

Chapitre 2

Calcul des poutres métalliques ajourées selon l'annexe N de l'Eurocode3

2.1. Introduction :

L'Eurocode3 partie 1.1 contient un certain nombre d'annexes informatives qui ne sont pas impératives mais donnent des informations utiles, parmi ces annexes on trouve l'annexe N.

L'Annexe N de l'Eurocode3 [E2] & [E3] traite, par des méthodes simplifiées le calcul des poutres métalliques avec ouvertures d'âme et des poutrelles ajourées. Dans ce contexte, il nous a paru intéressant de traiter, par ces méthodes, le cas des poutres avec ouvertures sans renforcement. Le pourquoi de ce choix, peut-être justifié par le fait que dans les planchers courants en acier, les poutres sont dépourvues de raidisseurs et on essaye toujours de ne pas renforcer les ouvertures d'âme car le coût des renforcements est disproportionné par rapport au prix de la charpente.

Dans ce chapitre, on commence tout d'abord par une présentation succincte et générale de la méthode de calcul proposé par l'Annexe N de l'Eurocode3 et on donne un récapitulatif des expressions à appliquer pour la vérification de deux configurations d'ouvertures rectangulaires et circulaires. En outre, les limites et les recommandations d'application des différentes expressions de l'Annexe N sur le dimensionnement des poutres avec ouvertures feront l'objet du dernier paragraphe de notre chapitre.

Dans l'annexe, on illustre un exemple de calcul d'une solive alvéolaire tiré à partir d'un projet réel étudié et calculé selon l'annexe N par D.Bitars [B1].

2.2. Présentation de l'Annexe N de l'Eurocode3:

Le calcul classique des poutres métalliques avec ouverture d'âme est basé sur un modèle élastique faisant intervenir dans chaque Té (voir Fig.2.1), d'une part, l'effort tranchant et la flexion secondaire due à cet effort et d'autre part, l'effort normal résultant de la division du moment fléchissant global par un bras de levier défini comme la distance entre les axes neutres des Té. Une difficulté peut être rencontrée dans l'application de ce modèle c'est le calcul de l'effort tranchant dans chaque Té pour les ouvertures excentrées. On peut appliquer, dans ce dernier cas, la méthode de Knostman, Cooper et Snell [K1].

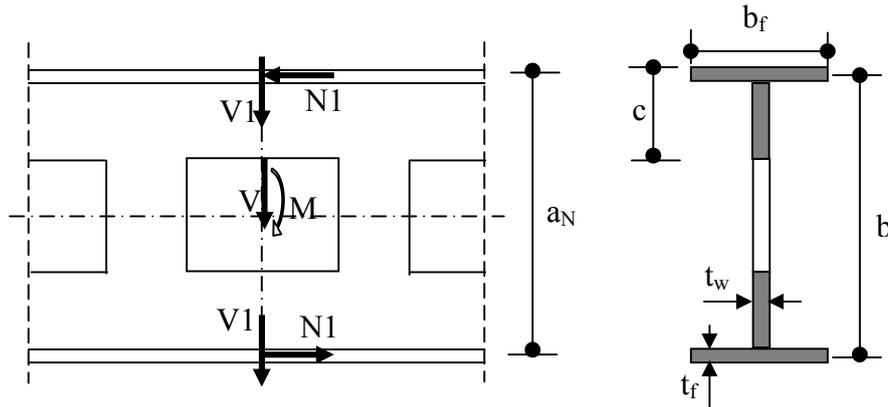


Fig. 2.1 : efforts intérieurs d'une poutre ajourée.

M : moment fléchissant global dû aux charges extérieures.

V : effort tranchant vertical.

$N1$: effort normal agissant dans les deux membrures ($N1=M/a_N$)

$V1$: effort tranchant dans chacune des membrures ($V1=V/2$)

$M1$: moment fléchissant local dû à l'effort $V1$.

a_N : bras de levier des forces $N1$ ($a_N=S/A1$).

S : moment statique de la poutre au droit des ajours: $S= b_f t_f b + t_w (c-t_f) (b-c)$.

$A1$: aire de la section d'une membrure: $A1= b_f t_f + t_w (c-t_f)$.

L'Annexe N adopte un modèle de calcul basé sur la formation de quatre rotules plastiques aux coins de l'ouverture. Le mécanisme de ruine se forme par la rotation des quatre rotules plastiques avec une augmentation de la flèche de la poutre sur la longueur de l'ouverture. L'analyse à l'état limite ultime est similaire à celle développée dans la référence (Redwood[R1]); la charge ultime ou en d'autres termes la résistance ultime, est calculée en considérant des distributions admissibles des contraintes normales et de cisaillement (le cisaillement est supposé uniforme sur l'âme du T) et par application du critère de Von Mises on obtient les expressions de la vérification des poutres ajourées données ci-après.

2.3. Vérification à l'Etat Limite Ultime selon l'Annexe N de l'Eurocode3:

On donne dans ce paragraphe un récapitulatif des expressions à appliquer pour la vérification des poutres avec ouvertures de formes rectangulaires et circulaires. Il ne faut pas perdre de vue que les poutres sont sans raidisseurs transversaux, sauf au droit des appuis si c'est nécessaire, et les trous sont sans renforcement.

Par ailleurs, des limites d'applicabilité sont à respecter pour la validité de ces expressions. Ces limites ainsi que d'autres recommandations sont données au paragraphe 2.4.

2.3.1. - Résistance au cisaillement au niveau de l'ouverture:

La résistance au cisaillement ($V_{o,Rd}$) d'âme évidée peut être déterminée par la réduction de la résistance plastique au cisaillement ($V_{pl,Rd}$) ou de la résistance au voilement par cisaillement ($V_{ba,Rd}$).

2.3.1.a. Ouvertures rectangulaires :

La résistance au cisaillement ($V_{o,Rd}$) est donnée par :

$$V_{o,Rd} = \min (V_{o,pl,Rd} , V_{o,ba,Rd})$$

$$V_{o,pl,Rd} = (V_{pl,Rd} - \frac{d_o \cdot t_w \cdot f_{yw}}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}}) \sqrt{\frac{\eta}{1+\eta}}$$

$$\eta = 0.75 \left[\frac{(d - d_o)^2 + 4 \cdot e_0^2}{a_0 \cdot (d - d_o)} \right]^2$$

$V_{pl,Rd}$: Résistance plastique au cisaillement.

γ_{M0} : Facteur partiel de sécurité (1,0 pour acier conforme).

f_{yw} : Limite d'élasticité de l'acier de l'âme.

$$V_{o,ba,Rd} = V_{ba,Rd} \left(1 - \frac{d_o + 0.3 a_0}{d}\right)$$

$V_{ba,Rd}$: Résistance au voilement par cisaillement calculée par la méthode post-critique simple selon l'EC3-1.1).

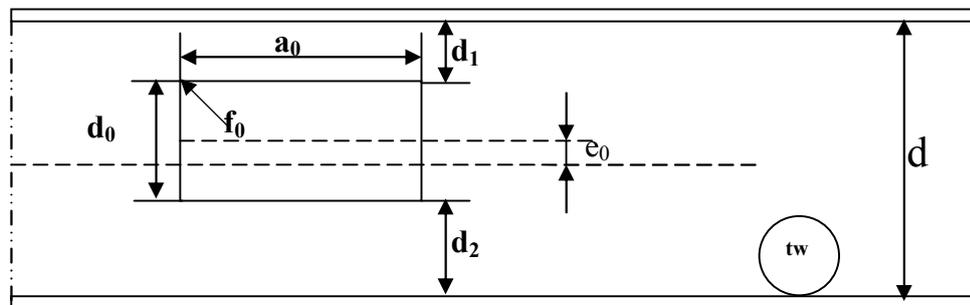


Fig. 2.2: ouverture rectangulaire.

2.3.1.b. Ouvertures circulaires :

La résistance au cisaillement ($V_{o,Rd}$) est donnée par :

$$V_{o,Rd} = \min (V_{o,pl,Rd} , V_{o,ba,Rd})$$

$$V_{o,pl,Rd} = (V_{pl,Rd} - \frac{0.9 d_o \cdot t_w \cdot f_{yw}}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}}) \sqrt{\frac{\eta}{1+\eta}}$$

$$\eta = 3.7 \left[\frac{(d - 0.9 d_o)^2 + 4 \cdot e_0^2}{d_o \cdot (d - 0.9 d_o)} \right]^2$$

Avec:

$$V_{o,ba,Rd} = V_{ba,Rd} \left(1 - \frac{d_o}{d}\right)$$

$V_{ba,Rd}$: Résistance au voilement par cisaillement (méthode post-critique simple selon l'EC3-1.1).

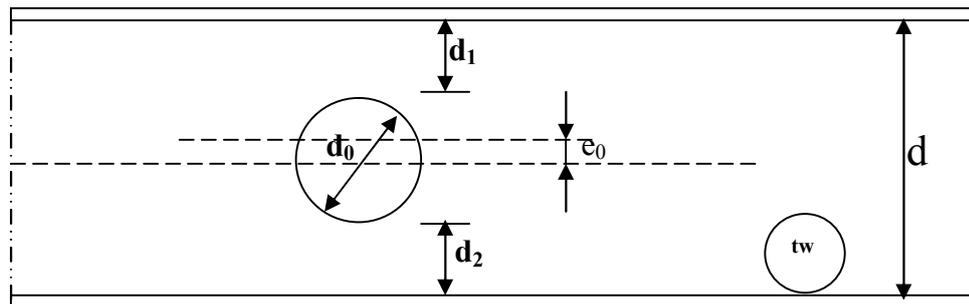


Fig. 2.3 : ouverture circulaire

2.3.2. Résistance à la flexion + cisaillement :

La résistance à la flexion ($M_{o,c,Rd}$) d'une poutre avec ouverture d'âme en présence du cisaillement est déterminée en réduisant le moment de résistance ($M_{c,Rd}$). Le terme «flexion + cisaillement» signifie que la vérification tient compte à la fois des effets suivants :

- la flexion globale de la poutre au droit de l'ouverture.
- la flexion secondaire (effet Vierendeel).
- l'interaction flexion et effort tranchant vertical.

2.3.2.a. Ouvertures rectangulaires :

La vérification des ouvertures, de type rectangulaire, dans les poutres métalliques se fait selon les classes de la section proposées par l'Eurocode3.

- **Section de la classe 1 ou 2 (avec ouverture) :**

$$M_{o,c,Rd} = M_{pl,Rd} \left(1 - \frac{0.25 \cdot t_w \cdot d_o (d_o + 4e_o)}{W_{pl,y}} - \chi_1 \cdot \frac{V_{o,sd}}{V_{o,Rd}} \right)$$

$M_{pl,Rd}$: Moment de résistance plastique de la section.

$W_{pl,y}$: Module de flexion plastique de la section.

$V_{o,sd}$: Effort tranchant au centre de l'ouverture.

$V_{o,Rd}$: Résistance à l'effort tranchant en présence de l'ouverture (paragraphe 3-3.1.a).

$$\chi_1 = \frac{0.25 \cdot t_w \cdot d^2 \left[1 + 3 \left(0.7 - \frac{d_o}{d} \right) \cdot \frac{a_o}{d} \right]}{W_{pl,y}}$$

- **Section de Classe 3 (avec ouverture) :**

$$M_{o,c,Rd} = M_{el,Rd} \left(1 - \frac{t_w \cdot (d_o + 2e_o)^3}{12 I_y} - \chi_1 \cdot \frac{V_{o,sd}}{V_{o,Rd}} \right) \cdot \chi_2$$

$$\chi_2 = 1.0 \quad \text{si} \quad a_o \leq 4.2 \cdot t_w \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}}$$

$$\chi_2 = 1.126 - 0.03 \cdot \frac{a_o}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}} \quad \text{si} \quad a_o > 4.2 \cdot t_w \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}}$$

$M_{el,Rd}$: Moment de résistance élastique de la section.

I_y : Moment d'inertie de la section sans ouverture.

2.3.2.b. Ouvertures circulaires :

La vérification des ouvertures, de type circulaire, dans les poutres métalliques se fait selon les classes de la section proposées par l'Eurocode3.

- **Section de la classe 1 ou 2 (avec ouverture) :**

$$M_{o,c,Rd} = M_{pl,Rd} \left(1 - \frac{0.225 \cdot t_w \cdot d_o (0.9 d_o + 4 e_o)}{W_{pl,y}} - \chi_1 \cdot \frac{V_{o,sd}}{V_{o,Rd}} \right) \leq M_{pl,Rd} \left(1 - \frac{0.25 \cdot t_w \cdot d_o (d_o + 4 e_o)}{W_{pl,y}} \right)$$

$$\chi_1 = \frac{0.25 \cdot t_w \cdot d^2 \left[1 + 1.35 \left(0.7 - 0.9 \frac{d_o}{d} \right) \cdot \frac{d_o}{d} \right]}{W_{pl,y}}$$

- **Section de Classe 3 (avec ouverture):**

$$M_{o,c,Rd} = M_{el,Rd} \left(1 - \frac{t_w \cdot (0.9 d_o + 2 e_o)^3}{12 I_y} - \chi_1 \cdot \frac{V_{o,sd}}{V_{o,Rd}} \right) \cdot \chi_2 \leq M_{el,Rd} \left(1 - \frac{t_w \cdot (d_o + 2 e_o)^3}{12 I_y} \right)$$

$$\chi_2 = 1.0 \quad \text{si} \quad d_o \leq 4.2 t_w \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}}$$

$$\chi_2 = 1.126 - 0.03 \frac{d_o}{t_w} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}} \quad \text{si} \quad d_o > 4.2 t_w \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}}$$

2.4. Limitations et recommandations :

Des limitations et des recommandations d'application des différentes expressions sont décrites ci-dessous, afin d'examiner les conditions de dimensionnement de poutres avec des ouvertures d'âme.

2.4.1. Classe des sections transversales:

En général, dans le cas des sections avec ouvertures, il suffit que les Té soient de classe 3. Il y a des situations où le moment plastique du Té doit être développé; c'est le cas lorsque $V_{o,sd} = 0$ (ouverture au milieu de la poutre sous charge uniforme). Dans ce dernier

cas, nous recommandons que la section du Té soit de Classe 1 ou 2.

Pour la classification de l'âme du Té, on peut considérer l'effet favorable de l'âme adjacente et on obtient ainsi.

- **Âme du Té de Classe 2.**

$$\text{Si } l_o \leq 32 \cdot \varepsilon \cdot t_w \quad \text{ou} \quad \text{si } d_1 \text{ et } d_2 \leq \frac{10 \cdot \varepsilon \cdot t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{32 \cdot \varepsilon \cdot t_w}{l_o}\right)^2}}$$

- **Âme du Té de Classe 3.**

$$\text{Si } l_o \leq 36 \cdot \varepsilon \cdot t_w \quad \text{ou} \quad \text{si } d_1 \text{ et } d_2 \leq \frac{14 \cdot \varepsilon \cdot t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{36 \cdot \varepsilon \cdot t_w}{l_o}\right)^2}}$$

$l_o = a_o$ pour les ouvertures rectangulaires.

$l_o = 0.7d_o$ pour les ouvertures circulaires.

Dans le cas des sections sans ouvertures, les sections transversales doivent être de Classe 1, 2 ou 3 selon l'EC3-1.1.

2.4.2. Caractéristiques géométriques :

Les expressions de calcul sont valables pour les ouvertures respectant les limites suivantes (voir Fig. 2.2 et Fig. 2.3):

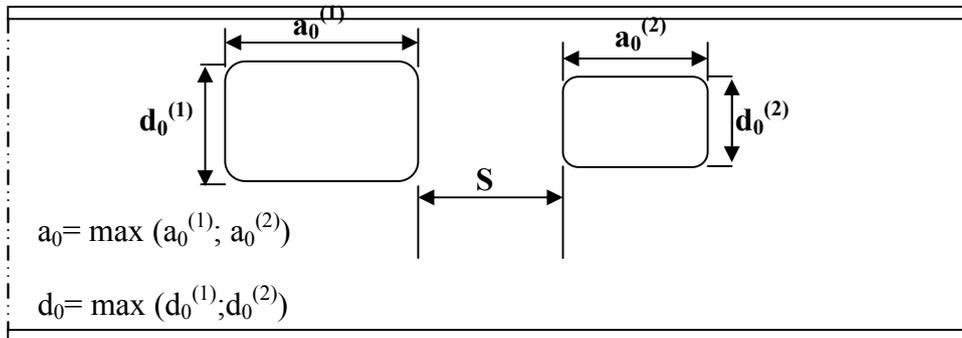
$$\frac{d_o}{d} \leq 0.75; \quad d_1 \geq 0.1 \cdot d \quad \text{et} \quad \frac{a_o}{d_o} \leq 3.0$$

$$r_o \geq 2t_w \quad \text{et} \quad r_o \geq 15\text{mm}$$

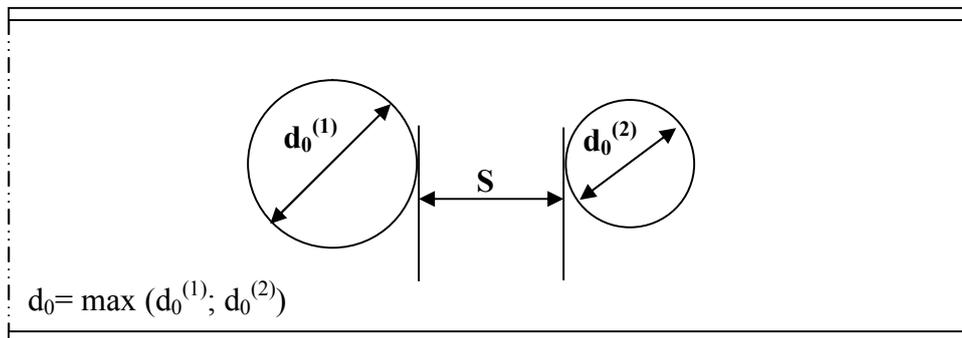
$$e_o \leq 0.125 \cdot d \quad (\text{Lorsque } e_o \text{ se situe dans la partie comprimée}).$$

2.4.3. Interaction entre les ouvertures :

L'interaction entre les ouvertures peut être négligée lorsque la distance nette entre les ouvertures est supérieure à d_0 pour les ouvertures rectangulaires et à $1,5 d_0$ pour les ouvertures circulaires (voir Fig.2.4).



$$S \geq d_0 \text{ et } S \geq a_0 \cdot \frac{V_{sd}}{V_{Rd} - V_{sd}}$$



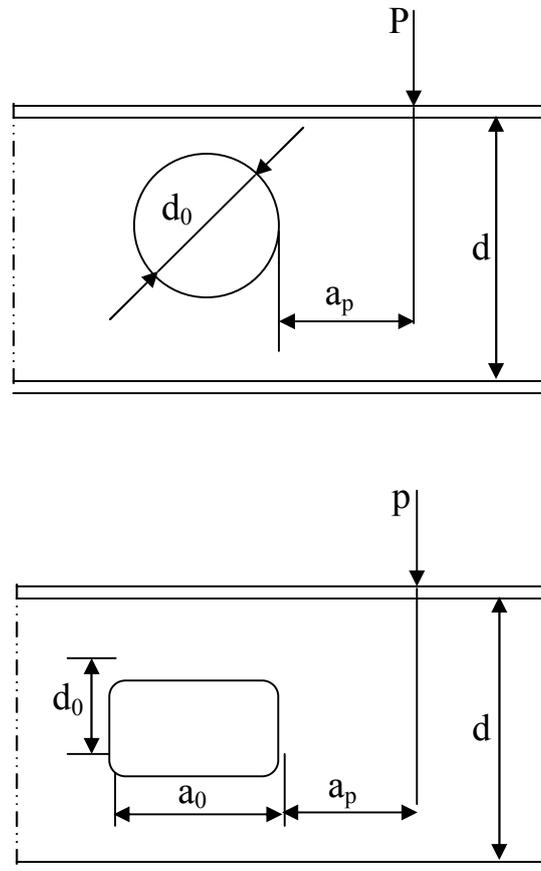
$$S \geq 1.5d_0 \text{ et } S \geq a_0 \cdot \frac{V_{sd}}{V_{Rd} - V_{sd}}$$

Fig. 2.4 : interactions entre les ouvertures.

2.4.4. Effet de l'ouverture sur la résistance de l'âme au droit d'une charge concentrée :

L'effet de l'ouverture sur la résistance de l'âme au droit d'une charge concentrée peut être négligé si la distance a_p entre la charge et l'extrémité de l'ouverture est supérieure aux valeurs indiquées à la figure 2.5.

Cette distance peut être réduite à zéro lorsqu'il y a des raidisseurs verticaux bordant l'ouverture.



$$a_p \geq d_0 \quad \text{si } \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}} \leq 3$$

$$a_p \geq \min \left(d; \frac{d_0}{3} \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}} \right) \quad \text{si } \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}} > 3$$

Fig. 2.5 : interaction charge concentrée - ouverture.

2.4.5. Effet de l'ouverture sur la résistance de l'âme au droit d'une réaction d'appui:

L'effet de l'ouverture sur la résistance de l'âme au droit d'une réaction d'appui peut être négligé si la distance a_r (Fig.2.6) est supérieure à $0.5d$.

Un calcul complémentaire est à effectuer ici, il s'agit de vérifier le cisaillement sur le plan horizontal de section ($a_r t_w$).

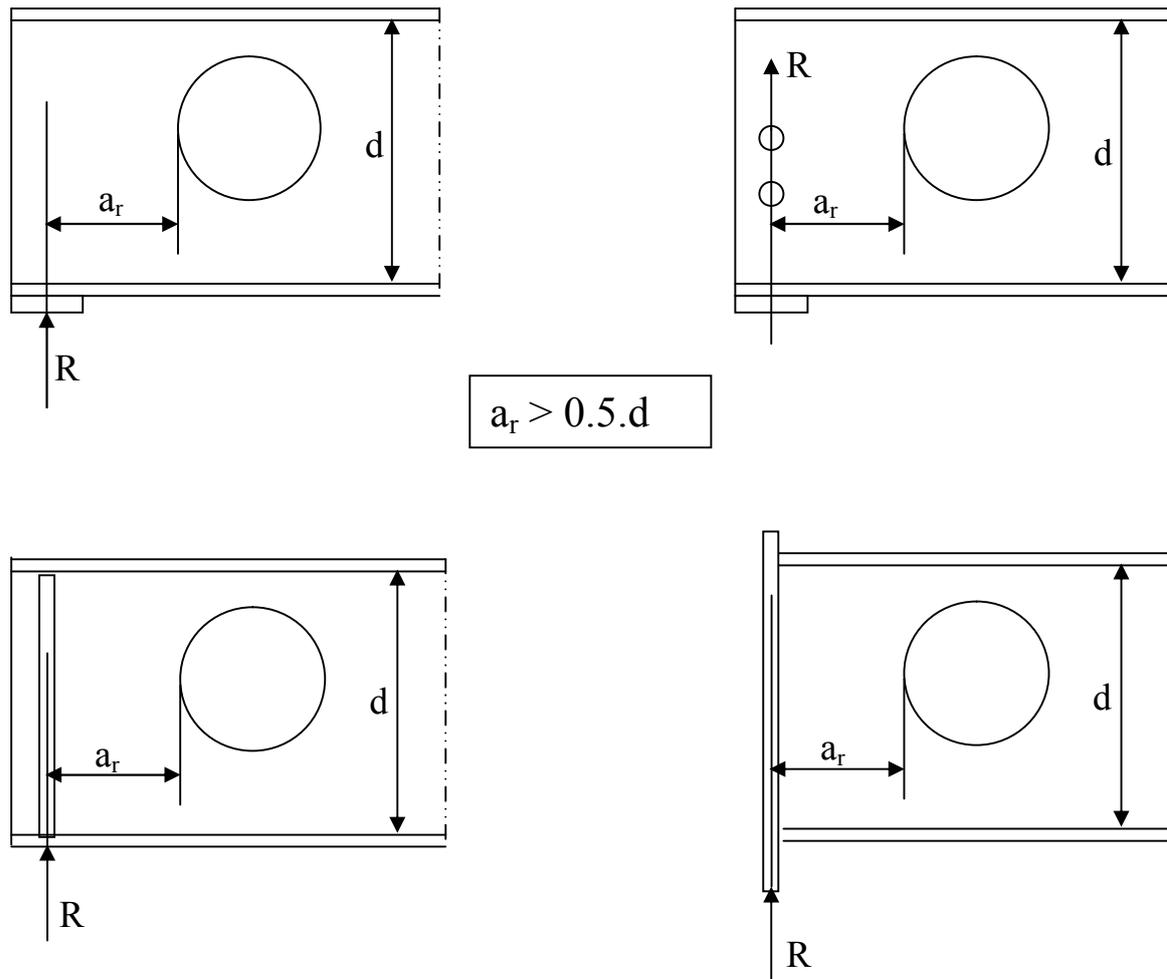


Fig. 2.6 : interaction réaction - ouverture.

2.4.6. Flambement de la semelle comprimée dans le plan de l'âme au droit de l'ouverture:

Pour empêcher la possibilité de flambement de la semelle comprimée dans le plan de l'âme en présence de l'ouverture, le rapport $\frac{d}{t_w}$ de l'âme doit satisfaire aux critères suivants : A_{fc}

$$\text{Ouverture rectangulaire : } \frac{d}{t_w} \leq K \cdot \left(\frac{E}{f_{yw}} \right) \left[1 - 0.5 \frac{a_o}{d} \right] \left[\frac{A_w}{A_{fc}} \right]^{0.5}$$

$$\text{Ouverture circulaire : } \frac{d}{t_w} \leq K \cdot \left(\frac{E}{f_{yw}} \right) \left[1 - 0.45 \frac{d_o}{d} \right] \left[\frac{A_w}{A_{fc}} \right]^{0.5}$$

K : 0.4 pour une semelle comprimée de classe 1 ou 2.

K : 0.55 pour une semelle comprimée de classe 3.

A_w : Aire de la section de l'âme.

A_{fc} : Aire de la section de la semelle comprimée.

f_{yf} : Limite d'élasticité de l'acier de la semelle comprimée.

Ces critères ne sont pas à considérer lorsqu'il y a des raidisseurs verticaux bordant l'ouverture.

2.4.7. Flambement du Té comprimé :

Le flambement du Té comprimé, dans le plan de l'âme et même hors plan, peut être négligé si les conditions suivantes sont respectées.

$$a_0 < 4.6 d_1 \text{ ou } 4.6 d_2 \quad \text{pour une ouverture rectangulaire.}$$

$$d_0 < 6 d_1 \text{ ou } 6 d_2 \quad \text{pour une ouverture circulaire.}$$

Dans le cas contraire, il faut effectuer la vérification du Té comprimé en considérant une longueur de flambement égale à $0,65a_0$ pour une ouverture rectangulaire et à $0,5d_0$ pour une ouverture circulaire.

2.5. Conclusion :

Nous avons présenté au cours de ce chapitre une méthode succincte et générale de calcul des poutres métalliques comportant des ouvertures d'âmes selon l'annexe N de l'Eurocode3, cependant, et compte tenu de ce contexte, il nous a paru utile de comparer les résultats obtenus par la méthode de l'annexe N de l'Eurocode3 sur le calcul de la résistance d'une solive alvéolaire (voir exemple dans l'annexe) tiré à partir d'un projet réel étudié et calculé par D.Bitars [B1] avec la méthode courante de Wang et al [W3](chapitre 4).