

---

---

**Industries du pétrole, de la pétrochimie et  
du gaz naturel — Calcul de l'épaisseur  
des tubes de fours de raffineries de  
pétrole**

*Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Calculation of  
heater-tube thickness in petroleum refineries*

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

ISO 13704:2007

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0a8e4c93-5ba8-49d6-bed2-ca6ef81bc91e/iso-13704-2007>



**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 13704:2007](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0a8e4c93-5ba8-49d6-bed2-ca6ef81bc91e/iso-13704-2007)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0a8e4c93-5ba8-49d6-bed2-ca6ef81bc91e/iso-13704-2007>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2007

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 22 749 09 47  
E-mail [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web [www.iso.org](http://www.iso.org)

Version française parue en 2009

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

Avant-propos .....	iv
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Termes et définitions</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b> <b>Informations générales pour la conception</b> .....	<b>4</b>
3.1 <b>Informations requises</b> .....	<b>4</b>
3.2 <b>Limitations pour les méthodes de conception</b> .....	<b>4</b>
<b>4</b> <b>Conception</b> .....	<b>5</b>
4.1 <b>Généralités</b> .....	<b>5</b>
4.2 <b>Équation pour les contraintes</b> .....	<b>8</b>
4.3 <b>Calcul de conception dans le domaine élastique (températures inférieures)</b> .....	<b>8</b>
4.4 <b>Calcul de conception à la rupture (températures supérieures)</b> .....	<b>9</b>
4.5 <b>Plage de températures intermédiaire</b> .....	<b>9</b>
4.6 <b>Épaisseur minimale admissible</b> .....	<b>9</b>
4.7 <b>Épaisseurs minimale et moyenne</b> .....	<b>10</b>
4.8 <b>Température équivalente du métal des tubes</b> .....	<b>10</b>
4.9 <b>Raccords composants</b> .....	<b>14</b>
<b>5</b> <b>Contraintes admissibles</b> .....	<b>17</b>
5.1 <b>Généralités</b> .....	<b>17</b>
5.2 <b>Contrainte élastique admissible</b> .....	<b>17</b>
5.3 <b>Contrainte à la rupture admissible</b> .....	<b>17</b>
5.4 <b>Exposant de rupture</b> .....	<b>17</b>
5.5 <b>Limite d'élasticité et résistance à la traction</b> .....	<b>17</b>
5.6 <b>Courbes de paramètres de Larson-Miller</b> .....	<b>18</b>
5.7 <b>Température de conception limite du métal</b> .....	<b>18</b>
5.8 <b>Courbes de contraintes admissibles</b> .....	<b>19</b>
<b>6</b> <b>Exemples de calculs</b> .....	<b>21</b>
6.1 <b>Calcul de conception dans le domaine élastique</b> .....	<b>21</b>
6.2 <b>Contrôle de la contrainte thermique (pour le domaine élastique seulement)</b> .....	<b>22</b>
6.3 <b>Calcul de conception à la rupture avec une température constante</b> .....	<b>26</b>
6.4 <b>Calcul de conception à la rupture avec une température variant linéairement</b> .....	<b>28</b>
<b>Annexe A (informative) Estimation de la durée de vie restante d'un tube</b> .....	<b>32</b>
<b>Annexe B (informative) Calcul de la température de peau maximale d'un tube de la section rayonnante</b> .....	<b>37</b>
<b>Annexe C (normative) Limitations des contraintes thermiques (domaine élastique)</b> .....	<b>49</b>
<b>Annexe D (informative) Feuilles de calcul</b> .....	<b>53</b>
<b>Annexe E (normative) Courbes de contraintes (unités SI)</b> .....	<b>55</b>
<b>Annexe F (normative) Courbes de contraintes (unités USC)</b> .....	<b>77</b>
<b>Annexe G (normative) Détermination de la fraction de corrosion et de la fraction de température</b> .....	<b>99</b>
<b>Annexe H (informative) Sources des données</b> .....	<b>108</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>114</b>

## 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 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. 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 du présent document 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.

L'ISO 13704 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 67, *Matériel, équipement et structures en mer pour les industries pétrolière, pétrochimique et du gaz naturel*, sous-comité SC 6, *Systèmes et équipements de traitement*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 13704:2001), qui a fait l'objet d'une révision technique. Elle incorpore le Rectificatif technique ISO 13704:2001/Cor.1:2004.

La présente version française inclut également le Rectificatif technique ISO 13704:2007/Cor.1:2008 à la version anglaise.

# Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Calcul de l'épaisseur des tubes de fours de raffineries de pétrole

## 1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie les exigences et donne des recommandations pour des méthodes et des critères de conception utilisés pour calculer l'épaisseur de paroi requise de tubes neufs et de raccords composants associés pour les fours de raffineries de pétrole. Ces méthodes sont appropriées pour concevoir des tubes destinés à un service dans des applications corrosives et non corrosives. Ces méthodes ont été développées spécifiquement pour la conception des raffineries et des tubes de fours à brûleurs de procédé associés (à brûleurs directs, tubes absorbant la chaleur au sein d'enceintes). Ces méthodes ne sont pas prévues pour être utilisées pour la conception de tuyauterie extérieure.

La présente Norme internationale ne donne pas de recommandations pour l'épaisseur de retrait de tubes, l'Annexe A décrit une technique pour estimer la durée de vie restante d'un tube de four.

## 2 Termes et définitions (standards.iteh.ai)

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0a8e4c93-5ba8-49d6-bed2-ca6ef81bc91e/iso-13704-2007>

### 2.1

#### diamètre intérieur réel

$D_i$

diamètre intérieur d'un tube neuf

NOTE Le diamètre intérieur réel est utilisé pour calculer la température de peau du tube dans l'Annexe B et la contrainte thermique dans l'Annexe C.

### 2.2

#### raccord composant

raccord relié aux tubes de fours à brûleurs

EXEMPLES Coudes doubles, coudes, réducteurs.

NOTE 1 Il existe une distinction entre les raccords composants standards et les raccords composants spécialement conçus; voir 4.9.

NOTE 2 Des spécifications de matériaux caractéristiques pour les raccords composants standards sont l'ASTM A 234, l'ASTM A 403 et l'ASTM B 366.

### 2.3

#### surépaisseur de corrosion

$\delta_{CA}$

épaisseur de matériau supplémentaire ajoutée pour permettre une perte de matériau au cours de la durée de vie de conception du composant

**2.4**  
**durée de vie de conception**

$t_{DL}$   
temps de fonctionnement utilisé comme base pour la conception de tube

NOTE La durée de vie de conception n'est pas nécessairement la même que la durée de vie pour le retrait ou le remplacement.

**2.5**  
**température de métal de conception**

$T_d$   
température du métal ou de la peau du tube utilisée pour la conception

NOTE Celle-ci est déterminée en calculant la température maximale du métal du tube ( $T_{max}$  dans l'Annexe B) ou la température équivalente du métal du tube ( $T_{eq}$  en 2.8) et en ajoutant une marge de température appropriée (voir 2.16). Une méthode pour calculer la température maximale du métal du tube à partir de la densité de flux de chaleur est incluse dans l'Annexe B. Lorsque la température équivalente du métal du tube est utilisée, la température de fonctionnement maximale peut être supérieure à la température de conception du métal. Lorsque la température équivalente du métal du tube est utilisée pour déterminer la température de conception du métal, cette température de conception du métal n'est applicable que pour le calcul de conception à la rupture. Il est nécessaire de développer une température de conception du métal distincte, applicable au calcul de conception dans le domaine élastique. La température de conception du métal applicable au calcul de conception dans le domaine élastique est l'addition de la température maximale calculée du métal du tube au cours de tous les cas de fonctionnement et de la marge de température appropriée.

**2.6**  
**contrainte élastique admissible**

$\sigma_{el}$   
contrainte admissible pour le domaine élastique

Voir 5.2.

ITeH STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

**2.7**  
**pression élastique de conception**

$p_{el}$   
pression maximale que le serpentin d'un four peut supporter pendant de courts intervalles de temps

NOTE Cette pression est habituellement associée aux réglages de la soupape de surpression, aux pressions statiques des pompes, etc.

**2.8**  
**température équivalente du métal de tube**

$T_{eq}$   
température calculée constante du métal qui, dans un intervalle de temps spécifié, produit le même endommagement par fluage que le fait une température variable du métal

NOTE En 4.8, le concept de température équivalente du métal des tubes est décrit plus en détail. Il y est fourni une méthode pour calculer la température équivalente du métal des tubes sur la base d'une variation linéaire de la température du métal des tubes du début du fonctionnement jusqu'à la fin du fonctionnement.

**2.9**  
**diamètre intérieur**

$D_1^*$   
diamètre intérieur d'un tube sans tenir compte de la surépaisseur de corrosion, utilisé pour les calculs de conception

NOTE Le diamètre intérieur d'un tube à l'état moulé est le diamètre intérieur du tube, sans tenir compte des marges pour porosité et corrosion.

**2.10****épaisseur minimale** $\delta_{\min}$ 

épaisseur requise minimale d'un tube neuf, prenant en compte toutes les marges appropriées

NOTE Voir l'Équation (5).

**2.11****diamètre extérieur** $D_o$ 

diamètre extérieur d'un tube neuf

**2.12****contrainte à la rupture admissible** $\sigma_r$ 

contrainte admissible pour le domaine de rupture par fluage

Voir 4.4.

**2.13****pression à la rupture de conception** $p_r$ 

pression de fonctionnement maximale que la section de serpentin peut supporter au cours d'un fonctionnement normal

**2.14****exposant de rupture** $n$ 

paramètre utilisé pour la conception dans le domaine de la rupture par fluage

NOTE Voir les figures dans les Annexes E et F.

**2.15****épaisseur de contrainte** $\delta_\sigma$ 

épaisseur, à l'exclusion de toutes les marges d'épaisseur, calculée à partir d'une équation qui utilise une contrainte admissible

**2.16****marge de température** $T_A$ 

partie de la température de conception du métal qui est incluse pour une mauvaise répartition du gaz de procédé ou du gaz de combustion, des inconnues de fonctionnement et des imprécisions de conception

NOTE La marge de température est ajoutée à la température maximale calculée du métal des tubes ou à la température équivalente du métal des tubes pour obtenir la température de conception du métal (voir 2.5).

### 3 Informations générales pour la conception

#### 3.1 Informations requises

Les paramètres de conception (pressions de conception, température de conception du fluide, surépaisseur de corrosion et matériau des tubes) doivent être définis. En outre, les informations suivantes doivent être fournies:

- a) durée de vie de conception des tubes de fours;
- b) si le concept de température équivalente doit être appliqué et, si c'est le cas, les conditions de fonctionnement au début et à la fin de la campagne;
- c) marge de température (voir l'ISO 13705), le cas échéant;
- d) fraction de corrosion (si elle est différente de celle indiquée sur la Figure 1);
- e) si les limites de contraintes thermiques dans le domaine élastique doivent être appliquées.

Si l'un quelconque des éléments a) à e) n'est pas fourni, utiliser les paramètres applicables suivants:

- durée de vie de conception égale à 100 000 h;
- température de conception du métal fondée sur la température maximale du métal (le concept de température équivalente ne doit pas être appliqué);
- marge de température égale à 15 °C (25 °F);
- fraction de corrosion donnée dans la Figure 1;
- limites des contraintes thermiques dans le domaine élastique.

ITeH STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO 13704:2007

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0a8e4c93-5ba8-49d6-bed2-ca6ef81bc91e/iso-13704-2007>

#### 3.2 Limitations pour les méthodes de conception

**3.2.1** Les contraintes admissibles sont fondées sur une prise en compte de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture seulement, la déformation plastique ou par fluage n'a pas été prise en compte. L'utilisation de ces contraintes admissibles peut résulter en de petites déformations permanentes dans certaines applications, cependant, ces petites déformations permanentes n'affectent pas la sécurité ou l'aptitude au fonctionnement des tubes de fours.

**3.2.2** Aucune considération n'est incluse concernant des effets néfastes pour l'environnement, tels que la graphitisation, la carburation ou l'attaque par hydrogène. Les limitations imposées par l'attaque par hydrogène peuvent être développées à partir des courbes de Nelson dans l'API 941 [1].

**3.2.3** Ces méthodes de conception ont été développées pour des tubes sans soudure. Elles ne sont pas applicables aux tubes qui ont une soudure longitudinale. L'ISO 13705 n'autorise que les tubes sans soudure.

**3.2.4** Ces méthodes de conception ont été développées pour des tubes minces (tubes ayant un rapport épaisseur sur diamètre extérieur,  $\delta_{\min}/D_o$ , inférieur à 0,15). Des considérations supplémentaires peuvent s'appliquer à la conception de tubes plus épais.

**3.2.5** Aucune considération n'est incluse pour prendre en compte les effets d'une charge par pression cyclique ou d'une charge thermique cyclique.

**3.2.6** Les limites pour les contraintes thermiques sont fournies en Annexe C. Les limites pour les contraintes développées par les masses, les supports, les raccords d'extrémités, etc. ne sont pas décrites dans la présente Norme internationale.

**3.2.7** La plupart des courbes citées en référence de paramètres de Larson-Miller en 5.6 ne sont pas les courbes de Larson-Miller au sens traditionnel mais sont déterminées d'après la résistance à la rupture pour 100 000 h comme expliqué dans l'Article H.3. En conséquence, il se peut que les courbes ne fournissent pas une estimation fiable de la résistance à la rupture pour une durée de vie de conception qui est inférieure à 20 000 h ou supérieure à 200 000 h.

**3.2.8** Les méthodes de la présente Norme internationale ont été développées pour des systèmes dans lesquels des tubes de fours sont soumis à une pression interne qui dépasse la pression externe. Il existe certains cas dans lesquels un tube de four peut être soumis à une pression externe plus élevée que la pression interne. Cela peut se produire par exemple dans des fours à vide ou dans d'autres types de fours au cours de conditions d'arrêt ou de déclenchement, en particulier lorsqu'une unité est en train de se refroidir ou d'être soumise à une purge, en formant un vide à l'intérieur des tubes du four. Les conditions où les pressions externes dépassent les pressions internes peuvent déterminer l'épaisseur de paroi des tubes du four. La détermination de ce fait (c'est-à-dire la conception pour le vide) n'est pas couverte dans la présente Norme internationale. En l'absence de code local ou national, qui peut s'appliquer, il est recommandé qu'un code de récipient sous pression, tel que l'ASME VIII (Division 1, UG-28) ou l'EN 13445, soit utilisé, car ces codes traitent également les conceptions où des conceptions pour pression externe existent.

## 4 Conception

### 4.1 Généralités

Il existe une différence fondamentale entre le comportement de l'acier au carbone dans un tube de four à fioul chaud fonctionnant à 300 °C (575 °F) et celui de l'acier au chrome-molybdène dans un tube de four de reformeur catalytique fonctionnant à 600 °C (1 110 °F). L'acier soumis à la température plus élevée flue, ou se déforme de manière permanente, même à des niveaux de contrainte bien inférieurs à la limite d'élasticité. Si la température de métal du tube est suffisamment élevée pour que les effets du fluage soient significatifs, le tube finit par subir une défaillance en raison de la rupture par fluage, bien qu'aucun mécanisme de corrosion ou d'oxydation ne soit actif. Pour l'acier soumis à une température plus basse, les effets du fluage sont inexistantes ou négligeables. L'expérience indique que, dans ce cas, le tube dure indéfiniment, à moins qu'un mécanisme de corrosion ou qu'un d'oxydation ne soit actif.

Comme il existe une différence fondamentale entre les comportements des matériaux à ces deux températures, il existe deux types de conception différents pour les tubes de fours: le calcul élastique et le calcul de la rupture par fluage. Le calcul est le calcul de conception dans le domaine élastique, à des températures plus basses, dans lequel les contraintes admissibles sont fondées sur la limite d'élasticité (voir 4.3). Le calcul de la rupture par fluage (qui est appelée ci-dessous calcul de conception à la rupture) est la conception pour le domaine de rupture par fluage, à des températures plus élevées, dans lequel les contraintes admissibles sont fondées sur la résistance à la rupture (voir 4.4).

La température qui sépare les domaines élastique et de rupture par fluage d'un tube de four n'est pas une valeur unique, il s'agit d'une plage de températures qui dépend de l'alliage. Pour l'acier au carbone, l'extrémité basse de cette plage de températures est d'environ 425 °C (800 °F), pour l'acier inoxydable du type 347, l'extrémité basse de cette plage de températures est d'environ 590 °C (1 100 °F). Les considérations qui déterminent la plage de conception comprennent également la pression de calcul de conception dans le domaine élastique, la pression de calcul de conception à la rupture, la durée de vie de conception et la surépaisseur de corrosion.

La pression pour le calcul de conception à la rupture n'est jamais supérieure à la pression de calcul de conception dans le domaine élastique. La caractéristique qui différencie ces deux pressions est la durée relative durant laquelle elles sont supportées. La pression pour le calcul de conception à la rupture est une condition de charge à long terme qui reste relativement uniforme sur une durée qui se compte en années. La pression pour le calcul de conception dans le domaine élastique est habituellement une condition de charge à court terme, qui ne dure habituellement que quelques heures ou quelques jours. La pression pour le calcul de conception à la rupture est utilisée dans l'équation de calcul de conception à la rupture, puisque l'endommagement par fluage s'accumule en conséquence de l'action de la contrainte de fonctionnement ou contrainte à long terme. La pression pour le calcul de conception dans le domaine élastique est utilisée dans l'équation de calcul de conception dans le domaine élastique pour empêcher des contraintes excessives dans le tube au cours des périodes de fonctionnement à la pression maximale.

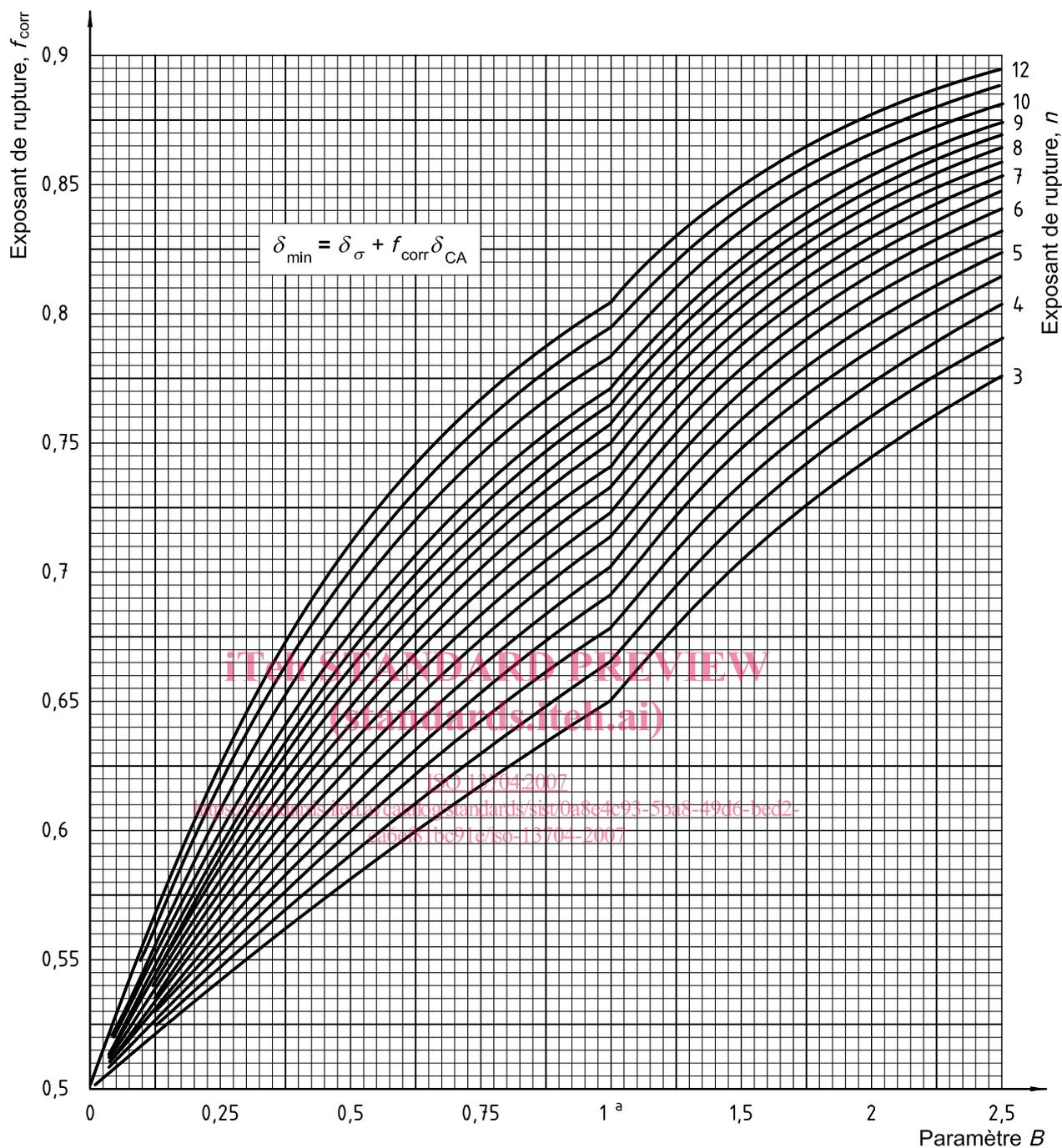
Le tube doit être conçu pour résister à la pression de calcul de conception à la rupture pendant de longues périodes de fonctionnement. Si la pression de fonctionnement normale augmente au cours d'une campagne de fonctionnement, la pression la plus élevée doit être considérée comme étant la pression de calcul de conception à la rupture.

Dans la plage de températures proche ou au-dessus du point où les courbes de contraintes admissibles élastiques et à la rupture se croisent, les deux équations de calcul de conception dans le domaine élastique et suivant la rupture doivent être utilisées. Il convient que la plus grande valeur de  $\delta_{\min}$  détermine la conception (voir 4.5). Un exemple de calcul, qui utilise ces méthodes, est inclus dans l'Article 6. Des feuilles de calculs (voir l'Annexe D) sont disponibles pour résumer les calculs d'épaisseur minimale et de température équivalente du métal des tubes.

L'épaisseur minimale admissible d'un tube neuf est donnée dans le Tableau 1.

Toutes les équations de conception décrites dans l'Article 4 sont résumées dans le Tableau 2.

**ITeH STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0a8e4c93-5ba8-49d6-bed2-ca6ef81bc91e/iso-13704-2007>



**Légende**

$$\delta_{\sigma} = \frac{p_r D_o}{2\sigma_r + p_r}$$

$\delta_{CA}$  est la surépaisseur de corrosion

$D_o$  est le diamètre extérieur

$\sigma_r$  est la contrainte admissible à la rupture

$p_r$  est la pression pour le calcul de conception à la rupture

$$B = \delta_{CA} / \delta_{\sigma}$$

<sup>a</sup> Noter le changement d'échelle à X = 1.

**Figure 1 — Fraction de corrosion**

## 4.2 Équation pour les contraintes

À la fois dans le domaine élastique et dans le domaine de rupture par fluage, l'équation de conception est fondée sur l'équation du diamètre moyen relative à la contrainte dans un tube. Dans le domaine élastique, la pression pour le calcul de conception dans le domaine élastique,  $p_{el}$ , et la contrainte élastique admissible,  $\sigma_{el}$ , sont utilisées. Dans le domaine de rupture par fluage, la pression de calcul de conception à la rupture,  $p_r$ , et la contrainte de rupture admissible,  $\sigma_r$ , sont utilisées.

L'équation du diamètre moyen donne une bonne estimation de la pression qui produit une déformation élastique à travers toute la paroi de tube dans les tubes minces (voir 3.2.4 pour une définition des tubes minces). L'équation du diamètre moyen fournit également une bonne corrélation entre la rupture par fluage d'un tube mis sous pression et une éprouvette d'essai uniaxiale. En conséquence, l'utilisation de cette équation est appropriée à la fois dans le domaine élastique et le domaine de rupture par fluage [16], [17], [18], [19]. L'équation du diamètre moyen pour la contrainte est donnée par l'Équation (1):

$$\sigma = \frac{p}{2} \left( \frac{D_o}{\delta} - 1 \right) = \frac{p}{2} \left( \frac{D_i}{\delta} + 1 \right) \quad (1)$$

où

$\sigma$  est la contrainte, exprimée en mégapascals [livres par pouce carré<sup>1)</sup>],

$p$  est la pression, exprimée en mégapascals (livres par pouce carré),

$D_o$  est le diamètre extérieur, exprimé en millimètres (pouces),

$D_i$  est le diamètre intérieur, exprimé en millimètres (pouces), y compris la surépaisseur de corrosion,

$\delta$  est l'épaisseur, exprimée en millimètres (pouces).

Les équations pour l'épaisseur de contrainte,  $\delta_\sigma$ , en 4.3 et 4.4 sont déterminées d'après l'Équation (1).

## 4.3 Calcul de conception dans le domaine élastique (températures inférieures)

Le calcul de conception dans le domaine élastique est fondé sur la prévention d'une rupture par éclatement lorsque la pression est à son maximum, c'est-à-dire lorsqu'une excursion de pression a atteint  $p_{el}$  à l'approche de l'expiration de la durée de vie de conception, après la fin de la surépaisseur de corrosion. Avec le calcul de conception dans le domaine élastique,  $\delta_\sigma$  et  $\delta_{min}$  (voir 4.6) sont calculées comme indiqué dans les Équations (2) et (3):

$$\delta_\sigma = \frac{p_{el} D_o}{2\sigma_{el} + p_{el}} \quad \text{ou} \quad \delta_\sigma = \frac{p_{el} D_i^*}{2\sigma_{el} - p_{el}} \quad (2)$$

$$\delta_{min} = \delta_\sigma + \delta_{CA} \quad (3)$$

où

$D_i^*$  est le diamètre intérieur, exprimé en millimètres (pouces), sans la surépaisseur de corrosion,

$\sigma_{el}$  est la contrainte élastique admissible, exprimée en mégapascals (livres par pouce carré), à la température de conception du métal.

1) L'unité «livres par pouce carré (psi)» est appelée «livres-force par pouce carré (lbf/in<sup>2</sup>)» dans l'ISO/CEI 80000.

#### 4.4 Calcul de conception à la rupture (températures supérieures)

Le calcul de conception à la rupture est fondé sur la prévention d'une rupture par fluage au cours de la durée de vie de conception. Avec le calcul de conception à la rupture,  $\delta_\sigma$  et  $\delta_{\min}$  (voir 4.6) sont calculées à partir des Équations (4) et (5):

$$\delta_\sigma = \frac{p_r D_o}{2\sigma_r + p_r} \quad \text{ou} \quad \delta_\sigma = \frac{p_r D_i^*}{2\sigma_r - p_r} \quad (4)$$

$$\delta_{\min} = \delta_\sigma + f_{\text{corr}} \delta_{\text{CA}} \quad (5)$$

où

$\sigma_r$  est la contrainte de rupture admissible, exprimée en mégapascals (livres par pouce carré), à la température de conception du métal et pour la durée de vie de conception,

$f_{\text{corr}}$  est la fraction de corrosion, donnée en fonction de  $B$  et  $n$  sur la Figure 1,

$$B = \delta_{\text{CA}} / \delta_\sigma$$

$n$  est l'exposant à la rupture à la température de conception du métal (indiquée dans les figures données en Annexes E et F).

La détermination de la fraction de corrosion est décrite dans l'Annexe G. Il est pris en compte dans cette détermination que la contrainte est réduite par la surépaisseur de corrosion, de manière correspondante, la durée de vie vis-à-vis de la rupture (est augmentée).

Les Équations (4) et (5) sont appropriées aux tubes de fours, cependant, si des circonstances spéciales requièrent que l'utilisateur choisisse une conception plus conservatrice, une fraction de corrosion égale à l'unité ( $f_{\text{corr}} = 1$ ) peut être spécifiée.

#### 4.5 Plage de températures intermédiaire

À des températures proches du point ou supérieures au point où les courbes de  $\sigma_{el}$  et  $\sigma_r$  se coupent sur les figures données en Annexes E et F, soit les considérations élastiques, soit les considérations à la rupture détermineront la conception. Dans cette plage de températures, il est nécessaire d'appliquer à la fois le calcul de conception dans le domaine élastique et le calcul de conception à la rupture. La plus grande valeur de  $\delta_{\min}$  doit déterminer la conception.

#### 4.6 Épaisseur minimale admissible

L'épaisseur minimale,  $\delta_{\min}$ , d'un tube neuf (y compris la surépaisseur de corrosion) ne doit pas être inférieure à celle indiquée dans le Tableau 1. Pour les aciers ferritiques, les valeurs indiquées sont les épaisseurs minimales admissibles du tube de paroi moyen de qualité 40. Pour les aciers austénitiques, les valeurs sont les épaisseurs minimales admissibles pour un tube à paroi moyenne de qualité 10S (le Tableau 5 indique quels alliages sont ferritiques et quels alliages sont austénitiques). Les épaisseurs minimales admissibles sont égales à 0,875 fois les épaisseurs moyennes. Ces minima sont fondés sur la pratique de l'industrie. L'épaisseur minimale admissible n'est pas l'épaisseur de retrait ou de remplacement d'un tube usé.

**4.7 Épaisseurs minimale et moyenne**

L'épaisseur minimale,  $\delta_{min}$ , est calculée comme décrit en 4.3 et 4.4. Les tubes qui sont achetés avec cette épaisseur minimale ont une épaisseur moyenne plus grande. Une tolérance d'épaisseur est spécifiée dans chaque spécification ASTM. Pour la plupart des spécifications ASTM indiquées sur les figures données dans les Annexes E et F, la tolérance sur l'épaisseur minimale est  $(+28^0)$  % pour des tubes finis à chaud et est  $(+22^0)$  % pour des tubes étirés à froid. Cela est équivalent aux tolérances sur l'épaisseur moyenne de  $\pm 12,3$  % et  $\pm 9,9$  %, respectivement. Les spécifications ASTM restantes requièrent que l'épaisseur minimale soit supérieure à 0,875 fois l'épaisseur moyenne, laquelle est équivalente à une tolérance sur l'épaisseur moyenne de + 12,5 %.

Avec une tolérance de  $(+28^0)$  %, un tube qui est acheté à une spécification d'épaisseur minimale de 12,7 mm (0,500 in) a l'épaisseur moyenne suivante:

$$(12,7)(1 + 0,28/2) = 14,5 \text{ mm (0,570 in)}$$

Pour obtenir une épaisseur minimale de 12,7 mm (0,500 in) dans un tube acheté avec une tolérance de  $\pm 12,5$  % sur l'épaisseur moyenne, l'épaisseur moyenne doit être spécifiée comme suit:

$$(12,7)/(0,875) = 14,5 \text{ mm (0,571 in)}$$

Toutes les spécifications d'épaisseur doivent indiquer si la valeur spécifiée est une épaisseur minimale ou une épaisseur moyenne. La tolérance utilisée pour associer les épaisseurs de paroi minimale et moyenne doivent être la tolérance donnée dans la spécification ASTM selon laquelle les tubes sont achetés.

**Tableau 1 — Épaisseur minimale admissible de tubes neufs**

Diamètre extérieur du tube		Épaisseur minimale			
		Tubes en acier ferritique		Tubes en acier austénitique	
mm	(in)	mm	(in)	mm	(in)
60,3	(2,375)	3,4	(0,135)	2,4	(0,095)
73,0	(2,875)	4,5	(0,178)	2,7	(0,105)
88,9	(3,50)	4,8	(0,189)	2,7	(0,105)
101,6	(4,00)	5,0	(0,198)	2,7	(0,105)
114,3	(4,50)	5,3	(0,207)	2,7	(0,105)
141,3	(5,563)	5,7	(0,226)	3,0	(0,117)
168,3	(6,625)	6,2	(0,245)	3,0	(0,117)
219,1	(8,625)	7,2	(0,282)	3,3	(0,130)
273,1	(10,75)	8,1	(0,319)	3,7	(0,144)

**4.8 Température équivalente du métal des tubes**

Dans la plage de rupture par fluage, l'accumulation de l'endommagement est une fonction des températures de fonctionnement réelles du métal des tubes (TMT). Pour des applications dans lesquelles il existe des différences significatives entre les températures TMT de début de campagne et de fin de campagne, une conception fondée sur la température maximale peut être excessive, puisque la température TMT de fonctionnement réelle est habituellement inférieure au maximum.

Pour une variation linéaire de la température du métal du début de la campagne (*start of run*),  $T_{\text{sor}}$ , jusqu'à la fin de la campagne (*end of run*),  $T_{\text{eor}}$ , une température équivalente du métal des tubes,  $T_{\text{eq}}$ , peut être calculée comme indiqué dans l'Équation (6). Un tube fonctionnant à la température équivalente du métal des tubes subit le même endommagement par fluage qu'un tube qui fonctionne en passant de la température de début de campagne à la température de fin de campagne.

$$T_{\text{eq}} = T_{\text{sor}} + f_T (T_{\text{eor}} - T_{\text{sor}}) \quad (6)$$

où

$T_{\text{eq}}$  est la température équivalente du métal des tubes, exprimée en degrés Celsius (Fahrenheit);

$T_{\text{sor}}$  est la température du métal des tubes, exprimée en degrés Celsius (Fahrenheit), au début de la campagne;

$T_{\text{eor}}$  est la température du métal des tubes, exprimée en degrés Celsius (Fahrenheit), à la fin de la campagne;

$f_T$  est la fraction de température donnée dans la Figure 2.

La détermination de la fraction de température est décrite dans l'Annexe G. La fraction de température est fonction de deux paramètres,  $V$  et  $N$ , donnés dans les Équations (7) et (8):

$$V = n_0 \left( \frac{\Delta T^*}{T_{\text{sor}}^*} \right) \ln \left( \frac{A}{\sigma_0} \right) \quad (7)$$

$$N = n_0 \left( \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right) \quad (8)$$

ISO 13704:2007  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0a8e4c93-5ba8-49d6-bed2-ca6ef81bc91e/iso-13704-2007>

où

$n_0$  est l'exposant de rupture à  $T_{\text{sor}}$ ;

$\Delta T^*$  est la variation de température, égale à  $T_{\text{eor}} - T_{\text{sor}}$ , exprimée en kelvin [degrés Rankine<sup>2</sup>], au cours de la période de fonctionnement,

$$T_{\text{sor}}^* = T_{\text{sor}} + 273 \text{ K } (T_{\text{sor}} + 460 \text{ }^\circ\text{R}),$$

$\ln$  est le logarithme naturel,

$\Delta \delta$  est la variation d'épaisseur, égale à  $\phi_{\text{corr}} t_{\text{op}}$ , exprimée en millimètres (pouces), au cours de la période de fonctionnement,

$\phi_{\text{corr}}$  est la vitesse de corrosion, exprimée en millimètres par an (en pouces par an),

$t_{\text{op}}$  est la durée de la période de fonctionnement, exprimée en années,

$\delta_0$  est l'épaisseur initiale, exprimée en millimètres (pouces), au début de la campagne,

---

2) Le degré Rankine est une unité désavouée.