



—

Optimisation des poutres reconstituées par soudage

—

Technique et applications

par Alain Bureau, chef du service recherche construction métallique, CTICM

1 | OBJET DE L'ARTICLE

En France, la fabrication de profils reconstitués par soudage (PRS) est une pratique courante dans les entreprises de charpente métallique. Ce mode de conception permet d'optimiser le poids de l'ossature. L'objet de cet article est de présenter des possibilités d'optimisation de poutres à section transversale en I simplement fléchies, en faisant le choix d'une section mono-symétrique, c'est-à-dire symétrique par rapport au plan moyen de l'âme (Figure 1).

Dans cet article, nous montrons qu'en concevant une section dont l'aire de la semelle comprimée est supérieure à l'aire de la semelle tendue, il est possible d'atteindre une capacité de résistance en flexion supérieure à celle obtenue pour une section à semelles égales. Nous supposons ici que la semelle supérieure est comprimée.

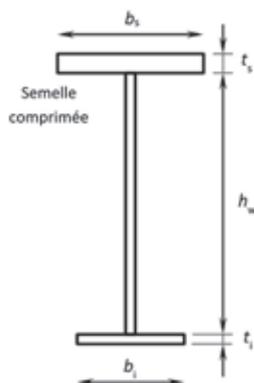


Figure 1 : Section transversale d'un PRS mono-symétrique

À partir d'une étude comparative simple, l'article présente des tendances en termes de résistance de section, de résistance au déversement d'une poutre et de flèche (ELS), en appliquant les règles de la norme NF EN 1993-1-1 [1] et de son Annexe Nationale [2].

2 | DOMAINE DE L'ÉTUDE COMPARATIVE

La comparaison porte sur un ensemble de 8 sections en I de même hauteur et de même masse linéique. Les dimensions de l'âme sont fixées à 800 x 6 mm.

Nous faisons le choix de partir d'une section à semelles égales (S0) qui sert de référence, et nous faisons varier dans un premier temps, l'épaisseur des semelles en conservant une largeur de 200 mm (sections S1, S2, S3). Ensuite, nous faisons varier la largeur des semelles en conservant l'épaisseur de 14 mm de la section S0 (sections S4, S5, S6). Enfin, pour la section S7, les dimensions des semelles sont choisies de façon presque optimale. Toutes les dimensions sont données dans le Tableau 1.

De manière générale, l'utilisation de profils reconstitués par soudage permet d'obtenir des sections transversales plus élancées que celles des profilés laminés à chaud, afin de procurer à la poutre une meilleure inertie et, par conséquent, une meilleure résistance en flexion et une meilleure rigidité.

Il en résulte que l'âme est souvent de classe 4, mais il est de bonne pratique de choisir les dimensions de la semelle comprimée de façon à ce qu'elle soit de classe 3 au maximum. Il n'y a pas d'intérêt à concevoir une section avec une semelle comprimée de classe 4 pour laquelle il y aurait lieu de calculer une largeur efficace (réduite) pour les vérifications de résistance aux états limites ultimes.

De plus, il convient de limiter le rapport entre l'épaisseur t_f de la semelle et l'épaisseur t_w de l'âme pour des raisons de réalisation des cordons de soudure. La pratique généralement admise est de respecter : $t_f/t_w \leq 4$. Dans tous les cas, on se reportera à la norme NF EN 1993-1-8 [4] et à son Annexe Nationale [5], ainsi qu'aux recommandations de la commission de normalisation CNC2M [6].

Cette étude ne porte que sur la nuance S355, nuance couramment utilisée en France pour les PRS, mais les tendances dégagées de cette étude sont les mêmes pour d'autres nuances d'acier. Il convient de noter qu'on se place dans le contexte d'une ossature de bâtiment et la limite d'élasticité peut être prise égale à 355 MPa pour une épaisseur inférieure ou égale à 40 mm, conformément à l'Annexe Nationale [2].

Section	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7*
b_s	200	200	200	200	220	240	260	260
t_s	14	16	18	20	14	14	14	16
h_w	800	800	800	800	800	800	800	800
t_w	6	6	6	6	6	6	6	6
b_i	200	200	200	200	180	160	140	140
t_i	14	12	10	8	14	14	14	12
H	828	828	828	828	828	828	828	828
masse	81,6	81,6	81,6	81,6	81,6	81,6	81,6	83,5

* La section S7 a une masse légèrement supérieure à celle des autres sections.

Tableau 1 : Dimensions en mm des sections et masse linéique en kg/m

Ici, les cordons de soudure âme-semelle ne sont pas pris en compte dans les calculs. Ils ne sont jamais pris en compte dans le calcul des caractéristiques de la section transversale mais il est possible de les prendre en compte dans le calcul des élargissements de la semelle et de l'âme, en vue de déterminer la classe de la section.

3 | RÉSISTANCE DE LA SECTION

3.1 | RÉSISTANCE EN FLEXION SIMPLE

Le fait de concevoir une section avec une semelle comprimée plus forte que la semelle tendue a pour conséquences :

- de déplacer le centre de gravité de la section, donc l'axe neutre élastique en flexion simple, vers la semelle comprimée et de réduire ainsi la hauteur de la partie comprimée de l'âme dans le diagramme de distribution élastique des contraintes normales ;
- de déplacer l'axe neutre plastique vers la semelle comprimée et de réduire ainsi la hauteur de la partie comprimée de l'âme dans le diagramme de distribution plastique des contraintes normales.



il est intéressant de noter que, pour une section mono-symétrique, l'axe neutre plastique en flexion simple ne passe pas par le centre de gravité. Par rapport à celui-ci, il est situé plus près de la semelle ayant la plus grande section.

Par conséquent, l'âme étant comprimée sur une hauteur plus faible, elle est moins sensible au voilement local et la classification des parois selon la NF EN 1993-1-1 (Tableau 5.2 feuille 1/3) prend en compte cela par le biais du rapport ψ des contraintes normales pour une distribution élastique des contraintes, ou par le biais du paramètre α pour une distribution plastique. Pour un élargissement d'âme donné, l'âme peut passer de la classe 4 à la classe 3 (résistance élastique) ou à la classe 2 (résistance plastique), voire à la classe 1, en augmentant les dimensions de la semelle comprimée et en réduisant celles de la semelle tendue (si l'on souhaite conserver la même aire de section, et donc le même poids d'acier).

Le Tableau 2 donne la classe de la semelle comprimée, la classe de l'âme et celle de la section transversale, ainsi que le moment résistant $M_{c,Rd}$ calculé selon le paragraphe 6.2.5 de la norme NF EN 1993-1-1 [1]. Pour les sections de classe 4, le module élastique efficace de la section est calculé conformément à la norme NF EN 1993-1-5 [3].

Nous pouvons constater qu'en augmentant les dimensions de la semelle comprimée et en diminuant celles de la semelle tendue (épaisseur ou largeur), la résistance élastique diminue. En effet, le moment d'inertie de flexion diminue (voir Tableau 4) alors que la distance du centre de gravité aux fibres les plus éloignées augmente.

En revanche, on passe d'une âme de classe 4 pour les sections S0 et S1 à une âme de classe 3 pour la section S2, puis à une âme de classe 2 pour la section S3. Pour cette section, il est alors possible de se référer à la résistance plastique et sa résistance en flexion est alors supérieure d'environ 11% à la celle de la section S0. Rappelons qu'il s'agit de la même hauteur (828 mm) et de la même masse linéique (Tableau 1).

Les sections S4 à S6 sont de classe 4 ou 3 et ne permettent pas de bénéficier de la résistance plastique.

Enfin, la section S7 peut être considérée comme ayant des dimensions optimales en comparaison des autres sections. En étant de classe 2, le moment de résistance plastique atteint 1094 kN.m, soit plus de 14% supérieur au moment résistant de la section S0.

Section	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Classe semelle	1	1	1	1	2	3	3	2
Classe âme	4	4	3	2	4	4	3	2
Classe Section	4	4	3	2	4	4	3	2
$M_{c,Rd}$ [kN.m]	958	941	857	1067	963	904	843	1094
Var. / S0	0	-1,7%	-10,5%	11,5%	0,6%	-5,6%	-12,0%	14,3%

Tableau 2 : Résistance en flexion simple des sections

Il convient de noter que, conformément à la clause 5.5.2(11) de l'EN 1993-1-1 [1], une section possédant une âme de Classe 3 et une semelle comprimée de classe 1 ou 2 peut être considérée comme une section de Classe 2 (résistance plastique) moyennant l'adoption de largeurs efficaces pour la partie comprimée de l'âme. Cette possibilité n'est pas exploitée ici.

3.2 | MÉTHODE PRATIQUE POUR OPTIMISER UNE SECTION PRS MONO-SYMMÉTRIQUE

À partir d'une section doublement symétrique, nous proposons de rechercher les dimensions de la semelle comprimée d'une section mono-symétrique ayant approximativement la même hauteur, la même aire de section transversale en conservant les dimensions de l'âme. Pour cela, il faut partir des conditions d'élançement données pour la classe 2 selon le Tableau 5.2 de la norme NF EN 1993-1-1, à savoir :

- pour la semelle comprimée, $\frac{b_s}{2t_s} \leq 10\varepsilon$
- pour l'âme, $\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{41,5 \varepsilon}{\alpha}$

En se plaçant à la limite de ces deux conditions, les dimensions de la semelle comprimée peuvent être estimées à l'aide des expressions suivantes :

- largeur de la semelle comprimée : $b_s = \sqrt{(10A - 830 \varepsilon t_w^2)} \varepsilon$
- épaisseur de la semelle comprimée : $t_s = \frac{b_s}{20\varepsilon}$

Bien sûr, une condition nécessaire est que, dans l'expression de b_s , le radicande soit positif. De plus, les dimensions finales de la semelle supérieure doivent être choisies de façon à se conformer à la bonne pratique, en tenant compte de toute autre exigence (projet, fabrication, disponibilité des tôles, etc.). Il en est de même du choix des dimensions de la semelle inférieure qui pourront être déterminées à partir de l'aire de la section.

Il est important de noter que la semelle inférieure constitue un appui vis-à-vis du voilement de l'âme. Elle doit donc présenter une certaine rigidité en flexion dans son plan. Sur ce point, il n'existe pas de règle précise dans l'Eurocode 3 mais nous proposons de respecter les conditions minimales suivantes :

- $t_i \geq 1,2 t_w$
- $b_i \geq 12 t_i$
- $b_i \geq b_s/2$

Application des formules au cas de la section symétrique S0 :

L'aire de la section S0 est : $A = 10400 \text{ mm}^2$

Pour l'acier S355, nous avons : $\varepsilon = 0,814$

Nous pouvons estimer les dimensions de la semelle supérieure :

$$b_s = \sqrt{(10 \times 10400 - 830 \times 0,814 \times 6^2)} \times 0,814 = 255 \text{ mm}$$

$$t_s = \frac{255}{20 \times 0,814} = 15,7 \text{ mm}$$



Nous adoptons une largeur de 260 mm et une épaisseur de 16 mm pour la semelle supérieure. En conservant l'aire de la section, nous pouvons calculer l'aire de la semelle inférieure :

$$A_i = 10400 - 800 \times 6 - 260 \times 16 = 1440 \text{ mm}^2$$

Il est recommandé que la largeur de la semelle inférieure soit égale à au moins la moitié de la semelle supérieure, soit : $b_i \geq 130 \text{ mm}$. Retenons alors une largeur de 140 mm.

L'épaisseur de la semelle inférieure sera au minimum de $1,2 \times 6 = 7,2 \text{ mm}$. Ici, nous faisons le choix de conserver la hauteur totale de la section (828 mm), ce qui nous conduit à une épaisseur de 12 mm. Nous retenons donc la solution suivante :

- $b_i = 140 \text{ mm}$ et $t_i = 12 \text{ mm}$, ce qui donne une aire de 1680 mm^2 pour la semelle inférieure. Ici, l'aire de la section est donc supérieure à celle de la section S0.

Ces dimensions sont celles de la section S7.

3.3 | RÉSISTANCE À L'EFFORT TRANCHANT

Il convient de noter que la résistance à l'effort tranchant dépend essentiellement des dimensions de l'âme. Ici, nous avons choisi de ne pas faire varier ses dimensions.

Avec un élancement $h_w/t_w = 133 > 72 \varepsilon/\eta$ (en prenant $\varepsilon = 0,81$ pour l'acier S355, et $\eta = 1,0$) selon le paragraphe 6.2.6(6) de la NF EN 1993-1-1 [1], l'âme doit être vérifiée vis-à-vis du voilement par cisaillement selon la norme NF EN 1993-1-5 [3].

4 | RÉSISTANCE AU DÉVERSEMENT DE LA POUTRE

Lorsqu'une poutre est soumise au risque de déversement, le fait de concevoir sa section avec une semelle comprimée plus forte que la semelle tendue a pour principales conséquences :

- d'augmenter le moment d'inertie de la semelle comprimée dans son plan, surtout en augmentant la largeur de la semelle ;
- de rapprocher le centre de torsion de la semelle comprimée. En particulier, lorsque la poutre est soumise à des charges transversales appliquées au-dessus de la semelle et dirigées vers de la centre de torsion, la distance entre le point d'application des charges et ce dernier est alors réduite, ce qui peut permettre d'augmenter significativement le moment critique de déversement.

Nous reprenons les sections S0 à S7 définies précédemment et nous calculons le moment de résistance au déversement d'une poutre sur appuis simples de longueur $L = 6 \text{ m}$, soumise à un moment constant sur sa longueur, puis à une charge uniformément répartie appliquée au-dessus de la semelle supérieure. La poutre n'est maintenue vis-à-vis du déversement qu'à ses extrémités (conditions d'appui "à fourche") :

- blocage en déplacement latéral ;
- blocage en rotation autour de l'axe longitudinal de la poutre ;
- rotation libre autour de l'axe vertical ;
- gauchissement libre.

La résistance au déversement $M_{b,Rd}$ est calculée selon le paragraphe 6.3.2 de la norme NF EN 1993-1-1 avec le coefficient de réduction défini en 6.3.2.2, en utilisant la courbe d conformément au Tableau 6.4, pour $h/b > 2$. Le moment critique de déversement élastique est calculé à l'aide du logiciel *LTBeam* [7].

Nous pouvons alors remarquer que l'augmentation du moment de résistance au déversement varie d'environ 7% à 28% en augmentant l'épaisseur de la semelle comprimée pour les sections S1 à S3. L'évolution est nettement plus marquée pour les sections S4 à S6, en augmentant la largeur de la semelle comprimée puisque l'augmentation varie d'environ 19% à 46%.

À nouveau, la section S7 présente un optimum par rapport aux autres sections puisque l'augmentation du moment de résistance au déversement est supérieure à 70%, par rapport à la résistance au déversement de la poutre avec la section S0.

Section	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Poutre soumise à un moment constant								
$M_{b,Rd}$ [kN.m]	287	309	320	367	342	387	422	507
Var. / S0	0	7,5%	11,4%	27,6%	19,1%	34,6%	46,7%	76,5%
Poutre soumise à une charge uniformément répartie								
$M_{b,Rd}$ [kN.m]	232	250	262	297	275	311	339	399
Var. / S0	0	7,9%	13,0%	28,3%	18,8%	34,1%	46,3%	72,2%

Tableau 3 : Résistance au déversement des poutres

5 | ÉTATS LIMITES DE SERVICE

Pour une poutre, il est essentiel d'évaluer l'impact de la mono-symétrie de la section sur le moment d'inertie de flexion par rapport à l'axe fort (noté I_y) car il intervient directement sur la flèche. Son influence sur la fréquence propre est moindre puisqu'elle est inversement proportionnelle à la racine carrée de l'inertie.

Le Tableau 4 présente les valeurs du moment d'inertie de flexion I_y pour les sections S0 à S7. Lorsqu'on fait varier l'épaisseur des semelles, le moment d'inertie diminue d'environ 0,8% à 7,5% (sections S1 à S3) alors que la variation de largeur a moins d'incidence puisque le moment d'inertie diminue de 0,4% à 3,8%. Le moment d'inertie de la section S7 est inférieur de 4,7% à celui de la section S0.

Finalement, l'influence de la mono-symétrie de la section reste modérée, inférieure à 5% pour les sections étudiées.

Section	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
I_y	118373	117384	114419	109476	117873	116375	113877	112866
Var. / S0	0,00%	-0,8%	-3,3%	-7,5%	-0,4%	-1,7%	-3,8%	-4,7%

Tableau 4 : Moment d'inertie de flexion I_y en cm^4

6 | CONCLUSION

La comparaison présentée dans cet article confirme l'intérêt de concevoir des poutres PRS avec des semelles de dimensions différentes, en ayant une âme relativement élancée.

Si la semelle comprimée a une section plus importante que la semelle tendue, il est possible de tirer bénéfice des points suivants :

- la partie comprimée de l'âme est réduite par rapport à une section symétrique et l'âme peut être de classe 1 ou 2. La section pourra être vérifiée par rapport à la résistance plastique en flexion ;
- l'inertie de la semelle comprimée dans son plan est plus importante que pour une section symétrique, ce qui a pour effet d'améliorer la résistance au déversement;
- le centre de cisaillement est plus proche de la semelle comprimée, ce qui peut aussi avoir pour effet d'améliorer la résistance au déversement lorsque la position des charges transversales a un effet déstabilisant.

Il est essentiel de noter qu'il peut être intéressant de concevoir une section mono-symétrique si la poutre est sollicitée en flexion sans changement de signe tant sur la longueur de poutre, que du fait de différents cas de chargement qui peuvent être appliqués. En cas d'inversion du sens du moment fléchissant, cet intérêt peut subsister seulement si l'un des sens de flexion prédomine de manière significative.

Cette comparaison n'a pas l'ambition d'être exhaustive. Les sections transversales ne peuvent être optimisées qu'en tenant compte des conditions particulières du projet. La solution PRS est souvent adoptée lorsqu'il est possible de mettre en œuvre une hauteur de poutre assez importante. Dans les autres cas, la poutrelle laminée offre souvent un bon compromis économique.

7 | RÉFÉRENCES

- [1] NF EN 1993-1-1 – Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. AFNOR. Octobre 2005.
- [2] NF EN 1993-1-1/NA – Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Annexe nationale à la NF EN 1993-1-1 – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. AFNOR. Août 2013.
- [3] NF EN 1993-1-5 – Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-5 : Plaques planes. AFNOR. Mars 2007.
- [4] NF EN 1993-1-8 – Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-8 : Calcul des assemblages. AFNOR. Décembre 2005.
- [5] NF EN 1993-1-8/NA – Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Annexe nationale à la NF EN 1993-1-8 – Partie 1-8 : Calcul des assemblages. AFNOR. Juillet 2007.
- [6] Recommandations pour le dimensionnement des assemblages selon la NF EN 1993-1-8. BNCM-CNC2M. Mars 2015.
- [7] Logiciel *LTBeam*, disponible en téléchargement sur le site du CTICM : www.cticm.com