

RÉSISTANCE À LA FATIGUE DES POUTRES HYBRIDES

Daniel BITAR

Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM)

L'utilisation des poutres hybrides reconstituées à partir de plats dont la limite d'élasticité de l'acier de l'âme est inférieure à celle des semelles peut donner lieu à une économie appréciable dans les projets de construction de ponts métalliques et mixtes.

Cet article présente une recherche à la fois expérimentale et théorique pour étudier l'effet de la plastification à la jonction âme semelle sur le comportement à la fatigue des poutres métalliques hybrides. Neuf essais à la fatigue sur des poutres de 2 à 5 mètres de portées sont réalisés afin d'évaluer la résistance de principaux détails dans les ponts métalliques de petites et moyennes portées.

Une étude numérique est réalisée pour simuler la propagation des fissures afin de pouvoir étendre le modèle à d'autres détails.

Enfin, des recommandations sont données pour la vérification et le calcul des poutres hybrides à l'état limite ultime, à l'état limite de service et à la fatigue. La partie expérimentale de cette recherche est menée au Service Recherche du CTICM avec la contribution de MM. Y. GALEA et M. LUKIC.

1. INTRODUCTION

La résistance à la flexion des poutres métalliques en I est principalement assurée par les semelles. La contribution de l'âme à cette résistance est de l'ordre de 6 à 10%. L'utilisation des sections hybrides avec des semelles en acier de haute limite d'élasticité (S460 ou S690) et des âmes en acier de limite d'élasticité courante (S355 par exemple) peut donner lieu à une économie appréciable en comparaison avec des solutions classiques de poutres homogènes.

Afin de garder un degré de sécurité acceptable, il est important de quantifier et de prendre en compte l'effet de la plastification à la jonction âme-semelle (Figure 1) sur la résistance pour les différentes phases de construction et d'exploitation de l'ouvrage.

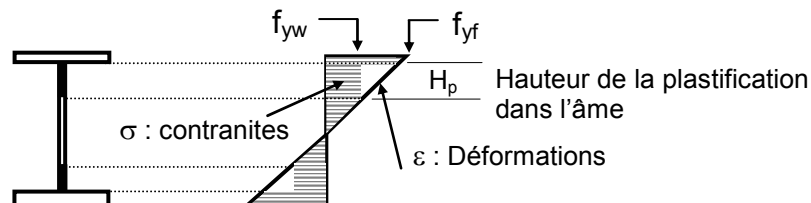


Figure 1 - Plastification à la jonction âme-semelle

Un aspect important dans l'utilisation de ces poutres hybrides concerne la résistance à la fatigue compte tenu de la présence de cette plastification à la jonction âme-semelle dans les conditions normales d'exploitation.

L'étendue de ce domaine nous conduit à limiter notre analyse dans un premier temps à celle des détails souvent rencontrés dans les ponts métalliques et mixtes de petites et moyennes portées (Figure 2) : l'attache du raidisseur transversal en simple plat sur la semelle, le cisaillement de cordon longitudinale en

présence ou non d'un défaut toléré de fabrication. Enfin la valeur admissible de l'étendue maximale de contraintes pour l'application des règles de fatigue.

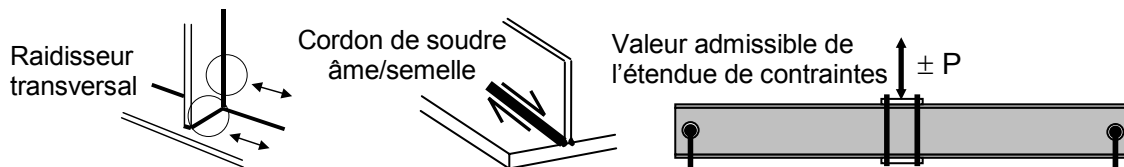


Figure 2 - Détails courants dans les ponts de petites et moyennes portées

Le comportement des sections hybrides dans les poutres métalliques et mixtes est étudié dans les années 60 par plusieurs par [Frost, Carskadan, Schilling, Toprac, Natarajan, Fielding 1964 to 1971].

L'utilisation de cette combinaison d'acier en Europe n'a pas eu de succès pour plusieurs raisons : La réglementation ne couvre pas les aciers de haute limite d'élasticité dans les ponts ($f_y > 355 \text{ N/mm}^2$) et la fabrication des aciers de limite d'élasticité supérieur à 355 ne permettait pas d'offrir ces aciers à des prix rendant compétitive leur utilisation.

Les recherches menées dans les années 80 – 90 [Garrigues 1992], [Johansson 1995], [SISC 1994] ont contribué considérablement à l'adoption de ces aciers de haute limite d'élasticité dans les Eurocodes et des indications sont données pour l'utilisation des sections hybrides.

Pour valider ces indications une recherche européenne est menée sur les poutres hybrides dans le cadre du projet "Composite Bridge Design for Small and Medium Spans". On présente ci-après un résumé des travaux entrepris au CTICM. La totalité des résultats sont donnée dans le rapport Final [European commission 2003].

2. ESSAIS À LA FATIGUE DES POUTRES HYBRIDES

2.1. Attache transversale d'un raidisseur en simple plat

Description des essais

Six poutres simplement appuyées de portées 5 mètres sont testées. Les poutres sont notées TH1, TH2, TH3, TM1, TM2 et TL1. Toutes les poutres sont fabriquées à partir de trois plats (Offert par GTS Industrie). La Figure 3 montre les caractéristiques géométriques des poutres et la section adoptée.

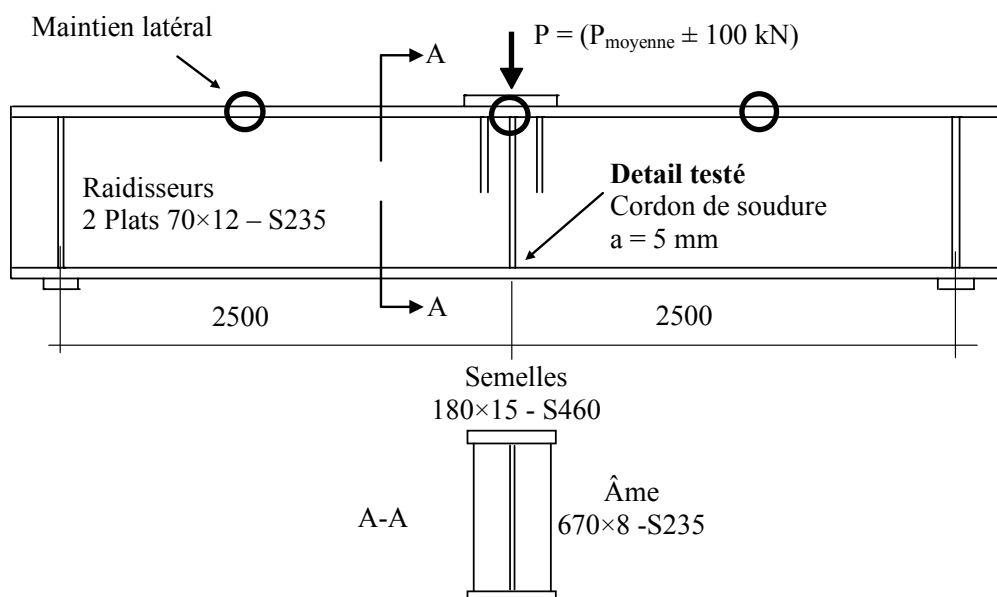


Figure 3 - Poutres hybrides pour les essais à la fatigue de l'attache transversale

Les aciers sont de nuances S460 pour les semelles et S235 conformément à l'EN 10025 et EN 10113. Les essais sur des éprouvettes de traction coupées dans le sens longitudinal (L) et dans le sens transversal (T) ont donné les résultats synthétisés dans le Tableau 1. Ces mesures confirment les nuances des aciers. Il est courant de trouver pour l'acier S235 une limite d'élasticité mesurée de l'ordre de 300 MPa.

Epaisseur/Nuance	Direction	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (10^3 MPa)
8 mm / S235JR	L/T	310/323	399/400	207/185
12 mm / S235JR	L/T	295/303	390/389	175/192
15 mm / S460M	L/T	492/520	567/591	223/217
Soudure âme-semelles (1)		> 450	> 550	
Soudure raidisseurs (2)		> 480	> 550	
(1) Soudure automatique L61-780 - LINCOLN				
(2) Soudure semi-automatique OSMC 710 - LINCOLN				

Tableau 1 – Caractéristiques mécaniques des aciers et des soudures

Procédure d'essai –Résultats - Analyses

Pour les mêmes caractéristiques géométriques, nous avons appliqué la même étendue de contraintes pour les six essais. La valeur de $\Delta\sigma = 100$ MPa (contrainte normale dans la semelle) est adoptée afin de se situer au-dessus de détail de référence à 2 millions de cycles qui est égal à 80 MPa selon l'Eurocode. Ceci correspond aussi à une variation de charge égale à +100 kN et -100 kN par rapport à la charge moyenne.

La charge moyenne est définie en fonction de l'importance de la plastification à la jonction âme-semelle et la hauteur plastifiée de l'âme. Pour les essais TH les cycles de fatigue sont dans le domaine de plastification de l'âme et les contraintes normales dans les semelles sont proches de la limite d'élasticité. Pour les essais TM, les cycles de fatigue sont centrés par rapport à la limite d'élasticité de l'âme faisant en sorte qu'une hauteur réduite de plastification est observée. Un seul essai TL est effectué où les contraintes sont inférieures à la limite d'élasticité de l'âme. Ce dernier essai constitue un essai de référence car la poutre se comporte comme une poutre homogène vis-à-vis de l'intensité des contraintes La Figure 4 illustre la position de ces différents essais.

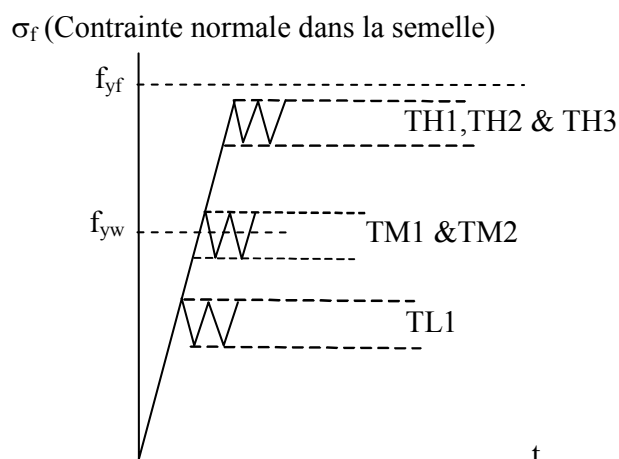


Figure 4 - Variation des contraintes pour les différents essais

Après une phase de mise en place, chaque poutre est soumise à un chargement monotone jusqu'à l'atteinte de P_{max} (limite supérieure de cycle de fatigue). Ensuite un déchargement jusqu'à P_{min} est opéré. Après contrôle des contraintes on procède aux cycles de fatigue entre ces deux valeurs. Des inspections régulières sont effectuées, 50 000 à 100 000 cycles, compte tenu de la fréquence appliqué (3 à 4 Hz). Outre l'observation visuelle, une détection, à des intervalles réguliers, par ressuage est effectuée après 1,0 millions de cycles. La Figure 5 montre le dispositif d'essai.

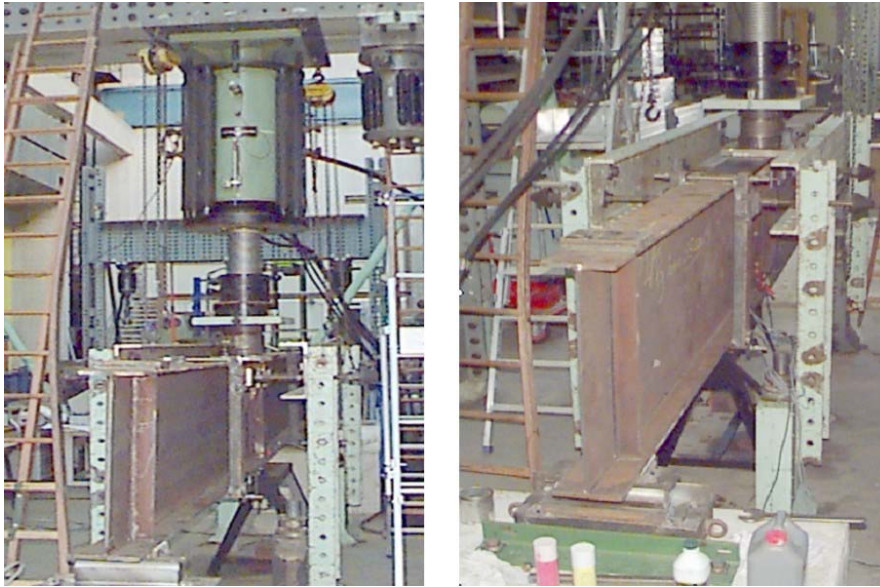


Figure 5 - Dispositif d'essais

Une fois la fissure détectée, les cycles sont maintenus afin de permettre la propagation de cette fissure. L'arrêt de la phase fatigue correspond au critère d'une fissure traversante.

Pour les six essais, la fissure s'est produite à la jonction raidisseur/âme juste à l'intersection de trois cordons : âme-semelle, raidisseur-semelle et raidisseur-âme. Une fissure type est montrée à la Figure 6.

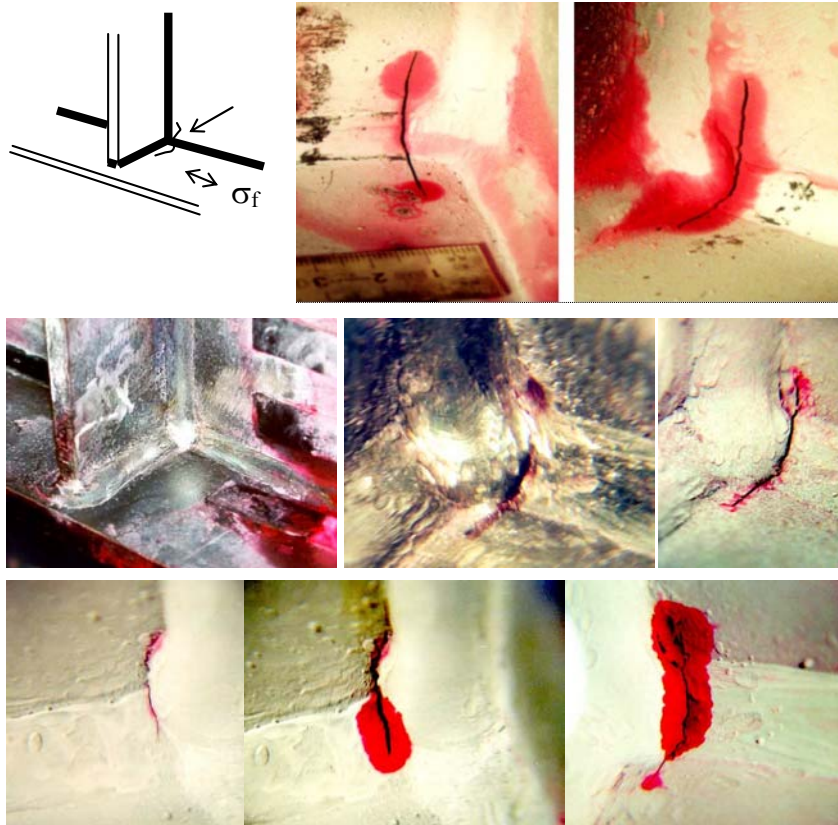


Figure 6 - Fissures de fatigue essais TH/TM/TL

Les résultats de ces essais sont donnés au Tableau 2

Essai	TH1	TH2	TH3	TM1	TM2	TL1
P_{min} (kN)	680			520		250
P_{max} (kN)	880			720		450
$P_{average}$ (kN)	780			620		350
Ratio (σ_i/f_{yw})	1,25			1,0		0,56
H_p (voir figure 1) (mm)	105			60		0
N_i (détection) ($\times 10^6$ cycles)	4.5	3.2	2.1	2.0	2.3	2.0
N_s (Fin) ($\times 10^6$ cycles)	5.5	3.7	3.8	3.8	4.1	3.8
Elément traversé	âme	âme	âme	Semelle	Semelle	Semelle

Tableau 2 - Résultats des essais de fatigue sur l'attache transversale

Une conclusion importante est à tirer à partir des ces essais. Le nombre de cycles au stade de détection et à la ruine par fatigue est indépendant de la hauteur plastifiée de l'âme (H_p). Le comportement à la fatigue pour ce détail dans les poutres hybrides est identique à celui des poutres homogènes. La déformation permanente ou flèche résiduelle due à la plastification dans l'âme est restée stable et n'a pas donné lieu à un cumul de déformations et ruine par cumul de déformation plastique.

Par ailleurs, nous avons placé ces résultats sur la courbe S-N correspondant à ce détail (95% de probabilité de non ruine). Sur la Figure 7, nous avons tracé en plus de la droite de l'EN 1993-1-9, les droites à 5% (5% de probabilité de ruine) et à 50% (50% de probabilité de non ruine). Pour chaque essai les positions des résultats à la détection de la fissure et à la ruine par fatigue (fissure traversante) montrent que si on veut garder un degré de sécurité équivalent à l'EN 1993-1-9 il est important de grader en catégorie 80 ce détail pour les poutres hybrides.

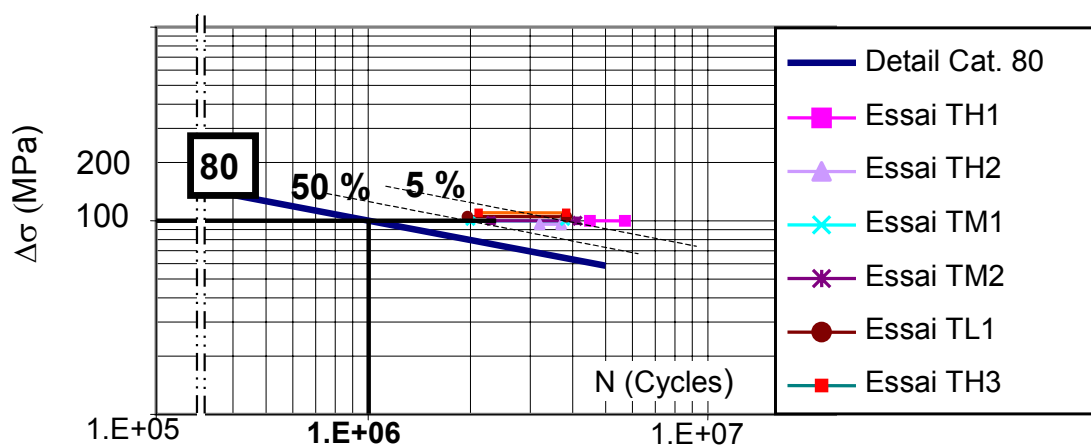


Figure 7 : Position des résultats expérimentaux par rapport à la courbe S-N de référence

Après chaque phase de fatigue, malgré la présence de fissures, un retour à zéro est opéré et une charge statique monotone croissante par palier est appliquée jusqu'à la ruine. Un exemple de courbe de comportement est donné à la Figure 8.

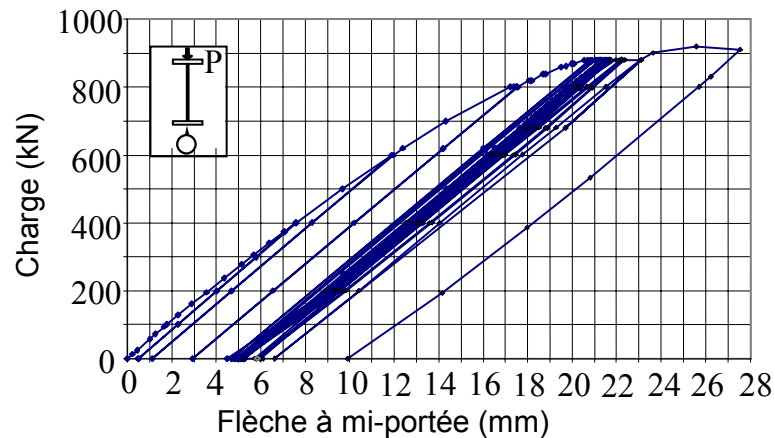


Figure 8 - Courbe charge flèche de la poutre TH1

La Figure 9 regroupe la totalité de ces courbes et le Tableau 3 donne les charges de ruine.

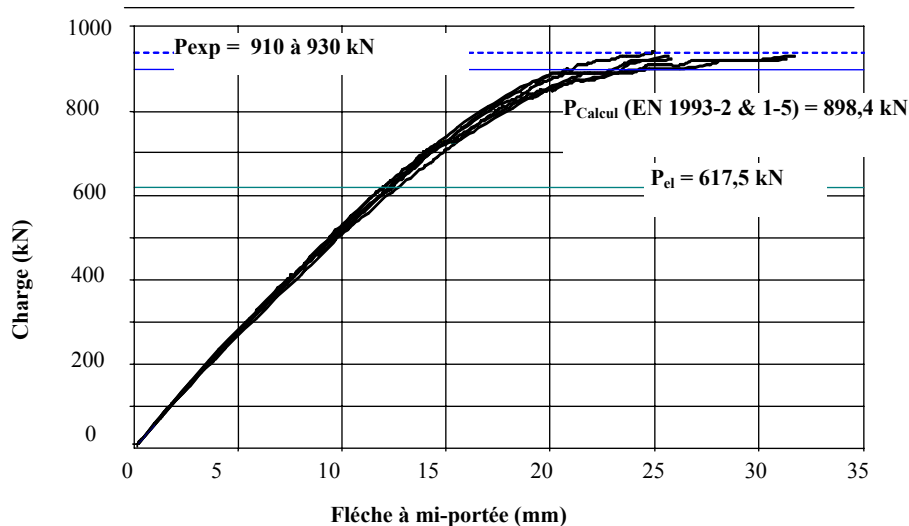


Figure 9 - Courbe charge-flèche sous chargement statique

Essai :	TH1	TH2	TH3	TM1	TM2	TL1
$P_{u,exp}$ (kN)	920	914	—	930	913	920
P_u Selon l'EN 1993-2 (Section de classe 3, caractéristiques mesurées et $\gamma_{M0} = 1.0$)	898	898	898	898	898	898

Tableau 3 - Charge de ruine statique et comparaison avec les Eurocodes

A partir de la figure 9 on constate que le comportement reste linéaire jusqu'à la première plastification dans l'âme pour ($P_{el} \approx 617$ kN) ; la non linéarité s'accroît pour un niveau de chargement égal à $P_{u,exp}/1,4 \approx 660$ kN ce qui correspond mieux à l'état limite de service pour une charge expérimentale de ruine de 900 kN. La ductilité est bonne malgré la fissure. La flèche à la ruine est égale à Portée/175.

Concernant la charge de ruine et le calcul de la résistance à l'état limite ultime, le tableau 3 montre que, malgré la fissure, la concordance des charges nous permet de conclure que l'effet de la plastification dans l'âme est à prendre en compte à la fois pour calculer le moment et pour la classification de la section

transversale. En effet, L'EN 1993 -1-5 autorise l'utilisation des sections hybrides à condition de classer l'âme en utilisant la limite d'élasticité de l'acier des semelles. Les résultats du tableau 3 sont obtenus en procédant de la sorte. En revanche, une classification de l'âme avec la nuance de son acier fait apparaître une section de classe 2 et une résistance plastique de la section ce qui confirme l'approche de l'Eurocode..

2.2. Résistance à la fatigue de cordon d'angle âme-semelle

Deux poutres ont été testées, notées TGAP et TNOGAP, pour étudier la résistance à la fatigue de cordons d'angle âme-semelle. Ces essais ont fait intervenir une interaction de trois paramètres :

- une plastification transversale de cordons d'angle qui peut être due à la réaction de galets en phase de lancement ;
- une plastification longitudinale à la jonction âme-semelle due à la flexion longitudinale surtout que l'orientation dans la réalisation des soudures dans les poutres hybrides est de prendre un acier d'apport sur la base de l'acier de l'âme ;
- un défaut de contact âme-semelle de 2 mm. Ce défaut est réalisé sur la totalité de la longueur de la poutre côté semelle tendue comme le montre la Figure 10.

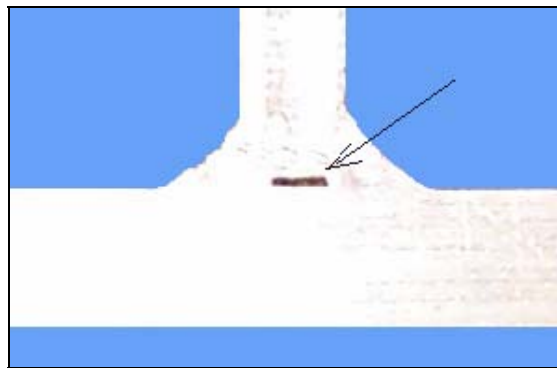


Figure 10 - Défaut de 2 mm pour l'essai TGAP

Les caractéristiques géométriques sont données à la figure 11 et les caractéristiques mécaniques de l'acier sont données au tableau 1

Première phase – application de la charge transversale

Pour ces essais deux phases de chargement sont appliquées : la première est l'application d'une charge de plastification transversale (Patch-loading) comme le montre la Figure 11.

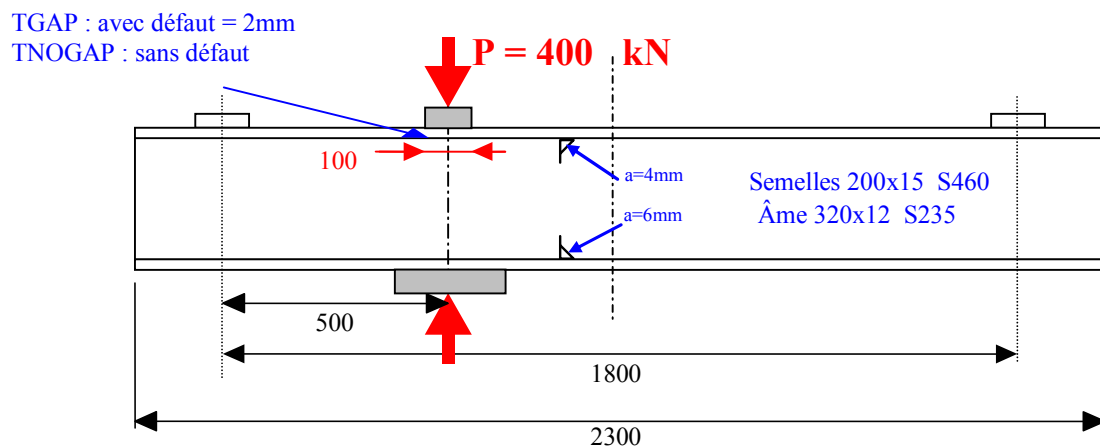


Figure 11a – Schéma de l'application de la charge transversale avant l'essai de fatigue

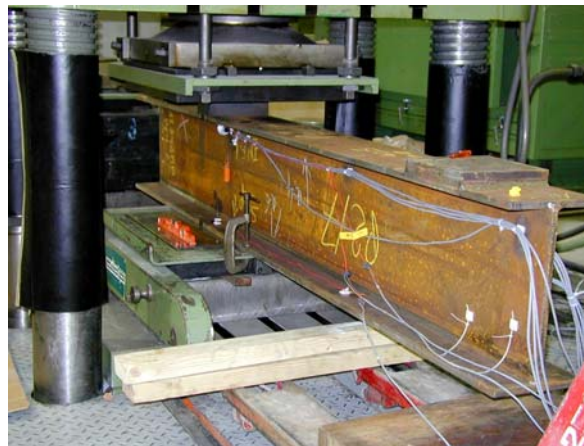


Figure 11b – Application de la charge transversale avant l'essai de fatigue

Les résultats à partir de cette phase concerne la mesure du raccourcissement de l'âme et la mesure des contraintes transversales pour s'assurer de la plastification de l'âme et des cordons de soudures. Ces mesures sont données à la Figure 12.

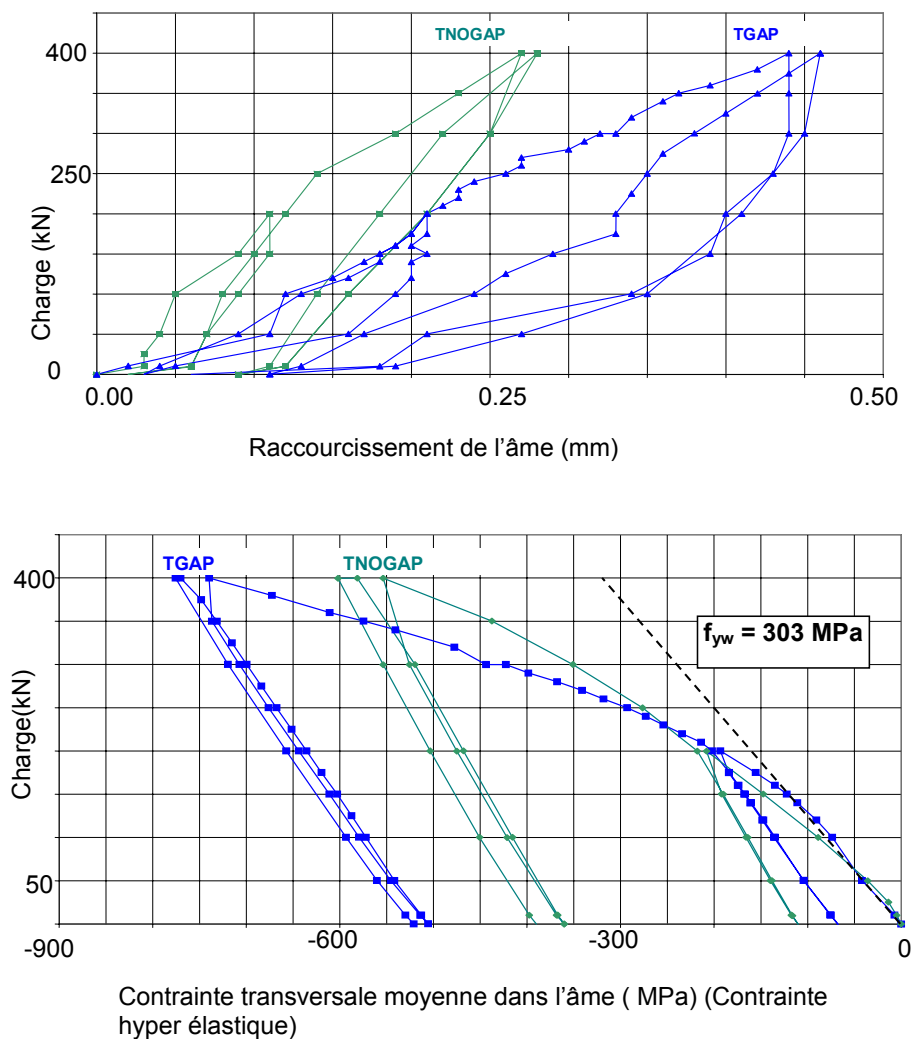


Figure 12 - Essais TGAP et TNOGAP – résultats à partir de la première phase

Deuxième phase – Chargement à la fatigue

Le choix de la portée est dicté par la capacité d'appliquer une variation de chargement permettant de produire la fissure par cisaillement avant celle produite par contraintes normales.

La capacité de variation de chargement est de l'ordre de 1000 kN si on veut rester à des fréquences autour de 3 à 4 Hz.

Les calculs de dimensionnement de ces essais sont résumés au Tableau 4. La Figure 13 montre le dispositif d'essai.

$P_{\min} = 100 \text{ kN}$, $P_{\max} = 1100 \text{ kN}$, $\Delta P = 1000 \text{ kN}$
$H_p = 42 \text{ mm}$ (Hauteur de plastification à mi-portée)
$\Delta \delta = 4,4 \text{ mm}$ (Variation de flèche avec prise en compte d'effort tranchant)
$\Delta \tau_{\text{weld}} = 156 \text{ MPa}$ (Cisaillement dans les cordons âme-semelles)
$\Delta \sigma_{\text{weld}} = 358 \text{ MPa}$ (à mi-portée)
$\Delta \sigma_{\text{weld}} = 199 \text{ MPa}$ (à l'endroit de la plastification par charge transversale)
$N_{\tau} = 71 \text{ 000 cycles}$ (selon courbe S-N en considérant uniquement le cisaillement)
$N_{\sigma} = 85 \text{ 000 cycles}$ (selon courbes S-N en considérant uniquement la flexion)

Tableau 4 - Valeur de calcul pour les essais à la fatigue TGAP et TNOGAP

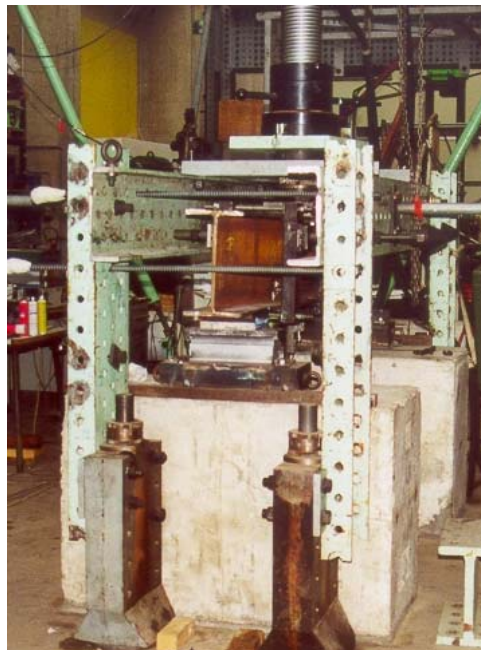
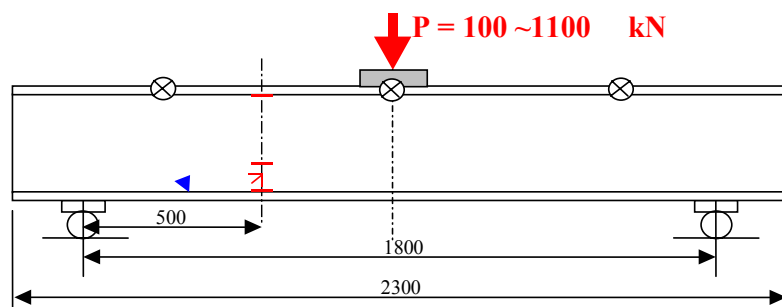


Figure 13 – Dispositif d'essais TGAP et TNOGAP – Phase fatigue

Pour chaque essai une variation de charge de 1000 kN entre 100 et 1100 kN est appliquée.
 Pour l'essai TGAP, la fissure s'est produite à la jonction âme semelle dans le cordon de soudure juste au milieu de la poutre entre les inspections à 230 920 et 234 760 cycles.
 Cette fissure soudaine est traversante. Nous avons fixé arbitrairement le nombre de cycles à la ruine par fatigue à $N_{TGAP,exp} = 232\ 000$ cycles.

La Figure 14 montre la position et la semelle tendue où la fissure est traversante.

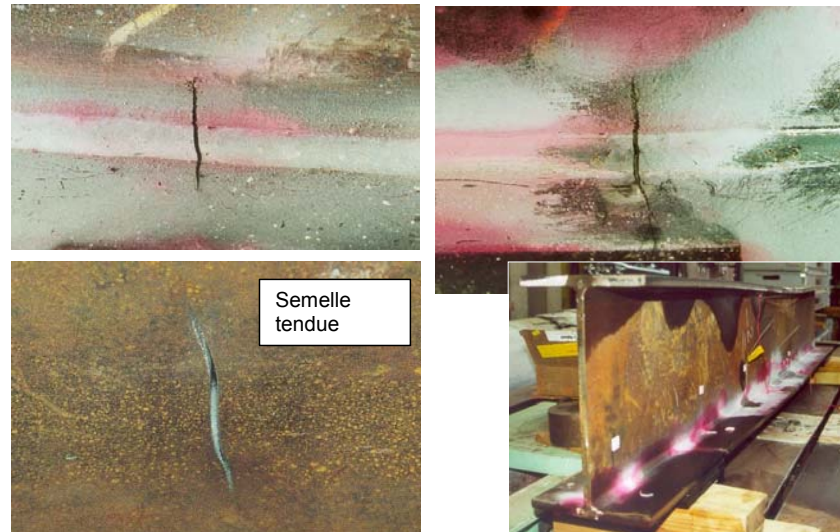


Figure 14 - Fissure de fatigue essai TGAP

Pour l'essai sans défaut TNOGAP deux fissures se sont développées, à 142 900 cycles, dans le cordon de soudure. Une fissure à mi-portée et la deuxième est à 100 mm à partir de la mi-portée mais côté opposé de l'âme. Peu de cycles après la première fissure a traversé l'âme et la semelle tandis que la deuxième s'est stabilisée à 8 mm de longueur.

La Figure 15 montre la fissure principale sur la poutre TNOGAP.

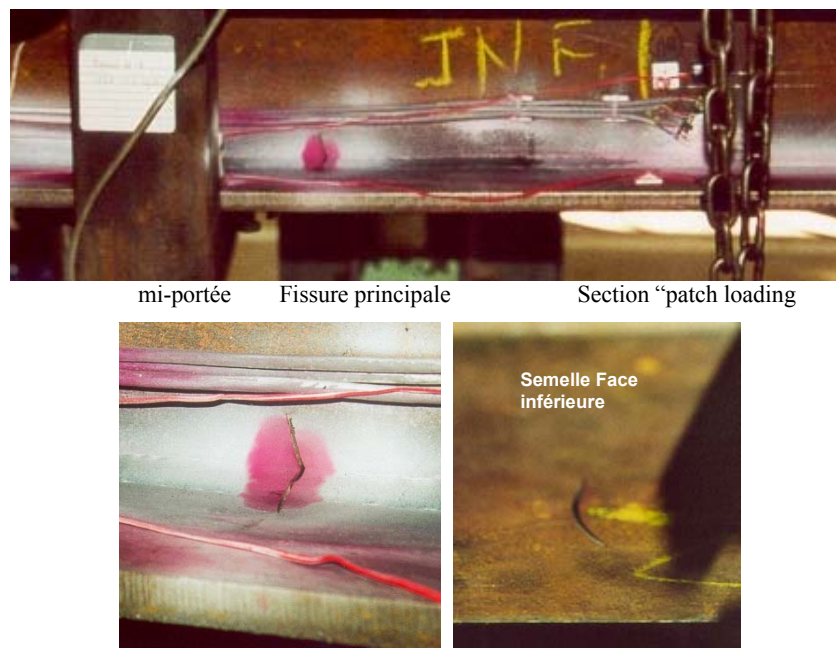


Figure 15 - Fissure de fatigue essai TNOGAP

Le Tableau 5 résume les différents événements.

Essai TNOGAP	détection	Fissure principale traverse l'âme	Fissure principale traverse la semelle	Fin de l'essai
Nb de cycles	142 900	161 000	164 430	165 220

Tableau 5 - Historique de développement de la fissure pour l'essai TNOGAP

La comparaison entre les résultats obtenus et les calculs à partir de l'EN 1993-1-9 montre une réserve importante vis-à-vis de la fatigue malgré la présence

- d'un défaut de 2 mm nominal ;
- de la plastification transversale de l'âme ;
- et de la plastification longitudinale dans l'âme sur une hauteur de 20 mm.

A partir de ces résultats on peut conclure que dans les poutres hybride la résistance à la fatigue des cordons d'angle âme-semelle en cisaillement n'est pas affectée par la plastification à la jonction âme semelle.

En outre, les pratiques en matière d'exécution de ces cordons et leur traitement en phase de lancement doivent être similaires à celles adoptées pour les poutres homogènes.

De même, après la phase de fatigue la poutre TNOGAP est soumise à un chargement statique monotone jusqu'à la ruine (compte tenu du développement soudain de la fissure pour la poutre TGAP nous n'avons pas appliqué la phase statique ultime).

La Figure 16 montre la courbe charge-flèche de cette poutre.

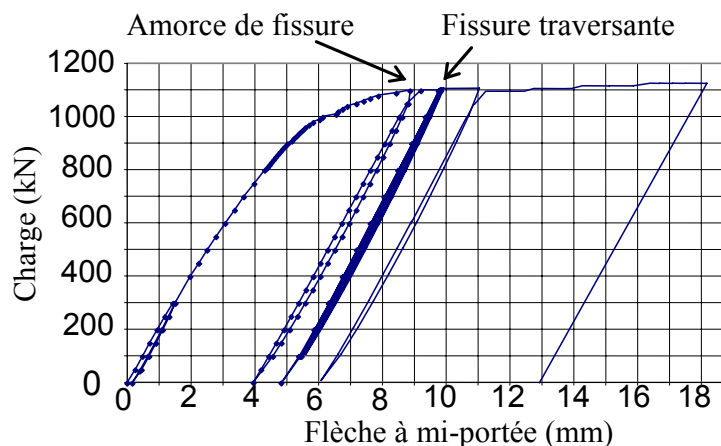


Figure 16 - Courbe charge flèche essai TNOGAP

La ruine s'est produite par une plastification importante à mi-portée et une ouverture importante de la fissure. Il est intéressant de constater à partir de cet essai que le comportement charge flèche est quasiment similaire aux poutres TH, TM et TL.

La charge ultime expérimentale est égale à $P_{u,exp} = 1\,130$ kN. Cette valeur est à comparer avec la charge de calcul à partir de l'EN 1993-2 qui est égale à 1 225 kN (calcul avec $\gamma_M = 1,0$ et les caractéristiques mesurées).

La présence de fissure explique aussi la grande ductilité de la poutre.

2.3. Étendue admissible de contraintes dans les poutres hybrides

Les règles de fatigue imposent une étendue de contrainte $\Delta\sigma$ ne dépassant pas $1,5 f_y$.

Pour les poutres hybrides, la question se pose sur la valeur de f_y à considérer pour appliquer ce critère. Cette valeur doit être celle des semelles f_{yf} ou de l'âme f_{yw} ? Une manière efficace pour répondre à cette question est de réaliser un essai de chargement alterné et de noter le niveau de l'étendue de contraintes donnant lieu à la stabilisation des boucles d'hystérésis.

En d'autres termes, il s'agit de réaliser un essai de fatigue oligocyclique à très faible nombre de cycles et d'observer les boucles d'hystérésis afin de déterminer le niveau d'entendue de contraintes produisant la divergence de ces boucles.

Une poutre est testée pour étudier cet aspect, poutre notée TOC, Les caractéristiques géométriques sont données à la Figure 17. Les caractéristiques mécaniques de l'acier sont données au tableau 1.

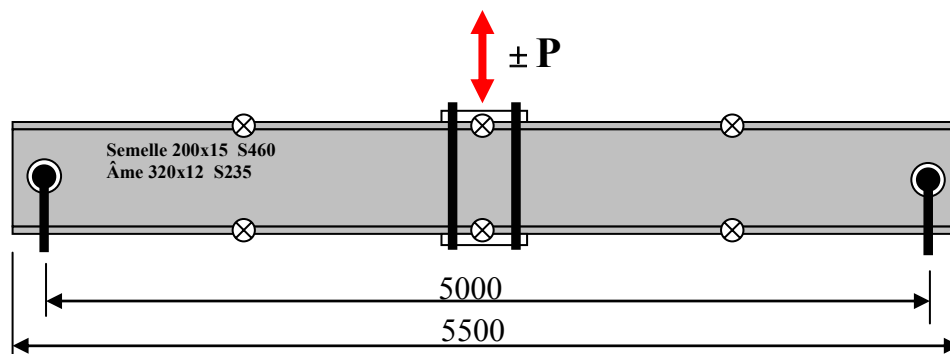


Figure 17 - Caractéristiques de la poutre pour l'essai Oligocyclique TOC

Un calcul préliminaire basé sur les contraintes normales à mi-portée, Figure 18, a montré qu'une variation de charge de l'ordre de + 450 kN à - 450 kN est nécessaire pour mener à bien cet essai.

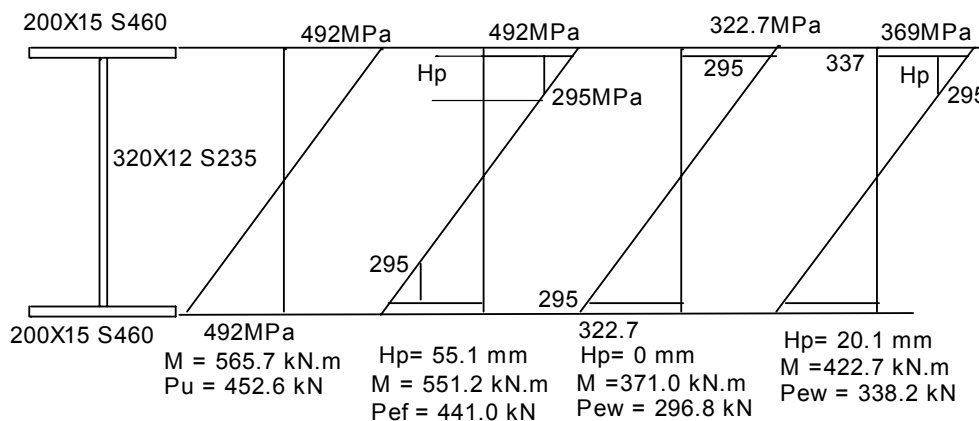
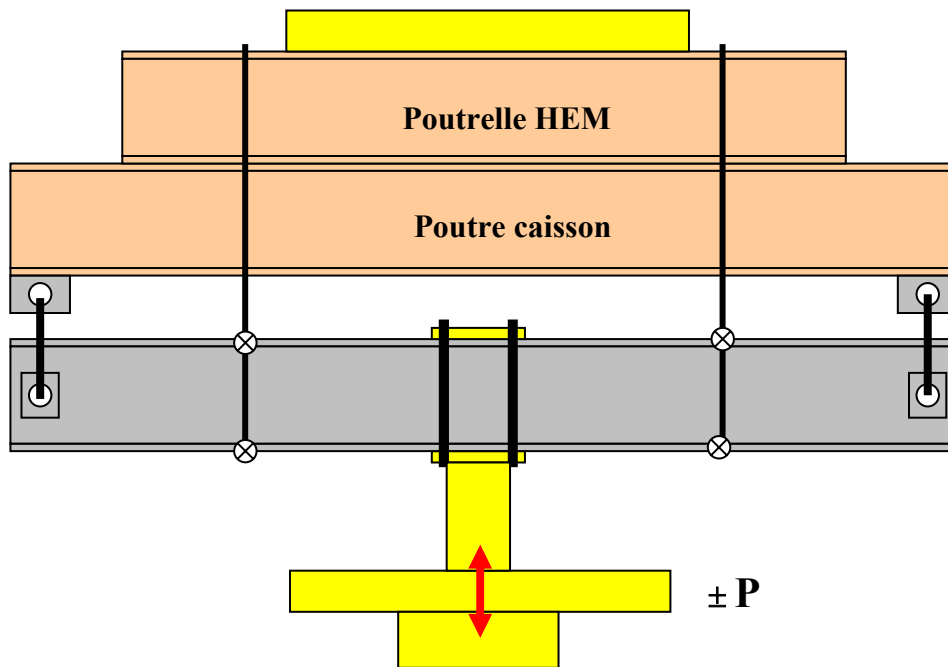


Figure 18 - Détermination de la charge pour l'essai TOC

Le choix d'utiliser une presse avec certaines adaptations découle de cette exigence de variation de charge. La Figure 19 montre ce dispositif d'essai.

Plateau supérieur de la presse (fixe)



Plateau inférieur de la presse (mobile)



Figure 19 - Dispositif d'essai TOC

L'histogramme de chargement est donné à la Figure 20.

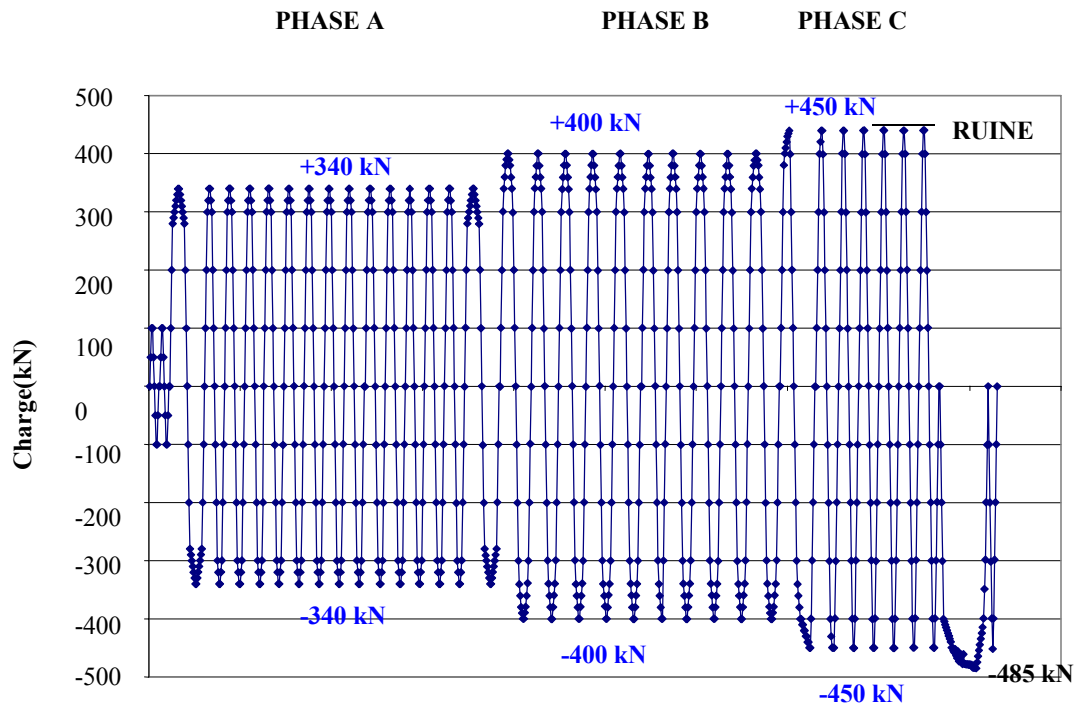


Figure 20 - Histogramme de chargement – essai TOC

Après une première étape de mise en place, trois phases sont appliquées :

Phase A

La phase A où la variation de charge est de +340 kN à -340 kN ce qui correspond à $\Delta\sigma_w/f_{yf} = 1,5$. Quinze cycles sont effectués dans cette phase. Les courbes charge-flèche sont pratiquement confondues pour les quinze cycles confirmant ainsi la stabilisation des boucles. Même constatation pour les courbes charge-contrainte.

Phase B

Pour la phase B la variation de charge est de +400 kN à -400 kN ceci correspond à $\Delta\sigma_w/f_{yf} = 1,7$. Dix cycles sont effectués dans cette phase. On a eu les mêmes constatations précédentes. La Figure 21 montre ces courbes.

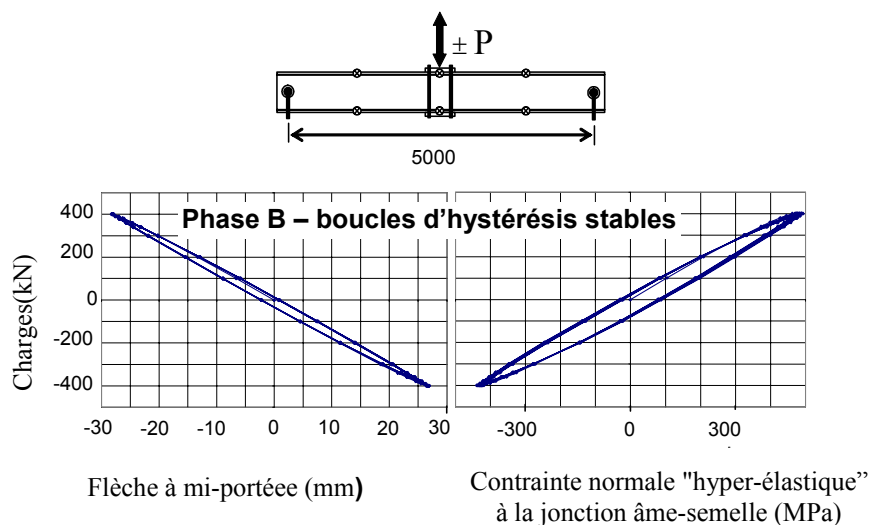


Figure 21 – Essai TOC – Phase B - boucles stables

Phase C

Pour la phase C où la variation de charge est de +440 kN à -440 kN ce qui correspond à $\Delta\sigma_w/f_{yf} = 1,9$. Une divergence importante est constatée après sept cycles. La Figure 22 montre la divergence des boucles.

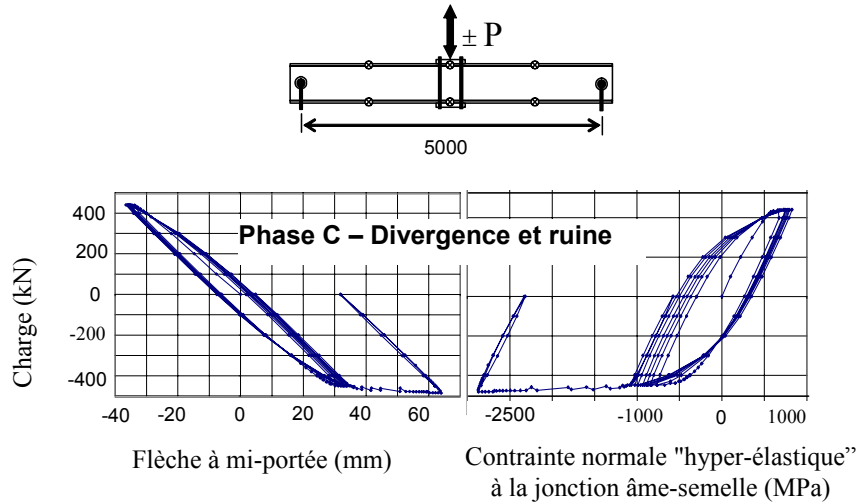


Figure 21 – Essai TOC – Phase C - boucles instables

Après la divergence, les cycles sont arrêtés et une charge statique jusqu'à la ruine est appliquée. La charge de ruine a atteint une valeur de 485 kN ce qui correspond à la charge de plastification confirmant ainsi le modèle adopté dans l'EN1993-2 pour les section de classe 1 et 2.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 6.

P (kN)	Nb de cycles	f_{yf} nominal (460 MPa)		f_{yw} nominal (235 MPa)		Stabilisation
		$\Delta\sigma_w/f_{yf}$	$\Delta\sigma_f/f_{yf}$	$\Delta\sigma_w/f_{yw}$	$\Delta\sigma_f/f_{yw}$	
± 340	15	1.47	1.61	2.88	3.15	Oui
± 400	10	1.73	1.89	3.39	3.70	Oui
± 440	7	1.90	2.08	3.72	4.07	NON

Tableau 6 - Principaux résultats à partir de l'essai TOC

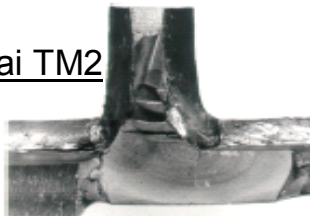
A partir de ce tableau on peut conclure que le critère $\Delta\sigma < 1,5 f_{yf}$ pour les poutres hybrides est validé. On peut donc retenir ce critère bien que l'essai permette d'aller plus loin par rapport à cette valeur de 1,5.

3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Pour certains essais (TM2, TL1) un tronçon autour de la fissure est isolée et traitée (refroidissement à -196°C et choc de marteau) afin d'observer les surfaces de rupture et déterminer les courbes cycles-progression de la fissure (Figure 23).



Essai TM2



Essai TL1

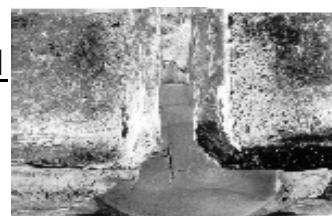
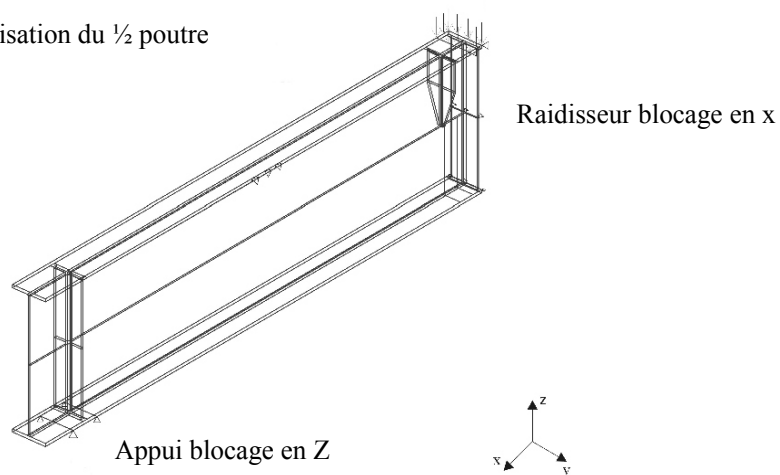


Figure 23 - Surface de rupture après ouverture des éprouvettes

Une modélisation par éléments finis avec le code BEASY-7.2 est effectuée afin de simuler la progression des fissures obtenues expérimentalement.

Charge cyclique = 100 kN

Modélisation du $\frac{1}{2}$ poutre



Modélisation du détail avec les conditions aux limites

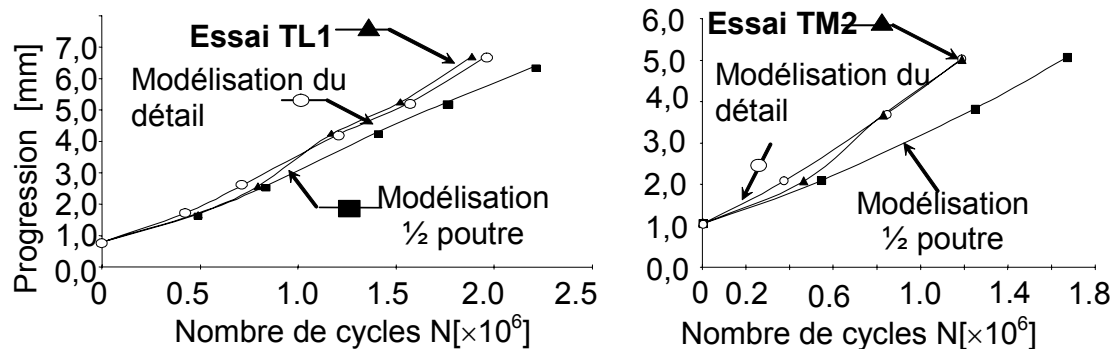
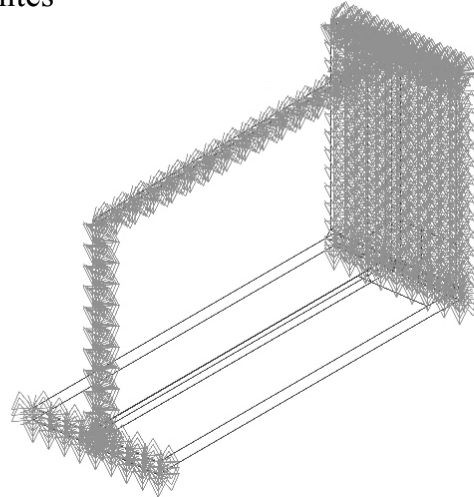


Figure 24 - Comparaison entre calcul EF et Essais

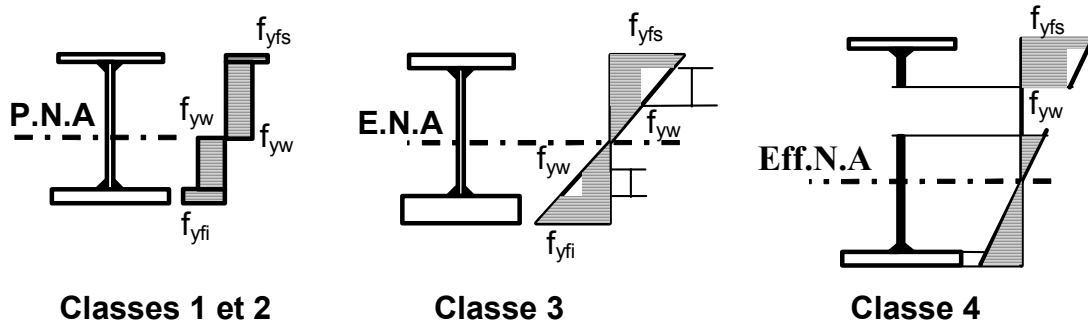
La comparaison, Figure 24, a montré une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les calculs EF. Il est possible ainsi de simuler et étendre l'étude par voie numérique à d'autres types de détails dans les poutres hybrides.

Des informations complètes sur ce modèle et l'étude numérique sont données dans le rapport final [European commission 2003- voir références]

4. RECOMMANDATIONS

Neuf essais à la fatigue sur des poutres hybrides sont réalisés. Des détails courants dans les ponts à petites et moyennes portées sont testés. A partir de cette recherche et les recherches antérieures nous avons pu tirer les recommandations suivantes :

- Les poutres hybrides peuvent être utilisées dans les ponts métalliques et mixtes pourvu que les limitations suivantes soient respectées :
 - la limite d'élasticité de l'âme est inférieure à celle des semelles tout en restant supérieure à sa moitié : $f_{yw} \leq f_{yf} \leq 2 f_{yw}$;
 - la classification de l'âme d'une poutre hybride vis-à-vis du voilement par compression est à effectuer en se basant sur la limite d'élasticité des semelles. La variation de la position de l'axe neutre due à la plastification dans l'âme peut être négligée pour effectuer cette classification ;
- A l'Etat Limite Ultime, les vérifications sont à mener en prenant en compte l'effet de la plastification dans l'âme ;



- Pour le calcul des flèches, l'effet de la plastification peut être négligé ;
- A la fatigue, l'étendue de contrainte est à limiter à $1,5f_{yf}/\gamma_{Mf}$ pour les contraintes normales et à $1,5f_{yw}/\sqrt{3}\gamma_{Mf}$ pour les contraintes de cisaillement ;
- Les classes de détails pour les poutres homogènes peuvent être utilisées pour les poutres hybrides ;
- Dans les poutres hybrides les cordons de soudure d'angle âme-semelle peuvent être réalisés en se basant sur l'acier de base de l'âme.

5. CONCLUSION

Cet article a permis de répondre à des questions importantes pour permettre l'utilisation des poutres hybrides dans les ponts métalliques et mixtes acier-béton.

La possibilité offerte par les Eurocodes, en donnant des règles supplémentaires pour l'utilisation des aciers de hautes limites d'élasticité ($f_y = 690$ MPa) et pour l'utilisation des section hybrides, nous permet de concevoir des ouvrages où les âmes des poutres sont en acier S355 et les semelles sont en acier S460 ou S690 afin d'une meilleur optimisation des coûts.

6. RÉFÉRENCES

Barsom J.M. , Rolfe S.T. «Fracture and Fatigue Control in structures, Applications of Fracture Mechanics» - Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632 – 1987.

Bitar D. «Résistance à la flexion des poutres hybrides a section en I» - CTICM - Revue Construction Métallique – N° 2-2003.

Carskadan Ph.S. «Bending of deep girders with A514 Steel flanges» - Journal of the structural division - October 1969.

Carskadan Ph.S. «Shear buckling of unstiffened hybrid beams» - Journal of the structural division - August 1968.

CEN - European Committee for Standardization

EN 1993-2: Design of steel structures: Part 2 : Steel bridges

EN 1993-1-5: General rules - Supplementary rules for planar plated structures without transverse loading

ENV 1994-2: Design of composite structures - Part 2: Composite bridges

European Commission. «Composite bridge design for small and medium spans» - Report Eur 20583 EN, Euro. Commission Directorate – General for Research 2003.

Frost R.W and Schilling Ch.G. «Behavior of hybrid beams subjected to static loads» - Journal of the structural division - June 1964.

Garrigues G. and al. «Les nouveaux aciers pour la construction des ponts : Les plaques thermomécaniques» - Symposium International Ponts Métalliques – FNB, Paris 1992.

Gurney T.R. «Fatigue of welded structures, second edition» - Cambridge University Press 1979.

Johansson B. «Super Steels in Structural Application - SUSAN » - Hybrid Girders - Lulea University of Technology - March 1995.

Schilling Ch.G. «Web crippling tests on hybrid beams» - Journal of the structural division - February 1967.

Schilling Ch.G. «Bending behavior of composite hybrid beams» - Journal of the structural division - August 1968.

Schwalbe K-H. «Bruchmechanik metallischer Werkstoffe» - Carl Hansen Verlag, München 1980.

SISC - Swedish Institute of Steel Construction. «Design of hybrid steel girders » - Publication N° 147 – 1994

Toprac A.A. «Fatigue strength of Hybrid plate girders» - Welding journal, 48, 1969.

Toprac A.A. & Fielding D.J. «Fatigue tests of A441-A36 hybrid plate girders» - The structural engineer - December 1970.

Toprac A.A. & Natarajan M. «Fatigue strength of hybrid girders» - Journal of the structural division - April 1971.