



LES ACIERS THERMOMECHANIQUES S355 ET S460, MISE EN ŒUVRE POUR LE PONT DE REMOULINS*

J. FUCHS (LRPC), P. LEPELERS (ECM), T. KRETZ (SETRA), J. M. VIGO (DH-GTS)

Quels sont les avantages des aciers thermomécaniques pour les ouvrages d'art?

La réponse avec le pont de Remoulins : limitation des épaisseurs, facilité de soudage.

Un seul petit grain de sable : le cas où la fatigue est prépondérante.

1/INTRODUCTION

1/1 GENERALITES

- Les tôles fortes destinées à la fabrication d'ouvrages d'art ont longtemps été livrées à l'état normalisé, un état stable obtenu par traitement thermique (recuit de normalisation) ou par laminage normalisant et dans lequel les caractéristiques du produit sont essentiellement liées à sa composition chimique (aciers N).

- Le développement de cages de laminage très puissantes et d'équipements de refroidissement accéléré sophistiqués associés à des dispositifs de pilotage et de contrôle extrêmement précis ont permis de mettre en œuvre des schémas de laminage permettant d'obtenir directement les propriétés mécaniques des tôles fortes sans avoir à recourir à des traitements thermiques ultérieurs.

Il s'agit du **laminage THERMOMECHANIQUE** : laminage contrôlé mené de façon à obtenir une structure optimale tant du point de vue de sa finesse que de celui de la morphologie et de la répartition des précipités, et qui est suivi d'un refroidissement à l'air ou même d'un refroidissement accéléré qui procure un affinement supplémentaire du grain et qui intensifie le durcissement par précipitation.

- Tout naturellement, ces aciers **THERMOMECHANIQUES (aciers M)** vont, compte tenu de leur mode de fabrication, se différencier des aciers normalisés de la façon suivante :

- à caractéristiques mécaniques équivalentes, ils auront une analyse chimique moins chargée,

- à analyses chimiques équivalentes, ils auront des caractéristiques mécaniques plus élevées.

- Tout cela se traduit de façon concrète par une meilleure aptitude au soudage et/ou la possibilité d'atteindre des niveaux de caractéristiques méca-

niques plus élevées sans que la soudabilité des tôles soit limitée.

Nous aborderons dans la suite de cet exposé un cas d'utilisation de ces tôles à la construction du **Pont de Remoulins** qui permettra d'en appréhender l'intérêt technico-économique global.

1/2 PRINCIPE DES TRAITEMENTS THERMOMECHANIQUES

- Le laminage contrôlé est un laminage à vocation métallurgique visant à obtenir les caractéristiques du produit directement à la sortie du train. Il consiste à effectuer les différentes passes à des températures bien précises de façon à contrôler les phénomènes d'écroutissage et de recristallisation de l'austénite et la précipitation dans la ferrite (Figure 1).

- Il nécessite des cages de laminage puissantes, car le laminage est généralement terminé à basse température, et des cages rapides pour empêcher le grain de grossir entre 2 passes.

- Ce laminage est suivi d'un refroidissement à l'air, dont la vitesse ne dépend que de l'épaisseur du produit, ou d'un refroidissement accéléré dont les différents paramètres = température de début de refroidissement, température de fin de refroidissement, vitesse, sont contrôlables.

Le refroidissement accéléré est réalisé dans des installations situées en ligne derrière la dernière cage de laminage et qui permettent de traiter la tôle au défilé par pulvérisation d'un brouillard air - eau (machine ADCO de Dunkerque) - (Figure 2) - ou par aspersion par jets d'eau (machine MULPIC de Dilling).

* Journée technique présentée par la SIS groupe Ile de France sur le thème : "Les aciers modernes" le mercredi 19 octobre 1994

APPLICATIONS

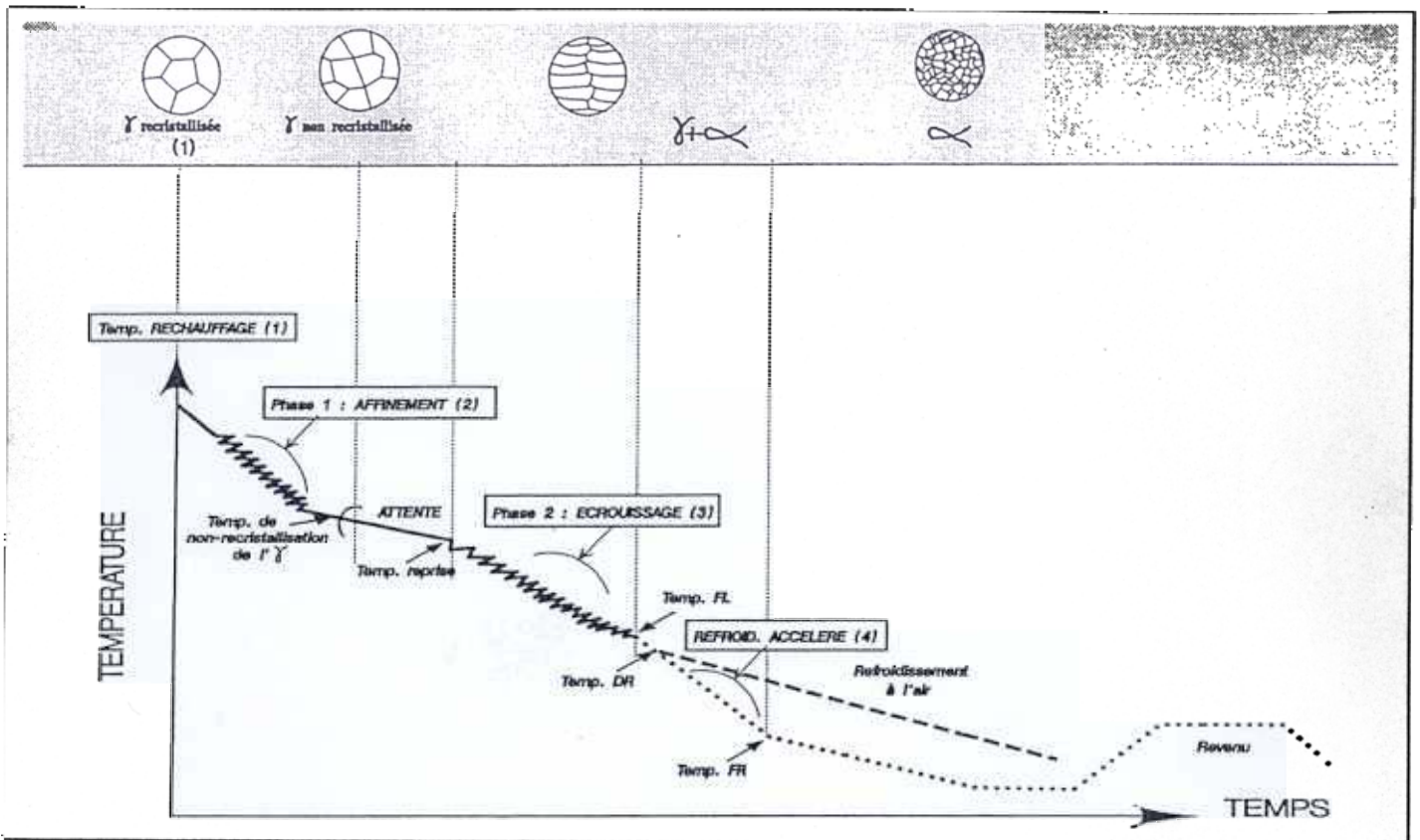


Fig. 1 : Schéma de laminage thermomécanique .

(1) Réchauffage des brames : Fixer un état de dissolution des éléments (micro-) alliés et la grosseur initiale des grains d'austénite. Phases de laminage :

(2) Lors de la première phase, affiner les grains d'austénite par recristallisation.

(3) Lors de la dernière phase, avec répression de recristallisation, influencer d'une manière rationnelle la forme et la grosseur du grain, la substructure de dislocation et la répartition des précipitations respectivement dans l'austénite et la ferrite.

(4) Refroidissement de la tôle : Obtenir une structure tenace présentant une morphologie à grains fins et une répartition de précipités de tailles optimales.

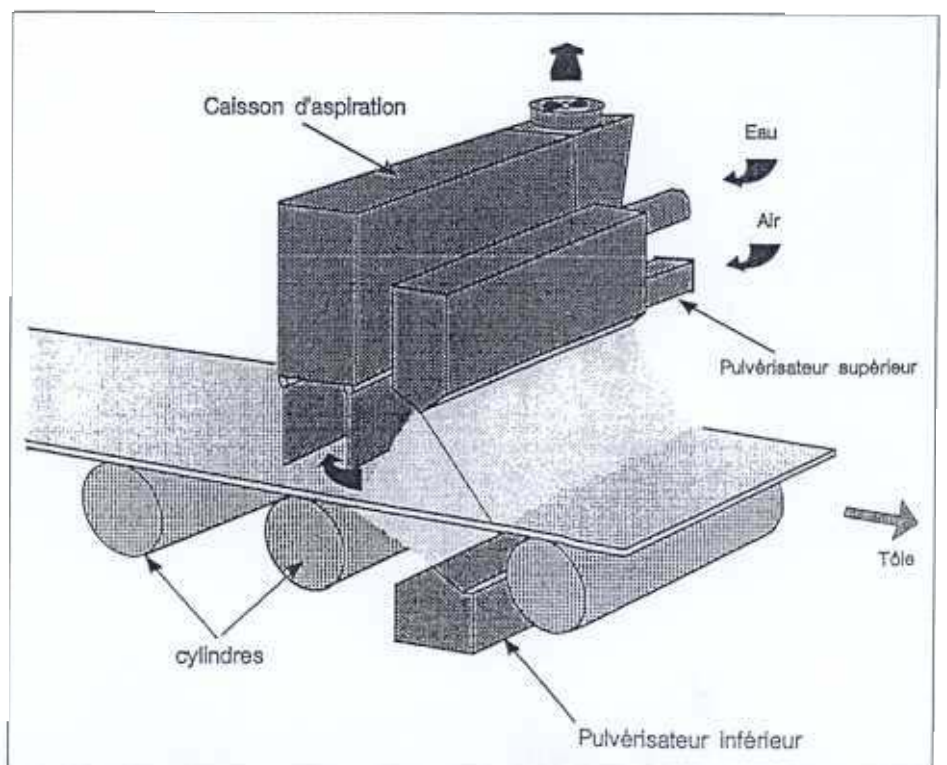


Fig.2 : Refroidissement accéléré doux (Machine ADCO).

1/3 ASPECT NORMATIF

- Les caractéristiques chimiques et mécaniques des tôles thermomécaniques sont définies par la norme européenne EN 10113 partie 3 publiée en 1993 relative aux aciers de construction à grains fins.
- Cette norme prend bien en compte les possibilités d'allègement des analyses.

A titre d'exemple, pour des tôles d'épaisseur ≤ 40 mm :

Tableau 1

Nuance	Etat N (EN 10113 partie 2)		Etat M (EN 10113 partie 3)	
	C max (%)	CEV max (%)	C max (%)	CEV max (%)
S355	0,20	0,43	0,14	0,39
S420	0,20	0,48	0,16	0,45
S460	0,20	à convenir avec le client	0,16	0,46

- Les caractéristiques chimiques et mécaniques spécifiées des nuances les plus couramment utilisées sont résumées dans les tableaux 2 et 3 ci-après :
- Ces tableaux matérialisent également les possibilités des tôleries de DH/GTS qui surpassent à tout point de vue les produits spécifiés par cette norme.
- A titre d'exemple, les aciers S355 et S460 (M ou ML) sont réalisables jusqu'à des épaisseurs respectives de 100 mm et 80 mm.
- Sur demande, nous pouvons garantir des valeurs de Carbone Equivalent de 0,36% et 0,42% respectivement pour les tôles

thermomécaniques S355 et S460 comme le montrent les tôles livrées pour la construction du Pont de Remoulins (cf § 4.) et les valeurs typiques indiquées au § 1.4.

La norme EN 10113 fait référence aux normes européennes EN 10029 et EN 10163 pour les parties : tolérances dimensionnelles, planéité et aspect.

1/4 CARACTERISTIQUES COMPAREES DES PLAQUES D'ACIER TM ET N

1/4/1 Nuance 355 (Tableaux 4 et 5)

L'écart de teneur en Carbone et Carbone Equivalent est de $60 \times 10^{-3}\%$ en faveur de l'état thermomécanique.

1/4/2 Nuance 460 (Tableaux 6 et 7)

Les écarts de teneur en Carbone et Carbone Equivalent sont respectivement de $80 \times 10^{-3}\%$ et de $130 \times 10^{-3}\%$ en faveur de l'état thermomécanique.

2/ AVANTAGES LIES A L'UTILISATION DES TOLES TM

2/1 INTERET DES TRAITEMENTS THERMOMECHANIQUES

- Les traitements thermomécaniques conduisent à un état et des propriétés qui ne peuvent être obtenus ou retrouvés par un traitement thermique seul. Ils sont donc réservés à la fabrication de produits dont la mise en œuvre est effectuée à froid (ou à tiède) et qui ne travaillent pas à haute température. Mais ils conduisent à des structures métallographiques beaucoup plus fines que celles des aciers normalisés. Ceci permet d'augmenter les propriétés de traction à composition chimique inchangée ou, à l'inverse, d'obtenir un grade d'acier donné avec une analyse plus légère et donc plus facile à mettre en œuvre, en particulier par soudage (cf Tableaux N° 4 à 7 et Figure 3).

- Tout cela se traduit par des avantages relatifs soit à la mise en œuvre soit à la conception des constructions métalliques comme le détaillent les paragraphes 2.2 et 2.3 ci-après.

2/2 BENEFICES DE MISE EN ŒUVRE

2/2/1 Fissuration à froid après soudage

- L'analyse très peu chargée de l'acier S355M lui confère une très faible susceptibilité à la fissuration à froid après soudage, si bien qu'il est possible de le souder sans préchauffage (Figure 4).

Tableau 2 : Nuance S355

Résumé de la Spécification NF EN 10113-3 (tôles épaisseur ≤ 83 mm) (extension de la norme pour les épaisseurs ≤ 100 mm)															
1) Composition chimique sur coulée (en %) :															
C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	V	Ti	Ni	Mo	N	CEV (f.ép.)			
												$\leq 0,18$	$> 0,18 \leq 0,20$	$> 0,20 \leq 0,22$	$> 0,22 \leq 0,24$
M	$\leq 0,14$	$\leq 1,80$	$\leq 0,028$	$\leq 0,40$	$\leq 0,50$	$\leq 0,02$	$\leq 0,06$	$\leq 0,10$	$\leq 0,06$	$\leq 0,30$	$\leq 0,20$	$\leq 0,015$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$	$\leq 0,40$
ML	$\leq 0,14$	$\leq 1,80$	$\leq 0,028$	$\leq 0,40$	$\leq 0,50$	$\leq 0,02$	$\leq 0,06$	$\leq 0,10$	$\leq 0,06$	$\leq 0,30$	$\leq 0,20$	$\leq 0,015$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$	$\leq 0,40$
Cr + Cu + Ni $\leq 0,30$															
2) Caractéristiques de traction imposées (M/ML - travers) :															
e (mm)	≤ 16	$16 < e \leq 40$	$40 < e \leq 63$	$63 < e \leq 100$											
Rm (N/mm ²) min	355	345	335	325											
Rm (N/mm ²)	450 - 610														
A (5,65 $\sqrt{S_0}$)	22 % min														
3) Valeurs minimales d'énergie de rupture en flexion par choc :															
Qualité	KV (moy. 3) min en J (°C) *														
	-20 -30 -40 -50														
M	L	40													
ML	L			27											
* Valeurs minimales d'extension de la NF EN 10113-3 sur épaisseur 100 mm livrées par DH-GTS															
ETAT DE LIVRAISON : TM															

Tableau 3 : Nuance S460

Résumé de la Spécification NF EN 10113-3 (tôles épaisseur ≤ 83 mm) (extension de la norme pour les épaisseurs tôles ≤ 90 mm)															
1) Composition chimique sur coulée (en %) :															
C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	V	Ti	Ni	Mo	N	CEV (f.ép.)			
												$\leq 0,18$	$> 0,18 \leq 0,20$	$> 0,20 \leq 0,22$	$> 0,22 \leq 0,24$
M	$\leq 0,18$	$\leq 1,70$	$\leq 0,028$	$\leq 0,40$	$\leq 0,50$	$\leq 0,02$	$\leq 0,05$	$\leq 0,12$	$\leq 0,05$	$\leq 0,45$	$\leq 0,20$	$\leq 0,025$	$\leq 0,45$	$\leq 0,45$	
ML	$\leq 0,18$	$\leq 1,70$	$\leq 0,028$	$\leq 0,40$	$\leq 0,50$	$\leq 0,02$	$\leq 0,05$	$\leq 0,12$	$\leq 0,05$	$\leq 0,45$	$\leq 0,20$	$\leq 0,025$	$\leq 0,45$	$\leq 0,45$	
Cr + Cu + Ni $\leq 0,30$															
2) Caractéristiques de traction imposées (M/ML - travers) :															
e (mm)	≤ 16	$16 < e \leq 40$	$40 < e \leq 63$	$63 < e \leq 70$	$70 < e \leq 80$										
Rm (N/mm ²) min	460	440	430	420	400										
Rm (N/mm ²)	530 - 720			510 - 680											
A (5,65 $\sqrt{S_0}$)	17 % min														
3) Valeurs minimales d'énergie de rupture en flexion par choc :															
Qualité	KV (moy. 3) min en J (°C) *														
	-20 -30 -40 -50														
M	L	40													
ML	L			27											
* Valeurs minimales d'extension de la NF EN 10113-3 sur épaisseur ≤ 80 mm livrées par DH-GTS															
ETAT DE LIVRAISON : TM															

APPLICATIONS

Tableau 4 : Analyse typique (en 10⁻³%) de la Nuance 355 (e = 50 mm) dans les états normalisés (N) et thermomécaniques (M).

Etat	C	Mn	P	S	Autres éléments	CEV*
Normalisé	150	1500	16	3,5	Si, Al, Nb	405
Thermomécanique	90	1500	16	1,5	Si, Al, Nb, Ti	345

Tableau 5 : Valeurs typiques des caractéristiques mécaniques de la Nuance 355 dans les états N et M.

Etat	Epaisseur (mm)	ReH (MPa)	Rm (MPa)	A5,65 _s (%)	KVL (-20°C) (J)	KVL (-50°C) (J)
Normalisé	20	405	550	29,5	200	
	50	375	535	30,5	200	
	100	352	522	31		135
	150	340	515	31,5		125
Thermomécanique	20	406	493	30	275	210
	50	410	530	26,5	300	275
	100	400	520	28	270	235

Tableau 6 : Analyse typique (en 10⁻³ %) de la Nuance 460 (e = 50 mm) dans les états normalisés (N) et thermomécaniques (M).

Etat	C	Mn	P	S	Autres éléments	CEV*
Normalisé	170	1650	13	1,5	Si, Al, Ni, Nb, V	520
Thermomécanique	90	1550	13	1,5	Si, Al, Ni, Nb, V, Ti	390

Tableau 7 : Valeurs typiques des caractéristiques mécaniques de la Nuance 460 dans les états N et M.

Etat	Epaisseur (mm)	ReH (MPa)	Rm (MPa)	A5,65 _s (%)	KVL (-20°C) (J)	KVL (-50°C) (J)
Normalisé	20	500	675	25	125	
	50	475	650	24,5	125	
	80	460	640	24		75
Thermomécanique	20	530	595	26		260
	50	490	575	23		240
	80	450	560	25		240

Dans les mêmes conditions, l'acier S355N nécessiterait un préchauffage entre 50°C et 100°C.

- Dans l'exemple suivant (Figure 5), les courbes de fissuration à froid obtenues par simulation reflètent bien les différences dues au carbone équivalent.

Pour une teneur en hydrogène de 5 ml/100g, la contrainte critique de fissuration est voisine de la limite d'élasticité pour la nuance S460M, alors qu'elle n'est que de 200 MPa pour l'acier normalisé de nuance équivalente S460N.

Ceci est confirmé par l'essai sur joint réel (Figure 5) qui montre que l'acier S460M peut être soudé sans préchauffage alors que le S460N nécessiterait un préchauffage à 100°C dans cette même configuration d'assemblage âme - semelle.

- Le risque extrêmement faible de fissuration à froid conduit à une simplification des procédures de soudage :

- préchauffage non nécessaire pour la majorité des joints soudés,

- pas de température minimale à respecter entre passes de soudage dans la plupart des cas,

- possibilité de souder des pièces extrêmement bridées sans risque majeur de fissuration,

- teneur en hydrogène des produits d'apport moins critique lorsque l'on doit souder des tôles thermomécaniques au lieu de tôles normalisées,

*procédure de soudage, plus permissive, améliorant la confiance du maître d'œuvre quant à l'intégrité du joint soudé.

- Tous ces avantages génèrent des gains quantifiables ou non relatifs aux :

- coût des produits d'apport,

- coût des opérations d'étuvage et de gestion des stocks d'électrodes,

- coût des opérations de préchauffage et des contrôles associés,

- coût des réparations,

- amélioration de la productivité des soudeurs grâce à l'amélioration des conditions de travail,

- soudage en extérieur plus facile,

- fiabilité des soudures,

- raccourcissement du planning de préfabrication,

- diminution des frais financiers. .

2/2/2 Ténacité des joints soudés

- Toujours grâce à son analyse optimisée, l'acier S460M permet de réaliser des joints soudés présentant une excellente ténacité (Figure 6).

Ici, le niveau de ténacité dans un joint à 25 kJ/cm est supérieur à 150 J à -40°C.

La comparaison avec la nuance normalisée confirme le gain très important de ténacité.

- Un acier S355M a été soudé dans des conditions extrêmes d'énergie de soudage soit 270 kJ/cm (Figure 7), c'est-à-dire 10 à 20 fois l'apport énergétique des procédés de soudage classiques tels que le soudage sous flux en poudre et le soudage à l'électrode enrobée.

Le procédé utilisé est le procédé Vertishield (electrogas).

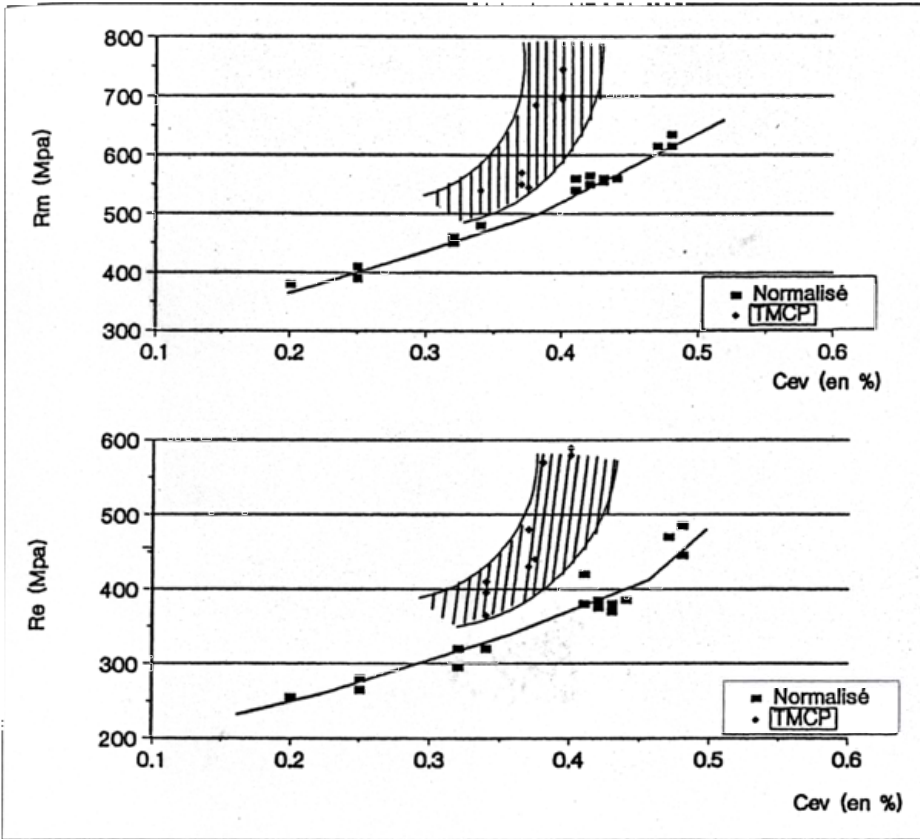
Malgré ces conditions très défavorables à l'obtention d'une bonne ténacité en zone thermiquement affectée par la chaleur du soudage, les résultats sont acceptables tels que présentés dans la Figure 8.

- Ces dernières observations conduisent aux possibilités suivantes :

- Augmentation possible de l'énergie de soudage,

* CEV : Valeur d'équivalence Carbone.

APPLICATIONS



- Amélioration de la ténacité des zones affectées thermiquement donc une plus grande sécurité des constructions vis à vis du risque de rupture fragile à énergie de soudage équivalente.
- Ces possibilités génèrent des gains quantifiables ou non relatifs à :
 - la réduction des temps donc des coûts de soudage,
 - l'amélioration de la sécurité des constructions.

Fig. 3 : Evolution Re et Rm avec CEV aciers TM et N

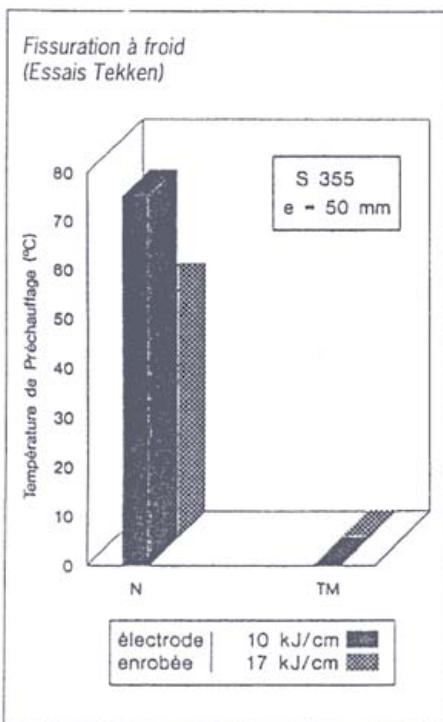


Fig. 4 : Température de préchauffage

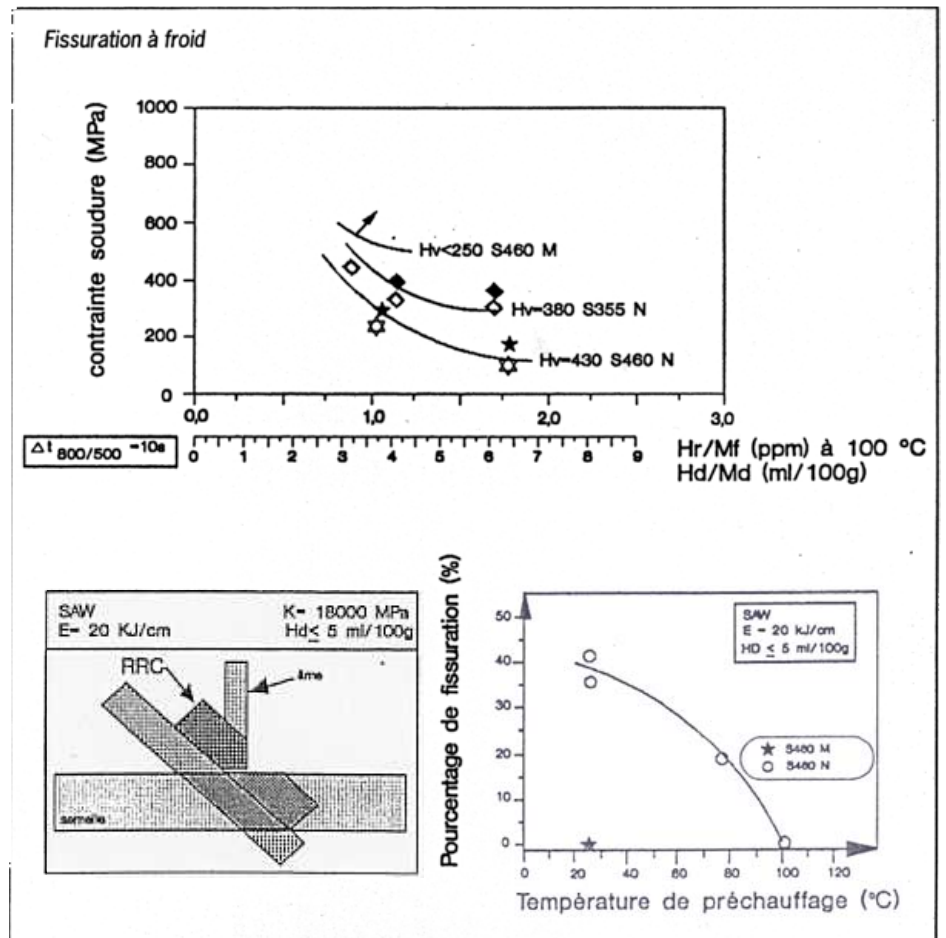


Fig. 5 : Définition des conditions de préchauffage

APPLICATIONS

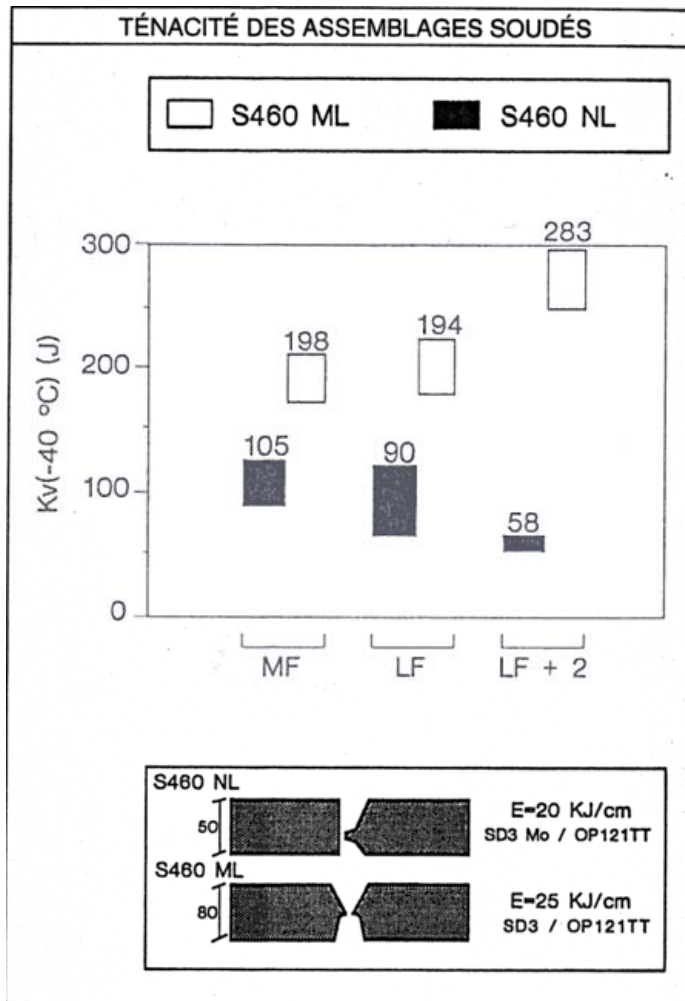


Fig. 6 : Résultats d'essais de soudage bout à bout S.A.W.

2/3 ACCES A DE NOUVELLES CONCEPTIONS

- Les conditions de mise en œuvre des tôles thermomécaniques S460M, sont comme nous l'avons vu, extrêmement simples voire même moins contraignantes que les conditions de mise en œuvre des aciers conventionnels S355N.
- La facilité de mise en œuvre de ces nouveaux aciers par rapport aux aciers S460N (normalisés) va en permettre un usage accru.
- Les avantages sont les suivants :
 - l'allègement des structures (Figure 9),
 - la réduction des coûts de préfabrication / fabrication (Figure 10),
 - l'accès à de nouvelles conceptions (Figures 11a et 11b).

Les figures 11a et 11b ci-après montrent l'utilisation d'acier S460 thermomécanique pour la construction d'ouvrages d'art.

Fig. 11a : Pont de Remoulins (Gard)

"Utilisation d'aciers S460 M et ML là où il est utile pour les tronçons sur appuis intermédiaires (réduction des épaisseurs de 120 mm en S355 à 80 mm en S460)"

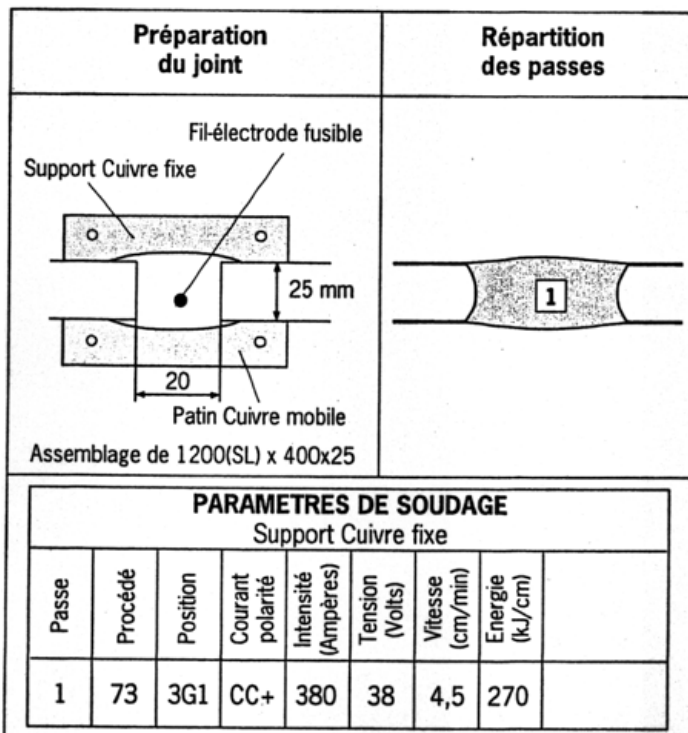


Fig. 7 : Procédé de soudage Vertishield (Lincoln)

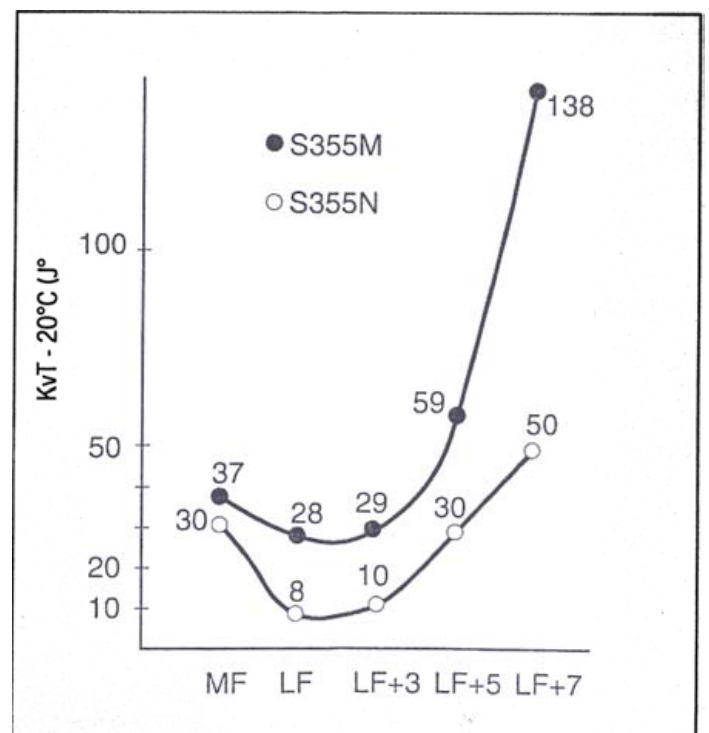


Fig. 8 : Ténacité d'un assemblage bout à bout Vertishield

APPLICATIONS

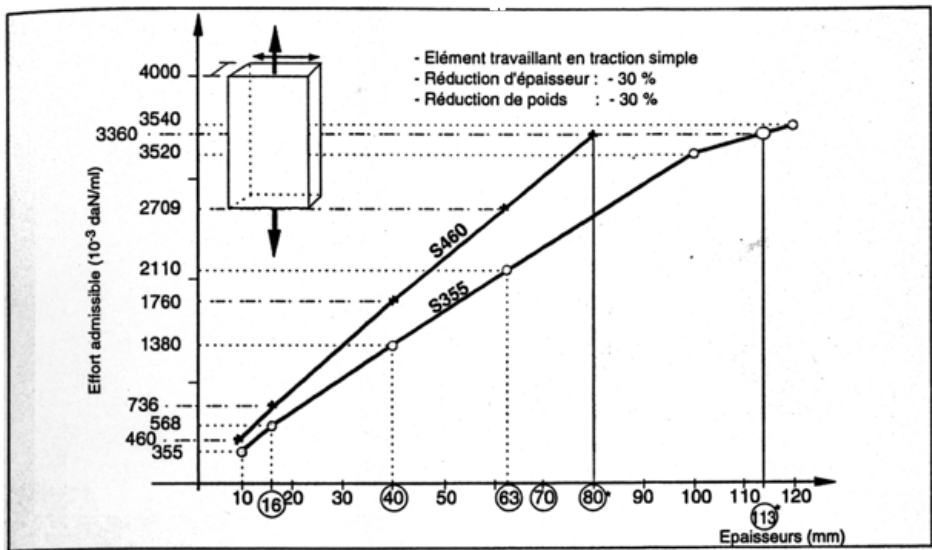


Fig. 9 : Réduction des poids

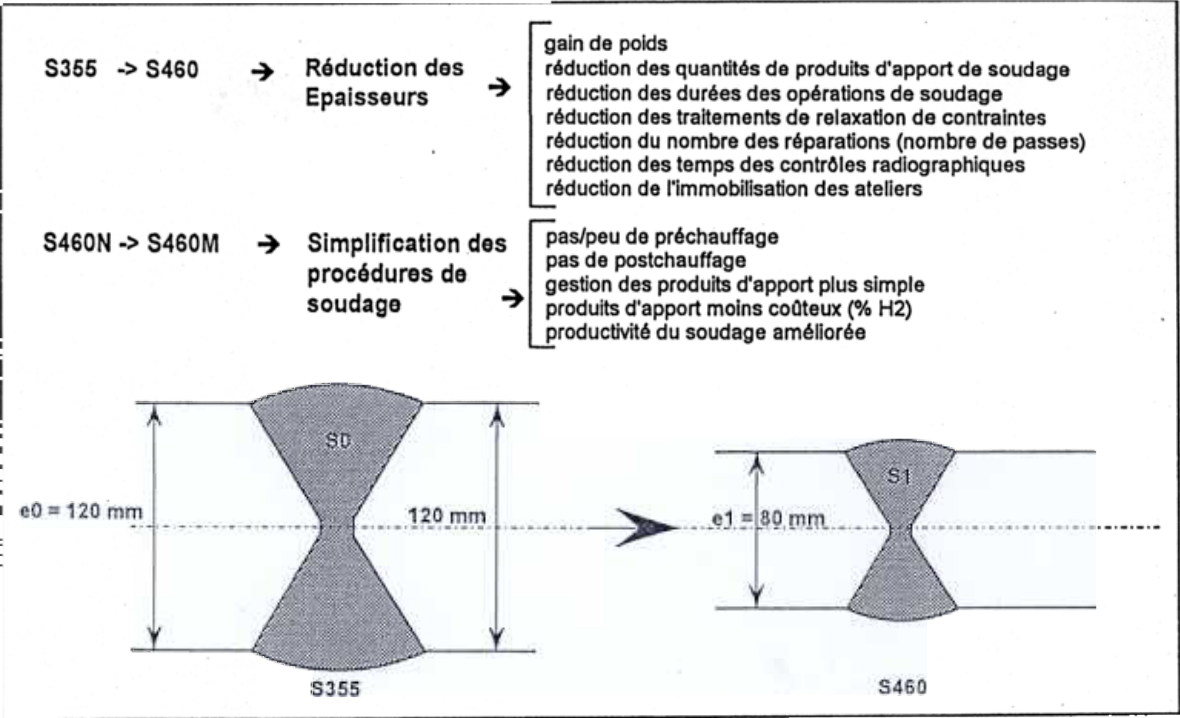


Fig. 10 : Réductions des coûts de fabrication entraînées par la substitution du S355 par le S460 et du S460N par le S460M.

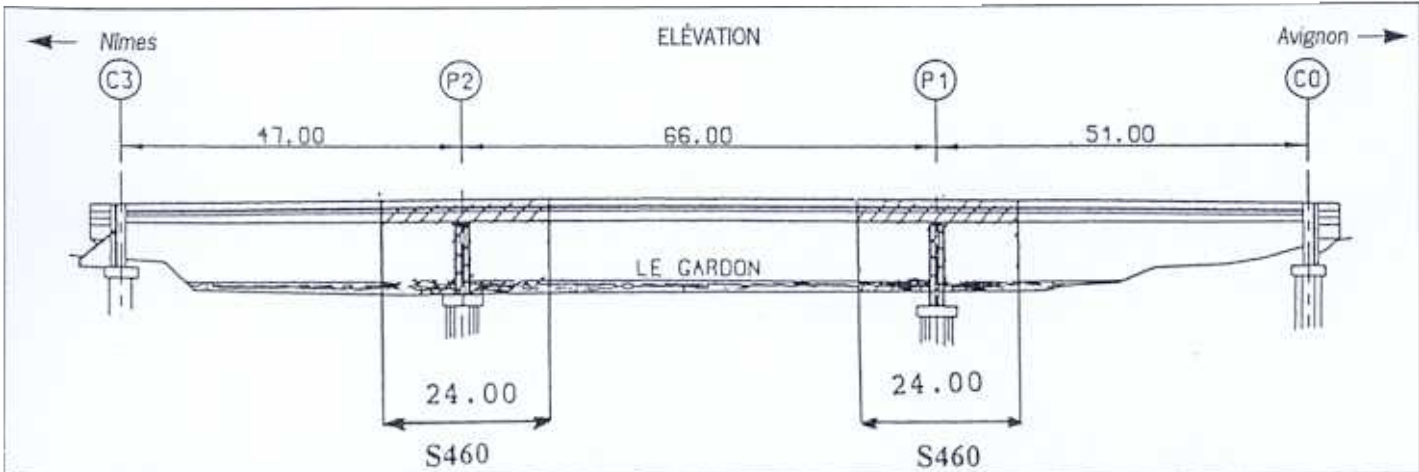


Fig. 11a : Pont de Remoulins (Gard)
 'Utilisation d'aciers S460 M et ML là où il est utile pour les tronçons sur appuis intermédiaires (réduction des épaisseurs de 120 mm en S355 à 80 mm en S460)'

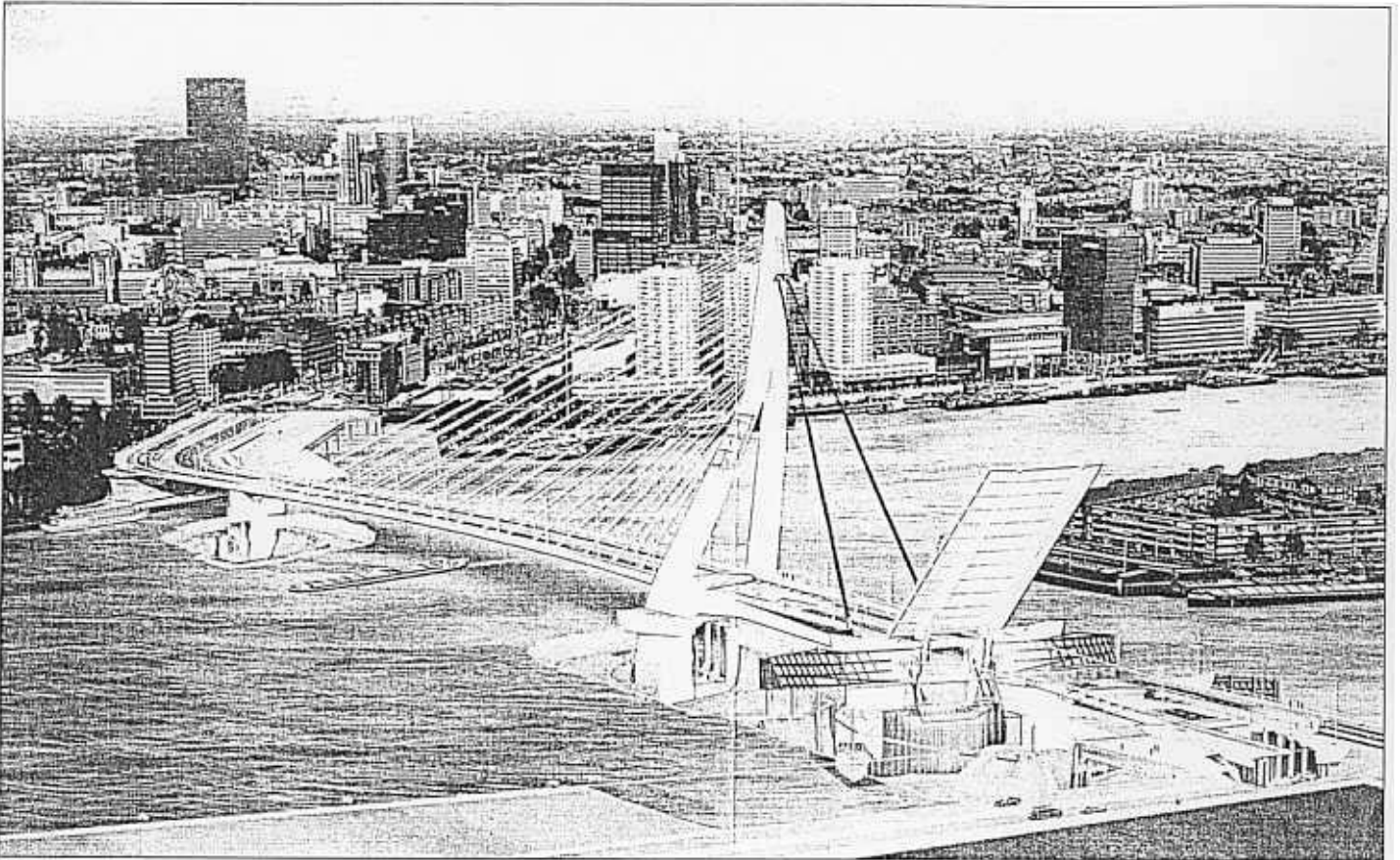


Fig. 11b : Pont Erasmus (Rotterdam). "Utilisation d'aciers S460 M et ML pour la fabrication du pylône. En effet, en raison de son esthétique particulière, seul un acier nuance S460 en permet une construction économique".

3/ DOMAINE D'UTILISATION DES TOLES TM

- Ces tôles sont utilisées pour la fabrication des grosses poutres soudées (P.R.S.) que l'on retrouve dans les ouvrages d'art, les ponts roulants, les bâtiments industriels, les structures de parking.
- Ces tôles sont également utilisées pour la fabrication de pylônes de ponts à haubans, de grosses viroles destinées à la fabrication de grandes structures tubulaires à treillis, par exemple pour les structures de couvertures de stades.
- D'autres secteurs d'activité tels que l'off-shore (allègement des superstructures de plates-formes) et la construction navale (soudabilité) utilisent aussi ces tôles thermomécaniques.
- Les premières livraisons industrielles de DH/GTS en aciers thermomécaniques ont démarré en 1990. A ce jour, plus de 50 000 tonnes ont été produites et mises en œuvre (Figure 12).
- Des réalisations en construction métallique incorporant des aciers thermomécaniques de DH/GTS sont référencées ci-contre (Figure 13).

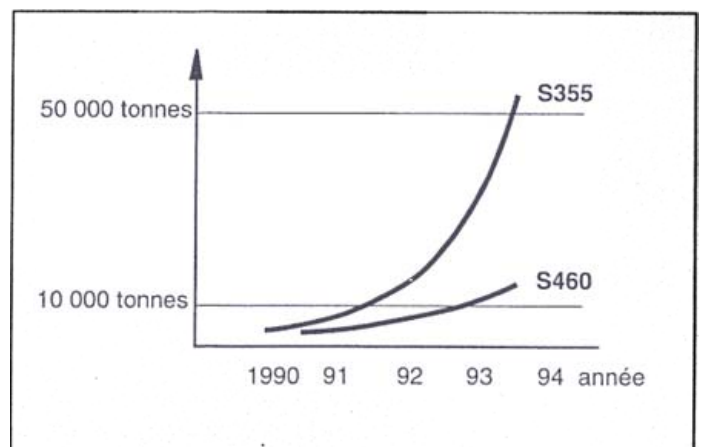


Fig. 12 : Livraison DH-GTS d'aciers TM

Norvège	Pont de BERGSOYSUNDET	3 000 t	S 460
Pays-Bas	Pont de ZUID BEVELAND (1992)	1 700 t	S355/S460
	Barrage MAESLANT KERING (1992/1996)	20 000 t	S355
	Pont ERASMUS (1993/1996)	2 000 t	S460
Allemagne	Atelier de fonderie (1992)	200 t	S355
France	Pont de Remoulins (1993)	400 t	S355/S460

Fig. 13 : Références de livraisons d'aciers TM DH-GTS en Construction Métallique

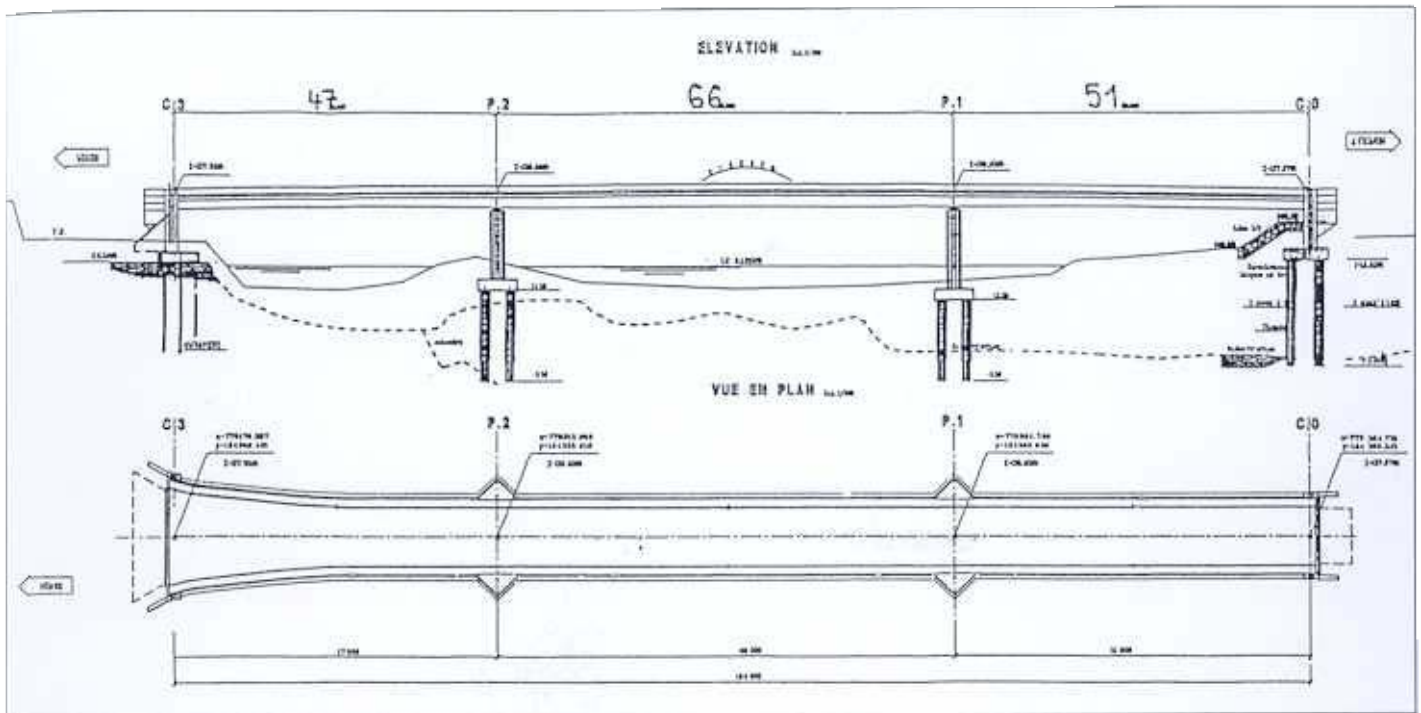


Fig. 14 : Pont de Remoulins, schéma de la structure.

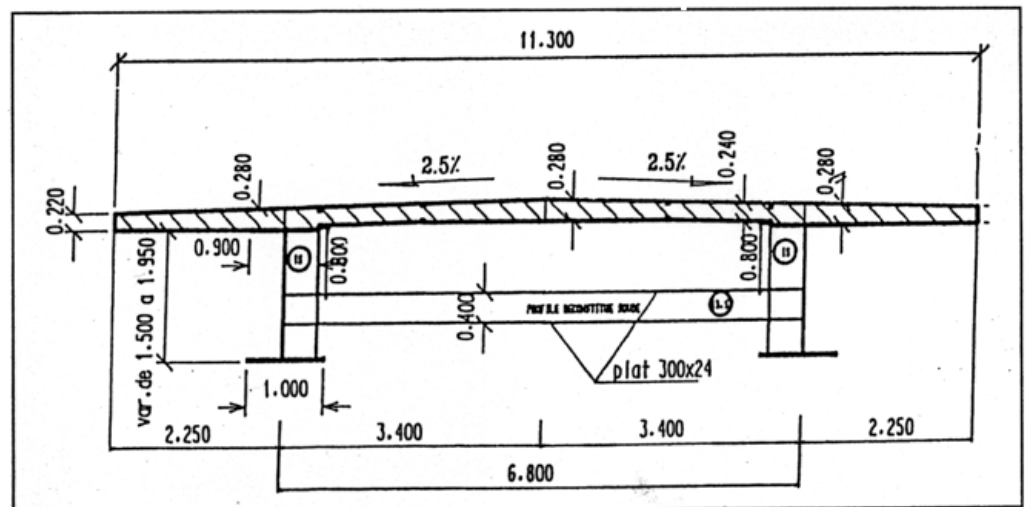


Fig. 15 : Pont de Remoulins, schéma de la structure.

4/LE PROJET DU PONT DE REMOULINS

4/1 PRESENTATION

- L'ouvrage qui permet actuellement à la RN 86 de franchir le Gardon à Remoulins est un pont suspendu construit en 1935. Il comporte une travée de 122,50 m et deux travées d'accès non suspendues de 25,50 m et 21,50 m.

- Suite à l'effondrement du pont de Sully-sur-Loire, des investigations ont montré qu'il existait un risque de rupture fragile important au niveau des tirants d'ancrage et des suspentes. Une étude a été menée afin de choisir entre réparation et

reconstruction du Pont de Remoulins et c'est la dernière solution qui a été considérée comme la plus satisfaisante.

- Les fortes contraintes hydrauliques et géotechniques justifiaient la recherche d'une solution avec un minimum de piles en rivière. Le SETRA a donc conseillé de retenir un ouvrage à trois travées en ossature mixte, de portées 47 m, 66 m et 51 m (Figure 14).

- Les études ont été effectuées par l'agence Europe Etudes Gecti de Marseille et par le SETRA. Les Laboratoires Régionaux des Ponts & Chaussées de Lyon et de Nancy ont défini les prescriptions particulières de mise en œuvre de l'acier thermo-mécanique et assurent le contrôle extérieur des soudures.

- Les entreprises retenues à l'issue de la consultation des entreprises sont Eiffel Construction Métallique pour la charpente métallique et Chantiers Modernes pour le génie civil.

- Le tablier a une largeur courante de 11,30 m et supporte deux voies de circulation. Il s'élargit de 11,30 m à 16,29 m sur la travée rive droite pour le raccordement au giratoire. Sa structure est constituée de deux poutres métalliques de hauteurs variables de 1,95 m en travée centrale à 1,50 m en rive, supportant un hourdis en béton armé. Ces poutres sont reliées par des entretoises, sauf dans la travée rive droite et sur les piles où les entretoises sont remplacées par des pièces de pont qui se prolongent en console pour supporter les encorbellements (Figure 15).

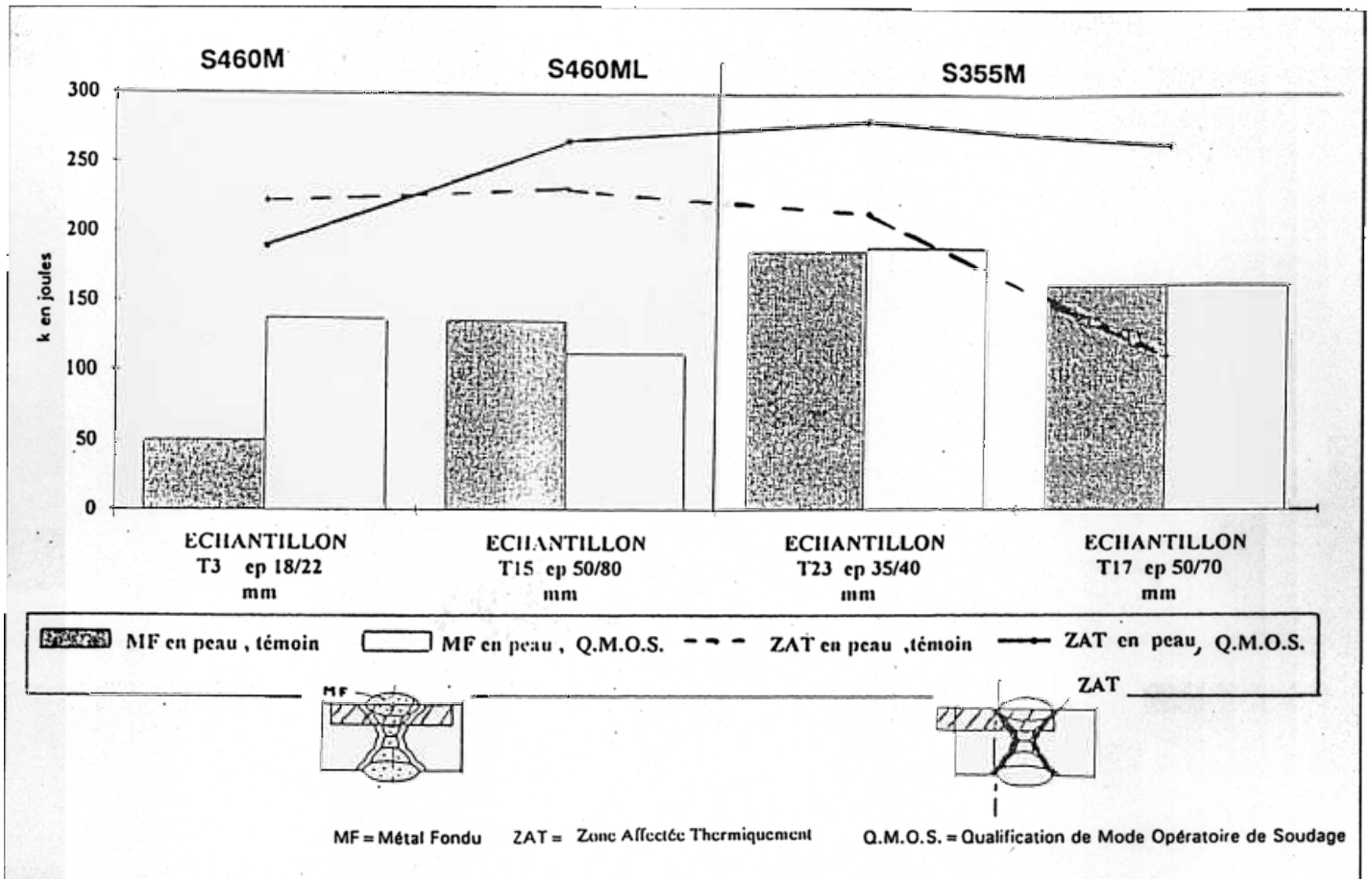


Fig. 16 : Résultats de résilience

4/2 EMPLOI DE L'ACIER THERMO-MÉCANIQUE

- La totalité de l'ouvrage est en acier thermomécanique produit par GTS Industries Dunckerque.
- Les poutres principales sont en acier S355 en travée et en acier S460 sur une longueur de 24 m au droit de chacune des piles intermédiaires. Les entretoises et les pièces de pont sont en acier S355.
- Les qualités utilisées sont la qualité normale (énergie de rupture garantie à -20°C) pour les épaisseurs inférieures ou égales à 50 mm en S460 et inférieures ou égales à 80 mm en S355, et la qualité basse température (énergie de rupture garantie à -50°C) pour les épaisseurs supérieures ou égales à 50 mm en S460.
- L'acier S460 est utilisé là où il est utile : pour les tronçons sur appuis intermédiaires. Son emploi permet de limiter l'épaisseur des semelles dans cette zone à 80 mm (contre 120 mm si l'on avait employé de l'acier S355).

- Par contre, l'acier S460 n'a pas été utilisé en travée car la vérification à la fatigue de l'ouvrage a conduit à limiter les variations de contrainte en travée, ce qui impose une épaisseur minimale de la semelle inférieure indépendamment de la limite d'élasticité de l'acier. L'emploi d'un acier à haute limite d'élasticité n'aurait donc pas permis de diminuer l'épaisseur de la semelle inférieure dans cette zone.
- Le tonnage total d'acier utilisé pour la construction des poutres principales de la charpente métallique est d'environ 350 tonnes. L'emploi de l'acier S460 a permis de réduire le tonnage de 34 tonnes (~10 %) par rapport à une solution entièrement en acier S355.

4/3 PROCÉDURE DE SOUDAGE

- Le principal intérêt de l'acier thermomécanique réside dans ses très bonnes caractéristiques de soudabilité : le carbone équivalent est faible (CEV 0,36% pour la nuance S355M en épaisseur 70 mm et CEV 0,38% pour la nuance S460ML en épaisseur 80mm), la résistance à la fissuration à froid est très grande, et la ténacité

de la zone affectée thermiquement est nettement supérieure à celle obtenue avec des aciers normalisés.

- De façon très schématique, on peut dire qu'un acier S355 thermomécanique peut, dans la majorité des cas, être soudé sans préchauffage, ce qui simplifie considérablement l'opération de soudage. Et un acier S460 thermomécanique peut en général être soudé dans des conditions similaires à l'acier S355 normalisé utilisé actuellement pour la construction des ouvrages d'art. Le CEV particulièrement bas du S460ML en épaisseur 80 mm en a permis un soudage sans préchauffage.
- L'innovation principale réside donc dans la mise en œuvre de modes opératoires spécifiques de soudage. GTS Industries a étudié dans ses laboratoires et centres de recherche les procédures de soudage adaptées à cet acier et donné des recommandations sur les produits d'apport à employer. Pour bénéficier des possibilités de soudage sans préchauffage, pour toutes les configurations de joints soudés, nous avons utilisé des produits d'apport à bas hydrogène.

- Il faut également signaler que certaines techniques utilisées en construction métallique ont fait l'objet de recommandations spéciales : il s'agit des chaudes de retrait (chaudes linéaires indifférentes et chaudes ponctuelles avec limitation de température à 700°C).

- Pour le soudage en usine, les procédés automatiques sous flux en poudre et semi-automatique avec un fil fourré sous gaz ont été mis en œuvre. Les modes opératoires de soudage correspondants ne comportaient pas de préchauffage. Ils ont tous été qualifiés sans problèmes, et ont permis de vérifier l'excellent niveau de ténacité des assemblages.

- Des procédures de réparation ont également été qualifiées; ces procédures prévoyaient l'utilisation d'électrodes enrobées à très bas hydrogène, ou le procédé Innershield.

- Pour le soudage sur le site, l'entreprise a choisi le procédé Innershield (Soudage avec fil fourré sans gaz) sans préchauffage. Le fil fourré employé est le fil NR 400, car il permet d'obtenir les résiliences voulues (à - 40°C) dans le métal fondu avec une bonne marge de sécurité. Toutefois, deux joints bout à bout de semelle avec des électrodes enrobées à très bas hydrogène sans préchauffage ont été réalisés afin de comparer les résultats obtenus avec ceux du procédé Innershield.

- De nombreux témoins de production ont été réalisés durant la fabrication de l'ouvrage. Ils ont permis de confirmer l'excellente soudabilité des matériaux employés. Ils ont également permis de mesurer l'excellente marge de sécurité offerte par cet acier compte tenu des variations toujours possibles entre les paramètres de soudage qualifiés et les paramètres de soudage relevés en production (Figures 16, 17 et 18).

- L'usage de ces aciers a induit des gains de mise en œuvre significatifs tels qu'exprimé au paragraphe 2 (en faisant abstraction des coûts de qualification des procédés de soudage nécessaires pour ce nouvel acier, et des coûts des témoins de production et des suivis particuliers inhérents à ce type de percée technologique).

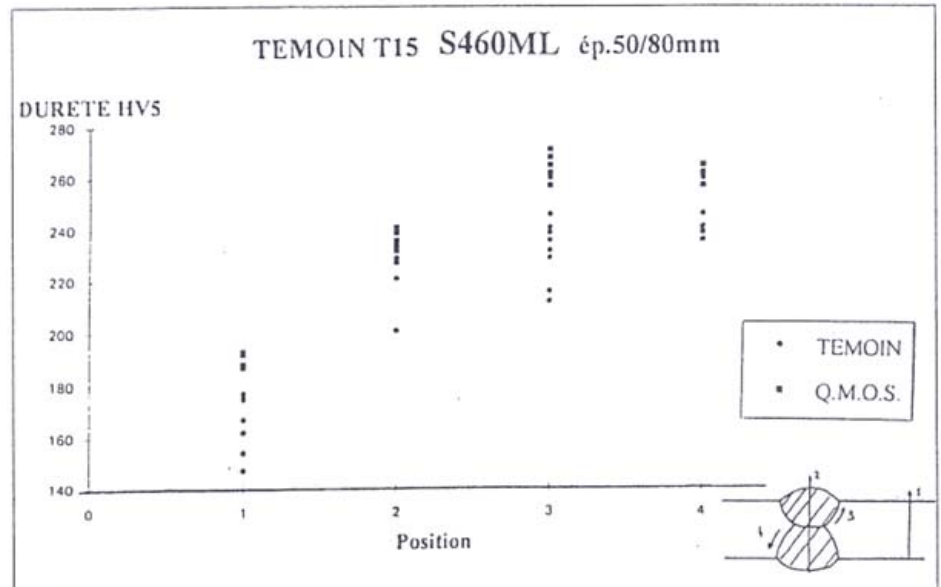


Fig. 17 : Résultats de dureté HV5

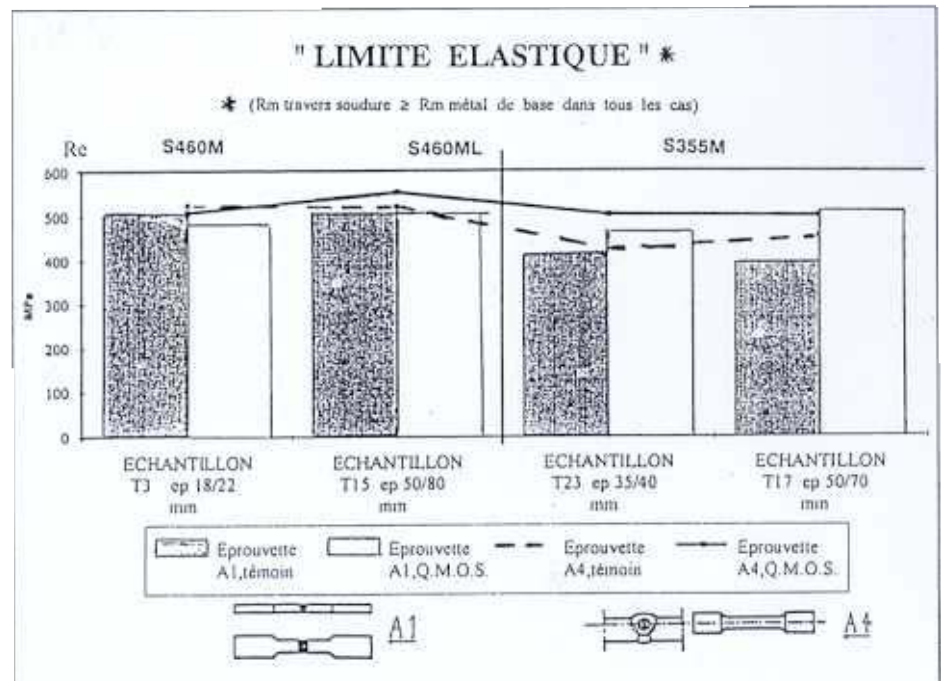


Fig. 18 : Résultats de traction