

# CHAPITRE 3

## Classification des sections transversales

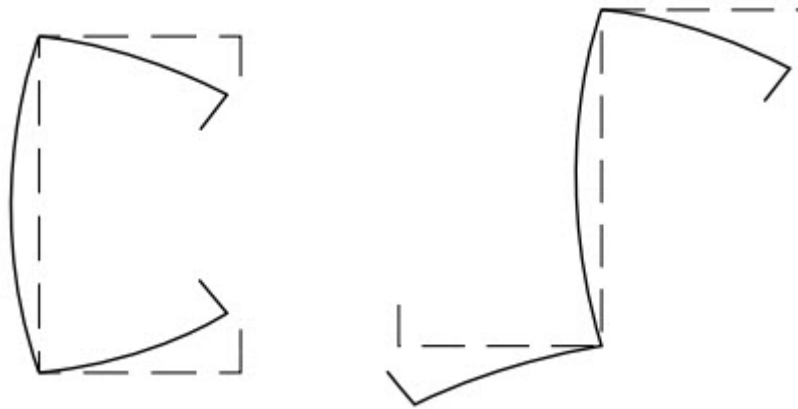
### 3.1 Introduction

Comme il a été présenté au chapitre 1, le matériau acier est caractérisé par une loi constitutive de contrainte-déformation mono-axiale symétrique ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), qui peut être déterminée par des essais de traction monotone sur des éprouvettes prélevés du matériau acier. La réponse des pièces en acier peut toutefois être très différente en traction ou en compression, en raison de l'influence importante des phénomènes de flambement. L'instabilité des éléments en acier comprimé ainsi que de tous les éléments réalisés avec d'autres matériaux peut être distinguée en :

- ◆ le flambement global ou flambement d'Euler, qui affecte l'élément sur toute sa longueur (ou une partie importante de celle-ci).
- ◆ le voilement local, qui affecte les plaques comprimées formant la section transversale, caractérisé par un voilement de longueur d'onde relativement courte.

En outre, il existe un troisième type d'instabilité, soi-disant "flambage par distorsion", qui a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières décennies. Ce mode de flambement est la conséquence de la déformation des sections transversales (Figure 3.1) : en ce qui concerne les éléments à paroi mince, c'est-à-dire les éléments principalement intéressés par ce phénomène, le flambement par distorsion est caractérisé par des déplacements relatifs de la ligne de pliage de la section transversale et la longueur d'onde associée est généralement comprise dans la plage délimitée par un voilement local et un de flambement global.

Il convient de noter que le voilement local et le flambement par distorsion peuvent interagir les uns avec les autres et que la conception des éléments en acier formés à froid est très complexe.

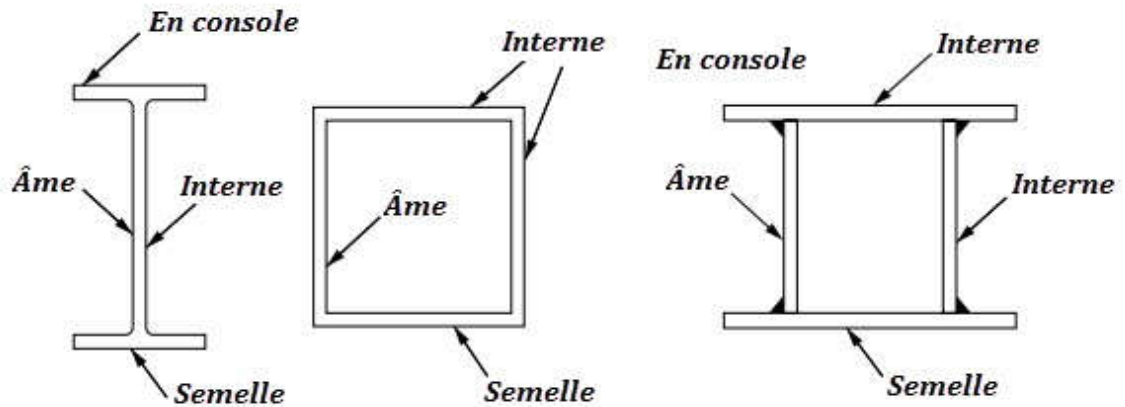


**Figure 3.1** Déformation typique de la section transversale pour le flambement par distorsion.

La classification d'une section transversale est nécessaire afin de choisir la méthode d'analyse appropriée ainsi que les approches appropriées pour les vérifications des membres. En outre, la stratégie de conception est basée sur ce qu'on appelle le calcul de capacité, et la classification des profilés est également très importante, en raison du rôle joué par la réponse ductile post-élastique. En général, toute section transversale est composée de différents éléments de plaque, tels que les semelles et les âmes, qui se répartissent en deux catégories (Figure 3.2) :

- Éléments internes ou rigidifiés, simplement supportés le long de deux bords parallèles à la direction de la contrainte de compression (axe longitudinal de l'élément) ;
- Les éléments en console (extérieurs) ou non rigidifiés, simplement appuyés le long d'un bord et libres sur l'autre bord parallèlement à la direction de la contrainte de compression.

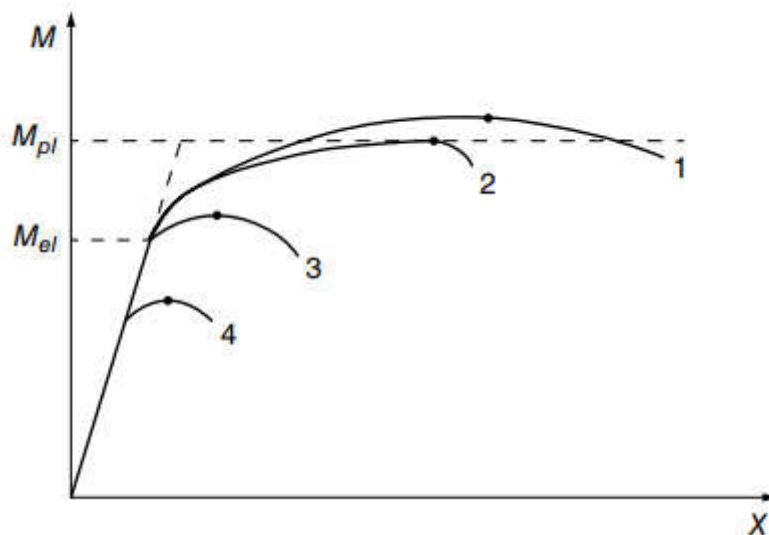
La classification de la section transversale dépend principalement du rapport largeur/épaisseur de chaque plaque (âme ou semelle), soit en compression totale ou partielle.



**Figure 3.2** Éléments internes ou en console.

### 3.2 Classification selon l'Eurocode 3

L'Eurocode 3 propose un critère de classification des sections transversales basé sur le rapport d'élancement (rapport largeur sur épaisseur) de chaque composant comprimé de la section, ainsi que sur d'autres facteurs. En particulier, en référence à la réponse en flexion en termes de relations entre le moment ( $M$ ) et la courbure ( $\chi$ ), les quatre classes de sections sont définies comme suit :



**Figure 3.3** Courbes de moments ( $M$ - $\chi$ ) pour les différentes classes de sections transversales considérées conformément à l'Eurocode 3.

- **Les sections transversales de classe 1**, c'est-à-dire celles qui garantissent une rotule plastique ayant une capacité de rotation suffisante pour l'analyse plastique sans réduction de la résistance (sections plastiques ou ductiles) ;
- **Les sections transversales de classe 2**, qui sont celles qui peuvent garantir, comme une section de classe 1, une résistance au moment plastique, mais qui ont une capacité de rotation limitée en raison du voilement local (section compact) ;
- **Les sections transversales de classe 3**, qui sont celles capables de supporter des contraintes de flexion uniquement dans les fibres les plus comprimées lorsqu'une distribution élastique des contraintes est envisagée en raison des phénomènes de voilement locaux qui empêchent la répartition de la plasticité le long de la section (sections semi-compactes) ;
- **Les sections transversales de classe 4**, qui sont celles soumises à des phénomènes de voilement locaux avant l'obtention d'une contrainte de déformation dans une ou plusieurs parties de la section (sections élancées).

Il convient de noter que, dans le cas d'un élément comprimé, aucune distinction ne peut être observée dans les performances des éléments des trois premières classes, en raison de la répartition des contraintes dans les sections transversales à charge axiale limitées à la limite d'élasticité.

Les choix possibles pour l'analyse structurale et la vérification des éléments sont donnés en fonction de la classe de l'acier. La capacité de charge de la section transversale doit être évaluée par rapport à la charge axiale (traction et compression) et au moment de flexion et de torsion. Les approches suivantes peuvent être adoptées :

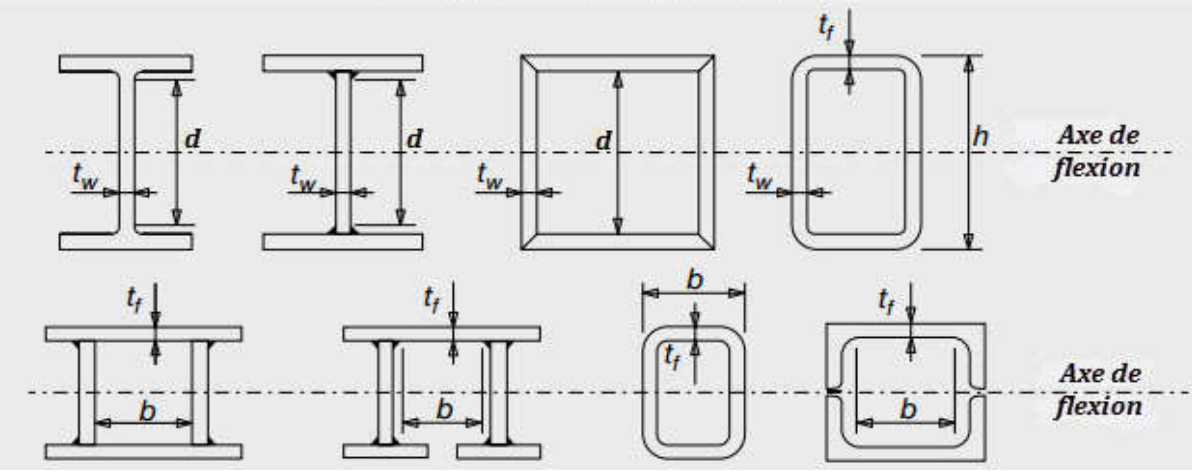
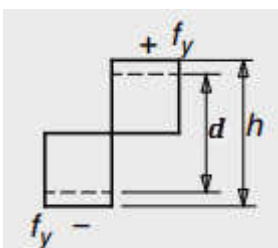
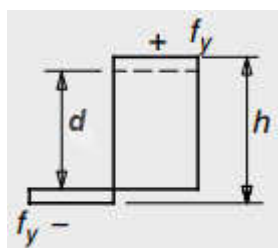
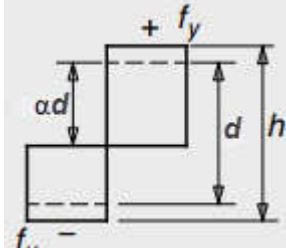
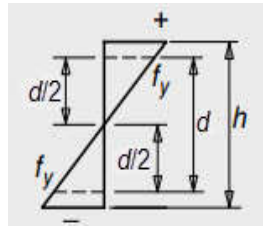
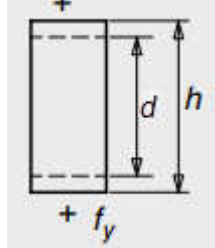
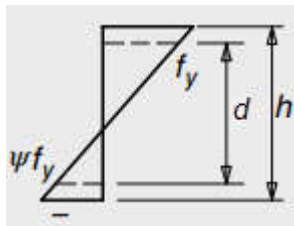
- Méthode élastique (E) : on suppose une réponse élastique linéaire jusqu'à l'obtention de la résistance d'écoulement élastique. Cette méthode peut être appliquée pour vérifier toutes les classes de section ; dans le cas de la classe 4, il faut faire référence aux propriétés géométriques effectives ;
- Méthode plastique (P) : l'étalement complet de la plasticité est supposé dans la section transversale, qui appartient aux classes 1 ou 2 ;

En termes de performances garanties par les quatre classes, La figure 3.3 présente les quatre classes de l'acier et les relations momentanées-courbure associées.

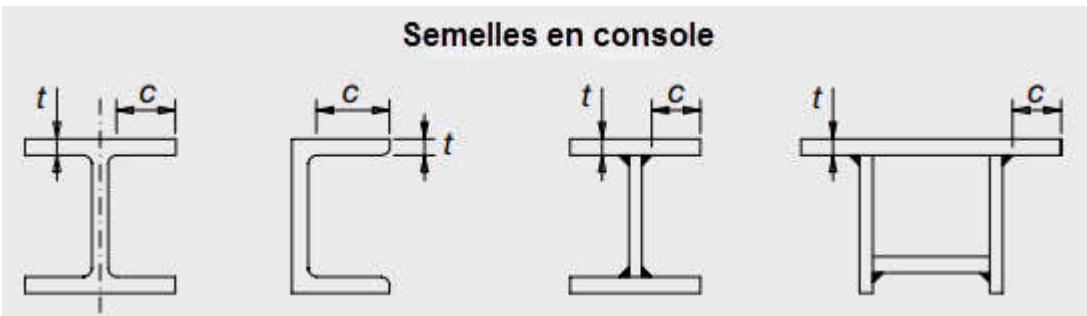
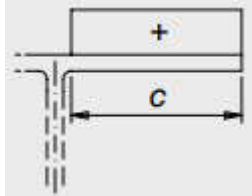
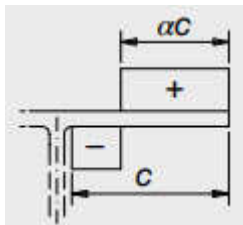
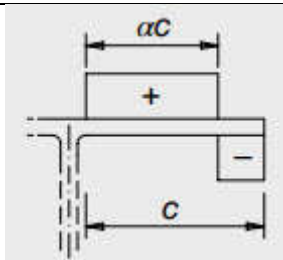
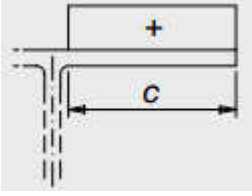
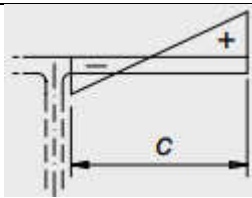
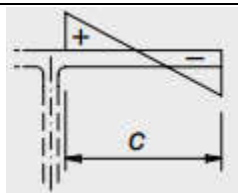
Les exigences relatives aux critères de classification sont proposées dans la partie générale de l'EC3 (c'est-à-dire EN 1993-1-1-1) : les proportions limites pour les éléments de compression de classe 1-3 sont présentées dans les tableaux ci dessous. Lorsque l'un des éléments de compression d'une section transversale ne respecte pas les limites indiquées dans ces tableaux, la section est classée comme élancée (Classe 4) et le voilement local doit être pris en compte de manière adéquate dans la conception en définissant les sections efficaces.

Comme il ressort des tableaux, la valeur limite du rapport largeur/épaisseur ( $b/t$ ) de l'élément de tôle générique sous compression dépend de la nuance d'acier par un facteur de réduction approprié  $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$  où  $f_y$  est la limite élastique de l'acier considéré (Exprimée en MPa). Dans des cas plus généraux, les éléments de compression formant une section transversale en compression peuvent appartenir à des classes différentes et la section transversale doit être classée en fonction de la classe la plus défavorable (La plus élevée) de ses éléments de compression. Le tableau 3.1 propose les critères de classification des éléments de compression interne, les tableaux 3.2 et 3.3 sont liés à la classification des semelles en console et des sections en cornières et en tubes circulaires, respectivement.

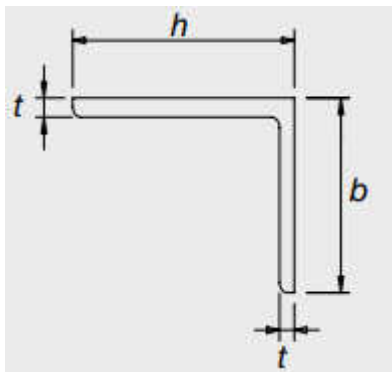
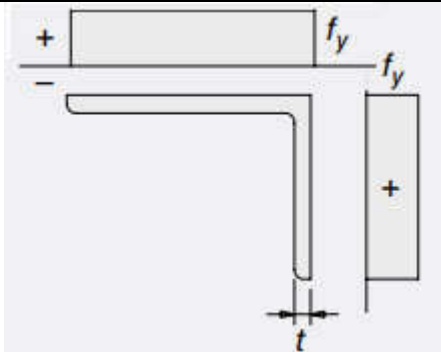
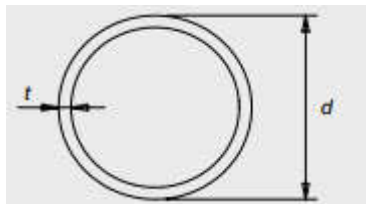
Si une section transversale a une âme de classe 3 et des semelles de classe 1 ou 2, elle doit être classée comme une section transversale de classe 3 qui, du point de vue de la conception, peut atteindre le moment élastique sans aucune dispersion de plasticité le long de la section et de l'élément.

Éléments de compression internes					
					
Classe	Élément soumis à la flexion	Élément soumis à la compression	Élément soumis à la flexion composée		
Distribution des contraintes dans l'élément (compression positive)					
1	$d/t_w \leq 72 \varepsilon$	$d/t_w \leq 33 \varepsilon$	Quand $\alpha > 0.5$ : $d/t_w \leq \frac{396 \varepsilon}{(13\alpha-1)}$ Quand $\alpha \leq 0.5$ : $d/t_w \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha}$		
2	$d/t_w \leq 83 \varepsilon$	$d/t_w \leq 38 \varepsilon$	Quand $\alpha > 0.5$ : $d/t_w \leq \frac{456 \varepsilon}{(13\alpha-1)}$ Quand $\alpha \leq 0.5$ : $d/t_w \leq \frac{41.5 \varepsilon}{\alpha}$		
Distribution des contraintes dans l'élément (compression positive)					
3	$d/t_w \leq 124 \varepsilon$	$d/t_w \leq 42 \varepsilon$	Quand $\psi > -1$ : $d/t_w \leq \frac{42 \varepsilon}{(0.67+0.33\psi)}$ Quand $\psi \leq -1^a$ : $d/t_w \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$		
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420
	$\varepsilon$	1.00	0.92	0.81	0.71
<sup>a</sup> $\psi \leq -1$ s'applique lorsque soit la contrainte de compression $\sigma < f_y$ , soit la déformation en traction $\varepsilon_y > f_y/E$					

**Tableau 3.1** Rapports maximal largeur/épaisseur pour les éléments comprimés d'après EN 1993-1-1-1 : Tableau 5.2 (feuille 1 de 3).

Semelles en console				
				
Classe	Semelle soumise à la compression	Semelle soumise à la flexion composée		
		Extrémité en compression	Extrémité en traction	
Distribution des contraintes dans l'élément (compression positive)				
1	$C/t_f \leq 9 \varepsilon$	$C/t_f \leq 9 \varepsilon/\alpha$	$C/t_f \leq 9 \varepsilon/\alpha \sqrt{\alpha}$	
2	$C/t_f \leq 10 \varepsilon$	$C/t_f \leq 10 \varepsilon/\alpha$	$C/t_f \leq 10 \varepsilon/\alpha \sqrt{\alpha}$	
Distribution des contraintes dans l'élément (compression positive)				
3	$C/t_f \leq 14 \varepsilon$	$\frac{C}{t_f} \leq 21 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}^a$		
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355
	$\varepsilon$	1.00	0.92	0.81
<sup>a</sup> Pour $k_\sigma$ voir EN 1993-1-5				

**Tableau 3.2** Rapports maximal largeur/épaisseur pour les éléments comprimés selon EN 1993-1-1-1 : Tableau 5.2 (feuille 2 de 3).

<div><div>Se référer également à "Semelles en console" (voir feuille 2 de 3)</div><div><div>Cornières</div></div><div>Ne s'applique pas aux cornières en contact permanent avec d'autres composants.</div></div>				
Classe	Section en compression			
Distribution des contraintes dans l'élément (compression positive)				
3	$h/t = 15\varepsilon \quad \frac{b+h}{2t} \leq 11.5\varepsilon$			
<div><div>Section circulaire tubulaire</div></div>				
Classe	Section en flexion / ou en compression			
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 EN 1993-1-6.			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355
	$\varepsilon$	1.00	0.92	0.81
	$\varepsilon^2$	1.00	0.85	0.66

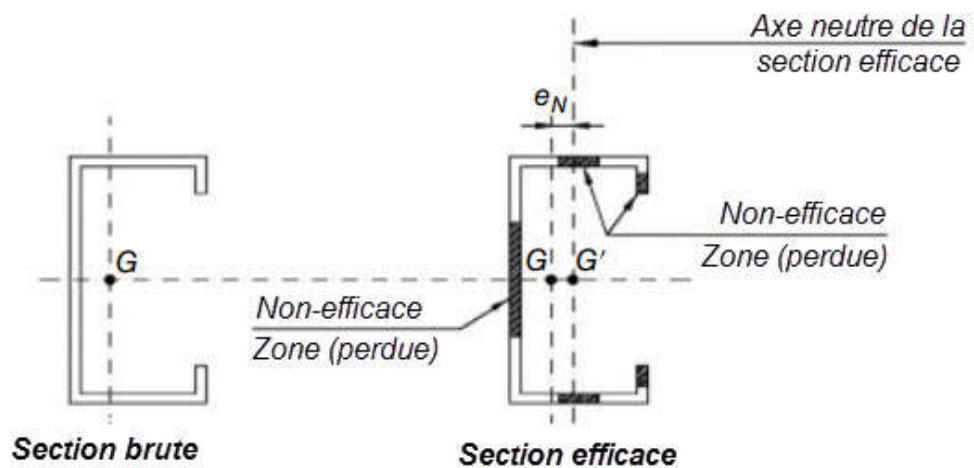
**Tableau 3.3** Rapport maximal largeur/épaisseur des éléments comprimés, d'après EN 1993-1-1-1 : Tableau 5.2 (feuille 3 de 3)



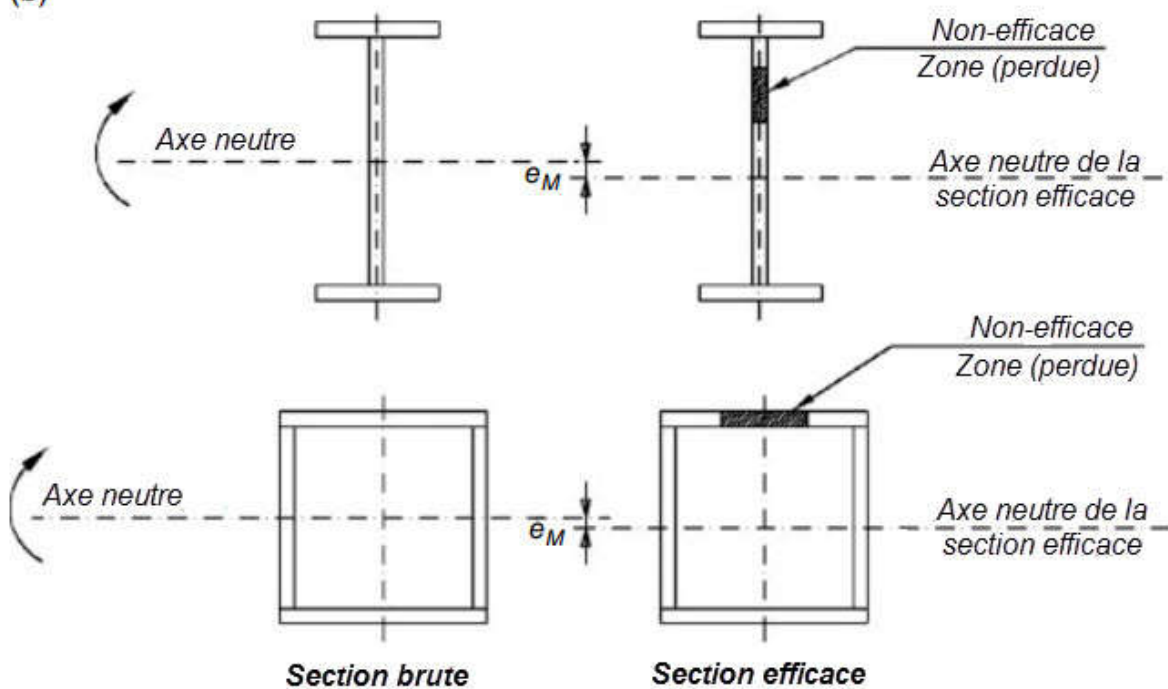
### 3.3 Propriétés géométriques effectives des profils de classe 4

Pour les sections de classe 4, on suppose que les parties de la zone en compression dues à des phénomènes locaux d'instabilité (voilement) n'ont pas de résistance (zone perdue) : typiquement, les parties comprimées des sections, qui doivent être négligées pour les contrôles de résistance, sont les parties proches de l'extrémité libre d'une semelle en console ou la partie centrale d'un élément comprimé interne.

(a)



(b)



**Figure 3.4** Sections transversales brutes et efficaces, cas d'une charge axiale (a) et cas d'une flexion (b).

On pourra se référer à la Figure 3.4 relative aux cas typiques de propriétés de section réduite pour des phénomènes de voilement locaux quand un élément est soumis à la compression (a) ou à la flexion (b). Dans le premier cas, il convient de noter que la section efficace est soumise à une charge axiale excentrique due au basculement du centroïde de la section brute vers la section efficace, c'est-à-dire que la section est soumise à un moment de flexion supplémentaire.

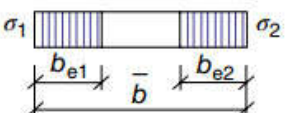
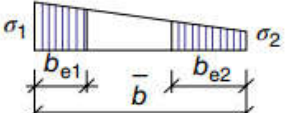
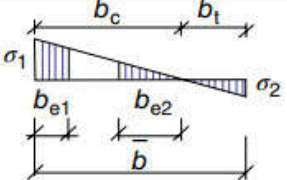
Du point de vue du calcul, il est nécessaire d'évaluer la section efficace (c'est-à-dire la section brute moins toutes les zones perdues) conformément aux procédures spécifiées dans EN 1993-1-5 (Conception des structures métalliques - Partie 1-5 : Eléments de structure plaqués). En particulier, les références sont les tableaux 3.1 et 3.2 et sont reproduites ici dans les tableaux 3.4 et 3.5.

La section efficace d'une plaque comprimée  $A_{c,eff}$  peut être obtenue à partir de la section brute,  $A_c$ , comme :

$$A_{c,eff} = \rho A_c$$

Le facteur de réduction  $\rho$  est défini comme suit :

### I. Eléments de compression interne (Âmes) :

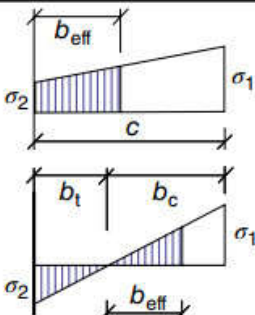
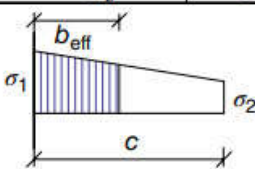
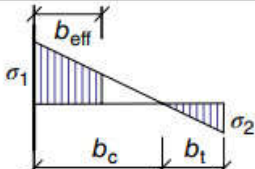
Distribution des contraintes (compression positive)				Largeur efficace $b_{eff}$		
				$\psi = 1$ ; $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0.5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.5 b_{eff}$		
				$1 > \psi > 0$ ; $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$ ; $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0.4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_1 / \sigma_2$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Coef de voilement $k_\sigma$	4.0	$8.2 / (1.05 + \psi)$	7.81	$7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2$	23.9	$5.98 (1 - \psi)^2$

**Tableau 3.4** Règles pour l'évaluation de la largeur efficace des éléments de compression interne (a-c : du tableau 4.1 de EN 1993-1-5).

$$\rho = 1.0 \text{ Si } \bar{\lambda}_p \leq 0.673$$

$$\rho = [\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)] / \bar{\lambda}_p^2 \leq 1 \text{ Si } \bar{\lambda}_p > 0.673 \text{ et } (3 + \psi) \geq 0$$

## II. Éléments comprimés en console (semelles) :

Distribution des contraintes (compression positive)		Largeur efficace $b_{\text{eff}}$			
		$1 > \psi > 0$ : $b_{\text{eff}} = \rho c$  $\psi < 0$ : $b_{\eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Coef de voilement $k_\sigma$	0.43	0.57	0.85	$0.57 - 0.21\psi + 0.07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$ : $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0$ : $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$		0	$0 > \psi > -1$
Coef de voilement $k_\sigma$	0.43	$0.578 / (\psi + 0.34)$		1.70	$1.7 - 5\psi + 17.1\psi^2$
				-1	23.8

**Tableau 3.5** Règles pour l'évaluation de la largeur efficace des éléments de compression en console (a-d : du Tableau 4.2 de la norme EN 1993-1-5).

$$\rho = 1.0 \text{ Si } \bar{\lambda}_p \leq 0.748$$

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0.188) / \bar{\lambda}_p^2 \leq 1 \text{ Si } \bar{\lambda}_p > 0.748$$

Où :

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} ; \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y(N/mm^2)}}$$

La largeur  $\bar{b}$  doit être évaluée conformément aux tableaux 4.1-4.3, où il est fait référence au terme  $c$  au lieu de  $\bar{b}$ . Le terme  $\psi$  représente le rapport entre les valeurs des contraintes aux

extrémités de la plaque tandis que  $k\sigma$  est le coefficient du voilement, qui peut être évalué à partir des tableaux 3.4 et 3.5 sur la base de la distribution des contraintes normales.