
**Bouteilles à gaz — Bouteilles à gaz
rechargeables en acier sans soudure —
Conception, construction et essais —**

Partie 1:

**Bouteilles en acier trempé et revenu ayant
une résistance à la traction inférieure à
1 100 MPa**

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

*Gas cylinders — Refillable seamless steel gas cylinders — Design,
construction and testing —*

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6f48c5b8-3756-42ff-9009-456161279280-iso-9809-1-1999>

*Part 1: Quenched and tempered steel cylinders with tensile strength less
than 1 100 MPa*



PDF – Exonération de responsabilité

Le présent fichier PDF peut contenir des polices de caractères intégrées. Conformément aux conditions de licence d'Adobe, ce fichier peut être imprimé ou visualisé, mais ne doit pas être modifié à moins que l'ordinateur employé à cet effet ne bénéficie d'une licence autorisant l'utilisation de ces polices et que celles-ci y soient installées. Lors du téléchargement de ce fichier, les parties concernées acceptent de fait la responsabilité de ne pas enfreindre les conditions de licence d'Adobe. Le Secrétariat central de l'ISO décline toute responsabilité en la matière.

Adobe est une marque déposée d'Adobe Systems Incorporated.

Les détails relatifs aux produits logiciels utilisés pour la création du présent fichier PDF sont disponibles dans la rubrique General Info du fichier; les paramètres de création PDF ont été optimisés pour l'impression. Toutes les mesures ont été prises pour garantir l'exploitation de ce fichier par les comités membres de l'ISO. Dans le cas peu probable où surviendrait un problème d'utilisation, veuillez en informer le Secrétariat central à l'adresse donnée ci-dessous.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 9809-1:1999](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6f48c5b8-3756-42ff-9009-a3eb1c124909/iso-9809-1-1999)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6f48c5b8-3756-42ff-9009-a3eb1c124909/iso-9809-1-1999>

© ISO 1999

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'ISO à l'adresse ci-après ou du comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax. + 41 22 734 10 79
E-mail copyright@iso.ch
Web www.iso.ch

Imprimé en Suisse

Sommaire

Page

1	Domaine d'application.....	1
2	Références normatives	1
3	Termes et définitions.....	2
4	Symboles	3
5	Contrôles et essais	4
6	Matériaux	4
7	Conception	7
8	Construction et exécution	11
9	Mode opératoire pour l'essai de prototype.....	12
10	Essais par lot.....	15
11	Essais sur chaque bouteille	25
12	Certificats	26
13	Marquage	26
	Annexe A (informative) Description, évaluation des défauts de fabrication et des critères de rejet des bouteilles à gaz en acier sans soudure, au moment de l'examen final effectué par le fabricant.....	27
	Annexe B (normative) Examen aux ultrasons.....	33
	Annexe C (informative) Exemple de certificat d'approbation de prototype.....	38
	Annexe D (informative) Certificat d'approbation de prototype.....	39

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 Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 3.

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.

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments de la présente partie de l'ISO 9809 peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

La Norme internationale ISO 9809-1 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 58, *Bouteilles à gaz*, sous-comité SC 3, *Construction des bouteilles*.

L'ISO 9809 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Bouteilles à gaz — Bouteilles à gaz rechargeables en acier sans soudure — Conception, construction et essais* :

- *Partie 1: Bouteilles en acier trempé et revenu ayant une résistance à la traction inférieure à 1 100 MPa*
- *Partie 2: Bouteilles en acier trempé et revenu ayant une résistance à la traction supérieure ou égale à 1 100 MPa*
- *Partie 3: Bouteilles en acier normalisé*

L'annexe B constitue un élément normatif de la présente partie de l'ISO 9809. Les annexes A, C et D sont données uniquement à titre d'information.

Introduction

L'objet de la présente Norme internationale est d'offrir une spécification sur la conception, la fabrication, le contrôle et l'essai des bouteilles en acier sans soudure pour usage international. L'objectif est d'arriver à un équilibre entre les considérations de conception et de rendement économique d'une part et les exigences d'acceptabilité internationale et d'utilité universelle d'autre part.

La présente Norme internationale vise à éliminer toute préoccupation quant au climat, aux contrôles redondants et aux restrictions actuellement de règle du fait de l'absence de Normes internationales reconnues. La présente Norme internationale ne devrait normalement pas être considérée comme le reflet des pratiques d'une nation ou d'une région quelconque.

iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

[ISO 9809-1:1999](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6f48c5b8-3756-42ff-9009-a3eb1c124909/iso-9809-1-1999)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6f48c5b8-3756-42ff-9009-a3eb1c124909/iso-9809-1-1999>

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 9809-1:1999

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6f48c5b8-3756-42ff-9009-a3eb1c124909/iso-9809-1-1999>

Bouteilles à gaz — Bouteilles à gaz rechargeables en acier sans soudure — Conception, construction et essais —

Partie 1:

Bouteilles en acier trempé et revenu ayant une résistance à la traction inférieure à 1 100 MPa

1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 9809 prescrit les exigences minimales pour certains aspects concernant le matériau, la conception, la construction et la mise en œuvre, le mode de fabrication et les essais au moment de la fabrication des bouteilles à gaz rechargeables, en acier trempé et revenu sans soudure, d'une capacité en eau comprise entre 0,5 l et 150 l inclus, pour gaz comprimés, liquéfiés ou dissous exposées à des températures ambiantes extrêmes à travers le monde (normalement entre -50 °C et $+65\text{ °C}$). La présente partie de l'ISO 9809 s'applique aux bouteilles ayant une résistance maximale à la traction R_m inférieure à 1 100 MPa.

NOTE 1 Si on le désire, les bouteilles de capacité en eau inférieure à 0,5 litres peuvent être fabriquées et certifiées conformément à la présente partie de l'ISO 9809.

NOTE 2 Pour les bouteilles en acier trempé et revenu présentant une résistance maximale à la traction supérieure ou égale à 1 100 MPa, se référer à l'ISO 9809-2. Pour les bouteilles en acier normalisé, se référer à l'ISO 9809-3.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de l'ISO 9809. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de l'ISO 9809 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de l'ISO et de la CEI possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

ISO 148:1983¹⁾, *Acier — Essai de résilience Charpy (entailles en V)*.

ISO 2604-2:1975, *Produits en acier pour appareils à pression — Spécifications de qualité — Partie 2: Tubes laminés sans soudure*.

ISO 6506:1981²⁾, *Matériaux métalliques — Essai de dureté — Essai Brinell*.

ISO 6508:1986³⁾, *Matériaux métalliques — Essai de dureté — Essai Rockwell (échelles A - B - C - D - E - F - G - H - K)*.

1) Sera annulée et remplacée par l'ISO 148-1, l'ISO 148-2 et l'ISO 148-3.

2) Sera annulée et remplacée par l'ISO 6506-1, l'ISO 6506-2 et l'ISO 6506-3.

3) Sera annulée et remplacée par l'ISO 6508-1, l'ISO 6508-2 et l'ISO 6508-3.

ISO 9809-1:1999(F)

ISO 6892:1998, *Matériaux métalliques — Essai de traction à température ambiante.*

ISO 7438:1985, *Matériaux métalliques — Essai de pliage.*

ISO 9712:1999, *Essais non destructifs — Qualification et certification du personnel.*

ISO 11114-1:1997, *Bouteilles à gaz transportables — Compatibilité des matériaux des bouteilles et des robinets avec les contenus gazeux — Partie 1 : Matériaux métalliques.*

ISO 13769:—⁴⁾, *Bouteilles à gaz — Marquage.*

3 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente partie de l'ISO 9809, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

limite d'élasticité

valeur correspondant à la limite supérieure d'élasticité R_{eH} ou, pour les aciers ne présentant pas de limite définie, la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %, $R_{p0,2}$ (allongement non proportionnel) (voir l'ISO 6892)

3.2

trempe

traitement thermique de durcissement au cours duquel une bouteille est portée à une température uniforme supérieure à celle du point critique supérieur, Ac_3 , de l'acier puis, est refroidie rapidement dans un milieu adapté

3.3

revenu

traitement thermique d'adoucissement qui suit la trempe et au cours duquel une bouteille est portée à une température uniforme inférieure à celle du point critique inférieur, Ac_1 , de l'acier

3.4

lot

quantité pouvant atteindre 200 bouteilles, plus celles nécessaires aux essais destructifs, de même diamètre nominal, de même épaisseur et de même conception, fabriquées à partir du même acier et ayant subi le même traitement thermique pendant la même durée

NOTE Les longueurs des bouteilles d'un lot peuvent varier jusqu'à ± 12 %.

3.5

pression d'épreuve

p_h

pression requise appliquée pendant un essai de pression

NOTE Elle est utilisée pour le calcul de l'épaisseur de la paroi de la bouteille.

3.6

facteur de contrainte théorique

F

rapport de la contrainte équivalente de paroi à la pression d'épreuve (p_h) à la contrainte minimale d'élasticité (R_e)

4) À publier.

4 Symboles

- a épaisseur minimale calculée de l'enveloppe cylindrique, exprimée en millimètres
- a' épaisseur minimale garantie de l'enveloppe cylindrique, exprimée en millimètres
- a_1 épaisseur minimale garantie d'un fond concave à la jointure, exprimée en millimètres (voir Figure 2)
- a_2 épaisseur minimale garantie au centre d'un fond concave, exprimée en millimètres (voir Figure 2)
- A allongement pour cent après rupture
- b épaisseur minimale garantie au centre d'un fond convexe, exprimée en millimètres (voir Figure 1)
- c écart maximal autorisé du profil d'éclatement, en millimètres (voir Figures 10 et 11)
- D diamètre nominal extérieur de la bouteille, exprimé en millimètres (voir Figure 1)
- D_f diamètre du mandrin de formage, exprimé en millimètres (voir Figure 6)
- F facteur de contrainte théorique (variable) (voir 3.6)
- h profondeur extérieure (fond concave), exprimée en millimètres (voir Figure 2)
- H hauteur extérieure de la partie bombée (fond concave ou convexe) exprimée en millimètres (voir Figure 1)
- L_0 longueur initiale entre repères, exprimée en millimètres, conformément à l'ISO 6892 (voir Figure 5)
- n rapport du diamètre du mandrin de l'essai de pliage à l'épaisseur réelle de l'éprouvette, (t)
- p_b pression de rupture réelle, exprimée en bars⁵⁾, au-dessus de la pression atmosphérique
- p_h pression d'épreuve hydraulique, exprimée en bars⁵⁾, au-dessus de la pression atmosphérique
- p_w pression de service, exprimée en bars⁵⁾, au-dessus de la pression atmosphérique
- p_y pression à la limite élastique observée pendant l'essai d'éclatement hydraulique et exprimée en bars², au-dessus de la pression atmosphérique
- r rayon de raccordement interne, exprimé en millimètres (voir Figures 1 et 2)
- R_e valeur minimale garantie de la limite d'élasticité, exprimée en mégapascals (voir 3.1)
- R_{ea} valeur réelle de la limite d'élasticité, exprimée en mégapascals, déterminée par l'essai de résistance à la traction (voir 10.2)
- R_g valeur minimale garantie de la résistance à la traction, exprimée en mégapascals
- R_m valeur réelle de la résistance à la traction, exprimée en mégapascals, déterminée par l'essai de résistance à la traction (voir 10.2)

⁵⁾ 1 bar = 10⁵ Pa = 10⁵ N/m².

- S_0 section initiale de l'éprouvette de traction, exprimée en millimètres carrés, conformément à l'ISO 6892
- t épaisseur réelle de l'éprouvette, exprimée en millimètres
- u rapport de la distance entre les arêtes des lames ou les plateaux de l'essai d'aplatissement à l'épaisseur moyenne des parois de la bouteille, en position d'essai
- V contenance en eau de la bouteille, exprimée en litres
- w largeur de l'éprouvette de traction, exprimée en millimètres (voir Figure 5)

5 Contrôles et essais

L'évaluation de la conformité doit être effectuée conformément aux règlements du ou des pays dans lesquels les bouteilles sont utilisées.

Afin de s'assurer que les bouteilles sont conformes à la présente partie de l'ISO 9809, elles doivent être soumises aux contrôles et essais des articles 9, 10 et 11, réalisés par un organisme de contrôle autorisé (nommé «le contrôleur» par la suite) et reconnu dans les pays d'utilisation. Le contrôleur doit posséder les compétences nécessaires au contrôle des bouteilles.

6 Matériaux

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

6.1 Exigences générales

6.1.1 Les matériaux utilisés pour la fabrication des bouteilles à gaz pour usage international doivent faire partie de l'une des catégories suivantes:

- <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6f48c5b8-3756-42ff-9009-45c01e124769/iso-9809-1-1999>
- a) aciers pour bouteilles reconnus au plan international;
- b) aciers pour bouteilles reconnus au plan national;
- c) nouvelles catégories d'acier pour bouteilles, résultant de progrès techniques.

Toutes ces catégories doivent respecter les exigences énoncées en 6.2.1 et 6.2.2, ainsi que les conditions correspondantes de 6.2.3.

6.1.2 Les matériaux utilisés pour la fabrication des bouteilles à gaz doivent être des aciers autres que des aciers effervescents, présentant des qualités de non vieillissement et doivent être calmés à l'aluminium ou au silicium.

Lorsque le client demande la vérification des qualités de non vieillissement, les critères à prendre en compte doivent être spécifiés d'un commun accord et apparaître dans la commande.

6.1.3 Le fabricant de bouteilles doit établir des moyens permettant d'identifier les bouteilles avec les coulées d'acier à partir desquelles elles ont été fabriquées.

6.1.4 Les nuances d'acier utilisées pour la fabrication des bouteilles doivent être compatibles avec le service de gaz prévu, par exemple, gaz corrosifs, gaz fragilisants (voir l'ISO 11114-1).

6.2 Contrôle de la composition chimique

6.2.1 La composition chimique de tous les aciers doit être définie au minimum par:

- la teneur en carbone, manganèse et silicium, dans tous les cas;

- la teneur en chrome, nickel et molybdène ou en tous autres éléments d'alliage intentionnellement ajoutés à l'acier;
- la teneur maximale en soufre et phosphore, dans tous les cas.

Les teneurs en carbone, manganèse, silicium et, le cas échéant, en chrome, nickel et molybdène, doivent être données avec des tolérances telles que la différence entre les valeurs maximales et minimales sur coulée n'excède pas les valeurs données dans le Tableau 1.

La teneur combinée des éléments suivants: vanadium, niobium, titane, bore et zirconium, ne doit pas être supérieure à 0,15 %.

La teneur réelle de chaque élément volontairement ajouté doit être rapportée et sa teneur maximale doit être conforme aux règles de bonne pratique applicables à la fabrication de l'acier.

Tableau 1 — Tolérances de composition chimique

Élément	Teneur maximale %	Plage admissible %
Carbone	< 0,30	0,06
	≥ 0,30	0,07
Manganèse	Toutes valeurs	0,30
Silicium	Toutes valeurs	0,30
Chrome	< 1,50	0,30
	≥ 1,50	0,50
Nickel	Toutes valeurs	0,40
Molybdène	Toutes valeurs	0,15

ISO 9809-1:1999

6.2.2 La teneur en soufre et en phosphore déterminée lors de l'analyse de coulée du matériau utilisé pour la fabrication des bouteilles à gaz ne doit pas dépasser les valeurs indiquées dans le Tableau 2.

Tableau 2 — Limites maximales de soufre et de phosphore

Élément	$R_m < 950$ MPa	$950 \leq R_m < 1\ 100$
Soufre	0,020 %	0,010 %
Phosphore	0,020 %	0,020 %
Soufre + phosphore	0,030 %	0,025 %

6.2.3 Le fabricant de bouteilles doit obtenir et fournir les certificats d'analyses (thermiques) de coulée des aciers fournis pour la fabrication des bouteilles à gaz.

Lorsque des analyses de vérification sont exigées, elles doivent être réalisées soit sur des échantillons prélevés pendant la fabrication sur le matériau tel que fourni par l'aciériste au fabricant de bouteilles, soit sur des bouteilles finies. Dans toute analyse de vérification, les écarts maximaux admissibles par rapport aux limites spécifiées sur les analyses de coulée doivent être conformes aux valeurs indiquées dans l'ISO 2604-2.

6.3 Aciers types

Les deux aciers types suivants sont reconnus à l'échelle internationale pour leurs performances sur de nombreuses années:

- a) l'acier chrome molybdène (trempé et revenu);
- b) l'acier carbone manganèse (trempé et revenu).

Les compositions chimiques de ces aciers, qui doivent être soumises aux contrôles spécifiés en 6.2.1, sont données dans le Tableau 3.

Tableau 3 — Compositions d'acier reconnues à l'échelle internationale

Élément	Nuances d'acier et états	
	CrMo (trempé et revenu)	CMn (trempé et revenu)
Carbone	0,25 % à 0,38 %	0,38 % max.
Silicone	0,1 % à 0,4 %	0,1 % à 0,35 %
Manganèse	0,4 % à 1,0 %	1,35 % à 1,75 %
Phosphore	0,020 % max.	0,020 % max.
Soufre	0,020 % max.	0,020 % max.
Chrome	0,8 % à 1,2 %	
Molybdène	0,15 % à 0,40 %	

NOTE La gamme réelle de chaque élément doit être conforme aux spécifications données en 6.2.1 et en 6.2.2 et aux règles de bonne pratique applicables à la fabrication de l'acier. En particulier, les limites indiquées dans le Tableau 2 prévalent sur les plages indiquées dans le présent tableau.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

6.4 Traitements thermiques

6.4.1 Le fabricant de bouteilles doit certifier le traitement thermique appliqué aux bouteilles finies.

6.4.2 Il est permis d'effectuer la trempe de l'acier dans un bain autre que l'huile minérale, à condition que la méthode utilisée ne provoque pas de fissures dans les bouteilles.

Si la vitesse de refroidissement dans le bain est supérieure à 80 % de celle obtenue avec de l'eau à 20 °C sans additifs, toutes les bouteilles de la production doivent être soumises à un essai non destructif afin de prouver l'absence de fissures.

6.4.3 Le procédé de revenu doit permettre d'obtenir les propriétés mécaniques requises.

Pour une résistance à la traction donnée, la température appliquée à un type d'acier ne doit pas s'écarter de plus de 30 °C de celle indiquée par le fabricant de bouteilles.

6.5 Exigences relatives aux essais

Le matériau des bouteilles finies doit satisfaire aux exigences des articles 9, 10 et 11.

6.6 Non-conformité aux exigences relatives aux essais

En cas de non-conformité aux exigences des essais, un contre-essai ou un nouveau traitement thermique suivi d'un nouvel essai, doivent être effectués de la manière suivante à la satisfaction du contrôleur :

- a) Lorsqu'il est prouvé qu'une erreur a été commise dans l'exécution de l'essai ou dans le cas d'une erreur de mesurage, un nouvel essai doit être effectué. Si ce dernier est satisfaisant, le premier essai doit être ignoré.
- b) Si l'essai a été réalisé de façon satisfaisante, la cause de la non-conformité de l'essai doit être identifiée.

- 1) Si la non-conformité est due au traitement thermique appliqué, le fabricant peut soumettre toutes les bouteilles non conformes à un nouveau traitement thermique. En d'autres termes, si la non-conformité concerne un essai de bouteilles d'un lot ou de prototypes, toutes les bouteilles représentatives doivent faire l'objet d'un nouveau traitement thermique avant le contre-essai; en revanche, si la non-conformité a lieu de manière sporadique lors d'un essai appliqué à chaque bouteille, seules les bouteilles non conformes doivent subir un nouveau traitement thermique et un contre-essai.

Ce nouveau traitement thermique doit consister en un nouveau revenu ou une nouvelle trempe suivie d'un revenu.

Lorsque les bouteilles sont soumises à un nouveau traitement thermique, l'épaisseur minimale garantie de la paroi doit être conservée.

Seuls les essais applicables à un prototype ou à un lot doivent être réalisés une nouvelle fois pour prouver la conformité du nouveau lot. Si un ou plusieurs d'entre eux ne sont pas satisfaisants, même partiellement, toutes les bouteilles du lot doivent être refusées.

- 2) Si la non-conformité est due à autre chose que le traitement thermique appliqué, toutes les bouteilles défectueuses doivent être refusées ou réparées par une méthode approuvée. Si les bouteilles réparées satisfont à l'essai ou aux essais requis pour la réparation, elles doivent être considérées comme faisant partie du lot d'origine.

7 Conception

7.1 Dispositions générales

7.1.1 Le calcul de l'épaisseur de la paroi des parties soumises à des pressions doit prendre en compte la valeur minimale garantie de la limite d'élasticité (R_e) du matériau.

7.1.2 Dans les calculs, la valeur de R_e ne doit pas dépasser $0,9 R_g$.

7.1.3 La pression interne, sur laquelle repose le calcul de l'épaisseur de paroi, doit être la pression d'essai hydraulique p_h .

7.2 Limitation de la résistance à la traction

7.2.1 Lorsqu'il n'existe aucun risque de fragilisation par hydrogène, la valeur maximale de la résistance à la traction est limitée par la capacité de l'acier à satisfaire aux exigences des articles 9 et 10, mais la résistance à la traction réelle maximale R_m ne doit en aucun cas être supérieure à 1 100 MPa pour les aciers chrome molybdène ou à 1 030 MPa pour les aciers carbone manganèse.

7.2.2 Lorsqu'il existe un risque de fragilisation par l'hydrogène (voir l'ISO 11114-1), la valeur maximale de la résistance à la traction, calculée comme indiqué en 10.2, doit être soit de 880 MPa, ou, si le rapport R_{ea}/R_m ne dépasse pas 0,9, de 950 MPa.

NOTE Des méthodes d'essai pour optimiser les niveaux de résistance des aciers à l'hydrogène sont à l'étude.

7.3 Calcul de l'épaisseur de l'enveloppe cylindrique

L'épaisseur minimale garantie de l'enveloppe cylindrique (a') ne doit pas être inférieure à l'épaisseur calculée à l'aide des équations (1) et (2), et les conditions supplémentaires (3) doivent être satisfaites:

$$a = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{10 F R_e - \sqrt{3} p_h}{10 F R_e}} \right) \quad (1)$$