

# RECOMMANDATIONS DE LA CNC2M

## RECOMMANDATIONS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES POUTRES EN ACIER AVEC OUVERTURES DANS L'AME SELON LA NF EN 1993

JUILLET 2015

---

---

## MEMBRES DE LA COMMISSION DE NORMALISATION

Président : M MAITRE

Secrétariat : MME LEMAIRE – BNCM

MME	ALGRANTI	CTICM
M	ARIBERT	INSA
M	BALGIU	QUALICONSULT
M	BARRAULT	FIMEC TECHNOLOGIES
M	BEGUIN	CTICM
M	BITAR	CTICM
MME	BONIFACE	EIFFAGE CM
M	BONNET	TECHNIP
M	BOURGEOIS	GROUPE INSTITUT DE SOUDURE
M	BUREAU	CTICM
M	CAILLEAU	AFNOR
M	CAUSSE	VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS
M	CHABROLIN	CTICM
M	COUCHAUX	CTICM
M	COUGNAUD	ACIM
MME	DAVAINE	INGEROP EXPERTISE ET STRUCTURES
M	DEFURNE	YVES COUGNAUD
M	DELPUECH	MEDDE/DGITM
M	DENYS	CIAN ENTREPRISE
MME	DUSSAUGEY	CISMA
MME	DUSSEQUE	BN ACIER
M	ETIENNE	SADEF
M	FOUCHE BAYLION	SOCOTEC
M	FOURMENT	VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS
M	GAULIARD	SCMF
M	GENEREUX	BNTRA
M	GINEYS	GFD
M	GOURMELON	EXPERT SFN
M	GREFF	GFD
M	HENRIQUES	CSTB
M	HOSTALERY	BUREAU VERITAS
M	HOUEL	CEREMA
M	IZABEL	SNPPA
M	LAMADON	BUREAU VERITAS
M	LAMY	UNION DES METALLIERS
M	LE CHAFFOTEC	CTICM
M	LEBLOND	CSTB
MME	LEMAIRE	BNCM
M	LEQUIEN	APAVE

M	LUKIC	CTICM
M	MAITRE	EXPERT SFN
M	MARTIN	CTICM
M	MOHEISSEN	EXPERT SFN
M	MONTEL	CAPEB
MME	PALISSON	SNPPA
MME	PECHENARD	AFFIX
M	PERNIER	EXPERT SFN
M	PLATZ	PROFIL DU FUTUR
M	POTRON	CAPEB
M	RAOUL	EXPERT SFN
MME	RAVONINAHIDRAIBE	CTICM
M	ROBERT	CEREMA
M	SEMIN	CTICM
M	SIFFERLIN	EDF
M	SOKOL	SOKOL CONSULTANTS
M	SOMJA	INSA DE RENNES
M	THOLLARD	TRACTEBEL ENGINEERING S.A
M	THONIER	EGF BTP
M	TRIQUET	SNCF
M	TROUART	UNION DES METALLIERS
M	VILLETTE	BAUDIN CHATEAUNEUF
M	ZHAO	CTICM

Ces Recommandations ont été établies par un groupe de travail composé de :

M	BEYER	CTICM
M	BUREAU	CTICM
MME	DAVAINE	INGEROP EXPERTISE ET STRUCTURES
M	HOORPAH	MIO
M	HOSTALERY	BUREAU VERITAS
M	LARUE	RBS
MME	LEMAIRE	BNCM/CTICM
M	MAITRE	EXPERT SFN
M	MILLOT	CABINET JAILLET-ROUBY
M	MOHEISSEN	MOHEISSEN JULIEN
MME	PALISSON	SNPPA
M	RODIER	CTICM
M	SOKOL	SOKOL CONSULTANTS
M	TRIQUET	SNCF
M	VILLETTE	BAUDIN CHATEAUNEUF

## **AVANT-PROPOS**

---

Les présentes recommandations viennent en complément des différentes parties de la NF EN 1993 et de leurs Annexes Nationales. Elles contiennent des informations complémentaires non contradictoires, destinées à faciliter l'application des règles de l'Eurocode 3.

Elles ne présentent qu'un caractère informatif et ne sauraient être contractualisées au même titre qu'un document normatif.

Le présent document a été entériné par la CNC2M (Commission de normalisation de la construction métallique et mixte), le 31 Juillet 2015.

Les utilisateurs de ces Recommandations sont invités à faire connaître leurs éventuelles observations au Bureau de Normalisation de la Construction Métallique, chargé de la gestion de la commission CNC2M.

BNCM

Centre Technique Industriel de la Construction Métallique

Espace Technologique, Immeuble Apollo

L'orme des merisiers

91193 SAINT-AUBIN

courriel : [bncm@cticm.com](mailto:bncm@cticm.com)

## TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>GÉNÉRALITÉS</b>	<b>7</b>
1.1	<b>Objet et domaine d'application</b>	<b>7</b>
1.2	<b>Terminologie</b>	<b>7</b>
1.2.1	Section transversale non ajourée	7
1.2.2	Section transversale ajourée	7
1.2.3	Ouverture d'âme	8
1.2.4	Montant d'âme	8
1.2.5	Té	8
1.2.6	Raidisseur	8
1.2.7	Renfort longitudinal	8
1.2.8	Renfort transversal	8
1.2.9	Renfort circulaire	8
1.2.10	Raidisseur annulaire	8
1.3	<b>Symboles</b>	<b>9</b>
1.4	<b>Géométrie</b>	<b>10</b>
1.5	<b>Modes de ruine</b>	<b>11</b>
1.6	<b>Raidissage et renforcement des ouvertures d'âme</b>	<b>13</b>
1.7	<b>Classification des sections</b>	<b>15</b>
1.7.1	Section transversale non ajourée	15
1.7.2	Section transversale ajourée	16
<b>2</b>	<b>POUTRES COMPORTANT DES OUVERTURES D'ÂME ISOLÉES</b>	<b>17</b>
2.1	<b>Résistance des poutres sans raidisseurs d'âme intermédiaires</b>	<b>17</b>
2.1.1	Généralités	17
2.1.2	Résistance aux forces transversales	18
2.1.3	Résistance à l'effort tranchant	19
2.1.4	Résistance au moment fléchissant	21
2.1.5	Ouvertures d'âme renforcées	22
2.2	<b>Flèche</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>POUTRES COMPORTANT DES OUVERTURES D'ÂME MULTIPLES</b>	<b>26</b>
3.1	<b>Généralités</b>	<b>26</b>
3.2	<b>Méthodes d'analyse</b>	<b>28</b>
3.3	<b>Résistance</b>	<b>29</b>

3.3.1	Modes de ruine	29
3.3.2	Section au droit d'une ouverture	30
3.3.3	Montants d'âme	34
3.3.4	Déversement	35
3.3.5	Résistance aux forces transversales	35
<b>3.4</b>	<b><i>Flèche</i></b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>36</b>
<b>ANNEXE A METHODE ALTERNATIVE POUR LA VERIFICATION DE LA STABILITE DU MONTANT D'AME D'UNE POUTRE CELLULAIRE</b>		<b>37</b>
<b>A.1</b>	<b><i>Domaine d'application</i></b>	<b>37</b>
<b>A.2</b>	<b><i>Stabilité du montant d'âme</i></b>	<b>37</b>

# 1 GÉNÉRALITÉS

---

## 1.1 Objet et domaine d'application

- (1) Les présentes recommandations donnent des dispositions supplémentaires aux règles générales de l'Eurocode 3, pour les poutres pourvues d'ouvertures dans les âmes. Elles s'appliquent tant aux profils laminés qu'aux profilés soudés. Les cas suivants sont pris en compte :
  - profils en I avec ouvertures d'âme isolées, voir Chapitre 2 ;
  - profils en I avec ouvertures d'âme multiples, voir Chapitre 3.
- (2) Pour les ouvertures d'âme isolées, elles couvrent les ouvertures qui sont soit concentriques, soit excentriques par rapport à l'axe de l'âme, de forme polygonale ou circulaire (voir 1.4), et avec ou sans renfort. Les cas comportant ou non des raidisseurs d'âme transversaux intermédiaires sont également inclus.
- (3) Pour les ouvertures d'âme multiples, elles couvrent les ouvertures espacées selon un pas régulier et situées concentriquement par rapport à l'axe de l'âme, constituées par l'expansion de profils en I laminés ou en pratiquant des ouvertures dans les âmes de profils en I soudés. Les ouvertures de forme polygonale ou circulaire ou qui présentent des extrémités circulaires et des côtés rectilignes sont couvertes. Les ouvertures multiples dans les âmes comportant des raidisseurs d'âme transversaux intermédiaires ne sont pas couvertes.
- (4) Ces recommandations ne couvrent pas les sections transversales à semelles inégales.
- (5) Ces recommandations ne couvrent pas les ouvertures d'âme adjacentes aux emplacements où des rotations de rotule plastique sont exigées pour la redistribution des moments fléchissants dans la structure.

NOTE Une rotule plastique est adjacente à l'ouverture si son emplacement prévu se situe à une distance inférieure à la hauteur de la section depuis le bord de cette ouverture.

- (6) Ces recommandations ne couvrent pas les ouvertures d'âme dans les poutres mixtes acier-béton.
- (7) Ces recommandations s'appliquent aux poutres fléchies suivant leur grande inertie, et dans lesquelles l'effort normal reste inférieur à  $0,01N_{net,Rd}$ , où  $N_{net,Rd}$  est la résistance de calcul à l'effort axial au droit de l'ouverture.
- (8) L'application d'une charge concentrée significative au droit d'une ouverture est à éviter, ce cas n'est pas traité dans les présentes recommandations.

NOTE L'application d'une charge concentrée au droit d'une ouverture doit faire l'objet de justifications particulières.

## 1.2 Terminologie

Dans le cadre des présentes recommandations, outre les termes définis en 1.5 de la NF EN 1993-1-1, les définitions suivantes s'appliquent :

### 1.2.1 Section transversale non ajourée

Section transversale de la poutre éloignée d'une ouverture d'âme.

### 1.2.2 Section transversale ajourée

Section transversale de la poutre, située à mi-longueur d'une ouverture d'âme.

### **1.2.3 Ouverture d'âme**

Trou pratiqué dans une âme et présentant une dimension significative par rapport à la hauteur de l'âme, voir Figure 1.

NOTE 1 Des ouvertures d'âme isolées sont pratiquées pour faciliter le passage de conduites de service au travers des âmes de poutres. Des ouvertures d'âme multiples peuvent être pratiquées dans le même but, mais elles sont également pratiquées pour augmenter la hauteur globale d'une poutre afin d'accroître son moment résistant et sa rigidité.

NOTE 2 Une ouverture isolée présentant une dimension maximale inférieure à 10% de la hauteur de l'âme de la poutre n'est pas considérée comme significative. Pour la vérification du comportement global de la poutre, il suffit alors simplement de prendre en compte cette ouverture dans le calcul des caractéristiques de la section et d'appliquer les règles habituelles de l'Eurocode 3.

### **1.2.4 Montant d'âme**

Partie restante de l'âme entre des ouvertures d'âme adjacentes, qui relie les tés supérieur et inférieur, y compris les raidisseurs ou les renforts transversaux ou circulaires (annulaires) le cas échéant, voir Figure 3.

### **1.2.5 Té**

Partie restante de l'âme au-dessus ou au-dessous d'une ouverture d'âme, plus la semelle supérieure ou inférieure respectivement, y compris les renforts ou les raidisseurs le cas échéant, voir Figure 3.

### **1.2.6 Raidisseur**

Élément destiné à empêcher l'instabilité de l'âme.

### **1.2.7 Renfort longitudinal**

Éléments adjacents aux bords d'une ouverture d'âme (voir Figure 6(a)), munis d'un ancrage d'extrémité suffisant au-delà des extrémités de l'ouverture pour :

- augmenter le moment résistant des tés supérieur et inférieur ainsi que de la section transversale ajourée ;
- ou s'opposer à la réduction de la résistance au voilement par cisaillement de l'âme provoquée par la présence de l'ouverture.

### **1.2.8 Renfort transversal**

Éléments s'étendant d'une semelle à l'autre, adjacents aux bords verticaux d'une ouverture d'âme pour compenser la réduction locale de la résistance au flambement de la semelle comprimée dans le plan de l'âme provoqué par la présence de l'ouverture d'âme, voir Figure 7.

### **1.2.9 Renfort circulaire**

Bride disposée sur le bord d'une ouverture d'âme circulaire et destinée à empêcher l'instabilité des montants d'âme ou le voilement local de l'âme, voir Figure 6(b).

### **1.2.10 Raidisseur annulaire**

Élément adjacent au bord d'une ouverture d'âme circulaire s'opposant à la réduction de la résistance aux instabilités de l'âme provoquée par la présence de l'ouverture, voir Figure 6(c).

### 1.3 Symboles

Dans ces recommandations, outre les symboles définis en 1.6 de la NF EN 1993-1-1, les symboles suivants sont utilisés :

- $A_r$  aire de renfort ;
- $a_o$  longueur de l'ouverture ;
- $a_p$  longueur additionnelle de la zone d'influence d'une ouverture ;
- $a_r$  longueur entre le raidisseur d'extrémité et la première ouverture ;
- $a_s$  longueur entre une ouverture et le raidisseur transversal intermédiaire le plus proche ;
- $b_o$  largeur minimum d'une ouverture polygonale ;
- $b_{o,eff}$  largeur minimum efficace d'une ouverture polygonale ;
- $b_w$  hauteur libre de l'âme (libre entre rayons de congé ou cordons de soudures âme-semelle) ;
- $d_o$  diamètre d'une ouverture circulaire ;
- $d_w$  hauteur hors-tout de l'âme ;
- $e_o$  excentricité d'une ouverture ;
- $f_{yr}$  limite d'élasticité des éléments de renfort ;
- $h_c$  hauteur entre les centres de gravité des tés supérieur et inférieur ;
- $h_o$  hauteur de l'ouverture ;
- $h_p$  hauteur des plaques intercalaires d'âme ;
- $L_v$  longueur d'ancrage du renfort longitudinal, voir Figure 13 ;
- $L_o$  Longueur utilisée pour la classification de la portion d'âme au-dessus de l'ouverture (définie sur la Figure 9) ;
- $M_{c,Rd}$  moment résistant de la section transversale non ajourée ;
- $M_{o,Rd}$  moment résistant de la section transversale ajourée ;
- $p$  pas des ouvertures d'âme ;
- $r_c$  congé de raccordement d'une ouverture rectangulaire ;
- $r_o$  rayon d'une ouverture circulaire ;
- $V_{c,Rd}$  résistance au cisaillement de la section transversale non ajourée ;

$V_{o,Rd}$  résistance au cisaillement de la section transversale ajourée ;

$w$  largeur du montant d'âme ;

$\varepsilon$  facteur dépendant de la limite d'élasticité  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [\text{MPa}]}}$ .

## 1.4 Géométrie

- (1) Ces recommandations comprennent les formes d'ouvertures suivantes, comme illustré dans la Figure 1 :
  - a) ouverture rectangulaire définie par sa hauteur  $h_o$  et sa longueur  $a_o$  ;
  - b) ouverture circulaire définie par son diamètre  $d_o$  ou son rayon  $r_o$  ;
  - c) ouverture hexagonale définie par sa hauteur  $h_o$ , sa longueur  $a_o$  et la longueur  $b_o$  du té ;
  - d) ouverture circulaire étendue définie par sa hauteur  $h_o$  et son rayon d'extrémité  $r_o$  ;
  - e) ouverture octogonale définie par sa hauteur  $h_o$ , sa longueur  $a_o$  et la longueur  $b_o$  du té, et la hauteur du montant  $h_p$ .
- (2) La géométrie d'une section transversale ajourée est indiquée dans la Figure 2.
- (3) Les détails des tés et des montants d'âme sont indiqués dans la Figure 3.
- (4) Ces recommandations peuvent être étendues aux ouvertures (ou groupe d'ouvertures) de forme quelconque, en les traitant comme une ouverture circulaire ou rectangulaire dans laquelle l'ouverture (les ouvertures) réelle(s) est (sont) inscrite(s). Le choix doit être fait au départ de l'étude pour la totalité des vérifications.

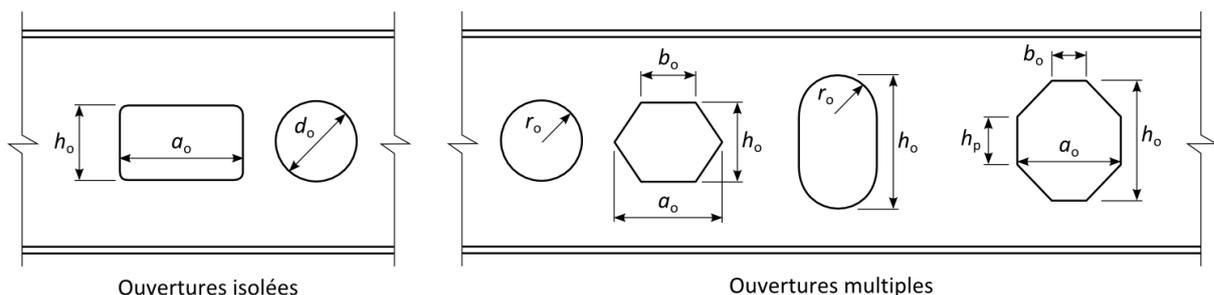
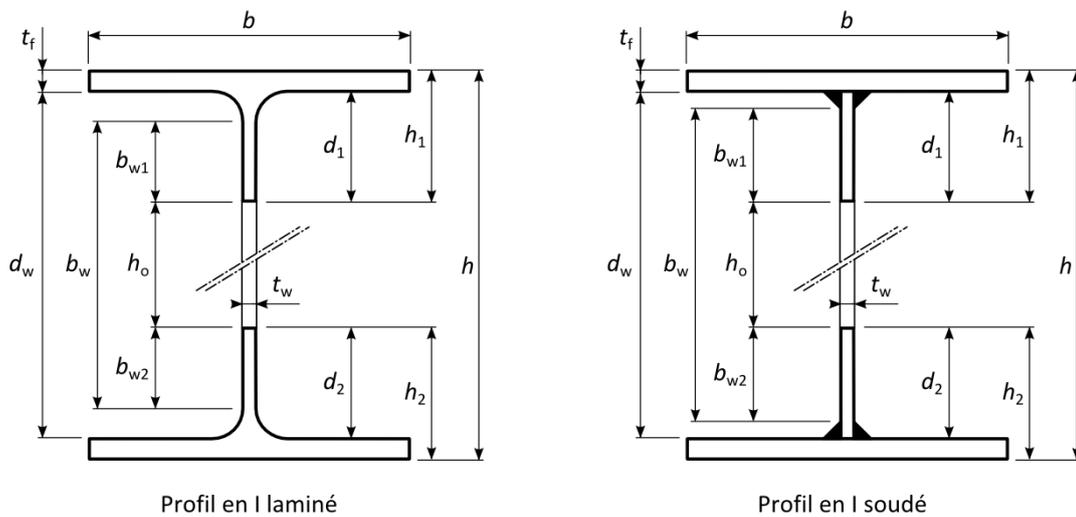
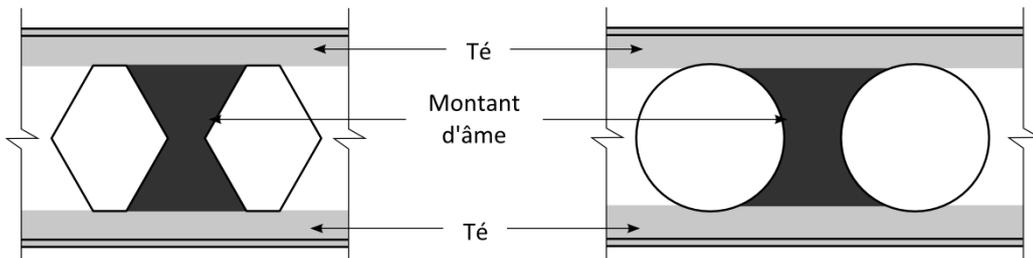


Figure 1 : Géométrie des ouvertures



**Figure 2 : Géométrie des sections transversales ajourées**

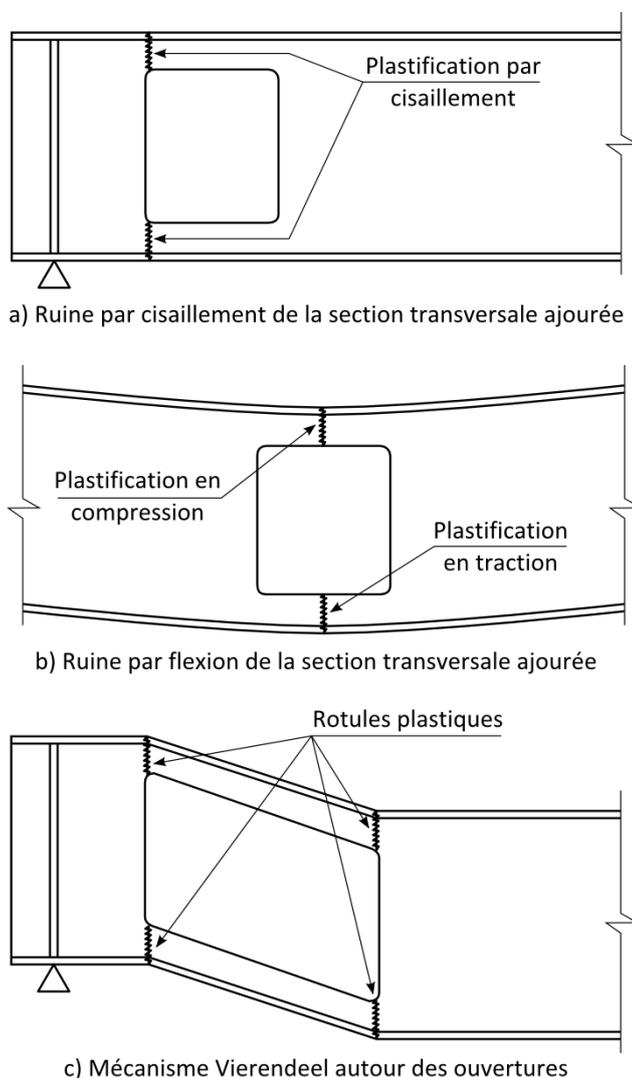


**Figure 3 : Tés et montants d'âme**

NOTE La hauteur du té est définie par la méthode de calcul dans le cas des ouvertures circulaires.

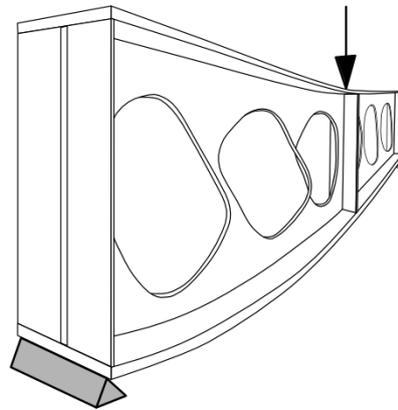
### 1.5 Modes de ruine

- (1) En sus des vérifications définies dans la NF EN 1993-1-1, pour toutes les poutres comportant des ouvertures dans les âmes, il convient de vérifier les modes de ruine spécifiques suivants, voir Figure 4 :
- ruine par cisaillement de la section transversale ajourée ;
  - ruine par flexion de la section transversale ajourée ;
  - mécanisme Vierendeel autour des ouvertures.

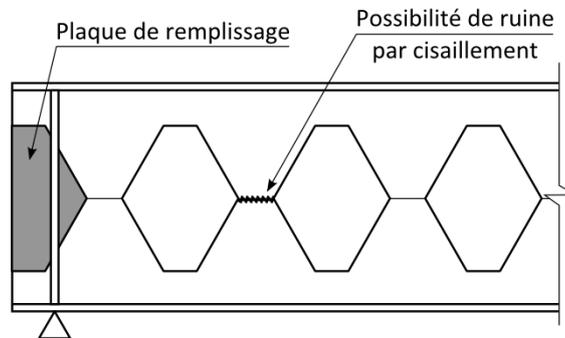


**Figure 4 : Modes de ruine supplémentaires dans les poutres comportant des ouvertures d'âme**

- (2) Pour les poutres comportant des ouvertures d'âme multiples (voir Figure 5), il convient de vérifier également les modes de ruine supplémentaires suivants résultant du cisaillement longitudinal dans la poutre :
- ruine par plastification ou instabilité provoquée par les moments dans les montants d'âme ;
  - ruine par cisaillement du montant d'âme ou de la soudure du montant d'âme.



a) Instabilité du montant d'âme provoquée par le cisaillement longitudinal

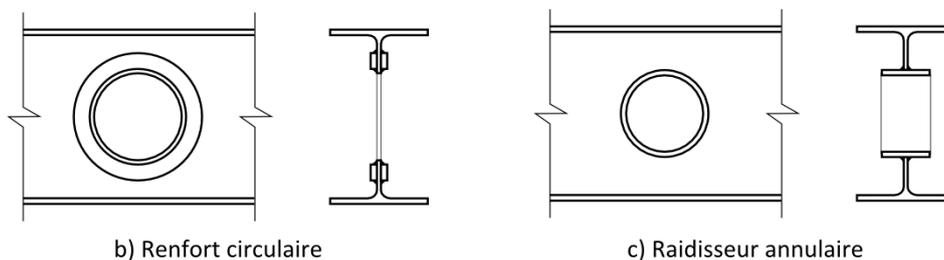
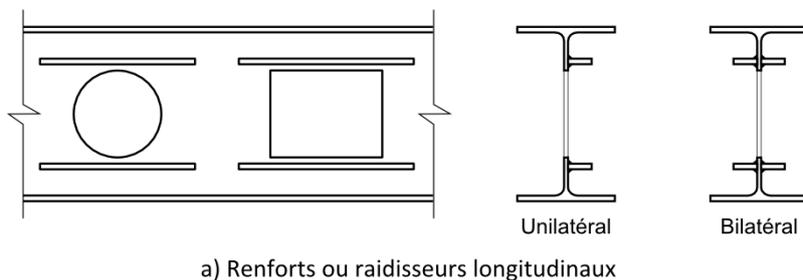


b) Ruine par cisaillement du montant d'âme ou de la soudure du montant d'âme

**Figure 5 : Modes de ruine spécifiques dans les poutres comportant des ouvertures d'âme multiples**

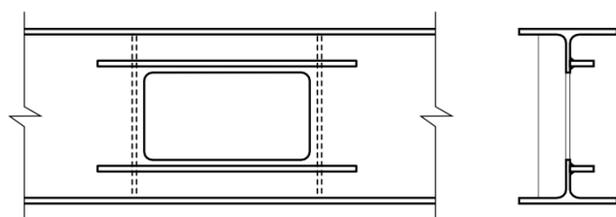
### 1.6 Raidissage et renforcement des ouvertures d'âme

- (1) Les bords des ouvertures d'âme peuvent être raidis afin d'éviter le voilement local de l'âme, voir Figure 6. Il convient que les raidisseurs longitudinaux respectent les limitations des élancements données pour les éléments de Classe 1 ou de Classe 2 (parois en console).
- (2) Les raidisseurs longitudinaux peuvent être sur une face ou sur deux faces.
- (3) Pour des ouvertures circulaires, un renfort circulaire peut être utilisé comme alternative au renfort longitudinal, voir Figure 6(b). Il peut être soit sur une face, soit sur deux faces ou prendre la forme d'un raidisseur annulaire bordant l'âme, voir Figure 6(c).
- (4) Les bords des ouvertures d'âme peuvent être renforcés afin d'augmenter la résistance de la poutre. Il convient que le renfort longitudinal soit totalement ancré au-delà des extrémités des ouvertures, voir 2.1.5 et Figure 6(a). Un renfort longitudinal comportant un ancrage d'extrémité total peut être pris en compte dans le calcul de la résistance de la section transversale ajourée au niveau d'une ouverture.
- (5) Les raidisseurs longitudinaux peuvent également être pris en compte dans le calcul de la résistance de la section transversale au niveau de l'ouverture, à condition qu'ils soient totalement ancrés au-delà des extrémités de l'ouverture, voir 2.1.5.

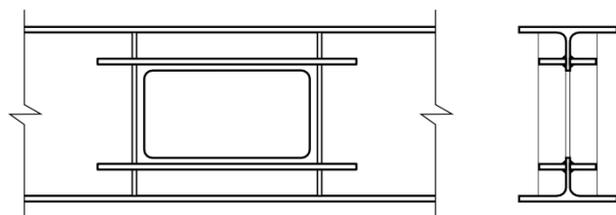


**Figure 6 : Raidissage ou renforcement des ouvertures d'âme**

- (6) Un renfort longitudinal peut être soit unilatéral, soit bilatéral, voir Figure 6(a). Si un renfort transversal est également utilisé, des dispositions recommandées sont données en Figure 7.



a) Renfort longitudinal unilatéral combiné avec un renfort transversal unilatéral sur l'autre face



b) Renfort longitudinal et renfort transversal bilatéraux

**Figure 7 : Dispositions recommandées avec des raidisseurs longitudinaux et transversaux**

- (7) Il convient de vérifier le té comprimé, formé par la semelle comprimée et la portion d'âme adjacente située au-dessus ou au-dessous d'une ouverture (comprenant le renfort le cas échéant), comme élément comprimé, au flambement dans le plan de l'âme, si la longueur de flambement  $L_{cr,Té}$  du té est supérieure à trois fois sa hauteur globale minimum  $h_1$  ou  $h_2$ . Il convient de prendre la longueur de flambement  $L_{cr,Té}$  égale à :
- $0,5d_o$  pour une ouverture circulaire ;
  - $0,65a_o$  pour une autre forme d'ouverture non renforcée ;
  - $0,75a_o$  pour une autre forme d'ouverture renforcée.
- (8) Pour prévenir l'éventualité de flambement de la membrure comprimée dans le plan de l'âme, il convient de mettre de chaque côté de l'ouverture un renfort transversal d'une aire au moins égale à  $0,1d_w t_w$  sauf si :

- pour une ouverture rectangulaire :

$$\frac{d_w}{t_w} \leq 0,4 \left( \frac{E}{f_{yf}} \right) \left( 1 - 0,5 \frac{a_o}{d_w} \right) \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (1a)$$

- pour une ouverture circulaire :

$$\frac{d_w}{t_w} \leq 0,4 \left( \frac{E}{f_{yf}} \right) \left( 1 - 0,45 \frac{d_o}{d_w} \right) \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (1b)$$

où :

- $A_{fc}$  aire de la semelle comprimée ;
- $A_w$  aire de l'âme non ajourée ;
- $a_o$  largeur de l'ouverture ;
- $d_o$  diamètre d'une ouverture circulaire ;
- $d_w$  hauteur hors tout de l'âme ;
- $t_w$  épaisseur d'âme.

NOTE Ces recommandations couvrent uniquement les semelles de Classe 1 ou 2, voir 1.7.1(1). Un coefficient de 0,4 a été utilisé ici car une rotation globale de rotule plastique adjacente aux ouvertures d'âme est exclue du domaine d'application, voir 1.1(5).

## 1.7 Classification des sections

### 1.7.1 Section transversale non ajourée

- (1) Il convient que la section transversale non ajourée de la poutre à une distance éloignée des ouvertures d'âme comporte des semelles de Classe 1 ou de Classe 2 et une âme de Classe 1, 2 ou 3.

- (2) Des sections transversales non ajourées comportant une âme de Classe 3 et des semelles de Classe 1 ou de Classe 2 peuvent être traitées comme des sections transversales efficaces de Classe 2 avec une âme efficace. Il convient que la portion d'âme comprimée soit remplacée par un élément de  $20 t_w \varepsilon$  adjacent à la semelle comprimée, avec un autre élément de  $20 t_w \varepsilon$  adjacent à l'axe neutre plastique de la section transversale efficace, voir Figure 8.

NOTE Ceci est la méthode donnée à la clause 6.2.2.4(1) de la NF EN 1993-1-1.

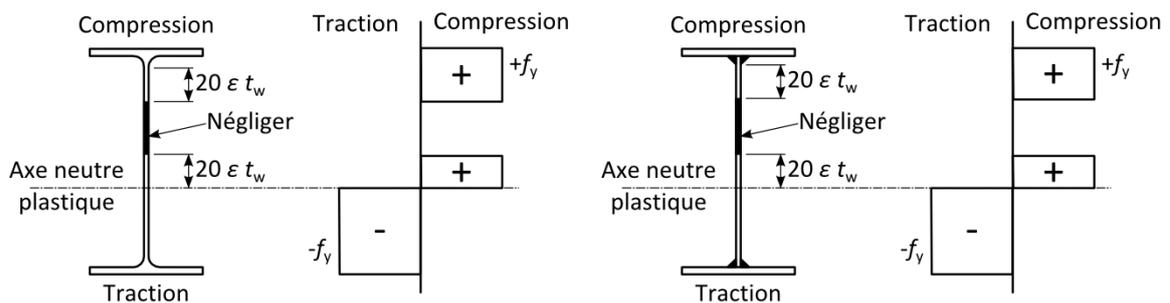


Figure 8 : Âme efficace de Classe 2

### 1.7.2 Section transversale ajourée

- (1) Il convient que les âmes de tés raidis soient de Classe 1 ou 2 après raidissage. Il convient que les renforts ou raidisseurs faisant partie de la section transversale d'un té raidi soient de Classe 1 ou de Classe 2.
- (2) Les portions de l'âme formant les âmes des tés non raidis au-dessus et au-dessous d'ouvertures d'âme non raidies peuvent être classifiées en tenant compte de l'encastrement des portions adjacentes de l'âme de la façon suivante :

- pour la Classe 2 :

$$L_o \leq 32 t_w \varepsilon$$

$$\text{sinon} \quad b_{wc} \leq \frac{10 t_w \varepsilon}{\sqrt{1 - \left( \frac{32 t_w \varepsilon}{L_o} \right)^2}} \quad (2a)$$

- pour la Classe 3 :

$$L_o \leq 36 t_w \varepsilon$$

$$\text{sinon} \quad b_{wc} \leq \frac{14 t_w \varepsilon}{\sqrt{1 - \left( \frac{36 t_w \varepsilon}{L_o} \right)^2}} \quad (2b)$$

où :

$b_{wc}$  longueur saillante d'âme de té  $b_{w1}$  ou  $b_{w2}$  indiquée dans la Figure 2 ;

$L_o$  longueur définie dans la Figure 9.

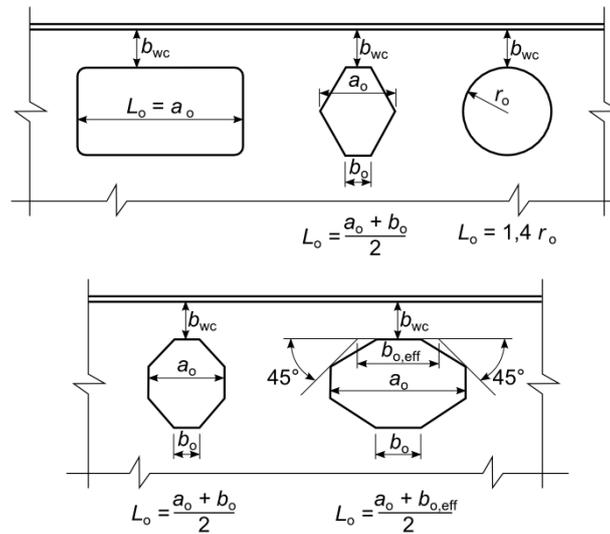


Figure 9 : Portion de l'âme formant l'âme d'un té non raidi

## 2 POUTRES COMPORTANT DES OUVERTURES D'ÂME ISOLÉES

### 2.1 Résistance des poutres sans raidisseurs d'âme intermédiaires

#### 2.1.1 Généralités

- (1) Il convient de munir toutes les âmes dont  $d_w / t_w \geq 72 \varepsilon$  de raidisseurs d'âme transversaux au droit des appuis.
- (2) Il convient que les dimensions d'une ouverture d'âme isolée satisfassent les limites suivantes, voir Figure 10 :

$$d_o \leq 0,80 d_w \text{ pour une ouverture circulaire}$$

$$h_o \leq 0,75 d_w \text{ pour une autre forme d'ouverture}$$

et, quelle que soit la forme de l'ouverture :

$$d_1 \geq 0,10 d_w$$

$$d_2 \geq 0,10 d_w$$

$$a_o \leq 3 h_o$$

$$r_c \geq 15 \text{ mm}$$

- (3) Il convient que l'excentricité  $e_o$  d'une ouverture ne soit pas supérieure à  $0,125 d_w$  en direction de la semelle comprimée, voir Figure 10.
- (4) Il convient que la largeur libre minimum  $w$  de l'âme formant un montant d'âme efficace entre deux ouvertures adjacentes satisfasse les conditions suivantes :

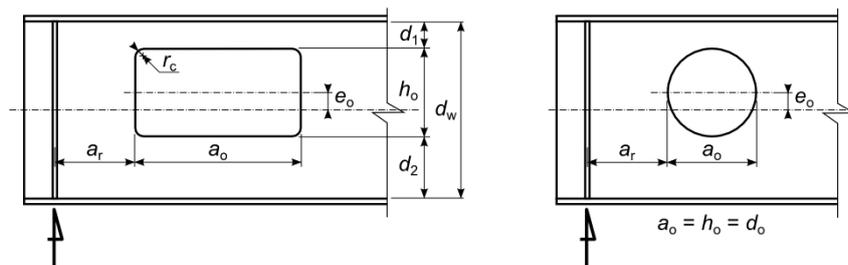
- pour les ouvertures circulaires :

$$w \geq 1,5 d_o \quad (3a)$$

- pour les autres formes d'ouvertures :

$$w \geq \max \{ a_o ; h_o \} \quad (3b)$$

- (5) Si les ouvertures sont de dimensions différentes, il convient d'utiliser la plus grande valeur de  $a_o$  et la plus grande valeur de  $h_o$  pour les ouvertures rectangulaires, et la plus grande valeur de  $d_o$  pour les ouvertures circulaires.
- (6) Pour qu'un raidisseur d'extrémité soit pleinement efficace, il convient que la longueur  $a_r$  entre le raidisseur et la première ouverture d'âme soit au moins égale à  $0,5 d_w$ , voir Figure 10.



**Figure 10 : Position et dimensions d'une ouverture**

- (7) Si une ouverture est proche d'un appui d'extrémité, il convient de vérifier la résistance du montant d'âme au cisaillement longitudinal s'exerçant dans la poutre entre l'ouverture et l'extrémité de la poutre. Il convient de baser l'effort tranchant devant être supporté par le montant d'âme sur les efforts axiaux s'exerçant dans les tés supérieur et inférieur à mi-longueur de l'ouverture. Il convient de baser la résistance au cisaillement sur la longueur minimum depuis l'extrémité de la poutre jusqu'au bord le plus proche de l'ouverture, ou, le cas échéant, la longueur jusqu'à l'extrémité la plus proche du renfort longitudinal.

### 2.1.2 Résistance aux forces transversales

- (1) La résistance d'une poutre sans raidisseurs transversaux intermédiaires aux forces transversales appliquées au travers d'une semelle peut être obtenue en utilisant la méthode exposée dans la NF EN 1993-1-5 chapitre 6, à condition que la force ne soit pas appliquée à l'âme non raidie sur la longueur  $a_z$  de la zone d'influence d'une ouverture d'âme.
- (2) Il convient de prendre la longueur totale  $a_z$  de la zone d'influence d'une ouverture, voir Figure 11, égale à :

$$a_z = a_o + 2a_p \quad (4)$$

(3) Il convient de calculer la longueur supplémentaire  $a_p$  de la zone d'influence au moyen des expressions suivantes :

- si  $d_w / t_w \leq 90 \varepsilon$  :

pour une ouverture circulaire : 
$$a_p = 0,9 d_o \quad (5b)$$

sinon : 
$$a_p = h_o \quad (5a)$$

- si  $d_w / t_w > 90 \varepsilon$  :

pour une ouverture circulaire : 
$$a_p = \frac{d_w / t_w}{100 \varepsilon} d_o \quad \text{mais } a_p \leq d_w \quad (5d)$$

sinon : 
$$a_p = \frac{d_w / t_w}{90 \varepsilon} h_o \quad \text{mais } a_p \leq d_w \quad (5c)$$

(4) Il convient de prévoir des raidisseurs d'âme transversaux au droit des appuis de la poutre, lorsqu'ils sont situés dans la zone d'influence de longueur  $a_z$  d'une ouverture d'âme, voir Figure 11.

(5) Il convient également de prévoir des raidisseurs d'âme transversaux au droit des forces transversales concentrées significatives appliquées sur les longueurs additionnelles  $a_p$  d'une ouverture d'âme.

(6) Il convient que la largeur d'âme prise en compte dans l'aire efficace d'un raidisseur transversal d'âme, voir NF EN 1993-1-5 clause 9.1(2), ne soit pas supérieure à la distance  $a_s$  jusqu'à l'ouverture la plus proche, voir Figure 11.

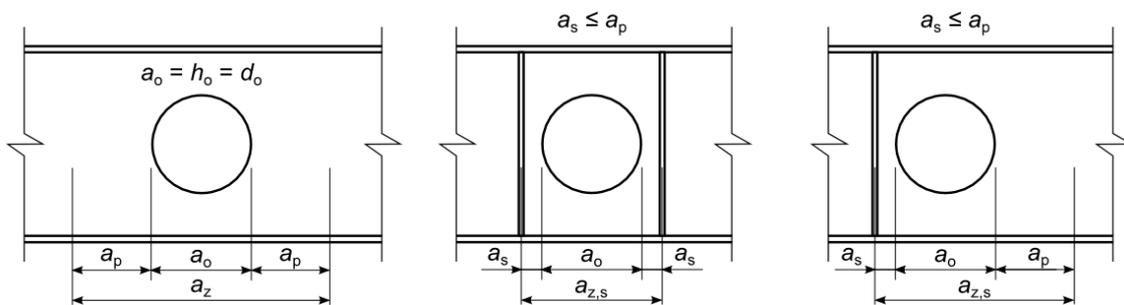


Figure 11 : Zone d'influence d'une ouverture

### 2.1.3 Résistance à l'effort tranchant

(1) La réduction de la résistance à l'effort tranchant provoquée par une ouverture d'âme isolée peut être négligée au niveau des sections transversales situées en dehors de sa zone d'influence de longueur  $a_z$ , ou  $a_{z,s}$  en présence de raidisseurs transversaux, voir 2.1.2 et Figure 11.

(2) La résistance à l'effort tranchant d'une section transversale ajourée peut être augmentée en renforçant l'ouverture, voir 2.1.5.

(3) La résistance à l'effort tranchant  $V_{o,Rd}$  d'une section transversale ajourée est déterminée en prenant le minimum de la résistance plastique  $V_{o,pl,Rd}$  et de la résistance au voilement  $V_{o,bw,Rd}$  (si  $h_w / t_w \geq 72 \varepsilon$ ).

(4) La résistance plastique à l'effort tranchant  $V_{o,pl,Rd}$  peut être obtenue par les expressions suivantes :

- pour les ouvertures circulaires :

$$V_{o,pl,Rd} = \left( V_{pl,Rd} - \frac{0,9 d_o t_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \right) \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \quad (6a)$$

avec :

$$\beta = 3,7 \left[ \frac{(d_w - 0,9 d_o)^2 + 4 e_o^2}{d_o (d_w - 0,9 d_o)} \right]^2 \quad (6b)$$

- pour les autres formes d'ouvertures :

$$V_{o,pl,Rd} = \left( V_{pl,Rd} - \frac{h_o t_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \right) \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \quad (6c)$$

avec :

$$\beta = 0,75 \left[ \frac{(d_w - h_o)^2 + 4 e_o^2}{a_o (d_w - h_o)} \right]^2 \quad (6d)$$

où  $V_{pl,Rd}$  représente la résistance plastique à l'effort tranchant de la section transversale non ajourée, déterminée suivant la clause 6.2.6 de la NF EN 1993-1-1 en adoptant  $\eta = 1$ .

(5) La résistance au voilement par cisaillement  $V_{o,bw,Rd}$  peut être obtenue par les expressions suivantes :

- pour les ouvertures circulaires :

$$V_{o,bw,Rd} = V_{bw,Rd} \left( 1 - \frac{d_o}{d_w} \right) \quad (7a)$$

- pour les autres formes d'ouvertures :

$$V_{o,bw,Rd} = V_{bw,Rd} \left( 1 - \frac{h_o + 0,3 a_o}{d_w} \right) \quad (7b)$$

où  $V_{bw,Rd}$  représente la résistance au voilement par cisaillement de la section transversale non ajourée, déterminée suivant la clause 5.2(1) de la NF EN 1993-1-5, en adoptant  $\eta = 1$ .

## 2.1.4 Résistance au moment fléchissant

- (1) La réduction de la résistance au moment fléchissant provoquée par une ouverture d'âme isolée peut être négligée pour les sections transversales situées en dehors de sa zone d'influence de longueur  $a_z$ , ou  $a_{z,s}$  en présence de raidisseurs transversaux, voir 2.1.2 et Figure 11.
- (2) La résistance au moment fléchissant d'une section transversale ajourée peut être augmentée en renforçant l'ouverture, voir 2.1.5.
- (3) La résistance au moment fléchissant  $M_{o,Rd}$  d'une poutre au droit d'une ouverture d'âme, en tenant compte des effets de l'effort tranchant  $V_{Ed}$  s'exerçant en ce point, peut être déterminée au moyen de la méthode approchée suivante :

### a) pour des ouvertures circulaires :

- pour les sections transversales de Classe 1 et 2 :
- 

$$M_{o,Rd} = M_{pl,Rd} \left[ 1 - \frac{0,225 t_w d_o (0,9 d_o + 4 e_o)}{W_{pl}} - \mu_1 \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right] \quad (8a)$$

$$\text{mais : } M_{o,Rd} \leq M_{pl,Rd} \left[ 1 - \frac{0,25 t_w d_o (d_o + 4 e_o)}{W_{pl}} \right] \quad (8b)$$

- pour les sections transversales de Classe 3 :

$$M_{o,Rd} = M_{el,Rd} \left[ 1 - \frac{t_w (0,9 d_o + 2 e_o)^3}{12 I_y} - \mu_1 \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right] \mu_2 \quad (8c)$$

$$\text{mais : } M_{o,Rd} \leq M_{el,Rd} \left[ 1 - \frac{t_w (d_o + 2 e_o)^3}{12 I_y} \right] \quad (8d)$$

avec :

$$\mu_1 = \frac{0,25 t_w d_w^2}{W_{pl}} \left[ 1 + 1,35 \left( 0,7 - \frac{0,9 d_o}{d_w} \right) \frac{d_o}{d_w} \right] \quad (8e)$$

$$\mu_2 = 1,125 - 0,001 \frac{d_o}{t_w \varepsilon} \quad \text{pour } \frac{d_o}{t_w} > 125 \varepsilon \quad (8f)$$

$$\mu_2 = 1,0 \quad \text{pour } \frac{d_o}{t_w} \leq 125 \varepsilon \quad (8g)$$

**b) pour les autres formes d'ouverture :**

- pour les sections transversales de Classe 1 et 2 :

$$M_{o,Rd} = M_{pl,Rd} \left[ 1 - \frac{0,25 t_w h_o (h_o + 4 e_o)}{W_{pl}} - \mu_1 \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right] \quad (9a)$$

- pour les sections transversales de Classe 3 :

$$M_{o,Rd} = M_{el,Rd} \left[ 1 - \frac{t_w (h_o + 2 e_o)^3}{12 I_y} - \mu_1 \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} \right] \mu_2 \quad (9b)$$

avec :

$$\mu_1 = \frac{0,25 t_w d_w^2}{W_{pl}} \left[ 1 + 3 \left( 0,7 - \frac{h_o}{d_w} \right) \frac{a_o}{d_w} \right] \quad (9c)$$

$$\mu_2 = 1,125 - 0,001 \frac{a_o}{t_w \varepsilon} \quad \text{pour } \frac{a_o}{t_w} > 125 \varepsilon \quad (9d)$$

$$\mu_2 = 1,0 \quad \text{pour } \frac{a_o}{t_w} \leq 125 \varepsilon \quad (9e)$$

où :

$I_y$  est le moment d'inertie de flexion de la section transversale non ajourée ;

$M_{el,Rd}$  est le moment de résistance élastique de la section transversale non ajourée, selon la NF EN 1993-1-1 clause 6.2.5(2) ;

$M_{pl,Rd}$  est le moment de résistance plastique de la section transversale non ajourée, selon la NF EN 1993-1-1 clause 6.2.5(2) ;

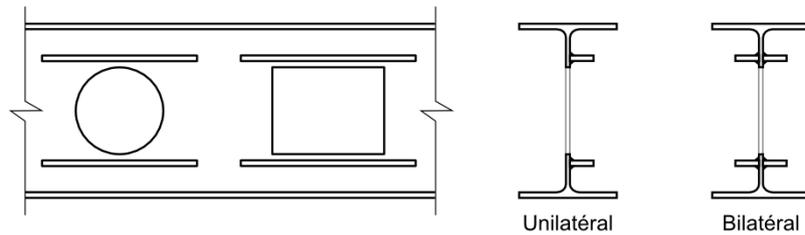
$V_{o,Rd}$  est la résistance au cisaillement de la section transversale ajourée, selon 2.1.3 ;

$W_{pl}$  est le module plastique de la section transversale non ajourée.

### 2.1.5 Ouvertures d'âme renforcées

(1) Cette méthode peut être utilisée pour les ouvertures d'âme renforcées par des raidisseurs longitudinaux (voir Figure 12) lorsque les conditions suivantes sont satisfaites :

- le renforcement est adjacent à l'ouverture, en laissant un espace juste suffisant pour les soudures ;
- les renforts au-dessus et au-dessous de l'ouverture ont chacun une aire égale  $A_f$  ;
- l'aire de renforcement  $A_f$  n'est pas supérieure à l'aire de semelle  $A_f$  ;
- le renforcement est de Classe 1 ou de Classe 2 ;
- les semelles sont de Classe 1 ou de Classe 2 ;
- après renforcement, les âmes des tés raidis sont de Classe 1 ou de Classe 2 sous effort normal de compression.



**Figure 12 : Raidisseurs longitudinaux**

- (2) Il convient de prendre la résistance au cisaillement  $V_{o,Rd}$  d'une ouverture circulaire renforcée égale à la plus faible des deux valeurs suivantes : la résistance au voilement par cisaillement  $V_{o,bw,Rd}$  calculée par l'expression (7a) en 2.1.3(5) ou la résistance plastique au cisaillement  $V_{o,pl,Rd}$  donnée par :

$$V_{o,pl,Rd} = \left( V_{pl,Rd} - \frac{d_o t_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \right) \mu_3 \quad (10a)$$

avec :

$$\mu_3 = \frac{7,7 A_r}{d_o t_w} \quad \text{mais } \mu_3 \leq 1,0 \quad (10b)$$

- (3) Il convient de prendre la résistance au cisaillement  $V_{o,Rd}$  d'une autre forme d'ouverture renforcée égale à la plus faible des deux valeurs suivantes : la résistance au voilement par cisaillement  $V_{o,bw,Rd}$  calculée par l'expression (7b) en 2.1.3(5) ou la résistance plastique au cisaillement  $V_{o,pl,Rd}$  donnée par :

$$V_{o,pl,Rd} = \left( V_{pl,Rd} - \frac{h_o t_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \right) \mu_3 \quad (11a)$$

avec :

$$\mu_3 = \frac{2\sqrt{3} A_r}{h_o t_w} \quad \text{mais } \mu_3 \leq 1,0 \quad (11b)$$

- (4) Il convient de déterminer la résistance au moment fléchissant  $M_{o,Rd}$  à mi-longueur d'une ouverture renforcée (circulaire ou autre), en tenant compte des effets de l'effort tranchant  $V_{Ed}$  s'exerçant en ce point, au moyen de l'expression suivante :

$$M_{o,Rd} = M_{1,Rd} - \frac{V_{Ed}}{V_{o,Rd}} (M_{1,Rd} - M_{2,Rd}) \quad (12a)$$

avec :

$$M_{2,Rd} = \frac{(A_f - A_r) d_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (12b)$$

- (5) Il convient de calculer la valeur de la résistance  $M_{1,Rd}$  pour un cisaillement nul au moyen des expressions suivantes :

- si  $A_r \leq t_w e_o$  :

$$M_{1,Rd} = M_{pl,Rd} \left[ 1 - \frac{0,25 t_w}{W_{pl}} \left( h_o - 2 \frac{A_r}{t_w} \right) \left( h_o - 2 \frac{A_r}{t_w} + 4 e_o \right) \right] \quad (13a)$$

- si  $A_r > t_w e_o$  :

$$M_{1,Rd} = M_{pl,Rd} \left[ 1 - \frac{t_w (0,25 h_o^2 + h_o e_o - e_o^2) - A_r h_o}{W_{pl}} \right] \quad (13b)$$

- (6) Il convient que les soudures longitudinales d'assemblage des renforts sur l'âme au-delà de chaque extrémité de l'ouverture consistent en des soudures d'angle sur deux côtés, ou lorsque c'est impossible, en des soudures à pénétration partielle. Il convient que ces soudures soient calculées pour transmettre l'effort axial de calcul  $F_{r,Ed}$  du renfort dans l'âme de la section non ajourée. La valeur de  $F_{r,Ed}$  peut être déterminée à partir du moment fléchissant sollicitant le té renforcé, ou, comme alternative par simplification, elle peut être prise égale à la résistance du raidisseur  $F_{r,Rd}$  donnée par :

$$F_{r,Rd} = \frac{A_r f_y}{\gamma_{M0}} \quad (14)$$

- (7) Il convient que la longueur d'ancrage  $L_v$  du renforcement au-delà de chaque extrémité de l'ouverture satisfasse les critères suivants, voir Figure 13 :

a) Un quart de la longueur de l'ouverture :

$$L_v \geq 0,25 a_o \quad (15a)$$

b) Résistance au cisaillement des soudures d'angle :

$$L_v \geq \frac{F_{r,Ed}}{2 n a f_{vw,d}} \quad (15b)$$

c) Résistance au cisaillement du renforcement :

$$L_v \geq \frac{F_{r,Ed}}{n t_r f_{yr} / (\gamma_{M0} \sqrt{3})} \quad (15c)$$

d) Résistance au cisaillement de l'âme :

$$L_v \geq \frac{F_{r,Ed}}{2 t_w f_{yw} / (\gamma_{M0} \sqrt{3})} \quad (15d)$$

où :

$a$  est la gorge de la soudure d'angle ;

$f_{vw,d}$  est la résistance de calcul au cisaillement d'une soudure d'angle, voir NF EN 1993-1-8 clause 4.5.3.3(3);

$n$  1 pour un renforcement sur une seule face,  
2 pour un renforcement sur deux faces.

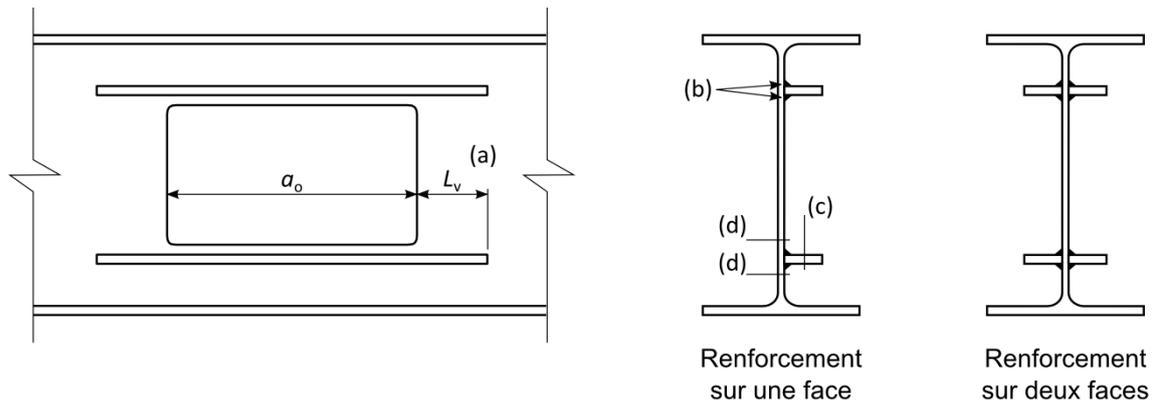


Figure 13 : Critères pour l'ancrage du renfort

## 2.2 Flèche

- (1) Il convient de déterminer la flèche verticale d'une poutre comportant une ouverture d'âme isolée à partir de la déformation globale de la poutre non ajourée, en ajoutant la déformation due à la présence de l'ouverture.
- (2) Il convient de déterminer la déformation additionnelle de la poutre ajourée en prenant en compte :
  - l'effet de flexion globale sur la déformation totale de la section transversale ajourée ;
  - l'effet de déformation par flexion locale des tés supérieur et inférieur ;
  - l'effet de déformation par cisaillement des tés supérieur et inférieur.
- (3) La flèche additionnelle  $\delta_{add}$  due à la présence d'une seule ouverture peut être estimée de façon approchée par la formule suivante :

$$\delta_{add} = \delta_b k_o \frac{a_o}{L} \frac{h_o}{h} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \quad (16)$$

où :

$\delta_b$  est la flèche de la poutre non ajourée en flexion simple ;

$x$  est la position de l'ouverture suivant l'axe longitudinal de la poutre par rapport à l'appui le plus proche ( $x \leq 0,5L$ ) ;

$L$  est la portée de la poutre ;

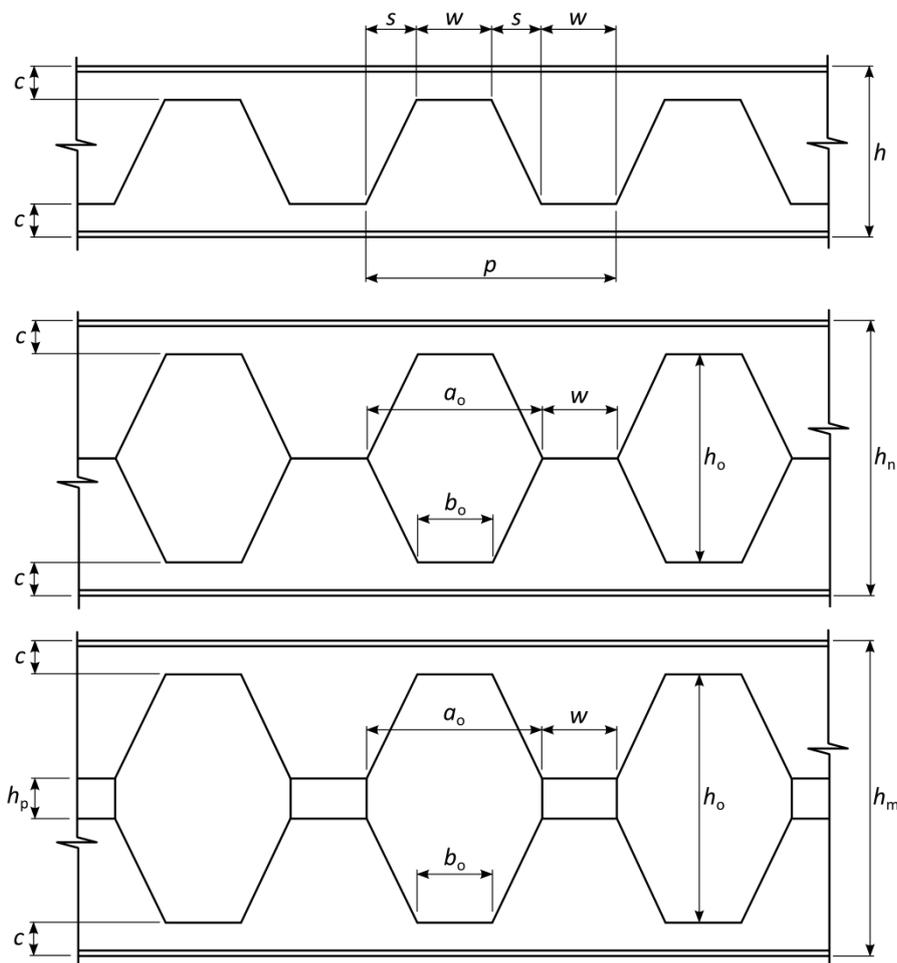
$k_o$  est un coefficient de correction valant :

- $k_o = 2,0$  pour une ouverture non raidie
- $k_o = 1,5$  pour une ouverture raidie

### 3 POUTRES COMPORTANT DES OUVERTURES D'ÂME MULTIPLES

#### 3.1 Généralités

- (1) Pour l'application des règles de ce chapitre à des poutres comportant des ouvertures d'âme multiples, il convient que les ouvertures d'âme soient espacées régulièrement sur la longueur de la poutre et disposées symétriquement sur la hauteur de la section transversale.
- (2) Il convient que la géométrie des poutres comportant des ouvertures d'âme polygonales multiples ou circulaires multiples soit telle qu'illustrée dans les Figure 14 et Figure 15 respectivement.



$$p = 2(w + s)$$

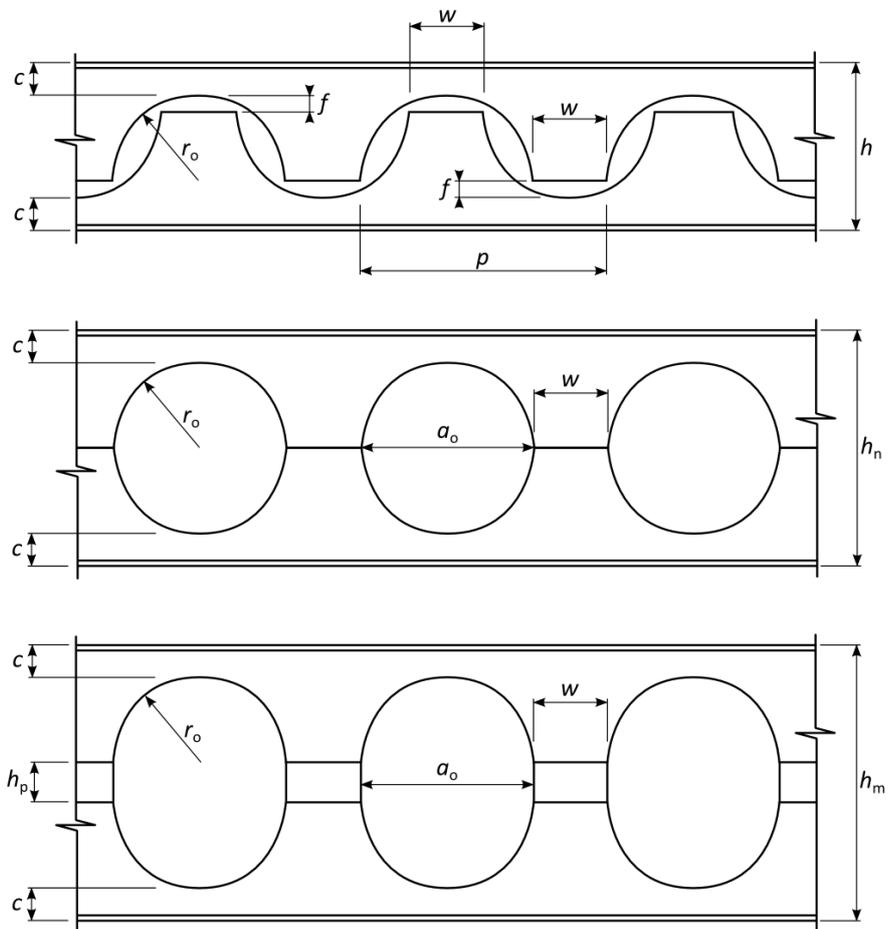
$$h_n = 2(h - c)$$

$$a_o = w + 2s$$

$$h_m = 2(h - c) + h_p$$

$$b_o = w$$

Figure 14 : Ouvertures d'âme polygonales multiples



$$p = w + 2r_o$$

$$h_n = 2(r_o + c)$$

$$f = r_o - \sqrt{r_o^2 - (w/2)^2}$$

$$h_m = 2(r_o + c) + h_p$$

$$c = (h - r_o - f) / 2$$

$$a_o = 2r_o$$

**Figure 15 : Ouvertures d'âme circulaires multiples**

- (3) Il convient que les dimensions des ouvertures d'âme multiples, voir Figure 16, satisfassent les limites suivantes :

$$d_1 \geq 0,10d_w$$

$$d_2 = d_1$$

$$a_o \leq h_o$$

$$b_o \leq 0,50a_o$$

$$0,25a_o \leq w \leq a_o$$

$$h_p \leq 0,5d_w$$

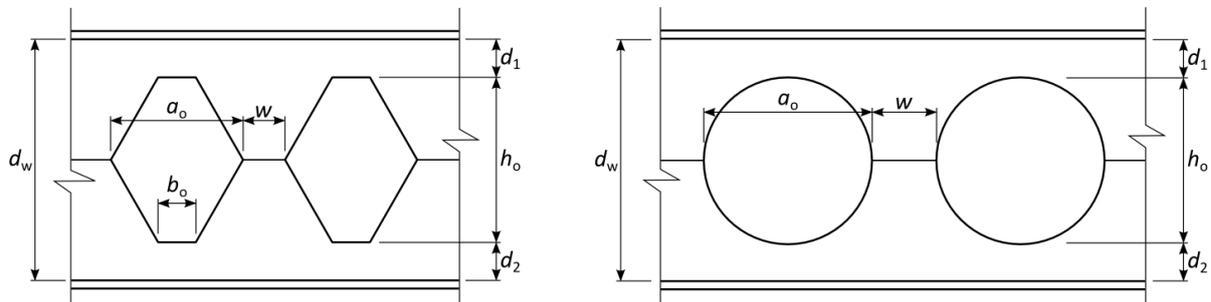


Figure 16 : Dimensions d'ouvertures d'âme multiples

- (4) Des ouvertures d'âme particulières peuvent être raidies ou renforcées, voir Figures 6(b), 6(c) et 17.

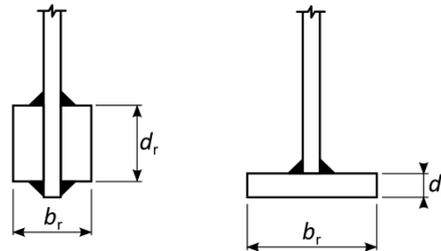


Figure 17 : Dimensions des renforts annulaires et des raidisseurs circulaires

- (5) Des ouvertures d'âme peuvent être omises, ou encore obturées, ou partiellement bouchées par soudure d'une plaque d'une épaisseur au moins égale à celle de l'âme, si nécessaire au droit des appuis, ou en d'autres points où des forces concentrées sont appliquées.
- (6) Il convient que les ouvertures d'âme soient également obturées ou omises aux emplacements où des raidisseurs transversaux sont disposés.

### 3.2 Méthodes d'analyse

- (1) Il convient d'analyser une poutre comportant des ouvertures d'âme multiples comme une poutre Vierendeel équivalente, comme indiqué dans la Figure 18(a).
- (2) L'analyse peut éventuellement être simplifiée en prenant pour hypothèse des points d'inflexion à mi-longueur de chaque ouverture et à mi-hauteur de chaque montant d'âme, voir Figure 18(b).

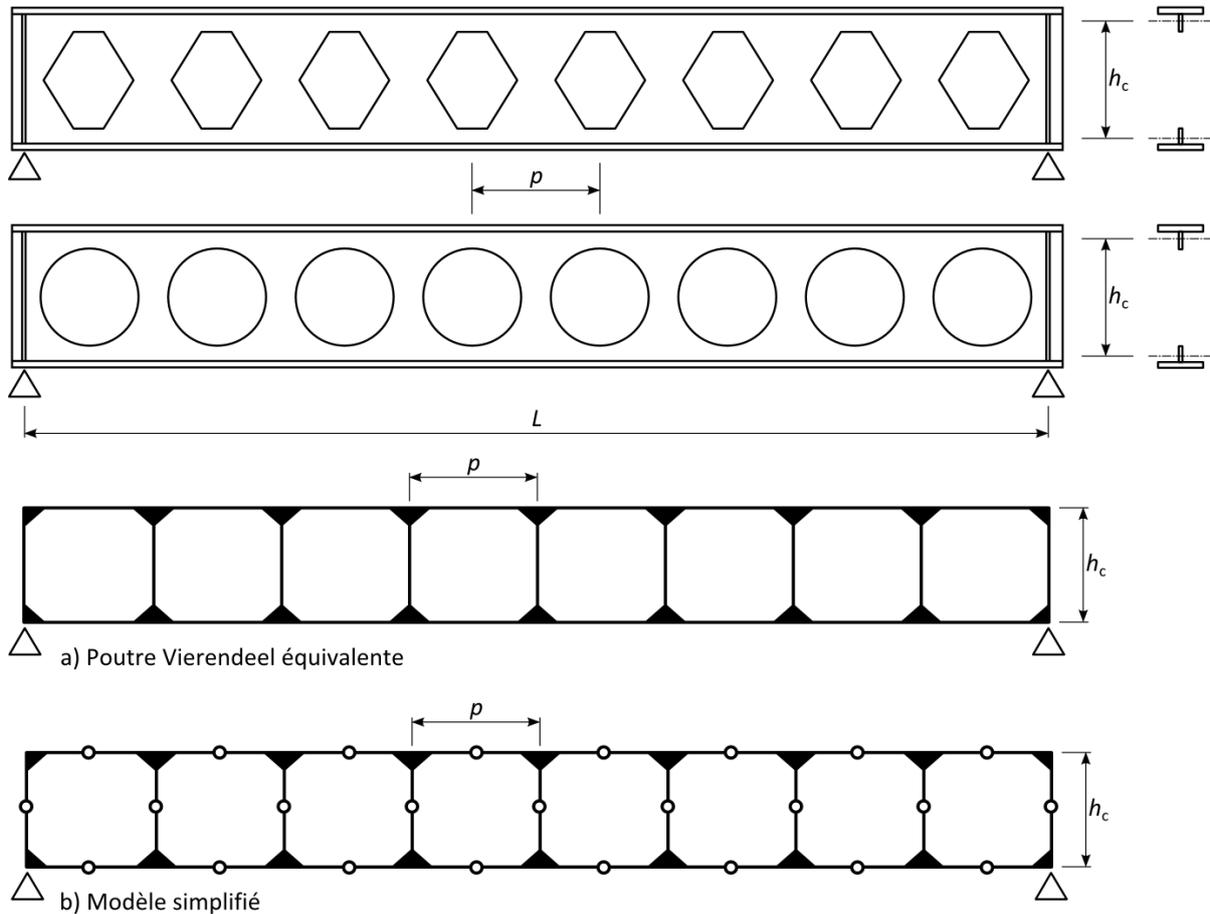


Figure 18 : Modèles d'analyse Vierendeel

### 3.3 Résistance

#### 3.3.1 Modes de ruine

- (1) Pour une poutre comportant des ouvertures d'âme multiples, il convient de vérifier les modes de ruine suivants, voir 1.5 :
- a) ruine des tés supérieur et inférieur au niveau d'une ouverture, voir 3.3.2, provoquée par les combinaisons de :
    - effort tranchant de la poutre  $V_{Ed}$  ;
    - moments Vierendeel  $M_{V,Ed}$  provoqués par le cisaillement de la poutre  $V_{Ed}$  ;
    - efforts axiaux  $N_{M,Ed}$  provoqués par le moment de la poutre  $M_{Ed}$  .

- b) ruine d'un montant d'âme, voir 3.3.3, provoquée par les combinaisons de :
  - moments Vierendeel  $M_{V,Ed}$  provoqués par le cisaillement de la poutre  $V_{Ed}$  ;
  - cisaillement Vierendeel  $V_{V,Ed}$  provoqué par le cisaillement de la poutre  $V_{Ed}$  ;
  - efforts axiaux  $N_{F,Ed}$  provoqués par des forces extérieures  $F_{Ed}$  .
- c) ruine de la poutre par déversement, voir 3.3.4 ;
- d) ruine locale provoquée par des forces transversales, voir 3.3.5.

### 3.3.2 Section au droit d'une ouverture

#### 3.3.2.1 Généralités

- (1) Il convient de vérifier la résistance d'une poutre comportant des ouvertures d'âme multiples en utilisant les valeurs de l'effort tranchant  $V_{Ed}$  et du moment fléchissant  $M_{Ed}$  coexistant dans la poutre à mi-longueur de chaque ouverture d'âme.
- (2) Les efforts axiaux  $N_{M,Ed}$  s'exerçant dans les tés en raison du moment fléchissant  $M_{Ed}$  sont calculés par l'expression :

$$N_{M,Ed} = \frac{M_{Ed}}{h_c} \quad (17)$$

où :

$h_c$  distance entre les centres de gravité des tés à mi-longueur de l'ouverture d'âme.

- (3) Il convient de déterminer la classe de la section selon 1.7.

#### 3.3.2.2 Ouvertures polygonales

- (1) Pour chaque ouverture d'âme polygonale, à condition que les tés soient de Classe 1 ou 2, il convient que la somme des quatre moments Vierendeel  $\sum M_{V,Ed}$  satisfasse le critère suivant :

$$\sum M_{V,Ed} \leq \sum M_{V,Rd} \quad (18a)$$

avec :

$$\sum M_{V,Ed} = b_o V_{Ed} \quad (18b)$$

où :

$\sum M_{V,Rd}$  est la résistance totale aux moments Vierendeel au niveau de l'ouverture;

$b_o$  est la longueur minimale de l'ouverture, voir Figure 16.

NOTE Lorsque les tés sont de Classe 3, il convient d'effectuer un calcul complet en élasticité. Ce calcul en élasticité peut également être adopté en alternative à l'application du critère (18a).

- (2) Il convient de calculer la résistance totale aux moments Vierendeel  $\sum M_{V,Rd}$  au niveau de l'ouverture au moyen de l'expression suivante :

$$\sum M_{V,Rd} = M_{1c,Rd} + M_{1t,Rd} + M_{2c,Rd} + M_{2t,Rd} \quad (19)$$

où :

$M_{1c,Rd}$  moment résistant du té supérieur avec l'extrémité de l'âme comprimée;

$M_{1t,Rd}$  moment résistant du té supérieur avec l'extrémité de l'âme tendue;

$M_{2c,Rd}$  moment résistant du té inférieur avec l'extrémité de l'âme comprimée;

$M_{2t,Rd}$  moment résistant du té inférieur avec l'extrémité de l'âme tendue.

- (3) Il convient de déterminer les quatre valeurs de moment de résistance pour les tés en prenant en compte, voir la Figure 19 :

- l'effort axial coexistant  $N_{M,Ed}$  provoqué par le moment fléchissant  $M_{Ed}$  ;
- l'effort tranchant coexistant  $V_{T,Ed}$  .

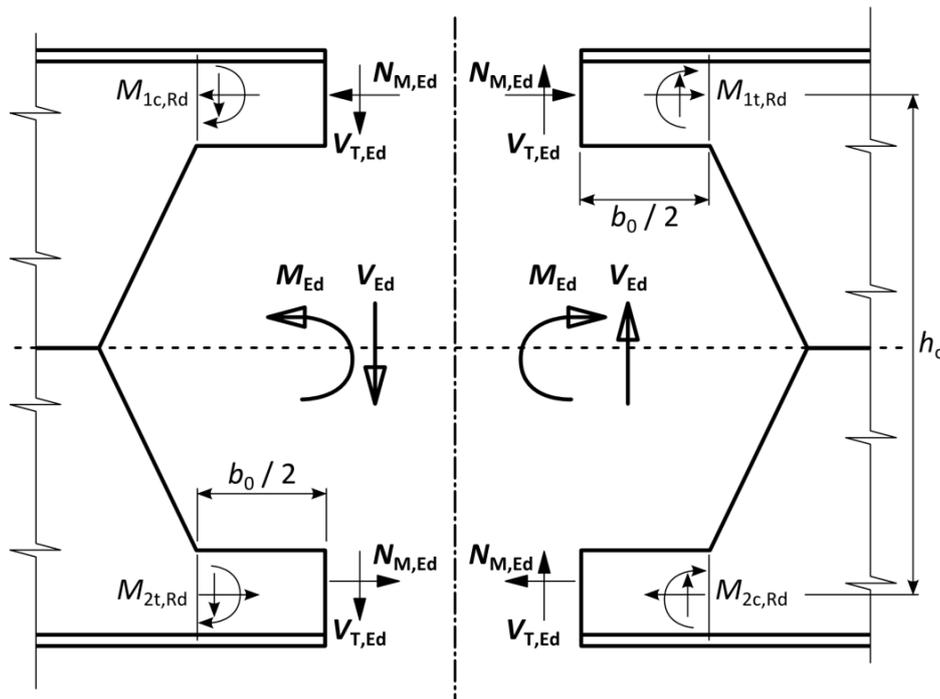


Figure 19 : Décomposition des efforts dans le modèle de poutre Vierendeel

- (4) Dans le cadre d'une vérification vis-à-vis du mécanisme Vierendeel sur la base de la condition (18a), le renforcement longitudinal peut être compris dans les sections transversales des tés supérieur et inférieur, à condition qu'il soit totalement ancré vis à vis de l'effort normal plastique du renfort, au-delà des extrémités de l'ouverture, voir 1.6 et 2.1.5.

- (5) Par simplification, le moment résistant du té  $M_{N,Rd}$  prenant en compte l'influence de l'effort axial peut être déterminé par les expressions suivantes :

- pour un té sans renforcement supplémentaire :

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left[ 1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right)^2 \right] \quad (20a)$$

- pour un té avec renforcement supplémentaire :

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left[ 1 - \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right] \quad (20b)$$

où :

$M_{pl,Rd}$  moment de résistance plastique du té.

NOTE : La formule simplifiée (20a) n'est pas représentative de l'interaction M-N d'une section en té isolée et n'est applicable que dans le cadre du critère de résistance (18a).

- (6) Il convient de calculer la résistance au cisaillement  $V_{T,Rd}$  du té selon la NF EN 1993-1-1 clause 6.2.6.
- (7) Si l'effort tranchant  $V_{T,Ed}$  est supérieur à  $0,50V_{T,Rd}$ , il convient de remplacer  $M_{pl,Rd}$  par  $M_{v,Rd}$  dans l'expression (20a) ou (20b) selon le cas, où  $M_{v,Rd}$  est le moment résistant de calcul réduit par la présence de l'effort tranchant.

### 3.3.2.3 Ouvertures circulaires

- (1) Il convient de vérifier la résistance globale d'une poutre comportant des ouvertures d'âme circulaires multiples à mi-longueur des ouvertures, voir section **a-a** de la Figure 20.

Le renforcement longitudinal peut être compris dans les sections transversales des tés, à condition qu'il soit totalement ancré au-delà des extrémités de l'ouverture, voir 1.6 et 2.1.5.

Il convient de déterminer les résistances des tés supérieur et inférieur selon les détails donnés pour les ouvertures polygonales dans les alinéas (3) à (7) du paragraphe 3.3.2.2.

- (2) En outre, il convient de vérifier les effets des moments Vierendeel au niveau de la section transversale critique de chaque ouverture, voir section **b-b** dans la Figure 20.

Le renforcement longitudinal peut être compris dans les sections transversales des tés, à condition qu'il soit totalement ancré au-delà des extrémités de l'ouverture, voir 1.6 et 2.1.5.

Dans cette vérification, le renforcement circulaire situé autour des ouvertures peut être également inclus dans les sections transversales des tés. Il convient de déterminer par itération l'angle critique  $\phi$  correspondant à la section critique **b-b**, voir la Figure 20.

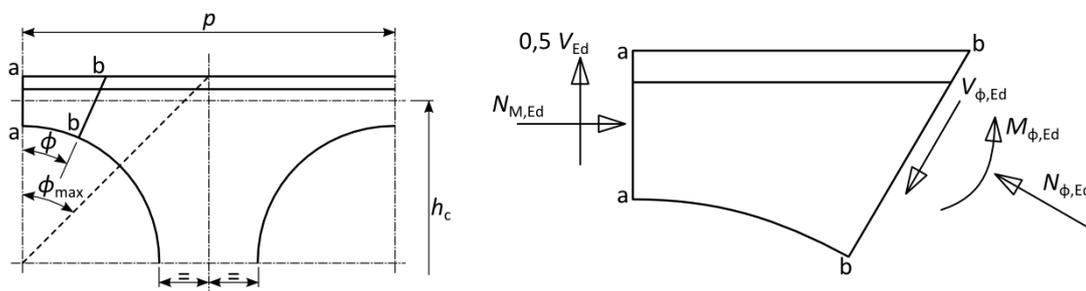


Figure 20 : Sollicitations au niveau de la section critique

- (3) Par simplification, le calcul peut être réalisé pour une série d'angles  $\phi$  de 20°, 25° et 30°. Un calcul plus précis par incrémentation peut éventuellement être effectué.
- (4) Il convient que les sollicitations présentes sur les sections **b-b** définies aux clauses (2) et (3), voir Figure 20, satisfassent le critère suivant :

$$\frac{N_{\phi,Ed}}{N_{\phi,Rd}} + \frac{M_{\phi,Ed}}{M_{\phi,Rd}} \leq 1,0 \quad (21)$$

où :

$M_{\phi,Rd}$  moment résistant (éventuellement réduit par l'effort tranchant  $V_{\phi,Ed}$ , voir (7)) de la section **b-b** ;

$M_{\phi,Ed}$  moment interne sur la section **b-b** ;

$N_{\phi,Rd}$  résistance à l'effort normal (éventuellement réduit par l'effort tranchant  $V_{\phi,Ed}$ , voir (7)) de la section **b-b** ;

$N_{\phi,Ed}$  effort normal dans la section **b-b** ;

$V_{\phi,Rd}$  effort tranchant dans la section **b-b** ;

- (5) Il convient de déterminer les sollicitations s'exerçant sur la section **b-b** en vérifiant l'équilibre avec les sollicitations régnant à mi-longueur de l'ouverture, section **a-a**.

NOTE Si l'analyse a été effectuée en prenant pour hypothèse des points d'inflexion, voir 3.2(2), les sollicitations s'exerçant sur la section **a-a** seront telles qu'indiquées dans la Figure 20.

- (6) Il convient de déterminer le moment résistant  $M_{\phi,Rd}$  en tenant compte de la classification de la section, voir 1.7.2.
- (7) Lorsque l'effort tranchant  $V_{\phi,Ed}$  dépasse la moitié de l'effort tranchant résistant, il convient de déterminer les résistances  $M_{\phi,Rd}$  et  $N_{\phi,Rd}$  en prenant en compte une limite d'élasticité réduite dans l'aire de cisaillement, voir la NF EN 1993-1-1 clause 6.2.8.

### 3.3.3 Montants d'âme

- (1) Il convient de vérifier la résistance des montants d'âme d'une poutre comportant des ouvertures d'âme multiples à l'effort tranchant longitudinal s'exerçant dans la poutre, de la façon suivante :
- résistance à l'instabilité provoquée par les moments fléchissants induits dans le montant d'âme ;
  - résistance au cisaillement du montant d'âme (y compris montant d'extrémité) ;
  - résistance des soudures dans le montant d'âme (y compris montant d'extrémité).

- (2) A condition que la hauteur  $h_o$  des ouvertures d'âme ne soit pas supérieure à  $60 \varepsilon t_w$  la résistance à l'instabilité d'un montant d'âme non raidi peut être vérifiée en s'assurant que le moment fléchissant  $M_{wp,Ed}$  au niveau de la section transversale critique dans le montant d'âme satisfait le critère suivant :

$$M_{wp,Ed} \leq (C_1 \alpha - C_2 \alpha^2 - C_3) M_{el,Rd} \quad \text{mais} \quad M_{wp,Ed} \leq 0,60 M_{el,Rd} \quad (22a)$$

avec :

$$C_1 = 5,097 + 0,1464 \beta - 0,00174 \beta^2 \quad (22b)$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625 \beta - 0,000683 \beta^2 \quad (22c)$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853 \beta - 0,00108 \beta^2 \quad (22d)$$

$$\alpha = \frac{P}{h_o} \quad (22e)$$

$$\beta = \frac{h_o}{t_w} \quad (22f)$$

où :

$M_{el,Rd}$  moment résistant élastique de la section transversale critique dans le montant d'âme.

- (3) Pour les ouvertures polygonales, il convient de prendre la section transversale critique dans le montant d'âme comme située au sommet des ouvertures.
- (4) Pour les ouvertures circulaires, il convient de prendre la section transversale critique dans le montant d'âme égale à  $0,10 r_o$  au-dessous du sommet des ouvertures.
- (5) S'il existe un raidisseur transversal s'étendant d'une semelle à l'autre entre les ouvertures, ou s'il existe un raidisseur annulaire au niveau d'une ouverture circulaire, ils peuvent être compris dans la section transversale critique du montant d'âme.
- (6) Il convient que l'effort tranchant  $V_{wp,Ed}$  s'exerçant dans un montant d'âme satisfasse le critère suivant :

$$V_{wp,Ed} \leq \frac{w t_w f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (23)$$

où :

$w$  largeur minimale du montant d'âme, voir Figure 14 et Figure 15.

- (7) Pour les poutres à ouvertures circulaires, une méthode alternative pour la vérification de la stabilité du montant d'âme est disponible en Annexe A.

### 3.3.4 Déversement

- (1) Pour une poutre comportant des ouvertures d'âme multiples, il convient de vérifier la résistance au déversement au moyen des caractéristiques de section transversale appropriées à mi-longueur des ouvertures en utilisant la NF EN 1993-1-1 clause 6.3.2

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_y f_y}{\gamma_{M1}} \quad (24)$$

- (2)  $W_y$  correspond au module de résistance en flexion de la section au droit de l'ouverture. Suivant la classe de cette section, voir 1.7.2, il s'agit du module de résistance plastique  $W_{pl,y}$  ou élastique  $W_{el,y}$ .
- (3) Le coefficient de réduction pour le déversement  $\chi_{LT}$  doit être calculé selon le paragraphe 6.3.2.2 de l'EN 1993-1-1, avec :
- la courbe c ( $\alpha_{LT} = 0,49$ ) pour les poutres réalisées à partir de profilés laminés ;
  - la courbe d ( $\alpha_{LT} = 0,76$ ) pour les profilés reconstitués par soudage.

NOTE Le facteur de correction  $f$  (clause 6.3.2.3(2) de la NF EN 1993-1-1) n'est pas applicable dans le cadre de ces recommandations.

- (4) L'élançement réduit pour le déversement  $\bar{\lambda}_{LT}$  est déterminé en prenant les caractéristiques de la section brute, sauf pour l'inertie de torsion et pour le module de flexion dont les valeurs doivent correspondre à la section au droit de l'ouverture.

### 3.3.5 Résistance aux forces transversales

- (1) La résistance d'une poutre comportant des ouvertures d'âme multiples aux forces transversales appliquées au travers d'une semelle peut être obtenue par la méthode donnée dans la NF EN 1993-1-5 chapitre 6, à condition que la force ne soit pas appliquée dans la longueur  $a_z$  (ou  $a_{z,s}$ ) de la zone d'influence d'une ouverture d'âme, comme indiqué en 2.1.2 des présentes recommandations.
- (2) Il convient de prévoir des raidisseurs d'âme transversaux lorsque des réactions d'appui ou autres forces transversales concentrées significatives sont appliquées dans la longueur  $a_p$  (ou  $a_s$ ) de la zone d'influence d'une ouverture d'âme.
- (3) Il convient que la largeur d'âme comprise dans l'aire efficace d'un raidisseur d'âme transversal, voir la NF EN 1993-1-5 clause 9.1(2), ne soit pas supérieure à la largeur disponible, libre d'ouvertures d'âme.

## 3.4 Flèche

- (1) Il convient de déterminer la flèche verticale d'une poutre comportant des ouvertures d'âme multiples à partir de la déformation globale flexion de la poutre non ajourée, en ajoutant la déformation additionnelle de la poutre ajourée provoquée par la présence des ouvertures.

- (2) Il convient de déterminer la déformation additionnelle de la poutre ajourée en prenant en compte :
- l'effet de la flexion globale sur la déformation totale de la section transversale ajourée ;
  - l'effet de la déformation par flexion locale des tés supérieur et inférieur ;
  - l'effet de la déformation par flexion locale des montants d'âme ;
  - l'effet de la déformation par cisaillement des tés supérieur et inférieur ;
  - l'effet de la déformation par cisaillement des montants d'âme.
- (3) La poutre ajourée peut être analysée comme une poutre Vierendeel équivalente, voir 3.2.
- (4) La flèche additionnelle  $\delta_{\text{add}}$  due à la présence d'ouvertures multiples peut être estimée de façon approchée par la formule suivante :

$$\delta_{\text{add}} = 0,5 \delta_b n_o k_o \frac{a_o h_o}{L h} \quad (25)$$

où :

$\delta_b$  est la flèche de la poutre non ajourée en flexion simple ;

$n_o$  est le nombre d'ouvertures le long de la poutre ;

$L$  est la portée de la poutre ;

$k_o$  est un coefficient de correction valant :

- $k_o = 2,0$  pour une ouverture non raidie
- $k_o = 1,5$  pour une ouverture raidie

## 4 RÉFÉRENCES

---

- (1) Ces recommandations font référence à d'autres normes françaises ou européennes, et notamment aux Eurocodes. Les références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après.
- (2) Références normatives :
- [1] **NF EN 1993-1-1** : *Calcul des structures en acier - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments* ;
  - [2] **NF EN 1993-1-5** : *Calcul des structures en acier - Partie 1-5 : Plaques planes chargées dans leur plan* ;
  - [3] **NF EN 1993-1-8** : *Calcul des structures en acier - Partie 1-8 : Calcul des assemblages*.
- (3) Autres publications :
- [4] *Poutres cellulaires acier et mixtes – Partie 1 : Proposition d'un modèle pour la stabilité d'un montant – D. BITAR et al. – Revue construction métallique n°1/2006, CTICM.*

## ANNEXE A

### METHODE ALTERNATIVE POUR LA VERIFICATION DE LA STABILITE DU MONTANT D'AME D'UNE POUTRE CELLULAIRE

---

#### A.1 *Domaine d'application*

- (1) La méthode alternative décrite ci-après s'applique aux poutres cellulaires munies d'ouvertures circulaires régulières fabriquées à partir de profilés laminés.

NOTE Les justifications de cette méthode ont été publiées dans l'article *Poutres cellulaires acier et mixtes – Partie 1 : Proposition d'un modèle pour la stabilité d'un montant* [4].

- (2) La méthode s'applique aux poutres cellulaires symétriques par rapport au plan de l'âme et respectant les conditions ci-dessous :

$$1,08 \leq \alpha \leq 1,50$$

$$w = 50 \text{ mm}$$

$$\frac{a_o}{t_w} \leq 60 \varepsilon$$

où :

$$\alpha = \frac{p}{a_o} ;$$

$$p = w + a_o ;$$

$w$  Largeur minimale du montant d'âme ;

$t_w$  Epaisseur de l'âme ;

$a_o$  Diamètre de l'ouverture.

#### A.2 *Stabilité du montant d'âme*

- (1) Chaque montant entre deux ouvertures consécutives, numérotées  $i$  et  $i+1$  sur la Figure 21, doit vérifier la condition ci-dessous pour la membrure supérieure comme inférieure :

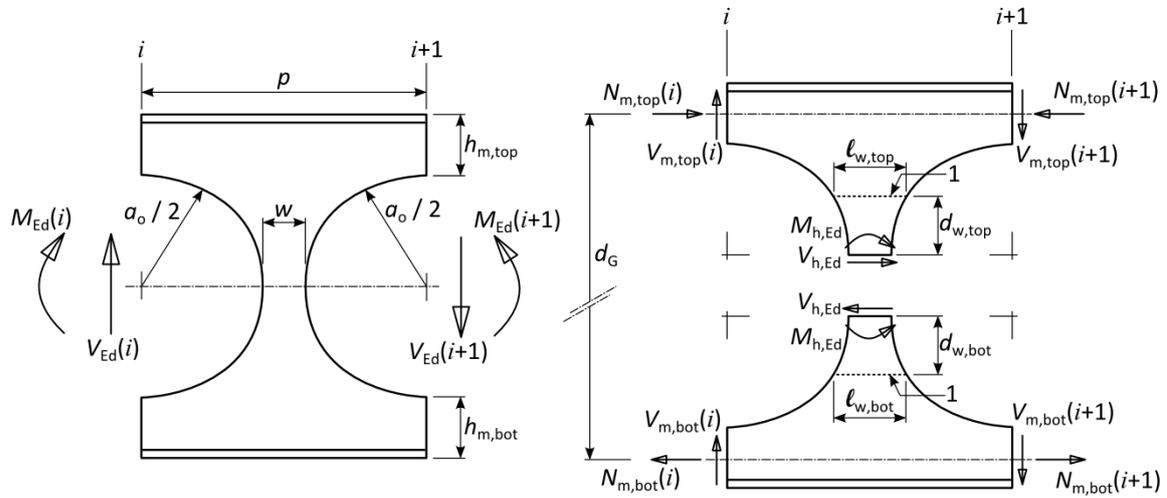
$$\frac{|\sigma_{w,Ed}|}{\kappa \sigma_{w,Rd}} \leq 1,0 \tag{26}$$

où :

$\sigma_{w,Ed}$  Contrainte principale de calcul sollicitant la section critique (pour le demi-montant supérieur ou inférieur), voir (4) ;

$\sigma_{w,Rd}$  Contrainte principale résistante de calcul pour le demi-montant considéré, voir (9) ;

$\kappa$  Facteur de réserve post-critique, voir (13).



1 : sections critiques

**Figure 21 : Efforts et moments au sein du montant d'âme**

- (2) La section critique est située à une distance  $d_w$  mesurée depuis l'axe de l'ouverture :

$$d_w = \frac{a_o}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{\alpha^4 + 8\alpha^2 - 2} - \alpha^2}{2}} \quad (27)$$

- (3) La largeur  $\ell_w$  de la section critique peut être calculée par l'expression suivante :

$$\ell_w = a_o \left( \alpha - \sqrt{1 - \left( \frac{2d_w}{a_o} \right)^2} \right) \quad (28)$$

- (4) La contrainte principale de compression sur la section critique est définie par :

$$\sigma_{w,Ed} = \frac{6 M_{c,Ed}}{\ell_w^2 t_w (1 - 4(d_w / a_o)^2)} \quad (29)$$

où :

$M_{c,Ed}$  Moment de flexion sollicitant la section critique (voir (5)).

- (5) Les efforts au sein du montant d'âme sont calculés à partir des expressions du Tableau A.1 :

	Membrane supérieure	Membrane inférieure
Effort axial dans la section $i$	$N_{m,top}(i) = \frac{M_{Ed}(i)}{d_G}$	$N_{m,bot}(i) = \frac{M_{Ed}(i)}{d_G}$
Effort axial dans la section $i+1$	$N_{m,top}(i+1) = \frac{M_{Ed}(i+1)}{d_G}$	$N_{m,bot}(i+1) = \frac{M_{Ed}(i+1)}{d_G}$
Cisaillement dans la section $i$	$V_{m,top}(i) = k_{Av,top} V_{Ed}(i)$	$V_{m,bot}(i) = k_{Av,bot} V_{Ed}(i)$
Cisaillement dans la section $i+1$	$V_{m,top}(i+1) = k_{Av,top} V_{Ed}(i+1)$	$V_{m,bot}(i+1) = k_{Av,bot} V_{Ed}(i+1)$
Moment de flexion sollicitant la section critique	$M_{c,Ed,top} = V_{h,Ed} d_{w,top} - M_{h,Ed}$	$M_{c,Ed,bot} = V_{h,Ed} d_{w,bot} + M_{h,Ed}$
$d_G$ Distance entre les centres de gravité des membranes supérieure et inférieure, au droit de l'ouverture.		

**Tableau A.1 : Efforts dans le montant d'âme**

- (6) La distribution du cisaillement entre les membranes supérieure et inférieure est fonction des facteurs  $k_{Av}$  :

$$k_{Av,top} = \frac{A_{v,0,top}^\eta}{A_{v,0,top}^\eta + A_{v,0,bot}^\eta} \quad (30a)$$

$$k_{Av,bot} = \frac{A_{v,0,bot}^\eta}{A_{v,0,top}^\eta + A_{v,0,bot}^\eta} \quad (30b)$$

Avec :

$$\eta = \frac{1}{9,48 - 4,84\alpha} \quad (30c)$$

où :

$A_{v,0,top}$  et  $A_{v,0,bot}$  sont les aires résistantes au cisaillement des tés supérieur et inférieur, respectivement.

- (7) Les aires résistantes au cisaillement des tés sont calculées comme suit :

$$A_{v,0} = 0,5 \left[ (2h_m - a_o - t_f) t_w + 2r_c t_f + (4 - \pi) r_c^2 \right] \quad (31)$$

- (8) Le cisaillement horizontal et le moment fléchissant au milieu du montant d'âme sont obtenus par :

$$V_{h,Ed} = N_{m,top}(i+1) - N_{m,top}(i) = N_{m,bot}(i+1) - N_{m,bot}(i) \quad (32a)$$

$$M_{h,Ed} = \frac{(V_{m,top}(i+1) - V_{m,top}(i))p}{2} - V_{h,Ed} d_{bot} \quad (32b)$$

où :

$d_{bot}$  Distance entre le centre de gravité de la membrure inférieure et le centre de l'ouverture.

(9) La contrainte principale résistante de calcul pour le demi-montant considéré est calculée par :

$$\sigma_{w,Rd} = \frac{\chi \xi f_y}{\gamma_{M1}} \quad (33)$$

où :

$\chi$  Coefficient de réduction pour l'instabilité hors plan du montant, obtenu en utilisant la courbe de flambement « a » ( $\alpha = 0,21$ ) définie dans la NF EN 1993-1-1 clause 6.3.1.2 et en considérant l'élançement réduit calculé en (10).

$\xi$  Coefficient de forme calculé comme suit :

$$\xi = 1,5 + \frac{2 \cdot 10^{-5}}{(1 - \alpha)^4} \quad (34)$$

(10) L'élançement réduit est obtenu par :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\xi f_y}{\sigma_{w,cr}}} \quad (35)$$

où :

$\sigma_{w,cr}$  Contrainte principale critique, voir (11).

(11) La contrainte principale critique est calculée par les expressions suivantes :

$$\text{Demi-montant supérieur :} \quad \sigma_{w,cr,top} = \alpha_{cr,top} \sigma_{w,top,Ed} \quad (36a)$$

$$\text{Demi-montant inférieur :} \quad \sigma_{w,cr,bot} = \alpha_{cr,bot} \sigma_{w,bot,Ed} \quad (36b)$$

où :

$\sigma_{w,top,Ed}$ ,  $\sigma_{w,bot,Ed}$  Contraintes principales sollicitant la section critique du demi-montant supérieur et inférieur respectivement, calculées sous l'effort du cisaillement horizontal  $V_{h,Ed}$  seul, suivant l'expression donnée en (5).

$\alpha_{cr,top}$ ,  $\alpha_{cr,bot}$  Facteurs d'amplification critiques du montant d'âme, dans le demi-montant supérieur ou inférieur respectivement, prenant en compte l'interaction entre les deux membrures et calculés suivant les expressions suivantes :

$$\alpha_{cr,top} = \max \left\{ \beta_{cr,top} ; \frac{2 \beta_{cr,top} \beta_{cr,bot}}{\beta_{cr,top} + \beta_{cr,bot}} \right\} \quad (37a)$$

$$\alpha_{cr,bot} = \max \left\{ \beta_{cr,bot} ; \frac{2 \beta_{cr,top} \beta_{cr,bot}}{\beta_{cr,top} + \beta_{cr,bot}} \right\} \quad (37b)$$

$\beta_{cr,top}$ ,  $\beta_{cr,bot}$

Facteurs d'amplification critiques du montant d'âme, dans le demi-montant supérieur ou inférieur respectivement, prenant en compte l'effet des efforts de compression et de cisaillement dans le montant et calculés suivant les expressions suivantes :

$$\beta_{cr,top} = \frac{1}{\frac{V_{h,Ed}}{V_{h,cr,top}} + k_s \frac{N_{m,top,Ed}}{N_{m,cr,Ed}}} \quad (38a)$$

$$\beta_{cr,bot} = \frac{1}{\frac{V_{h,Ed}}{V_{h,cr,bot}} + k_s \frac{N_{m,bot,Ed}}{N_{m,cr,Ed}}} \quad (38b)$$

où :

$k_s = +1,0$  lorsque la membrure est en compression ;

$k_s = -0,5$  lorsque la membrure est en traction.

$V_{h,cr,top}$ ,  $V_{h,cr,bot}$

Effort de cisaillement critique, pour le demi-montant supérieur ou inférieur respectivement, voir (12).

$N_{m,cr,top}$ ,  $N_{m,cr,bot}$

Effort de compression critique, pour le demi-montant supérieur ou inférieur respectivement, voir (12).

$N_{m,top,Ed}$ ,  $N_{m,bot,Ed}$

Effort de compression dans les membrures supérieure ou inférieure respectivement, obtenue avec les expressions ci-dessous :

$$N_{m,top,Ed} = \frac{A_{w,top}}{A_{0,top}} \min \{ N_{m,top}(i) ; N_{m,top}(i+1) \} \quad (39a)$$

$$N_{m,bot,Ed} = \frac{A_{w,bot}}{A_{0,bot}} \min \{ N_{m,bot}(i) ; N_{m,bot}(i+1) \} \quad (39b)$$

$A_{0,top}$ ,  $A_{0,bot}$

Section transversale de la membrure supérieure ou inférieure, respectivement, au droit de l'ouverture.

$A_{w,top}$ ,  $A_{w,bot}$

Section transversale de l'âme de la membrure supérieure ou inférieure, respectivement, au droit de l'ouverture :

$$A_{w,top} = A_{0,top} - b_{top} t_{f,top} \quad (40a)$$

$$A_{w,bot} = A_{0,bot} - b_{bot} t_{f,bot} \quad (40b)$$

- (12) Les efforts critiques  $V_{h,cr}$  et  $N_{m,cr}$  peuvent être calculés par les expressions suivantes :

$$V_{h,cr} = P_E (C_0 + C_1 t_w) \quad (41a)$$

$$N_{m,cr} = P_E (D_0 + D_1 t_w) \quad (41b)$$

où :

$$P_E = \frac{\pi^2 E}{a_o^2} w t_w^3 \quad (42)$$

Les coefficients  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $D_0$  et  $D_1$  sont calculés comme suit :

$$C_0 = -0,2502517 + 0,190103 \mu + 0,1314 \zeta \quad (43a)$$

$$C_1 = 0,0007611 - 0,0004279 \mu - 0,000019205 \zeta - 0,00024 \zeta \mu \quad (43b)$$

$$D_0 = 0,4760254 - 0,220803 \alpha - 0,161524 \zeta + 0,223909 \zeta \mu^2 \quad (43c)$$

$$D_1 = -0,00269273 + 0,0020576 \mu^2 + 0,00223834 \zeta - 0,00215748 \zeta \mu^2 \quad (43d)$$

Avec :

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\alpha - 1}}$$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\delta - 0,5}}$$

$$\alpha = \frac{p}{a_o}$$

$$\delta = \frac{h_w}{a_o}$$

- (13) Le facteur de réserve post-critique est donné par l'expression suivante :

$$\kappa = 1 + 0,625(\psi - 0,3) \quad (44)$$

où :

$\psi$  Rapport de moment :

$$\text{Membrane supérieure : } \psi = \frac{M_{pl,Rd,top}}{p V_{m,top}}$$

$$\text{Membrane inférieure : } \psi = \frac{M_{pl,Rd,bot}}{p V_{m,bot}}$$

$M_{pl,Rd,top}$ ,  $M_{pl,Rd,bot}$  Moment résistant plastique du té supérieur et inférieur, respectivement.

$V_{m,top}$ ,  $V_{m,bot}$  Effort de cisaillement dans le té supérieur et inférieur, respectivement.

Le rapport de moment  $\psi$  doit être calculé pour la section  $i$  et la section  $i+1$ , la valeur minimale étant retenue.