



CHAPITRE 12

Philosophie de design du Code ASME et Analyse Limite

- ⇩ *Historique du code*
- ⇩ *Critère de défaillance*
- ⇩ *Facteurs de sécurité*
- ⇩ *Intensité de contrainte*
- ⇩ *Classification des contraintes*

Code ASME

Boiler and Pressure Vessel Code

Les chaudières et réservoirs sous pression sont régis par le code ASME (American Society of Mechanical Engineers). C'est un outil de design qui contient l'ensemble des règles pour:

- ⇩ Calcul
- ⇩ Fabrication
- ⇩ Inspection

Les manufacturiers doivent respecter le code pour pouvoir exporter

- ⇩ aux États Unis
- ⇩ au Canada
- ⇩ à plusieurs autres pays

Historique du Code ASME

↓ Première tentative

American Boiler Manufacturer's Association (1887)
Expertise limitée (trial & error) des ingénieurs
Accidents (explosions de chaudières)
Règles de conception sécuritaires
Problèmes (Concurrence, divulgation des technologies)

↓ Deuxième tentative

Explosion à Brockton au Massachusetts (1905)
Apparition d'un code légal dans cette état (1907)
Apparition des codes dans d'autres états
Conflits et problème de conformité
Uniformité des codes (1911)
Première version du code ASME (1915)

Historique du Code ASME (suite)

↓ Première version (1915)

1 volume sur les chaudières de puissance (Power Boilers)
 $P_{max} = 275 \text{ psi}$ $T_{max} = 600^{\circ}\text{F}$

↓ Autres sections

Section VIII (1925)

↓ Code actuel

12 Sections
Chaudières $P_{max} = 5000 \text{ psi}$ et $T_{max} = 1100^{\circ}\text{F}$
Réservoirs $P_{max} = 3000 \text{ psi}$ (20.7 MPa)
et $-350 < \text{Temp.} < 1000^{\circ}\text{F}$ ($-212 < \text{Temp.} < 538^{\circ}\text{C}$)

↓ Adoption du code par les provinces canadiennes

Modifications au niveau de certification et législation

Contenu du Code ASME

- ↳ Section I-Power Boilers
- ↳ Section II-Materials
 - ↳ Part A-Ferrous Material Specifications
 - ↳ Part B-Nonferrous Material Specifications
 - ↳ Part C-Specifications For Welding Rods Electrodes And Filler Metals
 - ↳ Part D-Properties
- ↳ Section III Rules Construction Nuclear Power Plant Component
 - Division 1
 - ↳ Subsection NH Class 1 Components Elevated Temperature Service
 - ↳ Subsection NC-Class 2 Components
 - ↳ Subsection ND-Class 3 Components
 - ↳ Subsection NE-Class MC Components
 - ↳ Subsection NF-Supports
 - ↳ Subsection NG-Core Support Structures
 - ↳ Subsection-NB-Class 1 Components
 - ↳ Division 2 Code Concrete Reactor Vessels & Containment
 - ↳ Division 3 Containment System & Transportation Pkg Spent Nuc
 - ↳ Subsection NCA-General Requirements Div 1&2
 - ↳ Division 1 APPENDICES

Contenu du Code ASME

- ↳ Section IV-Rules For Construction Of Heating Boilers
- ↳ Section IX-Welding And Brazing Qualifications
- ↳ Section V-Nondestructive Examination
- ↳ Section VI-Recommended Rules For The Care And Operation Of Heating Boilers
- ↳ Section VII-Recommended Guidelines For The Care Of Power Boilers
- ↳ Section VIII- Rules For Construction of Pressure Vessels
 - ↳ Division 1
 - ↳ Division 2-Alternative Rules
 - ↳ Division 3-Alternative Rules High Press Vessels
- ↳ Section X-Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels
- ↳ Section XI - Rules For Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components
- ↳ Code Cases: Boilers And Pressure Vessels
- ↳ Nuclear Code Cases: Nuclear Components

Types de chargement (Loadings)

- ↓ Pressions interne et externe
- ↓ Charge dues au poids des composantes et contenus du réservoir
- ↓ Charge superposées des autres composantes et équipements, isolants et autres matériaux anti-corrosion et anti-érosion
- ↓ Charges du vent, de la neige et sismiques
- ↓ Réactions des supports, des anneaux, des pâtes d'encrage et autres
- ↓ Charges thermiques
 - ☞ Dilatation thermique
 - ☞ Différents matériaux, hétérogénéité et ou non-isotropie
 - ☞ Gradient thermique

Critères de défaillance utilisés par le code ASME

↓ Critère de la contrainte normale maximal

- ☞ Section I: Power Boilers
- ☞ Section VIII division I: Rules for construction of PV

$$\sigma_{\max} = S_u \quad \sigma_{\max} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

↓ Critère de la contrainte de cisaillement maximale

- ☞ Section III: Nuclear components
- ☞ Section VIII division 2: Alternative rules

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = S_y \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$
$$\sigma_{\max} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$
$$\sigma_{\min} = \min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

Catégories de défaillance (categories of failures)

↓ Matériau

- ☞ Mauvais choix
- ☞ Défauts dans le matériau

↓ Design (conception)

- ☞ Données incorrectes
- ☞ Mauvaise méthode de conception

↓ Fabrication

- ☞ Control de la qualité
- ☞ Procédures de fabrication
- ☞ Traitement thermique ou formage

↓ Utilisation

- ☞ Changement des conditions d'opération
- ☞ Manque d'expérience du personnel d'exploitation et de maintenance

Types de défaillance (Types of failures)

↓ Déformation élastique (*Elastic deformation*)

- ☞ Instabilité ou flambement

↓ Rupture fragile (*Brittle fracture*)

- ☞ Base température, acier à faible teneur en carbone, 40 à 50°F, test hydrostatique

↓ Déformation plastique excessive (*Excessive plastic deformation*)

- ☞ ASME Sec VIII div. 2 donne les limites

↓ Rupture (*Stress rupture*)

- ☞ Déformation due au fluage produit par fatigue ou chargement cyclique

↓ Instabilité plastique (*Plastic instability*)

- ☞ Déformation plastique cumulée lors d'un chargement cyclique

↓ Grande déformation (*High strain*)

- ☞ Fatigue oligocyclique (matériau à base résistance et haute ductilité)

↓ Corrosion sous contrainte (*Stress corrosion*)

- ☞ Stress corrosion cracking ou fissuration sous présence du chlore (sel)

↓ Corrosion-fatigue (*Corrosion fatigue*)

- ☞ Phénomène d'usure (pitting) en présence de la fatigue et la corrosion

Classification des contraintes selon le Code ASME

Les contraintes sont classées suivant

- ↓ **Origine**
- ↓ **Localisation (endroit)**
- ↓ **Distribution**

Les catégories de contraintes sont

- ↓ **Contrainte Primaire (P)** satisfaire les lois d'équilibre
 - ☞ moyenne primaire P_m
 - ☞ locale primaire P_L
 - ☞ primaire due à la flexion P_b
- ↓ **Contrainte Secondaire (Q)** satisfaire les déformations
- ↓ **Contrainte Peak (F)** source possible de fatigue

Catégories des contraintes (Stress categories)

- ↓ **Contrainte moyenne primaire P_m** (*general primary membrane stress*)
 - ☞ contrainte moyenne à travers épaisseur
 - ☞ loin des discontinuités et des concentrations
 - ☞ produite par les charges mécaniques
- ↓ **Contrainte locale primaire P_L** (*local primary membrane stress*)
 - ☞ contrainte moyenne
 - ☞ associée à une discontinuité de la structure, loin des concentrations
 - ☞ produite par les charges mécaniques
- ↓ **Contrainte de flexion primaire P_b** (*primary bending stress*)
 - ☞ linéaire à travers la paroi
 - ☞ proportionnelle à la distance mesurée à partir de son centroïde
 - ☞ loin des discontinuités et concentrations
 - ☞ produite par charges mécaniques

Catégories des contraintes Stress categories (suite)

↓ **Contrainte secondaire Q (secondary stress)**

- ☞ Auto-équilibrante nécessaire pour satisfaire la continuité de la structure
- ☞ produite par charge mécanique et/ou différence de dilatation thermique
- ☞ aux discontinuités mais excluant les concentrations de contraintes locales

↓ **Contrainte peak F (peak stress)**

- ☞ incrément de contrainte qui s'ajoute à la contrainte (P + Q)
- ☞ produite par concentration de contrainte ou contrainte thermique locale mais pas distorsion
- ☞ Peut faire l'objet d'une source possible de fissuration par fatigue ou une rupture par fragilisation

Intensités des contraintes (Stress Intensities)

↓ **Intensité de contrainte est la contrainte équivalente de Tresca**

$$S_m = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2 \tau_{\max}$$

$$\sigma_{\max} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

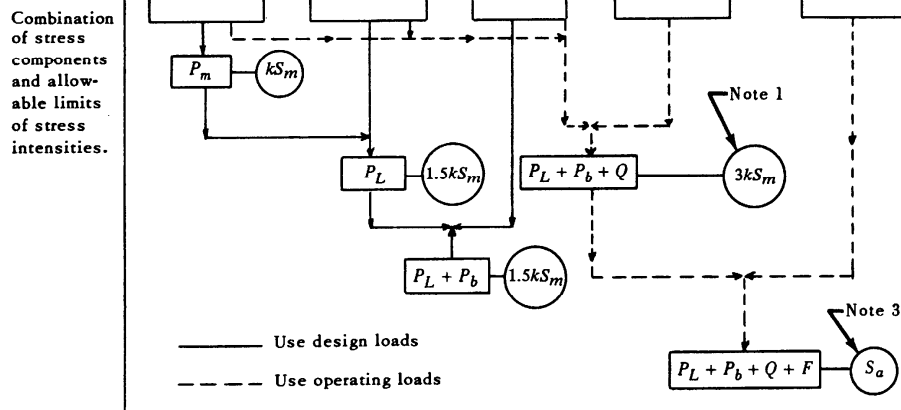
$$\sigma_{\min} = \min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

↓ **Procédure de calcul**

- ☞ Choisir un système d'axe t, l, r au point considéré
- ☞ Calculer les contraintes $\sigma_t, \sigma_l, \sigma_r, \tau_{tl}, \tau_{rl}$ et τ_{ll} pour chaque type de chargement
- ☞ Déterminer les catégories de contraintes P_m, P_L, P_b, Q et F
- ☞ Calculer les contraintes principales σ_1, σ_2 et σ_3 , pour les cas suivants

☞ P_m	→	$k S_m$
☞ P_L (P_L contient P_m)	→	$1.5 k S_m$
☞ $P_L + P_b$	→	$1.5 k S_m$
☞ $P_L + P_b + Q$	→	$3 k S_m$
☞ $P_L + P_b + Q + F$	→	S_a

Stress Category	Primary			Secondary Membrane plus Bending	Peak
	General Membrane	Local Membrane	Bending		
Description (For examples, see Table XIII-1130-1)	Average primary stress across solid section. Excludes discontinuities and concentrations. Produced only by mechanical loads.	Average stress across any solid section. Considers discontinuities but not concentrations. Produced only by mechanical loads.	Component of primary stress proportional to distance from centroid of solid section. Excludes discontinuities and concentrations. Produced only by mechanical loads.	Self-equilibrating stress necessary to satisfy continuity of structure. Occurs at structural discontinuities. Can be caused by mechanical load or by differential thermal expansion. Excludes local stress concentrations.	(1) Increment added to primary or secondary stress by a concentration (notch). (2) Certain thermal stresses which may cause fatigue but not distortion of vessel shape.
Symbol (Note 4)	P_m	P_L	P_b	Q	F



CLASSIFICATION OF STRESS INTENSITY IN VESSELS FOR SOME TYPICAL CASES¹

Vessel Part	Location	Origin of Stress	Type of Stress	Classification
Cylindrical or spherical shell	Shell plate remote from discontinuities	Internal Pressure	General membrane Gradient through plate thickness	P_m
		Axial thermal gradient	Membrane Bending	Q
	Junction with head or flange	Internal pressure	Membrane Bending	P_L Q
Any shell or head	Any section across entire vessel	External load or moment, or internal pressure	General membrane averaged across full section. Stress component perpendicular to cross section	P_m
		External load or moment	Bending across full section. Stress component perpendicular to cross section	P_m
	Near nozzle or other opening	External load or moment, or internal pressure	Local membrane Bending Peak (fillet or corner)	P_L Q F
	Any location	Temp. diff. between shell and head	Membrane Bending	Q Q
Dished head or conical head	Crown	Internal pressure	Membrane Bending	P_m P_b
	Knuckle or junction to shell	Internal pressure	Membrane Bending	P_L ² Q
Flat head	Center region	Internal pressure	Membrane Bending	P_m P_b
	Junction to shell	Internal pressure	Membrane Bending	P_L Q
Perforated head or shell	Typical ligament in a uniform pattern	Pressure	Membrane (Av. thru cross section) Bending (Av. thru width of lig., but gradient thru plate) Peak	P_m P_b F
			Isolated or atypical Ligament	Membrane Bending Peak
Nozzle	Cross section perpendicular to nozzle axis	Internal pressure or external load or moment	General membrane av. across full section. Stress component perpendicular to section	P_m (NB-3227.5)
		External load or moment	Bending across nozzle section	P_m (NB-3227.5)
	Nozzle wall	Internal pressure	General membrane Local membrane Bending Peak	P_L (NB-3227.5) Q F
			Differential expansion	Membrane Bending Peak

STRESS INTENSITY *k* FACTORS FOR VARIOUS LOAD COMBINATIONS

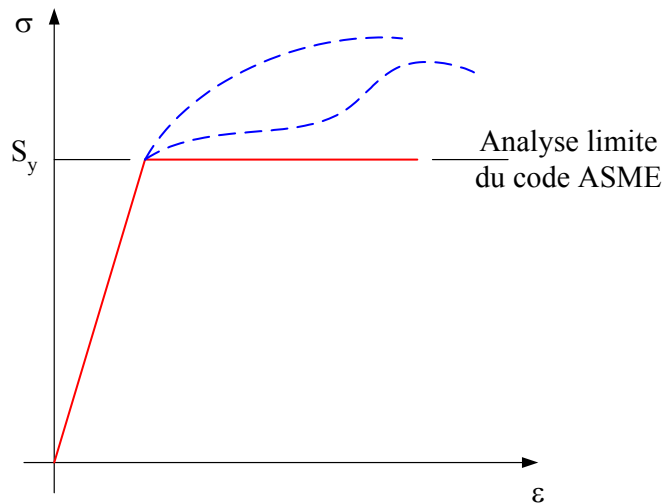
Condition	Load Combinations (See AD-110)	<i>k</i> Factors	Calculated Stress Limit Basis
Design	A) The design pressure, the dead load of the vessel, the contents of the vessel, the imposed load of the mechanical equipment, and external attachment loads	1.0	Based on the corroded thickness at design metal temperature
	B) Condition A above plus wind load	1.2	Based on the corroded thickness at design metal temperature
	C) Condition A above plus earthquake load	1.2	Based on the corroded thickness at design metal temperature
	D) Condition A above plus loads resulting from wave action [Note (1)] (NOTE: The condition of structural instability or buckling must be considered.)	1.2	Based on the corroded thickness at design metal temperature
Operation	A) The actual operating loading conditions. This is the basis of fatigue life evaluation.	See AD-160 and Appendix 5	Based on corroded thickness at operating pressure and metal operating temperature
Test	A) The required test pressure, the dead load of the vessel, the contents of the vessel, the imposed load of the mechanical equipment, and external attachment loads	See AD-151 for special limits	Based on actual design values at test temperature

NOTE:

(1) When the rules of this Division are used in design of pressure vessels installed in oceangoing ships, barges, and other floating craft [per AG-100(b)(2)], dynamic loads resulting from wave action included under Condition D shall be the most probable largest loads encountered during the vessel's life and having a probability level per wave encounter not greater than 10^{-8} , which corresponds to one occurrence in 20 years.

Conception limite du code ASME (Limit design)

le matériau a un comportement élastique parfaitement plastique où le phénomène de l'écroutissement est complètement ignoré

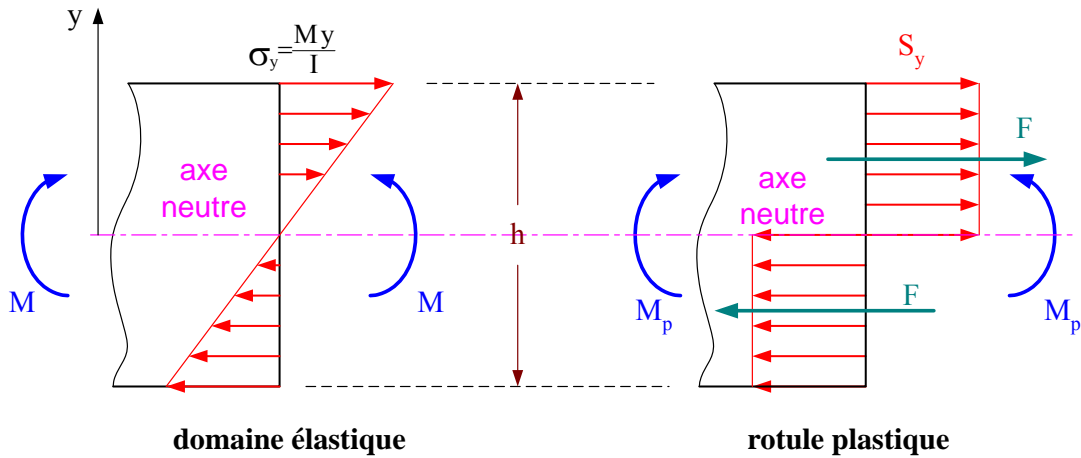


Analyse limite (Effondrement) Limit design (collapse)

Effondrement plastique d'une section rectangulaire en flexion

$$M_P = S_y \frac{h}{2} b \left(\frac{h}{2}\right) = S_y \frac{bh^2}{4}$$

$$\sigma = M_P \frac{c}{I} = S_y \frac{bh^2}{4} \frac{h}{2} \frac{1}{bh^3/12} = \frac{3}{2} S_y \quad \rightarrow \text{facteur de forme} = 1.5$$

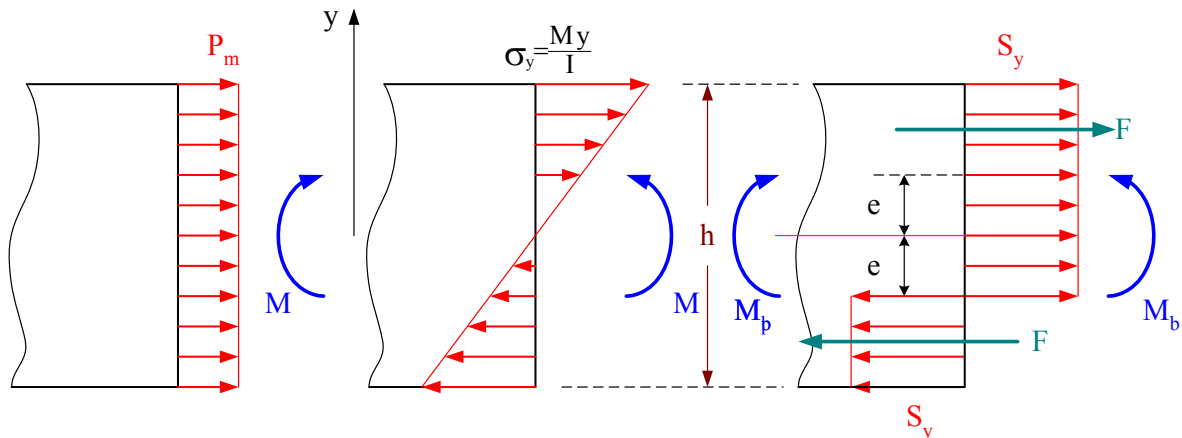


Analyse limite - Effondrement Limit design - collapse (suite)

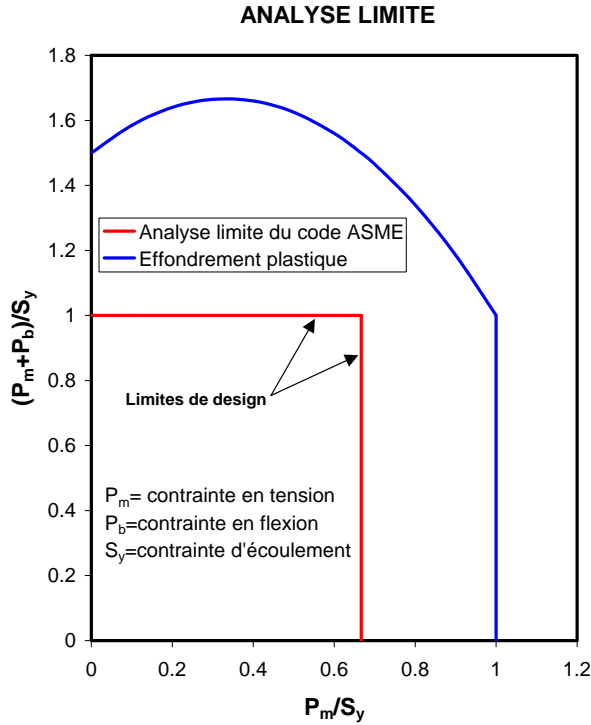
Effondrement plastique d'une section rectangulaire sous chargement combiné en tension et flexion

$$P_m = \frac{S_y(h/2+e)b - S_y(h/2-e)b}{bh} = 2 S_y \frac{e}{h}$$

$$P_b = \frac{M}{I} c = \frac{S_y b \left(\frac{h}{2}-e\right) \left[\left(\frac{h}{2}-e\right)+e\right] - S_y b \left(\frac{h}{2}+e\right) \left[\left(\frac{h}{2}+e\right)-e\right]}{\frac{bh^3}{12}} \frac{h}{2} \quad P_b = 6 S_y \left[\frac{1}{4} - \left(\frac{e}{h}\right)^2 \right]$$



Analyse limite

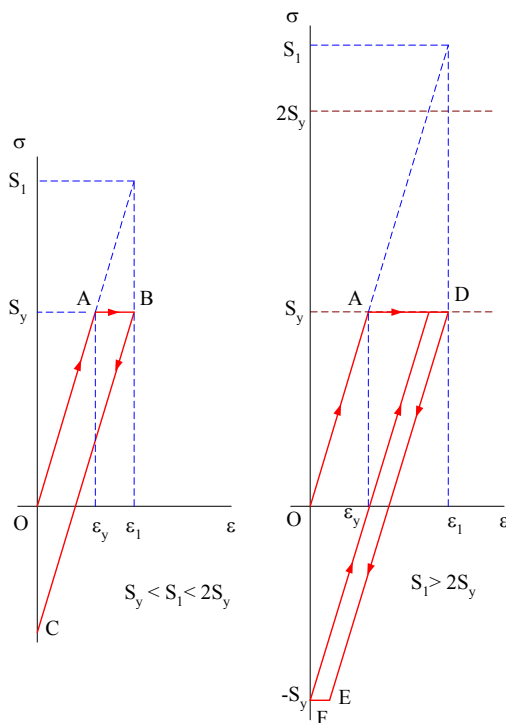


$$\frac{P_m}{S_y} = \frac{2e}{h}$$

$$\frac{P_b}{S_y} = 6 \left[\frac{1}{4} - \left(\frac{e}{h} \right)^2 \right]$$

$$\frac{P_m + P_b}{S_y} = \frac{3}{2} + \frac{2e}{h} - 6 \left(\frac{e}{h} \right)^2$$

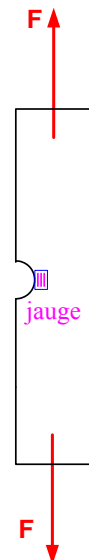
Contrainte secondaire élastique Secondary elastic stress



On considère un cycle de déformation au lieu d'un cycle de contrainte

Elastic stress range = $2 S_y$

Design statique
 $P_1 + P_b + Q + F$



Contrainte admissible (Facteur de sécurité) allowable stress (safety factor)

↓ Pour la section VIII div. 1, (*Conception par règles*)

S_m est le plus petit de

- ☞ 1/3 de la contrainte d'écoulement
- ☞ 1/4 de la contrainte ultime

↓ Pour la section VIII div. 2, (*Conception par analyse*)

S_m est le plus petit de

- ☞ 2/3 de la contrainte d'écoulement
- ☞ 1/3 de la contrainte ultime

Intensité de contrainte	Valeur de la table	Limite d'écoulement	Résistance ultime
Contrainte moyenne primaire P_m	S_m	$\leq 2/3 S_y$	$\leq 1/3 S_u$
Contrainte locale primaire P_L	$1.5 S_m$	$\leq S_y$	$\leq 0.5 S_u$
Contrainte de flexion primaire P_b	$1.5 S_m$	$\leq S_y$	$\leq 0.5 S_u$
Contrainte secondaire Q	$3 S_m$	$\leq 2 S_y$	$\leq S_u$