

NORME  
INTERNATIONALE

**ISO**  
**1940-2**

Première édition  
1997-06-15

---

---

**Vibrations mécaniques — Exigences  
en matière de qualité dans l'équilibrage  
des rotors rigides —**

**Partie 2:**  
**Défauts d'équilibrage**

[ISO 1940-2:1997](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-639958187180/ISO-1940-2-1997)

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-639958187180/ISO-1940-2-1997)

*Mechanical vibration — Balance quality requirements of rigid rotors —*

*Part 2: Balance errors*



Numéro de référence  
ISO 1940-2:1997(F)

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 1940-2 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 108, *Vibrations et chocs mécaniques*, sous-comité SC 1, *Équilibrage, y compris les machines à équilibrer*.

L'ISO 1940 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Vibrations mécaniques — Exigences en matière de qualité dans l'équilibrage des rotors rigides*:

- *Partie 1: Détermination du balourd résiduel admissible*
- *Partie 2: Défauts d'équilibrage*

Les annexes A à C de la présente partie de l'ISO 1940 sont données uniquement à titre d'information.

© ISO 1997

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

Organisation internationale de normalisation  
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse  
Internet central@iso.ch  
X.400 c=ch; a=400net; p=iso; o=isocs; s=central

Imprimé en Suisse

## Introduction

La qualité de l'équilibrage d'un rotor rigide est évaluée pendant l'opération d'équilibrage conformément à l'ISO 1940-1 par la mesure du balourd résiduel. Cette mesure peut contenir des erreurs qui proviennent d'un certain nombre de sources. Il est par conséquent nécessaire de considérer les erreurs impliquées. Là où l'expérience a montré qu'elles sont significatives, elles doivent être prises en compte dans la définition de la qualité de l'équilibrage du rotor. L'ISO 1940-1 ne traite pas des erreurs d'équilibrage dans le détail et particulièrement pas de l'évaluation desdites erreurs; par conséquent, la présente partie de l'ISO 1940 donne des exemples des erreurs types qui peuvent se produire et prévoit les procédures recommandées pour les déterminer. Elle décrit en outre les méthodes généralisées pour évaluer le balourd résiduel en présence de défauts d'équilibrage.

## iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

[ISO 1940-2:1997](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-63b99578fd87/iso-1940-2-1997)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-63b99578fd87/iso-1940-2-1997>

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

ISO 1940-2:1997

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-63b99578fd87/iso-1940-2-1997>

# Vibrations mécaniques — Exigences en matière de qualité dans l'équilibrage des rotors rigides —

## Partie 2:

### Défauts d'équilibrage

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 1940 couvre les points suivants:

- identification des erreurs dans le procédé d'équilibrage des rotors rigides;
- évaluation des erreurs;
- directives pour la prise en compte des erreurs;
- évaluation du balourd résiduel dans deux plans de correction quelconques.

#### 2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de l'ISO 1940. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente partie de l'ISO 1940 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 1925:1990, *Vibrations mécaniques — Équilibrage — Vocabulaire*.

ISO 1925:1990/Amd.1:1995, *Amendement 1 à l'ISO 1925:1990*.

ISO 1940-1:1986, *Vibrations mécaniques — Exigences en matière de qualité dans l'équilibrage des rotors rigides — Partie 1: Détermination du balourd résiduel admissible*.

ISO 2953:1985, *Machines à équilibrer — Description, caractéristiques et possibilités*.

### 3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de l'ISO 1940, les définitions données dans l'ISO 1925 (et son Amendement 1) s'appliquent.

### 4 Sources des erreurs d'équilibrage

On peut classer les erreurs d'équilibrage dans l'un des groupes suivants:

- a) erreurs systématiques, dont la valeur et l'angle peuvent être évalués par calcul ou par mesure;
- b) erreurs variables aléatoires, dont la valeur et l'angle peuvent varier de façon imprévisible pour un certain nombre de mesures effectuées dans les mêmes conditions;
- c) erreurs scalaires, dont la valeur maximale peut être évaluée ou estimée mais dont l'angle est indéterminé.

Des exemples des sources d'erreurs qui peuvent se produire sont donnés en 4.1, 4.2 et 4.3. En fonction des procédés de fabrication utilisés, la même erreur peut se classer dans une ou plusieurs des catégories ci-dessus. Certaines de ces erreurs sont reprises plus en détail dans l'annexe A.

#### 4.1 Erreurs systématiques

Les sources d'erreurs suivantes sont des exemples de sources d'erreurs systématiques:

- a) déséquilibre inhérent à l'arbre moteur de la machine à équilibrer;
- b) déséquilibre inhérent au mandrin;
- c) voile axial et radial dans l'élément moteur sur l'axe de l'arbre du rotor;
- d) voile axial et radial dans l'ajustement du rotor pour les composants ou dans le mandrin (voir 5.3);
- e) défaut de concentricité entre les surfaces du tourillon et du support utilisé pour l'équilibrage;
- f) voile axial et radial des paliers de l'élément roulant qui ne sont pas les paliers de fonctionnement et qui sont utilisés pour soutenir le rotor dans la machine à équilibrer;
- g) voile axial et radial des chemins de roulement dans les paliers de fonctionnement à l'élément roulant montés après l'équilibrage;
- h) déséquilibre venant des clavettes et clavetages;
- i) magnétisme résiduel dans le rotor ou le mandrin;
- j) erreurs provoquées par le réassemblage;
- k) erreurs provoquées par l'équipement et aux instruments d'équilibrage;
- l) différences entre les diamètres de l'arbre de fonctionnement et du mandrin d'équilibrage;
- m) défaut des joints universels;
- n) coude permanent du rotor après équilibrage.

## 4.2 Erreurs variables aléatoires

Les sources d'erreurs suivantes sont des exemples de sources d'erreurs variables aléatoires:

- a) pièces non fixées;
- b) liquides ou solides emprisonnés;
- c) distorsion provoquée par les effets thermiques;
- d) effets de perte par ventilation;
- e) utilisation d'un accouplement lâche comme élément moteur;
- f) couple transitoire du rotor horizontal provoqué par les effets gravitationnels lorsque le rotor est stationnaire.

## 4.3 Erreurs scalaires

Les sources d'erreurs suivantes sont des exemples de sources d'erreurs scalaires:

- a) jeu aux interfaces qui doivent être démontées après le processus d'équilibrage;
- b) jeu excessif dans les joints universels;
- c) jeu excessif sur le mandrin ou l'arbre;
- d) tolérances de calcul et de fabrication;
- e) voile des galets supports de la machine à équilibrer si leurs diamètres et celui du tourillon du rotor sont identiques ou presque ou sont dans un rapport en nombres entiers.

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
(standards.iteh.ai)  
ISO 1940-2:1997  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-63b99578fd87/iso-1940-2-1997>

## 5 Évaluation des erreurs

### 5.1 Généralités

Dans certains cas, les rotors sont équilibrés à la conception, leur matériau est uniforme et leur usinage respecte des tolérances suffisamment étroites pour ne pas nécessiter un équilibrage après la fabrication. Toutefois, sur la plupart des rotors, le déséquilibre initial dépasse les niveaux admis indiqués dans l'ISO 1940-1, en sorte que ces rotors doivent être équilibrés. Les paragraphes 5.2 à 5.6 traitent des erreurs d'équilibrage qui peuvent se produire au cours de cette opération.

### 5.2 Erreurs provoquées par l'équipement d'équilibrage et l'instrumentation

L'importance du déséquilibre présent peut augmenter les erreurs d'équilibrage provoquées par l'équipement d'équilibrage et l'instrumentation. Tous les efforts doivent être faits pour dessiner un rotor symétrique. En outre, en prenant en compte les causes de déséquilibre pendant la conception, on peut soit en éliminer certaines complètement, par exemple en combinant plusieurs pièces en une, soit les réduire en diminuant les tolérances d'ajustement. Il faut peser le coût de tolérances plus serrées contre les avantages apportés par une diminution des causes de déséquilibre. Lorsque ces causes ne peuvent être ni éliminées ni réduites à des niveaux négligeables, il faut procéder à leur évaluation mathématique.

### 5.3 Erreurs d'équilibrage provoquées par le voile axial et radial des ajustements des composants

Lorsqu'un composant de rotor parfaitement équilibré est monté excentré par rapport à l'axe de l'arbre du rotor, le déséquilibre statique qui en résulte  $U_s$  est égal à la masse  $m$  du composant multipliée par l'excentricité  $e$ :

$$U_s = m \cdot e \quad \dots (1)$$

Un déséquilibre supplémentaire de couple se produit si le composant est monté de façon excentrique dans un plan autre que le plan du centre de masse du rotor. Plus la distance du plan au centre de masse est grande, plus le déséquilibre de couple induit sera grand.

Si un composant parfaitement équilibré est monté de sorte que son axe principal d'inertie est incliné vers l'axe de l'arbre du rotor mais que son centre de masse reste sur l'axe de l'arbre, il en résultera un déséquilibre de couple. Pour les petits déplacements angulaires  $\Delta\gamma$  entre les deux axes, le déséquilibre de couple  $D_c$  qui en résulte est quasiment égal à la différence entre le moment d'inertie sur un axe transversal passant par le centre de masse du composant,  $I_x$ , et le moment d'inertie sur l'axe principal d'inertie de l'arbre,  $I_z$ , multipliée par l'angle  $\Delta\gamma$ , en radians:

$$D_c \approx (I_x - I_z) \cdot \Delta\gamma \quad \dots (2)$$

Cet énoncé n'est valable que si le composant présente une symétrie rotationnelle. L'approximation (2) s'applique donc surtout à l'équilibrage des disques sur les arbres.

S'il se produit une voilure à la fois radiale et axiale du composant, chaque erreur peut se calculer séparément à sa valeur attribuée dans le plan du palier ou le plan de correction, puis être combinée vectoriellement (voir aussi ISO 1940-1:1986, figure 1).

iTeh STANDARD PREVIEW

### 5.4 Évaluation des erreurs dans l'opération d'équilibrage

L'objet de l'équilibrage est de produire des rotors qui se situent dans les limites de balourd résiduel spécifiées. Pour s'assurer que ces limites ont été respectées, il convient de vérifier les erreurs et de les prendre en compte dans les mesurages du balourd résiduel.

Quand on utilise une machine à équilibrer, il existe diverses sources d'erreurs, notamment le type de rotor à équilibrer, tous les outils utilisés pour soutenir ou entraîner le rotor, la structure de soutien de la machine à équilibrer (paliers, berceaux de la machine, etc.), le système de détection de la machine à équilibrer et les systèmes électronique et de lecture. Chacune de ces sources ou toutes peuvent contribuer aux erreurs. En reconnaissant les caractéristiques de la plupart des erreurs, il peut être possible de se concentrer sur leurs causes et de les corriger, de les minimiser ou de les prendre en compte dans l'évaluation du balourd résiduel en calculant leurs effets.

Il convient que la machine à équilibrer utilisée soit conforme à l'ISO 2953, de sorte que toutes ses erreurs systématiques soient éliminées ou corrigées et que ses erreurs variables aléatoires soient limitées à  $U_{mar}$  selon la définition donnée dans l'ISO 2953. Quand on effectue l'évaluation dans la machine à équilibrer et que les positions de la masse du rotor ou du plan de mesure diffèrent de façon significative de celles utilisées pour vérifier le rotor utilisé dans les essais de la machine à équilibrer, il convient d'effectuer des essais supplémentaires avec la pièce à travailler réelle afin de déterminer le balourd résiduel minimal réalisable aux plans de mesure spécifiés sur la pièce.

### 5.5 Évaluation expérimentale des erreurs variables aléatoires

Si l'on soupçonne des erreurs variables aléatoires significatives, il faut effectuer plusieurs cycles de mesures pour évaluer l'ampleur de l'erreur.

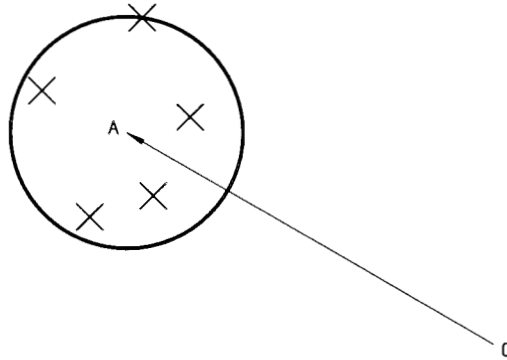
Ce faisant, il est important de s'assurer que les erreurs aléatoires sont produites au hasard à chaque cycle (par exemple en s'assurant que la position angulaire du rotor est différente au départ de chaque cycle).

On peut évaluer l'ampleur de l'erreur en appliquant des techniques statistiques courantes aux résultats obtenus. Cependant, dans la plupart des cas, la méthode approximative suivante conviendra.



Tracer les vecteurs de balourd résiduel mesuré et trouver le vecteur moyen  $\vec{OA}$  à partir de tous les cycles (voir figure 1). Tracer le plus petit cercle autour du centre A qui enferme tous les points. Le vecteur  $\vec{OA}$  représente une estimation du balourd résiduel et le rayon du cercle une estimation de l'erreur maximale possible de chaque lecture. L'incertitude de ces résultats sera en général réduite par augmentation du nombre de cycles effectués.

NOTE — Dans certains cas, en particulier si un point est nettement différent des autres, l'erreur estimée peut être trop grande pour être acceptable. Dans ce cas, il sera nécessaire de faire une analyse plus détaillée pour déterminer les erreurs.



Le tracé de plusieurs mesures est identifié par un X.

**Figure 1 — Tracé des vecteurs de balourd résiduel mesuré (erreurs variables aléatoires)**

ISO 1940-2:1997  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-63b99578fd87/iso-1940-2-1997>

## 5.6 Évaluation expérimentale des erreurs systématiques

Dans de nombreux cas, on peut trouver la plupart des erreurs systématiques à l'aide d'un équilibrage par indexage. Cela implique de mettre en œuvre la méthode suivante. Monter le rotor alternativement à  $0^\circ$  et  $180^\circ$  par rapport au poste qui est la source d'une erreur particulière. Mesurer plusieurs fois les déséquilibres dans les deux positions. Si  $\vec{OA}$  et  $\vec{OB}$ , comme le montre la figure 2, représentent les vecteurs de balourd moyens lorsque le rotor est monté à  $0^\circ$  et  $180^\circ$  respectivement, on peut établir un diagramme pour chaque plan de mesure dans lequel C est le point central de la distance AB. Le vecteur  $\vec{OC}$  représente l'erreur systématique particulière et les vecteurs  $\vec{CA}$  et  $\vec{CB}$  représentent le balourd résiduel du rotor avec le rotor respectivement à  $0^\circ$  et  $180^\circ$ .

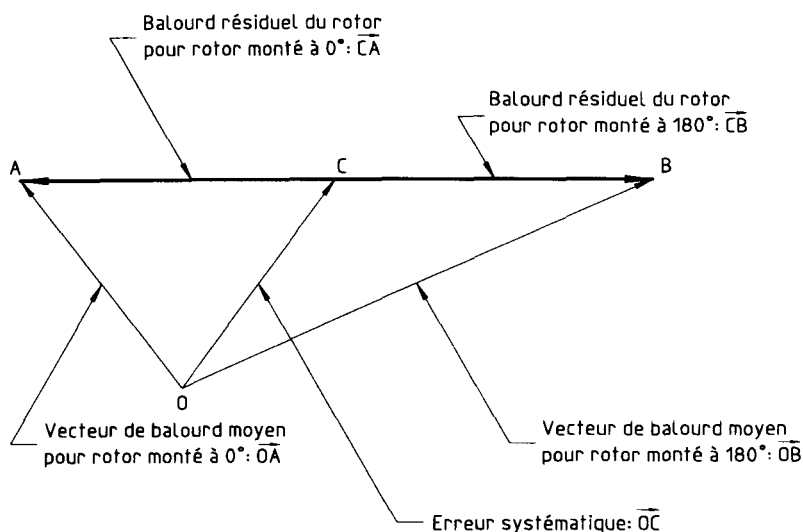


Figure 2 — Tracé des vecteurs de balourd résiduel mesuré et d'erreur systématique

NOTE — Dans ce cas, on a supposé que le rotor a été tourné par rapport à une référence de phase. Cependant, si la référence de phase reste fixe par rapport au rotor

— le vecteur  $\vec{OC}$  représente le balourd résiduel du rotor; et

— les vecteurs  $\vec{CA}$  et  $\vec{CB}$  représentent l'erreur systématique particulière, la référence de phase étant respectivement à  $0^\circ$  et  $180^\circ$ .

ISO 1940-2:1997

## 6 Évaluation de l'erreur combinée

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-63b99578fd87/iso-1940-2-1997>

Les erreurs systématiques dont l'ampleur et la phase sont connues peuvent être éliminées, par exemple, en appliquant des masses de correction temporaires aux outils ou au rotor pendant le processus d'équilibrage ou par une correction mathématique des résultats. Si les erreurs systématiques ne sont pas corrigées ou ne sont pas susceptibles de l'être selon l'une ou l'autre de ces méthodes, il convient de les considérer comme impossibles à corriger et de les combiner comme indiqué ci-dessous avec les erreurs variables aléatoires et les erreurs scalaires.

Soient

$\left| \vec{\Delta U}_i \right|$  l'ampleur de l'erreur non corrigée d'une source quelconque, évaluée de préférence avec une limite de confiance suffisante, et

$\Delta U$  l'ampleur de l'erreur combinée non corrigée.

La formule suivante

$$\Delta U = \sum \left| \vec{\Delta U}_i \right| \quad \dots (3)$$

est celle qui donne l'évaluation la plus sûre des erreurs. Elle garantit que, même en cas de pire combinaison d'erreurs, le rotor est acceptable, à condition que les critères de l'article 7 soient atteints.

La formule  $\Delta U = \sum \left| \vec{\Delta U}_i \right|$  est basée sur l'hypothèse la plus pessimiste selon laquelle toutes les erreurs non corrigées se trouvent dans le même sens angulaire et il convient donc d'additionner leurs valeurs numériques absolues.

Si l'on se rend compte, après avoir appliqué la formule et ensuite entré la valeur  $\Delta U$  dans la formule de l'article 7, que l'erreur combinée non corrigée met le rotor hors tolérance, il est recommandé d'essayer de réduire les erreurs les plus significatives.

Dans certains cas, on peut faire appel à une approche plus réaliste. Elle prend en compte le fait qu'il n'est pas probable que toutes les erreurs provenant de diverses sources se trouvent dans le même sens angulaire. Alors, l'erreur combinée  $\Delta U$  peut être évaluée en utilisant la formule de la «racine de la somme des carrés»:

$$\Delta U = \sqrt{\sum \left| \vec{\Delta U}_i \right|^2} \quad \dots (4)$$

Il est de règle d'appliquer les méthodes ci-dessus pour chaque plan de mesure.

Dans des conditions appropriées, les erreurs sont évaluées par des mesures sur un échantillonnage significatif de rotors. On suppose alors que les erreurs de même ampleur se retrouveront sur tous les rotors similaires qui ont été fabriqués et assemblés de la même façon.

Pour les rotors fabriqués en série, il peut être nécessaire que l'utilisateur et le fournisseur se mettent d'accord sur un procédé basé sur les statistiques pour trouver l'erreur combinée.

**ITeH STANDARD PREVIEW**  
(standards.iteh.ai)

## 7 Critères d'acceptation

Pour chaque plan de mesure, soient [ISO 1940-2:1997](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d05cc8ef-f2ba-4b23-92e1-63b99578fd87/iso-1940-2-1997)

$U_{per}$  l'ampleur du balourd résiduel admis obtenu à partir de l'ISO 1940-1,

$U_{rm}$  l'ampleur du balourd résiduel mesuré par une seule mesure après exécution des corrections pour les erreurs systématiques d'ampleur et d'angle connus, et

$\Delta U$  l'ampleur de l'erreur combinée définie dans l'article 6.

L'équilibre du rotor doit être considéré comme acceptable par le fabricant si la condition suivante est remplie:

$$U_{rm} \leq U_{per} - \Delta U \quad \dots (5)$$

Si  $\Delta U$  se révèle inférieur à 5 % de  $U_{per}$ , il peut être négligé.

Si l'utilisateur effectue une vérification supplémentaire de l'équilibre, l'équilibre du rotor doit être accepté si

$$U_{rm} \leq U_{per} + \Delta U \quad \dots (6)$$

Si cette condition n'est pas remplie, il peut être nécessaire de revoir et de répéter les procédures d'équilibrage.

NOTE — Si l'on prévoit un changement de balourd pendant le transport du rotor, il y a également lieu de le prendre en compte.