératoire.

Modifications

Corrections

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex
 Tél. : 01 42 91 55 55 — Tél. international : + 33 1 42 91 55 55



Membres de la commission de normalisation

Président : M BARBIER

Secrétariat : M CLOAREC — AFNOR

M	ALLIOUZ	ESSO SAF
M	ALVERNHE	BUREAU DE NORMALISATION DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE (BNAE)
M	ANTOINE	LABORATOIRE CENTRAL DES INDUSTRIES ELECTRIQUES (LCIE)
M	ARRIAT	BUREAU VERITAS
MME	AUTIQUET	SNCF
M	BARBIER	AEROSPATIALE
MME	BAVELARD	CERIB
MME	BERNAZZANI	KODAK INDUSTRIE
M	BORREIL	MINISTERE DE LA DEFENSE — DGA DCA CEAT
M	BRIGODIOT	AEROSPATIALE
M	BRUNET	AFNOR
M	BRUNSCHWIG	
MME	BUIL	SOFIMAE SA
M	BUSUTTIL	GDF
M	CHAILLIE	AUTOMOBILES PEUGEOT
M	COLLAY	ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
M	CORDEBOIS	DASSAULT AVIATION
M	DABERT	THOMSON CSF SERVICES INDUSTRIE
MME	DE PALMA	ECM METROLOGIE
M	DEVIGNES	SNCF
M	DUMONT	SCHNEIDER ELECTRIC SA
M	ERARD	LABORATOIRE CENTRAL DES INDUSTRIES ELECTRIQUES (LCIE)
M	FOLLIOT	LABORATOIRE DE RECHERCHES BALISTIQUES ET AERODYNAMIQUES (LRBA)
M	FOURCADE	CEA CESTA
M	GELY	SOPEMEA SA
M	KELLER	BUREAU NATIONAL DE METROLOGIE (BNM)
MME	KOPLEWICZ	UNION DE NORMALISATION DE LA MECANIQUE (UNM)
M	KRYNICKI	HEWLETT PACKARD FRANCE
M	LARQUIER	MCE CONSEIL
M	LAULAGNET	INERIS
M	LE BECHEC	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC)
M	LEGEAY	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC)
MME	LENAN	E2M
M	LEVEL	SANOFI RECHERCHE
M	MAGANA	MINISTERE DE L'INDUSTRIE — DARPMI
M	MARDELLE	DASSAULT ELECTRONIQUE
M	MARSCHAL	LABORATOIRE NATIONAL D'ESSAIS (LNE)
M	MARTINEZ	CIM CONSULTANTS
M	MICHEL	MINISTERE DE LA DEFENSE — DGA — DSTI — ETBS
M	MILLERET	SOMELEC SA
M	MONAT	CTIF
M	NAUDOT	ALCATEL CIT
MME	NOTIS	AFNOR
M	ODRU	UNPP
M	PENIN	SOMELEC SA
M	PICHON	AFNOR
M	PINAUD	THOMSON CSF SERVICES INDUSTRIE
M	PRIEL	LABORATOIRE NATIONAL D'ESSAIS (LNE)
M	PRIN	MINISTERE DE LA DEFENSE — DGA CELAR
M	RAMBAUD	TEKTRONIX SA
M	REGNAULT	LABORATOIRE NATIONAL D'ESSAIS (LNE)

MME	RENARD	ECOLE DES MINES DE DOUAI
M	REPOSEUR	COMITE FRANCAIS D'ACCREDITATION (COFRAC)
M	ROBIN	AFNOR
M	SERVENT	UNION TECHNIQUE DE L'ELECTRICITE (UTE)
M	STAROPOLI	GDF
M	TURPAIN	SYNDICAT DE LA MESURE
M	VANHALWYN	ROHDE ET SCHWARZ
M	VULOVIC	GDF DION RECHERCHE CERMAP

Membres du groupe de travail «Procédure d'étalonnage et de vérification des balances» :

Animateur : MME RENARD

M	ALLIOUZ	ESSO SAF
MME	BAVELARD	CERIB
M	BARBERON	SARTORIUS
M	DE BEAUFORT	METTLER TOLEDO SA
M	DELLA MARTINA	COMITE FRANCAIS D'ACCREDITATION (COFRAC)
M	JACQUEMET	PRECIA/MOLEN
M	KOZLOWSKI	TESTUT
MME	LAGAUTERIE	MINISTERE DE L'INDUSTRIE — DARPMI-SOUS DIRECTION DE LA METROLOGIE
M	LAULAGNET	INERIS
M	LE BECHEC	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC)
M	LEGEAY	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC)
M	LOUVEL	METTLER TOLEDO S.A.
M	MONAT	CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES DE LA FONDERIE (CTIF)
M	RENARD	ECOLE DES MINES DE DOUAI
M	TURPAIN	SYNDICAT DU PESAGE ET DU COMPTAGE
M	VERWAERDE	MINISTERE DE L'INDUSTRIE-DRIRE NORD-PAS-DE-CALAIS

Sommaire

	Page
Avant-propos	5
0 Introduction	5
1 Domaine d'application	5
2 Références normatives	5
3 Définitions	6
3.1 instruments de pesage	6
3.2 instruments de pesage à fonctionnement non automatique	6
3.3 instruments à équilibre non automatique	6
3.4 masse conventionnelle	7
3.5 poussée de l'air	7
3.6 erreur de mesure	7
3.7 étalonnage	7
3.8 ajustage	7
3.9 réglage	7
3.10 exactitude d'un instrument de mesure	7
3.11 erreur de justesse	7
3.12 justesse	7
3.13 fidélité	7
3.14 mobilité	7
3.15 sensibilité	8
3.16 valeur brute	8
3.17 valeur nette	8
3.18 résolution	8
3.19 échelon	8
3.20 traçabilité	8
3.21 raccordement	8
3.22 opérateur	8
3.23 utilisateur	8
4 Procédure d'étalonnage	9
4.1 Méthode	9
4.2 Conditions d'environnement et d'installation	9
4.3 Moyens d'étalonnage	9
4.3.1 Étalons	9
4.3.2 Autres moyens	10
4.4 Programme d'étalonnage	10
4.5 Opérations préliminaires	10
4.6 Mode opératoire d'étalonnage	11
4.6.1 Répétabilité	11
4.6.2 Justesse	11
4.7 Calcul de l'incertitude d'étalonnage	11
4.7.1 Incertitude liée à la répétabilité (u_q)	11
4.7.2 Incertitude liée à la résolution (u_r)	12
4.7.3 Incertitude liée à l'influence de la température	12
4.7.4 Incertitude liée à la grandeur appliquée	13
4.8 Présentation des résultats	15
4.9 Recommandation d'utilisation	16

Avant-propos

Ce fascicule de documentation complète la norme NF X 07-010 «Métrologie — La fonction métrologique dans l'entreprise». Il reprend les éléments contenus dans les différentes normes citées en référence, en particulier le fascicule de documentation X 07-016, et peut servir de guide pour l'élaboration de procédures d'étalonnage adaptées aux Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique (IPFNA). Il s'appuie sur le synoptique (annexe A de la norme NF X 07-010) explicitant les démarches d'étalonnage.

Il est supposé que le personnel chargé, d'une part de l'élaboration et d'autre part de l'application des procédures possède la compétence métrologique. Ce point particulier ne sera plus évoqué par la suite.

La détermination de l'intervalle d'étalonnage n'est pas du ressort du présent guide.

Dans ce qui suit, des informations sont données à titre d'exemple, afin de conseiller la prise en charge des différentes causes d'incertitude pour le calcul d'incertitude estimée dans les conditions d'étalonnage de l'IPFNA.

0 Introduction

Le présent document s'inscrit dans la série des fascicules de documentation relatifs aux instruments de mesure et à ce titre, développe principalement les modalités à appliquer pour la rédaction des procédures d'étalonnage des Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique (IPFNA).

1 Domaine d'application

Le présent document a pour objet de fixer les règles essentielles d'établissement des procédures d'étalonnage des Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique.

En France, depuis le 1^{er} janvier 1993, seuls les Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique utilisés pour des usages réglementés par le décret n° 91-330 du 27 mars 1991 sont soumis à des dispositions réglementaires.

En conséquence, pour des usages non réglementés, il est de la responsabilité de l'utilisateur de maîtriser ses Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique conformément à la norme NF X 07-010.

Le présent document est applicable par toute personne devant rédiger les procédures d'étalonnage des IPFNA à usage non réglementé, quel qu'en soit le type.

2 Références normatives

Ce document comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à ce document que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

NF X 07-001:1994	Normes fondamentales — Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.
NF X 07-010:1992	Métrologie — La fonction métrologique dans l'entreprise.
FD X 07-012:1995	Métrologie — Métrologie dans l'entreprise — Certificat d'étalonnage des moyens de mesure.
X 07-015:1993	Métrologie — Essais — Métrologie dans l'entreprise — Raccordement des résultats de mesure aux étalons.

X 07-016:1993	Métrieologie — Essais — Métrieologie dans l'entreprise — Modalités pratiques pour l'établissement des procédures d'étalonnage et de vérification des moyens de mesure.
FD X 07-017-1:1995	Métrieologie — Procédure d'étalonnage et de vérification des Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique (IPFNA) — Partie 1 : Vérification.
XP X 07-020:1996	Normes fondamentales — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.
NF EN ISO 8402	Management de la qualité et assurance de la qualité — Vocabulaire (indice de classement : X 50-120).
NF EN 45501:1993	Aspects métrieologiques des instruments de pesage à fonctionnement non automatique (indice de classement : E 12-000).

Recommandation RM Aéro 800 25 «Guide pour le suivi métrieologique d'instrument de mesure — Optimisation des intervalles de confirmation métrieologique».

Recommandation de l'Organisation Internationale de Métrieologie Légale (OIML) R 33 : Valeur conventionnelle du résultat des pesées dans l'air.

Recommandation de l'Organisation Internationale de Métrieologie Légale (OIML) R 111 : Poids des classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₂, M₃.

Circulaire n° 92.00.600.001.1 du 15/10/92 relative aux «masses-étalons et poids-étalons»

NOTE : La recommandation RM Aéro 800 25 est disponible au Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace (BNAE) Technoplis 54 — 199 rue Jean-Jacques Rousseau — 92138 Issy les Moulineaux cedex.

Les recommandations de l'OIML sont disponibles au Bureau International de Métrieologie Légale, 11 rue Turgot, 75009 PARIS.

La circulaire N° 92.00.600.001.1 est disponible au Ministère de l'Industrie, Sous-Direction de la Métrieologie, 22 rue Monge, 75005 PARIS.

3 Définitions

Les termes couramment utilisés sont définis dans les normes NF X 07-001, NF X 07-010 et NF EN 45501. Les termes principaux sont cités ci-dessous. Lorsque leurs définitions ne sont pas expressément données, il est fait un renvoi aux normes concernées.

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent :

3.1 instruments de pesage

NF EN 45501 (T.1.1).

3.2 instruments de pesage à fonctionnement non automatique

NF EN 45501 (T.1.2).

3.3 instruments à équilibre non automatique

NF EN 45501 (T.1.2.5).

3.4 masse conventionnelle

R 33 (Recommandation de l'Organisation Internationale de Métrologie Légale).

3.5 poussée de l'air

R 33 (Recommandation de l'Organisation Internationale de Métrologie Légale).

3.6 erreur de mesure

NF X 07-001 (3.10).

3.7 étalonnage

NF X 07-001 (6.11).

3.8 ajustage

NF X 07-001 (4.30).

3.9 réglage

NF X 07-001 (4.31).

NOTE : Calibrage est quelquefois une traduction impropre de l'anglais «calibration» qui signifie étalonnage.

3.10 exactitude d'un instrument de mesure

NF X 07-001 (5.18).

3.11 erreur de justesse

NF X 07-001 (5.25).

3.12 justesse

NF X 07-001 (5.25).

3.13 fidélité

NF X 07-001 (5.27) et EN 45501 (T 4.3).

3.14 mobilité

NF X 07-001 (5.11) et NF EN 45501 (T 4.2).

3.15 sensibilité

NF X 07-001 (5.10) et NF EN 45501 (T 4.1).

3.16 valeur brute

NF EN 45501 (T.5.2.1).

3.17 valeur nette

NF EN 45501 (T.5.2.2).

3.18 résolution

NF X 07-001 (5.12).

3.19 échelon

Échelon, valeur d'une division (d'échelle) : NF X 07-001 (4.22).

Différence entre les valeurs correspondant à deux repères successifs.

NOTE : Cette notion est équivalente à la définition de l'échelon réel (d) donnée dans la norme EN 45501.

Échelon réel (d) : NF EN 45501 (T.3.2.3).

Valeur exprimée en unités de masse :

- de la différence entre les valeurs correspondant à deux repères consécutifs, pour une indication analogique ; ou
- de la différence entre deux indications consécutives, pour une indication numérique.

3.20 traçabilité

Dans ce document le terme de traçabilité recouvre la traçabilité technique (NF X 07-001) et la traçabilité documentaire (NF EN ISO 8402).

3.21 raccordement

[Voir la note 3 de la NF X 07-001 (6.10 Traçabilité).] La manière dont s'effectue la liaison aux étalons est appelée raccordement aux étalons.

3.22 opérateur

Désigne la (ou les) personne(s) chargée(s) de l'étalonnage.

3.23 utilisateur

Désigne la (ou les) personne(s) chargée(s) de l'utilisation de l'IPFNA.

4 Procédure d'étalonnage

Comme tout équipement de mesure, un IPFNA demande des précautions d'emploi et d'usage qui devront être respectées par l'opérateur.

Lorsque les caractéristiques métrologiques de l'IPFNA sont différentes des caractéristiques d'utilisation, ces dernières doivent apparaître sur l'équipement de mesure et/ou sur tout document attaché à l'équipement.

4.1 Méthode

La méthode d'étalonnage consiste à comparer, dans les conditions décrites et quantifiées par l'opérateur, si possible sur le lieu d'utilisation habituel, les indications de l'IPFNA aux valeurs conventionnellement vraies des masses étalons.

4.2 Conditions d'environnement et d'installation

L'opérateur décrit les conditions d'environnement et d'installation (stabilité du support, etc.) et dresse une liste des grandeurs d'influence susceptibles d'influer sur l'opération d'étalonnage.

À titre d'exemple, les principales grandeurs d'influence sont :

- la température ;
- l'hygrométrie ;
- la pression atmosphérique ;
- la gravité ;
- les vibrations ;
- les courants d'air, le flux d'air ;
- les champs électriques ;
- les champs magnétiques ;
- etc.

4.3 Moyens d'étalonnage

4.3.1 Étalons

Établir la liste des masses étalons nécessaires. Les masses étalons utilisées font l'objet d'un raccordement aux étalons nationaux et leur traçabilité est établie. Tous ces éléments peuvent être contenus dans des fiches de vie ou décrits dans des documents distincts.

Les masses étalons doivent :

- être propres (utilisation de chiffons ou de pinceaux, en cas de poussière) ;
- être conservées à l'abri de la poussière ;
- être manipulées avec soin (utilisation de gants en peau ou en coton, de pinces, d'élingues adaptées) ;
- avoir des incertitudes ou des erreurs maximales tolérées sur leurs valeurs compatibles avec les besoins.

4.3.2 Autres moyens

Les autres moyens éventuels utilisés lors de l'étalonnage doivent faire l'objet d'un raccordement aux étalons nationaux, par exemple :

- thermomètre ;
- hygromètre ;
- baromètre, etc.

4.4 Programme d'étalonnage

Les points d'étalonnage sont définis à partir de la (des) plage(s) d'utilisation et en fonction des besoins de l'utilisateur.

La liste non exhaustive ci-dessous présente, sans ordre de priorité, les principaux paramètres susceptibles d'être pris en compte lors de l'étalonnage et de son calcul d'incertitude :

- la répétabilité ;
- la résolution ;
- l'influence de la température ;
- la grandeur appliquée ;
- la justesse ;
- la sensibilité (cas de balance à fléau) ;
- la mobilité ;
- l'excentration ;
- le fluage ou la dérive sous charge ;
- le dispositif de mise à zéro et/ou de tarage ;
- etc.

Le programme d'étalonnage proposé est fondé sur les essais ou observations énumérés ci-après :

- la répétabilité ;
- la résolution ;
- l'influence de la température ;
- la grandeur appliquée (valeur de l'étalon, pérennité de l'étalon, poussée de l'air) ;
- la justesse.

4.5 Opérations préliminaires

Les opérations préliminaires listées ci-après sont recommandées :

- s'assurer de l'identification de l'IPFNA ;
- s'assurer de l'absence de défauts évidents ;
- s'assurer de la propreté et du bon état du récepteur de charge (plateau, crochet, etc.) de l'IPFNA ;
- s'assurer que l'IPFNA est dans la position dans laquelle l'ajustage de son fonctionnement a été effectué (par exemple : mise de niveau) ;
- mettre sous tension l'IPFNA ; attendre le temps de chauffage indiqué sur la notice du constructeur ;
- si nécessaire, faire le réglage de l'IPFNA ;
- s'assurer que les conditions d'environnement et d'installation sont celles décrites en 4.2.

4.6 Mode opératoire d'étalonnage

L'ordre ci-dessous a été guidé par un souci de limiter le temps de manipulation et d'immobilisation de l'IPFNA. Le mode opératoire est donné à titre indicatif. Les relevés d'indication peuvent se faire :

- par lecture directe de l'affichage ;
- par la méthode (dite méthode du seuil) décrite en A.4.4.3 «Évaluation des erreurs» de la norme NF EN 45501. Il conviendra d'utiliser la même méthode de relevé d'indication tout au long des opérations d'étalonnage.

4.6.1 Répétabilité

La répétabilité est l'estimation des caractéristiques de fidélité d'un IPFNA.

Elle est déterminée en plusieurs points régulièrement répartis dans la plage d'étalonnage (par exemple 10 pesées répétées en trois points : au minimum, au milieu et au maximum de la plage d'étalonnage).

4.6.2 Justesse

L'étalonnage est effectué à différentes valeurs de charge appartenant à la plage d'étalonnage (le relevé peut être effectué à cinq valeurs de charge lorsque la plage d'étalonnage est identique à l'étendue de mesure de l'IPFNA).

Selon le mode d'utilisation de l'IPFNA, l'essai peut être effectué :

- en charges croissantes ;
- en charges décroissantes ;
- en charges croissantes et décroissantes.

4.7 Calcul de l'incertitude d'étalonnage

4.7.1 Incertitude liée à la répétabilité (u_q)

4.7.1.1 Si la résolution de l'IPFNA est suffisante pour détecter des écarts de répétabilité, la variance relative à la répétabilité pour chacun des points est donnée par la formule suivante :

$$u_q^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Deux exploitations sont possibles :

- si les résultats sont fonction de la charge, on pourra trouver une modélisation enveloppant l'ensemble des points de la forme : $a + bM$;
- sinon, on choisit le majorant.

4.7.1.2 Si la résolution de l'IPFNA n'est pas suffisante pour détecter des écarts de répétabilité la variance relative à la répétabilité est donnée par la formule suivante :

$$u_q^2 = \frac{d^2}{12} \text{ (loi de distribution rectangulaire)}$$

où :

d est l'échelon de l'IPFNA.

4.7.2 Incertitude liée à la résolution (u_r)

L'incertitude de lecture dépend de la résolution. La variance de lecture est donnée par la formule suivante :

$$u_r^2 = \frac{r^2}{6}$$

(loi de distribution rectangulaire appliquée à la lecture du zéro et à la lecture de la masse : $2 \times \frac{r^2}{12}$)

- a) résolution d'un IPFNA à indication numérique lorsque les mesures sont effectuées par lecture directe :
— la résolution est donnée par la formule suivante :

$$r = k_n d$$

où :

d est l'échelon de l'IPFNA ;

k_n est un coefficient supérieur ou égal à 1 déterminé en fonction du plus petit chiffre significatif exploité, pour tenir compte, entre autre, de l'instabilité de l'affichage, du besoin, etc ;

EXEMPLE : Pour un IPFNA dont l'échelon d est 5 kg, la résolution r à considérer peut être, selon le choix de l'utilisateur :

- soit $r = 5$ kg (dans ce cas $k_n = 1$) ;
- soit $r = 10$ kg (dans ce cas $k_n = 2$).

b) résolution d'un IPFNA à indication numérique lorsque les mesures sont effectuées par «la méthode du seuil». Cette méthode est détaillée en A.4.4.3 «Évaluation des erreurs» de la norme NF EN 45501. La résolution est donnée par la formule suivante :

$$r = m_a$$

où :

m_a sont les masses additionnelles utilisées pour la méthode du seuil ;

c) résolution d'un IPFNA à indication analogique. La résolution est donnée par la formule suivante :

$$r = k_a d$$

où :

d est l'échelon de l'IPFNA ;

k_a est un coefficient inférieur ou égal à 1.

EXEMPLE : Si on interpole à la demi-division, ou à $d/3$ ou à $d/5$, k_a est égal respectivement à $1/2$, ou à $1/3$ ou à $1/5$.

4.7.3 Incertitude liée à l'influence de la température

L'influence de la température sur les mesurages est normalement décrite par le fabricant dans la documentation de l'IPFNA.

En l'absence de données, le tableau 1 ci-après donne des valeurs acceptables.

Tableau 1

Nombre maximal d'échelons de l'IPFNA n	Coefficient de variation maximale de la justesse en fonction de la température pour des IPFNA à usage réglementé δ	Coefficient de variation maximale de la justesse en fonction de la température pour les autres IPFNA δ
1 000	$250 \times 10^{-6} / K$	$2 500 \times 10^{-6} / K$
10 000	$25 \times 10^{-6} / K$	$250 \times 10^{-6} / K$
100 000	$5 \times 10^{-6} / K$	$50 \times 10^{-6} / K$
au-delà	$1,5 \times 10^{-6} / K$	$15 \times 10^{-6} / K$

Une bonne stabilité de la température permet de diminuer l'incertitude liée à ce paramètre. La variation éventuelle de la température pendant l'étalonnage entraîne une incertitude qui peut être évaluée de la façon suivante :

$$u_t^2 = \frac{W^2}{12} \text{ (loi de distribution rectangulaire)}$$

où :

W est l'étendue de la variation de la justesse due à la variation de la température pendant l'étalonnage.

W est donnée par le calcul suivant, dans la même unité que «m» :

$$W = m \times \delta \times [(T_{\max} + U_{th}) - (T_{\min} - U_{th})]$$

avec :

m est la valeur de la charge appliquée ;

δ est le coefficient de variation de la justesse de l'IPFNA en fonction de la variation de la température ;

$T_{\max} - T_{\min}$ est la variation de la température pendant l'étalonnage de l'IPFNA ;

U_{th} est l'incertitude élargie d'utilisation du thermomètre.

EXEMPLE : Soit un IPFNA :

— dont la variation de la justesse en fonction de la température δ est :

$$250 \times 10^{-6} / K ;$$

— avec une température variant pendant l'étalonnage de 5 K ;

— avec un thermomètre dont l'incertitude élargie d'utilisation U_{th} est 1 K.

$$W = m \times 1,75 \times 10^{-3}$$

4.7.4 Incertitude liée à la grandeur appliquée

Trois cas peuvent se présenter pour les masses-étalons utilisées :

— ces masses sont étalonnées mais utilisées à la valeur nominale ;

— ces masses sont étalonnées et utilisées à leur valeur conventionnelle ;

— ces masses sont classées (on ne prend en compte ni leur valeur conventionnelle ni les incertitudes d'étalonnage).

4.7.4.1 Valeur de l'étalon

a) les masses sont étalonnées :

$$u_e^2 = \frac{U_e^2}{k^2}$$

où :

U_e est l'incertitude élargie d'étalonnage de la masse considérée ;

k est le facteur d'élargissement ;

b) les masses sont classées et on ne prend en compte ni leur valeur conventionnelle ni les incertitudes d'étalonnage.

Dans ce cas la variance relative à l'étalonnage d'une masse est donnée par la formule suivante :

$$u_e^2 = \frac{EMT^2}{3}$$

où :

EMT est l'erreur maximale tolérée (en + et -) de la classe de la masse considérée.

Dans le cas de combinaison de masses, la résultante de l'incertitude est la somme arithmétique de l'incertitude sur chaque masse si une corrélation est supposée (par exemple dans le cas de masses de même valeur nominale étalonnées dans le même laboratoire). Sinon la résultante de l'incertitude sera la somme quadratique de l'incertitude sur chaque masse.

4.7.4.2 Pérennité des étalons

a) les masses sont classées et la périodicité de raccordement définie dans la Circulaire n° 92.00.600.001.1 du 15/10/92 relative aux «masses-étalons et poids-talons» est respectée.

L'incertitude due à la pérennité est prise en compte dans l'erreur maximale tolérée de la classe et il n'y a pas lieu d'ajouter une composante spécifique ;

b) autres cas :

— masses dont on connaît l'historique, la variance due à la pérennité des étalons est donnée par la formule conventionnelle suivante :

$$u_p^2 = \frac{e_p^2}{4}$$

avec :

e_p est l'écart maximal entre deux étalonnages consécutifs déterminée à partir de trois étalonnages successifs au minimum ;

NOTE : Cette valeur est à réviser à chaque étalonnage.

— masses dont on ne connaît pas l'historique : se référer à la recommandation RM Aéro 80 025 (optimisation des intervalles de confirmation métrologique).

À titre indicatif et dans l'attente de constituer un historique de l'étalon, si la durée d'utilisation entre les deux premiers étalonnages est inférieure ou égale à un an, on peut considérer que la variance due à la pérennité des étalons est donnée par la formule suivante :

$$u_p^2 = u_e^2$$

où :

u_e est l'incertitude-type d'étalonnage de la masse.

4.7.4.3 Poussée de l'air

Une correction de poussée de l'air doit être appliquée avant de déterminer l'incertitude.

La variation de la poussée de l'air pendant l'étalonnage entraîne une incertitude qui peut être évaluée de la façon suivante :

$$u_a^2 = \frac{(\delta M_c)^2}{12} \text{ (loi de distribution rectangulaire)}$$

où :

δM_c représente l'intervalle dans lequel est comprise la masse conventionnelle des étalons.

L'intervalle résulte de la méconnaissance de la masse volumique de l'air ambiant τ_a et de la masse volumique des étalons τ_M qui n'est généralement pas de 8 000 kg/m³ (masse volumique conventionnellement choisie des étalons de masse).

L'intervalle δM_c est donné par la formule suivante :

$$\delta M_c = M_v \times \delta \tau_a \times \left| \frac{1}{\tau_m} - \frac{1}{8\,000} \right|$$

où :

M_v est la masse vraie ;

$\delta \tau_a$ représente l'écart possible sur la masse volumique de l'air ambiant (dû à sa méconnaissance) ;

τ_M représente la masse volumique des masses-étalons.

Dans le cas d'un mesurage où une incertitude plus importante peut être acceptée, on pourra utiliser la formule simplifiée majorante suivante :

$$\delta M_c = m \times 60 \times 10^{-6}$$

avec m représentant la valeur totale des masses-étalons au point d'étalonnage, dans les limites suivantes :

- $\delta \tau_a = 0,218 \text{ kg/m}^3$ correspondant aux conditions limites ci-dessous :
 - température : $293 \text{ K} \pm 10 \text{ K}$;
 - pression atmosphérique : $101\,325 \text{ Pa} \pm 5\,000 \text{ Pa}$;
 - hygrométrie : $50 \% \text{ HR} \pm 40 \% \text{ HR}$.
- τ_M compris entre $2\,500 \text{ kg/m}^3$ et $9\,000 \text{ kg/m}^3$.

4.8 Présentation des résultats

Le tableau 2 ci-après récapitule les calculs d'incertitude d'étalonnage.

Tableau 2

Cause d'incertitude	Conditions particulières		
	Répétabilité	La résolution de l'IPFNA est suffisante $u_q^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$	La résolution de l'IPFNA n'est pas suffisante $u_q^2 = \frac{d^2}{12}$
Lecture	$u_r^2 = \frac{d^2}{6}$		
Température	$u_t^2 = \frac{(m \times \delta \times [(T_{\max} + U_{th}) - (T_{\min} - U_{th})])^2}{12}$		
Grandeur appliquée		Valeur de l'étalon : masse étalonnée (valeur conventionnelle) $u_e^2 = \frac{U_e^2}{k^2}$	Valeur de l'étalon : masse classée $u_e^2 = \frac{EMT^2}{3}$
		Pérennité de l'étalon : masse classée $u_e^2 = 0$	Pérennité de l'étalon : masse avec historique $u_e^2 = \frac{e_p^2}{4}$
			Pérennité de l'étalon : masse sans historique $u_p^2 = u_e^2$
	Poussée de l'air : $u_e^2 = \frac{(\delta M_c)^2}{12}$		

L'incertitude-type composée u_c en chaque point de l'étalonnage de l'IPFNA est :

$$u_c = \sqrt{u_q^2 + u_r^2 + u_t^2 + u_e^2 + u_p^2 + u_a^2}$$

L'incertitude élargie en chaque point de l'étalonnage de l'IPFNA est :

$$U = 2u_c$$

L'enregistrement de l'étalonnage est conforme à 4.8 du fascicule de documentation X 07-016.

4.9 Recommandation d'utilisation

Pour le calcul d'incertitude de la mesure ou de l'essai la démarche proposée comporte deux étapes. La première consiste à étalonner l'IPFNA dans des conditions de référence définies. La seconde consiste à évaluer les causes d'erreur et les composantes de l'incertitude liée à la mesure et aux conditions habituelles d'utilisation. Ceci permet de calculer l'incertitude d'utilisation et d'effectuer les corrections jugées nécessaires.

Les conditions d'utilisation peuvent différer des conditions d'étalonnage en particulier, pour les paramètres suivants :

- la température ;
- l'hygrométrie ;
- la pression atmosphérique ;
- la charge appliquée ;
- la gravité ;
- les vibrations ;
- les courants d'air ;
- le flux d'air ;
- les champs électriques ;
- les champs magnétiques ;
- l'hystérésis ;
- l'excentration ;
- le fluage ;
- la pérennité ;
- la caractéristique du matériau pesé (masse volumique, stabilité, magnétisme rémanent, etc.) ;
- etc.