

# **MA1 – COURS DE CHARPENTES METALLIQUES**

---

## **CLASSIFICATION DES SECTIONS**

---

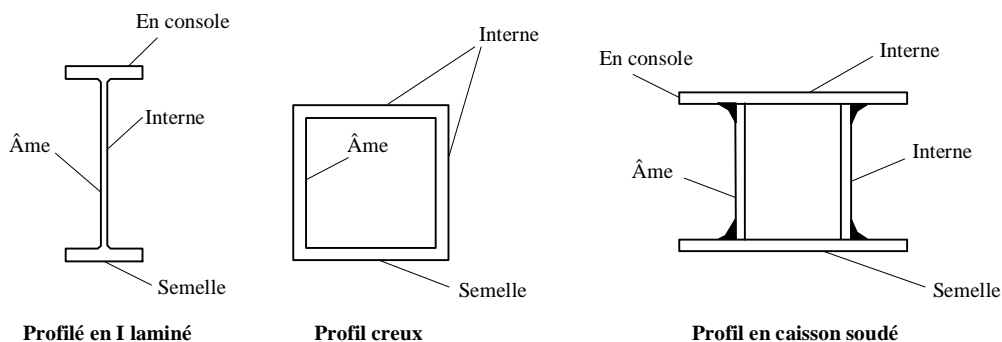
**INSTITUT HEMES GRAMME**

**Ir. Jacques Dehard  
Professeur**

# 1. Introduction

Les profilés de construction, qu'ils soient laminés ou soudés, peuvent être considérés comme constitués d'un ensemble de parois distinctes, dont certaines sont dites « internes ou raidies » (par exemple les âmes de poutres ouvertes ou les semelles de caissons) et d'autres sont appelées « en console ou non raidie » (par exemple les semelles des profils ouverts et les ailes des cornières).

Comme les parois des profilés de construction sont relativement minces comparées à leur largeur, lorsqu'elles sont sollicitées en compression (par suite de l'application de charges axiales sur la totalité de la section et/ou par suite de flexion), elles peuvent voiler localement. Ainsi, la prédisposition d'une paroi quelconque de la section transversale au voilement peut limiter la capacité de résistance aux charges axiales ou la résistance à la flexion de la section, en l'empêchant d'atteindre sa limite élastique. On peut éviter une ruine prématurée provoquée par les effets du voilement local en limitant le rapport largeur/épaisseur des parois individuelles au sein de la section transversale. Ceci constitue la base de l'approche par classification des sections transversales.



## 2. Classification

L'EC3 définit quatre classes de sections transversales. La classe à laquelle appartient une section transversale particulière dépend de l'élancement de chaque élément (défini par un rapport largeur/épaisseur) et de la distribution des contraintes de compression, uniforme ou linéaire. Les classes sont définies en termes d'exigences de comportement pour la résistance aux moments fléchissants :

**Les sections transversales de Classe 1** sont celles où peut se former une rotule plastique possédant la capacité de rotation exigée pour l'analyse plastique, c'est-à-dire pour autoriser une redistribution des moments dans la structure.

**Les sections transversales de Classe 2** sont celles qui, bien qu'elles soient capables de développer un moment plastique, ont une capacité de rotation limitée sous moment constant.

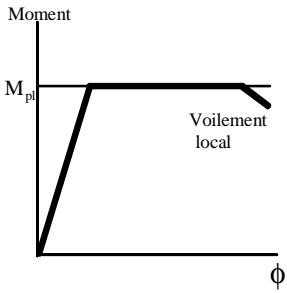
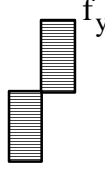
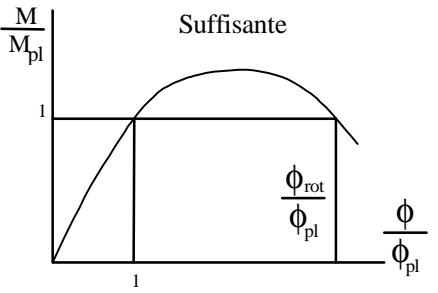
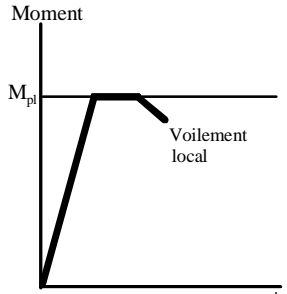
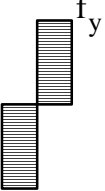
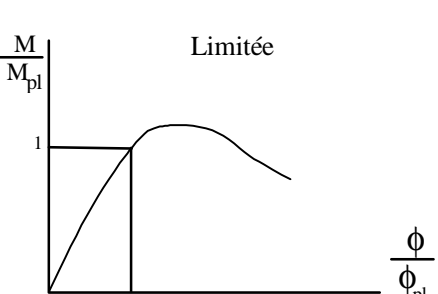
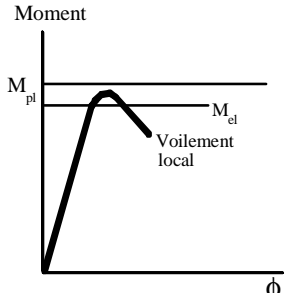
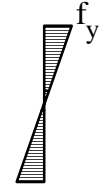
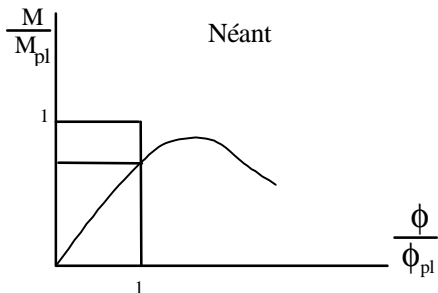
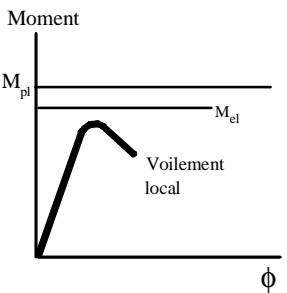
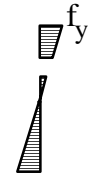
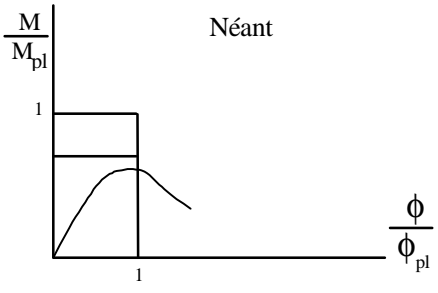
**Les sections transversales de Classe 3** sont celles pour lesquelles la contrainte calculée dans la fibre extrême comprimée peut atteindre la limite élastique mais où le voilement local, tout en permettant le développement du moment élastique, empêche le développement du moment résistant plastique.

**Les sections transversales de Classe 4** sont celles dans lesquelles le voilement local limite le moment résistant à une valeur inférieure à celle du moment élastique (ou la résistance à la compression pour les éléments sous charges normales). Une prise en compte explicite des effets du voilement local est nécessaire (principe des largeurs efficaces, aires et modules efficaces) dans ce type de sections !

Compte tenu des définitions précédentes, il y a donc une relation entre l'analyse globale d'une structure et le calcul de la résistance de ses sections transversales ! Ainsi,

- des sections de classes 1, permettant la formation de rotules plastiques (diagramme bi-rectangulaire de contraintes) avec des capacités de rotation suffisantes pour assurer une redistribution des moments conduisant à la formation d'un mécanisme de ruine, sont nécessaires pour une analyse globale plastique ;
- des sections de classes 2, permettant la formation de rotules plastiques, mais avec des capacités de rotation limitées insuffisantes pour assurer une redistribution des moments, doivent être utilisées avec une analyse globale élastique. L'état limite ultime est alors associé à la formation de la première rotule plastique ;
- des sections de classes 3 ou 4, ne pouvant atteindre leur résistance plastique, doivent obligatoirement faire l'objet d'une analyse globale élastique. L'état limite ultime est obtenu, respectivement, lorsque la limite élastique est atteinte dans la fibre la plus sollicitée de la section complète (classe 3), ou dans la fibre la plus sollicitée de la section dite « efficace » à cause du voilement local (classe 4).

Le tableau suivant résume les classes en fonction du comportement, du moment de résistance et de la capacité de rotation :

Modèle de comportement	Moment de résistance	Capacité de rotation	Classe
	Moment plastique sur section brute 		<b>1</b>
	Moment plastique sur section brute 		<b>2</b>
	Moment élastique sur section brute 		<b>3</b>
	Moment élastique sur section efficace 		<b>4</b>

Où :  $M$  : le moment appliqué à la section ;

$\phi$  : la rotation (courbure) de la section sous le moment ;

$\phi_{pl}$  : la rotation (courbure) de la section exigée pour y générer une distribution plastique totale des contraintes ;

Les moments de résistance en flexion pour les quatre classes définies ci-dessus sont donc :

- pour les **classes 1 et 2** : le moment plastique :  $M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y$  ;
- pour la **classe 3** : le moment élastique de la section brute :  $M_{el} = W_{el} \cdot f_y$  ;
- pour la **classe 4** : le moment élastique réduit à cause du voilement local c'est-à-dire le moment élastique de la section efficace :  $M_o = W_{eff} \cdot f_y < M_{el}$

### 3. Comportement élastique d'une paroi comprimée

Une plaque (ou paroi) plane rectangulaire mince (figure (a) ci-dessous), soumise à des efforts de compression exercés sur ses petits côtés, a une contrainte de voilement critique élastique  $\sigma_{cr}$ , ou contrainte critique d'Euler, donnée par :

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{\sigma} \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2$$

où :  $k_{\sigma}$  représente le coefficient de voilement de la plaque qui prend en compte les conditions d'appui aux bords, la distribution des contraintes et le coefficient d'aspect de la plaque  $L/b$ ;

$\nu$  = coefficient de Poisson ;

$E$  = module de Young ;

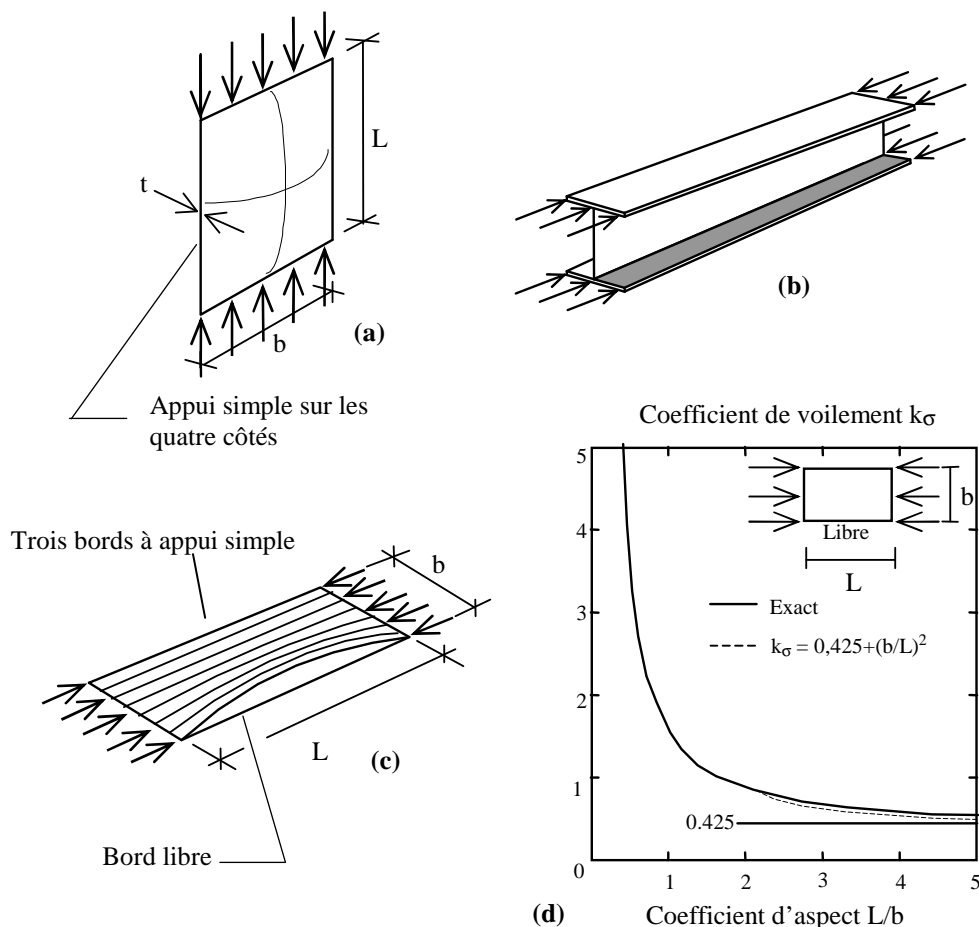
$t$  = épaisseur de la plaque ;

$b$  = largeur de la plaque.

La contrainte de voilement critique élastique  $\sigma_{cr}$ , établie dans le cadre de la théorie élastique linéaire pour une plaque parfaite et un matériau parfait (indéfiniment élastique), est donc inversement proportionnelle à  $(b/t)^2$ , rapport qui est analogue à l'élancement  $(L/i)^2$  pour le flambement des colonnes.

Les sections de profilés utilisés en construction comprennent des parois qui tendent à être très longues par rapport à leur largeur (rapports  $L/b \gg 1$ ).

De plus, les sections ouvertes comprennent un certain nombre de parois qui sont libres le long d'un bord longitudinal. La déformation de voilement pour ces parois, lorsqu'elles sont comprimées, est illustrée dans la figure ci-dessous (cas (b) et (c)). La relation entre le coefficient d'aspect et le coefficient de voilement pour une paroi en console longue et mince de ce type est illustrée à la figure (d), d'où il ressort clairement que le coefficient de voilement tend vers une valeur limite de 0,425 au fur et à mesure que l'élancement de la paroi augmente.

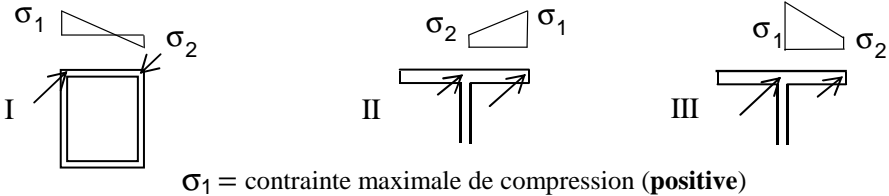


La littérature technique fournit nombre de tableaux, formules ou graphiques donnant les coefficients de voilement pour toute une série de plaques avec différentes conditions d'appuis, différents chargements et différentes dimensions.

Le tableau suivant donne, par exemple, les coefficients  $k_\sigma$  pour des parois longues uniformément comprimées avec diverses conditions d'appui le long des bords longitudinaux :

Conditions d'appui bords longitudinaux	Coefficients $k_\sigma$
Encastré-encastré	6,97
Encastré-appuyé	5,41
Appuyé-appuyé	4,00
Encastré-libre	1,25
Appuyé-libre	0,43

Quand les parois des sections transversales sont soumises à des répartitions de contraintes variables, le coefficient  $k_\sigma$  doit en tenir compte. Il dépend alors du rapport des contraintes  $\psi$ . Le tableau suivant donne des formules pour des parois internes et en consoles de profilés classiques :

					
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	+1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi \geq -1$	-1
Cas I Paroi interne	4,0	$8,02/(1,05+\psi)$	7,81	$7,81 + 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9
Cas II Paroi console	0,43	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	0,57	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	0,85
Cas III Paroi console	0,43	$0,578/(0,34+\psi)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

On peut donc conclure que si l'on reste dans le domaine élastique, pour qu'une section soit classifiée en classe 3 ou mieux (2 ou 1), la contrainte de voilement critique élastique  $\sigma_{cr}$  doit être supérieure à la limite élastique  $f_y$ .

En égalant donc l'expression  $\sigma_{cr} = \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$  à  $f_y$ , en remplaçant  $\nu$  par sa valeur 0,3 et en réorganisant, cela est le

cas si :  $b/t < 0,92 \sqrt{k_\sigma E/f_y}$

En fait, cette expression est générale car l'effet de la répartition des contraintes, les conditions aux limites et l'élancement de la paroi, sont tous compris dans le coefficient de voilement  $k_\sigma$ .

## 4. Comportement élastique - plastique d'une paroi comprimée

Le comportement « élastique – plastique » d'une paroi parfaitement plane, faite d'un matériau « élastique-parfaitement plastique », soumise à une compression uniforme, peut être utilement représenté par un diagramme « charge ultime normalisée - élancement réduit », où la charge ultime normalisée  $\bar{N}_p$ , et l'élancement réduit de paroi  $\bar{\lambda}_p$ , sont donnés

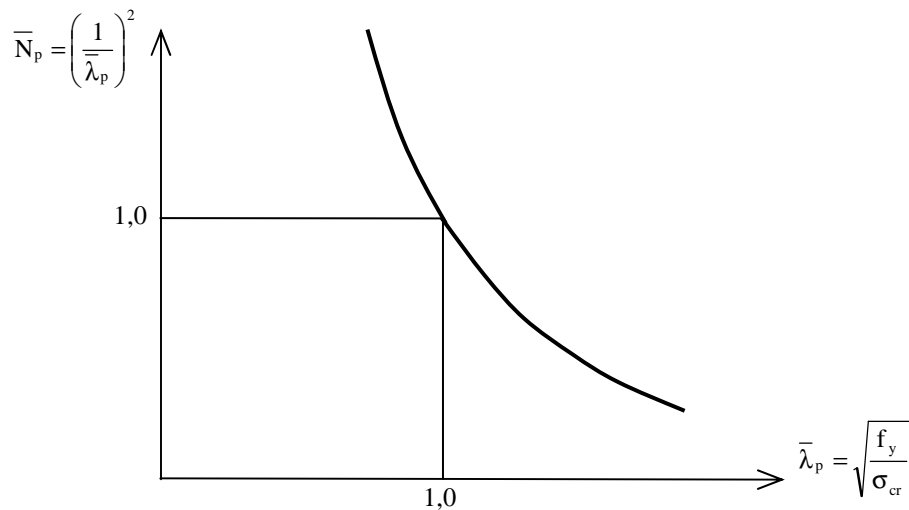
$$\text{par : } \bar{N}_p = \frac{\sigma_{ult}}{f_y} \quad \text{et} \quad \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}.$$

Pour cela, reprenons, un instant, la logique de la théorie élastique de la contrainte de voilement d'Euler. Dans ce cas, la contrainte ultime qui intervient dans la définition précédente de la charge ultime normalisée doit correspondre à cette contrainte critique puisque, dans ce cas, on ignore la limite d'élasticité de l'acier : on posera donc  $\sigma_{ult} = \sigma_{cr}$ .

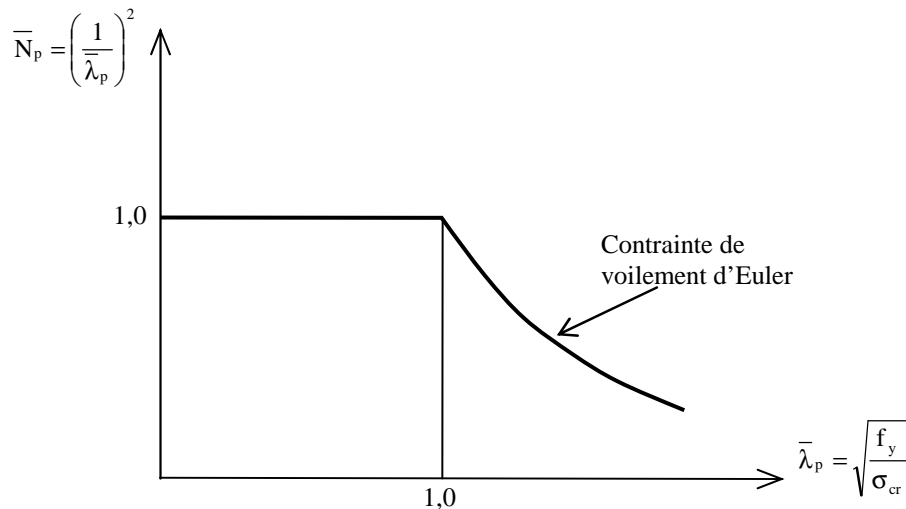
On obtient alors pour la charge ultime normalisée :  $\bar{N}_p = \frac{\sigma_{cr}}{f_y}$  et comme  $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$ , on a finalement la relation :

$$\bar{N}_p = \left(\frac{1}{\bar{\lambda}_p}\right)^2 \quad \text{établie dans les conditions d'une pièce parfaite.}$$

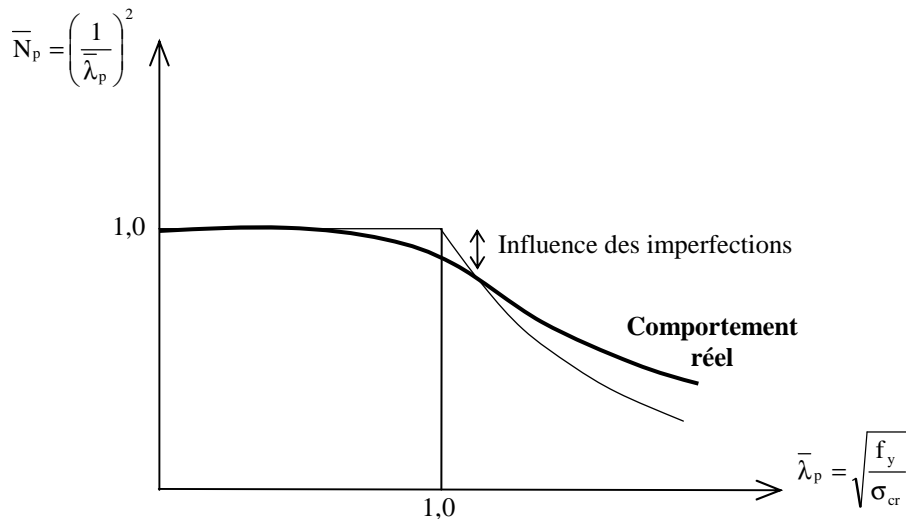
La figure suivante montre cette relation qui existe entre  $\bar{N}_p$  et  $\bar{\lambda}_p$ .



Il faut cependant tenir compte de la limite élastique  $f_y$  du matériau et corriger la courbe en conséquence. En effet, pour un élancement réduit de paroi inférieur à l'unité, la charge ultime normalisée ne peut dépasser l'unité, puisque la paroi ne peut développer une charge supérieure à sa charge d'écrasement plastique. Pour des valeurs de  $\bar{\lambda}_p$  supérieures,  $\bar{N}_p$  diminuera au fur et à mesure que l'élancement de paroi augmente, la contrainte limite soutenue étant limitée à la contrainte de voilement critique élastique  $\sigma_{cr}$ . On obtient alors le graphe plus réaliste suivant :



En réalité, la paroi a des imperfections initiales (défauts de planéité, contraintes résiduelles, ...), l'acier n'a pas un comportement idéal « élastique-parfaitement plastique », et toute plaque a la capacité de supporter des charges au-delà du niveau provoquant le voilement élastique (comportement « post-critique »). Pour toutes ces raisons, et si on néglige l'écroutissement du matériau pour les très faibles élancements, le comportement réel d'une plaque est finalement le suivant, où l'on constate que les imperfections provoquent un voilement prématuré pour  $\bar{\lambda}_p < 1$  :



## 5. Elancements limites des parois

En substituant l'expression  $\sigma_{cr} = \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$  dans la définition de l'élancement réduit  $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$ , et en remplaçant  $f_y$  par  $235/\epsilon^2$  (pour que l'expression puisse être utilisée avec toutes les nuances d'acier), cet élancement réduit de paroi peut être exprimé sous la forme :

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{t}\right)^2}{\frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{\epsilon^2}{235}}}, \text{ et en remplaçant } \pi, E \text{ et } \nu \text{ par leurs valeurs : } \boxed{\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}}, \text{ soit}$$

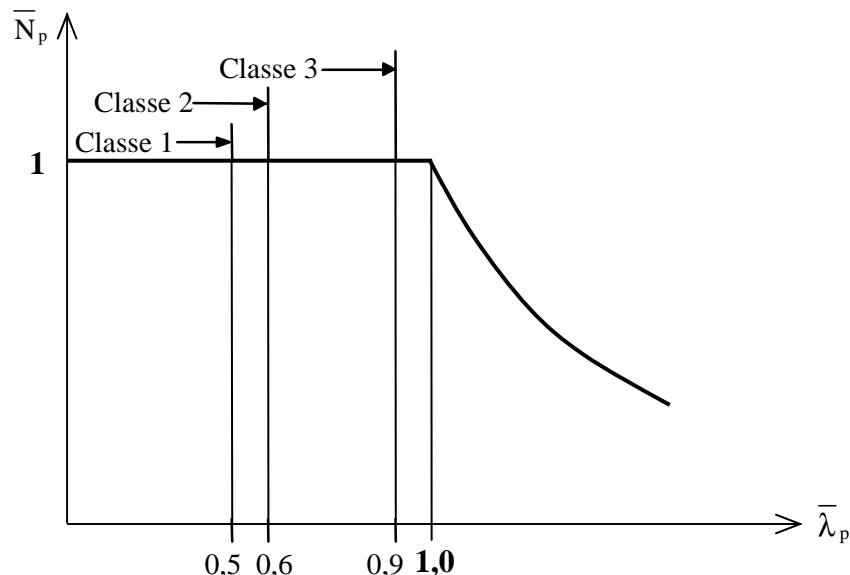
une expression qui relie directement l'élancement réduit au rapport « visuel »  $b/t$  et aux caractéristiques de la plaque représentées par  $k_\sigma$ .

Il faut alors fixer des limites de l'élancement réduit de paroi pour les différentes classes.

Au vu du graphique représentant le comportement d'une plaque réelle, pour les sections de classes 3, l'élancement limite de paroi ne peut être pris égal à 1 à cause des imperfections et du comportement réel de l'acier ! Il doit être réduit afin de retarder l'apparition du voilement local jusqu'à ce que la nécessaire distribution des contraintes dans la section (plastification au niveau de la fibre extrême ou distribution plastique sur la section entière) ait été atteinte. C'est pourquoi, en fonction de statistiques sur les imperfections notamment, l'EC3 a adopté pour les classes 3 :  $\bar{\lambda}_p < 0,9$  pour les parois fléchies (où la limite élastique peut être atteinte dans la fibre extrême) et  $\bar{\lambda}_p < 0,74$  pour les parois comprimées (où la limite élastique peut être atteinte dans toute la section).

Une section de classe 1 doit développer un moment résistant égal à la capacité plastique de la section et doit maintenir cette résistance sous des rotations importantes (déformation du matériau dans la zone d'écroutissage). Il faut donc dans ce cas, retarder l'apparition du voilement local jusqu'à ce que la distribution plastique des contraintes dans la section et la redistribution des efforts dans la structure aient été atteints. Sur base de certaines considérations théoriques, l'EC3 a choisi pour les classes 1 :  $\bar{\lambda}_p < 0,5$ .

Pour les classes 2, qui doivent aussi développer leur moment plastique, mais dont la capacité de rotation est limitée, l'EC3 propose :  $\bar{\lambda}_p < 0,6$ . Tout ceci est résumé sur le graphique suivant :



Il reste alors, en utilisant la relation  $\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$  avec les valeurs convenables de  $\bar{\lambda}_p$  et  $k_\sigma$ , à tirer les rapports

limites  $b/t$  pour les différentes classes de sections de profilés comprimés ou fléchis.

Les tableaux suivants sont extraits de l'EN1993-1-1 où « c » représente la largeur « b » appropriée pour le type de paroi et le type de section transversale.

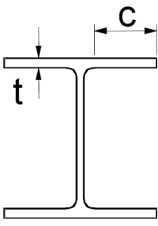
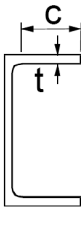
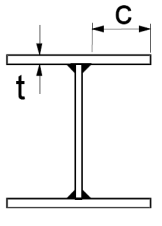
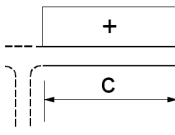
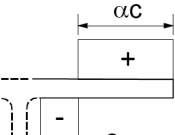
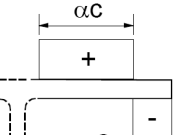
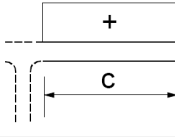
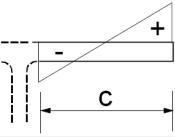
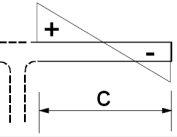
**Table 5.2 (Feuille 1 sur 3): Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées**

Parois comprimées internes						
				Axe de flexion		
Classe	Paroi fléchie	Paroi comprimée		Paroi fléchie et comprimée		
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$		lorsque $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ lorsque $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$		
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$		lorsque $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ lorsque $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$		
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$		lorsque $\psi > -1$ : $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ lorsque $\psi \leq -1^*)$ : $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$		
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	235	275	355	420	460
	$\varepsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

\*)  $\psi \leq -1$  s'applique lorsque la déformation dans la fibre comprimée est inférieure à la déformation dans la fibre tendue, que la contrainte de compression soit inférieure à  $f_y$  ou que la zone tendue soit partiellement plastifiée. Dans ce second cas,  $\psi$  est le rapport algébrique de la déformation dans la fibre tendue à la déformation dans la fibre comprimée.

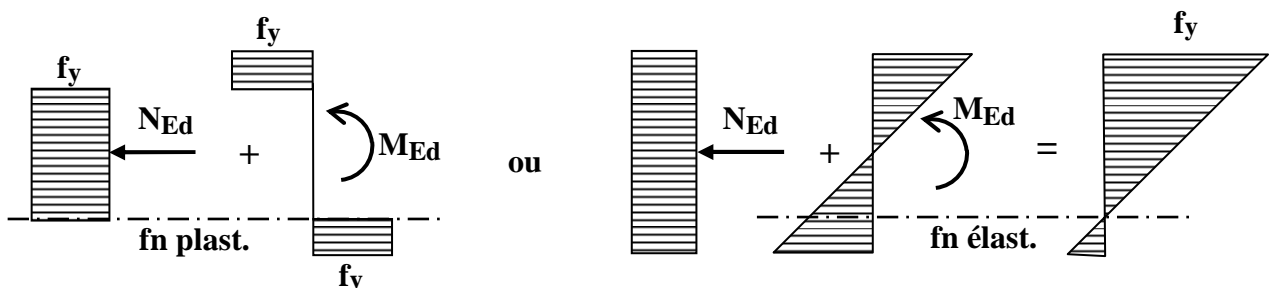


**Tableau 5.2 (Feuille 2 sur 3): Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées**

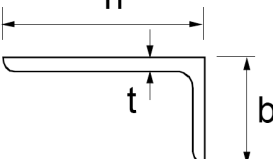
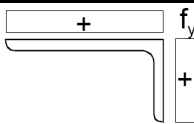
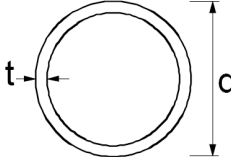
Semelles en console						
						
Sections laminées		Sections soudées				
Classe	Paroi comprimée	Paroi fléchie et comprimée				
		Extrémité comprimée		Extrémité tendue		
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c / t \leq 9\varepsilon$	$c / t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c / t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c / t \leq 10\varepsilon$	$c / t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c / t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c / t \leq 14\varepsilon$	$c / t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$				
Pour $k_\sigma$ , voir l'EN 1993-1-5						
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	$f_y$ (N/mm²)	235	275	355	420	460
	$\varepsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

## 5.1 Cas de la flexion composée

Comme on peut le voir sur les deux tableaux précédents, en cas de flexion composée d'un profil, le classement dépendra de la position de l'axe neutre élastique ou plastique. Si la flexion a lieu autour de y-y, c'est l'âme qui est concernée et si c'est autour de z-z, ce sont les semelles. Dans ce cas, il faudra connaître, soit l'effort normal  $N_{Ed}$ , soit le moment  $M_{Ed}$  appliqué à la section, pour pouvoir calculer la position de l'axe neutre, et ce, en supposant la section complètement plastifiée ou en supposant la plus grande contrainte égale à  $f_y$  (calcul élastique) !



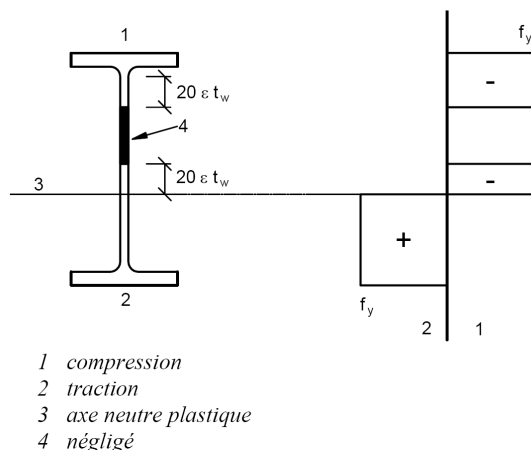
**Tableau 5.2 (Feuille 3 sur 3): Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées**

<div><div>Consulter également “Semelles en console” (voir feuille 2 sur 3)</div><div><div>Cornières</div></div><div>Ne s'applique pas aux cornières en contact continu avec d'autres composants</div></div>						
Classe	Section comprimée					
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
<div><div>Sections tubulaires</div></div>						
Classe	Section fléchie et/ou comprimée					
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$					
NOTE Pour $d/t > 90\varepsilon^2$ , voir l'EN 1993-1-6						
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	235	275	355	420	460
	$\varepsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\varepsilon^2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

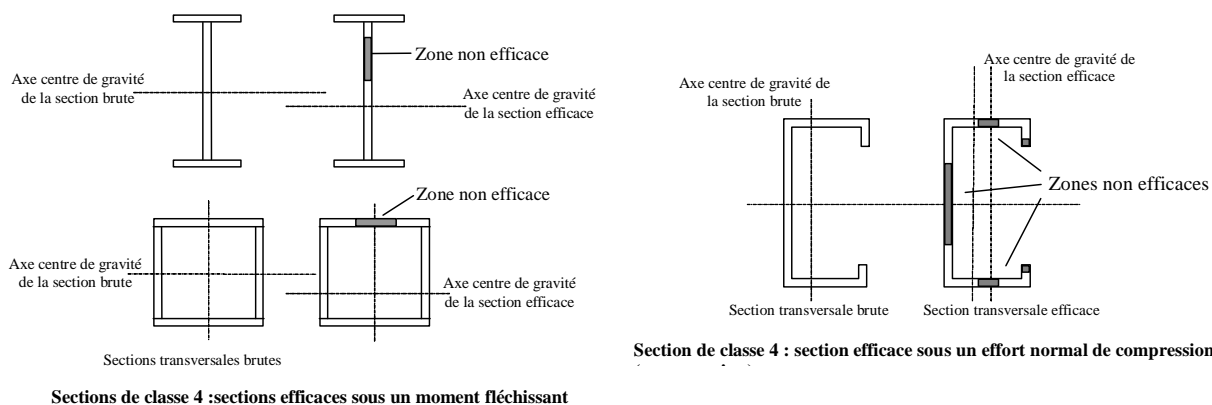
## 6. Remarques

1. La classe d'une section transversale est définie par la classe la plus élevée (la moins favorable) de ses parois partiellement ou complètement comprimées.
2. La classe d'une section dépend de la limite élastique de l'acier ainsi que du type de sollicitation (flexion et compression). C'est évident au vu de la formule de l'élancement réduit  $\bar{\lambda}_p$ . Par exemple, un profilé IPE360 sera de classe 1, en flexion, pour un acier S235, S355 et S460, tandis qu'il sera de classe 2 en compression pour un acier S235, de classe 3 en compression pour un acier S355 et de classe 4 en compression pour un acier S460 !
3. Lors de la détermination de la résistance d'une section transversale de classe 3, lorsque la plastification se produit d'abord du côté tendu de la section, les réserves plastiques de la zone tendue peuvent être exploitées en prenant en compte une plastification partielle dans cette zone.

4. Les sections transversales possédant une âme de classe 3 et des semelles de classe 1 ou 2 peuvent être considérées de classe 2 moyennant l'adoption d'une âme efficace en conformité avec le croquis ci-dessous :



5. Il y a lieu de considérer comme étant de classe 4, toute paroi ne satisfaisant pas les limites données pour la classe 3. Lorsque c'est le cas de l'une quelconque des parois comprimées d'une section, la totalité de la section est classifiée en classe 4 (communément appelée "section élancée"), et il convient de prendre en compte le voilement local dans les calculs, en utilisant une section transversale dite « **efficace** ». Cette dernière est prise égale à la section brute diminuée « de certaines parties » où le voilement peut se produire, puis calculée de façon similaire aux sections de classes 3 au moyen d'une résistance de section transversale élastique limitée par l'atteinte de la limite élastique aux fibres extrêmes. La figure suivante montre des exemples de sections transversales efficaces pour des parois fléchies ou comprimées.



6. Lorsque l'âme est considérée comme ne résistant qu'à l'effort tranchant, sans aucune contribution aux résistances à la flexion et à l'effort normal de la section, la section transversale peut être classée en classe 2, 3 ou 4, en fonction de la seule classe des semelles.

7. Excepté pour les barres calculées au flambement, les sections de classe 4 peuvent être traitées comme des sections de classe 3, si les rapports largeur-épaisseur sont inférieurs aux proportions limites pour la classe 3 prises dans les

tableaux précédents en ayant multiplié  $\epsilon$  par 
$$\sqrt{\frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}}$$
 où  $\sigma_{com,Ed}$  est la contrainte maximale de compression de

calcul exercée dans la paroi et tirée d'une analyse au premier ordre ou, si nécessaire, au second ordre. Ceci afin de traiter le cas de contraintes maximales inférieures à la limite élastique dans la section.

## 7. Vérifications des sections

Le chapitre sur la classification des sections, concerne le voilement par compression (uniforme ou variable) des parois de profilés. Ce voilement local, comme les effets du trainage de cisaillement, sont pris en compte au moyen de « largeurs efficaces » conformément à l'EN 1993-1-5. Le voilement par cisaillement se traite différemment et fait l'objet d'un chapitre dans cette même EN 1003-1-5.