

NOUVEAUX ACIERS À HAUTE LIMITE D'ÉLASTICITÉ APPLICATION AUX OUVRAGES D'ART

Michel MULLER et Dr. Falko SCHRÖTER

DILLINGER HÜTTE GTS

1. DÉVELOPPEMENT ET PRODUCTION

Le développement de nouveaux grades d'acier a toujours été influencé par la demande des utilisateurs, qui souhaitent des produits présentant à la fois de bonnes caractéristiques mécaniques, tels que la limite d'élasticité et la résilience, mais aussi d'excellentes propriétés de mise en œuvre assurant une fabrication en atelier et un montage de la structure efficaces. Parmi les différentes possibilités existantes pour augmenter la limite d'élasticité d'un acier, il y a deux techniques majeures :

- l'ajout d'éléments d'alliage : avec des éléments d'alliage tels que le carbone ou le manganèse, la résistance mécanique des aciers peut être aisément augmenté. Mais il est bien connu aussi que l'addition d'alliages détériore dans bien des cas les propriétés de mise en œuvre des produits en acier, en particulier leur soudabilité.
- les traitements thermiques : ils ont un effet sur la microstructure et la taille de grain. Le principal avantage de ces processus réside dans l'obtention d'une structure à grains fins qui amène à une limite d'élasticité élevée et une meilleure résilience qu'un acier à grains grossiers (relation de Hall – Petch).

Pour cette raison, le traitement thermique est d'une importance capitale dans le développement de nouvelles nuances d'acier comme le montre le graphique sur la figure 1. Jusqu'à 1950, l'acier connu aujourd'hui sous le nom de S355J2 était considéré comme un acier à haute limite d'élasticité. Pour une plaque, cette nuance est habituellement obtenue par un laminage à chaud conventionnel (voir figure 2 process A) suivi par un traitement thermique de normalisation – un chauffage à une température légèrement supérieure à la valeur A_{c3} (température à laquelle la structure ferrito-perlitique est complètement transformée en austénite) suivi d'un refroidissement doux conduisant à une structure à grains fins et homogènes (voir figure 2, process B). Ce processus peut être remplacé par un laminage normalisant dans lequel ce traitement thermique est inclus dans l'opération de laminage tout en conduisant à un résultat similaire.

Durant les années 1960, l'utilisation du processus de trempe et revenu pour les aciers de construction a vu le jour (process C). Ce procédé consiste en un laminage suivi d'un chauffage à une température supérieure à A_{c3} , d'un refroidissement rapide appelé la trempe, normalement dans l'eau, et pour finir, d'un revenu à une température inférieure à A_{c1} (température à laquelle l'austénite commence à se former ; voir process C, figure 2). Après la première étape, on obtient une structure à grains martensitiques ou bainitiques avec des propriétés de résilience qui seront améliorées de manière significative pendant l'opération de revenu. Outre le traitement thermique, le bon compromis entre résistance et résilience est aussi dû au fait que ces aciers sont alliés par l'ajout de micro-alliages (Nb, V, Ti) qui précipitent sous la forme de fins carbonitrides.

A ce jour, ce process permet d'atteindre des limites d'élasticité jusqu' à 1100 MPa, bien que les normes ne mentionnent des nuances que jusqu' à 960 MPa. De plus, en Europe, les constructions classiques d'ouvrages d'art et de bâtiments en acier ne profitent que très rarement de ces aciers à « ultra-haute » limite d'élasticité et se contentent de nuances jusqu'à 690 MPa.

Dans les années 1970 le procédé de laminage thermomécanique (TM) a été développé et d'abord appliqué aux tôles à tubes. Mais il a rapidement pris place dans les domaines de construction navale et de plateforme offshore. Le laminage TM est défini comme un process avec des températures de fin de laminage dans un certain intervalle de température permettant d'obtenir des caractéristiques mécaniques qui ne peuvent être obtenues ou conservées par un traitement thermique seul. La nuance d'acier obtenue possède une haute limite d'élasticité ainsi qu'une résilience élevée et dans le même temps, une teneur en éléments d'alliage minimale conférant une bonne soudabilité.

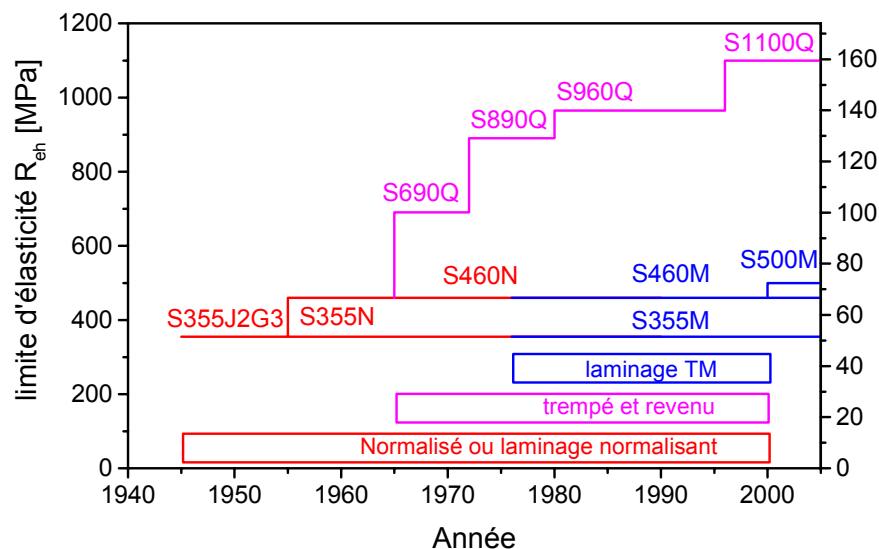


Figure 1 : Développement historique des procédés de fabrication de tôles en acier

Pour ces aciers, on ajoute également quelques micro alliages tels que le niobium, le vanadium et/ou le titane mais dans des proportions très faibles afin d'obtenir un effet de durcissement supplémentaire par la formation de fins carbonitrides et afin d'augmenter la température de recristallisation. Les premières passes de laminage se déroulent aux températures traditionnelles de laminage mais les passes suivantes se déroulent à des températures précises (on parle de laminage contrôlé) légèrement inférieures à la température de recristallisation (process D, figure 2) et parfois même dans la gamme de température de coexistence de l'austénite et de la ferrite/perlite (process E). Ce procédé peut être complété par un refroidissement accéléré doux, en particulier pour les tôles épaisses (process F).

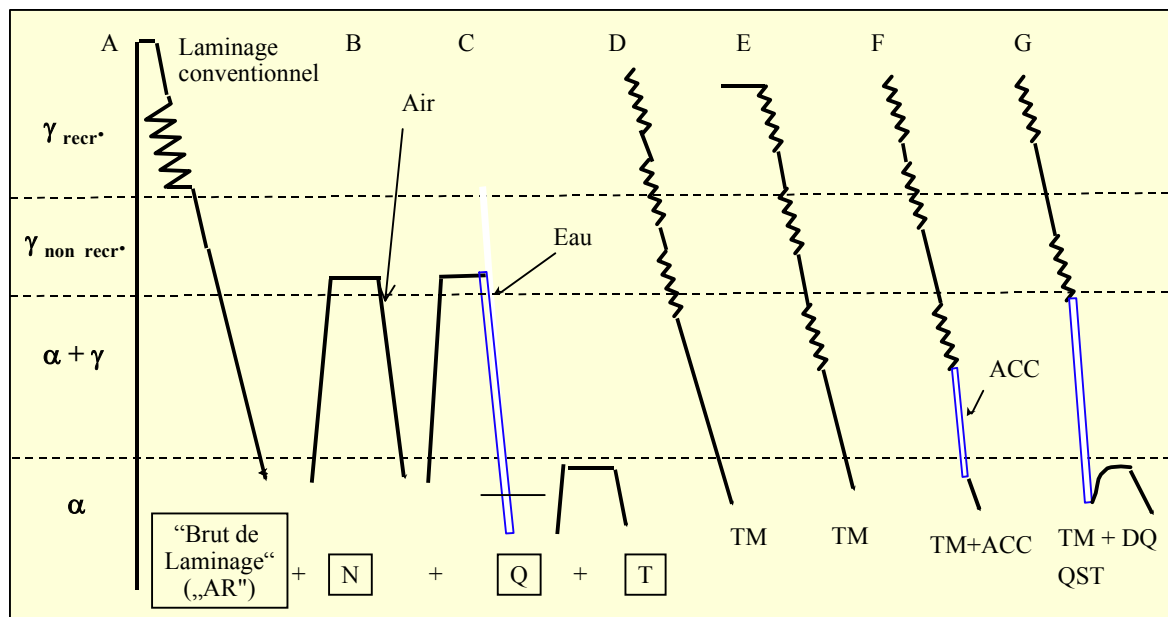


Figure 2 : Différents types de traitements thermiques et de procédés de laminage. La température est reportée sur l'axe des ordonnées. γ_{recr} signifie austénite recristallisée, $\gamma_{\text{non recr}}$ signifie austénite non recristallisée, $\alpha + \gamma$ représente la gamme de température de l'austénite + ferrite et α la gamme de température pour la ferrite + perlite.

Tous ces schémas de fabrication TM conduisent à une microstructure à grains fins de ferrite et perlite - voire même partiellement de bainite, comme indiqué figure 3, en évitant une forte teneur en éléments d'alliage ; ceci conduit ainsi à de bonnes propriétés de résilience et de soudabilité. De plus, des nuances avec de hautes limites d'élasticité peuvent être obtenues par ces techniques. Des plaques avec des garanties de limite d'élasticité minimales jusqu'à 500 MPa sont disponibles dans des épaisseurs jusqu'à 80 mm et déjà utilisées dans la construction navale et offshore. Pour la construction métallique des plaques de 120 mm avec une limite d'élasticité jusqu'à 460 MPa ont été produites et utilisées avec succès en particulier dans les ouvrages d'art. Ces nuances à haute limite d'élasticité n'ont pas seulement été développées en Europe mais aussi au Japon et aux Etats-Unis.

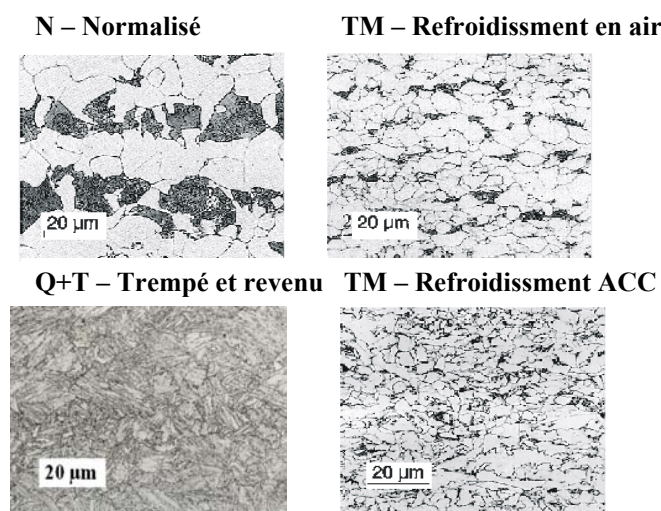


Figure 3 : Microstructure pour des aciers TM et Q, en comparaison avec un acier N

2. PROPRIÉTÉS DES ACIERS À HAUTE LIMITE D'ÉLASTICITÉ

Les teneurs maximales en éléments d'alliage indiquées dans les normes Européennes pour ces aciers à haute limite d'élasticité sont des valeurs traditionnelles de limite supérieure. Mais les teneurs actuelles des aciers sont bien plus basses. De plus, il faut prendre en considération que ce n'est pas seulement la nuance d'acier qui a une influence sur la teneur en éléments d'alliages, mais également la gamme d'épaisseur du produit considéré. Bien entendu, il y aura aussi des différences entre les produits issus de différents fabricants.

Le tableau 1 indique les compositions chimiques des nuances S460ML, S460QL, S690QL (valeurs selon norme et analyse typique) en comparaison avec l'acier de construction ordinaire S355J2. On peut voir, que pour des nuances jusqu'à S460, les aciers TM présentent une composition chimique très réduite qui leur confère une excellente soudabilité. Mais même les teneurs en alliages des aciers à très haute limite d'élasticité, en particulier le S690, permettent une mise en œuvre efficace, comme décrite ci-dessous.

Il faut garder à l'esprit que les valeurs de caractéristiques mécaniques données par les normes sont des valeurs minimales à garantir, mais l'utilisateur peut s'attendre à de bien meilleures valeurs, en particulier pour la résilience. La figure 4 représente les courbes de transition données par l'essai de résilience Charpy-V (en fonction de la température) pour les nuances S460ML et S690QL en comparaison avec un acier ordinaire S355J2. On peut se rendre compte que ces aciers à haute limite d'élasticité présentent des valeurs de résilience beaucoup plus élevées à cette température que celles données par les normes (27 J à -50°C et 30 J à -40°C). Même à température ambiante, le résultat est meilleur que pour l'acier S355J2.

	S355J2		S460ML		S460QL		S690QL	
	EN 10025 Partie 2	Analyse typique	EN 10025 Partie 4	Analyse typique	EN 10025 Partie 6	Analyse typique	EN 10025 Partie 6	Analyse typique
C	≤ 0.22	0.17	≤ 0.16	0.08	≤ 0.20	0.15	≤ 0.20	0.16
Si	≤ 0.55	0.45	≤ 0.60	0.45	≤ 0.80	0.45	≤ 0.80	0.30
Mn	≤ 1.60	1.50	≤ 1.70	1.65	≤ 1.70	1.50	≤ 1.70	1.30
P	≤ 0.025	0.018	≤ 0.025	0.011	≤ 0.020	0.012	≤ 0.020	0.012
S	≤ 0.025	0.015	≤ 0.020	0.002	≤ 0.010	0.005	≤ 0.010	0.005
Nb	-	-	≤ 0.05	< 0.04	≤ 0.06	0.017	≤ 0.06	< 0.04
V	-	-	≤ 0.12	-	≤ 0.12	-	≤ 0.12	-
Ti	-	-	≤ 0.05	-	≤ 0.05	-	≤ 0.05	-
Mo	-	-	≤ 0.20	-	≤ 0.70	0.115	≤ 0.70	0.37
Ni	-	-	≤ 0.80	0.19	≤ 2.0	-	≤ 2.0	0.15
Cu	≤ 0.55	-	≤ 0.55	0.17	≤ 0.50	-	≤ 0.50	0.08
Cr	-	-	≤ 0.30	-	≤ 1.50	-	≤ 1.50	0.40
B	-	-	-	-	≤ 0.0050	-	≤ 0.0050	< 0.003
CE	0.47	0.42	0.47	0.39	0.47	0.39	0.65	0.54
Pcm	-	0.26	-	0.19	-	0.19	-	0.29
CET	-	0.32	-	0.26	-	0.26	-	0.35

Carbone équivalent:

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

$$Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$$

Tableau 1 : Composition chimique d'aciers à haute limite d'élasticité, d'épaisseur 50 mm. La nuance S355J2 est donnée à titre de comparaison. Extrait des normes Européennes et exemples de valeurs actuelles.

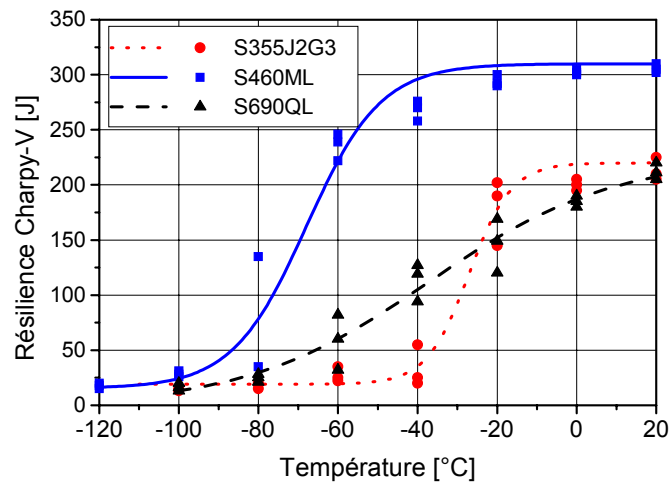


Figure 4 : Courbe de résilience pour les qualités S460ML et S690QL en comparaison avec la nuance S355J2

A partir des valeurs issues du tableau 1, on aperçoit que le laminage TM conduit à des limites d'élasticité élevées tout en maintenant une composition chimique favorable. De plus, comme déjà mentionné, ces aciers présentent une très bonne résilience. Ces résultats combinés amènent à d'excellentes propriétés de soudabilité des aciers TM : par exemple, un acier S460M n'est pas plus difficile à souder qu'un acier traditionnel S355J2. D'un autre côté, les aciers trempés – revenus, comme le S690Q ont des compositions chimiques plus chargées conduisant à des carbones équivalents nécessitant des précautions particulières pendant le soudage, tels un préchauffage, un apport d'énergie limité pour éviter de trop longs temps de refroidissements. Cependant, le soudage de ce type d'aciers est déjà devenu routinier dans beaucoup de branches de la construction mécanique comme la fabrication des grues.

La résistance à la fatigue de ces aciers HLE est légèrement meilleure que les aciers classiques normalisés, mais en fait la résistance à la fatigue du métal de base n'assure que pour partie l'endurance d'un élément de structure métallique. En effet, il est maintenant bien connu que la tenue à la fatigue des assemblages soudés dépend, pour l'essentiel, des concentrations de contraintes engendrées par la géométrie des cordons de soudure et des amorces de fissuration constituées par les défauts des soudures. De plus, pour les aciers 690Q, les soudures peuvent limiter l'avantage que constitue la haute résistance du métal de base car les matériaux d'apport sont en général plus mous que le métal de base.

Les autres limites à l'utilisation des aciers trempés est qu'une haute limite d'élasticité est synonyme de déformation élastique importante (effet de ressort), enfin, la mise en forme à chaud au-dessus de 650°C impose une nouvelle opération de trempe et de revenu car une telle température dégrade les caractéristiques mécaniques initiales résultant du traitement de trempe et revenu.

De même, pour les aciers avec laminage thermomécanique, le formage à chaud entraînera une dégradation des caractéristiques mécaniques qu'il n'est pas possible de rétablir. Mais leur aptitude au formage à froid ($T < 580^{\circ}\text{C}$) est très bonne, on pourra effectuer un traitement de détensionnement pour rétablir la perte de ténacité due à l'écrouissage.

3. EXEMPLES

L'intérêt de l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité (HLE) dans la construction d'ouvrages d'art est évident : la hauteur de la coupe transversale peut être réduite par rapport à l'utilisation d'aciers ordinaires et ainsi en résulte :

- Une diminution du poids mort de la structure, qui profite au génie civil et au montage
- Une réduction de la taille des joints soudés qui entraîne une diminution des coûts de fabrication et d'inspection

Pour ces raisons, les aciers HLE ne sont pas uniquement utilisés pour des grands ouvrages prestigieux, mais également pour des ponts courants de moyenne portée. Lors de l'utilisation des aciers HLE, la résistance à la fatigue des assemblages soudés est du même ordre de grandeur que lors de l'emploi d'aciers ordinaires, selon les normes Européennes. Cependant, les aciers HLE peuvent montrer des avantages pour les phénomènes de fatigue, par exemple en cas de charge excessive ou bien si les soudures sont traitées par un traitement post-soudage spécifique.

La figure 5 représente un pont de type standard, construit sur un canal se situant à Zuid Beveland, la partie méridionale des Pays-Bas. La structure bi-poutre en S460 a été choisie afin de réduire la hauteur de la poutre et de porter au maximum la hauteur sous le pont pour la circulation fluviale.



Figure 5 : Pont à Zuid-Beveland (Pays-Bas)

Un exemple typique pour l'utilisation d'un acier S690Q pour les ponts à moyenne portée en Allemagne est donné sur la figure 6. Il s'agit d'un pont mixte traversant une voie ferrée à Ingolstadt avec des portées de 24 – 3*30 – 24 mètres. La section transversale est constituée de deux poutres reconstituées soudées (PRS) de hauteur 1,2 m et espacées de 7 m, d'entretoises espacées de 7,5 m et d'un tablier en béton coulé sur place par tronçons de 15 m. Ici, l'acier de nuance S690Q a été utilisé pour les connexions entre la poutre et les piles, qui sont constituées de tubes en acier de 600 mm de diamètre remplis de béton. La bande d'acier S690, d'épaisseur 70 mm, a été soudée à la poutre de façon à obtenir une connexion rigide en flexion. Ainsi, une alternative efficace à l'emploi d'une pièce d'appui a été créée.

Cependant, le principal domaine d'application des aciers HLE, comme le S460M reste la construction de grands ouvrages d'art, comme par exemple le nouveau pont sur le Rhin au nord de Düsseldorf (Allemagne), qui a été ouvert à la circulation en 2002. Pour ce pont à haubans de portée centrale égale à 275 m, les hauteurs des pylônes ont dû être réduites à 34 m en raison de la proximité de la zone d'atterrissage de l'aéroport tout proche (voir figure 8). Ainsi, pour palier aux forces importantes atteintes en tête de pylône, seul des aciers HLE (en l'occurrence S460ML) ont pu être utilisés pour ces éléments structuraux. Des plaques jusqu' à 100 mm d'épaisseur ont même été nécessaires pour les parties centrales de la tête de pylône.

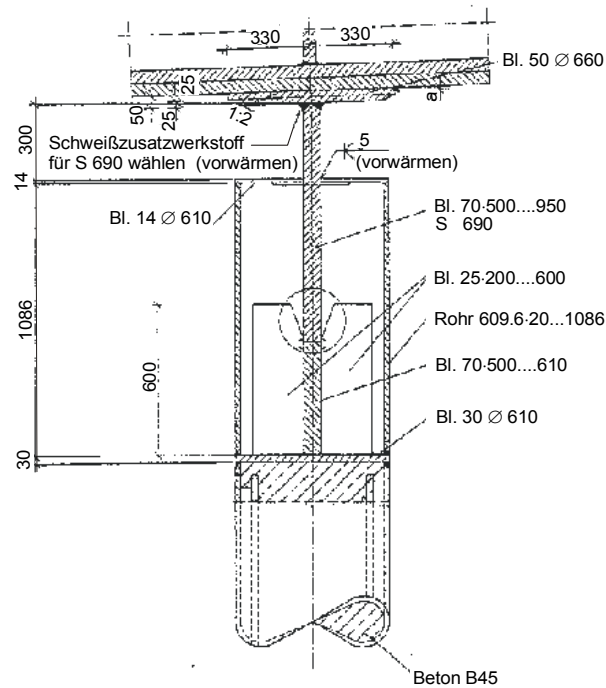


Figure 6 : Pile et connexion pile-poutre pour le pont d'Ingolstadt



Figure 7 : Autre exemple de pont utilisant un acier S690 : Eiserne Brücke à Regensburg

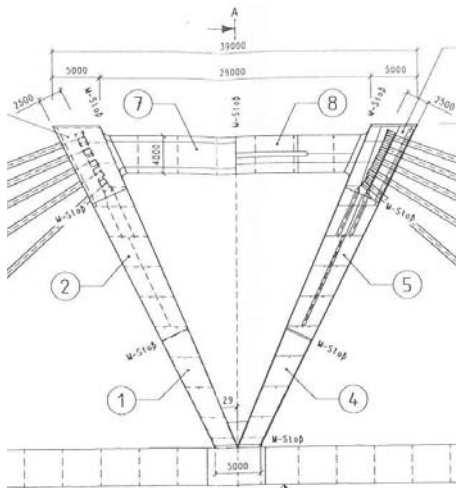


Figure 8 : Pylône du nouveau pont sur le Rhin au nord de Düsseldorf

Pour le pont à haubans de Rion - Antirion en Grèce qui traverse le golfe de Corinthe (le pont a pris le nom définitif de Pont Harilaos Trikoupi), des tôles en S460M d'épaisseur 80 mm maximum ont été utilisées pour la structure mixte du tablier de type bi-poutre. Pour des plaques plus épaisses, des nuances trempés-revenus S460Q ont été mises en œuvre. De plus, pour les têtes de pylône, l'emploi de 700 tonnes de S460M jusqu'à 110 mm a été nécessaire.

Il n'est pas étonnant non plus de retrouver des aciers HLE dans le viaduc de Millau, construit en un temps record de 38 mois entre 2001 et 2004. Sur l'ensemble des 43 000 t de tôles fortes livrées pour le tablier et les pylônes, près de 18 000 t d'acier sont de nuance S460 thermomécanique. Cette nuance a été utilisée dans les caissons centraux, dans les pylônes et aux liaisons pile – tablier – pylône où de fortes épaisseurs (supérieures à 50 mm) ont été employées. Sans l'utilisation de ces aciers à haute performance, le tablier n'aurait pas pu être aussi fin et le temps de construction a été raccourci grâce à la préfabrication de la structure métallique en atelier (Voir figures 9 et 10).



Figure 9 : Le viaduc de Millau



Figure 10 : Vue du caisson du viaduc de Millau

4. CONCLUSION

Pour les concepteurs de ponts, une large gamme de dimensions et de nuances d'acier est disponible aujourd'hui. L'acier à haute limite d'élasticité (avec laminage thermomécanique ou traitement de trempe et revenu) – pour lequel le défi réside également dans le fait de pouvoir le produire dans des dimensions de plus en plus grandes (tôles épaisses) – constitue donc un matériau de premier choix pour les ouvrages d'art en acier ou ponts mixtes. Mais ce n'est pas uniquement l'élargissement des possibilités offertes par les sidérurgistes qui doit profiter aux futurs ponts en Europe mais aussi l'expérience que peut apporter un pays voisin sur un matériau, une structure encore inconnue chez nous ; par exemple les nuances auto-patinables, les aciers TM, la structure bi-poutre connaissent des applications contrastées dans les pays Européens.