

Documents scientifiques et techniques

Les aciers à Haute Limite d'Elasticité

Octobre 2012



AVANT-PROPOS

Le guide AFGC de 1997 consacré «aux aciers thermomécaniques» se terminait par le souhait que ces aciers poursuivent leur développement et qu'à la suite de cette étape, des aciers plus performants tels les trempés-revenus soient aussi de plus en plus utilisés et fasse l'objet d'un futur document...

Cette prévision se trouve aujourd'hui réalisée. Les aciers à Haute Limite d'Elasticité ont poursuivi leur développement tant en nombre et étendue d'emploi dans les travaux publics, le bâtiment ou l'industrie, qu'en terme d'augmentation des caractéristiques mécaniques. Et l'ensemble des professionnels - sidérurgistes, concepteurs, entreprises de construction - a souhaité par ce guide rassembler son expérience, en faire l'analyse et dresser les perspectives, et ce sur toute la gamme des HLE.

Le travail accompli est remarquable. Il est à la fois techniquement détaillé et très didactique. Il traite de tous les thèmes : la gamme des produits, la réglementation, l'élaboration et les caractéristiques, le soudage, le comportement en fatigue, la conception, les calculs selon les eurocodes, les aspects économiques et environnementaux, les références d'utilisation en France et à l'étranger. La présentation de calculs détaillés aux eurocodes d'un ouvrage comportant des sections hybrides, c'est dire avec des tôles en différentes nuances d'acier HLE, est particulièrement intéressante.

Je renouvelle à tous les participants de ce guide mes remerciements pour ce travail, qui permet de mettre à disposition de la collectivité une base de savoirs sur les aciers HLE et de promouvoir ainsi le plus haut niveau du génie civil français.

Thierry KRETZ

Président du comité scientifique de l'AFGC

Ce document a été établi par un groupe de travail constitué de :

Vincent	BABOZ	ex-COYNE ET BELLIER
Daniel	BITAR	CTICM
Nicolas	CAILLET	ARCELOR MITTAL
Corinne	CHOVET	AIR LIQUIDE WELDING
Laurent	COURREGELONGUE	BE VERITAS
Christian	CRÉMONA	SETRA - CTOA
René	CREUTZ	ARCELOR MITTAL
Boris	DONNAY	ARCELOR MITTAL Sections
Robert	DUBOIS	BAUDIN CHATEAUNEUF
Thierry	DUCLOS	SYSTRA
Bernard	GAUSSET	ARCADIS
Marc	HEVER	ARCELOR MITTAL Sections
Wasoodev	HOORPAH	MIO
Michel	HUTHER	BE VERITAS
Pascal	LEPERS	EIFFAGE Construction Métallique
Maden	LUKIC	CTICM
Jean	MAC FARLANE	INGEROP
François	MALTRUD	INSTITUT DE SOUDURE
Cécile	MANUELLI	DILLINGER HÜTTE G.T.S.
Hervé	MARNEFFE	CETE Est-LRPC Nancy
Jean-Luc	MARTIN	SNCF - Direction de l'ingénierie
Jean	MENIGAULT	BN Acier
Serge	MONTENS	SYSTRA
Jean-Michel	MOREL	CETE Est-LRPC Nancy
Stéphane	PAUVERT	BAUDIN CHATEAUNEUF
Marc	PERRIER	Ets GAGNE
Aude	PETEL	SETRA - CTOA
Joël	RAOUL	Consultant
Jacques	RESPLENDINO	DIR-MED
Michel	ROYER-MULLER	CONSTRUIRACIER (ex OTUA)
Falko	SCHRÖTER	DILLINGER HÜTTE - G.T.S.
Fereydoun	TAVAKOLI	CETE LYON
Jean-Michel	VIGO	Consultant

Placé sous la direction de :

Thierry	KRETZ	SETRA - CTOA
---------	-------	--------------

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	3
INTRODUCTION	9
1. NORMALISATION ET REGLEMENTATION	10
1-1 PRODUITS	10
1-1-1 Normalisation (NFEN 10 025)	10
1-1-2 La procédure d'agrément (CCTG, marque NF Acier, marquage CE)	24
1-1-3 Exigences de choix des aciers	24
1-2 CONCEPTION ET CALCULS	28
1-2-1 Analyse globale plastique	29
1-2-2 Ductilité	29
1-2-3 Calcul des assemblages	30
1-2-4 Vérification à la fatigue	31
1-2-5 Application aux structures définies par les parties EN 1993-2 à EN 1993-6	32
1-3 LES DOCUMENTS D'EXECUTION ET LA QUALITE D'EXECUTION	32
1-3-1 Introduction	32
1-3-2 Les principales options de l'EN 1090-2	32
1-3-3 L'organisation de la qualité	35
1-3-4 Les normes associées à l'EN 1090-2	36
1-3-5 Matériaux et produits	36
1-3-6 La Directive « Produits de la Construction »	38
1-3-7 Les normes de produits	40
1-3-8 Les normes de soudage et de contrôle	41
2. ELABORATION ET PROPRIETES DES ACIERS HLE	47
2-1 COMPOSITION CHIMIQUE ET STRUCTURE DES ACIERS HLE	47
2-1-1 Influence de l'analyse sur les caractéristiques mécaniques	47
2-1-2 Influence des conditions de refroidissement sur la structure des aciers	50
2-2 ELABORATION DES ACIERS HLE	51
2-2-1 Influence du processus de fabrication sur les propriétés des aciers	51
2-2-2 Les différents processus de fabrication : synthèse	54
2-3 LES PLAQUES OU TÔLES QUARTO	56
2-3-1 Gamme dimensionnelle pour les états de livraison N, M et Q	56
2-3-2 Les procédés de fabrication des aciers à hautes limites d'élasticité	57
2-3-3 Propriétés des aciers à Hautes Performances	65
2-3-4 Résistance au feu	69
2-3-5 Résistance à la corrosion	70

2-4 LES POUTRELLES HLE	70
2-4-1 Procédé de fabrication et gamme dimensionnelle	70
2-4-2 Propriétés mécaniques et chimiques des aciers S460 thermomécaniques	72
2-4-3 Résistance au feu des aciers S460M comparés aux aciers conventionnels	77
2-4-4 Comportement en fatigue d'assemblages soudés en profilés S460M	79
2-4-5 Comportement en flambement des profilés S460M	80
2-4-6 Profilés S460M et construction parasismique	82
3. MISE EN ŒUVRE DES ACIERS HLE	83
3-1 LE SOUDAGE	83
3-1-1 Introduction	83
3-1-2 Aciers de nuance S 460 M	85
3-1-3 Aciers de nuance S 690 Q	103
3-1-4 Cas du soudage hétérogène acier S460 sur acier S690	113
3-1-5 Les procédures de réparation en soudage	113
3-2 AMELIORATION DU COMPORTEMENT EN FATIGUE DES ASSEMBLAGES SOUDES	114
3-2-1 Les principes des techniques d'amélioration de la tenue en fatigue	117
3-2-2 Réduction de la concentration de contrainte en pied de cordon	119
3-2-3 Création au niveau du pied de cordon d'un champ de contraintes résiduelles de compression	120
3-2-4 Les gains effectifs possibles - la position des textes	123
3-2-5 Parachèvement des cordons de soudure vis-à-vis des contraintes géométriques	125
3-2-6 Influence de la résilience des aciers HLE sur la fatigue	125
4. CONCEPTION	127
4-1 INTRODUCTION	127
4-2 PONTS DE GRANDES PORTEES	128
4-2-1 Répartition matière longitudinale : semelles	129
4-2-2 Répartition matière longitudinale : âmes	130
4-2-3 Contraintes locales au lancement - Patch Loading	131
4-2-4 Condition de déformabilité	131
4-3 PONTS TREILLIS	131
4-4 PONTS DE PETITES PORTEES	132
4-5 PONTS A OSSATURES TUBULAIRES	134
4-6 CONCEPTION DE DETAIL	134
4-6-1 Raidisseurs et platines d'appuis	135
4-6-2 Goussets dans les poutres treillis	135
4-6-3 Pièces d'accrochage des câbles et suspentes	135

4-6-4 Dalles orthotropes	135
4-7 OUVRAGES SPECIAUX	138
5. CALCULS ET JUSTIFICATIONS DES STRUCTURES EN HLE	140
5-1 INTRODUCTION	140
5-2 JUSTIFICATIONS THEORIQUES ET EXPERIMENTALES POUR L'UTILISATION DES POUTRES HYBRIDES	141
5-2-1 Généralités	141
5-2-2 Eléments de justification	142
5-2-3 Modélisation numérique	162
5-2-4 Recommandations pour le calcul des poutres hybrides	163
5-3 BIPOUTRES MIXTES HYBRIDES (travée principale 80 m)	165
5-3-1 Présentation des trois solutions (S355 - S355/S460 - S460/S690)	165
5-3-2 Hypothèses pour le dimensionnement des solutions hybrides	169
5-3-3 Détermination des zones fissurées (solutions hybrides)	172
5-3-4 Exemple de justification d'une solution hybride - solution 2.	174
5-3-5 Tonnage d'acier	183
5-3-6 Vérifications à la fatigue	184
5-4 CAISSONS MIXTES HYBRIDES (travée principale 120 m)	195
5-4-1 Présentation des deux solutions (S355 - S460/S690)	195
5-4-2 Diagrammes des efforts M et V à l'ELU dans les deux ouvrages	197
5-4-3 Tonnage d'acier et chiffrage des différentes solutions	201
5-5 BIPOUTRE MIXTE INNOVANT AVEC POUTRES HYBRIDES (travée principale 130 m)	203
5-5-1 Présentation des deux solutions (S355 - S460/S690)	203
5-5-2 Tonnage d'acier et chiffrage des différentes solutions	205
6. ASPECTS ECONOMIQUES, ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX	207
6-1 ASPECTS ECONOMIQUES	207
6-2 ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX	224
6-2-1 Les atouts de l'acier face au développement durable	224
6-2-2 Déclaration environnementale des aciers de construction (EPD)	225
6-2-3 Une approche développement durable pour les ponts métalliques	226
6-2-4 Conclusion	229
7. LES ACIERS A HAUTES PERFORMANCES DANS LE MONDE	231
7-1 LES ACIERS A HAUTES PERFORMANCES AUX ETATS-UNIS	231
7-1-1 Historique du développement des aciers HPS 70 et HPS 100W	231

7-1-2 Les propriétés des aciers HPS 70 et HPS 100 W	233
7-1-3 Mise en œuvre des aciers HPS 70 W et HPS 100 W	235
7-1-4 Performance de résistance à la corrosion atmosphérique	235
7-2 LES ACIERS A HAUTES PERFORMANCES AU JAPON	236
7-2-1 Historique du développement des aciers BHS 500 et BHS 700	236
7-2-2 Les propriétés des aciers BHS 500 et BHS 700	237
7-2-3 Mise en œuvre des aciers BHS 500 W et BHS 700 W	237
7-3 REFERENCES D'UTILISATION	238
7-3-1 Ouvrages d'art	238
7-3-2 Constructions Offshore, construction hydraulique	245
7-3-3 Grues télescopiques	249
7-3-4 Sous-marins	250
7-3-5 Pipelines	250
8. CONCLUSIONS	252
9. SIGLES ET ABREVIATIONS	253
10. BIBLIOGRAPHIE	255

INTRODUCTION

En raison de leurs excellentes caractéristiques mécaniques, associées à leurs très bonnes propriétés de mise en œuvre dépendant des épaisseurs et nuances, les aciers à hautes performances également appelés HLE comme aciers à Haute Limite d'Elasticité, sont de plus en plus fréquemment utilisés dans des domaines très variés de la construction, comme l'offshore pétrolier (structures et conduites sous-marines ~550 MPa), les conduites forcées (~700 MPa), la construction d'engins de levage (~1100 MPa), les coques de sous-marins nucléaires (~1000 MPa), les bâtiments de grandes hauteurs (~460 MPa), les ouvrages d'art (~460 MPa), etc. Pour ces aciers la gamme des limites d'élasticité s'étend de 420 MPa à plus de 1100 MPa. En ce qui concerne la construction d'ouvrages d'art, les normes produits, les règlements de calculs et normes d'exécution couvrent en Europe une gamme de nuances d'aciers plus réduite toutefois largement suffisante compte-tenu des besoins identifiés (R_e : 420 MPa ~ 700 MPa).

L'utilisation de ces aciers est plébiscitée par de nombreux usages et gains. Par exemple, contraindre les épaisseurs à des niveaux raisonnables n'excédant pas 150 mm pour des éléments de structures particulièrement sollicités, réduire le poids propre à des fins de descentes de charges maîtrisées par exemple, à des fins d'optimisation des opérations de soudage et, en corollaire, dans le contexte du développement durable, en vue de réduire les énergies consommées et les émanations de dioxyde de carbone à toutes les étapes de la production des aciers, transport, soudage et manutention en raison de l'allègement procuré par les aciers HLE.

Cet ouvrage passe en revue : les données métallurgiques de base, la réglementation et les normes, la fabrication des aciers plaques et profilés, la conception et les calculs, la mise en œuvre, des références d'utilisations, des données issues de dimensionnement d'ouvrages utilisant les aciers S460 et propositions de solutions plus innovantes hybrides utilisant des nuances S 690. Enfin cet ouvrage propose également un tour d'horizon de l'utilisation des aciers HLE en Europe, au Japon et aux USA.

Ce document publié dans le cadre du Comité Scientifiques et Technique de l'AFGC a été rédigé par des experts de la profession représentant les principaux acteurs de la filière ouvrages d'art (CETE de Lyon, CETE de L'Est, CTICM, BNS, LCPC, SETRA, SNCF, ARCADIS, EGIS, INGEROP, DillingerHütte-GTS, ArcelorMittal, Baudin Chateauneuf, Eiffel construction, Ets J- Richard Ducros, Air Liquide Welding et Institut de Soudure).

En construction de génie civil appliquée au bâtiment et aux ouvrages d'art, les aciers HLE sont entendus comme étant les aciers de nuance strictement supérieure à 355 MPa.

1. NORMALISATION ET REGLEMENTATION

1-1 PRODUITS

1-1-1 Normalisation (NF EN 10025)

1-1-1-1 Introduction

Les aciers sont élaborés au moyen de deux filières :

Les poutrelles HLE sont plutôt issues de la filière électrique. Les tôles ou plaques HLE sont, elles, plutôt issues de la filière fonte.

1) filière fonte

Dans un premier temps, la fonte est élaborée au haut fourneau qui est alimenté en minerai de fer et en coke. La fonte est ensuite traitée dans un convertisseur à oxygène pour réduire le taux de carbone jusqu'à la teneur voulue et pour ajuster la teneur en éléments d'alliage au moyen de l'ajout de ferro-alliages dans le convertisseur.

La filière fonte nécessite donc l'utilisation de matières premières vierges : minerai et charbon.

2) filière électrique

L'acier est élaboré dans un four électrique qui est alimenté en ferrailles et en éléments d'alliage comme dans la filière fonte.

La filière électrique participe au recyclage de l'acier puisqu'elle consomme des ferrailles et évite l'utilisation de matières premières vierges.

Une fois que l'acier est élaboré, le métal liquide est solidifié sous forme de demi-produits, brames, blooms ou billettes en fonction de la forme des produits à obtenir (produits plats ou produits longs). Cette opération est réalisée au moyen d'un procédé de coulée continue qui a pratiquement remplacé partout la coulée en lingots.

Les demi-produits issus de la coulée continue sont transformés en produits plats ou longs en acier au moyen d'installations appropriées de laminage.

Les produits plats minces (épaisseur inférieure à 17 mm environ) sont laminés dans un train à bandes où le laminage s'effectue de façon continue : production continue de bandes conditionnées en bobines (aussi appelées « coils » dans le cas présent du laminage à chaud).

Les produits plats plus épais sont laminés dans un laminoir réversible, aussi appelé laminoir « Quarto » où le produit subit des passes de laminage en avant puis en arrière

jusqu'à atteindre l'épaisseur voulue. Ce procédé est donc un procédé discontinu et les produits finis issus de ce procédé ne sont pas des bandes mais des plaques ou des tôles.

Certains produits plats en bobines issus du laminage continu à chaud sont laminés à froid pour la fabrication de bandes minces (épaisseur inférieure à 3mm environ). Cependant, le laminage à froid ne concerne pas les aciers de construction laminés à chaud utilisés dans les ouvrages d'art et il est donc inutile de décrire plus avant les procédés de laminage à froid.

La plupart des aciers de construction utilisés en France sont définis dans les normes françaises dont un nombre croissant sont des normes européennes reprises dans la collection nationale. Les normes européennes sont reprises de façon obligatoire dans la collection des normes françaises et annulent les anciennes normes françaises traitant du même sujet.

1-1-1-2 Classification et désignation des aciers

La classification des aciers est effectuée conformément à la norme NF EN 10020 : 2000. La composition chimique est utilisée pour faire la distinction entre aciers non alliés et aciers alliés. La norme NF EN 10020 définit aussi les aciers de qualité, les aciers spéciaux et les aciers inoxydables. Ainsi, à part les aciers inoxydables qui sont toujours alliés, les aciers de qualité et spéciaux sont alliés ou non alliés en fonction de leur composition chimique.

Les aciers HLE sont désignés de deux façons :

- 1) Désignation symbolique selon NF EN 10027-1 : 2005

La désignation est du type SNNNA(B/N) (N : symbole numérique, A ou B/N : symbole alphabétique ou symbole numérique).

S : acier de construction (S : comme Structural Steel en anglais).

NNN : limite d'élasticité minimale dans la gamme d'épaisseur la plus faible (souvent inférieure ou égale à 16mm).

Pour les aciers non alliés de la norme NF EN 10025-2

AB : propriété de flexion par choc. A est la valeur de l'énergie de flexion par choc et B est la température : J, K et L pour 27 ; 40 et 60 Joules respectivement et R ; 0 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 pour température ambiante (Room température en anglais (~23+/-5°C)) ; 0 ; -20 ; -30 ; -40 ; -50 et -60°C respectivement.

Pour les aciers soudables à grain fin (10025-3 et 10025-4) et aciers trempés revenus (10025-6)

Les deux derniers symboles combinent la valeur de l'énergie de flexion par choc et un traitement de l'acier (laminage normalisant, thermomécanique, trempé-revenu).

2) Désignation numérique selon NF EN 10027-2 :1992

La désignation numérique est du type 1.nnnn qui est en fait la désignation allemande étendue à l'Union Européenne. Les symboles numériques nnnn en fonction de la composition chimique de l'acier sont attribués par l'Office Européen d'Enregistrement. La désignation numérique est utilisée dans le marché allemand et est utile aux normalisateurs pour établir des correspondances entre nuances d'aciers différentes. Les autres marchés font généralement référence à la désignation symbolique.

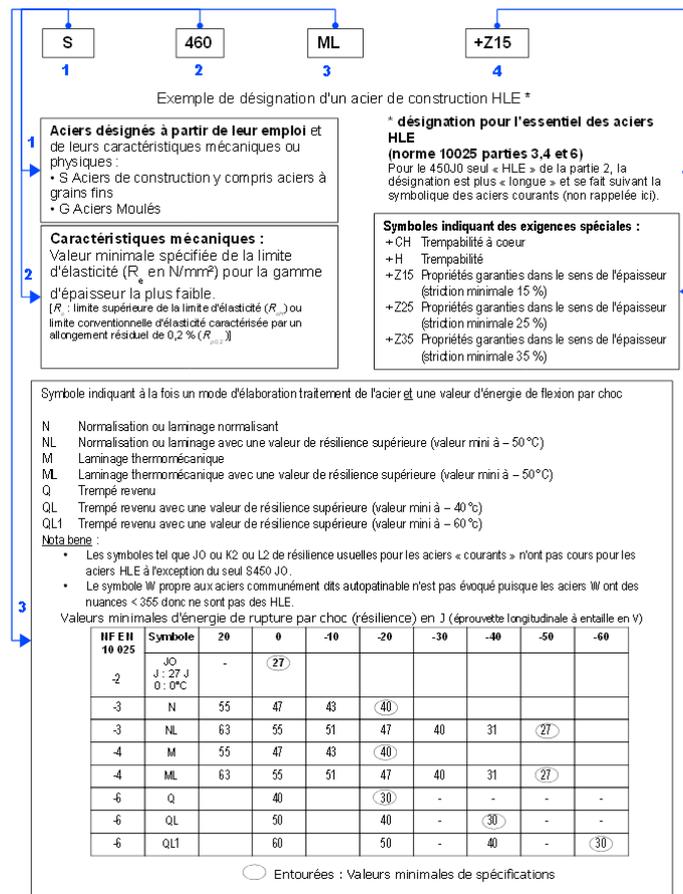


Figure 1.1 : Désignation des HLE selon la NF EN 10027-2

1-1-1-3 Exigences formulées dans les normes

Une norme est un document qui comporte des exigences auxquelles le produit doit satisfaire pour qu'il soit conforme à la norme. Un document ne comportant pas d'exigences ne peut pas être une norme. En revanche, il peut être un rapport technique ou un fascicule de documentation diffusé par un organisme de normalisation comme le CEN, l'ISO ou l'AFNOR.

Les normes européennes sur les aciers comportent généralement les exigences suivantes :

- Composition chimique de la coulée et du produit.
- Caractéristiques mécaniques : limite d'élasticité, résistance à la traction, énergie de flexion par choc le cas échéant.
- Soudabilité basée sur la composition chimique au moyen du calcul du carbone équivalent CEV (formule de l'IIW/IIS).
- Tolérances sur les dimensions et la forme.
- Autres caractéristiques : aptitude à la galvanisation ou au formage à froid, etc.

Les caractéristiques sont déterminées en appliquant des modes opératoires décrits dans les normes d'essais et de mesure :

- Normes d'analyse chimique pour la composition chimique.
- Norme d'essai de traction NF EN ISO 6892 pour les caractéristiques de traction.
- Norme NF EN 10045-1:1990 pour l'énergie de flexion par choc au moyen de l'essai Charpy.
- Normes dimensionnelles qui fixent les tolérances sur les dimensions et la forme du produit. (NF EN 10029 (tôles>3mm), NF EN 10034 (Poutrelles) ,)
- Autres normes comme celles sur l'aptitude à la galvanisation, etc.

1-1-1-4 Norme NF EN 10025 sur les aciers de construction laminés à chaud

1-1-1-4-1 Introduction

Les paragraphes suivants présentent brièvement le contenu des normes NF EN 10025-1 à -6 en insistant sur les aspects essentiels sans donc décrire l'intégralité du contenu de ces normes. Ainsi, les paragraphes suivants ne peuvent pas remplacer les normes NF EN 10025-1 à -6 pour les relations entre clients et fournisseurs. Seules les normes NF EN 10025-1 à -6 publiées par AFNOR peuvent être citées comme référence pour les

contrats entre clients et fournisseurs, l'assurance de la qualité et les exigences réglementaires permettant l'apposition du marquage CE sur les produits.

Au moment de la publication du présent Guide, les normes EN 10025-1 à -6 étaient en cours de révision. Il convient que l'utilisateur du présent Guide se réfère aux versions les plus récentes des normes publiées.

1-1-1-4-2 Norme NF EN 10025-1 sur les exigences générales

La norme principale sur les aciers de construction métallique laminés à chaud est la norme française NF EN 10025-1 qui est d'origine européenne. Elle a été publiée par AFNOR en 2005 de même que les normes NF EN 10025-2 à -6.

NF EN 10025-1 est une norme européenne harmonisée selon la Directive Produits de Construction (DPC, ou CPD en anglais) en réponse au Mandat M/120 sur les produits de construction métallique.

En tant que norme harmonisée, NF EN 10025-1 comporte une Annexe ZA qui définit les caractéristiques essentielles pertinentes pour que le produit soit conforme à la DPC et puisse par conséquent porter le marquage CE.

Les caractéristiques essentielles pertinentes sont celles du Mandat M/120 qui sont reprises dans l'annexe ZA de NF EN 10025-1. Le comité technique européen ECISS/TC10 a défini quelles sont les caractéristiques essentielles du Mandat M/120 qui sont pertinentes pour les produits définis dans NF EN 10025-1 à -6 et celles qui ne le sont pas.

Les caractéristiques essentielles du Mandat M/120 reprises dans l'Annexe ZA de NF EN 10025-1 sont les suivantes :

- Tolérances sur les dimensions et la forme
- Elongation
- Résistance à la traction
- Limite d'élasticité
- Résistance à la flexion par choc
- Soudabilité
- Durabilité

L'élongation (allongement), la résistance à la traction et la limite d'élasticité sont déterminées à partir de l'essai de traction selon NF EN ISO 6892. La résistance à la flexion par choc est déterminée au moyen de l'essai Charpy selon NF EN 10045-1. La soudabilité est déterminée au moyen du carbone équivalent en appliquant la formule de l'IIW/IIS. La durabilité est caractérisée par l'aptitude à la galvanisation [pour les aciers NF EN 10025-5 (non concernés par ce guide) par la composition chimique avec

l'ajout d'éléments d'addition qui empêchent la corrosion atmosphérique en profondeur (formation d'une patine protectrice)].

Dans le cas de NF EN 10025-1, les caractéristiques essentielles du mandat M/120 coïncident avec les exigences demandées habituellement dans les normes européennes sur les aciers à quelques exceptions près comme la durabilité par exemple.

La vérification des exigences essentielles énoncées dans l'Annexe ZA fait appel à l'évaluation de la conformité qui est décrite en détail dans l'Annexe B de NF EN 10025-1.

En résumé, le système d'attestation de la conformité 2+ est exigé pour les produits livrés selon NF EN 10025-1 pour qu'ils puissent porter le marquage CE.

Le système 2+ implique d'abord la réalisation d'essais par le fabricant du produit de type initial, d'essais sur échantillons prélevés en usine et le contrôle de la production en usine aussi appelé FPC (anglais : factory production control).

Le système 2+ implique aussi des tâches effectuées par un organisme de contrôle extérieur appelé « organisme notifié » : inspection initiale de l'usine et du contrôle de production en usine et surveillance continue du contrôle de production en usine.

1-1-1-4-3 Normes support de NF EN 10025-1

Les normes NF EN 10025-2 à -6 qui contiennent les nuances d'aciers sont appelées normes support de la norme harmonisée NF EN 10025-1.

Les aciers spécifiés dans les normes support peuvent être livrés sous forme de produits longs ou de produits plats, parfois en forte épaisseur (plaques quarto). La plupart des exigences sont communes aux produits plats et aux produits longs à quelques exceptions près. En revanche, les normes NF EN 10025-1 à -6 ne s'appliquent pas aux profils creux pour la construction qui sont traités dans les normes NF EN 10210-1 ; -2 et NF EN 10219-1 ; -2.

1-1-1-4-4 Norme NF EN 10025-2 sur les aciers non alliés

La norme NF EN 10025-2 spécifie quatre nuances dont chacune possède plusieurs qualités en fonction de l'énergie absorbée en flexion par choc :

- S235JR, S235J0, S235J2 : limite d'élasticité $R_{eH} = 235$ MPa pour la gamme d'épaisseur la plus faible (de 0 à 16 mm). JR, J0 et J2 signifient énergie absorbée de 27 Joules à la température ambiante ($\sim 23 \pm 5^\circ\text{C}$), à 0°C et -20°C respectivement.
- S275JR, S275J0, S275J2 : $R_{eH} = 275$ MPa pour la gamme d'épaisseur la plus faible (de 0 à 16 mm). JR, J0 et J2 signifient énergie absorbée de 27 Joules à la température ambiante, à 0°C et -20°C respectivement.

- S355JR, S355JO, S355J2, S355K2 : $R_{eH} = 355$ MPa pour la gamme d'épaisseur la plus faible (de 0 à 16 mm). JR, JO et J2 signifient énergie absorbée de 27 Joules à la température ambiante à 0°C et -20°C respectivement. K2 signifie énergie absorbée de 40 Joules à -20°C.
- 450JO : $R_{eH} = 450$ MPa pour la gamme d'épaisseur la plus faible (de 0 à 16 mm). JO signifie énergie absorbée de 27 Joules à 0°C. L'acier S450JO n'est livré que sous forme de produits longs.

1-1-1-4-5 Conditions de livraison des aciers spécifiés dans NF EN 10025-2

L'état de livraison est désigné comme suit : +AR pour (As-Rolled (brut de laminage)) ; +N pour laminage Normalisant ; +M pour laminage thermoMécanique.

L'état de livraison des produits longs et des produits plats laminés en continu (train à bandes) peut être +AR, +N ou +M au choix du producteur. Seuls les états de livraison +AR ou +N peuvent être commandés.

- L'état de livraison des produits issus de laminage réversible (quarto) peut seulement être +AR ou +N au choix du producteur.
- Si un document de contrôle est requis, l'état de livraison doit être indiqué dans le document de contrôle par son symbole spécifique (+N, +AR ou +M).
- Dans le cas où les produits sont commandés à l'état +N ou +AR, le symbole spécifique (+N ou +AR) doit être ajouté à la désignation.

NB : Le fascicule 66 n'autorise pas l'état +AR pour les ponts

1-1-1-4-6 Normes NF EN 10025-3 et -4 sur les aciers normalisés et « thermomécaniques »

La norme NF EN 10025-3 spécifie les aciers normalisés ou obtenus par laminage normalisant. Quatre nuances y sont spécifiées avec deux qualités pour chaque nuance en fonction de l'énergie de flexion par choc :

S275, S355, S420, S460 en qualités N ou NL : limite d'élasticité $R_{eH} = 275 ; 355 ; 420 ; 460$ MPa respectivement pour la gamme d'épaisseur la plus faible (de 0 à 16 mm). N et NL signifient valeurs minimales spécifiées d'énergie de flexion par choc à des températures inférieures ou égales à -20°C et -50°C respectivement. Cela se traduit concrètement par des valeurs d'énergie de 40 Joules à -20°C et 27 Joules à -50°C pour les qualités N et NL respectivement.

La norme NF EN 10025-4 spécifie les aciers obtenus par laminage thermomécanique (communément appelés « aciers thermomécaniques » voire aussi appelés TMCP comme Thermo Mechanical Controlled Process). Quatre nuances y sont spécifiées avec deux qualités pour chaque nuance en fonction de l'énergie de flexion par choc :

S275, S355, S420, S460 en qualités M ou ML : limite d'élasticité R_{eH} = 275 ; 355 ; 420 ; 460 MPa respectivement pour la gamme d'épaisseur la plus faible (de 0 à 16 mm). M et ML signifient valeurs minimales spécifiées d'énergie de flexion par choc à des températures inférieures ou égales à -20°C et -50°C respectivement. Cela se traduit concrètement par des valeurs d'énergie de 40 Joules à -20°C (soit 27 Joules à -30°C) et 27 Joules à -50°C pour les qualités N et NL respectivement.

La limite d'élasticité des aciers S275M et S355M est identique à celle des aciers S275N et S355N pour les épaisseurs inférieures ou égales à 80 mm. De la même façon, la limite d'élasticité des aciers S420M et S460M est identique à celle des aciers S420N et S460N pour les épaisseurs inférieures ou égales à 63 mm. Même chose pour les qualités ML et NL.

En revanche, la composition chimique des aciers obtenus par laminage thermomécanique est plus allégée que celle des aciers normalisés entraînant de fait des valeurs de carbone équivalent (CEV) plus faibles pour les aciers obtenus par laminage thermomécanique et, par suite une meilleure soudabilité.

C'est le laminage thermomécanique lui-même qui permet d'atteindre des valeurs de limite d'élasticité identiques à celles des aciers normalisés bien que leur composition chimique soit plus faible.

Ainsi, dans les gammes d'épaisseurs où les limites d'élasticité sont identiques, les aciers obtenus par laminage thermomécanique pourront être préférés aux aciers normalisés dans les applications où la soudabilité est un critère majeur de choix.

1-1-1-4-7 Norme NF EN 10025-5 sur les aciers « autopatinables »

La nouvelle version de la norme NF EN 10025-5 devrait intégrer des aciers de limite d'élasticité supérieure à 355 MPa et ces HLE de type autopatinable seront concernés par ce guide.

1-1-1-4-8 Norme NF EN 10025-6 sur les aciers trempés et revenus

La norme NF EN 10025-6 spécifie des nuances et qualités d'aciers à haute limite d'élasticité livrés à l'état trempé et revenu.

Sept nuances sont spécifiées dont chacune en deux ou trois qualités en fonction de l'énergie absorbée en flexion par choc :

S460Q ; S500Q ; S550Q ; S620Q ; S690Q ; S890Q et S960Q : limite d'élasticité R_{eH} = 460 ; 500 ; 550 ; 550 ; 620 ; 690 ; 890 ; 960 MPa pour la gamme d'épaisseur la plus faible (de 3 à 50 mm). Q fait référence à l'état trempé et revenu et à des valeurs minimales spécifiées d'énergie absorbée en flexion par choc à des températures inférieures ou égales à -20°C. Cela se traduit concrètement par des valeurs d'énergie de 30 Joules à -20°C.

S460QL à S960QL comme ci-dessus. QL fait référence à des valeurs minimales spécifiées d'énergie absorbée en flexion par choc à des températures inférieures ou égales à -40°C, soit 30 Joules à -40°C.

S460QL1 à S890 comme ci-dessus à l'exception de la nuance S960. QL1 fait référence à des valeurs minimales spécifiées d'énergie absorbée en flexion par choc à des températures inférieures ou égales à -60°C, soit 30 Joules à -60°C.

1-1-1-4-9 Epaisseurs maximales des produits spécifiés dans NF EN 10025-1 à -6

Tableau 1.2 : Limites d'élasticité garanties des aciers de la norme NF EN 10025

Nuance	Partie de la norme NF EN 10025	limite d'élasticité garantie ReH (N/mm ²)									
		e ≤ 16	16 < e ≤ 40	40 < e ≤ 50	50 < e ≤ 63	63 < e ≤ 80	80 < e ≤ 100	100 < e ≤ 120	120 < e ≤ 150	150 < e ≤ 200	200 < e ≤ 250
S355	2	355	345	335	325	315	295		285	275	
S355N	3	355	345	335	325	315	295		285	275	
S355M	4	355	345	335	325	325	320	320*	(1)	(1)	
S420N	3	420	400	390	370	360	340		330	320	
S420M	4	420	400	390	380	370	365	365*	(1)	(1)	
S450	2	450	430	410	390	380	380		(1)	(1)	
S460N	3	460	440	430	410	400	380		370	(1)	
S460M	4	460	440	430	410	400	385	385*	(1)	(1)	
S460Q	6		460		440		400		(1)	(1)	
S500Q	6		500		480		440		(1)	(1)	
S550Q	6		550		530		490		(1)	(1)	
S620Q	6		620		580		560		(1)	(1)	
S690Q	6		690		650		630		(1)	(1)	
S890Q	6		890		830		(1)	(1)	(1)	(1)	
S960Q	6		960	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)

* produit longs uniquement

(1) limite de la norme

Le tableau 1.3 montre les épaisseurs maximales des produits livrés selon NF EN 10025-2 à -6. Pour chaque norme, l'épaisseur maximale varie en fonction des nuances et/ou qualités. Certains produits plats spécifiés selon NF EN 10025-2 sont livrables jusqu'à 400 mm d'épaisseur.

Tableau 1.3

Norme	Nuances	Epaisseur maximale (mm)
NF EN 10025-2	Toutes	250
	Plats J2 et K2	400
NF EN 10025-3	S275 à S420	250
	S460	200
NF EN 10025-4	Toutes	120
NF EN 10025-5	S235 et S355 W	150
	S355WP	12
NF EN 10025-6	S460 à S690	150
	S890	100
	S960	50

1-1-1-4-10 Tolérances et aspect de surface

L'ensemble des produits livrables selon NF EN 10025-1 à -6 fait référence à seize normes de tolérances en fonction de la forme du produit. Les tolérances de la plupart des produits plats sont spécifiées dans NF EN 10029 :1991 ou NF EN 10051 :1997.

L'état de surface des produits conformes à NF EN 10025-1 à -6 est spécifié dans les normes NF EN 10163-1 à -3 :2005. Les discontinuités de surface sont décrites dans NF EN 10163-1. Ce sont principalement les criques, empreintes, inclusions non métalliques, marques de calamine, pailles, repliures, soufflures, etc. La manière de considérer les discontinuités comme isolées ou groupées est aussi décrite dans NF EN 10163-1. Cette norme spécifie enfin les modes de réparation par meulage et soudage des surfaces comportant des discontinuités.

Produits plats :

La norme NF EN 10163-2 spécifie des classes et sous-classes correspondant à différents états de surface des produits plats et procédures de réparation associées (voir Tableau 1.4).

Tableau 1.4 : Classification des états de surface et conditions de réparation pour les produits plats à titre indicatif (voir la norme NF EN 10163-2 pour les détails précis)

	Mode de réparation du défaut	Réparation par usinage/ meulage puis soudage	Réparation par soudage après accord	Réparation par soudage non autorisée
Classe A : Epaisseur restante peut être inférieure à l'épaisseur minimale spécifiée dans la norme associée de tolérances dans des limites précises (voir Tableaux 3 et 4 de NF EN 10163-2)	Sous-classe 1	X		
	Sous-classe 2		X	
	Sous-classe 3			X
Classe B : Epaisseur restante ne doit pas être inférieure à l'épaisseur minimale spécifiée dans la norme associée de tolérances.	Sous-classe 1	X		
	Sous-classe 2		X	
	Sous-classe 3			X

Profilés :

La norme NF EN 10163-3 spécifie des classes et sous-classes correspondant à différents états de surface des profilés et procédures de réparation associées : Les classes C et D concernent les applications générales et spéciales respectivement.

Tableau 1.5 : Classification des états de surface et conditions de réparation pour les produits plats à titre indicatif (voir la norme NF EN 10163-3 pour les détails précis)

	Mode de réparation du défaut	Réparation par usinage/meulage puis soudage	Réparation par soudage après accord	Réparation par soudage non autorisée
Classe C : Applications générales	Sous-classe 1	X		
	Sous-classe 2		X	
	Sous-classe 3			X
Classe D : Applications spéciales	Sous-classe 1	X		
	Sous-classe 2		X	
	Sous-classe 3			X

1-1-1-4-11 Soudabilité des aciers spécifiés dans NF EN 10025-2 à -6

La soudabilité des aciers spécifiés dans NF EN 10025-2 à -6 est exprimée au moyen du carbone équivalent selon la formule de l'IIW/IIS.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

CEV maximum (sur analyse de coulée) pour épaisseur e (mm)		e ≤ 16	16 < e ≤ 30	30 < e ≤ 40	40 < e ≤ 50	50 < e ≤ 63	63 < e ≤ 100	100 < e ≤ 120	120 < e ≤ 150	150 < e ≤ 250
Nuance	Partie de la norme NF EN 10025									
S355	2	≤ 0,45 %	≤ 0,45 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,49 %
S355N	3	≤ 0,43 %	≤ 0,43 %	≤ 0,43 %	≤ 0,43 %	≤ 0,43 %	≤ 0,45 %	≤ 0,45 %	≤ 0,45 %	≤ 0,45 %
S355M	4	≤ 0,39 %	≤ 0,39 %	≤ 0,40 %	≤ 0,40 %	≤ 0,40 %	≤ 0,45 %	≤ 0,45 %	≤ 0,45 %	-
S420N	3	≤ 0,48 %	≤ 0,48 %	≤ 0,48 %	≤ 0,48 %	≤ 0,48 %	≤ 0,50 %	≤ 0,52 %	≤ 0,52 %	≤ 0,52 %
S420M	4	≤ 0,43 %	≤ 0,45 %	≤ 0,45 %	≤ 0,46 %	≤ 0,46 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	-
S460	2	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,49 %	≤ 0,49 %	≤ 0,49 %	≤ 0,49 %	≤ 0,49 %	≤ 0,49 %	-
S460N	3	≤ 0,53 %	≤ 0,53 %	≤ 0,53 %	≤ 0,53 %	≤ 0,53 %	≤ 0,54 %	≤ 0,55 %	≤ 0,55 %	≤ 0,55 %
S460M	4	≤ 0,45 %	≤ 0,46 %	≤ 0,46 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,48 %	≤ 0,48 %	≤ 0,48 %	-
S460Q	6	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,47 %	≤ 0,48 %	≤ 0,48 %	≤ 0,50 %	≤ 0,50 %	-
S500Q	6	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,70 %	≤ 0,70 %	≤ 0,70 %	≤ 0,70 %	-
S560Q	6	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,77 %	≤ 0,77 %	≤ 0,83 %	≤ 0,83 %	-
S620Q	6	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,77 %	≤ 0,77 %	≤ 0,83 %	≤ 0,83 %	-
S690Q	6	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,65 %	≤ 0,77 %	≤ 0,77 %	≤ 0,83 %	≤ 0,83 %	-
S890Q	6	≤ 0,72 %	≤ 0,72 %	≤ 0,72 %	≤ 0,72 %	≤ 0,82 %	≤ 0,82 %	-	-	-
S960Q	6	≤ 0,82 %	≤ 0,82 %	≤ 0,82 %	≤ 0,82 %	≤ -	-	-	-	-

Tableau 1.6 : CEV maximum garantis selon la NF EN 10025

Cependant, la valeur du CEV n'est pas le seul facteur à considérer pour caractériser la soudabilité surtout pour les aciers de NF EN 10025-6 pour lesquels la valeur du CEV peut dépasser les 0,80%. Les exigences générales pour le soudage à l'arc des aciers spécifiés dans NF EN 10025-1 à -6 sont données dans la norme NF EN 1011-2 :2004.

En particulier, les normes NF EN 10025 attirent l'attention de l'utilisateur sur le risque de fissuration à froid des aciers spécifiés dans ces normes lors de leur mise en œuvre.

1-1-1-4-12 Formage des aciers spécifiés dans NF EN 10025-1 à -6

L'aptitude au formage à chaud, à froid et aux chaudes de retrait des aciers spécifiés dans NF EN 10025-1 à -6 est décrite dans le rapport technique CEN/TR10347 :2006. Ce document remplace la partie formage de la circulaire CECA IC 2 publiée en 1983. La partie soudage est reprise dans la norme NF EN 1011-2 :2004 (voir plus haut).

1-1-1-4-13 Galvanisation des aciers spécifiés dans NF EN 10025-2 à -6

Les exigences d'aptitude à la galvanisation doivent faire l'objet d'un accord entre le producteur et le client. Il convient d'utiliser les normes ISO sur la galvanisation des aciers pour définir ces exigences d'aptitude. Trois classes d'aptitude à la galvanisation sont définies en fonction des teneurs en silicium et phosphore. Ces classes ne suffisent cependant pas à caractériser l'aptitude à la galvanisation. Elles ne sont données qu'à titre indicatif.

La forme du produit, la composition du bain de zinc et d'autres facteurs éventuels ont une influence aussi importante que la composition chimique de l'acier sur l'aptitude à la galvanisation. C'est pour cette raison que la préférence est donnée aux normes ISO appropriées pour définir les exigences d'aptitude à la galvanisation.

1-1-1-5 Autres normes d'aciers de construction

NF EN 10149 : Produits plats laminés à chaud à hautes limites d'élasticité soudables pour formage à froid

Les produits plats laminés à chaud à haute limite d'élasticité soudables pour formage à froid spécifiés dans les normes NF EN 10149-1 à -3 peuvent être utilisés en construction mais, ils ne doivent pas être utilisés dans le cas de formage à chaud.

Les normes NF EN 10149-1 à -3 concernent des produits plats d'épaisseur 1,5 à 20 mm pour les aciers dont $R_{eH} \leq 460$ MPa et de 1,5 à 16 mm pour les aciers dont $R_{eH} > 460$ MPa. Les aciers de la partie 2 sont obtenus par laminage thermomécanique et ceux de la partie 3 sont normalisés ou obtenus par laminage normalisant.

NF EN 10164 : Aciers de construction à caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface du produit.

Il est peut être parfois nécessaire d'utiliser des aciers avec propriétés garanties dans le sens de l'épaisseur. En pareil cas, les produits plats et les profilés spécifiés suivant NF EN 10025-2 à -6 ou d'autres normes peuvent être proposés avec caractéristiques de striction garanties dans le sens de l'épaisseur selon la norme NF EN 10164 :2005 (voir tableau 1.7).

Dans le cadre de l'eurocode 3, la norme européenne NF EN 1993-1-10 (:2005+AC2009) « choix des qualités d'acier » et son annexe NF EN 1993-1-10 /NA (avril 2007) donne une méthode (procédure) de choix de l'exigence relative à la valeur minimale de striction en fonction du risque d'arrachement lamellaire. Cette méthode définit une striction minimale Z_{Ed} caractérisant le niveau de striction nécessaire pour tenir compte des conditions de sollicitation de la zone critique où peut apparaître l'arrachement lamellaire. Cette valeur est déterminée par l'addition de cinq facteurs.

Il convient ensuite de choisir un acier tel que $Z_{Rd} > Z_{Ed}$.

Z_{Rd} : valeur de la capacité du matériau à éviter l'arrachement lamellaire selon la norme EN 100164, c'est à dire Z15,Z25,Z35.

Z_{Ed} : valeur requise résultant de la grandeur des déformations provoquées par le retrait du métal bridé sous les cordons de soudures. Z_{ed} est déterminée par l'addition de cinq facteurs selon tableau 3.2 de NF EN 1993-1-10.

Tableau 1.7 : Classes de qualité et valeurs minimales de striction pour les aciers spécifiés avec propriétés garanties dans le sens de l'épaisseur selon NF EN 10164 (voir la norme pour les détails précis)

Classe de qualité	Striction (%)	
	Z_{Rd}	
	Valeur moyenne minimale de 3 essais	Valeur minimale individuelle
Z15	15	10
Z25	25	15
Z35	35	25

NF EN 10160 / NF EN 10306 : Contrôle ultrasonore des produits plats en acier d'épaisseur égale ou supérieure à 6 mm (méthode par réflexion) / Contrôle par ultrasons des poutrelles à larges ailes à faces parallèles et des poutrelles

Les produits plats doivent être soumis à un contrôle aux ultrasons conformément aux prescriptions de l'EN 10160 et les profilés conformément aux indications de l'EN 10306.

NF EN 10210-1 : Profils creux de construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins

Les profils creux finis à chaud et formés à froid pour la construction sont spécifiés dans les normes NF EN 10210-1:1994 et NF EN 102109-1 respectivement. Les parties 2 sont les normes de tolérances associées.

NF EN 10248-1 / NF EN 10249-1 : Palplanches laminées à chaud en aciers non alliés/ Palplanches profilées à froid en aciers non alliés

Les palplanches laminées à chaud et profilées à froid sont spécifiées dans les normes NF EN 10248-1:1995 et NF EN 10249-1:1995 respectivement. Les parties 2 sont les normes de tolérances associées.

1-1-2 La procédure d'agrément (CCTG, marque NF Acier, marquage CE)

Pour les marchés publics de travaux, le dernier fascicule 4 titre III du CCTG (année 2000) « Aciers laminés pour construction métallique », accorde à la certification un rôle prépondérant en s'inscrivant dans le cadre de la réforme de l'état et de la suppression de certains régimes d'autorisation.

A la date de sortie du guide HLE, le fascicule 4 titre III est intégré dans une nouvelle version du fascicule 66 (décret d'application daté du 01/07/2012).

En effet, pour les ouvrages d'art et bâtiments non courants, seuls sont utilisables les produits bénéficiant du marquage CE et du droit d'usage de la marque NF-Acier (marque de conformité aux normes européennes et françaises établie par AFNOR certification), secteur d'application « Bâtiment-Travaux publics - Construction métallique d'ouvrages d'art et de bâtiments non courants » ou couverts par une certification reconnue équivalente.

Les caractéristiques certifiées NF sont : les dimensions, les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, l'aptitude au soudage, la nuance d'acier, l'absence de défauts internes, l'état de livraison, le marquage et l'origine. La liste des fournisseurs et produits certifiés sont téléchargeables à cette adresse :

<http://www.marquenf.com/download/produits/FR/NF138.pdf>

1-1-3 Exigences de choix des aciers

- Les aciers à haute limite d'élasticité utilisables dans les constructions sont définis dans l'EN 1993-1-1 "structures en acier - règles générales" et dans l'EN 1993-1-12 (règles additionnelles pour l'extension de l'EN 1993 aux nuances jusqu'à S700).

- **EN 1993-1-1**

L'EN 1993-1-1 (article 1.2.2) impose des aciers des normes :

EN 10025 « produits laminés à chaud en aciers de construction » partie 1 à 6

EN 10210-1 « profils creux pour la construction finis à chaud en aciers de construction non alliés et à grains fins »

EN 10219-1 « profils creux pour la construction finis à froid en aciers de construction non alliés et à grains fins »

Pour ce qui concerne les HLE, les qualités doivent être

⇒ EN 10025-3 ▪ S420 N/NL ▪ S460N/NL
⇒ EN 10025-4 ▪ S420 M/ML ▪ S460 M/ML
⇒ EN 10025-6 ▪ S460 Q/QL/QL1

⇒ EN 10210-1 ▪ S420 NH/NLH ▪ S460 NH/NLH
⇒ EN 10219-1 ▪ S420 MH/MLH ▪ S460 MH/MLH

- **EN 1993-1-12**

Les qualités couvertes sont :

⇒ EN 10025-6 ▪ S500 Q/QL/QLI
 ▪ S550 Q/QL/QLI
 ▪ S620 Q/QL/QLI
 ▪ S690 Q/QL/QLI

➤ Spécifications complémentaires

- **Risque de rupture fragile**

Les épaisseurs maximales utilisables pour chaque nuance et qualité sont définies :

- par le tableau 2-1 de l'EN 1993-1-10 et
- par le tableau 4 de l'EN 1993-1-12 (équivalent pour les nuances de 500 à 690) :

Tableau 2.1 — Valeurs admissibles maximales d'épaisseur d'élément t en mm

Nuance	Qualité	Énergie Charpy KV		Température de référence T_{Ed} [°C]																							
		à T [°C]	J_{min}	$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$								$\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$								$\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$							
				10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50			
S420	M,N	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85	70	60	50	200	185	160	140	120	100	85			
	ML,NL	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120	100	85	70	200	200	200	185	160	140	120			
S460	Q	-20	30	70	60	50	40	30	25	20	110	95	75	65	55	45	35	175	155	130	115	95	80	70			
	M,N	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80			
	QL	-40	30	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95			
	ML,NL	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115			
	QL1	-60	30	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130			
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75			
S690	Q	0	40	40	30	25	20	15	10	10	65	55	45	35	30	20	20	120	100	85	75	60	50	45			
	Q	-20	30	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	20	140	120	100	85	75	60	50			
	QL	-20	40	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	165	140	120	100	85	75	60			
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75			
	QL1	-40	40	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	190	165	140	120	100	85			
	QL1	-60	30	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	190	165	140	120	100			

Steel grade	Subgrade	Charpy energy CVN		Reference temperature T_{Ed} [°C]																							
		at T [°C]	J_{min}	$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$								$\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$								$\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$							
				10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50			
S460	Q	-20	27	70	60	50	40	30	25	20	110	95	75	65	55	45	35	175	155	130	115	95	80	70			
	Q	0	40	60	50	40	30	25	20	15	95	75	65	55	45	35	30	155	130	115	95	80	70	60			
	M,N	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80			
	QL	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80			
	QL	-40	27	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95			
	ML,NL	-30	40	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95			
	ML,NL	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115			
	QL1	-40	40	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115			
	QL1	-60	27	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130			

Epaisseur maximale

Tableaux 1.8 et 1.9

En ordonnée : les valeurs des énergies Charpy sont celles dans la direction du laminage.

En abscisse :

- la température de service correspond à la température caractéristique de la structure donnée par l'EN 1991-1-5 (période de retour 50 ans).
- la contrainte σ_{Ed} est la contrainte longitudinale de calcul résultant de la combinaison accidentelle d'actions où la température est l'action dominante et où l'action variable dominante est égale à sa valeur fréquente $\psi_1 Q_k$.

Dans le cas de pièces en compression, on admet de prendre en général $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$.
Des extrapolations sont possibles entre les valeurs du tableau.

* Pour les ponts l'EN 1993-2 art 3.3.3, impose aussi l'exigence du tableau 3.1.

Tableau 3.1 — Exemple d'exigences supplémentaires relatives à la ténacité du matériau de base

Exemple	Épaisseur nominale	Exigence supplémentaire
1	$t \leq 30$ mm	$T_{27J} = -20$ °C selon EN 10025
	$30 < t \leq 80$ mm	Acier à grain fin selon EN 10025, par ex. S355N/M
	$t > 80$ mm	Acier à grain fin selon EN 10025, par ex. S355NL/ML

- **Exigences de ductilité**

L'EN 1993-1-1 recommande les valeurs minimales suivantes pour les aciers jusqu'à S460 :

$$f_u/f_y \geq 1,10$$

$$A\% \geq 15 \%$$

$$\varepsilon_u \geq 15 \varepsilon_y \text{ avec } \varepsilon_y = f_y/E$$

L'EN 1993-1-12 donne les valeurs suivantes pour les aciers au delà de S460:

$$f_u/f_y \geq 1,05$$

$$A\% \geq 10 \%$$

$$\varepsilon_u \geq 15 f_y/E$$

Ces valeurs sont supposées satisfaites pour les aciers des normes spécifiées en 1-1-3.

1-2 CONCEPTION ET CALCULS

Les ponts mixtes sont calculés à partir de l'EN 1994-2. Dans ce texte les aciers à utiliser sont limités à la nuance S460 (EN 1994-2, 3.3(2))

Les différentes parties de l'Eurocode 3 sont utilisables dans le cas des aciers de nuances S235 à S460 (EN 1993-1-1, 3.1(2)).

L'utilisation de nuances plus élevées n'a pas fait l'objet d'études suffisamment détaillées. En première approche il conviendra de se limiter à un calcul élastique des efforts et des résistances.

La partie 1-12 (EN 1993-1-12) complète en cas de besoin ces parties pour les rendre utilisables pour les nuances S500 à S700.

Les principaux compléments à apporter sont listés ci-dessous.

** Rappel des propriétés mécaniques en traction des HLE :*

Par rapport à l'acier usuel S355N, les aciers HLE ont de meilleures limites d'élasticité et résistance à la rupture, et un allongement moindre.

Les courbes de traction réelles de trois éprouvettes (S355N, S460ML, S690QL) permettent de saisir les différences de propriétés en traction.

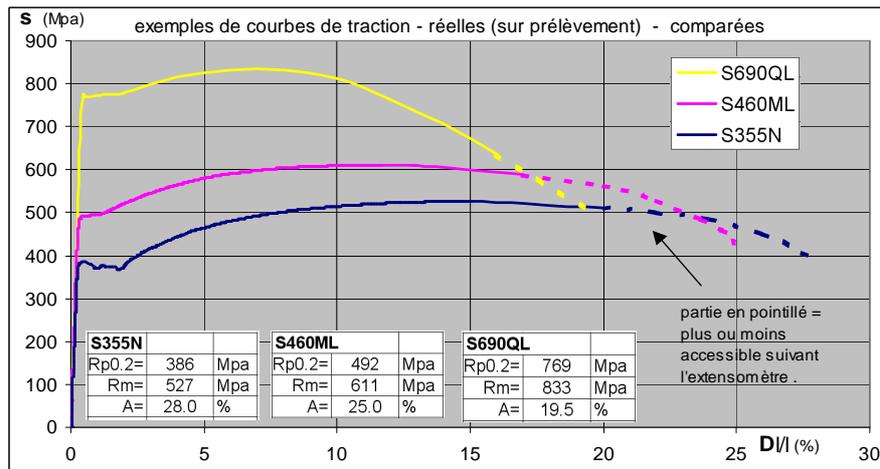


Figure 1.10 : Courbes de traction sur éprouvettes en S355N, S460ML, et S690QL

Les valeurs garanties par les exigences de la norme EN 10025 étant pour ces 3 aciers les suivantes :

		limite d'élasticité garantie ReH (Mpa)										
Nuance	Partie de la norme NF EN 10025	e ≤ 16	16 < e ≤ 40	40 < e ≤ 50	50 < e ≤ 63	63 < e ≤ 80	80 < e ≤ 100	100 < e ≤ 120	120 < e ≤ 150	150 < e ≤ 200	200 < e ≤ 250	
S355N-NL	3	355	345	335	325	315	295	285	275			
S460M-ML	4	460	440	430	410	400	385	385*	(1)	(1)		
S690QL-QL1	6	690			650		630		(1)	(1)		
		Résistance à la traction Rm (Mpa)										
S355N-NL		470 à 630					450 à 600					
S460M-ML		540 à 720		530 à 710	510 à 690	500 à 680	490 à 660	491 à 660*	(1)	(1)		
S690QL-QL1		770 à 940			760 à 930		710 à 900			(1)	(1)	
		Allongement à la rupture (%)										
S355N-NL		22					21					
S460M-ML		17							17*	(1)	(1)	
S690QL-QL1		14								(1)	(1)	

* produit longs uniquement

(1) limite de la norme

Tableau 1.11 : Valeurs garanties des aciers de la norme NF EN 10025

1-2-1 Analyse globale plastique

Nous avons vu (page précédente et chapitre 1-1-3), que d'une manière générale les aciers S500 à S700 ont des capacités de déformations inférieures dont il convient de tenir compte, d'autant plus que le niveau de contrainte peut être très élevé.

C'est pourquoi les analyses globales plastiques (méthode des rotules plastiques ou analyse rigide-plastique) ne sont pas autorisées [5-4-1 (3) et (4) de EN 1993-1-1 ne sont pas applicables].

Seule, une analyse plastique non linéaire basée sur des plastifications partielles (par éléments finis) peut être éventuellement envisagée.

1-2-2 Ductilité

L'utilisation des aciers S500 à S700 nécessite des précautions particulières pour le contrôle des déformations et pour éviter les entailles et les concentrations de contrainte.

Les valeurs limites du rapport f_u / f_y , l'allongement à la rupture et la déformation ultime e_u suivantes sont recommandées (EN 1993-1-12, 3.2.2) :

- $f_u / f_y \geq 1,05$ (alors que $f_u / f_y \geq 1,10$ pour les aciers couverts par l'EN1993-1-1, 3.2.)
- allongement à la rupture $\geq 10\%$ (alors que $\geq 15\%$ pour les aciers couverts par l'EN1993-1-1, 3.2.)
- $e_u \geq 15 f_y / E$ (même inégalité pour les aciers couverts par l'EN1993-1-1, 3.2.)

La résistance en section nette en traction (EN 1993-1-12, 6.2.3) est limitée à

$$N_{t,Rd} = 0,9 \left(\frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M12}} \right)$$

Puisque $\gamma_{M12} = \gamma_{M2} = 1,25$, on retrouve la formule de l'EN 1993-1-1, 6.2.3

1-2-3 Calcul des assemblages

L'EN 1993-1-8 est modifié comme suit (cf EN 1993-1-12, 2.8) :

- Les attaches en cisaillement et comportant des trous surdimensionnés ou oblongs ne sont autorisées qu'en catégorie C (résistance au glissement à l'état limite ultime).
- Les formules simplifiées pour les cornières tendues attachées par une seule aile et autres barres tendues attachées de façon non symétriques de même que les pattes d'attache (voir EN 1993-1-8, 3.10.4) ne sont pas applicables.

Une étude particulière, prenant en compte les excentricités doit donc être faite dans ce cas.

- La distribution des efforts entre fixations d'un assemblage à l'état limite ultime doit être linéaire élastique (voir EN 1993-1-12, 3.12(2)).
- Dans le cas des aciers jusqu'à S460, l'EN 1993-1-8, 4.2 (2) spécifie que les valeurs de limites d'élasticité, de résistance ultime en traction, d'allongement à la rupture et d'énergie minimale lors de l'essai de flexions par choc sur éprouvette Charpy du métal d'apport pour soudage doivent être équivalentes ou supérieures à celles du métal de base.

L'annexe nationale de l'EN 1993-1-12 peut autoriser l'utilisation d'électrodes de caractéristiques inférieures à celle du métal de base (limitation aux passes racine).

Dans ce cas:

- * pour les cordons d'angle, la résistance de l'assemblage est calculée en remplaçant f_u (résistance nominale ultime à la traction de la pièce

assemblée la plus faible) par f_{eu} (résistance nominale ultime à la traction du métal d'apport pour des électrodes conformes aux normes NF EN 499, EN 12 534 et EN 12 535).

Le tableau suivant définit f_{eu} en fonction des classes de résistance.

Classe de résistance	35	42	55	62	69
f_{eu} N/mm ²	440	500	640	700	770

* pour les soudures bout à bout à pleine pénétration, la résistance doit être calculée sur la base de f_{eu} .

- dans les assemblages à recouvrement, la longueur des soudures d'angle est limitée à 50a. Au-delà il convient de tenir compte de la non-uniformité de la distribution des contraintes.
- les assemblages semi-rigides (voir EN 1993-1-8, 5.2.2.4) ne sont pas admis.
- les analyses globales rigide-plastique et élasto-plastique ne sont pas autorisées. Seule, l'analyse globale élastique est autorisée, les rigidités en rotation des assemblages étant définies en 5.1.2 de l'EN 1993-1-12.
- dans le cas d'une analyse globale plastique non linéaire, les assemblages doivent être à pleine résistance.
- les platines de poteau sont utilisables à condition que la résistance ne soit pas donnée par celle des boulons d'ancrage.
- les résistances statiques des assemblages de profils creux données dans l'EN 1993-1-8,7 seront à multiplier par 0,9 pour les aciers de S355 à S460 et par 0,8 pour les nuances au-delà de S460.

1-2-4 Vérification à la fatigue

Dans l'EN 1993-1-9, 8.1 les étendues de contraintes sous charges fréquentes sont limitées à $1,5 f_y$ pour couvrir la fatigue oligo-cyclique.

Pour les poutres hybrides pour lesquelles la limite d'élasticité des semelles f_{yf} ne dépasse pas $\varphi_h \cdot f_{yw}$ (f_{yw} = limite d'élasticité de l'âme) l'EN 1993-1-5, 4.3(8) donne la limite à $1,5 f_{yf}$.

(Le coefficient φ_h vaut 2 (l'Annexe nationale renvoie à la valeur de l'EN 1993-1-5, 4.3 (6)).

1-2-5 Application aux structures définies dans les parties EN 1993-2 à EN 1993-6.

Pour les aciers HLE, pour les parties d'eurocodes
EN 1993-2 = ponts
EN 1993-4 = silos, réservoirs, pipelines
En 1993-5 = pieux et palplanches
En 1993-6 = chemins de roulement

il convient de se reporter à l'EN 1993-1-12 et son annexe nationale.

1-3 LES DOCUMENTS D'EXECUTION ET LA QUALITE D'EXECUTION

1-3-1 Introduction

L'EN 1090 « Structures en acier et structures en aluminium - Exigences relatives à l'exécution des structures » définit les conditions techniques d'exécution des structures tout en responsabilisant le donneur d'ordre, en lui demandant de préciser entre autres, les classes d'exécution des structures. La norme européenne NF EN 1090, concentre en trois parties l'ensemble des thèmes nécessaires et suffisants :

- Partie 1 : Exigences pour l'évaluation de la conformité des éléments structurels.
- Partie 2 : Exigences techniques pour l'exécution des structures en acier.
- Partie 3 : Exigences techniques pour l'exécution des structures en aluminium.

Nous traiterons ci-après exclusivement de la partie 2.

Ce chapitre explicite les éléments principaux de cette norme EN 1090 et **surligne** les choix spécifiques aux aciers HLE.
Les lecteurs connaissant bien la NF EN 1090 pourront parcourir rapidement ce chapitre 1-3.

1-3-2 Les principales options de l'EN 1090-2

- **Les classes d'exécution**

Le donneur d'ordre doit fixer les classes d'exécution dans son marché. Quatre classes d'exécution sont prévues. Cette classification peut s'appliquer à l'ensemble de la structure, à une partie de la structure ou à des détails spécifiques. Les principes du choix de la classe d'exécution reposent sur trois critères : la classe de conséquences, la catégorie de service et la catégorie de fabrication.

Classes de conséquences	Description	Exemples
CC3	Conséquence élevée en termes de perte de vie humaine, ou conséquences économiques, sociales d'environnement très importantes	Tribunes, bâtiments publics où les conséquences de la défaillance seraient élevées (ex. : salle de concert)
CC2	Conséquence moyenne en termes de perte de vie humaine, ou conséquences économiques, sociales d'environnement à considérer	Bâtiments résidentiels et de bureaux, bâtiments publics où les conséquences de la défaillance seraient moyennes (ex. : immeuble de bureaux)
CC1	Conséquence faible en termes de perte de vie humaine, ou conséquences économiques, sociales ou d'environnement faibles ou négligeables	Bâtiments agricoles normalement inoccupés (ex. : bâtiments de stockage), serres

Les **classes de conséquences** sont empruntées à l'annexe B à l'Eurocode 0 - EN 1990 «Base de calcul des structures».

Pour les ouvrages d'art, il est recommandé de retenir les classes de conséquences **CC2** (conséquences moyennes) ou **CC3** (conséquences élevées).

Des recommandations ou explications sur le classement de l'ouvrage ou des parties d'ouvrages sont fournies dans les documents :

- fascicule 66 - chapitre 4.1.2
- guide Sétra « applications des eurocodes pour les maîtres d'ouvrages » (février 2010) - chapitre 3.2.3, page 22
- guide Sétra « eurocodes 0 et 1 - applications aux ponts et passerelles » (février 2010) - chapitre 1.3.2, page 127

- **Les catégories de service et les catégories de fabrication**

Il s'agit d'évaluer les dangers potentiels liés aux conditions de service ou à l'exécution :

Catégories de services	Critères
SC1	<ul style="list-style-type: none"> Structures et composants soumis à des actions statiques ou quasi-statiques pour lesquelles, selon l'EC3, une vérification à la fatigue n'est pas exigée. Structures et composants avec leurs liaisons sujettes à des actions sismiques dans des zones d'activité sismique basse.
SC2	<ul style="list-style-type: none"> Structures et composants soumis à des actions répétées avec une intensité telle qu'une vérification à la fatigue est exigée selon l'EC3 (ex : ponts rails et ponts routes, poutres de roulement pour ponts roulants, structures sensibles à des vibrations dues au vent ou à des machines en rotation). Structures et composants avec leurs liaisons sujettes à des actions sismiques dans des zones d'activité sismique moyenne ou haute.

- action prédominante des charges dynamiques (rupture fragile), fatigue, risques sismiques...

- difficultés d'exécution de la structure ou de ses éléments : complexité des assemblages, aciers à hautes caractéristiques ou en fortes épaisseurs...

Deux catégories de service et deux catégories de fabrication sont prévues selon les tableaux ci-après : **Classes de catégories**

Catégorie de fabrication	Critères
PC1	<ul style="list-style-type: none"> Composants non soudés en acier quelle que soit la nuance Composants soudés en acier de nuance inférieure à S355
PC2	<ul style="list-style-type: none"> Composants soudés en acier de nuance S355 et au-delà Composants principaux pour l'intégrité de la structure assemblés par soudage sur chantier Composants fabriqués par formage à chaud ou soumis à un traitement thermique pendant la fabrication Composants de poutres à treillis en profils creux nécessitant des découpes d'extrémité en gueule de loup

- **Les classes d'exécution** sont ensuite choisies en fonction des classes de conséquences, des catégories de service et des catégories de fabrication retenues pour les éléments considérés. Elles induisent une rigueur d'exigences croissantes de EXC1 à EXC4. Ces exigences portent entre autres sur : le dossier constructeur, le contrôle des produits, les tolérances, les préparations d'assemblage, la qualification des soudeurs et des modes opératoires, les contrôles et leur étendue

Elles peuvent être choisies sur la base des indications du tableau ci-après :

Classes de conséquences		CC1		CC2		CC3	
Cat. de services		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Cat. de fabrication	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3	EXC3
	PC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3	EXC3	EXC4

Les Classes d'exécution pour des constructions métalliques en HLE , telles que des ouvrages d'art sont nécessairement EXC4, ou EXC3.

- **Les tolérances géométriques**

Deux types de tolérances ont été retenus :

- les tolérances essentielles qui conditionnent la sécurité de la structure et sont donc liées à la conception et aux exigences de l'Eurocode 3 ;
- les tolérances fonctionnelles liées aux nécessités de montage et de correspondance de pièces ou éléments.

Des tolérances spéciales peuvent, bien entendu, être requises dans des cas particuliers tels que la fixation de panneaux de façade en verre par exemple.

1-3-3 L'organisation de la qualité

En ce qui concerne les ouvrages d'art, un **Plan Qualité** est exigé, celui-ci doit suivre un schéma bien défini. En l'occurrence, c'est celui du fascicule 66 du CCTG qui s'applique (chapitre 4.2.1).

Le document général de maîtrise de la qualité doit aborder les points suivants :

- étude des exigences du cahier des charges comparées aux capacités d'exécution ;
- organigramme du personnel d'encadrement responsable du projet et des études ;
- principes et modalités d'organisation du contrôle, y compris l'attribution des responsabilités pour chaque tâche de contrôle ;
- points d'arrêt ou exigences concernant les contrôles ou essais devant témoin, et toutes les exigences d'accès correspondantes.

Le dossier préalable à l'exécution contient principalement une liste des ressources mises en oeuvre (personnel et équipements), une liste des procédures de contrôle ainsi que des vérifications devant être effectuées .Ces documents doivent être produits avant l'exécution de l'étape de construction à laquelle ils se rapportent.

Le dossier d'exécution comprend les documents d'exécution (notes de calculs, plans d'exécution, procédures d'exécution et procédures de contrôle) et les enregistrements réels des contrôles et vérifications réalisés, ou qui démontre les qualifications ou certifications des ressources mises en oeuvre. Ceux qui concernent les points d'arrêt, s'ils affectent la poursuite de l'exécution, doivent être produits au préalable.

1-3-4 Les normes associées à l'EN 1090-2

La règle est, qu'il est interdit de répéter des prescriptions figurant dans une norme existante, ce qui conduit parfois à des exigences « à tiroir » avec des renvois successifs d'une norme sur l'autre. La solution présente néanmoins des avantages dans la mesure où l'on évite le risque d'exigences contradictoires, cas où la norme « support » serait modifiée et où les modifications ne seraient pas reportées dans la norme de base.

L'EN 1090-2 comporte donc à juste titre, près de 200 «Références normatives ». Les plus nombreuses sont les normes de produits, au nombre d'une centaine. Viennent ensuite une trentaine de normes soudage, une quinzaine de normes d'essais destructifs ou non destructifs applicables aux soudures ainsi qu'une vingtaine de normes relatives à la protection contre la corrosion.

1-3-5 Matériaux et produits

La clause 5 « Matériaux et produits » de l'EN 1090-2 contient des prescriptions relatives à sept types de matériaux ou produits :

- Aciers (aciers au carbone, aciers inoxydables, aciers moulés) ;
- Produits consommables pour soudage (électrodes, fils et flux) ;
- Éléments de fixation mécaniques (boulons, rivets, goujons...) ;
- Produits de calage ;
- Joints de dilatation ;
- Appareils d'appui ;
- Câbles à haute résistance.

L'analyse de cette clause pourrait consister en une récitation des nombreuses normes de référence, il est donc préférable de situer l'ensemble de ces produits et de leurs normes de référence dans le contexte européen, en essayant de voir comment les préoccupations de l'utilisateur, donneur d'ordres ou constructeur, ont été prises en compte et en mettant l'accent sur quelques points particuliers.

On pourrait résumer les préoccupations du donneur d'ordres sous forme de deux questions : « Comment dois-je spécifier mes produits ? » et « Comment la qualité de ces produits est-elle assurée et vérifiée ? ».

La réponse à la première question est « Par référence aux normes pertinentes » car, hormis les joints de dilatation, tous les produits visés sont aujourd'hui couverts par des normes européennes (ou à défaut, nationales).

Encore faut-il avoir répondu d'abord à la question de base « De quels produits ai-je besoin ? ». Ceci paraît une évidence, mais il est indispensable que soient définies avec précision les nuances et qualités d'acier, les classes de boulons, la nature des produits de calage, la résistance à la traction des câbles et le type d'appareil d'appui.

Seule exception, les produits d'apport pour soudage dont les caractéristiques mécaniques sont étroitement liées à celles du métal de base et la nature au procédé de soudage utilisé par le constructeur.

La deuxième question peut recevoir deux types de réponse selon qu'il s'agit de contrôles de fabrication ou de contrôles de réception, en d'autres termes de contrôles producteur ou de contrôles client. Ce dernier point a été résolu en liant, tout au moins pour les produits métalliques, la nature du document accompagnant les produits à la classe d'exécution, par référence à la norme EN 10204 « Matériaux métalliques - Types de documents de contrôle » conformément au tableau ci-après :

Nuance d'acier	Classe d'exécution		
	EXC1	EXC2	EXC3 ou EXC4
≤ S275	Rapport d'essai type 2.3	Rapport d'essai type 2.3	Rapport d'essai type 2.3
>S275	Rapport d'essai type 2.3	Certificat de contrôle type 3.1	Certificat de contrôle type 3.1

Concernant la qualité en fabrication, il convient de souligner le changement fondamental introduit par les réglementations européennes. Il y a encore quelques années, l'obligation était faite, tout au moins pour les ouvrages d'art, d'utiliser des aciers disposant d'un agrément ministériel, dit agrément CIPACAS. A partir de 2000, (fascicule 4 titre III du CCTG et puis le fascicule 66 révisé en 2012) cet agrément a été remplacé par la certification NF. Les boulons à serrage contrôlé pour construction métallique étaient, quant à eux, soumis à ce dernier régime depuis 1983.

La construction européenne met ces dispositions en sursis du fait de son objectif principal de suppression des entraves techniques aux échanges en prenant en compte les exigences des diverses réglementations des pays membres de l'Union européenne. Dans ce but, un certain nombre de directives ont été prises : directive « Machines », directive « Équipements sous pression » et pour ce qui nous concerne la directive « Produits de la Construction ».

Le principe est de définir un certain nombre d'exigences dites « essentielles », de s'assurer de la conformité des produits à ces exigences et d'identifier les produits à l'aide du marquage CE. Tous les produits de la construction devront donc être revêtus à terme du marquage CE.

Une remarque : le marquage CE n'est pas une marque de qualité, mais un marquage réglementaire.

1-3-6 La Directive « Produits de la Construction »

• **Les exigences essentielles**

La particularité de la DPC (directive "Produits de la construction") est que les produits concernés doivent être conçus et fabriqués de telle sorte que les ouvrages dans lesquels ils sont utilisés satisfassent aux exigences essentielles définies par la directive.

Celles-ci sont au nombre de six : Résistance mécanique et stabilité ; Sécurité en cas d'incendie ; Hygiène, santé et environnement ; Sécurité d'utilisation ; Protection contre le bruit ; Économie d'énergie et isolation thermique.

• **Le contrôle de la conformité**

La directive « Produits de la construction » prévoit quatre méthodes de contrôle de la conformité, avec deux variantes, telles que présentées dans le tableau ci-après :

Systèmes	1	1+	2	2+	3	4
Essai de type initial	0	0	X	X	0	X
Essais d'échantillons	X	X	(X)	(X)		
Inspection initiale	0	0	0	0		
Contrôle de production	X	X	X	X	X	X
Surveillance continue		0		0		
Essais sur prélèvements	(0)	(0)				

Certification

X : Tâche du producteur

Déclaration

0 : Tâche de l'organisme

Le système retenu est précisé dans chaque mandat relatif à une famille de produits.

• **Le mandat M120 et les caractéristiques des produits**

Les mandats définis pour l'application des directives relèvent d'une décision de la Commission des Communautés européennes ; celle relative au mandat M120 concernant les « Produits de construction métallique et produits connexes » date du 9 mars 1998.

Dans chaque mandat, on trouve la définition des produits concernés, le système d'attestation de conformité retenu et la liste des caractéristiques liées aux exigences essentielles qui doivent être couvertes impérativement par les normes harmonisées des produits concernés.

Le mandat M120 définit quatre sous-familles de produits : Profilés métalliques structurels ; Éléments structurels de construction métallique ; Matériaux de soudage ; Connecteurs de construction.

Le système d'attestation de conformité, qui ne peut être discuté, est le système CE 2+ comprenant un programme d'essais de type initial et un contrôle de production réalisés

par le fabricant, complétés par un audit initial et une surveillance continue effectués par un organisme de certification agréé dit « organisme notifié ».

La liste des caractéristiques, propre à chaque sous-famille, relatives à l'exigence essentielle de résistance et stabilité qui ont été arrêtées après accord du CEN, sont indiquées ci-après :

• **Profilés métalliques structurels :**

- tolérances de dimension et de forme allongement
- résistance à la traction
- limite d'élasticité
- résilience
- soudabilité (composition chimique)

• **Éléments structurels de construction métallique :**

- tolérances de dimension et de forme
- capacité portante
- résistance aux chocs
- résistance à la fatigue (le cas échéant)

• **Matériaux de soudage :**

- allongement
- résistance à la traction
- limite d'élasticité
- résilience
- composition chimique

• **Connecteurs de construction :**

- tolérances de dimension et de forme
- allongement
- résistance à la traction
- limite d'élasticité
- résilience,
- aptitude à la précontrainte (serrage), incluant le coefficient de frottement
- résistance au cisaillement

Les normes harmonisées correspondantes doivent reprendre ces caractéristiques, préciser les méthodes utilisées pour leur détermination, définir la consistance de l'essai de type initial ainsi que les éléments principaux du contrôle de fabrication en usine et les conditions du marquage CE. Pour tenir compte de l'éventail de produits dans chaque sous-famille, certains comités techniques ont décidé d'élaborer une norme « chapeau » générale répondant à ces critères.

Les valeurs de chaque caractéristique figurent dans les normes propres à chaque produit, considérées comme normes supports. Nous allons faire le point sur un certain nombre d'entre elles.

1-3-7 Les normes de produits

1-3-7-1 Aciers laminés

- **Aciers de construction**

Ils sont définis par la NF EN 10025 « Produits laminés à chaud en aciers de construction », qui comprend six parties : EN 10025-1 à 6 traités dans le chapitre 1.1 de ce guide et en cours de révision en 2012.

1-3-7-2 Aciers moulés

Les aciers moulés sont couverts, de façon générale par les normes EN 1559-1 « Fonderie - Conditions techniques de fourniture

- Partie 1 : Généralités et EN 1559-2 Fonderie - Conditions techniques de fourniture
- Partie 2 : Spécifications complémentaires pour les pièces moulées en acier. Ces normes sont complétées par une norme spécifique aux aciers moulés de construction l'EN 10340 « Aciers moulés de construction ».

Cette norme contient tous les éléments nécessaires au marquage CE.

1-3-7-3 Consommables pour soudage

Les électrodes, fils et flux sont multiples et variés de même que leur utilisation. Les normes de classification et de caractéristiques propres à chaque produit n'ont donc pas été remaniées pour satisfaire à la Directive.

Une norme « chapeau » générale EN 13479 « Produits consommables pour soudage - Norme générale de produit pour les métaux d'apport et les flux pour le soudage par fusion de matériaux métalliques » a donc été rédigée.

Elle s'applique uniquement aux produits relevant de cette directive « Produits de la construction ».

Elle s'appuie en outre sur la norme EN 14532 « Produits consommables pour le soudage - Méthodes d'essai et exigences de qualité », en trois parties :

- Partie 1 : Méthodes primaires et évaluation de la conformité des produits consommables pour l'acier, le nickel et les alliages de nickel
- Partie 2 : Méthodes complémentaires et évaluation de la conformité des produits consommables pour l'acier, le nickel et les alliages de nickel

- Partie 3 : Évaluation de la conformité des fils électrodes, fils et baguettes pour le soudage des alliages d'aluminium

1-3-8 Les normes de soudage et de contrôle

Le soudage est un domaine de la construction métallique où le recours à la normalisation est le plus complexe et le plus diversifié.

Ce n'est pas le fait de la construction métallique, mais bien celui de la technique. En effet, le soudage est une technique « transversale » dont les applications sont multiples : appareils à pression, distribution de gaz, off-shore, construction métallique, automobile... Par ailleurs, les procédés et méthodes progressent chaque jour et deviennent plus complexes.

Il en résulte un ensemble de textes dont l'objectif est de traiter dans le détail toutes les opérations concourant à la qualité en soudage.

La clause soudage de l'EN 1090-2 (article 7) fait référence à une quarantaine de normes qu'il serait fastidieux et inutile d'analyser en détail. Trois points méritent un développement :

- l'organisation générale de la qualité ;
- la qualification des modes opératoires ou du personnel ;
- les contrôles non destructifs et les critères d'acceptation.

1-3-8-1 L'organisation générale de la qualité

L'option fondamentale de l'EN 1090-2 est de spécifier que les opérations de soudage doivent être effectuées conformément aux exigences de l'EN ISO 3834 « Exigences de qualité en soudage. Soudage par fusion des matériaux métalliques » qui constitue, en fait, une déclinaison de l'ISO 9000 appliquée au soudage et traite des points suivants :

- Revue de contrat et du dossier de conception
- Sous-traitance
- Personnel chargé du soudage
- Personnel chargé des contrôles, essais et examens
- Matériels
- Activités de soudage
 - Produits consommables pour soudage
 - Stockage des matériaux de base
 - Traitement thermique après soudage
- Contrôles, essais et examens liés au soudage
- Non-conformités et actions correctives
- Étalonnage
- Identification et traçabilité
- Enregistrements relatifs à la qualité.

Après une première partie, relative aux éléments de choix du niveau de qualité en fonction des exigences contractuelles, l'EN ISO 3834 précise dans ses parties 2, 3 et 4, de sévérité décroissante, les exigences de qualité applicables au soudage, aussi bien en atelier que sur site. Dans l'EN 1090-2, ce choix est déjà fait, reliant les exigences de qualité aux classes d'exécution requises. Pour les classes d'exécution EXC3 et EXC4, c'est la qualité la plus haute « norme EN ISO 3834 partie 2 « exigences de qualité complète » qui s'applique.

Les points concernant les activités de soudage proprement dites, le personnel chargé du soudage, des contrôles, essais et examens, ces contrôles, essais et examens eux-mêmes méritent un examen.

1-3-8-2 Soudage - la qualification des personnels et des modes opératoires

Les activités de soudage doivent, comme toutes les autres activités, disposer au titre de l'organisation de la qualité d'un programme de production comportant la liste et l'identification des opérations à réaliser, des contrôles et essais à effectuer ainsi que les références aux processus applicables. Ce dernier point fait l'objet d'une série de normes traitant des descriptifs et qualifications des modes opératoires de soudage développées ci-après.

- o Le personnel chargé du soudage et des contrôles

L'expression « personnel chargé du soudage » recouvre les soudeurs, pour le soudage manuel, et les opérateurs, pour le soudage automatique ou semi-automatique. Pour chacune de ces catégories, il est précisé qu'ils doivent être qualifiés par une épreuve appropriée définie dans la série des normes EN 287, concernant les soudeurs, ou de l'EN 1418, concernant les opérateurs.

Par ailleurs, l'EN ISO 3834 introduit une notion nouvelle, celle de « **coordonnateur en soudage** ». Définie dans la norme EN ISO 14731« Coordination en soudage - Tâches et responsabilités » selon trois niveaux de connaissances techniques, fondamentales (B), spécifiques (S) ou complètes (C) ; cette fonction peut être exercée par diverses personnes : ingénieur soudeur, technologue en soudage, chef de production, contremaître.

Le niveau de connaissances requis est donné par le tableau ci-après :

Classe d'exécution	Aciers	Epaisseur		
		t ≤ 25	25 < t ≤ 50	t > 50
EXC2	S235 à S355	B	S	C
EXC3	S420 à S700	S	C	C
EXC2	S235 à S355	S	C	C
EXC3	S420 à S700	C	C	C
EXC4	Tous	C	C	C

Pour les HLE, le niveau requis de connaissance pour le coordonnateur en soudage est le « niveau complet »

(excepté pour des épaisseurs de tôles ≤ 25 , en classe d'exécution EXC3)

Pour ce qui concerne le **personnel chargé de réaliser les contrôles non destructifs**, une certification selon l'EN 473 « Qualification et certification du personnel en contrôle non destructif - Principes généraux » est requise. Cette certification comporte trois niveaux par technique de contrôle: ultrasons, rayonnements ionisants, magnétoscopie, ressuage. L'organisme français de certification est la COFREND (Confédération Française pour les Essais Non Destructifs).

- Contrôles, examens et essais

Les exigences de qualité relatives aux contrôles, examens et essais relèvent dans leur majorité d'une bonne pratique des opérations de soudage. Avant soudage, il convient d'identifier les produits utilisés, matériaux de base et produits consommables, de vérifier la validité des qualifications, les préparations de joints... Pendant le soudage, ce sont les paramètres de soudage, les températures... qui retiennent l'attention. Après soudage, ce sont les vérifications dimensionnelles et les contrôles non destructifs qu'il faut pratiquer.

- La qualification des modes opératoires de soudage

Les normes de qualification des modes opératoires de soudage à l'arc figurent parmi les plus anciennes publiées par le Comité technique CEN/TC 121. À ces normes, qui respectaient la règle générale du choix entre « pas de qualification » ou « qualification par épreuve », sont venues s'ajouter de nouvelles modalités de qualification, la philosophie générale étant d'offrir un éventail de possibilités permettant de choisir la solution la plus économique et techniquement la plus appropriée.

Procédés	Arc	Gaz	Faisceau d'électrons	Laser	Résistance	Goujons	Friction
Règles générales	EN ISO 15607						
Groupement des matériaux	CR ISO / TR 15608			Non applicable		CR ISO / TR 15608	
DMOS	EN ISO 15609-1	EN ISO 15609-2	EN ISO 15609-3	EN ISO 15609-4	EN ISO 15609-5	EN ISO 14555	EN ISO 15620
Consommables agréés	EN ISO 15610			Non applicable			
Expérience acquise	EN ISO 15611					EN ISO 15611 & 14555	EN ISO 15611 & 15620
MOS standard	EN ISO 15612				Non applicable		
Essai préalable production	EN ISO 15613					EN ISO 15613 & 14555	EN ISO 15613 & 15620
Epreuve de qualification *	EN ISO 15614 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 7 ; 8 ; 9 ; 10	EN ISO 15614 1 ; 3 ; 6 ; 7	EN ISO 15614 7 ; 11	EN ISO 15614 12 ; 13	EN ISO 14555	EN ISO 15620	
1 : acier/nickel ; 2 : Al ; 3 : acier moulé ; 4 : finition des aciers moulés ; 5 : Ti / Zr ; 6 : cuivre ; 7 : rechargement 8 : tube sur plaque ; 9 : hyperbare sous eau ; 10 : hyperbare à sec ; 11 : faisceau d'électrons/soudage Laser ; 12 : points molette et bossages ; 13 : embout par étincelage							

Il est à noter que la durée de vie des QMOS pose parfois soucis quand on fait peu l'opération de soudage correspondante.

L'extension à d'autres procédés de soudage, ainsi qu'à d'autres matériaux, a conduit à une refonte complète du système selon le tableau (annexe A de l'EN-ISO 15607) ci-après.

L'analyse du tableau ci-dessus fait ressortir les points suivants :

- les règles générales s'appliquent à tous les procédés ;
- seuls le soudage de goujons et le soudage par friction n'entrent pas dans le schéma général, compte tenu de leur spécificité ;
- le groupage des matériaux est commun à tous les autres procédés (soudage à l'arc, soudage au gaz, soudage par faisceau d'électrons, soudage laser, soudage par résistance) ;
- les modalités de qualification par utilisation de produits consommables agréés, par référence à l'expérience acquise, par référence à un mode opératoire de soudage standard, par exécution d'un assemblage soudé particulier préalable à la production, sont également communes à ces mêmes procédés. Cela signifie que le même type de procédure peut être appliqué ;
- concernant la qualification par essai, des regroupements ont été effectués entre soudage à l'arc et soudage au gaz d'une part, soudage par faisceau d'électrons et soudage laser d'autre part. Ceci signifie que les mêmes types d'essais sont utilisés et interprétés suivant les mêmes modalités ;
- en revanche, les exigences relatives aux descriptifs des modes opératoires de soudage (DMOS) sont spécifiques à chaque* procédé.

Si l'on s'en tient à la procédure couramment employée aujourd'hui en construction métallique, on a la correspondance suivante :

	Ancienne norme	Nouvelle norme
Règles générales	EN 288-1	EN ISO 15607
DMOS	EN 288-2	EN ISO 15609-1
Épreuve de qualification	EN 288-3	EN ISO 15614-1

Pour les classes d'exécution 3 et 4, l'EN 1090-2 ne retient que cette possibilité*, ainsi que celle de l'essai préalable à la production (EN ISO 15613). Les autres options sont ouvertes pour la classe d'exécution 2. Rien n'est demandé pour la classe de base, classe 1.

1-3-8-3 Les contrôles non destructifs et les critères d'acceptation

Les contrôles non destructifs, s'ils ne suffisent pas à garantir un niveau de qualité déterminé, sont déterminants pour l'acceptation d'une structure ou d'un équipement soudé. Au cours de ces dernières années, ils ont fait l'objet d'un travail normatif important dont le concept général a considérablement évolué. De plus la technologie des méthodes de contrôle non destructif a connu, des progrès significatifs; en contrepartie, les modalités d'interprétation des indications ont évolué en devenant plus complexes.

Les contrôles non destructifs des assemblages soudés sont aujourd'hui traités dans un ensemble de normes, élaborées selon une approche « horizontale » indépendante des applications traduite de la façon suivante :

- Élaboration d'un référentiel unique pour la description et la définition des classes de défauts.
- Définition des modalités d'application de chaque méthode, ainsi que de leurs limites de validité, en précisant à partir de quel moment une indication peut être considérée comme significative ou non.
- Interprétation, pour chaque méthode, des niveaux d'indications fournies par celle-ci par référence aux classes de défauts de base.

La norme de base est l'EN ISO 5817 « Soudage - Assemblages en acier, nickel, titane et leurs alliages soudés par fusion (soudage par faisceau exclu) - Niveaux de qualité par rapport aux défauts » qui décrit et définit par ordre de sévérité décroissante trois classes de défauts : B, C et D.

Suit la norme EN ISO 17635 « Contrôles non destructifs des assemblages soudés - Règles générales pour les matériaux métalliques » qui « donne des indications pour le choix de la méthode de contrôle non destructif des assemblages soudés et l'évaluation des résultats dans le cadre du contrôle qualité. Elle spécifie également les règles générales et les normes applicables pour différents types de contrôle, tant du point de vue de la méthodologie

que des niveaux d'acceptation pour les matériaux métalliques ».

Les détails sont ensuite donnés, tant en ce qui concerne la technique et ses limites de validité que les « niveaux d'acceptation », dans les normes spécifiques à chaque méthode. Six types de méthodes sont ainsi couverts : examen visuel, ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault, radiographie et ultrasons.

Dans le système proposé, le seul souci sera de choisir la classe de défauts tolérés par rapport au référentiel de base, EN ISO 5817.

En l'état actuel de la norme de l'EN 1090-2, les exigences suivantes sont fixées :

- Classe d'exécution 1 -> Niveau de qualité D
- Classe d'exécution 2 -> Niveau de qualité C
- Classe d'exécution 3 -> Niveau de qualité B
- Classe d'exécution 4 -> Niveau de qualité (B +) avec exigences complémentaires prenant en compte les effets de fatigue (cf tableau 17 art 7.6 de l'EN1090-2)

Les niveaux de qualité par rapport aux défauts de soudage pour les constructions en HLE sont donc ne niveau B ou B+.

2- ELABORATION ET PROPRIETES DES ACIERS HLE

2-1 COMPOSITION CHIMIQUE ET STRUCTURE DES ACIERS HLE

2-1-1 Influence de l'analyse sur les caractéristiques mécaniques

Un acier est composé de fer et de carbone (moins de 2% de carbone et, le plus souvent, moins de 0,25% pour les aciers dits soudables), mais aussi d'autres éléments d'alliages. Certains éléments sont ajoutés (manganèse, silicium, niobium, vanadium, titane, molybdène, aluminium, nickel, chrome, cuivre...) afin d'améliorer ses propriétés mécaniques (limite d'élasticité, résilience ...), son aptitude à la mise en œuvre (réponse au soudage et/ou aux traitements thermiques ...), sa résistance à la corrosion atmosphérique (aciers W de la norme NF EN 10025-5), ou encore son comportement dans des conditions de températures variées (aciers pour applications cryogéniques, utilisation à chaud...). D'autres éléments d'alliage sont au contraire indésirables (soufre, phosphore,...) et on cherche à en limiter la teneur ou les effets.

Le fer a la particularité de présenter des changements d'état structural, c'est-à-dire une modification de l'organisation des atomes dans l'espace, selon les températures. Ces modifications se font à plus ou moins haute température, suivant la composition de l'acier. Le carbone a pour effet de durcir le fer qui, à l'état pur, est très ductile mais peu résistant. La solubilité du carbone est variable selon la température (élevée à chaud, très faible à température ambiante). Le diagramme d'équilibre Fe-C (Fig.2.1) décrit, dans des conditions idéales (refroidissement très lent), quelles sont les conséquences structurales de ces phénomènes.

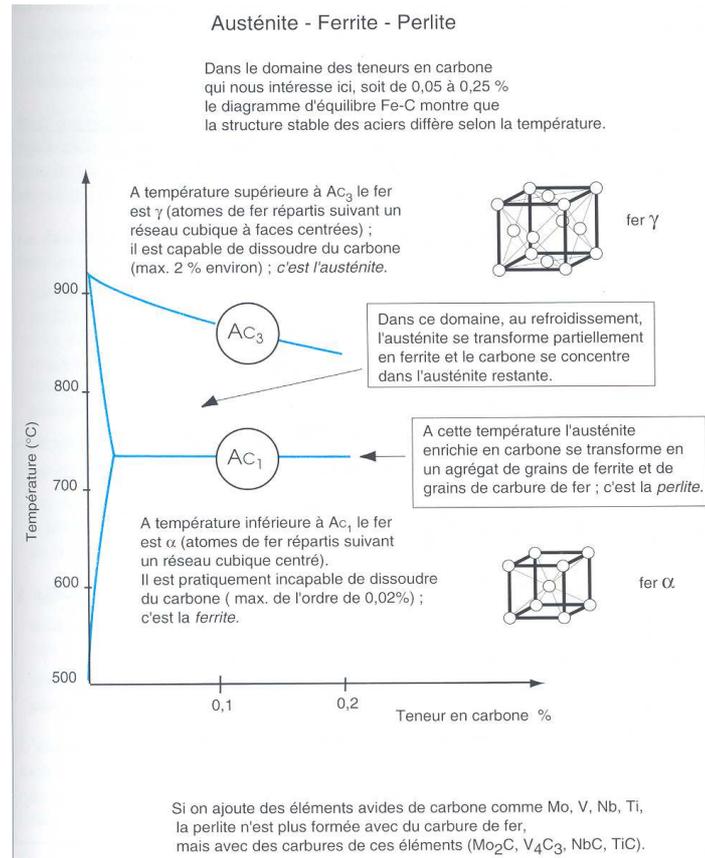


Figure 2.1- Diagramme d'équilibre Fer-Carbone.

En pratique, l'équilibre n'ayant pas le temps de s'établir, différents états métallurgique sont obtenus en fonction de l'analyse et du procédé de fabrication (paramètres de réchauffage des brames, vitesses de refroidissement, traitements thermiques...)

Au niveau de l'analyse, différents mécanismes permettent aux sidérurgistes de modifier les propriétés mécaniques :

Le durcissement :

Il confère à l'acier ses performances de résistance (hautes limites d'élasticité), et peut être obtenu par les mécanismes suivants :

➔ Par précipitation en présence de faibles additions d'éléments d'alliage tels que le vanadium, niobium ou le titane, pour former généralement des carbures, parfois des nitrures ou des carbonitrures. Cette précipitation

est réalisée lors des changements d'état structural. Le durcissement obtenu est d'autant plus important que les particules formées sont plus dures, plus proches de la taille optimale (laquelle est généralement relativement petite, de l'ordre de quelques millièmes de micromètres) et précipitées dans les grains de ferrite (et non à côté comme dans la perlite),

→ Par affinement de la taille des grains comme évoqué ci-dessous,

→ Par effet de solution solide, d'effet toutefois limité car il nécessite généralement l'addition de quantités importantes en éléments de substitution (lorsque l'élément prend la place de l'atome de fer) ou d'insertion (lorsque l'élément occupe les interstices du réseau de fer). Les propriétés de résilience sont dégradées dans des proportions relativement importantes (surtout pour les solutions d'insertion comme c'est le cas pour le carbone) sauf pour le manganèse et le nickel,

→ Par écrouissage de la ferrite pendant sa formation : ce phénomène est réalisable par achèvement du laminage à relativement basse température, c'est-à-dire dans le domaine de transformation $\gamma \Rightarrow \alpha$

L'affinement de la taille de grains :

Il peut être obtenu par :

→ La diminution de la taille des grains de l'austénite avant sa transformation ; ce résultat peut être réalisé par l'adaptation des conditions de laminage,

→ La réalisation de la transformation $\gamma \Rightarrow \alpha$ dans des conditions de refroidissement qui conduisent à des grains fins.

L'état inclusionnaire :

Il est maîtrisé lors des opérations d'aciérie (étape de la métallurgie en poche) par abaissement des teneurs en éléments générateurs d'inclusions (soufre et oxygène) et lors du processus de coulée et de solidification (étape de coulée continue), par une optimisation des paramètres de coulée, visant à réduire et à optimiser la ségrégation inclusionnaire.

L'influence des différents éléments d'alliage est présentée dans la figure 2.2.

	Rm	Re	Résistance à l'abrasion	Résistance à la fatigue	Résilience	Dureté à froid	Dureté à chaud	A%
Aluminium					↑			
Carbone	↑		↑		↓	↑		
Cobalt		↑					↑	
Chrome	↑	↑	↑		↓	↑		↓
Manganèse	↑	↑	↑			↑		↓
Molybdène	↑	↑					↑	
Nickel	↑	↑	↑		↑			↓
Silicium	↑	↑	↑			↑		
Titane	↑	↑	↑		↓	↑	↑	
Tungstène	↑	↑	↑			↑	↑	
Vanadium	↑	↑		↑	↑	↑		

Figure 2.2- Influence des éléments d'alliage.

2-1-2 Influence des conditions de refroidissement sur la structure des aciers

En pratique, les conditions de refroidissement ont également une très grande influence sur l'état structural d'un acier : en modifiant ces dernières, on conditionne son état final.

Les différentes évolutions sont décrites par le diagramme de transformation en refroidissement continu (TRC) (Fig.2.3) qui, pour une composition chimique donnée de l'acier, représente les domaines d'existence des différentes structures (austénite, ferrite, perlite, bainite, martensite) en fonction de la vitesse de refroidissement : les structures ferrito-perlitiques sont obtenues pour les vitesses de refroidissement plus faibles (courbe C), les structures bainitiques pour des vitesses de refroidissement plus

élevées (courbe B), et les structures martensitiques lors de refroidissements très rapides (courbe A).

Transformation au cours des refroidissements industriels vues avec le diagramme TRC (Transformations en Refroidissement Continu)

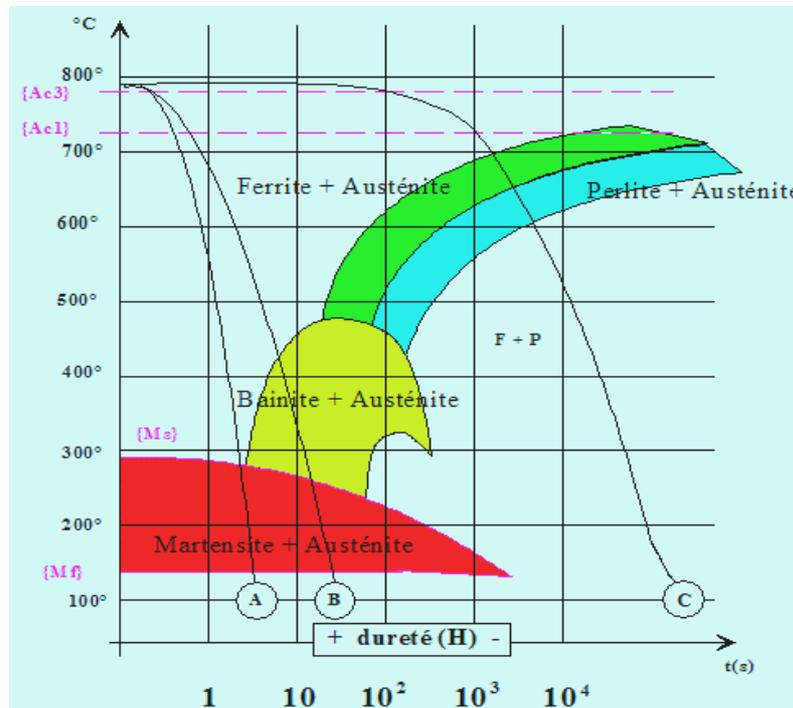


Figure 2.3

2-2 ELABORATION DES ACIERS HLE

2-2-1 Influence du processus de fabrication sur les propriétés des aciers

Le chapitre précédent montre que pour conférer aux aciers de construction métallique leurs propriétés d'emploi les plus élevées, le sidérurgiste devra:

- ⇒ Provoquer les transformations structurales les plus aptes à donner à la précipitation du carbone l'effet durcissant le plus efficace, ce qui permet

d'ajuster au mieux la teneur en carbone au niveau le plus bas pour obtenir une soudabilité maximale,

⇒ Faire jouer les processus qui permettront de donner aux grains du métal la plus petite taille possible.

Différentes filières de fabrication peuvent être mises en œuvre par le sidérurgiste pour obtenir les propriétés recherchées pour l'acier.

Le premier procédé consiste en un laminage normal réalisé sans précautions particulières et à haute température (achèvement au-delà de 1000°C). Le produit ainsi mis à dimension et refroidi à l'air libre conduit à une structure ferrito-perlitique assez grossière et partiellement aciculaire. Il est alors nécessaire de faire subir au métal un traitement thermique pour **affiner sa structure** et lui conférer ses propriétés mécaniques d'emploi. Dans le cas des aciers normalisés, ce traitement thermique est un recuit de normalisation. Il consiste à chauffer l'acier à une température légèrement supérieure à AC_3 (de l'ordre de 930 °C) pour faire passer l'acier à l'état austénitique, dont les grains sont d'autant plus fins que la température reste proche de l' AC_3 et que le temps de maintien n'est pas trop élevé.

Si la normalisation est suivie d'un refroidissement à l'air, le refroidissement est d'autant plus lent que le produit est épais et la structure en est d'autant moins fine et les caractéristiques de résistance d'autant moins élevées.

Le laminage normalisant est un laminage contrôlé qui permet d'obtenir les mêmes structures et les mêmes caractéristiques mécaniques que la filière avec normalisation tout en évitant le traitement thermique.

Pour améliorer les propriétés des aciers normalisés, on dispose alors de deux moyens :

→ Élever la teneur en carbone (au détriment de la soudabilité) pour augmenter la quantité de carbure de fer précipitée et donc accroître le durcissement,

→ Augmenter légèrement la trempabilité de l'acier pour abaisser le domaine de température dans lequel se développe la transformation $\gamma \Rightarrow \alpha$ et aboutir à une structure ferrito-perlitique plus fine. Le moyen le plus utilisé est une addition de manganèse.

La procédure qui implique l'ajout de carbone n'étant pas totalement satisfaisante, car cela se fait au détriment de la ductilité et de la soudabilité du métal, les sidérurgistes ont mis en œuvre d'autres procédures.

D'un côté, les conditions de précipitation du carbone peuvent être modifiées en ajoutant des éléments d'alliage (vanadium, niobium et/ou molybdène) induisant une précipitation

de carbures (ou de carbonitrides) capables d'un durcissement plus important que celui dû à la cémentite. Le dosage de ces éléments (teneur en niobium comprise entre 0,03 et 0,05% et teneur en vanadium entre 0,05 et 0,012%) est réalisé de telle sorte que la mise en solution ne se fasse qu'à très haute température (au-dessus de 1150 °C) et que par voie de conséquence, l'austénite soit sursaturée à la température à laquelle elle se transforme. Ainsi la précipitation de carbures (et carbonitrides) se fait très finement, au moment de la transformation $\gamma \Rightarrow \alpha$, à l'interface austénite/ferrite ; la croissance de la ferrite permet alors d'englober les précipités très fins dans les grains (c'est la précipitation interphase) et donc de réaliser un durcissement beaucoup plus efficace parce que dû à de fins précipités intragranulaires. Il devient ainsi possible, à limite d'élasticité visée identique, d'abaisser la teneur en carbone. Ainsi ont été mis au point les aciers HLE de la première génération, aciers micro-alliés (au niobium et/ou vanadium) dits à **dispersoïdes**.

Le deuxième procédé est un laminage contrôlé dans des domaines de température plus basses, pouvant descendre jusqu'à 700°C. Grâce aux possibilités offertes par le contrôle des conditions de laminage et de refroidissement, il est possible d'affiner la taille des grains d'austénite et de provoquer leur transformation dans des conditions telles que la formation de la structure ferrito-perlitique se fasse à relativement basse température et conduise aux grains les plus fins avec durcissement de la ferrite par précipitation interphase de carbure (et carbonitride) de niobium et vanadium. C'est le laminage **thermomécanique**, qui a donné naissance à la deuxième génération d'aciers HLE qui présentent, comparée à la première génération :

- Des caractéristiques mécaniques plus élevées à analyse donnée,
- Des compositions chimiques moins chargées à caractéristiques mécaniques données.

Ce processus sera détaillé dans le chapitre « plaques »

Le sidérurgiste dispose, par ailleurs, d'autres moyens permettant de conférer aux aciers de très hautes performances de résistance : il s'agit du traitement de durcissement par **trempe et revenu** (utilisé pour l'acquisition des performances de la plupart des aciers de construction mécanique).

Ce procédé consiste en un laminage à haute température suivi d'un refroidissement rapide appelé trempe, normalement dans l'eau, et pour finir, d'un revenu à une température inférieure à Ac1 (température à laquelle l'austénite commence à se former).

La trempe consiste à refroidir suffisamment et très rapidement l'acier, après l'avoir austénitisé, pour former des structures autres que ferrito-perlitiques (martensitiques ou bainitiques) et obtenir ainsi des duretés plus élevées. La trempe martensitique est celle qui procure la plus grande dureté réalisable avec une analyse donnée. Elle conduit à

une structure hors d'équilibre qui est très dure mais fragile et dont les propriétés de résilience seront améliorées de manière significative pendant l'opération de revenu.

Après durcissement par trempe, il est donc nécessaire de soumettre l'acier à un traitement de revenu (en général la température de revenu doit être supérieure à 625 °C), dont le rôle est de restaurer la ténacité et la ductilité du métal affectées par la trempe. Celui-ci acquiert une stabilité suffisante pour que les cycles thermiques de soudage n'engendrent pas d'effet de sur-revenu dans une partie de la zone affectée par la chaleur lors du soudage, cet effet de sur-revenu diminuerait localement la résistance de l'acier.

Le revenu est un traitement thermique caractérisé par la température de réchauffage ($T < A_{c1}$), le temps de maintien à cette température (t) et le refroidissement jusqu'à la température ambiante selon une loi programmée ou non.

Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état d'équilibre sans toutefois chercher à atteindre cet état. Le choix de T et t permet de contrôler cette évolution en fonction du compromis recherché pour les caractéristiques mécaniques. A l'état trempé, les résultats ne dépendent que de l'analyse et sont indépendants de la vitesse de refroidissement (du moins tant que l'on reste martensitique).

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 carbonitrures.

Un revenu bien adapté permet donc d'améliorer la ductilité et la ténacité tout en conservant les valeurs de limite d'élasticité et de résistance nécessaires pour l'emploi envisagé.

2-2-2 Les différents processus de fabrication : synthèse

Les procédés de fabrication décrits précédemment sont résumés dans la figure 2.4.

On peut retenir que :

- **Les aciers livrés à l'état normalisé** (ou équivalent) **repérés N** sont:
- ⇒ Les aciers qui après laminage et retour à la température ambiante, ont subi un traitement thermique de normalisation,
 - ⇒ Les aciers qui ont été laminés dans des conditions leur conférant des propriétés d'emploi comparables à celles engendrées par le traitement thermique de

normalisation (et accessibles par un traitement thermique ultérieur de normalisation) ; il s'agit du « laminage normalisant »

→ **Les aciers livrés après traitement thermomécanique et repérés M ou TM** sont des aciers qui ont été laminés dans des conditions de températures telles que les transformations microstructurales conduisent à une microstructure à grain fin, telle que la ferrite-perlite fine. Le laminage peut être suivi, en fonction de l'épaisseur des produits et de la nuance visée :

- ⇒ d'un refroidissement à l'air calme,
- ⇒ d'un refroidissement accéléré (cas des nuances élevées et/ou des fortes épaisseurs),
- ⇒ d'une trempe superficielle suivie d'un auto-revenu (cas des produits de forte épaisseur soumis à un refroidissement accéléré).

→ **Les aciers livrés à l'état trempé et revenu et repérés Q** sont :

- ⇒ Les aciers qui, après laminage et retour à la température ambiante, ont été réchauffés à une température légèrement supérieure à la température de normalisation et ensuite ont subi un traitement complet de trempe et revenu (cas des produits plats S690 Q à S 960 Q)
- ⇒ Les aciers qui, après laminage, ont subi une trempe directe suivie d'un revenu.

Ces différents procédés de fabrication ne mettent pas en jeu les mêmes mécanismes de durcissement et, de ce fait, n'exploitent pas la présence du carbone avec la même efficacité. Ainsi donc, à performances mécaniques identiques, les aciers fabriqués selon ceux-ci n'ont pas les mêmes teneurs en carbone (et donc la même soudabilité métallurgique) (cf chapitre 3 « soudage »).

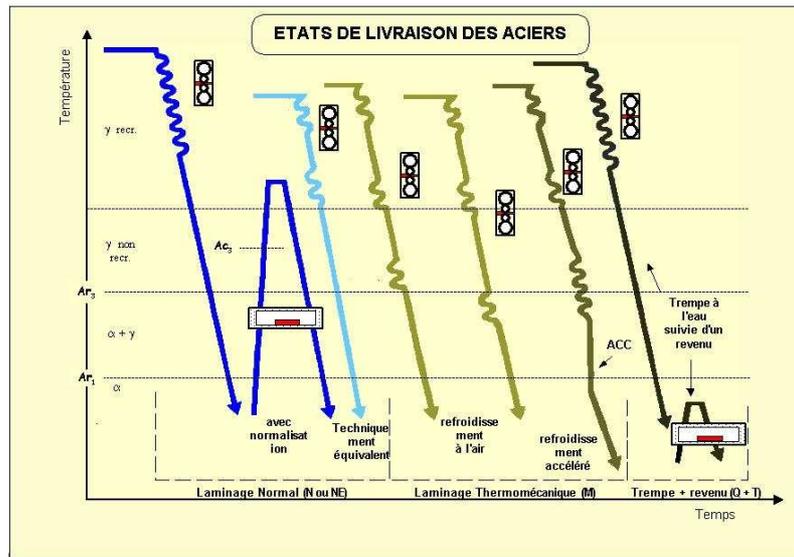


Figure 2. 4. Processus de fabrication des plaques et/ou poutrelles laminées.

2-3 LES PLAQUES OU TÔLES « QUARTO »

2-3-1 Gamme dimensionnelle pour les états de livraison N, M et Q

Les dimensions maximales réalisables (Epaisseur x Longueur x largeur) pour les tôles fortes (appelées également plaques ou tôles quarto) en fonction des états de livraison (N, M ou Q) dépendent, en premier lieu, des capacités des cages de laminage tant en terme dimensionnel qu'en terme de puissance et de dispositifs de contrôle en temps réel. Les capacités des autres outils du laminoir, comme les fours de réchauffage de brames ou de traitements thermiques, ou encore les installations de refroidissement accéléré ou de trempe, peuvent également intervenir sur les dimensions maximales réalisables. A titre d'exemple, il est indiqué ci-après les possibilités dimensionnelles standards de livraison selon les états N, M (TM) et Q, de Dillinger Hütte GTS, fournisseur européen majeur de tôles fortes.

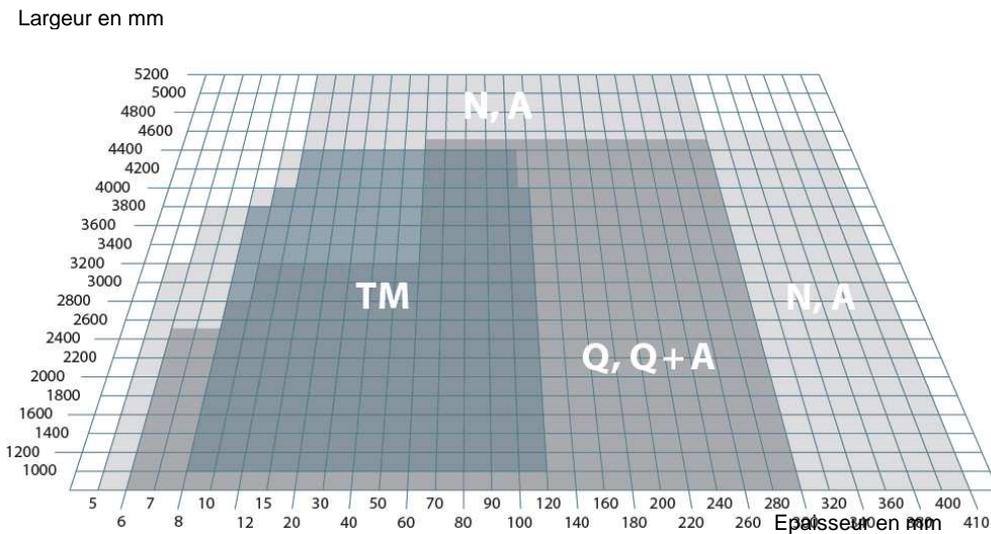


Figure 2.5: Programme dimensionnel standard de Dillinger Hütte GTS pour les différents états de livraison (longueur maxi : 28 m, poids tôle maxi : 40 t)

2-3-2 Les procédés de fabrication des aciers à hautes limites d'élasticité

Nous nous intéresserons ici essentiellement aux procédés thermomécaniques et trempés et revenus. Les hautes limites d'élasticité obtenues par normalisation (ou laminage normalisant), le S460 dans le cas des plaques, conduisent à des aciers dont les teneurs élevées en éléments d'alliage ne sont pas favorables à la mise en œuvre (cf chapitre soudage).

2-3-2-1 Le laminage thermomécanique (M ou TM)

L'utilisation du laminage thermomécanique pour les tôles fortes s'est véritablement généralisée vers le milieu des années 60 pour répondre à de nouvelles exigences dans le domaine de la production des tubes de transport de gaz et de pétrole. Il s'agissait en effet de développer des aciers présentant des caractéristiques améliorées : de traction, de résistance à la rupture fragile et, dans certains cas, de résistance à la corrosion en milieu acide. Ces aciers devaient, en outre, présenter des caractéristiques de mise en œuvre (soudabilité...) permettant la construction et l'exploitation des pipelines dans des environnements sévères (mer du Nord, Alaska...).

Aujourd'hui, ces aciers ne sont plus utilisés uniquement pour les oléoducs ou les gazoducs, mais également pour toutes les constructions qui réclament des exigences

supérieures en ductilité du matériau comme la construction offshore, la construction navale mais surtout la construction métallique. Le procédé de laminage thermomécanique n'est applicable que jusqu'à des épaisseurs dont la limite décroît quand la nuance augmente, de ce fait cette gamme d'aciers thermomécaniques a du être complétée par le procédé de trempe et revenu notamment pour les épaisseurs plus élevées.

Pour les produits destinés à la construction métallique, les filières de production par traitement thermomécanique se répartissent suivant les nuances et les épaisseurs en : laminage thermomécanique + refroidissement à l'air ou laminage thermomécanique + refroidissement accéléré ACC (Accelerated Controlled Cooling). Le traitement ACC est très souvent utilisé pour les tôles les plus épaisses et les nuances à plus haute limite d'élasticité afin de garantir une bonne homogénéité de leurs propriétés.

Ce processus nécessite des cages de laminoir puissantes, car le laminage est généralement terminé à basse température, et des cages rapides pour empêcher le grain de grossir entre passes. La disponibilité de modèles de schémas de laminage performants, qui peuvent être mis en œuvre en toute fiabilité grâce à des dispositifs contrôlés par des microprocesseurs, contribue également à apporter au produit les propriétés recherchées.



**Photo 2.6 : cage de laminage quarto de GTS Industries à Dunkerque
(©Dillinger Hütte GTS - C. Manuelli)**

Avant laminage, les aciers possèdent une structure de solidification grossière. Ils sont d'abord réchauffés à des températures se situant généralement entre 1100 °C et 1250°C pour les faire passer à l'état austénitique et mettre en solution tous les carbures.

Puis au cours du laminage à chaud, les grains sont déformés et absorbent donc de l'énergie. Suivant la quantité de déformation réalisée et la durée des opérations, le laminage peut conduire à deux états :

→ Si la déformation est relativement limitée, les grains d'austénite sont déformés et écrouis et, si la température est relativement basse, leur transformation allotropique se fait avec germination importante de grains α et conduit donc à une ferrite fine,

→ Si la déformation est élevée, dépendant de la température, la recristallisation (par germination et croissance de nouveaux grains) peut se produire. Ainsi apparaissent de nouveaux grains qui, lors de leur formation, sont très petits si la quantité d'énergie absorbée est importante et si la température est relativement basse.

La première phase de laminage, à des températures supérieures à 1000°C, provoque un premier affinement de la structure par recristallisation tout en ébauchant la mise en forme. La deuxième phase de déformation à des températures basses (légèrement supérieures à A_{r3} , voire comprises entre A_{r3} et A_{r1}) permet aux grains d'austénite d'être très fins et écrouis en fin de dernière passe de laminage.

Un refroidissement accéléré peut être réalisé dans des installations situées en ligne après la dernière cage de laminoir, donc dès la sortie de la dernière cage du laminoir. Ce refroidissement permet de bénéficier d'un affinement supplémentaire des grains par augmentation du nombre de sites de germination et abaissement des températures de précipitation des précipités de niobium et vanadium. Il conduit à une intensification du durcissement. Les divers paramètres du refroidissement (température de début, température de fin, vitesse) sont contrôlables, tandis que la vitesse d'un refroidissement à l'air ne dépend que de l'épaisseur du produit.

La figure 2.7 illustre le mécanisme d'affinement de taille de grain au cours des différentes passes de laminage, schématisées par les figures en zigzag. Le schéma présente la succession des opérations dans le temps, de la sortie du four de réchauffage des brames au refroidissement de la tôle.

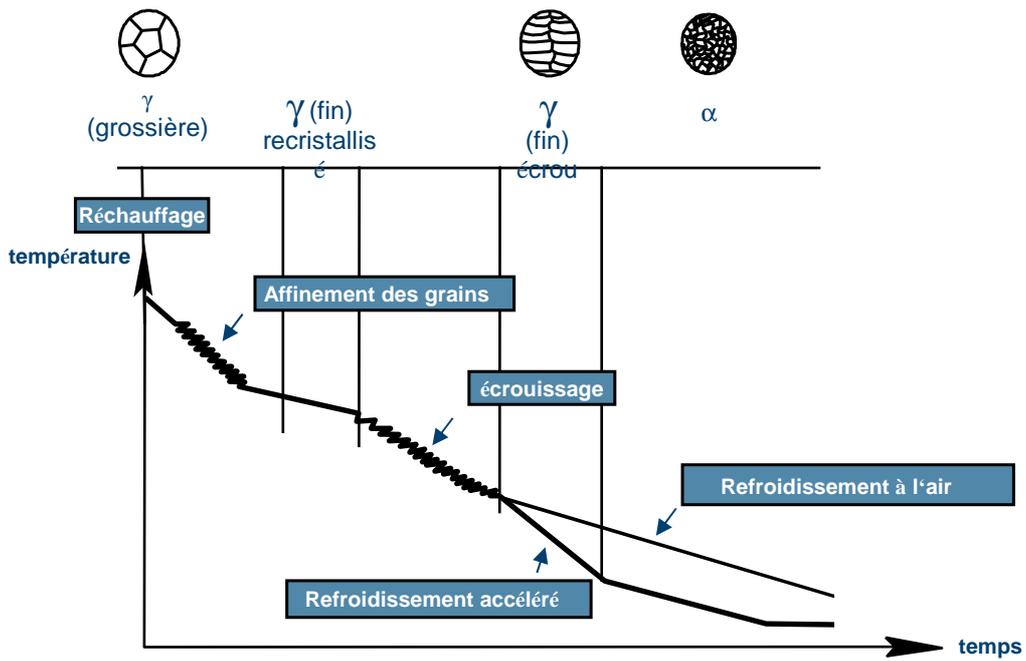


Figure 2.7 : Schéma de laminage TM

Les structures obtenues par laminage thermomécanique sont plus fines que par laminage normalisant (ou normal suivi d'un traitement de normalisation), d'autant plus dans le cas d'un refroidissement accéléré (figure 2.7).



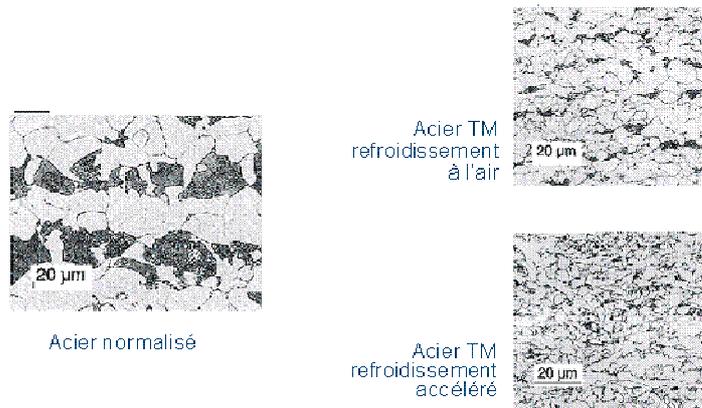


Figure 2.8

2-3-2-2 Le procédé de trempe suivi d'un revenu (Q)

Le développement des nuances trempées et revenues a commencé vers le milieu des années 60. Ces produits peuvent aujourd'hui être fournis avec une limite d'élasticité minimale jusqu'à 960 N/mm² (selon norme) voire 1100 N/mm² pour certains aciers de marque. Dans la construction métallique, seuls les aciers avec une limite d'élasticité jusqu'à 460 MPa, voire égale à 690 MPa pour les ouvrages innovants, sont utilisés. Ceci est dû à des raisons techniques comme la soudabilité des nuances plus élevées qui peut être délicate mais aussi à des restrictions administratives qui existent dans de nombreux pays européens, faute de références suffisantes. Les nuances à limite d'élasticité très élevée, au-delà de 890 MPa, sont utilisées aujourd'hui essentiellement pour la construction mécanique ou les engins de travaux publics, par exemple pour les grues mobiles.

L'opération de trempe, peut être réalisée :

→ Soit après une austénitisation (chauffage pour faire passer l'acier à l'état austénitique et mettre le carbone en solution) effectué sur le produit fini (après laminage et refroidissement de la tôle). Il est alors nécessaire de veiller à limiter le grossissement des grains d'austénite. Pour ce faire, on ajuste la température de maintien à son niveau le plus bas mais on utilise aussi un acier calmé à l'aluminium (et/ou au titane) pour bloquer le grossissement des grains d'austénite,

→ Soit immédiatement à la sortie du laminage afin de bénéficier du grain fin conféré par le laminage. Il faut alors tenir compte de la baisse de trempabilité liée à la finesse des grains d'austénite.

Ce mode de durcissement qui passe par la formation de martensite et éventuellement de bainite exige que soit mis en œuvre un moyen de refroidissement d'autant plus énergique que le produit traité est épais et que l'acier possède une trempabilité d'autant plus élevée que le produit traité est épais.

Ces exigences, lorsque l'on veut fabriquer des produits épais, imposent le recours à des aciers faiblement alliés dont la trempabilité peut constituer une entrave au soudage en imposant un préchauffage et éventuellement un post chauffage. L'application de ce mode de durcissement aux aciers non alliés ne peut se faire que sur des produits relativement peu épais (la limite dépend de l'efficacité du moyen de refroidissement).

Le tableau 1, ci-dessous donne une comparaison des vitesses de refroidissement entre un refroidissement à l'air libre et un refroidissement forcé à l'eau, en peau et à cœur de tôle. Les différences de vitesses observées entre peau et cœur de tôles vont conduire le sidérurgiste à doper analytiquement en éléments trempant les tôles les plus épaisses afin d'en favoriser la trempe à cœur.

Épaisseur tôle	Refroidissement à l'air	Refroidissement à l'eau près de la surface	Refroidissement à l'eau à cœur de tôle
20 mm	0.5 K/s	80 K/s	40 K/s
100 mm	0.1 K/s	80 K/s	2.5 K/s

Un exemple d'un acier Dillimax 890 (S890QL selon l'EN10025-6) montre l'influence qu'apporte un traitement de revenu sur les propriétés. La figure 2.9 ci-dessous montre que les propriétés de résistance de cet acier sont fortement dégradées suivant les paramètres de revenu utilisés alors que sur la figure 2.10, les caractéristiques de résistance à la rupture fragile sont dans le même temps nettement améliorées.

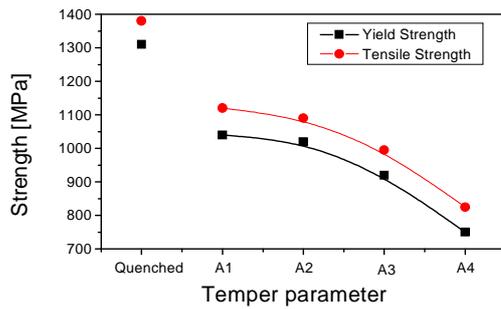


Figure 2.9 : Influence de la température de revenu sur la résistance d'une tôle en acier Dillimax 890, épaisseur 60 mm

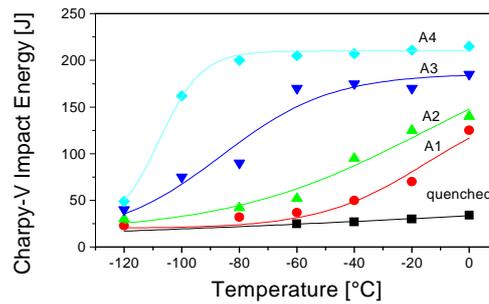


Figure 2.10 : Influence de la température de revenu sur la courbe de transition Charpy-V du Dillimax 890, épaisseur 60 mm

De même, les conditions de revenu doivent être adaptées à la composition chimique particulière de l'acier. Les caractéristiques exigées de ces aciers ne peuvent être obtenues que par des conditions de trempé et de revenu très précises. Il a été vu ci-dessus que le transfert thermique à cœur décroît quand l'épaisseur du produit croît. Ce qui se traduit par une diminution de la trempabilité de l'acier (à analyse identique) quand l'épaisseur du produit augmente. Refroidir brutalement un acier de trempabilité insuffisante conduirait à une structure transformée en martensite en surface du produit, mais on trouverait, en s'éloignant de la surface, un mélange de microstructures beaucoup plus douces.

Le choix de l'analyse des aciers trempés et revenu se fait donc en fonction de deux impératifs :

- ⇒ être suffisamment trempant pour l'épaisseur considérée
- ⇒ obtenir une dureté minimale de la martensite, compte-tenu du revenu ultérieur.

Ainsi, par exemple, les caractéristiques de dureté exigées sur toute l'épaisseur pour une plaque de 80 mm d'épaisseur (Figure 2.11), sont atteintes si son CE est de 0,70%, bien que ce niveau de dureté puisse être atteint, mais seulement en peau, avec une analyse moins chargée.

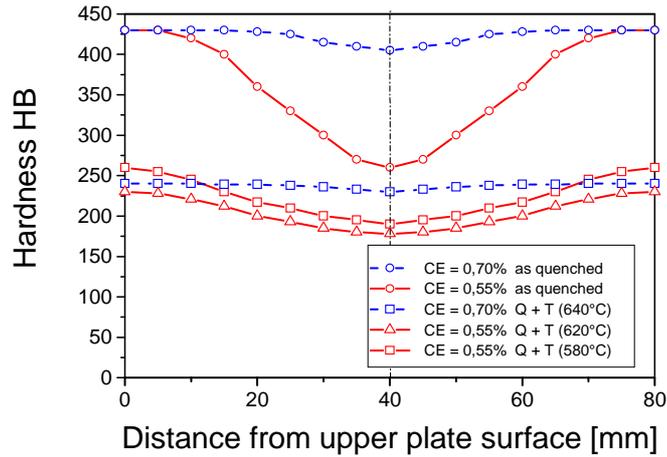


Figure 2.11 : Distribution des duretés au travers de l'épaisseur d'une tôle de 80 mm suivant son CE 0,70 % ou 0,55%

Pour un acier trempé de moindre épaisseur, une plus basse composition chimique, donc avec un CE de seulement 0,55%, permet d'atteindre des valeurs de dureté homogènes dans son épaisseur.

Certains sidérurgistes proposent des aciers trempés et revenus dont les valeurs de carbone équivalent sont inférieures à celles de la norme EN 10025-6 et permettant de meilleures conditions de mise en œuvre (cf tableau 2-12). On peut également observer que, pour les aciers trempés et revenus, le carbone équivalent augmente naturellement avec l'épaisseur des produits.

Epaisseur	CEV max. (%) pour S690Q/QL/L1 selon EN 10025-6	CEV max. (%) pour Dillimax 690
≤ 50	0,65	0,60
> 50 : ≤ 100	0,77	0,70
> 100 : ≤ 150	0,83	0,78
> 150 : ≤ 200	/	0,85

Carbones équivalents:

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

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

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

Tableau 2.12 : Carbone équivalent typique pour l'acier DillimaxS 690Q (Source : Dillinger Hütte GTS)

2-3-3 Propriétés des aciers à Hautes Performances

2-3-3-1 Analyses chimiques

Le tableau 2.13 ci-dessous 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 décrit ci-dessous:

	S355J2		S460ML		S460QL		S690QL	
	EN 10025 Partie 2	Compos. typique	EN 10025 Partie 4	Compos. typique	EN 10025 Partie 6	Compos. typique	EN 10025 Partie 6	Compos. 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
Carbones équivalents: $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$ $Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$ $CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$								

Tableau 2.13 : Compositions typique (source Dillinger Hütte GTS) et selon norme (EN 10025 -4 et -6) d'aciers à haute limite d'élasticité, d'épaisseur 50 mm.

La nuance S355J2 est donnée à titre de comparaison (EN 10025-2).

Dans la figure 2.14, on voit à travers les valeurs de carbone équivalent qu'à nuance donnée, il est possible de réduire de façon très sensible la teneur des éléments entrant dans la composition chimique des aciers. Cela se traduit directement par une amélioration notable de la soudabilité des aciers thermomécaniques à nuance égale par rapport à la soudabilité des aciers normalisés (cet aspect des choses sera développé plus tard chapitre 3 relatif à la mise en œuvre et au soudage)

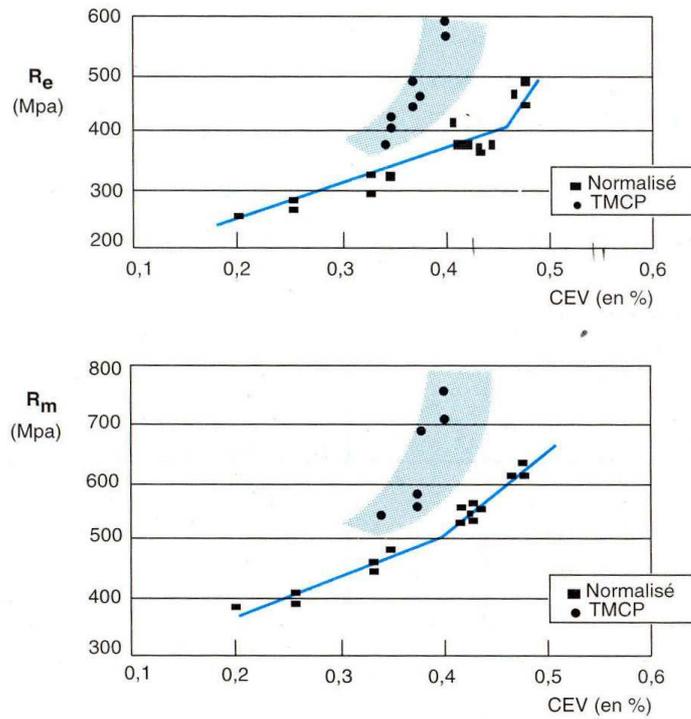


Figure 2.14 -

Evolution de Re et Rm avec le CEV pour les aciers TM

2-3-3-2 Propriétés mécaniques

Propriétés spécifiées,

- Caractéristiques de traction :

Caractéristiques mécaniques de traction													
Nuances et qualités	Limite d'élasticité minimale ReH (MPa)					Résistance à la traction Rm (MPa)					Allongement à la rupture 5,65 % _{L5} (%)		
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							
S355J2	>16	>40	>63	>80	>100	>150	>200	>250	>300	>350	>400	17	
	≤16	≤40	≤63	≤80	≤100	≤150	≤200	≤250	≤300	≤400			
S460ML	355	345	325	315	295	285	275	265				17	
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							
Dillimax 500M	>16	>40	>63	>80	>100							17	
	≤16	≤40	≤63	≤80	≤100	≤120							
S500Q	460	440	430	410	400	385						16	
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							
S550Q	≥10	>50										14	
	≤50	≤100											
S690Q	490	470										14	
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							
Dillimax 690	≥3	>50	>100										14
	≤50	≤100	≤150										
S550Q	500	480	440										16
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							
S690Q	550	530	490										14
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							
Dillimax 690	≥3	>50	>100										14
	≤50	≤100	≤150										
S550Q	690	650	630										14
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							
Dillimax 690	>65	>100	>150										14
	≤65	≤100	≤150	≤200									
Dillimax 690	690	670	630	610								14	
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							
Dillimax 690	≥65	>100	>150										14
	≤65	≤100	≤150	≤200									
Dillimax 690	690	670	630	610								14	
	Epaisseur nominale (mm)					Epaisseur nominale (mm)							

Tableau 2.15 : Caractéristiques mécaniques spécifiées selon NF EN 10025

Les valeurs des tôles Dillimax sont spécifiées dans les fiches produits DH-GTS. Les valeurs de la norme sont les valeurs (minimales) garanties.

- Energie de rupture en flexion par choc :

Dans la pratique, seule la garantie pour la température la plus basse est vérifiée. Pour le S355J2 (comme pour les aciers de la norme NF EN 10025-2 en général), il n'est exigé que 27 joules à -20°C (éprouvette prélevée en sens long).

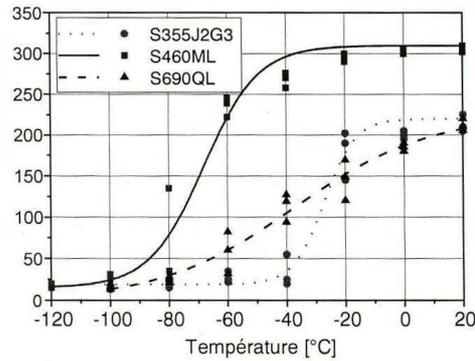


Figure 2.16 : Courbes de transition (ordonnée KV (J)) pour les qualités S460ML et S690QL en comparaison avec la nuance S355J2.

Les valeurs pour les qualités N et M, communes aux nuances S355 et S460, sont de 40 joules à -20°C et pour les qualités NL et ML, de 27 joules à -50 °C.

Les aciers trempés-revenus doivent satisfaire à une valeur identique de 30 joules à différentes températures : -20 °C pour la qualité Q, -40 °C pour la qualité QL et -60°C pour la qualité QL1.

Nuance S355

Etat	Epaisseur (mm)	R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	A % (5,65 √s ₀)	KVL (-20°C) (J)	KVL* (-50°C) (J)
Normalisé	20	410	555	29,5	200	
	50	385	540	30,5	200	
	100	365	525	31		135
	150	340	515	31,5		125
Thermomécanique	20	406	493	30	275	210
	50	410	530	29,5	300	275
	100	400	520	28	270	235

* pour qualités NL et ML

Tableau 2.17 : Exemple de caractéristiques pour la nuance S355 dans les états N/NL et M/ML (Dillingen)

Sur la figure 2.16, on peut constater un excellent niveau de résiliences et de température de transition (bien au delà de la norme) pour l'acier M (S460 ML) en comparaison à l'acier N (S355 J2G3); de même, la zone de transition des aciers Q (S690QL) moins brutale et donc plus sécurisante que celle des aciers N.

Nuance S460

Tableau

Etat	Epaisseur (mm)	R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	A % (5,65 √S ₀)	KVL (-20°C) (J)	KVL * (-50°C) (J)
Normalisé	20	500	675	25	125	100
	50	475	650	24,5	125	95
	80	460	640	24	90	75
Thermomécanique	20	530	595	26	285	260
	50	490	575	23	270	240
	80	450	560	25	270	240

* pour qualités NL et ML

2.18 - Exemple de caractéristiques pour la nuance S460 dans les états N/NL et M/ML

Nuance S690QL

Etat	Epaisseur (mm)	R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	A % (5,65 √S ₀)	KVL (-20°C) (J)	KVL * (-50°C) (J)
Trempé et revenu	20	785	820	18		
	50	810	850	18		
	80	740	810	19		

Tableau 2.19 - Exemple de caractéristiques typiques pour la nuance S690QL

On notera les fortes valeurs de résilience en comparaison des exigences des normes.

2-3-4 Résistance au feu

Aujourd'hui la réglementation n'exige pas d'analyse sur la stabilité au feu des ouvrages d'art dès lors qu'ils ne sont pas situés dans un univers confiné ou que la nature du trafic n'est pas à même d'engendrer un risque réel conduisant à la ruine de l'ouvrage.

Dans des cas, alors bien particuliers, indépendamment de la nuance d'acier utilisée S 355 à S690, le concepteur pourra être amené à effectuer des vérifications de tenue au feu en se basant sur les sollicitations thermiques d'incendie de référence (par exemple

selon la norme ISO 834) voire des études d'ingénierie incendie particulières et des essais spécifiques d'incendies afin de démontrer la stabilité au feu de la structure, avec ou sans ajout de protection additionnelle globale ou locale. En ce qui concerne les aciers à Hautes Performances, comme pour les aciers classiques, il sera alors judicieux de prendre en compte la massivité des pièces en relation avec les réductions d'épaisseur que permettent ces aciers, ainsi que les courbes de résistance en traction en fonction des températures fournies par les sidérurgistes.

2-3-5 Résistance à la corrosion

Compte-tenu de leurs analyses chimiques, peu alliées, les aciers à Hautes Performances des nuances S 460 à S 690, des états de livraison M et Q, présentent une résistance à la corrosion similaire à celle des nuances classiques S355. De ce fait, tout comme les aciers S 355 habituellement utilisés pour la construction d'ouvrages d'art, ils devront être protégés par des systèmes de peinture, par métallisation ou par galvanisation selon les modalités définies par le fascicule 56 « Protection des Ouvrages Métalliques contre la Corrosion » du CCTG.

A noter que la Norme NF EN 10025-5 (voir §1-1-4-5) relative aux aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique communément nommés « aciers autopatinables » ne couvre à ce jour que les aciers de nuances \leq S 355. (Au stade de la rédaction du guide, la norme 10025 est en cours de révision notamment la partie 5 (aciers W). Elle devrait couvrir des nuances \geq S 355.)

2-4 LES POUTRELLES HLE

2-4-1 Procédé de fabrication et gamme dimensionnelle

La méthode conventionnelle pour produire des aciers à haute limite d'élasticité réputés soudables, consiste à ajouter dans l'acier des éléments d'alliages et à laminier les produits à des températures contrôlées. Cette technique de laminage est cependant limitée par :

- ⇒ la puissance mécanique du laminoir puisque ce procédé demande des taux de corroyage élevés dans des domaines de températures relativement bas
- ⇒ l'impossibilité de réduire considérablement le carbone équivalent (CE) de l'acier et, par conséquence, d'améliorer sa soudabilité.

Or, les métallurgistes savaient depuis longtemps que la maîtrise du refroidissement permet d'augmenter fortement les performances de leurs produits. En conséquence, il fallait chercher à optimiser le cycle thermique des poutrelles, non seulement pendant le laminage, mais aussi après la dernière passe. Ces réflexions ont été à l'origine des

développements des traitements de refroidissement accéléré à la sortie de la chaude de laminage (TM-ACC).

Dans ce procédé la poutrelle subit les traitements suivants (voir figure 2.20) :

- un laminage thermomécanique est appliqué pendant la mise en forme. A la sortie de la dernière cage, la poutrelle a une température de l'ordre de 850°C
- elle passe immédiatement dans une rampe pour être refroidie par projection d'eau sur toute sa surface.

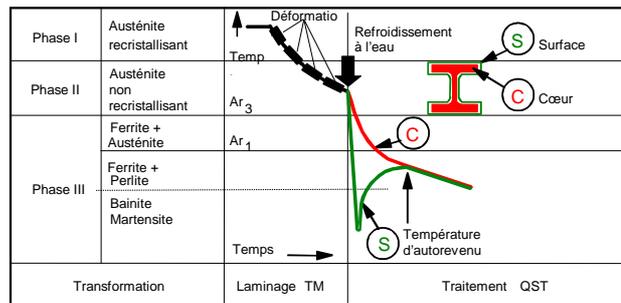
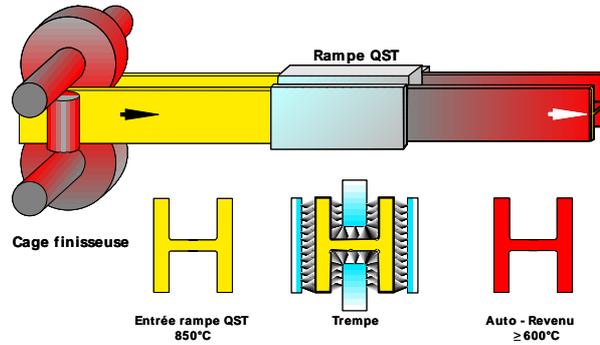


Figure 2.20: Principe du procédé du traitement de trempe et d'auto-revenu (QST)

Le refroidissement accéléré sur une poutrelle de forte épaisseur engendre un gradient de température et s'apparente à une trempe superficielle. Cette trempe sera interrompue avant que le cœur du produit ne soit affecté. Les couches superficielles sont ainsi soumises à un autorevenu, grâce au flux de chaleur résiduelle se propageant du cœur vers la surface lors de la phase d'homogénéisation de la température. Les températures typiques d'autorevenu sont égales ou supérieures à 600°C. Ce principe donne son nom au procédé thermomécanique de trempe et autorevenu (TM-QST).

Ainsi, la technique de laminage thermomécanique combinée avec le refroidissement accéléré permet l'élaboration de poutrelles en nuance S460 combinée à une excellente

résistance à la rupture fragile jusqu'à des épaisseurs d'aile de 140 mm (voir figure 2.21) tout en conservant une bonne aptitude au soudage.

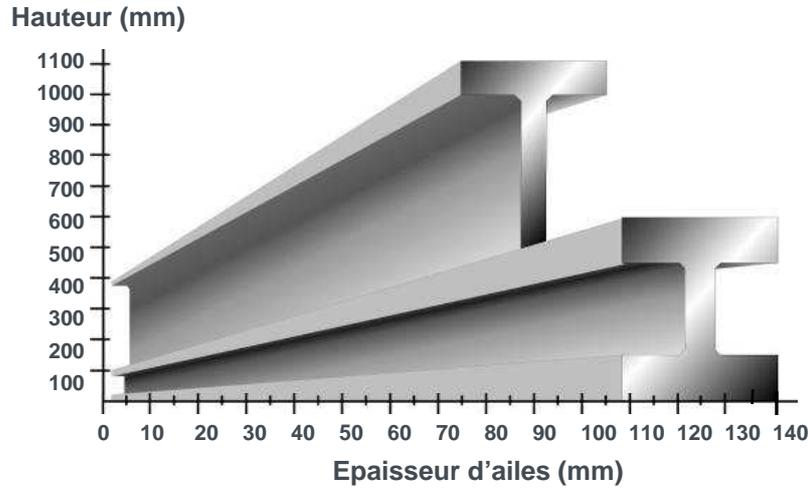


Figure 2.21 : Gamme dimensionnelle des poutrelles ArcelorMittal

2-4-2 Propriétés mécaniques et chimiques des aciers S460 thermomécaniques

Les poutrelles en nuance S460 sont déclinés suivant la norme européenne des aciers de construction EN 10025-4 (S460M, S460 ML), des aciers pour structures marines EN 10225 (S460G3+M, S460 G4+M) mais également d'autres normes internationalement utilisées telle que ASTM A913 (Gr65).

D'autre part, des produits aux spécifications encore plus strictes sont également disponibles suivant les désignations HISTAR dont les spécifications sont décrites dans l'agrément technique européen ETA 10-0156.

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales des aciers de résistance disponibles en profilé laminés.

Norme	Nuance	Epaisseur d'aile (mm)	Qualités en épaisseur d'aile de 40 mm					
			CE %	Re (MPa)	Rm (MPa)	A%*	Essai de flexion par choc	
							T°C	Energie (J)
EN 10025-4:2004	S460M	≤140	≤0.46	≥440	540-720	≥17	-20	≥40
	S460ML	≤125	≤0.46	≥440	540-720	≥17	-50	≥27
ETA 10-0156 :2010	HISTAR 460	≤140	≤0.41	≥460	540-720	≥17	-20	≥40
	HISTAR 460L	≤82	≤0.41	≥460	540-720	≥17	-50	≥27
EN 10225:2009	S460G3+M	≤40	≤0.43	≥440	530-720	≥17	-40	≥60
	S460G4+M	≤40	≤0.43	≥440	530-720	≥17	-40	≥60
	HISTAR 460 TZ OS	≤40	≤0.39	≥460	530-720	≥17	-20	≥60
	HISTAR 460 TZK OS	≤40	≤0.39	≥460	530-720	≥17	-40	≥60
A913:2011	Gr65	≤140	≤0.43	≥450	550	≥15	+21	≥54
	Gr70	≤140	≤0.45	≥485	620	≥14	+21	≥54

* norme EN: A5d, norme ASTM: A200

Tableau 2.22

Composition chimique

La figure 2.23 résume l'évolution du carbone équivalent lors de la mise au point des aciers de résistance. L'utilisation des microalliages, des techniques de laminage à température contrôlée puis du refroidissement accéléré a permis de limiter les teneurs en carbone équivalent, favorisant ainsi l'aptitude au soudage. Cela a conduit au développement des nuances S460 soudable à grain fin.

Les performances des aciers thermomécaniques sont supérieures à celles des aciers normalisés en termes de réduction des éléments d'alliage comme l'indique la figure 2. Le carbone équivalent d'un acier thermomécanique S460 est comparable à ceux couramment rencontrés pour les aciers S355N. Ces aciers S460 sont ainsi des aciers à soudabilité améliorée mais dont la composition chimique et le comportement est parfaitement caractérisé.

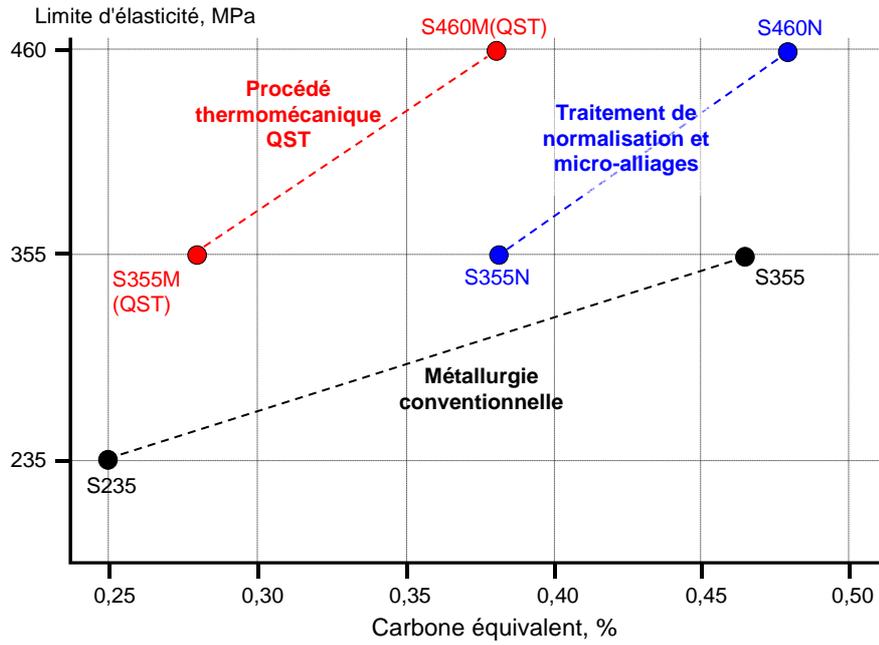


Figure 2.23 : Evolution de la limite d'élasticité en fonction du carbone équivalent pour les procédés de laminage normalisant « N » et thermomécaniques « M » avec QST.

Valeurs typiques pour des épaisseurs de 40 mm

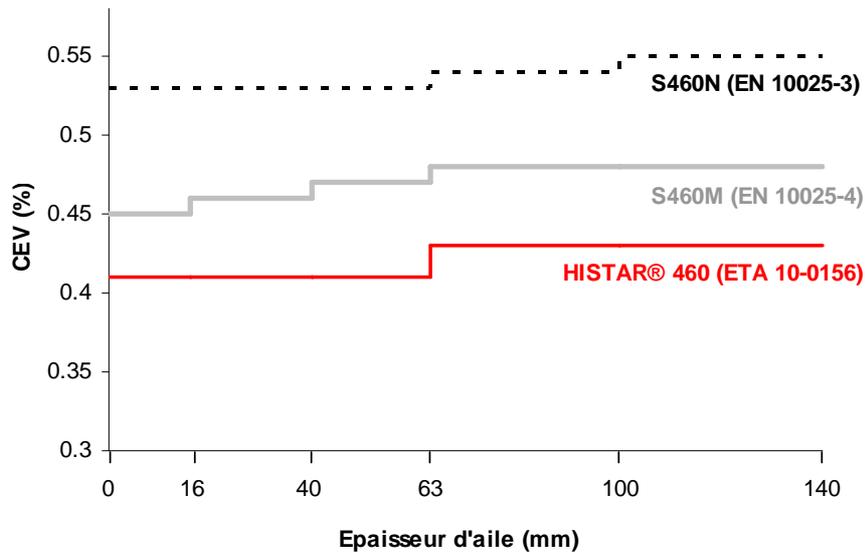


Figure 2.24: Teneur maximale admissible en carbone équivalent pour les aciers à grain fin soudables

Propriétés mécaniques en traction

La figure 2.25 montre l'évolution de la limite élastique garantie des aciers de constructions soudables. Traditionnellement la limite élastique garantie d'une nuance d'acier diminue avec l'augmentation d'épaisseur. Cette évolution intègre l'influence du refroidissement lent à l'air des produits épais. Il est toutefois possible d'offrir des profilés avec une limite élastique stable sur toute la gamme d'épaisseur en profitant en appliquant la technique du refroidissement accéléré à la sortie de la chaude de laminage.

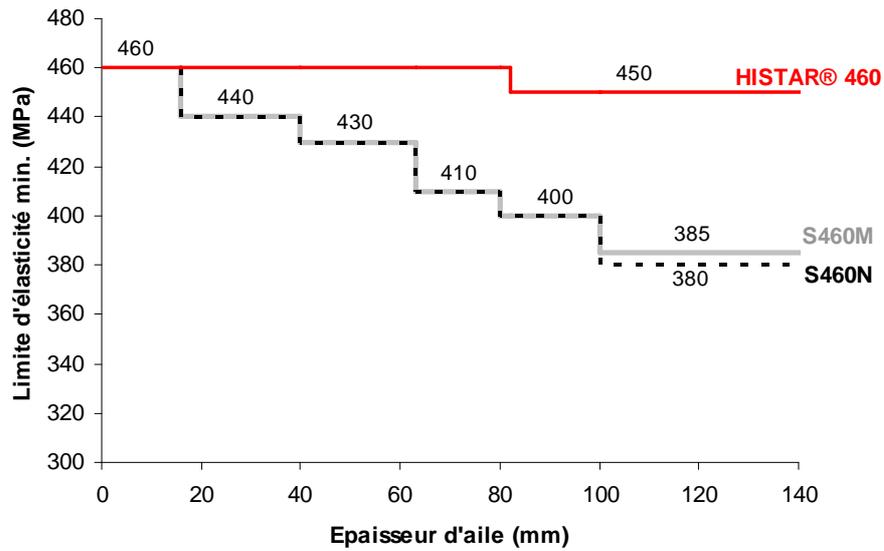


Figure 2.25 : Limite d'élasticité minimale garantie des aciers à grain fin soudables

Propriétés de résilience

De nos jours, il est bien connu qu'un certain niveau de ductilité de l'acier est exigé pour éviter la propagation de fissures ainsi qu'une rupture fragile en particulier dans les zones affectées thermiquement pendant le soudage ou dans le cas de sollicitations sismiques lors de tremblements de terre.

En Europe, les nuances S460M sont fournies avec des valeurs de résiliences garanties de 40J à -20°C (cette garantie est même valable par exemple pour des poutrelles Jumbos HD 400x1086 kg/m). Les profilés peuvent également être fournis avec de meilleures résiliences à basse température. Ainsi les aciers thermomécanique utilisés dans des applications offshore sont livrés avec des valeurs de résiliences garanties de 50J à -40°C.

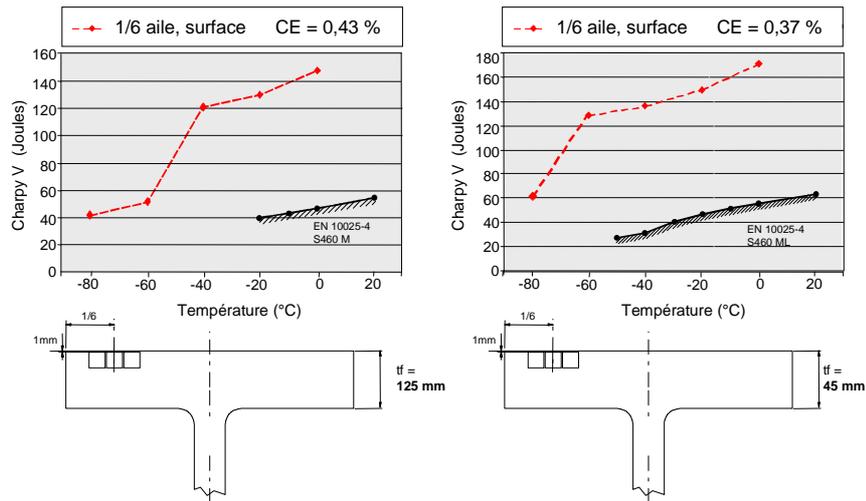


Figure 2.26: Résultats typiques de courbes de transition Charpy V pour des aciers thermomécanique S460M, en épaisseur de 125 et 45 mm (valeurs ici mesurées sur poutrelles Histar)

2-4-3 Résistance au feu des aciers S460M comparés aux aciers conventionnels

Les parties « feu » de l'Eurocode couvrent les aciers S235, S355 et S460 de la norme EN10025 parties 2 à 5 et fournissent des méthodes de calculs pour l'ingénierie basées sur la limite d'élasticité effective $f_{y,\theta}$ en fonction de la température d'acier, comme le montre la Figure 2.27.

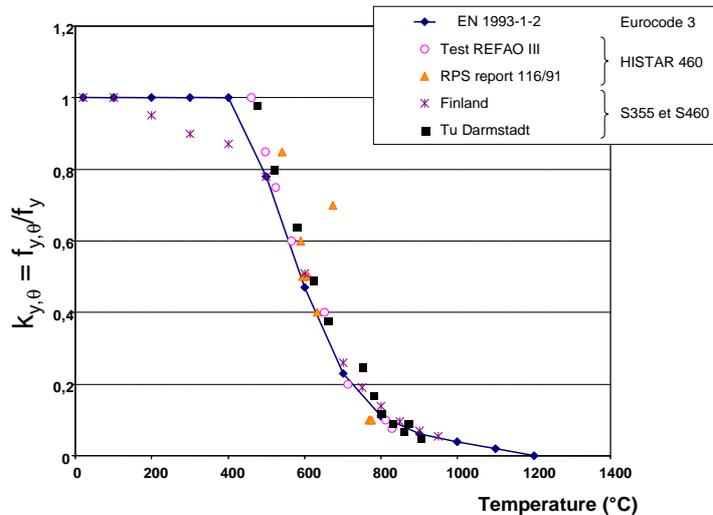


Figure 2.27 : Réduction de la limite d'élasticité effective en fonction de la température

Cette courbe a été établie à partir d'essais expérimentaux réalisés au début des années quatre-vingt-dix. Elle a été validée par des essais effectués plus récemment. La courbe se base sur des résultats d'essais de traction à chaud uniaxiale ou de flexion trois points, en condition isotherme et anisotherme.

L'évolution du module d'élasticité d'un acier en S460 en fonction de la température est illustrée dans la Figure 2.28.

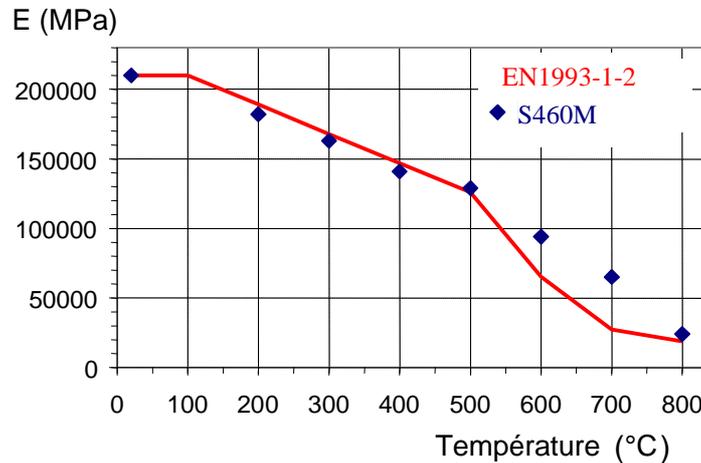


Figure 2.28 : Evolution du module d'élasticité en fonction de la température (mesuré sur poutrelle Histar®)

Dans certains cas, l'utilisation d'acier S460 peut permettre de s'affranchir de l'utilisation de revêtement isolant au feu (type flocage, panneaux rigides ou peinture intumescente qui représentent de 30 à 100% du prix de l'acier selon les cas).

Supposons le dimensionnement d'un élément de structure réalisé en nuance S235. Un coefficient de chargement d'environ 0,5 est exigé pour répondre aux prescriptions de sécurité des normes à température ambiante (dans un immeuble de bureaux par exemple). Avec le critère de flèche (souvent déterminant) et sachant que le concepteur doit choisir parmi un jeu donné de profilés, un rapport de chargement de 0,45 est représentatif.

La courbe illustrée dans la Figure 2.27 peut alors être traduite en termes de niveau de chargement pour cet élément de structure (Figure 2.29). La température critique pour laquelle l'élément de structure atteint sa limite d'élasticité effective $f_{y,\theta}$ est alors de 600°C.

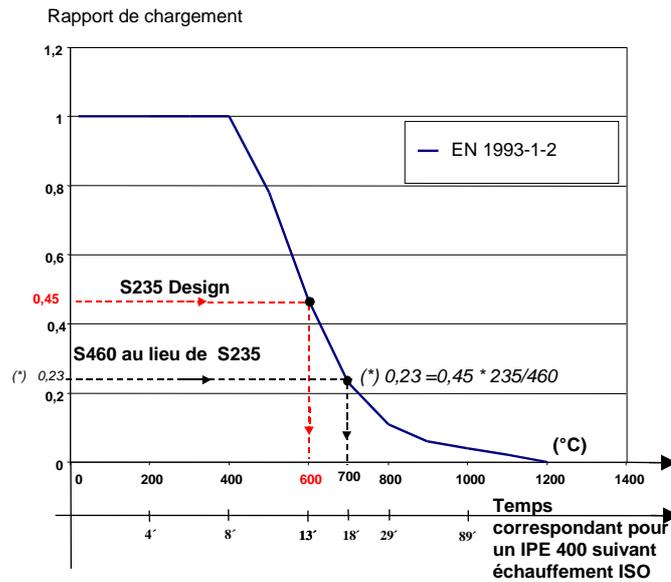


Figure 2.29 : Rapport de chargement maximal en cas de feu

Si l'acier S235 est substitué par un S460, ce surdimensionnement conduit à une augmentation de 100°C de la température critique. Pour exemple, le choix d'un IPE 400 mène à une augmentation de la résistance au feu ISO de 13 à 18 minutes. Cette augmentation est assez faible si une prescription ISO est exigée. Cependant, la différence peut être significative dans le cas d'utilisation de courbes de feu naturelles (démarche d'ingénierie incendie). Dans l'exemple de la figure 2.28, si la pointe de la courbe de chauffe se situe entre 600 et 700°C, une construction en acier S460 survivra à l'incendie ce qui ne sera pas le cas pour une structure identique en S235. De plus, pour certains types de bâtiments (ex. hall industriel) pour lesquels le taux de chargement considéré en cas d'incendie est faible (0.2 à 0.3), la substitution du S235 par du S460 peut même permettre d'atteindre 30 minutes de résistance au feu ISO.

2-4-4 Comportement en fatigue d'assemblages soudés en profilés S460M

La Figure 2.30 montre le bon comportement en fatigue des aciers S460M: les résultats obtenus sont aussi bons que ceux des aciers conventionnels S355N. Les valeurs expérimentales se situent au-dessus de la courbe de résistance à la fatigue fixée par l'Eurocode 3 pour la catégorie de détail constructif 112 relative aux soudures transversales (soudage bout à bout) de poutrelles laminées.

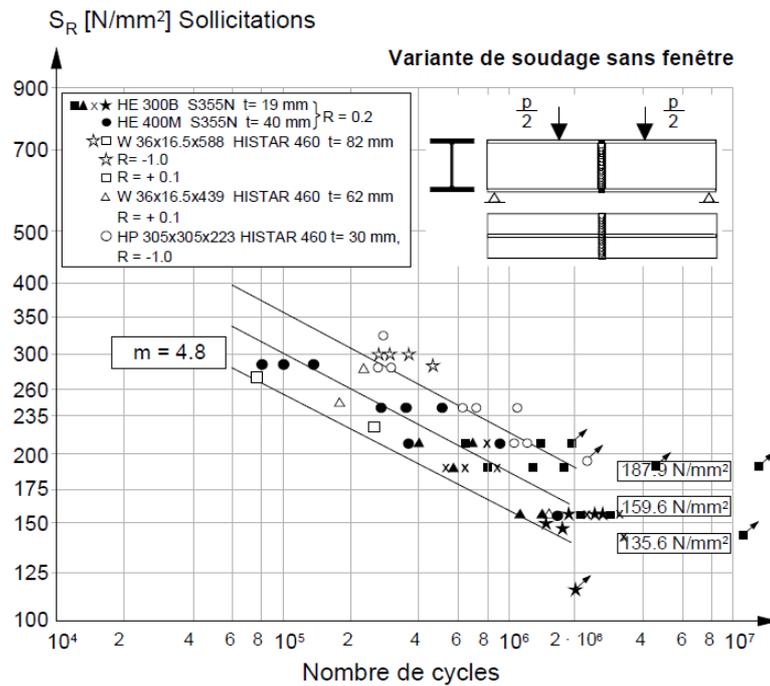


Figure 2.30 : Essais de fatigue de poutrelles soudées bout à bout en acier S355N et HISTAR 460. Nombre de cycles en fonction de l'amplitude des sollicitations S_R

2-4-5 Comportement en flambement des profilés S460M

Les aciers S460 sont pris en compte par les Eurocodes 3 et 4. Présentant des contraintes résiduelles plus faibles relativement à leur limite d'élasticité, le comportement au flambement des profilés laminés S460 est meilleur que pour les nuances à plus basse limite d'élasticité, et des courbes de flambement plus favorables peuvent être utilisées. C'est ce que montre le tableau de la Figure 2.31, issu de l'Eurocode EN 1993-1-1.

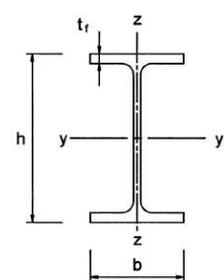
Section transversale	Limites	Flambement Selon l'axe	Courbe de flambement	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y a	z-z a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y b	z-z a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y b	z-z a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y d	z-z c

Figure 2.31 : Sélection des courbes de flambement, selon Eurocode EN 1993-1-1

En particulier, la courbe de flambement a₀ a été développée spécifiquement pour les aciers S460 (Figure 2.32).

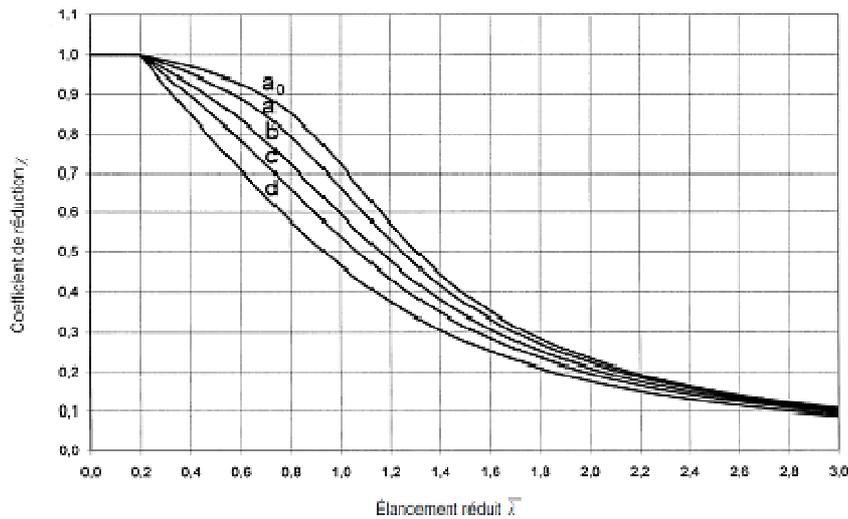


Figure 2.32 : Courbes de flambement selon Eurocode EN 1993-1-1

2-4-6 Profilés S460M et construction parasismique

Les aciers S460 comme les aciers S235 et S355 sont couverts par l'Eurocode 8 pour le dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme.

Les constructions en acier présentent un bon comportement vis-à-vis du séisme, en particulier via l'utilisation de concepts dissipatifs pour lesquels des parties de la structure sont volontairement choisies pour se déformer plastiquement et ainsi dissiper de l'énergie lors d'un tremblement de terre.

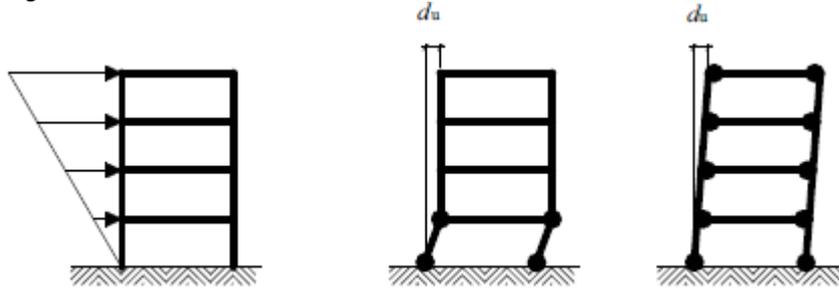


Figure 2.33 : Exemple de comportement global de structure non dissipatif et dissipatif

Le mécanisme dissipatif dit « poutres faibles - poteaux forts » pour lequel des rotules plastiques sont formées dans les poutres et non dans les poteaux, peut être favorisé par l'utilisation d'un acier à plus haute limite élastique dans les poteaux. Par exemple, l'utilisation de profilés en S460 pour les poteaux (parties non dissipatives) peut alors s'avérer judicieuse en combinaison avec des poutres en nuance inférieure (parties dissipatives).

3. MISE EN ŒUVRE DES ACIERS HLE

3-1 LE SOUDAGE

3-1-1 Introduction

Les aciers HLE dont traite le présent document ne forment pas une famille homogène en terme de soudabilité. Une bonne idée de la différence de soudabilité existant entre les différentes nuances est fournie par l'observation des carbones équivalents maximum prévus par la norme EN 10025, tels qu'indiqué aux tableaux ci dessous.

Remarque : le carbone équivalent pris en compte par la norme EN 10025 est le carbone équivalent IW : $CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$

Désignation	Carbone équivalent max. (en %) en fonction de l'épaisseur (en mm)				
	≤30	>30 ≤63	>63 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤250
S420N	0,48	0,48	0,50	0,52	0,52
S450	0,47	0,49	0,49	0,49	-
S460N	0,53	0,53	0,54	0,55	0,55

Désignation	Carbone équivalent max. (en %) en fonction de l'épaisseur (en mm)				
	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤120	>120 ≤150
S420 M	0,43	0,45	0,46	0,47	0,47
S460M	0,45	0,46	0,47	0,48	0,48

Désignation	Carbone équivalent max. (en %) en fonction de l'épaisseur (en mm)		
	≤50	>50 ≤100	>100 ≤150
S460Q	0,47	0,48	0,50
S500Q	0,47	0,70	0,70
S550Q	0,65	0,77	0,83
S620Q	0,65	0,77	0,83
S690Q	0,65	0,77	0,83

Tableau 3.1 : carbone équivalent CEV - valeurs exigées par la norme EN 10025

Plus le carbone équivalent augmente, plus la trempabilité du métal augmente et plus le risque de fissuration à froid en ZAT augmente. Les précautions à prendre pour éviter la fissuration à froid en ZAT (Energie de soudage minimum, préchauffage, température

entre passes minimum et éventuellement post chauffage) seront de plus en plus contraignantes lorsque l'on va monter en grade, depuis le S460M jusqu'au S690Q.

Remarque : d'autres formules de carbone équivalent peuvent être utilisées pour apprécier la sensibilité à la fissuration à froid. On citera notamment le P_{cm}, particulièrement bien adapté aux aciers à bas carbone, et le CET utilisé notamment dans une des méthodes de prévision des températures de préchauffage décrite dans la norme EN 1011.

Parallèlement, plus l'acier est chargé en éléments d'alliage, plus la ténacité de la ZAT risque de se dégrader lors de la mise en œuvre de conditions de soudage conduisant à des temps de séjour à haute température longs, notamment du fait de phénomènes de grossissement de grain et de coalescence et/ou remise en solution des précipités conférant ses propriétés au métal de base. Un indicateur commode pour caractériser le cycle thermique de soudage dans la zone fondue et dans la ZAT est le temps mis par la température pour redescendre de 800°C à 500°C, paramètre noté usuellement "Tr 800-500"¹. Pour une géométrie de joint donnée et un procédé de soudage donné ce Tr800-500 est d'autant plus long que l'énergie de soudage est importante et que la température initiale des pièces sur lesquelles on soude est élevée.. Il en résulte que plus on monte en grade, plus il sera nécessaire de limiter les énergies de soudage maximum mises en œuvre, et plus il sera nécessaire de limiter et de contrôler la température maximale entre passes.

Pour les mêmes raisons une limitation du Tr800-500 sera également nécessaire pour éviter de dégrader les propriétés mécaniques du métal fondu lors du soudage des nuances à plus haute limite d'élasticité.

La nécessité de concilier prévention de la fissuration à froid et conservation des propriétés mécaniques du joint fait que le domaine de soudabilité se réduit progressivement lorsque l'on passe du S460M au S690Q.

Par ailleurs, plus la limite d'élasticité du métal fondu augmente, plus le risque de fissuration à froid en zone fondue croit, et plus il sera nécessaire de mettre en œuvre des produits d'apport à bas hydrogène.

Nous détaillons ci après les conditions de mise en œuvre des deux nuances extrêmes, S460M et S690Q

¹ Le Tr800-500 est le paramètre le plus utilisé pour caractériser de façon "globale" le cycle thermique de soudage. D'autres paramètres du même type (TR 700-300 par exemple) peuvent être utilisés lorsque l'on s'intéresse plus particulièrement à des phénomènes se produisant dans des plages de température spécifiques.

3-1-2 Aciers de nuance S460M

3-1-2-1 Aciers concernés

Il s'agit d'une nuance obtenue par laminage thermomécanique et dont les caractéristiques sont données dans la norme EN 10025-4. Cette norme prévoit une teneur maximum en carbone de 0,16. La réalité peut être est bien meilleure quand on considère les analyses moyennes sur produit de fournitures industrielles en provenance de deux sidérurgistes différents comme indiqué au tableau ci dessous :

Nuance	Epaisseur	C	Mn	Si	Ni	V	CET	CEV
S460M	40 mm	0,090	1,50	0,30	0,40	0,058		0,38
S460M	50 mm	0,070	1,54	0,32	0,42	0,070		0,37

Tableau 3.2

Remarque : à signaler que comparé à l'acier normalisé conventionnel S460N, une nuance trempée et revenue de type S460Q montre une soudabilité nettement améliorée. Cet acier présente des avantages similaires à ceux des aciers du type thermomécanique S460M.

3-1-2-2 Procédés de soudage envisageables

L'ensemble des procédés de soudage mis à la disposition des constructeurs peut être utilisé pour la mise en œuvre de l'acier thermomécanique S460M, dans des conditions plus favorables que dans le cas des aciers livrés à l'état normalisé. On retiendra particulièrement les procédés suivants :

(Les chiffres entre parenthèses correspondent à la désignation normalisée des procédés selon ISO EN 4063)

- le soudage manuel avec électrode enrobée de type basique (111)

C'est un procédé manuel traditionnel qui est facilement mis en œuvre en toutes positions par un soudeur qualifié, et dont l'inconvénient est un faible taux de dépôt, de l'ordre du kilo de métal déposé par heure. Il peut être utilisé en construction métallique dès que les autres procédés plus productifs ne peuvent être mis en œuvre, ou qu'ils s'avèrent défaillants lors des qualifications. Il demeure un procédé complémentaire indispensable pour des énergies de soudage pouvant atteindre 20 kJ/cm

L'électrode basique a bénéficié ces dernières années d'une évolution technologique qui a abouti à l'apparition sur le marché de nouveaux produits à très bas hydrogène, conditionnés dans des étuis étanches qui dispensent du traitement de séchage et de conservation jusqu'au moment de l'emploi, ce qui simplifie l'organisation du chantier et

de l'assurance de la qualité. Les teneurs en hydrogène diffusible sont de l'ordre de 3,5 ml/100 g de métal fondu (6,4 ml/100g de métal déposé) pour les électrodes classiques, et de l'ordre de 2,2 ml/100 g de métal fondu (4 ml/100 g de métal déposé) pour les électrodes à très bas hydrogène.

- le soudage sous flux en poudre électro-conducteur (121)

Ce procédé d'atelier, mécanisé, permet au moyen de bancs de soudage ou de chariots automoteurs, de réaliser à plat, au moindre coût, des soudures de grandes longueurs, telles que les soudures d'angle d'assemblage des âmes sur semelles. Il est aussi utilisé pour rabouter des semelles de forte épaisseur en soudage multi-passes en disposant de part et d'autre de la semelle des appendices provisoires. Parfois organisé en arcs multiples, il permet d'atteindre les plus grands taux de dépôt, de l'ordre de 10 kg de métal déposé par heure. La gamme d'énergies de soudage délivrées en arc simple se situe entre 15 et 40 kJ/cm ; en arcs multiples, elle peut atteindre 80 kJ/cm.

Les couples fil-flux actuellement proposés permettent d'obtenir les niveaux requis d'énergie de rupture en flexion par choc (résilience), de même que de basses teneurs en hydrogène, soit environ 2 ml/100 g de métal fondu quand on prend la précaution de traiter convenablement le flux pour le sécher. Cependant on rencontre encore fréquemment des couples fils-flux conduisant à de teneurs en hydrogène plus élevées, de l'ordre de 5 à 12 ml/100g.

- Le soudage semi-automatique avec fil fourré de poudre métallique sans flux, mais avec gaz de protection (136)

Parmi les procédés de soudage semi-automatique, où le soudeur tient la torche qui guide l'extrémité du fil fusible dévidé à vitesse constante, le fil fourré de poudre métallique présente l'intérêt d'offrir les plus faibles teneurs en hydrogène diffusible qui peuvent couramment descendre à 1,5 ml/100 g de métal fondu (2,6 ml/100 g de métal déposé). De plus, il réunit d'autres avantages tels que : pas ou peu de laitier, peu de fumée, taux de dépôt élevé à plat. Sa gamme d'utilisation se situe entre 15 et 25 kJ/cm.

En fait c'est le procédé qui remplace en atelier l'électrode enrobée pour une meilleure productivité. La sensibilité aux courants d'air rend difficile le soudage sur chantier sans perturbation du process, à moins de précautions particulières.

- Le soudage semi-automatique avec fil fourré de flux sans gaz de protection

Ce procédé qui permet le soudage en toutes positions avec un bon taux de dépôt pour des énergies de soudage comprises entre 20 et 30 kJ/cm présente, du fait de l'absence de gaz, un intérêt économique certain, notamment pour les travaux de montage en chantier extérieur. Il se distingue des autres procédés décrits ci avant, qu'on qualifiera de *classiques* en raison de leur teneur élevée en manganèse par les points suivants :

- les fils adaptés à la construction des ouvrages (ceux qui offrent les meilleures résiliences), ont une composition chimique particulière, qu'on peut caractériser d'abord par une faible teneur en manganèse, comprise selon les fils entre 0,15 et 0,85%, une forte teneur en azote (0,03 à 0,06%) neutralisée par une forte teneur en aluminium (0,3 à 0,8%), une teneur en oxygène plutôt faible (100 à 600 ppm) et enfin une faible teneur en impuretés. On atteint couramment une teneur de 0,005% pour le soufre et de 0,008% pour le phosphore, ce qui est exceptionnel par rapport à l'ensemble des produits d'apport.

- des teneurs en hydrogène diffusible relativement fortes, de l'ordre de 5 à 6 ml/100g de métal fondu (7 à 11 ml/100g de métal déposé),
- nécessité de soudeurs spécialement formés pour sa mise en œuvre, car il appelle une tenue différente de la torche et des longueurs de fil sorti relativement grandes. L'insuffisance de qualification des soudeurs conduit à la présence d'un excès de défauts de compacité.

Parmi l'importante gamme des fils de ce type offerts sur le marché, quelques uns permettent d'assurer les énergies de rupture en flexion par choc (résilience) à -40°C et une limite d'élasticité de 460N/mm² dans la zone fondue.

Aide mémoire : nous pouvons synthétiser l'usage des différents procédés de soudage comme suit :

En atelier

Arc manuel avec électrodes enrobées (111)

- pour exécution d'une première passe de fond de soudure bout à bout,
- pour exécution des différents cordons d'angle,
- pour exécution d'une soudure bout à bout ou d'angle à pleine pénétration.

Automatique sous flux électro-conducteur (121)

- pour exécution d'une soudure bout à bout de rabouillage de semelles de membrure,
- pour exécution de tous les cordons d'angle de grande longueur.

Semi-automatique fil fourré sous gaz (136)

- pour exécution d'une première passe de fond de soudure bout à bout,
- pour exécution des différents cordons d'angle.

Ce procédé remplace avantageusement l'électrode enrobée quand l'accès est facile.

Semi-automatique fil fourré sans gaz (114)

Comme précédemment, remplace l'électrode enrobée pour les positions autres qu'à plat ou en gouttière : verticale montante ou plafond pour la réalisation de cordons d'angle.

Éléments de fixation (goujons connecteurs)

Principe du procédé :

- levée du goujon créant un arc électrique,
- temps de maintien de l'arc électrique,
- plongée avec refoulement du métal fondu guidé par une bague réfractaire.

Sur chantier**Arc manuel avec électrodes enrobées (111)**

- pour exécution des rabotages de poutres principales (semelles supérieures et inférieures et âme),
- pour exécution de tous les cordons d'angle avec ou sans garantie de pénétration,
- soudage toutes positions.

Semi-automatique fil fourré sans gaz (114)

- pour exécution des rabotages de poutres principales (semelles supérieures, inférieures et âme),
- pour exécution de tous les cordons d'angle avec ou sans garantie de pénétration,
- soudage toutes positions.

Comme en atelier ce procédé remplace l'électrode enrobée.

3-1-2-3 Choix du métal d'apport

Il faut que les propriétés mécaniques des soudures soient au moins égales aux valeurs minimales garanties pour le métal de base. Les caractéristiques de traction sont obtenues sans difficultés jusqu'à un niveau de 460 MPa par des produits d'apport C-Mn classiques, dès qu'ils contiennent plus de 1,3% de manganèse

Il en est de même pour les caractéristiques KV d'énergie de rupture en flexion par choc (résilience) de 31 J à -40°C ou de 27 J à -50°C, qui peuvent être facilement obtenues avec les produits d'apport modernes, au besoin en s'aidant d'une faible addition de nickel.

Dans tous les cas il sera nécessaire, pour éviter la fissuration en zone fondue (cf. paragraphe 3-1-2-4) de s'assurer que les produits d'apport présentent des taux d'hydrogène bas ou très bas, et de respecter les instructions de séchage du fabricant.

3-1-2-4 Le soudage des plaques M

- le risque de fissuration à froid en ZAT

La fissuration à froid résulte de la conjonction de trois facteurs qui sont :

- la microstructure de la zone affectée thermiquement ZAT, principalement la teneur en martensite
- les contraintes présentes dans la zone soudée
- la teneur en hydrogène du cordon de soudure

Les contraintes présentes dans la zone soudée dépendent de l'état de bridage de la soudure et la teneur en hydrogène du cordon de soudure du procédé et de produits de soudage mis en œuvre, le contrôle de la microstructure de la zone affectée thermiquement est le seul degré de liberté dont disposent les sidérurgistes pour

optimiser le comportement des nuances. La voie suivie est la recherche d'une teneur minimale en martensite (pour un cycle thermique donné), l'idéal étant d'arriver à garantir l'absence de martensite pour les cycles thermiques de soudage les plus rapides. Dans des conditions de soudage imposées la réduction, voire l'élimination, du risque de formation de martensite en ZAT nécessite de diminuer les teneurs en éléments d'addition, ce qui se traduit par un abaissement des valeurs des paramètres de type carbone équivalent CEV (CIIW, ou, plus adapté à ce type d'aciers CET, Pcm, CEN).

L'aptitude d'un acier à former des structures martensitiques est illustrée sur la courbe dureté-critère de refroidissement ci dessous, dont les deux paramètres importants sont :

- la dureté de la martensite H_m : plus H_m est élevé, plus le constituant est fragile,
- le critère de refroidissement critique Δt_m , temps de refroidissement entre 700°C et 300°C conduisant à une structure totalement martensitique et caractérisant la trempabilité de l'acier.

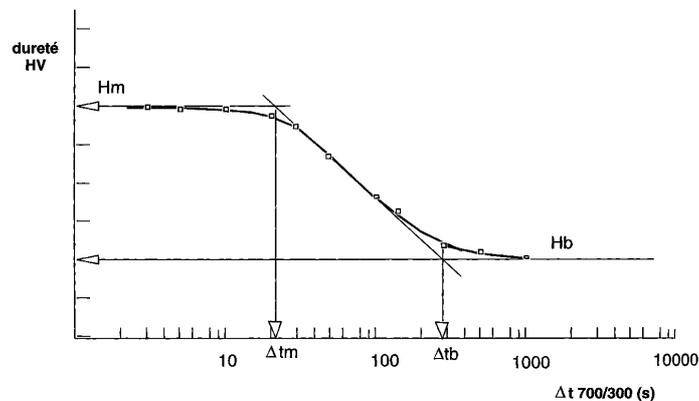


Figure 3.3

La dureté Vickers de la martensite H_m est uniquement fonction de la teneur en carbone et, pour des teneurs en carbone $[C]$ comprises entre 0,05 et 0,25%, est décrite par la relation : $H_m = 288 + 841 [C]$

Le critère de refroidissement critique Δt_m est relié à l'analyse chimique de la nuance par l'intermédiaire de relation de type carbone équivalent, tel qu'indiqué à la figure ci après. On y observe une relation linéaire entre un paramètre C_{eq} et $\log(\Delta t_m)$

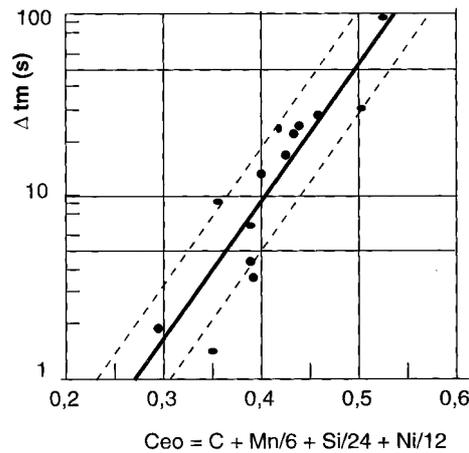


Figure 3.4

La figure 3.4 montre que plus C_{eo} est élevé, plus le critère de refroidissement critique Δt_m est élevé, et plus les conditions de soudage (énergie de soudage, température entre passes, préchauffage) permettant d'obtenir un cycle de soudage suffisamment long pour éviter la formation d'une structure totalement martensitique seront contraignantes.

Remarque : la validité de cette formule est restreinte aux aciers non alliés. Elle ne tient pas compte du V, du Cr et du Mo, ces deux derniers éléments étant présents dans la plupart des aciers S690-960Q.

L'acier S460M présente des teneurs réduites en carbone, nickel, chrome, niobium et vanadium. De ce fait on obtient une valeur typique l'ordre de 380 pour H_m , ce qui signifie que l'on aura affaire à des constituants moins fragiles que dans le cas des aciers normalisés de grade équivalent. De même, le temps de refroidissement critique Δt_m est court, de l'ordre de 6 s, ce qui autorise la mise en œuvre d'énergies de soudage faibles.

Vis à vis de la fissuration à froid, l'influence combinée de la microstructure et de l'hydrogène est indiquée à la figure ci après. Celle ci représente l'évolution de la contrainte critique de fissuration avec la teneur en hydrogène diffusible dans la soudure. Pour un temps de refroidissement $\Delta t_{800/500} = 10$ s, correspondant à une énergie de soudage $E = 20$ kJ/cm on peut constater que la nuance S460M présente une faible susceptibilité à la teneur en hydrogène, la contrainte critique restant dans tous les cas supérieure à la limite d'élasticité du matériau. A noter que le taux d'hydrogène diffusible a été limité à 4,5 ml/100g de métal déposé. En effet, malgré son excellente soudabilité l'acier S460M doit être soudé avec des apports présentant des taux

d'hydrogène diffusible bas pour éviter la fissuration à froid en zone fondue (cf. paragraphe 3-1-2-3).

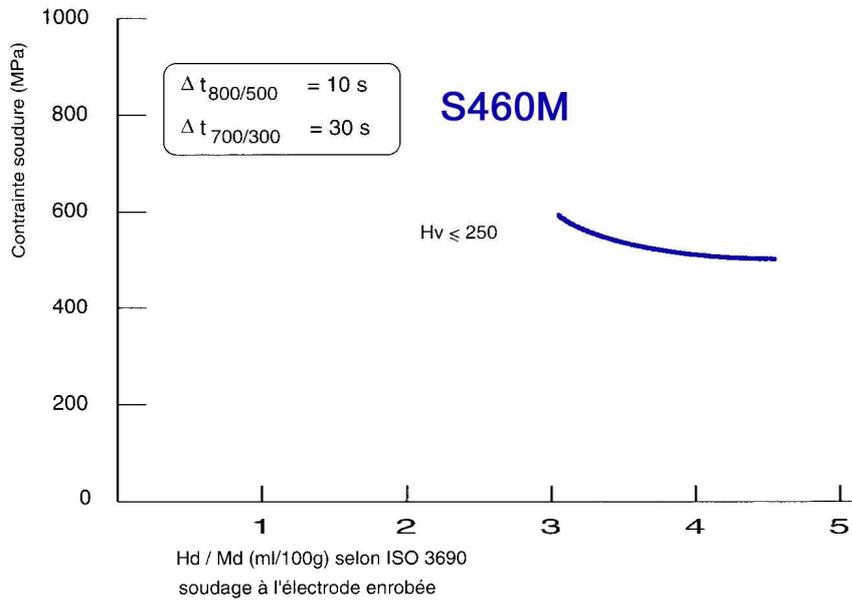


Figure 3.5

L'excellente résistance à la fissuration à froid de la nuance S460 M est confirmée par les résultats d'essai de fissuration sur implant (cf. figure 3.6 ci-après) menés avec de plus faibles énergies de soudage. Si la condition la plus sévère (8 kJ/cm, contrainte égale à R_e) est déclarée fissurante pour les deux teneurs en hydrogène testées, aucune fissure n'est observée pour cette énergie de 8 kJ/cm lorsque la contrainte est ramenée à $R_e/2$. Il suffit de porter l'énergie de soudage à 10 kJ/cm pour qu'aucune fissure ne soit observée pour un niveau de contrainte égal à R_e , et ce pour les deux teneur en hydrogène (3ml et 5 ml/100g de métal fondu) testées.

En pratique il en résulte que pour cet acier et ces teneurs en hydrogène l'utilisation d'une énergie de soudage supérieure à 10 KJ/cm suffira à se garantir contre le risque de fissuration à froid, quel que soit le niveau de bridage du joint soudé.

Remarque : attention, comme évoqué au point 3.1.1 ci avant, lors du choix final de l'énergie de soudage il faudra veiller à ne pas utiliser des énergies de soudage trop élevées susceptibles d'entraîner une dégradation des caractéristiques mécaniques du joint.

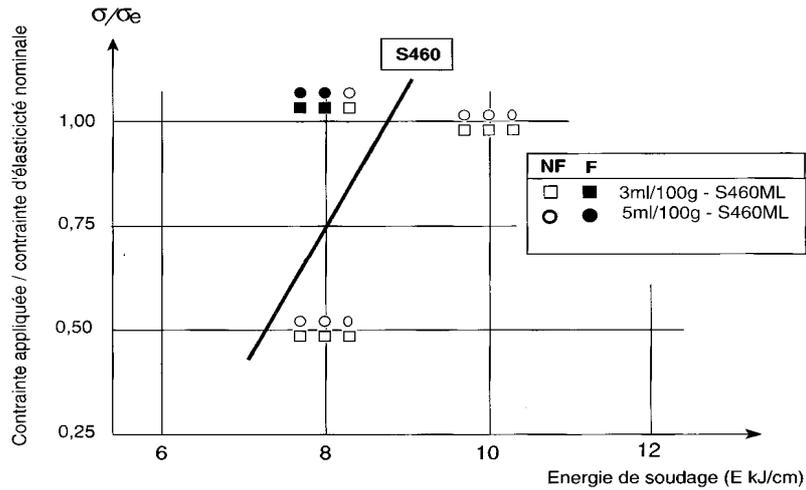


Figure 3.6

L'allégement de la composition chimique, rendu possible par l'application d'un laminage thermomécanique, doit permettre pour des aciers à haute limite d'élasticité, la mise en œuvre de températures de préchauffage plus faibles. Dans le cas de la réalisation des ponts métalliques, une attention particulière a été portée sur la réalisation, couramment rencontrée, de l'assemblage âme-semelle avec le procédé automatique arc submergé sous flux solide. La maquette en figure ci après est représentative de cet assemblage dans les conditions les plus sévères : le niveau de contrainte résiduelle généré lors de ce type d'essai est généralement nettement supérieur à celui généré par une soudure d'angle. Elle permet d'évaluer les températures de préchauffage nécessaires pour s'affranchir du problème de la fissuration à froid dans cette configuration, avec une marge de sécurité.

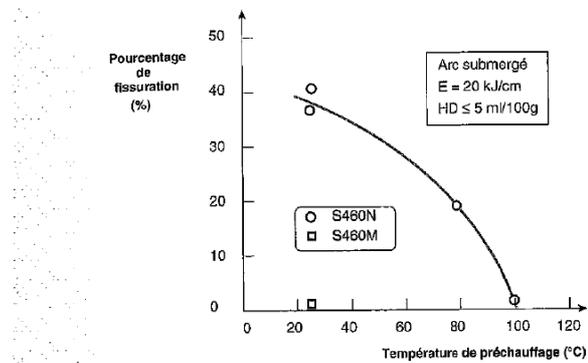


Figure 3.7

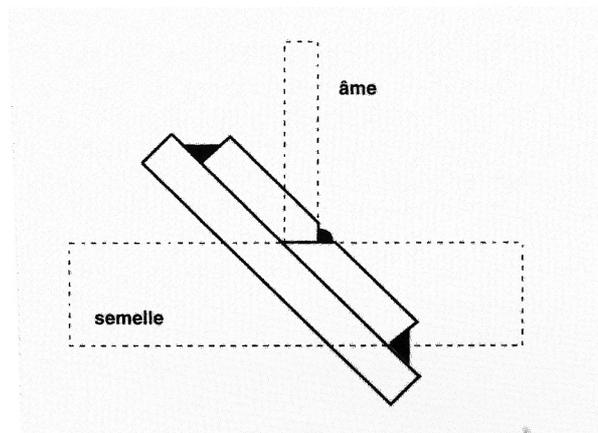


Figure 3.8

Les résultats des essais montrent (cf figure ci-dessus) que pour une énergie de soudage de 20 kJ/cm et une teneur en hydrogène diffusible inférieure ou égale à 5 ml/100g de métal déposé la très faible trempabilité de la nuance S460M conduit à l'absence de fissure même sans préchauffage. Les niveaux de dureté mesurés sur les éprouvettes confirment l'absence de martensite dans la zone affectée thermiquement de l'acier S460M.

- Le risque de fissuration à froid en zone fondue

Nous avons vu au point 3-1-2-4 que le risque de fissuration à froid dans la zone affectée thermiquement ZAT est pratiquement inexistant et qu'il est possible d'envisager le soudage sans préchauffage de la nuance S460M (alors que le S460N en nécessite un de l'ordre de 100°C). Toutefois la mise en œuvre de ces aciers avec des apports classiques de type C-Mn, ayant des teneurs en manganèse supérieures à 0,9% montre que dans des configurations très bridées de soudage bout à bout, le risque de fissuration se déplace de la ZAT vers la zone fondue. Cette évolution est d'autant plus sensible que la teneur en manganèse de la zone fondue et la teneur en hydrogène sont élevées.

Ce comportement est précisé par l'essai Tekken (EN ISO 17642-2:2005-09) dont les résultats d'essais de fissuration autobridés exécutés sans préchauffage montrent, au tableau ci-dessous, qu'il existe en fonction de la teneur en manganèse une teneur maximale en hydrogène comprise entre 2,5 et 3,5 ml/100 g de métal fondu (soit 5 à 7 ml/100 g de métal déposé), qui permet d'éviter totalement la fissuration. Ainsi, pour profiter pleinement de l'avantage du soudage sans préchauffage offert par les aciers thermomécanique, il suffit d'utiliser les produits d'apport à bas ou très bas hydrogène qui sont maintenant généralement offerts pour tous les procédés de soudage.

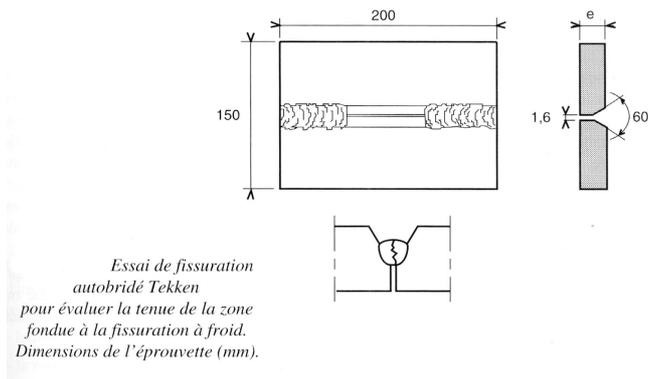


Figure 3.9

H ₂ diffusible (ml/100g)		Teneur en manganèse			
Métal fondu	Métal déposé	0,95	1,10	1,38	1,64
2,5	4,7	NF	NF	NF	NF
2,9	5,4	NF	NF	NF	F
3,5	6,6	NF	NF	F	F
5,3	10,1	F	F	F	F
7,9	15,1	F	F	F	F

Tableau 3.10 : Résultats d'essais Tekken - Fissuration en zone fondue (F)
Epaisseurs d'éprouvettes : 20 à 40 mm - Energies de soudage : 7 à 10 kJ/cm

- la résistance à la rupture fragile des assemblages soudés

La résistance à la rupture fragile des assemblages soudés est un critère qui limite le domaine de soudabilité pour les plus fortes énergies de soudage. Dans un joint soudé la zone affectée thermiquement (ZAT) est le domaine qui présente généralement les plus faibles caractéristiques de résistance à la rupture fragile. La taille des grains, la teneur en azote en solution solide et la présence d'une micro-phase fragilisante appelée MA, Martensite austénite sont généralement considérées sur le plan métallurgique pour interpréter ce comportement.

L'amélioration de la ténacité des joints soudés est donc possible avec optimisation de la composition chimique de l'acier qui se traduit par la réduction des teneurs en carbone, en Nb et en Si.

Cette approche est permise par l'application d'un mode d'élaboration avec traitement thermomécanique qui permet de conserver au métal de base ses caractéristiques de traction. C'est ainsi que par rapport à la nuance normalisée équivalente la nuance S460ML optimisée se singularise par une teneur en carbone plus faible, par la réduction des teneurs en silicium, nickel et niobium et par une très faible addition de titane. Ceci permet de mettre en œuvre des énergies de soudage élevées (jusqu'à 35s pour le Tr 800-500) en conservant une bonne ténacité en ZAT.

3-1-2-5 Le soudage des poutrelles M ou QST (Acier trempé et auto-revenu)

Comme les plaques en acier obtenu par laminage thermomécanique, les poutrelles en acier trempé et auto-revenu ont fait l'objet d'essais destinés à apprécier leur comportement vis à vis du soudage.

- le risque de fissuration à froid en ZAT

Le laminage thermomécanique avec trempé et auto-revenu, permet d'optimiser la composition chimique du métal de base et de réduire le carbone équivalent d'environ 0,10%. Ainsi le CEV de l'acier S460M est inférieur à celui de l'acier S355N.

Il en résulte que même pour des vitesses de refroidissement élevées la dureté de l'acier S460M est inférieure à celle de l'acier S355N

Le bon comportement de l'acier S460M vis à vis de la fissuration à froid est également confirmé par les essais de fissuration sur implants (ISO 17 642) effectués avec des contraintes au niveau de la limite d'élasticité (cf. figure ci après)

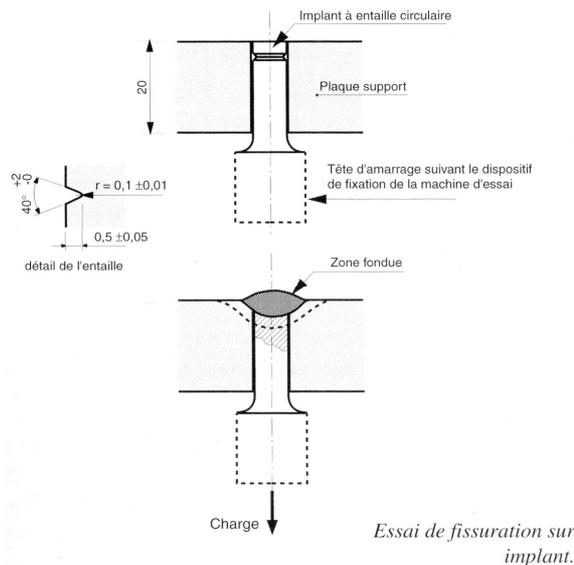
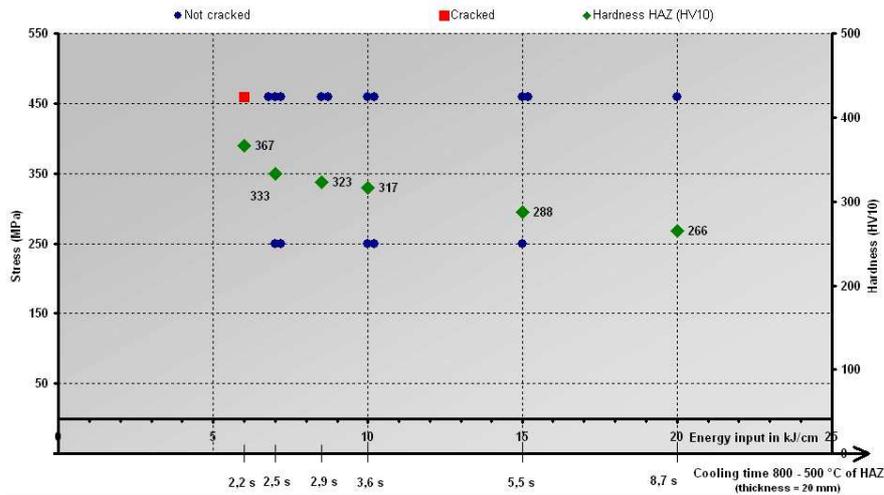


Figure 3.11



**Figure 3.12: Comportement au soudage d'un acier S460M. Essais de fissuration sur implants (H_2 dif. du produit d'apport = 7,1 ml/100g de métal déposé)
Courbe dureté-paramètre de refroidissement**

Suite à ces résultats et d'après l'expérience pratique de soudage avec des électrodes basiques de teneur en hydrogène diffusible inférieure à 10ml/100g de métal déposé, on peut affirmer que le soudage en conditions usuelles des poutrelles M ne demande pas de préchauffage pour un CEV inférieur à 0,40%, voire inférieur à 0.43% avec un hydrogène diffusible inférieur à 5ml/100 g

Un dégourdissage est tout de même recommandé pour des températures ambiantes au-dessous de 5°C.

Généralement, les métaux d'apport ont un CEV plus faible que les aciers à souder. Dans le cas des aciers à résistance plus élevée, le choix du métal d'apport doit se faire judicieusement afin d'éviter un CEV élevé du métal déposé, qui conditionnerait alors un préchauffage destiné à éviter la fissuration de ce dernier.

- le risque de fissuration à froid en Zone Fondue

Bien qu'aucun cas de fissuration en zone fondue lors du soudage des poutrelles n'ai été rapporté à ce jour, il convient cependant de privilégier les métaux d'apport permettant de s'affranchir de ce risque (cf. chapitre 3.1.2.4) : teneur en manganèse limitée ($Mn < 1,1\%$ pour un produit d'apport de classe H10, $Mn < 1,5\%$ pour un produit d'apport de classe H5), teneur en hydrogène diffusible inférieure à 7 ml/100g de métal déposé.

- la résistance à la rupture fragile

Pour éviter une rupture fragile dans les soudures, l'acier doit garder une bonne ténacité dans la ZAT. Ceci est particulièrement critique pour les apports d'énergie importants lors du soudage. La figure ci dessous montre la ténacité dans la Zone fondue, la ZAT et le métal de base d'un acier S460M. On remarquera le très bon comportement de cet acier où les propriétés de résilience en ZAT sont conservées pour des énergies de soudage atteignant 35 kJ/cm

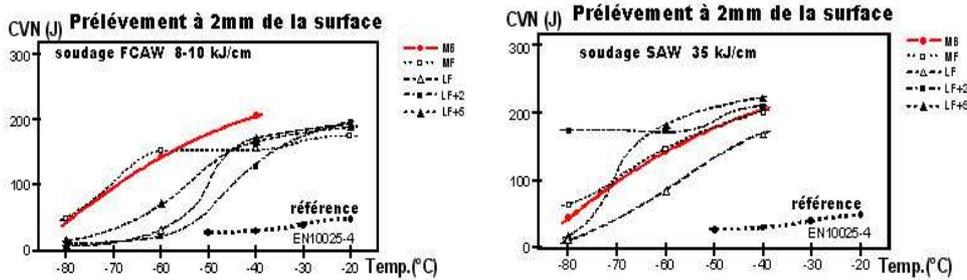


Figure 3.13 : Valeurs de résilience obtenues sur soudures d'acier 460M, avec deux énergies de soudage différentes

3-1-2-6 Le coupage thermique

Les nuances S460 M et ML présentent une excellente aptitude au coupage tant oxyacétylénique que plasma. Du fait de leur plus faible trempabilité, les bords bruts d'oxycoupage vont être de plus faible dureté que ceux d'aciers normalisés de nuance équivalente. La figure ci après illustre le gradient de dureté à partir de la rive oxycoupée vers le matériau non affecté par la chaleur, après oxycoupage d'une tôle de nuance S460ML, d'épaisseur 80 mm, et confirme ce comportement.

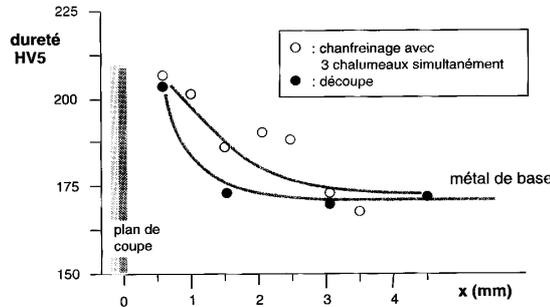


Figure 3.14 : Gradient de dureté après oxycoupage

L'absence de structures de trempe dans la zone affectée par la chaleur de la coupe (HV5 max. = 220) met en évidence le très faible risque de fissuration du plan de coupe et ainsi confirme la possibilité de découper ces tôles sans préchauffage, même dans des conditions climatiques très sévères.

Dans le cas d'une configuration où le chauffage est très important (cas du délardage d'une tôle forte et chanfreinage avec trois chalumeaux simultanément), les caractéristiques mécaniques de traction et l'énergie de rupture en flexion par choc (résilience) du métal de base sont préservées.

Grâce à la dureté peu élevée et à la bonne ténacité des rives oxycoupées, il est possible de réaliser une opération de pliage à froid sans risque de fissuration.

3-1-2-7 Les chaudes de retrait

Les professionnels de la construction métallique font largement appel aux opérations de chaude de retrait soit pour redresser les tôles après soudage, soit pour les former ou les plier. Trois grands types de chaudes sont utilisés selon le résultat escompté. On opère des chaudes ponctuelles, linéaires ou triangulaires. Ces chauffes, qu'elles soient réalisées au chalumeau ou par induction, se traduisent par un apport rapide et localisé de chaleur induisant des phénomènes thermomécaniques et des modifications métallurgiques.

- Les conséquences mécaniques des chaudes de retrait

L'ensemble des essais a mis en évidence l'existence d'une gamme de températures optimales vis à vis des déformations en fonction de l'épaisseur des tôles, comme indiqué à la figure ci après.

Évolution de la flèche après chaude de retrait linéaire réalisée sur un coupon de dimensions "ép. 500 x 500" mm².

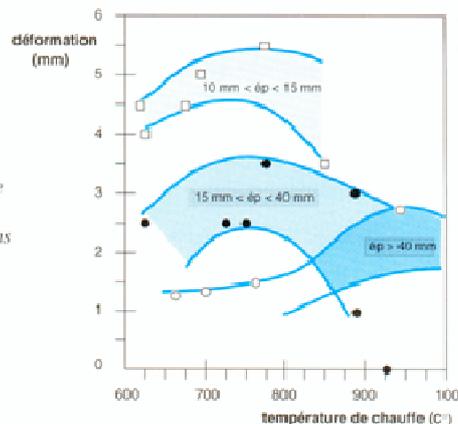


Figure 3.15 : Evolution de la flèche après chaude de retrait linéaire réalisée sur un coupon de dimensions ep.500x500 mm²

Dans la gamme des épaisseurs fines ($e < 15\text{mm}$), plus fortement sujettes à déformation, la température optimale de traitement, du point de vue efficacité mécanique, est inférieure à 800°C , tandis qu'elle se situe entre 800 et 850°C pour les épaisseurs comprises entre 15 et 40mm . Pour les épaisseurs supérieures la température optimale d'un point de vue efficacité mécanique dépasse 900°C . Nous verrons qu'il n'est pas toujours possible de mettre en œuvre ces températures et qu'il peut être nécessaire de les limiter pour ne pas altérer les propriétés mécaniques de la tôle.

- Les conséquences mécaniques des chaudes sur les propriétés mécaniques - températures maximales à mettre en œuvre.

L'incidence de chaudes de retrait linéaires sur les caractéristiques d'une tôle en acier S460M de 40mm d'épaisseur est donnée au tableau ci dessous (Tableau 3.16) :

Propriétés	Métal de base	Températures de chaude de retrait ($^{\circ}\text{C}$)			
		665	707	780	940
Re (MPa)	480	469	455	466	466
Rm (MPa)	587	580	578	583	576
KV -40°C (J)		276	280	261	219

Tableau 3.16

La résistance à la traction Rm, la limite d'élasticité Re et l'allongement A% restent bons. Les essais de flexion par choc réalisés montrent également qu'aucune fragilité n'est observée lors des essais à -40°C . Une légère chute de l'énergie s'amorce pour les températures supérieures à 900°C , mais les valeurs restent dans ces conditions encore largement au-dessus des spécifications.

Ce sont les fortes épaisseurs qui nécessitent une surveillance particulière (vitesses de chauffage et de refroidissement plus lentes), notamment dans le cas de chaudes triangulaires où une quantité très importante de chaleur, apportée lors de la chauffe dans toute l'épaisseur de la tôle, pourrait conduire à un adoucissement local de l'acier.

En résumé, il est donc possible de dégager des conditions de chauffe industrielles ($650^{\circ}\text{C} < T < 900^{\circ}\text{C}$) qui soient optimales à la fois vis à vis des déformations et des caractéristiques mécaniques de la zone affectée.

Les températures doivent toutefois être limitées à 900°C pour les chaudes linéaires, 700°C pour les chaudes ponctuelles et 650°C pour les chaudes triangulaires.

- Application aux poutrelles en acier QST

Les poutrelles en acier S460ML, ayant subi l'auto-revenu à des températures relativement hautes (mini 600°C), conservent leurs propriétés mécaniques au niveau initial pour des chaudes jusqu'à au moins 700°C.

Pour une chaude de retrait avec des températures de 850°C, la baisse de la limite d'élasticité est légère comme on peut l'observer sur la figure suivante. En pratique industrielle courante, les opérations de dressage ou de contre-fléchage par le travail à la flamme peuvent donc être appliquées sur les poutrelles en acier S460M.

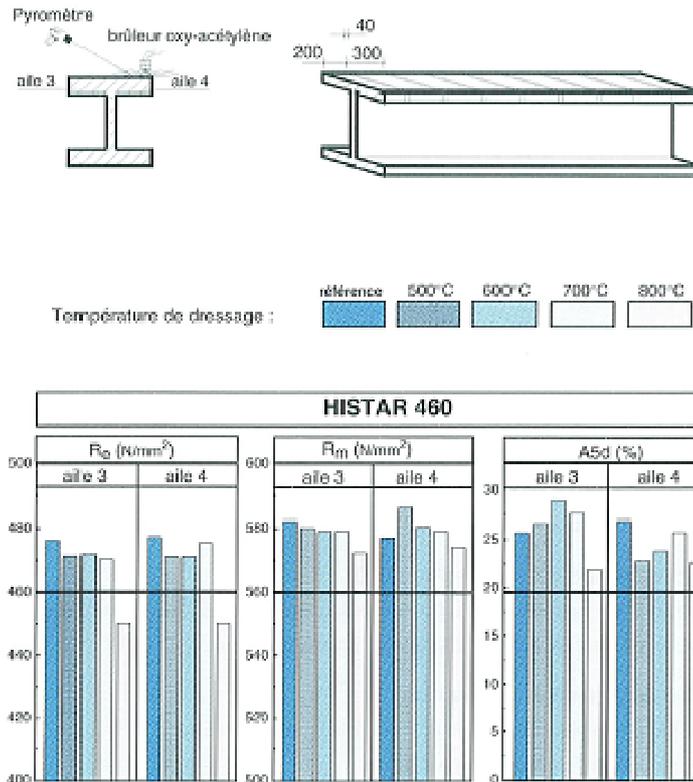


Fig. 3.17: caractéristiques mécaniques après chaude de retrait

- Exemples d'application pour les ouvrages d'art

Précambuage des semelles de poutres principales, entretoises ou pièces de pont

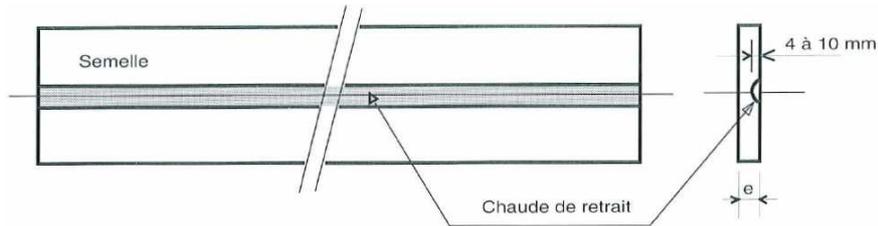


Fig. 3.18 : Chaude de retrait linéaire dans l'axe longitudinal de la semelle.

Cette opération s'effectue pour des épaisseurs inférieures ou égales à 30 mn. Puissance calorifique et vitesse d'avance sont réglées pour faire en sorte que la chaude soit efficace en terme de déformation par retrait ; ce qui représente une pénétration de la chaude de retrait sur une épaisseur de l'ordre de 4 à 10 mn sous la peau de la semelle.

Redressage d'une semelle sortie d'oxycoupage

Cette opération s'effectue sur le chant de la semelle oxycoupée. La profondeur p des chaudes de retrait est au maximum égale au tiers de la largeur de la semelle.

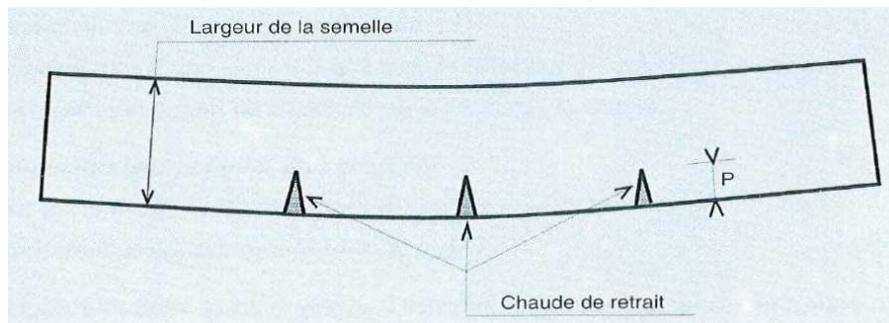


Fig. 3.19 : Redressage d'une semelle

Cambrage d'une semelle au droit d'un appui
Exemple : poutre de hauteur variable.

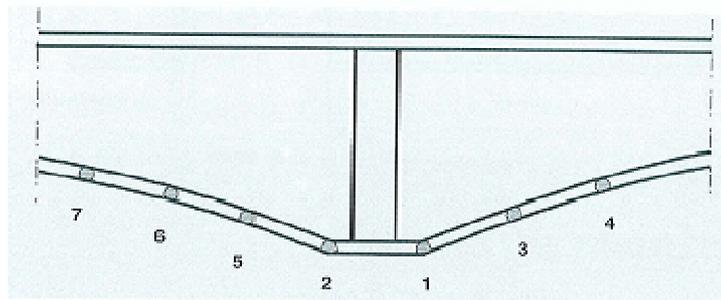


Fig. 3.20 : Cambrage d'une poutre de hauteur variable

Au niveau de l'appui (points 1 et 2), le pli peut être obtenu par pliage à chaud sur toute la largeur et l'épaisseur de la semelle, sous réserve de prendre en compte les pertes de caractéristiques de formage (perte des caractéristiques de traction après traitement thermique à haute température - voir tableau en début de chapitre 3-1-2-7) ; si celles-ci ne peuvent être acceptées, il faut recourir au raboutage par soudure.

Au niveau de la courbure courante de la semelle inférieure (points 3, 4, 5, 6...), le cambrage est obtenu par chaufes de retrait, sur toute la largeur et l'épaisseur de la semelle.

La distance entre les points de chauffe est fonction du rayon de courbure de la semelle.

Calibrage d'un ensemble après soudage d'un voile ou d'un raidisseur

Cas général :

- soudage d'un raidisseur horizontal ou vertical sur une âme de poutre principale

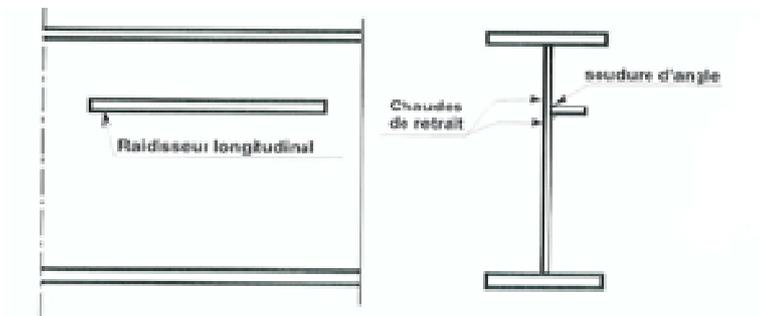


Fig. 3.21

- soudage de l'âme sur semelle d'un montant reconstitué

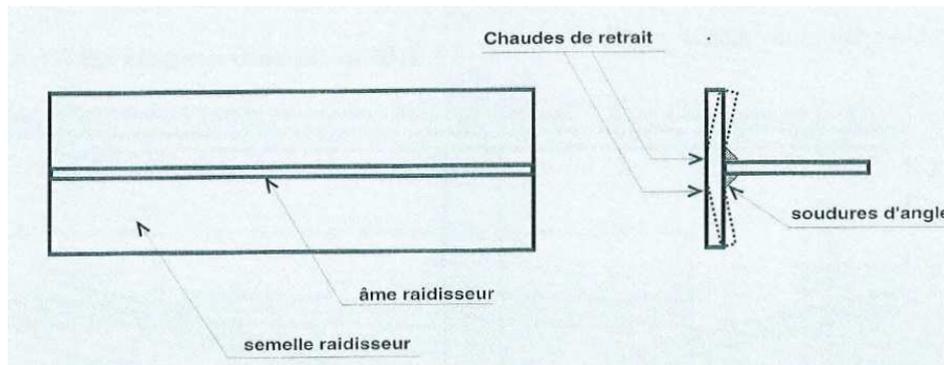


Fig. 3.22

Exécution des chaudes de retrait

Dans la mesure du possible, les chaudes de retrait de grande longueur sont exécutées de façon automatique. Les chalumeaux de chauffe sont inondés sur la machine d'oxycoupage ou sur des chariots munis d'un système d'avance à vitesse variable.

Les chaudes de retrait ponctuelles ou de courte longueur sont exécutées annuellement par un opérateur confirmé. Les paramètres optimaux d'exécution des chaudes de retrait (températures, durée de maintien, vitesse d'avance ...) sont déterminés en fonction du dernier résultat à obtenir, dans les conditions décrites en début de chapitre.

3-1-3- Aciers de nuance S690Q

3-1-3-1 Aciers concernés

Il s'agit d'une nuance trempée revenue dont les caractéristiques sont définies par la norme EN 10025-6. Les valeurs de carbone équivalent maximum prévues par la norme sont relativement élevées, de 0,65% pour les épaisseurs inférieures à 50 mm jusqu'à 0,83% pour les épaisseurs comprises entre 100 et 150 mm.

3-1-3-2 Procédés de soudage envisageables

A priori quatre procédés de soudage sont envisageables :

- le soudage manuel à l'électrode enrobée à l'électrode basique (111). On veillera à choisir des électrodes présentant un taux d'hydrogène diffusible bas ($HD < 5 \text{ ml/100g}$)

m.d.). Les électrodes seront séchées et conservées en étuve avant emploi conformément aux indications du fournisseur.

- le soudage sous flux en poudre électro-conducteur (121). Là encore on retiendra les couples fil-flux présentant les taux d'hydrogène les plus faibles possibles. Le flux sera séché avant usage et on veillera à éviter toute reprise accidentelle d'humidité du flux. L'obtention de taux d'hydrogène inférieur à 5ml/100g est possible, mais nécessite de porter une attention particulière au choix initial du couple fil-flux, au suivi de la qualité des approvisionnements, à la bonne exécution des opérations de séchage, conservation et mise en œuvre du flux.

- le soudage semi-automatique avec fil massif sous protection gazeuse (135). Ce procédé est intéressant en ce sens qu'il procure généralement des taux d'hydrogène diffusible bas (typiquement 2ml/100 g m.f.)

- le soudage semi-automatique avec fil fourré de poudre métallique sans flux mais avec gaz de protection (136). On vérifiera que le produit retenu présente bien un taux d'hydrogène diffusible bas conformément à ce que l'on peut attendre de ce type de produit.

Le choix appartient au constructeur en fonction d'impératifs technico-économiques tels que le prix de revient, la qualification du personnel, les moyens et l'organisation de l'atelier, ainsi que de l'énergie de soudage à mettre en œuvre.

3-1-3-3 Choix du métal d'apport

En soudage bout à bout les métaux d'apport devront être choisis de manière à assurer en zone fondue des caractéristiques mécaniques (traction, résilience) équivalente à celles du métal de base. De nombreux fournisseurs de produits d'apport sont à même de fournir ce type de produit. Il faudra cependant veiller à ce que les propriétés en zone fondue soient conservées dans les conditions de mise en œuvre effectives du produit et ne soient pas dégradées par la mise en œuvre d'un régime thermique trop chaud

En soudage d'angle il est possible d'utiliser un métal d'apport présentant des caractéristiques de traction inférieures à celles du métal de base, la résistance du joint étant assurée en augmentant la hauteur de gorge du cordon

Dans tous les cas on choisira des produits d'apport présentant des taux d'hydrogène diffusibles faibles (<5ml selon ISO 3690) et on séchera les électrodes enrobées et les flux pour soudage sous flux électro-conducteur conformément aux indications du fabricant.

3-1-3-4 Le soudage des plaques Q

- Le risque de fissuration à froid en ZAT

- ✓ Influence du carbone équivalent

Du fait des valeurs de carbone équivalent élevées cette nuance est sensible au risque de fissuration à froid en ZAT. L'importance du risque est fonction de la composition réelle de la fourniture à souder. Celle ci peut varier notablement en fonction de la stratégie adoptée par le sidérurgiste pour obtenir les caractéristiques mécaniques requises. A titre d'exemple la figure ci dessous donne les courbes de fissuration sur implant obtenues pour deux fournitures d'acier S690, l'une très faiblement alliée au nickel chrome chrome molybdène et l'autre micro alliée au niobium titane bore. On observe que ces deux fournitures présentent des carbones équivalents très différents, de respectivement 0,41% et 0,68%, ce qui conduit à des positionnements très différents des courbes de fissuration. La nuance micro alliée présente une courbe moyennement montante, relativement proche de celle d'un acier de construction de type S355, qui laisse présager qu'un simple préchauffage sera suffisant pour s'affranchir du risque de fissuration à froid. L'autre fourniture présente une courbe basse et plate, indiquant que le recours au postchauffage sera nécessaire pour éviter la fissuration à froid.

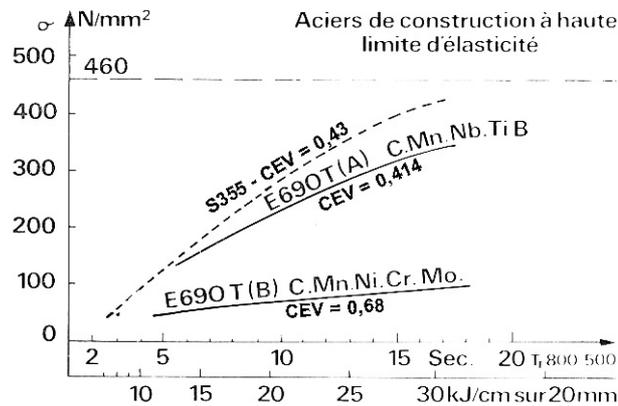


Figure 3.23 : Courbes de fissuration sur implants de deux fournitures d'acier S690

Remarque : bien que seul le CEV (carbone équivalent IIW) soit pris en compte dans la norme EN10025, il faut signaler d'autres formules de carbone équivalent tels que le CET (cf. norme EN1011) permettent une meilleure approche du risque de fissuration à froid pour les aciers trempés revenus à haute limite d'élasticité.

Un autre exemple de l'influence du carbone équivalent est donné par la comparaison des précautions de soudage recommandées dans les fiches OTUA/CETIM/IS pour deux fournitures en provenance de deux aciéristes différents (cf. ci dessous)

acier 1 - CEV typique 0,54 - fiche OTUA /CETIM/IS

Soudage		Teneur en hydrogène diffusible du métal déposé	
Procédé de soudage	Energie de soudage (kJ/mm)	H ₂ ≤ 1cm ³ /100g	H ₂ ≤ 5cm ³ /100g
Electrode enrobée	0,7		125°C + Post-ch. 60 min.
	1,5		125°C + Post-ch. 60 min.
MAG	1,5	100°C + Postch. 45 min.	Non déterminées
Fil sous flux	2		120°C + Post-ch. 60 min.

acier 2 - e<20mm - CEV typique = 0,41 - fiche OTUA/CETIM/IS

Procédé de soudage	Énergie (kJ/cm)	Teneur en hydrogène diffusible du métal	
		H ₂ ≤ 2ml/100g	H ₂ ≤ 5ml/100g
MAG	15	100°C	
	≥ 20	50°C	
Électrode enrobée	7 - 15		125°C
	≥ 25		50°C

Si très fort bridage : préchauffage 125°C pour H₂ = 2ml/100g et 150°C pour H₂ = 5ml/100g

Figure 3.24 : Conditions de soudage pour deux fournitures d'aciers S690

NB : ces diagrammes de publication sont donnés tels quels à titre "illustratifs".

On constate que pour l'acier présentant le plus fort carbone équivalent le recours au post-chauffage est nécessaire quelles que soient les conditions de soudage. A l'inverse pour l'acier présentant le plus faible carbone équivalent un simple préchauffage, à des températures relativement modérées est suffisant.

✓ Influence de l'énergie de soudage

L'examen de la figure précédente montre que l'utilisation d'une énergie de soudage élevée permet d'abaisser les températures de préchauffage à mettre en œuvre. Cependant l'énergie de soudage ne doit pas être augmentée exagérément, sous peine de dégrader les propriétés de la ZAT et de la zone fondue.

✓ Influence de l'hydrogène diffusible

L'examen de la figure précédente montre que la diminution du taux d'hydrogène diffusible permet d'abaisser les températures de pré et post-chauffage à mettre en œuvre. Un autre exemple de l'incidence du taux d'hydrogène diffusible sur les précautions à mettre en œuvre est ci-après :

**ESSAIS DE FISSURATION SUR IMPLANTS
ACIER S690QL (CEV = 0,52)**

taux H₂ dif = 1,9 ml/100 g m.f. **taux H₂ dif = 3,3 ml/100 g m.f.**
E = 15 kJ/cm - contrainte : 600MPa

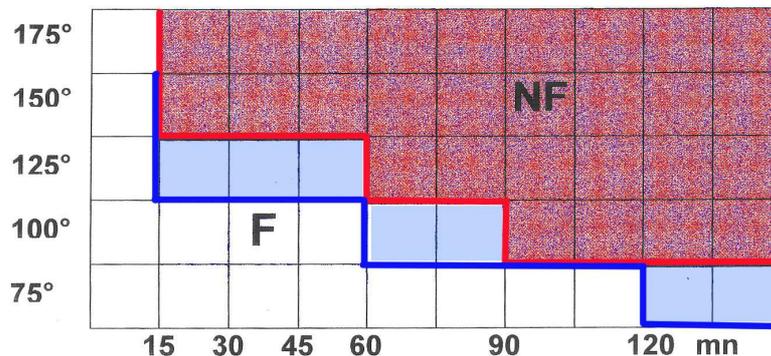


Figure 3.25 : Diagrammes de postchauffage établis sur implants

Les diagrammes de la figure ci-dessus fournissent les couples temps-températures de post-chauffage à mettre en œuvre pour éviter la fissuration. On constate que toutes choses égales par ailleurs, l'abaissement du taux d'hydrogène diffusible de 3,3 à

1,9 ml/100g de métal fondu permet de réduire la durée du post-chauffage et d'abaisser les températures.

✓ Influence de l'épaisseur des tôles

Sur les diagrammes extraits des fiches OTUA précédemment donnés, on observe que l'acier 2 n'est fourni avec un carbone équivalent de 0,41 que pour des épaisseurs inférieures à 20mm. En effet plus l'épaisseur des tôles augmente plus l'aciériste doit augmenter le carbone équivalent pour obtenir les caractéristiques mécaniques demandées. Le tableau ci-après indique l'évolution du carbone équivalent en fonction de l'épaisseur chez un sidérurgiste donné. On observe une augmentation notable du carbone équivalent lorsque l'épaisseur passe de 20 mm à 150 mm. Parallèlement les conditions de préchauffage à mettre en œuvre deviennent de plus en plus contraignantes.

Remarque : bien qu'il ait pu être plus pertinent de paramétrer ce tableau en terme de CET plutôt que de CEV, le sidérurgiste a choisi d'utiliser le CEV, probablement du fait que ce dernier fait l'objet de prescription dans la norme EN 10025.

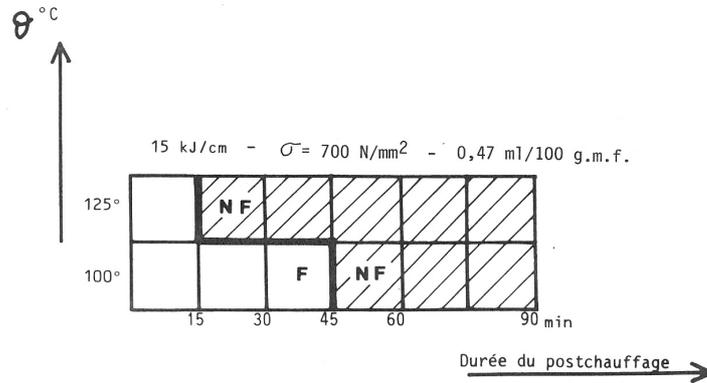
Epaisseur (mm)	CEV(sidérurgiste)	CEV max norme (EN 10025)	Préchauffage
20 à 50 mm	0,60	0,65	100 à 150 °C
50 à 80 mm	0,67	0,77	150 à 180°C + post-chauffage
80 à 110 mm	0,72	0,77(e<100mm) 0,83 (e>100mm)	150 à 180°C + post-chauffage
110 à 150 mm	0,78	0,83	150 à 180°C + post-chauffage

Post-chauffage : traitement de déshydrogénisation de 2 à 4h à une température de 200 à 300 °C, à pratiquer avant refroidissement de la pièce (avec produits d'apport à très bas taux d'hydrogène diffusible)

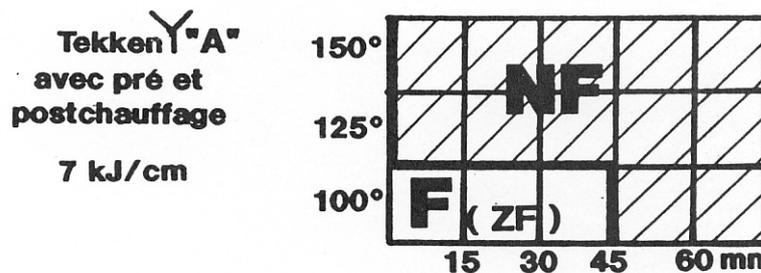
Tableau 3.26 : Evolution du carbone équivalent en fonction de l'épaisseur

✓ Le risque de fissuration en zone fondue

Pour obtenir les caractéristiques mécaniques requises les produits d'apport doivent comporter des additions non négligeables d'éléments d'alliage, qui augmentent la dureté en zone fondue. Cette dernière est alors susceptible de fissurer à froid. La fissuration surviendra soit en zone fondue soit en ZAT selon les sensibilités respectives de ces deux zones. Pour les aciers S690Q les sensibilités de la ZAT et de la zone fondue sont souvent voisines comme illustré à la figure ci après.



a) Diagramme de post-chauffage implant établi pour la ZAT (Fig 3.27)



b) Diagramme de post-chauffage Tekken établi pour la zone fondue (Fig 3.28)

Le diagramme de la figure a (3.27), établi par la méthode des implants, indique les précautions de post-chauffage nécessaires pour éviter la fissuration en ZAT d'un acier S690Q donné. Le diagramme de la figure b (3.28), établi sur la base d'essais Tekken ayant fissuré en zone fondue indique les précautions nécessaires pour éviter la fissuration à froid en zone fondue pour un produit d'apport adapté au soudage de cet acier S690Q. On constate que dans ce cas les précautions sont voisines pour les deux zones, ce qui indique des sensibilités au risque de fissuration à froid similaires pour ces deux zones.

Les différentes formes de fissuration à froid en zone fondue :

Deux types de fissures peuvent être rencontrés : les fissurations longitudinales et les fissurations transversales.

Les fissures longitudinales intéressent les soudures monopasses (cf. figure 3.29) ou les passes de racine des soudures multipasses.

fissuration longitudinale

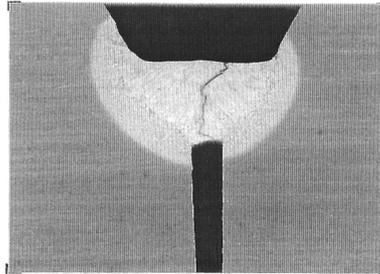


Figure 3.29 - Fissure longitudinale d'un cordon monopasse

Les fissures transversales intéressent les soudures multipasses épaisses. Elles s'initient le plus souvent au tiers supérieur de l'épaisseur de la soudure et peuvent se propager sur toute l'épaisseur du joint soudé. Elles peuvent être perpendiculaires à la surface du joint (cf. figure ci après) ou inclinées à 45° (fissures "en chevron"). Les soudures épaisses multipasses réalisées en soudage sous flux électro-conducteur sont plus particulièrement sensibles à cette fissuration transversale.

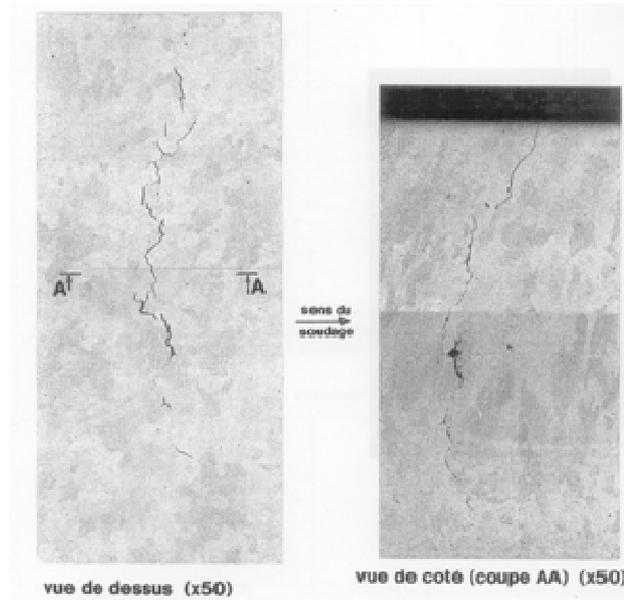


Fig 3.30 : Fissuration transversale d'une soudure multipasses

▪ **Les paramètres influant sur la fissuration en zone fondue**

Les principaux paramètres influant sur le risque de fissuration en zone fondue sont :

- ⇒ la composition chimique de la zone fondue. Plus le carbone équivalent de la zone fondue est élevé, plus la dureté et la limite d'élasticité sont élevées et plus le risque de fissuration dans cette zone est élevé.
- ⇒ le taux d'hydrogène diffusible du produit d'apport
- ⇒ le procédé de soudage : le soudage sous flux électro-conducteur semble plus sensible à la fissuration transversale que les autres procédés
- ⇒ la température de préchauffage et entre passes
- ⇒ l'épaisseur à souder : les faibles épaisseurs (inférieures à 20mm) sont réputées beaucoup moins sensibles à la fissuration transversale que les fortes épaisseurs

Par contre l'énergie de soudage semble être un facteur moins influant qu'il ne l'est dans le cas de la fissuration à froid en ZAT

▪ **Détermination des conditions de soudage pour éviter la fissuration à froid**

Les conditions de soudage, énergie de soudage, température de préchauffage et entre passes, temps et température d'un éventuel post-chauffage peuvent être déterminées sur la base de renseignements fournis par l'aciériste, sur la base de l'expérience du constructeur, par des essais de soudabilité ou en utilisant une méthode prédictive. Dans tous les cas il faut être conscient que les conditions déterminées pour une fourniture d'acier et un produit d'apport ne sont valables que pour la composition chimique du métal de base et pour le taux d'hydrogène diffusible du métal d'apport ayant servi à les déterminer.

Les essais utilisables sont les essais d'implant et les essais autobridés. Les essais d'implant permettent de déterminer les conditions de soudage valables pour la ZAT. Ces conditions devront être validées par des essais autobridés de type tekken avec préparation en Y pour vérifier qu'elles satisfassent également aux exigences de la zone fondue. Pour les soudures multipasses épaisses il sera bon de vérifier l'absence de risque de fissuration transversale au moyen d'un essai autobridé multipasses tel celui préconisé par le TWI

En ce qui concerne les méthodes prédictives, la norme EN 10025-6 recommande d'utiliser la norme EN 1011-2. Cette norme propose, à titre informatif, deux méthodes prédictives, A et B, pour déterminer les conditions de préchauffage permettant d'éviter la fissuration en ZAT. A signaler que certaines fournitures peuvent avoir des compositions chimiques qui les font sortir du champ d'application de la méthode A. La méthode B prend partiellement en compte le risque de fissuration en zone fondue puisqu'il est recommandé de calculer la température de préchauffage sur la base du carbone équivalent (CET) de la zone fondue majoré de 0,03% lorsque cette valeur est supérieure au carbone équivalent du métal de base. La méthode B recommande le recours au post-chauffage pour les aciers ayant une limite d'élasticité supérieure à 460 MPa et une épaisseur supérieure à 30 mm, dans le cas du soudage sous flux électro-conducteur. Le post-chauffage recommandé est alors de 2 h à 250°C.

▪ **Exemple de recommandations visant à éviter la fissuration froid pour un acier donné**

Comme indiqué ci avant, les précautions à prendre pour éviter la fissuration à froid sont largement dépendantes de la fourniture d'acier considérée. A titre d'exemple on trouvera ci dessous les recommandations d'un aciériste relatives à ses fournitures, dont la soudabilité a été optimisée.

Tableau 3.31 : Température mini de préchauffage - HD = 5 ml/100g - E = 15 kJ/cm

Epaisseur (mm)	20	30	>50
----------------	----	----	-----

Tpréchauffage (°C)	25	100	150
--------------------	----	-----	-----

Tableau 3.32 : Température mini de préchauffage - HD = 2 ml/100g - E = 10 kJ/cm

Epaisseur (mm)	20	30	>50
Tpréchauffage (°C)	25	75	125

Post-chauffage : pour les épaisseurs supérieures à 30 mm et si la technique de soudage entraîne un apport d'hydrogène élevé il est recommandé de procéder à un post-chauffage immédiatement après soudage à 200°C pendant au moins deux heures, selon épaisseur des pièces

Ces indications sont données à titre d'exemple et ne sauraient être étendues aux fournitures d'autres fournisseurs.

- **Limitation de la température de préchauffage, de la température entre passes et de l'énergie de soudage**

La température de préchauffage et l'énergie de soudage doivent être suffisamment élevées pour éviter le risque de fissuration à froid. Mais, à l'inverse, elles ne doivent pas être trop élevées sous peine de dégrader les propriétés du métal de base au voisinage de la soudure ainsi que celles de la zone fondue. Les limites à ne pas dépasser dépendent des fournitures d'acier et de métal d'apport mis en œuvre.

A titre indicatif, un aciériste recommande ainsi de travailler entre 10 et 21 kJ/cm: pour une épaisseur de 20 mm et entre 10 et 25 kJ/cm pour les épaisseurs supérieures à 25 mm, le tout pour des températures de préchauffage et entre passes de l'ordre de 100 à 150°. Il est également recommandé de ne pas dépasser 220°C pour la température de travail. Selon cette même source assurer un Tr800-500 inférieur à 15 secondes devrait permettre de préserver les propriétés de la plupart des produits d'apport.

3-1-3-5 Coupage thermique

Les aciers S690Q peuvent se couper à l'aide des procédés de coupage thermique usuels : oxycoupage, coupage plasma, coupage laser. Ces trois procédés engendrent une zone thermiquement affectée dont la dureté maxi avoisine les 450 HV10. Le coupage laser et le coupage plasma peuvent être mis en œuvre sans préchauffage. Pour ce qui est de l'oxycoupage il est recommandé de procéder à un préchauffage tel qu'indiqué ci-dessous :

Epaisseur (mm)	<20	<50	<100	>100
Tpréchauffage (°C)	25	50	100	150

Tableau 3.33

3-1-3-6 Chaudes de retrait

Les chaudes de retrait avec température maximale de 600°- 650°C n'entraînent pas de baisse des caractéristiques de traction et de résilience.

Pour les chaudes triangulaires où toute la section est portée à la température de chauffe et où les cycles thermiques sont lents il conviendra de ne pas dépasser ces températures.

Pour les chaudes en ligne où seule la peau de la tôle est chauffée et où les cycles thermiques sont rapides on pourra tolérer des températures maximales jusqu'à 800°C sans conséquences préjudiciables sur les caractéristiques de l'élément ayant subi la chauffe.

3-1-4 Cas du soudage hétérogène acier S460 sur acier S690

Dans le cas du soudage hétérogène acier S460 (M ou Q) sur acier S690Q le métal d'apport sera choisi pour avoir des caractéristiques mécaniques en rapport avec celles de l'acier S460. Par contre les conditions de soudage (énergie, préchauffage, températures entre passes mini et maxi, post chauffage éventuel) seront dictées par l'acier S690Q qui est le plus exigeant en terme de soudabilité

3-1-5 Les procédures de réparation en soudage

Les réparations des défauts de soudage sont des opérations particulièrement critiques. En effet la construction environnante impose un bridage maximum. De plus les cordons à déposer sont parfois relativement courts, si bien que le régime thermique stationnaire n'a pas le temps de s'établir, et sans précautions particulières le Tr800-500 risque d'être plus court que celui du joint initial. Dans le même ordre d'idée, les réparations sont souvent effectuées en soudage manuel à l'électrode enrobée, avec des énergies de soudage limitées, alors que le joint initial a pu être réalisé par un procédé automatisé, avec des énergies de soudage plus élevées. Il est donc important de mettre en œuvre lors des réparations des conditions de préchauffage, et le cas échéant de post chauffage, déterminées par des essais préalables mettant en jeu des niveaux de bridage importants et des énergies de soudage limitées. Bien entendu, on veillera à utiliser des produits d'apport à très bas taux d'hydrogène.

3-2 AMELIORATION DU COMPORTEMENT EN FATIGUE DES ASSEMBLAGES SOUDES

a) Intérêt d'une procédure d'amélioration du comportement en fatigue

Les courbes S-N de référence et les règles de calcul en fatigue données dans les textes de construction (Eurocode 3 Partie 1-9 [7], Recommandations de l'IIW [4]...) sont identiques pour les aciers à basse limite d'élasticité et les aciers à haute limite d'élasticité, pour ce qui concerne les assemblages soudés sans parachèvement. Ceci reflète une réalité mise en évidence par les essais de fatigue. Alors que la limite d'endurance augmente de façon sensiblement proportionnelle à la limite d'élasticité pour le métal de base, il n'en va pas de même pour les assemblages soudés qui, à configuration identique, présentent sensiblement la même limite d'endurance quelles que soient les caractéristiques du métal de base et du métal d'apport.

Ce comportement s'explique par la conjonction de trois facteurs :

- Il existe dans le cordon de soudure et son voisinage un important champ de contraintes résiduelles ;
- Le pied du cordon de soudure est une zone où existe une forte concentration de contrainte. Celle-ci dépend en particulier de l'angle de raccordement du cordon et de la présence ou non d'un rayon de raccordement plus ou moins important ;
- Même dans un assemblage de bonne qualité, il existe généralement en pied de cordon des micro-défauts locaux : morsures d'arc, caniveaux, collages... Bien que de petite taille, ces micro-défauts - de part leur forme aiguë - sont susceptibles de jouer le rôle d'amorce de fissure de fatigue.

Il en résulte que la phase d'amorçage des fissures de fatigue est plus courte pour les assemblages soudés :

- alors que sur une éprouvette lisse de métal de base la phase d'amorçage représente environ 90 % de la durée de vie en fatigue,
- pour un assemblage soudé cette phase d'amorçage ne représente plus que 10 % à 30 %.

Or c'est essentiellement sur la durée de la phase d'amorçage que jouent les caractéristiques mécaniques du matériau ; dans la phase de propagation de fissure qui suit la phase d'amorçage, la vitesse de propagation est sensiblement la même pour tous les aciers de construction. Une fissure de fatigue commence alors sa propagation à partir de sa taille initiale jusqu'à une taille dite critique.

Enfin, la durée de vie à la fatigue est aussi influencée, dans une moindre mesure (1 à 5%), par la ténacité du matériau. Plus le matériau est tenace, plus la taille des fissures

critiques (fissures pouvant provoquer la rupture brutale) est importante, ce qui signifie une phase de propagation prolongée (donc, une durée de vie plus longue), intervalles d'inspection plus espacés et fissures plus faciles à détecter.

Pour revenir aux cordons de soudure, les exigences pour le soudage des aciers à haute limite d'élasticité sont d'un niveau plus élevé par rapport au soudage des aciers à basse limite d'élasticité, ce qui devrait aider à obtenir des structures métalliques avec une meilleure résistance à la fatigue. Pour les aciers à grains fins - très sensibles aux paramètres de soudage -, il est très important de suivre les règles données dans la norme EN 1011-2 vis-à-vis des températures avant et après soudage pour éviter le développement de zones martensitiques à gros grains. Il est aussi extrêmement important d'être prudent lors des réparations par soudage des cordons de soudure.

Pour les détails situés dans les sections les plus sollicitées vis-à-vis de la fatigue, les solutions pour améliorer le comportement à la fatigue des structures peuvent être [8] :

- Utilisation de types de détails constructifs avec un meilleur comportement à la fatigue ;
- Déplacement des détails constructifs critiques dans les sections moins sollicitées ;
- Application de procédés de soudage plus performants ;
- Meilleure qualité de l'exécution des soudures ;
- Parachèvement des cordons de soudure (possible uniquement en pieds de cordons).

Un parachèvement du pied de cordon permet d'allonger la phase d'amorçage, et donc d'obtenir au final une durée de vie des assemblages soudés en aciers à haute limite d'élasticité supérieure à celle des mêmes assemblages en acier dont la limite d'élasticité est basse. Notons ici que l'endroit de fissuration dans un assemblage peut être déplacé, c'est-à-dire que l'amélioration du pied de cordon peut rendre un autre endroit (en particulier la racine) critique vis à vis de la fatigue et donc limiter le gain potentiel.

Le parachèvement peut donc être une technique indiquée voire nécessaire pour les assemblages soudés en aciers HLE pour que les vérifications en fatigue n'annihilent (par changement des épaisseurs) pas le gain procuré en vérifications ELS-ELU.

b) Soin vis-à-vis des détails constructifs

Comme pour les structures en acier à basse limite d'élasticité, pour obtenir une meilleure tenue de la structure en acier HLE à la fatigue, il est conseillé de respecter les précautions suivantes [8] :

- Limiter les discontinuités dans les zones fortement sollicitées ;
- Mettre les cordons de soudure et les détails constructifs dans les zones de plus faible étendue de contrainte ou aux endroits où la contrainte moyenne est de compression ;
- Concevoir des structures en limitant la flexion secondaire ;
- Eviter la combinaison de multiples concentrateurs de contrainte dans une même zone ;
- Ne pas utiliser les cordons d'angle ni les cordons à pénétration partielle dans les assemblages transmettant des efforts perpendiculairement au cordon ;
- Eviter d'utiliser les raidisseurs longitudinaux, excepté aux appuis, si l'accroissement du poids propre du panneau sans raidisseurs ne se dément pas économiquement par rapport au panneau raidi ;
- Remplacer éventuellement un assemblage soudé par un assemblage boulonné précontraint.

c) Parachèvement des pieds de cordons de soudure

Au-delà de la conception judicieuse de l'ensemble de la structure il est possible d'améliorer la résistance à la fatigue des cordons de soudure par l'application de techniques de parachèvement, qui se limitent à l'amélioration de la résistance à la fatigue en pied de cordon exclusivement.

3-2-1 Les principes des techniques d'amélioration de la tenue en fatigue

Deux approches sont possibles :

- Réduire la concentration de contrainte en pied de cordon, en améliorant la forme macro géométrique du pied de cordon et en éliminant les micros défauts au niveau du pied de cordon. Les techniques sont : a) le meulage ou fraisage, b) la refusion TIG (Tungsten Inert Gas);
- Créer au niveau du pied de cordon un champ de contraintes résiduelles de compression. Les techniques sont : c) le grenailage de précontrainte, d) le martelage selon diverses techniques.

NB : pour les modes opératoires voir [9] pour ce qui est de la documentation technique française.

Toutes les techniques d'amélioration ont en commun le problème potentiel du développement de la fissure à un autre endroit qui n'a pas pu être mécaniquement traité.

Il faut rappeler que l'endroit traité, à savoir le pied du cordon, n'est pas le seul site d'amorçage de la fissuration : celle-ci peut apparaître par exemple en racine du cordon, au droit d'un manque de pénétration, de défauts internes, etc. Il apparaît donc une limitation de l'efficacité des traitements, limitation qui doit absolument être contournée par une bonne réalisation du joint soudé. On ne saurait trop souligner que les techniques de parachèvement ne sont pas destinées à compenser des erreurs de conception ou de réalisation.

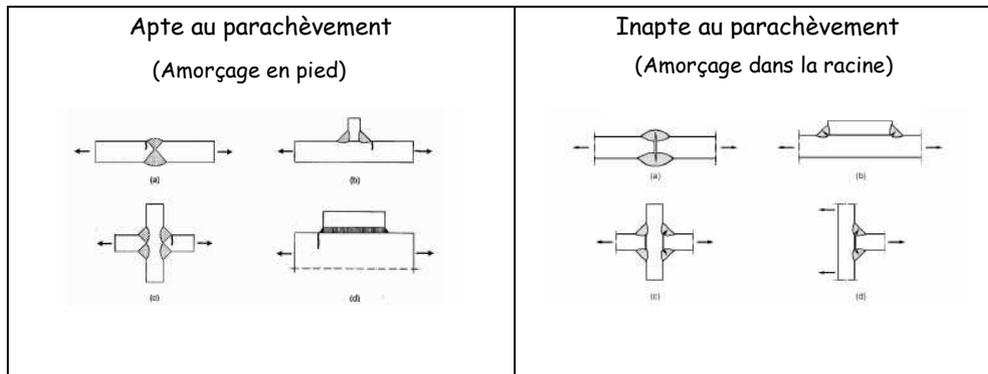


Figure 3.34 - Aptitude au parachèvement des assemblages [3], [4]

Du fait de l'incertitude sur la localisation de l'amorçage de la fissure, on exclut tout effet bénéfique résultant d'un traitement sur les détails suivants :

- toutes les soudures longitudinales continues (parallèles à la direction des efforts)
- les soudures transversales bout-à-bout exécutées d'un seul côté ainsi que celles sur latte de soudage
- les connecteurs
- les plats de recouvrement et les semelles additionnelles
- les joints cruciformes à pénétration partielle et, de manière générale, tous les cordons d'angle à pénétration partielle transmettant des efforts perpendiculairement aux cordons
- les joints soudés à recouvrement à clin.

Pour résumer, le tableau donné ci-après synthétise les détails constructifs de l'Eurocode [7] aptes au parachèvement.

De plus, les détails pour lesquels les normes exigent déjà un meulage (par exemple les soudures transversales en bout meulées) ne peuvent plus prétendre aux effets bénéfiques d'un autre traitement du type « réduction de la concentration de contrainte en pied de cordon (meulage-fraisage, refusion TIG) ».

Détails de l'EN 1993-1-9 [7] qui se prêtent au parachèvement	
Tableau	N° de détail
8.1	—
8.2	—
8.3	⑤, ⑥, ⑦,...
8.4	⑥, ⑦, ⑧,...
8.5	①, ②,...
8.6	①,...
8.7	?
8.8	?
8.9	—
8.10	?

Tableau 3.35

En conclusion, quand les techniques de parachèvement sont considérées, la possibilité d'amorçage de fissuration à un autre endroit que le pied de cordon doit être évitée.

Les effets bénéfiques de tous les traitements d'amélioration sont conditionnés par le mode opératoire de mise en œuvre de la technique de parachèvement ainsi que par les charges de fatigue appliquées au détail soudé. Ils sont les plus efficaces pour les détails comportant de fortes concentrations de contraintes locales et dans la zone des faibles contraintes / grand nombre de cycles ($> 2 \times 10^6$ cycles). Ces traitements conviennent bien aux ouvrages d'art car l'essentiel du dommage correspond à la zone au-delà de 2 millions de cycles.

Pour les catégories de détails constructifs concernées, la pondération par le facteur d'effet d'épaisseur est à prendre en compte. Ce facteur est moins contraignant pour les assemblages parachevés [3], [4] :

$$f(t) = (25 / t_{eff})^{0.2}$$

$t_{eff} = L/2$ pour $L/t < 2$ et $t_{eff} = t$ sinon, où L est définie sur la figure ci-dessous.

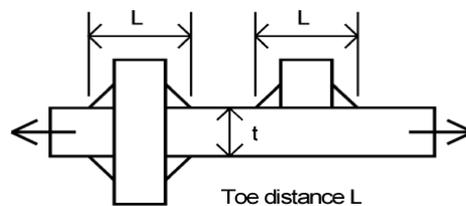


Fig 3.36

3-2-2 Réduction de la concentration de contrainte en pied de cordon

3-2-2-1 Meulage ou fraisage du pied de cordon

Le but de cette opération est d'éliminer par enlèvement de matière tous les micro défauts présents en pied de cordon (caniveaux, morsures d'arc,...) et de créer un profil de raccordement arrondi présentant un rayon important, de manière à réduire le facteur d'intensité de contrainte à cet endroit. Le meulage doit être suffisant pour éliminer complètement toutes les traces des défauts présents en pied de cordon. Il est important de veiller à obtenir après meulage une surface qui présente des stries de meulage les moins apparentes possibles (elles sont autant de sites d'amorçage de fissures possibles). Ces stries doivent être parallèles à la direction de l'effort auquel est soumis l'assemblage soudé. On veille également à éviter tout meulage en dehors de la zone à traiter.

3-2-2-2 Refusion TIG (Tungsten Inert Gas) du pied de cordon

Comme le meulage, cette opération permet à la fois d'éliminer les défauts superficiels de raccordement et d'obtenir une forme de raccordement arrondi. Les paramètres opératoires doivent être choisis de façon à obtenir le profil souhaité, et de permettre une bonne maîtrise de l'opération par le soudeur. En particulier on veille à éviter la création de tout caniveau ou morsures d'arc. Par ailleurs on vérifie que la refusion TIG ne conduit pas à l'apparition d'une ZAT présentant des niveaux de dureté trop élevés, susceptibles de jouer le rôle « d'entaille métallurgique ». Il est nécessaire que la procédure et l'opérateur soient qualifiés.

3-2-2-3 Les effets bénéfiques de la réduction des concentrations de contraintes

D'après les recherches dont les résultats sont collectés, analysés et publiés par l'IIW, [3], [4], les effets bénéfiques des techniques exposées ci-dessus peuvent être considérés uniquement pour les assemblages de catégorie de détail 90 ou inférieure. Ceci s'explique par le fait que les catégories supérieures englobent les détails non soudés, les détails dont les durées de vie à la fatigue ne sont pas le résultat de la ruine du pied de cordon ou les soudures dont le comportement a déjà été amélioré.

Pour les catégories de détail 90 ou inférieures, les effets bénéfiques des techniques qui ont pour but la réduction de la concentration de contrainte en pied de cordon de soudure se traduisent par une multiplication de l'étendue de contrainte admissible par le facteur de 1,3, ce qui correspond à une augmentation de la durée de vie de 120 %. Mais,

la catégorie de détail maximale obtenue ainsi est celle immédiatement inférieure à la valeur résultant de la multiplication par le facteur 1,3.

D'après l'IIW [3], dans la région proche de la fatigue oligocyclique, toutes les courbes S-N sont bornées par la courbe correspondant à la résistance du matériau de base, même si certains travaux [11] montrent que même sous faible nombre de cycles, il y a quelque chose à gagner, par exemple avec le meulage ou le TIG, grâce à la diminution du facteur de concentration de contrainte.

D'autres documents peuvent donner d'autres valeurs de l'amélioration. Le DNV [1], par exemple, donne pour ce groupe de méthodes une augmentation de la durée de vie de 3,5 fois, ce qui est cohérent avec les consignes de l'ancienne version des recommandations de l'IIW [3], mais ce qui est trop favorable par rapport à la version la plus récente dans laquelle les augmentations de la durée de vie ont été revues à la baisse.

3-2-3 Création au niveau du pied de cordon d'un champ de contraintes résiduelles de compression

3-2-3-1 Grenailage de précontrainte

Le but de l'opération est d'introduire au niveau du pied de cordon des contraintes superficielles élevées de compression. Il est nécessaire de fixer et de valider les paramètres d'exécution de l'opération (taille et nature de la grenaille, intensité Almen,...). D'après [12], c'est la seule méthode qui vise purement la création d'un champ de contraintes résiduelles de compression, car les autres - données ci-après - modifient aussi la géométrie du pied de cordon et peuvent réduire ainsi aussi la concentration de contrainte.

3.2.3.2 Martelage du pied de cordon

Comme pour le grenailage de précontrainte l'objectif est d'introduire de fortes contraintes de compression au niveau du raccordement. Plusieurs types d'outils sont envisageables pour mener à bien cette opération : martelage avec un outil mono pointe pneumatique (bouterolle), martelage à l'outil multipointe pneumatique (aiguilles), martelage à l'outil multipointe actionné par ultrasons (UIT = « Ultrasonic Impact Treatment »). Dans tous les cas il faut en premier lieu vérifier que la géométrie de l'extrémité de l'outillage utilisé permet bien d'atteindre le point de raccordement entre le cordon et la tôle, compte tenu de la géométrie initiale effective du raccordement. Comme pour le grenailage il est nécessaire d'identifier, fixer et valider les différents paramètres d'exécution.

Il est important de préciser qu'il serait souhaitable - pour obtenir les meilleurs résultats possibles - de charger le détail constructif lors de son traitement par martelage de telle façon que la zone à marteler soit tendue. Inversement, si cette zone est comprimée, l'efficacité du traitement sera ainsi réduite.

3-2-3-3 Les effets bénéfiques de la création d'un champ de contraintes résiduelles de compression

Comme pour le cas précédent, les résultats de recherches sont publiés par l'IIW. Les effets bénéfiques des techniques exposées ci-dessus peuvent être considérés uniquement pour les assemblages qui entrent jusqu'à la catégorie de détail 90 [3].

Pour les catégories de détail 90 ou inférieur, les résultats obtenus sur les éprouvettes de laboratoire montrent que les effets bénéfiques des techniques qui ont pour le but la création au niveau du pied de cordon d'un champ de contraintes résiduelles de compression se traduisent par une multiplication de l'étendue de contrainte admissible par le facteur de 1,5, ce qui correspond à une augmentation de la durée de vie de 240 %. Mais, la catégorie de détail maximale obtenue ainsi est celle immédiatement inférieure à la valeur résultant de la multiplication par le facteur 1,5.

NB : Pour les aciers avec une limite d'élasticité inférieure à 355 MPa, le facteur de multiplication n'est pas 1,5, mais 1,3.

Les essais de fatigue sur les éléments de structures réels montrent des effets bénéfiques inférieurs par rapport à ceux obtenus avec les essais sur éprouvettes de laboratoire. Il est donc recommandé, pour les épaisseurs de tôles supérieures à 20 mm, d'adopter les courbes d'amélioration obtenues pour les techniques qui visent la réduction de la concentration de contrainte en pied de cordon (technique de meulage-fraisage ou technique TIG), limitant aussi la catégorie de détail maximale obtenue à 100.

Il y a lieu d'ajouter ici que le martelage à l'outil multipointe actionné par ultrasons - étant donné qu'il s'agit d'une méthode relativement nouvelle, avec les applications dans le domaine des ouvrages d'art toutes récentes - paraît être une méthode encore plus prometteuse par rapport aux méthodes classiques [5], [6], [10]. Actuellement, on ne dispose pas de recommandations vis-à-vis de l'amélioration du comportement à la fatigue en appliquant cette méthode, mais en attendant un nombre de résultats suffisamment grand pour une analyse statistique fiable, on pourrait se contenter des taux d'améliorations donnés ci-dessus pour les méthodes classiques.

D'autres documents peuvent donner d'autres valeurs de l'amélioration. Le document [1], par exemple, donne pour le martelage une augmentation de la durée de vie de 4,0 fois.

Comme les assemblages traités pour y introduire un champ de contraintes résiduelles de compression sont sensibles à la contrainte moyenne résultant des actions sur les structures, les effets bénéfiques explicités ci-dessus ne peuvent être utilisés que dans les circonstances suivantes [3] (fig. 4, contrainte positive = traction) :

- Contrainte de compression nominale maximale ne dépasse pas $0,25 f_y$;
- Quand le rapport des contraintes $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} < 0$, la courbe améliorée est utilisée avec l'étendue de contrainte complète, $\Delta\sigma_{\text{eff}} = \Delta\sigma$;
- Quand ce rapport $0 < R < 0,4$, la courbe améliorée est utilisée avec la contrainte maximale au lieu de l'étendue de contrainte de calcul, $\Delta\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\max}$.
- Quand $R \geq 0,4$, aucun effet bénéfique ne peut être obtenu avec ces méthodes.

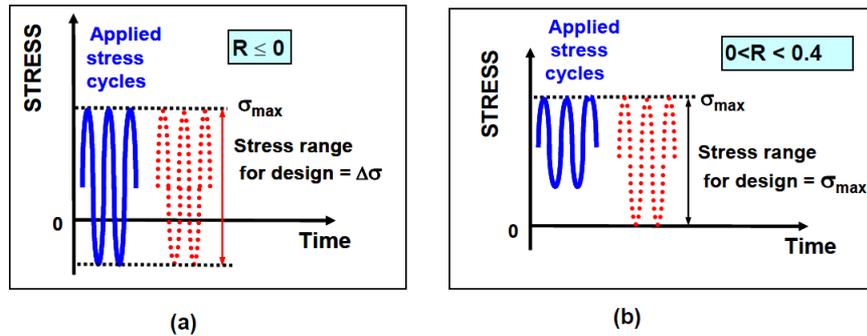


Figure 3.37 - Création d'un champ de contraintes résiduelles de compression [3]
(contrainte positive = traction)

3-2-4 Les gains effectifs possibles - la position des textes

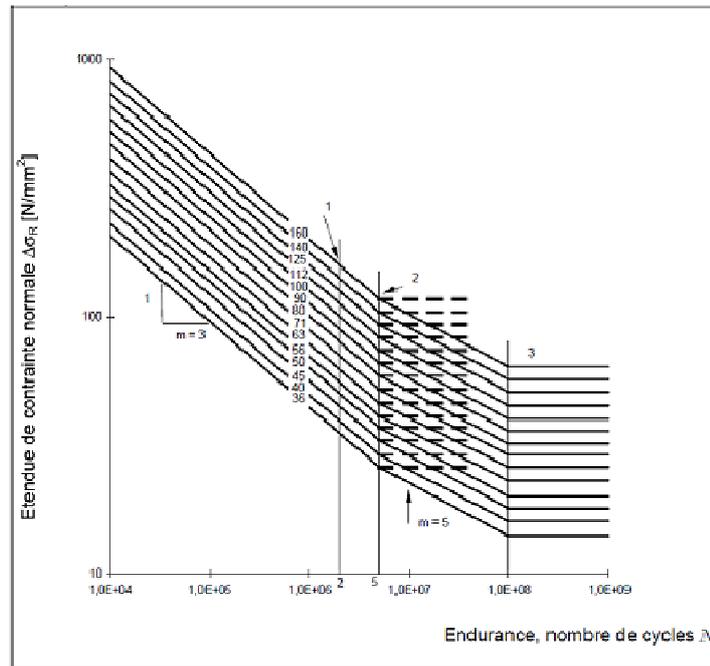
Les résultats d'essais publiés dans la littérature montrent que :

- Les procédés de parachèvement conduisent à une amélioration de la résistance à la fatigue.
- L'effet des traitements de parachèvement est maximum dans le domaine des grands nombres de cycles et pour les rapports R faibles.
- Les aciers à haute limite d'élasticité se prêtent particulièrement bien aux traitements de parachèvement.

L'Eurocode 3 Partie 1-9 [7] ne prend pas en compte l'effet des traitements de parachèvement faute d'un nombre de résultats d'essais insuffisant à la date de sa rédaction. A l'inverse, les recommandations de l'IIW [4] - document le plus récent dans

le domaine - permettent de surclasser les assemblages ayant fait l'objet d'un traitement de parachèvement.

La refusion TIG et le meulage du pied de cordon permettent de multiplier par 1,3 le niveau de contrainte admissible, pour les détails constructifs de classe 90 ou inférieure. Le martelage du pied de cordon, avec bouterolle ou aiguilles, permet de multiplier par 1,5 le niveau de contrainte admissible les détails constructifs initialement classés en classe 90 ou inférieure. Par contre, ce dernier n'est pas valable pour les tôles plus épaisses de 20 mm, pour lesquelles il faut continuer avec l'application du facteur multiplicatif de 1,3.



Légende

- 1 Catégorie de détail $\Delta\sigma_C$
- 2 Limite de fatigue à amplitude constante $\Delta\sigma_D$
- 3 Limite de troncature $\Delta\sigma_L$

Figure 3.38 - Courbes S-N de référence [7]

En conclusion, nous recommandons pour ce guide les améliorations ci-dessous.

Effets bénéfiques du parachèvement (quelle que soit la méthode appliquée)	
Catégorie de détail de l'EC3, non-traité, $\Delta\sigma_C$	Catégorie de détail parachévé, $\Delta\sigma'_C$
90	100

80	100
71	90
63	80
56	71
50	63
45	56
40	50
36	45

Tableau 3.39

Note : on gagne plus sur les détails dont la catégorie de détail est basse, et au-dessus de sa valeur de 100 MPa il devient inutile de parachever.

3-2-5 Parachèvement des cordons de soudure vis-à-vis des contraintes géométriques

Bien que peu d'essais aient été effectués pour traiter la question des contraintes géométriques (voir l'annexe B de la NF EN 1993-1-9 [7] pour les détails constructifs non traités), les références [3] et [4] donnent quelques indications pour la possible quantification des effets de parachèvement pour les cordons d'angle en utilisant deux types de méthodes explicités plus haut :

Limite d'élasticité	Réduction de la concentration de contrainte		Création d'un champ de contraintes résiduelles de compression	
	Transmettant des efforts	Ne transmettant pas d'effort	Transmettant des efforts	Ne transmettant pas d'effort
< 355	112	125	112	125
> 355	112	125	125	140

Tableau 3.40

3-2-6 Influence de la résilience des aciers HLE sur la fatigue

Malgré le fait que l'augmentation de la limite d'élasticité de l'acier n'ait aucune influence sur la résistance à la fatigue des assemblages soudés (fait connu depuis les années 60 [2]), la tolérance à la fissuration des aciers à haute limite d'élasticité - grâce à leur ténacité améliorée (finesse du grain) par rapport aux aciers standards - est beaucoup plus grande.

Cet effet apporte plusieurs avantages pour les ponts en aciers HLE :

- La taille des fissures critiques plus grande élargit l'intervalle de temps disponible pour découvrir les fissures et pour réagir ;
- La ruine par plastification des sections restantes permet aux ingénieurs d'évaluer la nocivité des fissures si elles sont découvertes ;
- Les deux avantages précédents peuvent aussi servir comme base pour lever certaines interrogations sur les structures dites non redondantes.

Note : la résistance à la fatigue en amorçage des aciers HLE est meilleure, donc le parachèvement apporte encore plus.

Références

- [1] DNV-RP-C203 : Fatigue design of offshore steel structures - Recommended practice, Det Norske Veritas, août 2005.
- [2] Fisher J.W. et Wright W.J. : High Toughness of HPS: Can it help you in fatigue design, Conférence "Steel Bridge Design and Construction for the New Millennium with emphasis on High Performance Steel", 2000.
- [3] Haagensen P.J. et Maddox S.J. : Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures, IIW document XIII-2200r3-07, version de juillet 2009.
- [4] Hobbacher A. et al. : Recommendations for fatigue design of welded assemblages and components, IIW document IIW-1823-07 / XIII-2151r4-07 / XV-1254r4-07, version de décembre 2008.
- [5] Kudryavtsev Y. et al. : Fatigue Life Improvement of Welded Elements by Ultrasonic Peening, IIW document XIII-2010-04.
- [6] Kuhlmann U., Dürr A. et Schröter F. : Hochfeste Feinkornbaustähle im Stahlbau: Anwendung im Stahlbau insbesondere unter der Berücksichtigung des Ermüdungsfestigkeit geschweißter Konstruktionen, DVS 236.
- [7] NF EN 1993-1-9 : Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 1-9 : Fatigue, AFNOR, 2005.
- [8] Nussbaumer A. et Sedlacek G. : Improving the Fatigue Resistance, in "Use and Application of High-Performance Steels for Steel Structures", Structural Engineering Documents N°8, IABSE, 2005.
- [9] SETRA-CTICM-SNCF : Ponts métalliques et mixtes - Résistance à la fatigue - Guide de conception et de justifications, Sétra, 1996.
- [10] Statnikov E. : Physics and Mechanism of Ultrasonic Impact Treatment, IIW document XIII-2004-04.
- [11] Tateishi K., Hanji T. Et Hanibuchi S. : Improvement of Extremely Low Cycle Fatigue Strength of Welded Joints by Toe Finishing, IIW document XIII-2232-08, 2008.

- [12] Ummenhofer T., Weich I. et Nitschke-Pagel T. : Extension of life time of welded dynamic loaded structures; IIW document XIII-2085-05.

4. CONCEPTION

4-1 INTRODUCTION

La conception des ouvrages d'art avec des aciers haute limite d'élasticité (HLE) de nuances S460 et S690, n'est pas fondamentalement différente de celle réalisée avec les aciers de la nuance S355 habituellement utilisée.

Les méthodes de dimensionnement sont identiques ainsi que les justifications à mener. Si des ouvrages de type piétonnier peuvent être réalisés avec des aciers S460 en totalité voire avec du S690, il n'en est pas de même des ouvrages routiers pour lesquels, les dispositions retenues jusqu'à maintenant par les concepteurs pour assurer la justification à la fatigue ont consisté à marier en fait 2 nuances d'acier, le S355 et le S460.

De nombreux ouvrages modernes présentent cette particularité.

On peut classer les particularités de conception en distinguant :

- la conception d'ensemble de l'ouvrage
- la conception de détail

Dans la conception d'ensemble des tabliers, il s'agit de distribuer les différentes nuances d'acier longitudinalement et parfois transversalement.

La conception de détail concerne des pièces locales du tablier fortement sollicitées par exemple en zone d'appui, et les éléments de pile ou de pylône.

L'utilisation des aciers de nuances élevées peut aussi être intéressante pour les éléments de pile ou de pylône des ponts suspendus ou haubanés.

Les conditions d'utilisation dépendent de la nature de structure de l'ouvrage : tablier de grandes portées, petites portées ; ossature en poutres à âme pleines, treillis ou tubes.

L'utilisation des aciers HLE conduit dans tous les cas à une diminution de poids propre. L'intérêt réside dans les moyens de manutention dans l'usine, le transport et le montage sur le site, ainsi que sur la descente de charges et en corollaire les gains réalisables sur les appuis et fondations.

Comme le rappelle la référence [1], ces aciers HLE ont l'intérêt de réduire les sections de métal à mettre en œuvre, d'où un gain de poids ; cette réduction des épaisseurs entraîne également une économie sur les assemblages soudés.

Ces considérations présagent plutôt positivement pour l'emploi des aciers à HLE dans la conception des ouvrages d'art en n'oubliant pas cependant les limites suivantes :

- **Conserver** une rigidité minimale sous peine d'ouvrages ayant des flèches sous charges d'exploitation trop importantes
- **Assurer** la stabilité de forme, sinon les pièces comprimées en aciers HLE ne présenteront pas de gain significatif de capacité. (Cf [1])
- **Vérifier** la résistance à la fatigue.

L'utilisation d'épaisseurs plus faibles conduit aussi à une réduction des cordons de soudure. Les chanfreins pour les rabotages des tronçons étant moins épais, il y a un gain conséquent pour les opérations de soudage et de contrôle des soudures.

4-2 PONTS DE GRANDES PORTEES

Les portées des ouvrages d'art de types bi-poutre ou caisson mixte construits ces dernières années en France a dépassé souvent 100 m. (125 m pour le bi-poutre de Triel sur Seine ; 144 m pour le caisson mixte du Viaduc de Verrières)

De plus à ces particularités de franchissement s'ajoutent celles provenant de la section transversale dont la largeur dépasse souvent 20m, par exemple, pour des ouvrages à double chaussée autoroutière.



Photo 4.1 : Viaduc de Verrières (Photo Construiracier - JM. Vigo)



Photo 4.2 : Pont de Jassans Riottier -Travée de 130m, nuance d'acier S460 sur appui et S355 en travée (Photo Construiracier - JM. Vigo)

La mise en place de l'ossature métallique par lançage reste toujours la méthode la plus économique.

La conception de ces ouvrages conduit à des poutres de grande hauteur avec un poids propre élevé à manutentionner en usine et sur site. L'utilisation des aciers de nuance S460 et plus permettant une diminution du poids propre présente donc un intérêt certain.

4-2-1 Répartition de la matière longitudinale - Semelles

4-2-1-1 Cas des semelles

Dans de tels ouvrages, l'utilisation en semelle inférieure des aciers S460 (ou plus) s'avère intéressante pour les tronçons en zone de moment négatif, car elle permet de limiter l'épaisseur des semelles qui atteignaient 150 mm en S355. Avec une inertie plus faible au droit des piles intermédiaires, le moment négatif diminue, alors que le moment positif en travée augmente. Ceci va dans le sens d'une meilleure utilisation des capacités de résistance des sections mixtes acier-béton en travée et des sections métal seul en zone de moment négatif.

Afin de ne pas se pénaliser par des épaisseurs minimales rapportées à la largeur trop grande (largeur efficace déterminée par le traînage de cisaillement), il convient de ne pas avoir de grandes largeurs de semelles.

Une attention doit être portée aux phases provisoires compte tenu de la diminution relative d'inertie des sections en HLE.

4-2-1-2 Sollicitations sous convoi de fatigue

Disposées sur les zones d'appuis, sur des tronçons dont la longueur atteint 20m à 30m, ces parties en aciers à hautes performances permettent par la diminution de matière de réduire la rigidité de ces zones et de renvoyer les efforts vers le milieu de travée où en général les étendues des variations de contraintes sont plus faibles. Même si l'acier sur appui n'est pas utilisé jusqu'à sa pleine limite de capacité cette disposition permet en général de limiter les variations de contrainte sous convoi de fatigue.

L'utilisation des aciers HLE en travée est limitée par les épaisseurs minimales imposées par les vérifications à la fatigue, en particulier en travée de rive. Cependant une analyse plus fine des détails de fatigue montre l'intérêt de limiter les variations brusques des épaisseurs des semelles ce qui peut être obtenu en changeant de nuance d'acier.

Par ailleurs, dans le domaine des grandes portées le dimensionnement découle essentiellement des efforts sous charges permanentes. Comme le rapport charges permanentes / charges d'exploitation est élevé en général, la variation des contraintes sous convoi de fatigue reste faible, en particulier, si les sections sur piles ont été assouplies. L'influence des vérifications sous charges de fatigue est donc réduite.

4-2-1-3 Cas des caissons

Pour des caissons ouverts ou fermés, la largeur de la tôle de fond étant imposée, l'utilisation d'épaisseurs faibles conduit à un raidissage plus conséquent. Ici aussi, il serait plus avantageux de recourir à des épaisseurs surabondantes vis à vis des contraintes mais nécessitant un raidissage moindre.

4-2-2 Répartition de la matière longitudinale : âmes

Les aciers de nuances HLE, sont privilégiés pour réduire les épaisseurs de semelle. Il est cependant possible de conserver des nuances S355 pour les âmes. Les différentes épaisseurs de tôles en aciers HLE sont ainsi en nombre réduit, ce qui simplifie les approvisionnements.

La stabilité au voilement limite l'utilisation économique des épaisseurs faibles permises par les aciers HLE ; un surcroît de raidissage paraît même nécessaire. Cet aspect reste cependant à analyser avec l'application des méthodes de vérification des sections suivant les nouvelles règles des Eurocodes.

La tendance actuelle est d'avoir donc âmes plus épaisses, avec au plus deux files de raidisseurs longitudinaux. Ceci milite en faveur des poutres hybrides avec une âme plus épaisse de nuance inférieure aux semelles.

Cependant, plutôt que de rechercher la réduction du poids de tablier par des tôles plus minces, on recherchera un format de poutre qui évite le raboutage longitudinal des tôles d'âmes. Ceci apporterait automatiquement une meilleure stabilité au voilement.

4-2-3 Contraintes locales au lancement - Patch Loading

Le lancement des tabliers de grandes portées produit des réactions importantes sur les appareils de lancement. Les sections des poutres en ces points sont soumises à une force transversale concentrée combinée avec une flexion et un effort axial. (Formule 7.2 EN 1993 1-5) La force transversale sollicite l'âme directement. Dans ce cas une nuance élevée peut s'avérer intéressante vis-à-vis de la résistance locale.

4-2-4 Condition de déformabilité

Du fait des diminutions d'inertie des sections utilisant des HLE, les flèches ou contre-flèches de fabrication augmentent. Il faut donc porter attention à ce point ainsi qu'aux tolérances entre éléments. Les flèches en service augmentent aussi et sont à surveiller, bien qu'il n'y ait pas de critère dimensionnant imposé sur ce point pour les ponts routes.

4-3 PONTS TREILLIS

D'une façon générale, pour les ponts treillis les dispositions à retenir sont voisines de celles préconisées pour les ouvrages de type bipoutres. Les dispositions d'épanouissement des contraintes dans les goussets, entre les membrures et les

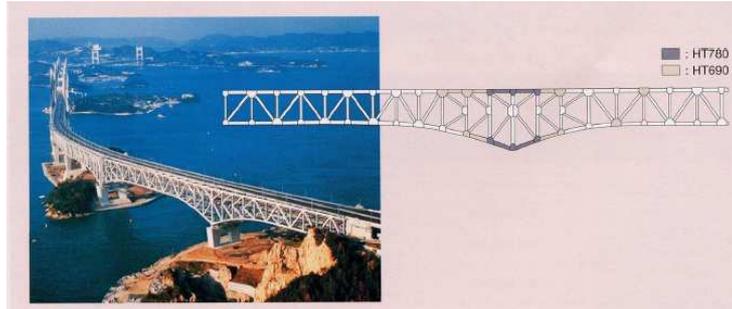
diagonales prennent une grande importance. Certains concepteurs privilégient les âmes au détriment des semelles. Cette disposition limite les joints de chantier visibles et donne une forte apparence d'homogénéité structurelle.

Des ouvrages réalisés avec des aciers THLE [5] montrent la possibilité de réaliser des structures fines et modernes. Avec les structures treillis il est possible d'atteindre des portées importantes.

Pour les ponts routiers et ferroviaires, les éléments porteurs en treillis présentent le meilleur rapport poids/portée. En particulier si la configuration du tablier n'impose pas de contraintes de hauteur.

Le moment fléchissant longitudinal se traduisant par l'effort normal dans les membrures, les zones les plus sollicitées sont près des appuis et à mi-travée. La

variation
hauteur
de
ces



de
permet
ramener
zones

uniquement près des appuis (Fig. 4.1).

Fig. 4.1 : Utilisation d'aciers THLE dans les membrures des poutres treillis en zone d'appui : Pont à Kobe au Japon

Les aciers THLE permettent de reprendre ces efforts normaux élevés moyennant des dispositifs anti-flambement transversaux. Ceux-ci sont constitués soit par le contreventement transversal ou par les pièces de ponts supportant la dalle de circulation.

Pour ce qui concerne les diagonales, la tenue au flambement des éléments comprimés limite l'utilisation des aciers THLE.

Sur les éléments de détail, ce sont les goussets d'attache qui peuvent s'avérer intéressants pour l'utilisation d'acier THLE.

4-4 PONTS DE PETITES PORTEES

Dans le domaine des petites portées, les structures des tabliers mixtes sont principalement à base de poutrelles laminées : soit des poutrelles enrobées, soit des poutres connectées à une dalle béton.

La valeur des flèches n'étant pas un critère déterminant, on peut envisager des gains d'épaisseur avec des poutrelles S460. Ce critère peut être déterminant pour le choix des solutions aciers face aux tabliers entièrement béton dans des configurations de franchissement ou le gabarit est limité.

Les ouvrages dans cette gamme de portées doivent être conçus avec l'idée de parachèvement en vue d'une livraison directe aux chantiers pour être mis en œuvre par l'entreprise générale avec du personnel non qualifié en travaux de charpente. La conception de l'ouvrage doit se faire de façon globale en intégrant les parties béton des appuis et surtout la dalle béton du tablier.

Des études et des réalisations ont été effectuées au Luxembourg pour concevoir des ouvrages courants mixtes associant des poutres S460 Histar [6], [7] et [15]. Ces poutres sont connectées sur appui aux entretoises en béton par l'intermédiaire de goujons (Fig. 4.2).

Cette disposition s'apparente à celle développée dans le projet Mikti Thème n°1 pour lequel outre l'utilisation de bétons spéciaux, l'emploi d'aciers THLE y est étudié avec une disposition d'entretoisement spécifique :

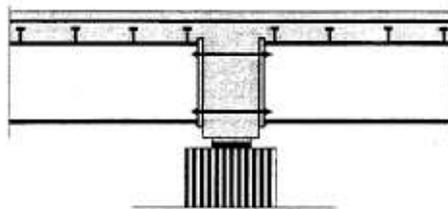


Fig. 2 exemple de poutres connectées à des chevêtres béton

Fig 4.2 (extrait de [8])

Des passages supérieurs routiers ont été conçus suivant un concept répétitif intégrant tous les aspects relatifs au métal et au béton. (PS de l'A16) [1].

Des conceptions plus innovantes poussent la mixité acier-béton encore plus loin : caissons constitués de deux poutrelles laminées et remplis de béton (PS13 [13], caisson à deux poutrelles accolées sans semelle supérieure et les âmes découpées de façon ondulatoire pour la connexion avec la dalle béton (Pont de Pöcking [x])

Pour des passages supérieurs au-dessus des lignes ferroviaires, on a le choix entre les solutions multi-poutres mixtes ou poutrelles enrobées. Pour ces ouvrages les critères de rigidité (flèches et vibration) sont respectés, de façon plus économique pour les grandes portées avec des nuances plus élevées. (Fig. 4.3)

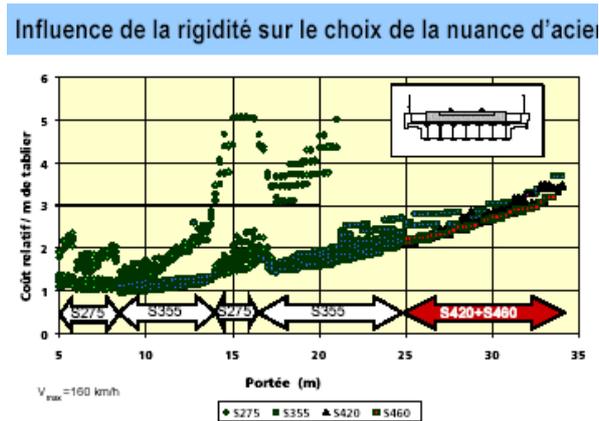


Fig 4.3 : Coût relatif par m² de tablier TGV en fonction des nuances d'acier
4-5 PONTS EN OSSATURES TUBULAIRES

En France de nombreux ponts à ossatures tubulaires ont vu le jour, tant pour les structures légères comme les passerelles piétonnes que pour les structures routières, comme par exemple le pont en arc d'Antrenas sur l'A75 (Photo 4.3). Des techniques de formage des tubes permettent de constituer des arcs à courbure continue ce qui en améliore l'esthétique.

L'emploi des HLE y est encore peu développé, par ce que la conception de ces structures se heurte à des difficultés de fonctionnement des nœuds vis-à-vis surtout de la fatigue. Des études sont en cours et on pourra se reporter utilement à l'article concernant ce type de structure en référence [9].

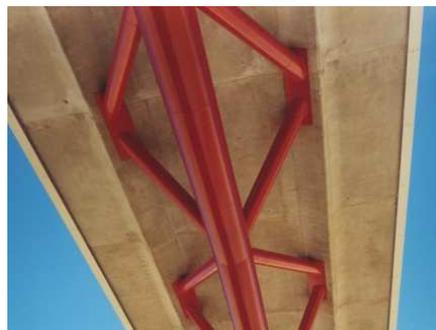


Photo 4.3 : Pont d'Antrenas (Photo Sétra - G. Forquet)

4-6 CONCEPTION DE DETAIL

L'emploi des aciers THLE se justifie dans les éléments fortement sollicités par des efforts concentrés :

- raidisseurs d'appui des poutres
- diaphragmes d'appui des caissons au-dessus d'appareils d'appui et des points de vérinage
- pièces d'ancrages des haubans sur le tablier et sur les pylônes des ponts à haubans
- pièces d'accrochage des suspentes des bow-strings et des ponts suspendus
- pièce d'about arc-tirant des bow-strings

Dans tous ces cas l'utilisation des aciers THLE pour la reprise et la diffusion des efforts concentrés peut se faire sans recours à des tôles de forte épaisseur en évitant ainsi les difficultés de raboutage et l'obligation de post-traitement thermique de relaxation de contraintes.

4-6-1 Raidisseurs et platines d'appuis

S'il est possible d'envisager des platines d'appui en aciers HLE (en particulier acier TM pour des raisons de soudage sur une pièce fortement bridée), l'apport de raidisseurs verticaux en acier HLE en travée n'est pas démontré. Plusieurs raisons justifient cet état. La principale est la stabilité au flambement. Le gain de résistance apporté par l'acier THLE (30% par exemple entre le S460 et le S355) n'est pas en rapport avec le gain sur la stabilité. Ce dernier n'est en effet que de 15 à 20%.

A moins de concevoir l'ensemble de l'ouvrage en acier THLE, l'utilisation de sections hybrides paraît une bonne alternative économique. Les âmes en S355 seront alors de préférence raidies par des éléments de même nuance.

Pour des raidissages ponctuels de butées sismiques ou de freinage, l'utilisation d'acier HLE peut apporter un gain.

C'est également l'analyse au cas par cas qui permettra de faire le choix définitif.

4-6-2 Goussets dans les poutres treillis

Bien que les entreprises pour certains ouvrages en treillis comme le pont de Pritz à Laval aient limité les joints d'assemblage en découpant les parties latérales du treillis dans une même tôle, les études fines des assemblages membrures/diagonales montrent souvent des concentrations de contraintes excessives. L'emploi d'acier THLE pourrait résoudre ce type de problème local. A priori ceci ne devrait pas conduire à un surcoût constructif. De plus, la réduction d'épaisseur améliore le fonctionnement en évitant des zones de forte rigidité aux nœuds et ainsi supprime ou limite les concentrations d'efforts.

4-6-3 Pièces d'accrochage des câbles et suspentes

Il peut-être intéressant d'utiliser des aciers THLE pour des pièces d'attaches voire pour les barres ou les suspentes associées.

Les exemples ne manquent pas dans ce domaine que ce soit pour des projets neufs ou pour des réparations.

Ces pièces d'ouvrages étant parfois très visibles, le choix des aciers THLE peut apporter un gain esthétique. On veillera cependant à s'assurer que le choix de la nuance est conforme aux contraintes d'exploitation, choc éventuel, fragilité aux basses températures.

4-6-4 Dalles orthotropes

L'intérêt principal des dalles orthotropes est leur poids propre très réduit. Cependant, leur coût élevé fait qu'elles ne peuvent pas être utilisées de façon systématique. Elles sont donc principalement utilisées pour des ouvrages dont la légèreté est primordiale. Les trois types de structures sont notamment concernés :

- *Les viaducs métalliques démontables (VMD)* : les montages et démontages de ce type d'ouvrages provisoires sont facilités par la réduction du poids ;
- *Les travées de ponts mobiles* : les gains de poids permettent de faire des économies sur les dispositifs d'équilibrage et les mécanismes de levage. Comme en témoigne (Photo 4.4) l'utilisation d'acier S460 pour la fabrication des deux tabliers du pont levant Gustave Flaubert à Rouen.



Photo 4.4 : Pont Gustave Flaubert à Rouen (Photo Construiracier - JM. Vigo)

- *Les ouvrages de grandes portées* : un plâlage orthotrope permet de réaliser de plus grandes travées en allégeant le poids propre du tablier. C'est un atout important lorsque l'on veut limiter le nombre de piles dans un cours d'eau ou au droit du franchissement d'un estuaire, comme pour le pont de Normandie (Photo 4.5) où la partie centrale du tablier est une dalle orthotrope de nuance S420.



Photo 4.5 : Pont de Normandie (Photo Sétra - G. Forquet)

Le viaduc de Millau (Photo 4.6) est constitué d'un caisson métallique avec un plâlage orthotrope utilisant une grande quantité d'aciers S460 sur les zones d'appui et dans certaines parties de la section transversale. La répartition de poids final du tablier se répartit en 2/3 - 1/3 entre les nuances S355 - S460, et 3/4 - 1/4 pour les pylônes.



Photo 4.6 : Le viaduc de Millau (Photo Construiracier - JM. Vigo)

Les dalles orthotropes sont également intéressantes pour la rénovation d'anciens ponts. Elles permettent en effet le renforcement ou l'élargissement de tabliers vétustes en conservant les anciens appuis.

L'usage d'acier THLE dans le domaine des dalles orthotropes n'est pas encore courant pour des raisons liées au comportement transversal de ces structures et au comportement à la fatigue. En effet, pour les ouvrages routiers les charges d'exploitation se trouvent directement appliquées au platelage, créant de fortes variations locales des contraintes transversales. Des ouvrages en Hollande ont récemment fait l'objet de réparations lourdes du fait de fissurations longitudinales dans le platelage liées à la fatigue.

Les analyses effectuées tant avec des modèles numériques qu'en laboratoire ont montré l'importance de la couche de roulement sur la diffusion des charges et la réduction des problèmes de fatigue.

En France des études sont en cours sur ce problème (projet de recherche ANR «orthoplus»). Elles ont d'ores et déjà montrées l'importance de la rigidité et de l'épaisseur de la couche de roulement dans la tenue à la fatigue des dalles orthotropes.

Pour des ouvrages du type pont de Normandie, ou viaduc de Millau, les enrobés bitumineux mis en œuvre ont une épaisseur de l'ordre de 70 à 80mm. Ils assurent la diffusion des charges et la pérennité de la structure sous les sollicitations de fatigue. Par contre l'emploi d'aciers THLE n'a pas de raison d'être avec ce type de couche de roulement.

Pour les ponts mobiles où l'on recherche un gain de poids, les enrobés épais ne sont pas adaptés. Les enrobés minces ou ultra-minces sont les plus utilisés. Ils sont par contre d'un faible intérêt vis-à-vis de la diffusion des charges de fatigue.

Des études sont également en cours pour analyser l'apport de matériaux rigides remplaçant ces enrobés sur le comportement de ces platelages (projet de recherche ANR «orthoplus»).

Pour ces types de structure, l'emploi d'acier THLE deviendra particulièrement intéressant dès lors qu'un complexe de diffusion des charges associant rigidité et faible épaisseur aura été mis au point, assurant ainsi la pérennité de la structure sous les trafics lourds que ce soit pour les ponts mobiles où les grands ouvrages à dalle orthotrope.

4-7 OUVRAGES SPECIAUX

Les aciers THLE peuvent aussi, être utilisés, pour fabriquer des structures provisoires très élancées, requérant une grande légèreté, comme des becs de lancement etc.

Exemple du Viaduc de Verrand (Photos 4.7 et 4.8)



Photo 4.7 : Viaduc de Verrand (Photo Construiracier - JM. Vigo)

Pour la phase de mise en place de l'ouvrage, l'avant-bec long de 85m a été réalisé en acier THLE S690. La portée des travées franchies par ce tablier à double caisson



orthotrope étant de 135m.

**Photo 4.8 : Bec de lançage S690 - phases de lancement
(Photo Construiracier - JM. Vigo)**

De même pour la construction du viaduc de Millau les 2 nuances d'acier S355 et S460 ont été mariées pour la réalisation des palées provisoires et des chevêtres métalliques sur appuis.

Bibliographie

- [1] - Les aciers thermomécaniques - AFPC - OTUA de mai 1997
- [2] - Concepts de dimensionnement à la fatigue des ouvrages métalliques de J. Brozetti et M.A. Hirt - construction métallique n°1 - 1987
- [3] - Ponts métalliques et mixtes - Résistance à la fatigue - SETRA - SNCF - CTICM - mai 1996
- [4] - Eurocodes partie 3 et 4
- [5] - New bridge over the Aare Channel at Hagneck, Switzerland- from D. Stucki and H.G. Dauner - in Steelbridge 2004
- [6] - Current world-wide trends in the usage of modern steel plates for bridge constructions. SCHRÖTER, M. MULLER in Steelbridge 2004
- [7] - Les ouvrages d'art courant sur la liaison avec la Sarre au Luxembourg - W. Schwarz - R. Biwer - N. Engel in BOM n°3 - OTUA
- [8] - Design of high performance bridges in the small and medium span range- Ph. RAMONDENC - in Steelbridge 2004
- [9] Recent developments in tubular bridges and the fatigue design of their joints from A. NUSSBAUMER, S. C. STURM, A. SCHUMACHER, M.A. HIRT in Steelbridge 2004
- [10] - Composite twingirders bridges with long spans and large width from R. DUBOIS in Steelbridge 2004
- [11] - From Stellbridge 2004 - Alberto Miazon - Verrand viaduc
- [12] - Use and application of high performance steels for steel structures - SED N° 8 - IABSE - Oct. 2005
- [13] - Bulletin Ouvrages Métalliques - N° 1 - OTUA - 2001
- [14] - Bulletin Ouvrages Métalliques - N° 2 - OTUA - 2003
- [15] - Bulletin Ouvrages Métalliques - N° 3 - OTUA - 2004
- [16] - Conception et calcul des éléments transversaux dans les ponts-routes mixtes - JC Foucriat et J. Roche
- [17] - Bulletin Ponts Métalliques n°23 - OTUA - 2004

5. CALCULS ET JUSTIFICATIONS DES STRUCTURES EN HLE

5-1 INTRODUCTION

L'utilisation de l'acier HLE s'impose pour augmenter les limites actuelles de portées et pour réaliser des largeurs d'ouvrages de plus en plus importantes. Il ne s'agit pas de remplacer l'acier courant S355 par les aciers S460 ou S690 sur la totalité de l'ouvrage, mais d'introduire l'acier HLE d'une manière optimisée dans les zones critiques de l'ouvrages. Les solutions hybrides peuvent prendre plusieurs formes.

La forme la plus simple parmi les solutions hybrides est l'utilisation des aciers HLE (à partir de S460) dans les zones sur piles où les moments fléchissant peuvent atteindre pour les grands ouvrages -portées près de 120 mètres et une largeur de tablier de 20 à 24 mètres- des valeurs de l'ordre de 350 voire 400 MN.m. L'avantage de cette solution est de pouvoir réaliser des ouvrages à hauteur constante sans recours à des semelles d'épaisseurs très importantes sur pile ou à des semelles additionnelles à faible résistance à la fatigue. De plus, du point de vue économique, le gain est évident dans la mesure où la réduction de la quantité d'acier pour ces types d'ouvrages sera, sur pile, au prorata des rapports $f_{y,HLE} / f_{y,S355}$ et où le rapport de prix des aciers HLE/S355 reste inférieur au rapport des performances. Nos connaissances actuelles permettent de répondre à la quasi-totalité des spécificités liées à cette utilisation.

L'autre forme de poutres hybrides, consiste à introduire l'acier HLE uniquement pour les semelles et de conserver l'acier courant pour les âmes. Cette solution a fait l'objet de travaux importants de recherches sur les plans à la fois théorique, expérimental et économique.

Une troisième possibilité pour les solutions hybrides conduit à associer à ces poutres métalliques hybrides des dalles en béton ultra performant. Les BFUP (bétons fibré à ultra haute-performance) avec une résistance à la compression de l'ordre de 140 à 180MPa et une résistance à la traction proche de 10 MPa vont permettre de pousser vers le haut les performances structurelles et aller encore plus loin en termes de travelage et de largeur des ouvrages.

La première partie de ce chapitre sera consacrée aux poutres hybrides fabriquées à partir d'un panachage des nuances d'aciers : un rappel succinct sera donné. Les spécificités liées au comportement et aux calculs des poutres métalliques hybrides seront discutées ensuite. Il est important de mettre à la disposition des ingénieurs les justifications expérimentales permettant de se rassurer sur le comportement à la fatigue des poutres hybrides. C'est pourquoi ce guide présente une partie du chapitre 5-2 consacré aux travaux expérimentaux qui permettent de rassurer les concepteurs et les maîtres d'œuvre sur le comportement à la fatigue de ce type de poutres.

Dans le domaine des moyennes et longues portées, le bi-poutre mixte acier-béton est l'ouvrage d'art le plus souvent construit actuellement en France. Il est donc normal de présenter dans la deuxième partie les trois solutions de bipoutres mixtes hybrides étudiées dans le cadre de ce guide afin de démontrer la possibilité d'obtenir un bilan économiquement positif (cf chapitre 6-1) en adoptant ces solutions hybrides. Les caissons mixtes hybrides seront traités en troisième partie et là aussi les études sont menées jusqu'à la comparaison économique afin de fournir les éléments nécessaires à la prise de décision.

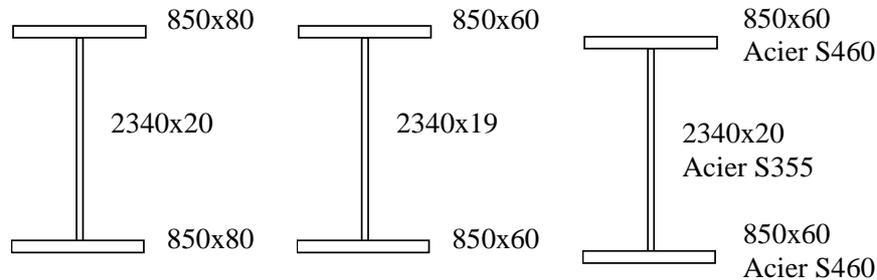
Enfin, il est intéressant de faire profiter les concepteurs et les maîtres d'ouvrages des innovations suite aux travaux réalisés ces dernières années. On terminera ce chapitre par montrer une étude originale faisant intervenir une solution hybride avec des aciers S690 et du béton BFUP.

5-2 JUSTIFICATIONS THEORIQUES ET EXPERIMENTALES POUR L'UTILISATION DES POUTRES HYBRIDES

5-2-1 Généralités

La résistance à la flexion d'une poutre métallique de pont à section en I est principalement assurée par les semelles. La contribution de l'âme à cette résistance est de l'ordre de 6 à 10%. La nuance courante d'acier des tôles utilisées dans la fabrication des poutres reconstituées soudées (PRS) est la nuance S355 avec une limite d'élasticité de 355 N/mm^2 (pour une épaisseur de tôle inférieure ou égale à 16 mm [4]). En remplaçant l'acier de nuance S355 par un acier de nuance S460, voir l'exemple de la figure 5-1, on peut assurer le même moment de résistance, avec une réduction de l'épaisseur des semelles dans un rapport égal à $355/460$. En revanche, la réduction de l'épaisseur de l'âme ne suit pas le même rapport. En effet, l'épaisseur de l'âme est fortement tributaire de la résistance au voilement par cisaillement du panneau d'âme en fonction de l'élançement de l'âme et en fonction du raidissage transversal.

A titre d'exemple, pour un panneau d'âme de coefficient d'aspect égal à 2 (raidisseurs espacés à deux fois la hauteur de l'âme) l'utilisation de l'acier S460 pour l'âme est inutile car il ne permet pas d'améliorer la résistance au voilement par cisaillement et l'épaisseur est presque inchangée par rapport à l'acier S355. Ceci est schématisé à la figure 5-1



a) Section homogène S355 b) Section homogène S460 c) Section hybride S460/S355

Figure 5-1 : Comparaison des sections à résistances égales (Flexion - Voilement par cisaillement)

Dans une hypothèse purement économique où le rapport : $\frac{\text{prix d'acier S460}}{\text{prix d'acier S355}}$ est inférieur à $\frac{460}{355}$, il est tout à fait intéressant d'optimiser l'utilisation de l'acier en adoptant un acier de haute limite d'élasticité pour les semelles et un acier courant pour les âmes. D'autres considérations sont aussi très importantes, par exemple :

- le comportement des tôles de fortes épaisseurs vis-à-vis de la rupture fragile ;
- la variation de la limite d'élasticité garantie avec l'épaisseur de la tôle ;
- le comportement à la fatigue des tôles en fonction de l'épaisseur, etc.

Le champ d'utilisation du guide couvre les configurations où la limite d'élasticité de l'acier de l'âme est inférieure à celle des semelles, on verra plus loin que le rapport $f_{y,semelle} / f_{y,âme}$ est à limiter à 2. où $f_{y,semelle}$ et $f_{y,âme}$ sont les limites d'élasticité de ces deux composants.

5-2-2 Eléments de justification

Le comportement à la flexion des sections hybrides est schématisé à la figure 5-2. La distribution linéaire des déformations sur la hauteur totale de la section implique l'atteinte en premier lieu de la limite d'élasticité à la jonction âme-semelle marquant le seuil du comportement élastique de la section.

L'accroissement de la déformation, avec l'hypothèse que la section reste plane, donne lieu à des zones de plastification dans l'âme et, en supposant des semelles inégales, un déplacement de l'axe neutre qu'il convient d'appeler axe neutre élasto-plastique (A.N.E.P.). Le seuil du comportement élasto-plastique correspond à l'atteinte de la plastification sur toute la hauteur de la section. Cet état de plastification généralisée est rendu possible par l'absence d'instabilité (voilement par compression) des parois comprimées.

Les positions des axes neutres élastique (A.N.E) et plastique (A.N.P) résultent des caractéristiques géométriques et mécaniques de la section. Entre ces deux situations et à chaque accroissement de la déformation, il existe une situation d'équilibre donnant lieu à une position d'axe neutre élasto-plastique.

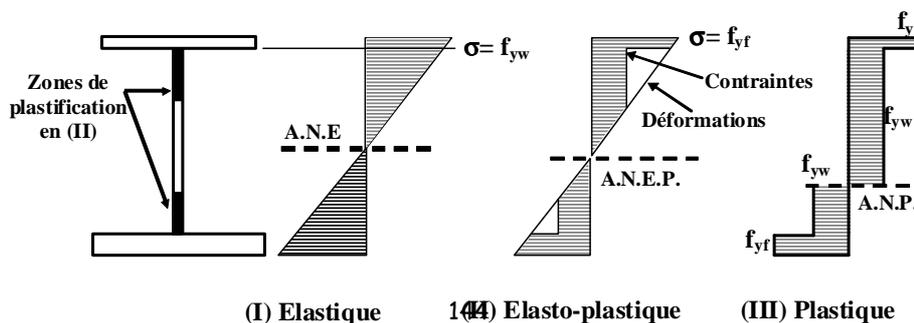


Figure 5-2 - Comportement à la flexion d'une section hybride et plastification à la jonction âme-semelle

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 5-2) sur la résistance pour les différentes phases de construction et d'exploitation de l'ouvrage.

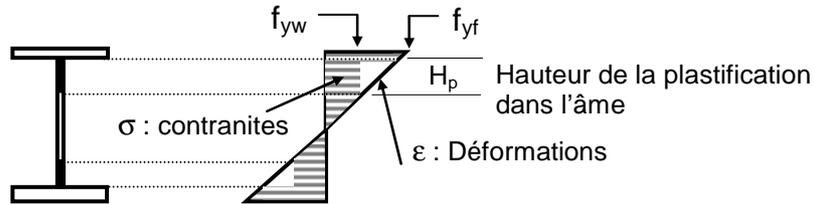


Figure 5-2b : Plastification à la jonction âme-semelle

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 (ELS) (En effet, alors qu'à l'ELS pour une poutre en acier classique, toute la section reste en fonctionnement élastique, pour une poutre hybride, les semelles restent en élastique mais une partie de l'âme sera, elle, plastifiée).

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 5-3) :

- l'attache du raidisseur transversal en simple plat sur la semelle,
- le cisaillement de cordon longitudinal 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.

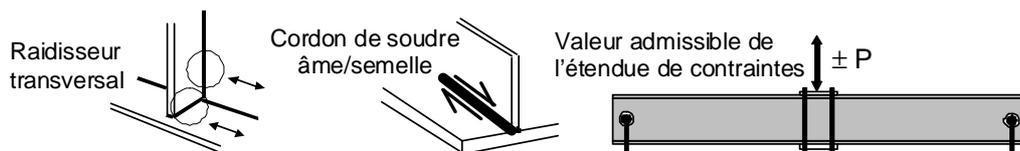


Figure 5-3 : Détails courants dans les ponts mixtes

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" [1]. On présente ci-après en encadré un résumé des travaux réalisés au CTICM.

NB : Les recommandations pour le calcul des poutres hybrides sont présentées au chapitre 5-2-4.

Résumé des travaux réalisés au CTICM, dans le cadre d'une recherche européenne menée sur les poutres hybrides dans le cadre du projet "Composite Bridge Design for Small and Medium Spans" [1].

5-2-2-1 Justification à la fatigue des attaches des raidisseurs dans les poutres hybrides et résistance à la flexion

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 5-4 montre les caractéristiques géométriques des poutres et la section adoptée.

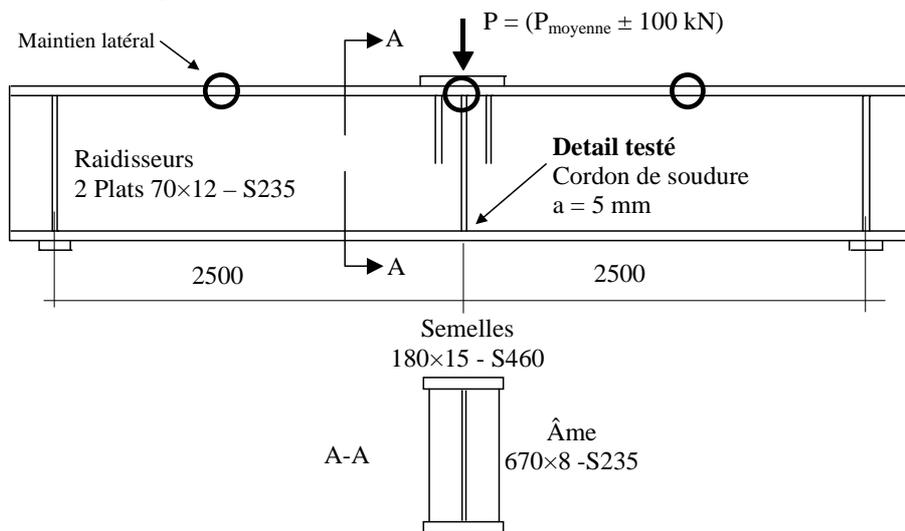


Figure 5-4 : Poutres hybrides pour les essais à la fatigue de l'attache transversale

Les aciers sont de nuances S460 pour les semelles et S235 pour l'âme. 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 5-1**. 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 5-1 - Caractéristiques mécaniques des aciers et des soudures

Procédure d'essai -Résultats - Analyses

La même étendue de contraintes dans la semelle est appliquée 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 la catégorie 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 5-5 illustre la position de ces différents essais.

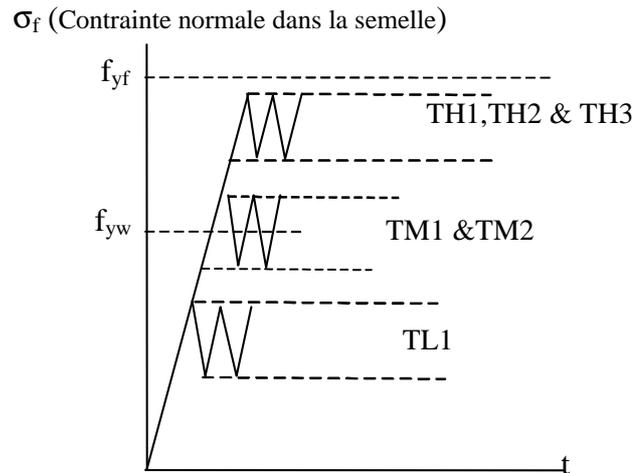


Figure 5-5 : Variation des contraintes pour les différents essais

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 appliquée (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 5-6 montre le dispositif d'essai.

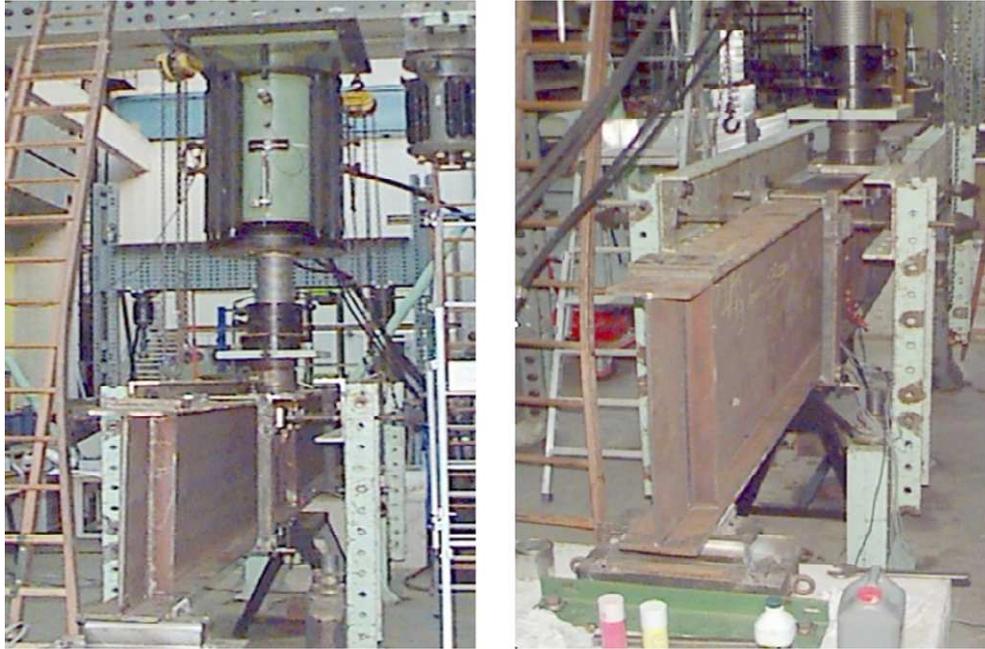


Figure 5-6 : Dispositif d'essais (Photo CTICM - D. Bitar)

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 5-7.



Figure 5-7 Fissures de fatigue essais TH/TM/TL (Photo CTICM - D. Bitar)

Les résultats de ces essais sont donnés au Tableau 5-2

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_f/f_{yw})	1,25			1,0		0,56
H_p (voir figure 5-2) (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 5-2 : 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.** (Ici pour ces essais à $\Delta\sigma = 100$ MPa, la « fatigue » (critère fissure traversante) se produit à plus de 3,8 millions de cycles ($\gg 2$ millions) correspondant à la catégorie)

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 5-8, 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 garder en catégorie 80 ce détail pour les poutres hybrides.

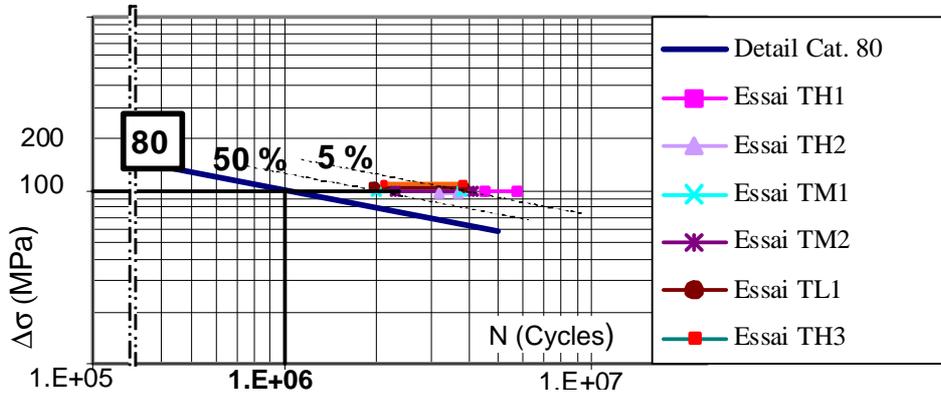


Figure 5-8 : Position des résultats expérimentaux par rapport à la courbe S-N de référence

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 ensuite appliquée, in fine jusqu'à la ruine. Un exemple de courbe de comportement est donné à la Figure 5-9.

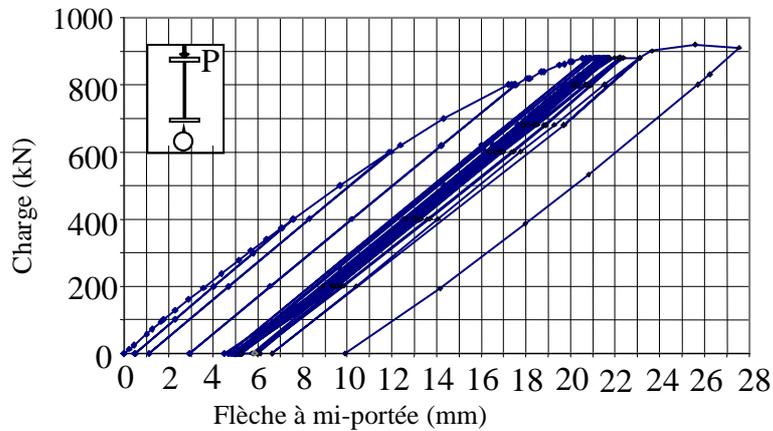


Figure 5-9 : Courbe charge flèche de la poutre TH1

La Figure 5-10 regroupe la totalité de ces courbes et le Tableau 5-3 donne les charges de ruine.

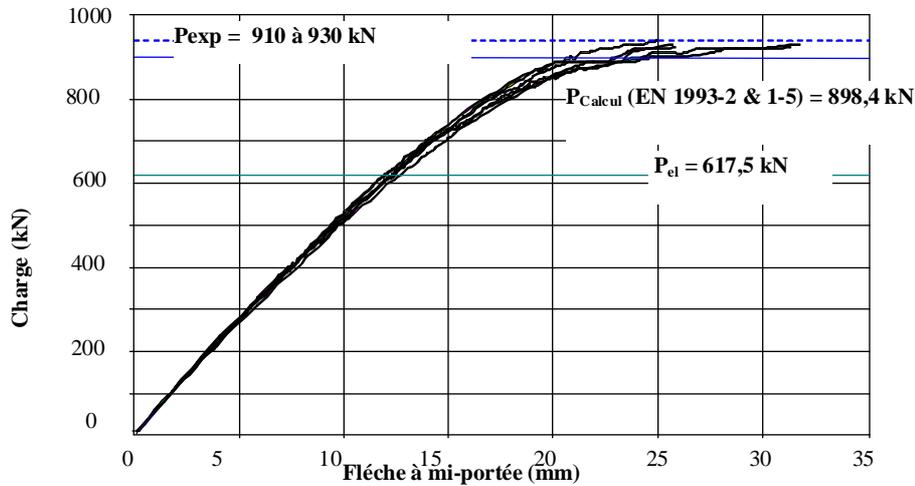


Figure 5-10 : Courbe charge-flèche sous chargement statique

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 5-3 : Charge de ruine statique et comparaison avec les Eurocodes

Les valeurs de $P_{u,exp}$, sont très constantes, quelque soit le type de localisation de l'apparition de la fissure (fissure âme pour TH1, TH2, TH3 ; fissure semelle pour TM1, TM2, TL1)

A partir de la figure 5-10 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 5-3 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.

A cet égard, L'EN 1993 -1-5, 4.3 (6)b autorise maintenant 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 5-3 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 plus importante que le résultat expérimental. Ces essais constituent une base de données pour la justification de l'Eurocode et de notre approche dans le présent guide.

5-2-2-2 Justification à la fatigue des cordons d'angle âme/semelle dans les poutres hybrides

Deux poutres ont été testées, notées **TGAP** et **TNOGAP**, pour étudier la résistance à la fatigue de cordons d'angle âme-semelle. Le principe est ici de tester ce cordon : - qui en poutre homogène classique est classé catégorie de détail 125 MPa (cas courant, cf EN1993-1-9, tableau 8.2), - qui pose question ici de classification pour le calcul classique de fatigue et aussi pour le comportement en deçà du niveau élevé de cycle compte tenu de la plastification sous ELS d'une partie de l'âme (cf fin du chapitre 5-2-2)

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 5-11.

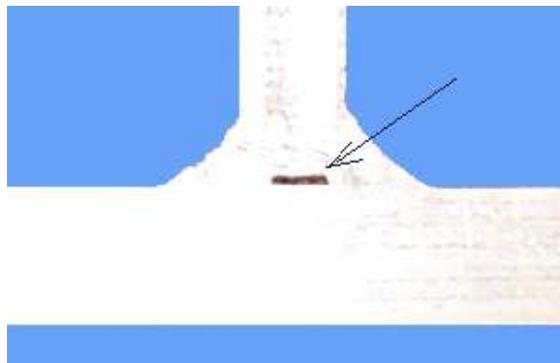


Figure 5-11 : Défaut de 2mm pour l'essai TGAP

Les caractéristiques géométriques sont données à la figure 5-12 et les caractéristiques mécaniques de l'acier sont données au tableau 5-1

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 5-12.

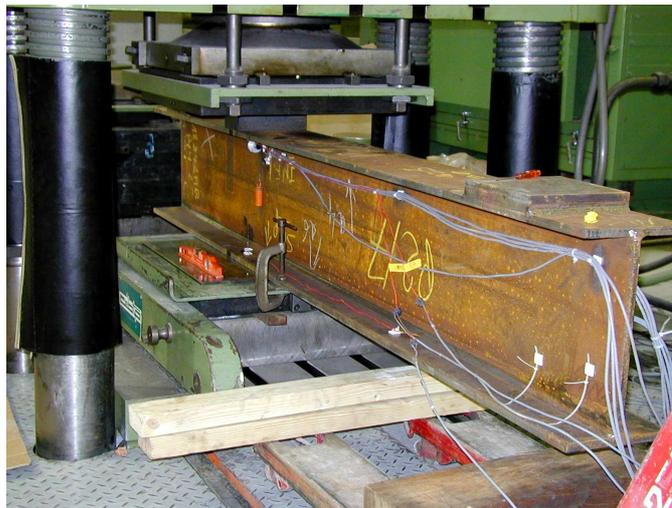
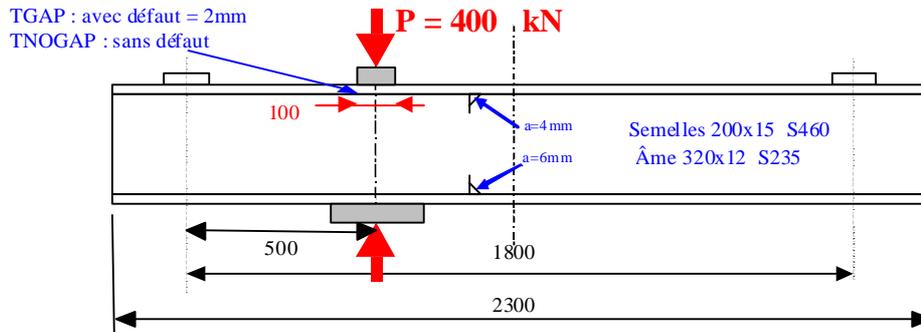


Figure 5-12 - Application de la charge transversale avant l'essai de fatigue
(Photo CTICM - D. Bitar)

Les résultats de (et à partir de) cette phase concernent 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 5-13.

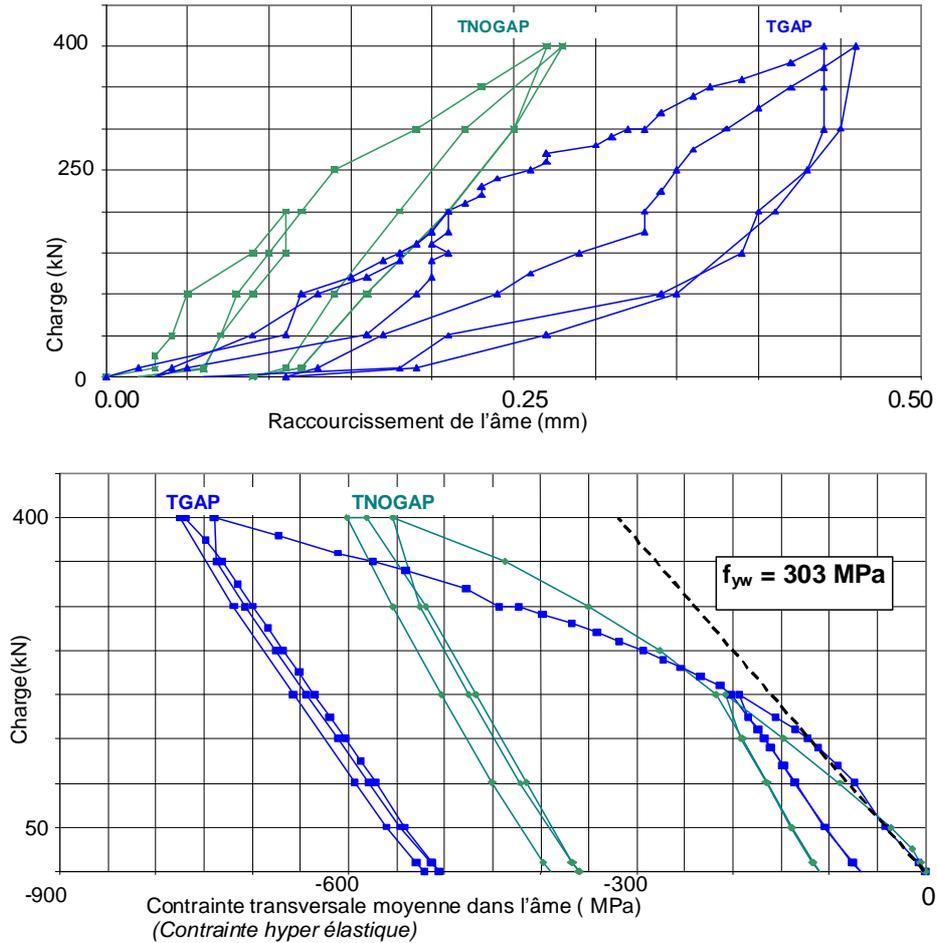


Figure 5-13 : Essais TGAP et TNOGAP - résultats à partir de la première phase

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 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 5-4. La Figure 5-14 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)
 $\Delta \tau_{weld} = 156 \text{ MPa}$ (Cisaillement dans les cordons âme-semelles)
 $\Delta \sigma_{weld} = 358 \text{ MPa}$ (à mi-portée)
 $\Delta \sigma_{weld} = 199 \text{ MPa}$ (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 5-4 : valeur de calcul pour les essais à la fatigue TGAP et TNOGAP

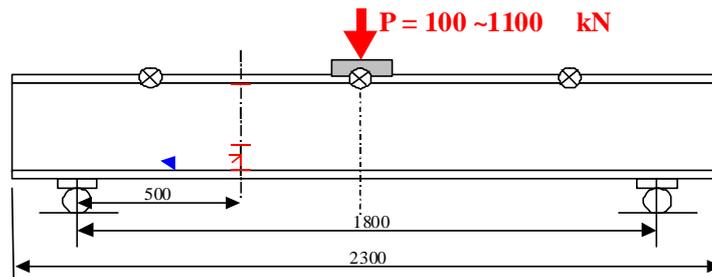


Figure 5-14 - Dispositif d'essais TGAP et TNOGAP - Phase fatigue

Pour chaque essai une variation de charge de 1000 kN entre 100 et 1100 kN est appliquée.



(Photo CTICM - D. Bitar)

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 5-15** montre la position et la semelle tendue où la fissure est traversante.

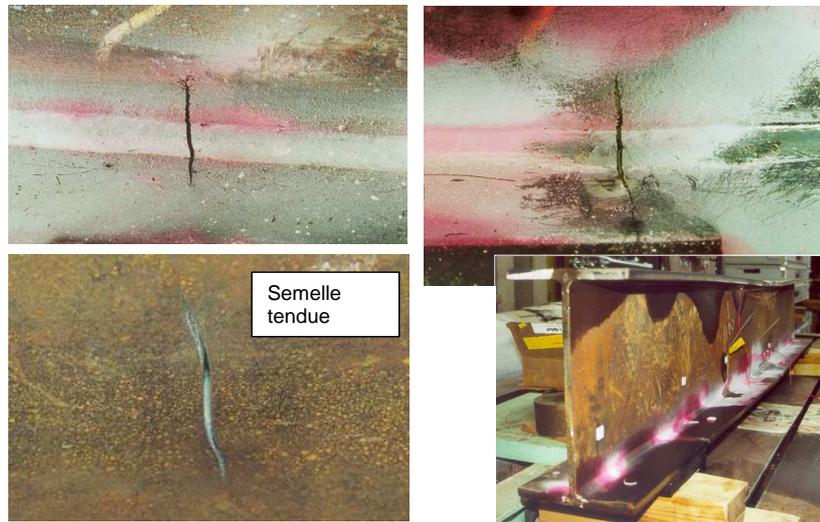
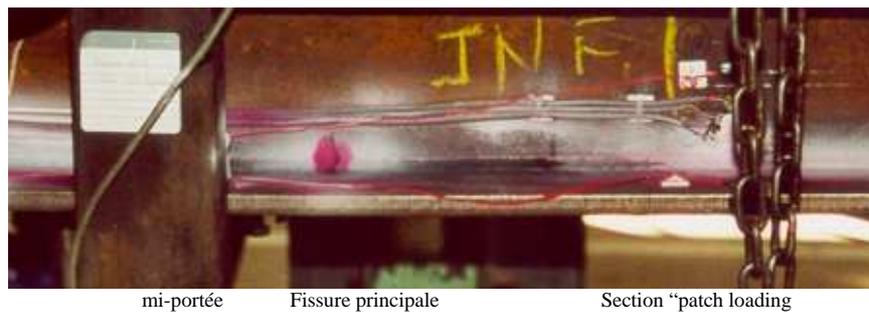


Figure 5-15 : Fissure de fatigue essai TGAP (Photo CTICM - D. Bitar)

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 5-16 montre la fissure principale sur la poutre TNOGAP.



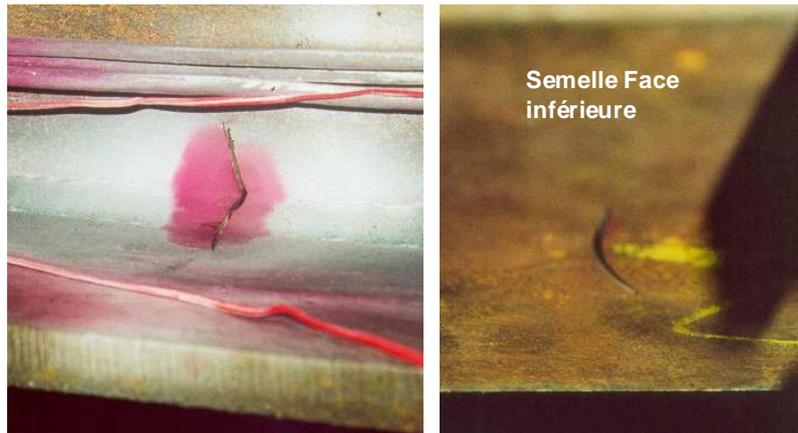


Figure 5-16 : Fissure de fatigue essai TNOGAP (Photo CTICM - D. Bitar)

Le Tableau 5-5 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 5-5 : 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

- i/ d'un défaut de 2 mm nominal;
- ii/ de la plastification transversale de l'âme ;
- iii/ 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 hybrides 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 5-17 montre la courbe charge-flèche de cette poutre.

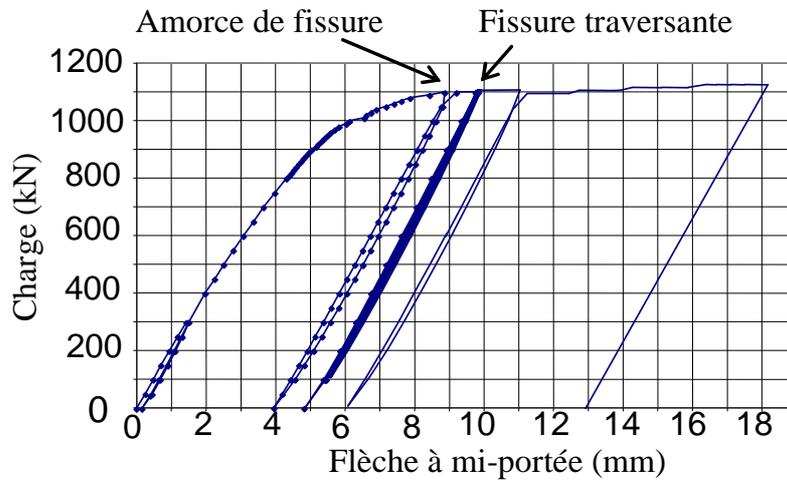


Figure 5-17 : Courbe charge flèche essai TNOGAP

La ruine s'est produite par une plastification importante à mi-portée et une ouverture importante de la fissure.

Il 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 $P_{u,exp} = 1130$ 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.

5-2-2-3 Justification expérimentale de l'étendue admissible de contraintes dans les poutres hybrides

Les règles de fatigue imposent que l'étendue de contrainte $\Delta\sigma$ due aux charges fréquentes ne dépasse pas $1,5 f_y$. (réf EN 1993-1-9 (8)1 ; EN 1993-1-5, 4.3 (8) (hybride) ; réf EN 1993-1-12, 2.9 (hybride))

Pour les poutres hybrides, la question « se pose(ait) en effet » 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 5-18. Les caractéristiques mécaniques de l'acier sont données au tableau 5.1.

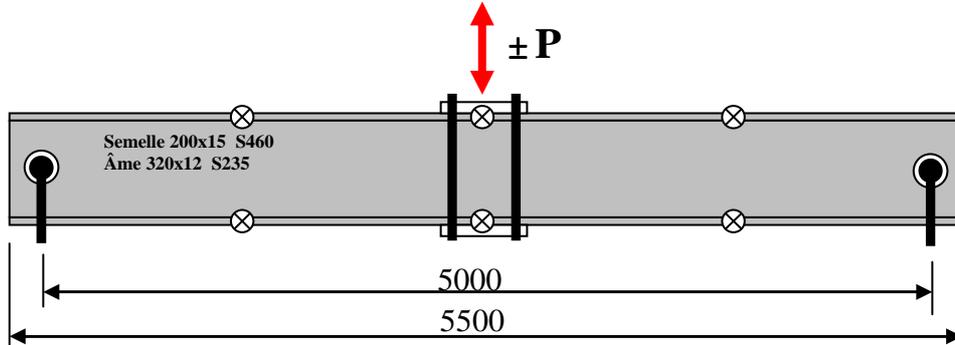


Figure 5-18 : Caractéristiques de la poutre pour l'essai Oligocyclique TOC

Un calcul préliminaire basé sur les contraintes normales à mi-portée, Figure 5-19, a montré qu'une variation de charge de l'ordre de + 450 kN à - 450 kN est nécessaire pour mener à bien cet essai.

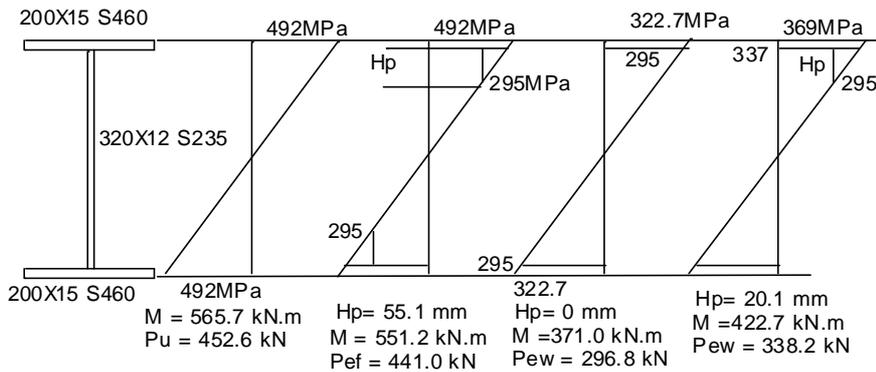


Figure 5-19 : Détermination de la charge pour l'essai TOC

Le choix d'utiliser une presse avec certaines adaptations découle de cette exigence de variation de charge. La Figure 5-20 montre ce dispositif d'essai.

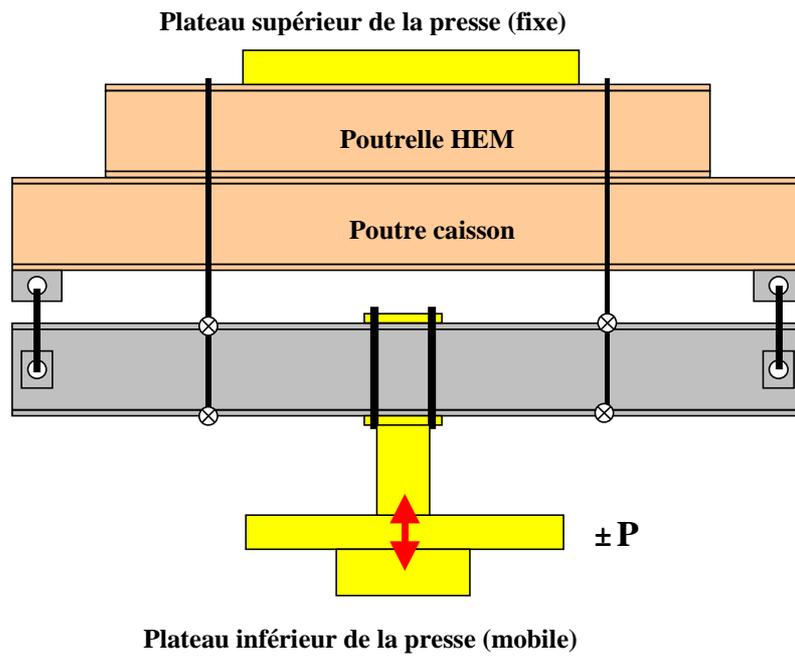


Figure 5-20 : Dispositif d'essai TOC (Photo CTICM - D. Bitar)

L'histogramme de chargement est donné à la Figure 5-21.

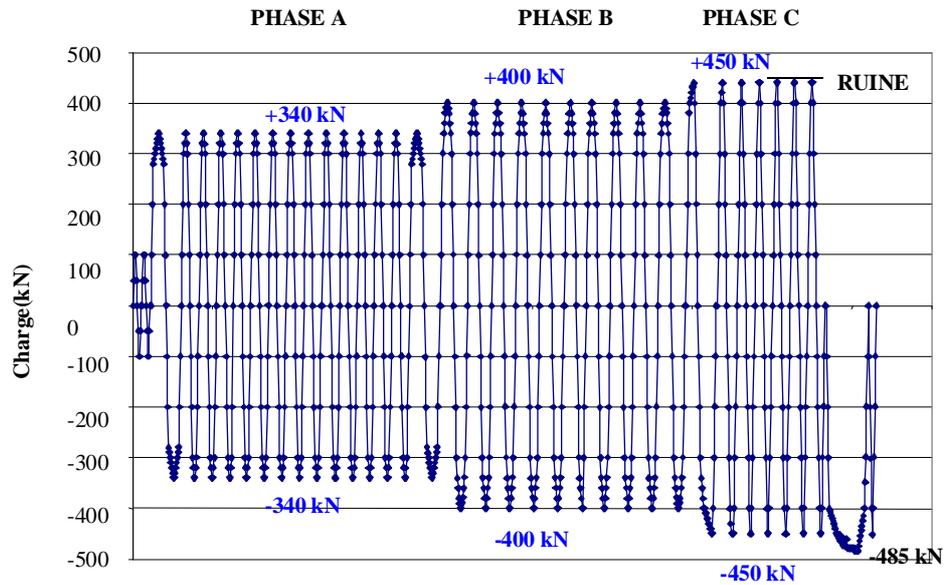


Figure 5-21 : Histogramme de chargement - essai TOC

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 5-22 montre ces courbes

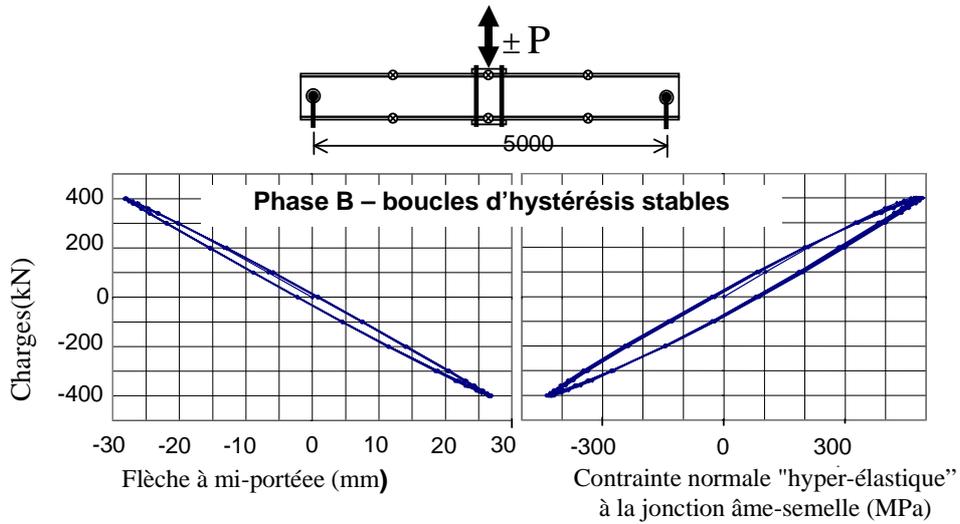


Figure 5-22 - Essai TOC - Phase B - boucles stables

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 5-23 montre la divergence des boucles.

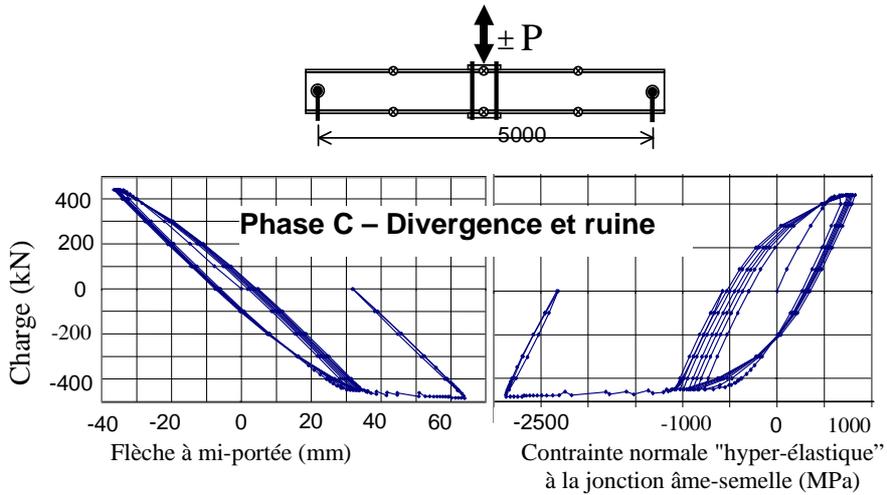


Figure 5-23 - Essai TOC - Phase C - boucles instables

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'EN 1993-2 pour la section de classe 1 et 2.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 5-6.

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 5-6 : 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.

5-2-3 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 5-24).



Figure 5-24 : 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.

La comparaison, Figure 5-25, 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.

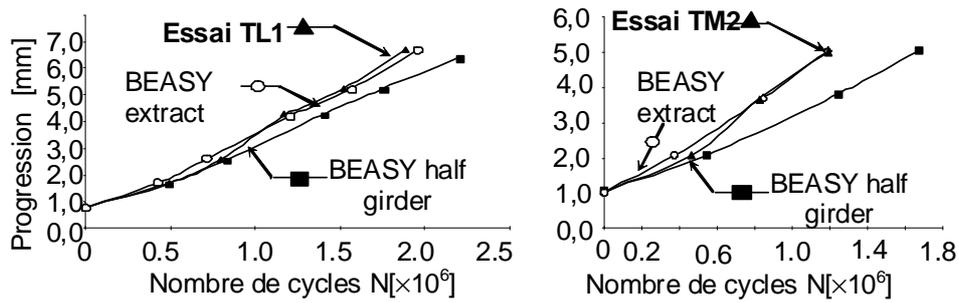


Figure 5-25 : Comparaison entre calcul EF et Essais

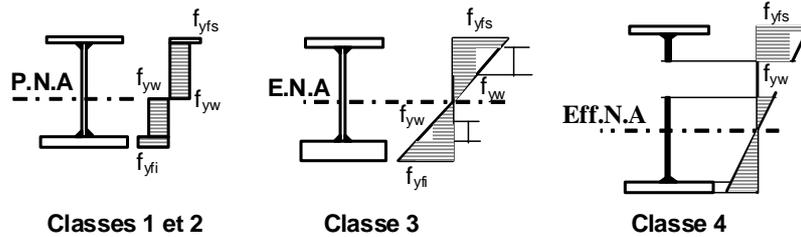
Il n'est pas envisageable dans le cadre de notre guide d'entrer dans les détails numériques (voir [1]), mais il est intéressant de retenir la possibilité de simuler d'une manière satisfaisante la réponse à la fatigue d'un détail donné dans une poutre hybride malgré la présence de la plastification.

5-2-4 Recommandation pour le calcul des poutres hybrides

Les différents travaux de recherche dans le domaine de poutres hybrides ont permis l'établissement de règles d'application et l'acceptation de ces règles dans les normes Eurocodes 3. Des calculs d'application sont donnés dans les chapitres 5-3, 5-4 et 5-5 de ce guide ainsi que dans la référence [2].

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 dans l'âme peut être négligé ;
- Pour la fatigue, il convient de limiter les étendues de contrainte nominale, nominale modifiée ou géométrique dues aux charges fréquentes $\psi_1 Q_k$ (voir EN 1990) à :
 $1,5f_{yf}/\gamma_{Mf}$ pour les contraintes normales (limite élastique des semelles) et
 $1,5f_{yw}/\sqrt{3}\gamma_{Mf}$ pour les contraintes de cisaillement (limite élastique des âmes); (EN 1993-1-9 ; art 8)
- 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.

Références

- [1] Bitar D. «Composite bridge design for small and medium spans» - **European Commission** Report Eur 20583 EN, Euro. Commission Directorate - General for Research 2003.
- [2] Bitar D. «RESISTANCE A LA FLEXION DES POUTRES HYBRIDES A SECTION EN I» - CTICM - Revue Construction Métallique - N° 2-2003.
- [3] Johansson B. «Super Steels in Structural Application - SUSAN » - Hybrid Girders - Lulea University of Technology - March 1995.
- [4] **EUROCODE 3** : NF EN 1993-1-1. Calcul des structures en Acier; NF EN 1993-1-5 ; NF EN 1993-2 Ponts métalliques, EN 1993-1-9 Fatigue
- [5] **EUROCODE 4** : NF EN 1994-1-1 et 1994-2 Ponts mixtes
- [6] **EUROCODE 3** : NF EN 1993-1-12 - Utilisation acier HLE

5-3 BIPOUTRES MIXTES HYBRIDES (travée principale 80 m)

5-3-1 Présentation des trois solutions (S355 - S355/S460 - S460/S690)

L'ouvrage est un pont routier à trois travées, constitué de deux travées de rive de 60 m et une travée centrale de 80 m.

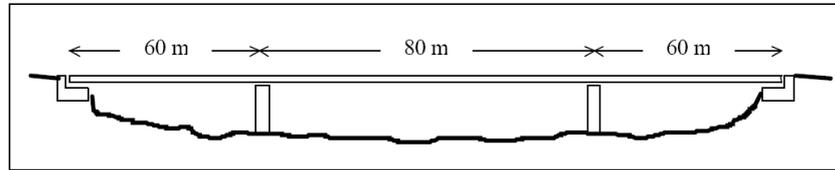


Figure 5.3.1 Profil en long

Le profil en travers du tablier supportant une chaussée autoroutière à 2x2 voies de circulation est le suivant (largeur totale 23.50 m) :

- BN4 (0,5m)
- BAU (3,0m)
- Chaussée (7,0m)
- BDG (1,0m)
- DBA (0,5m)
- BDG (1,0m)
- Chaussée (7,0m)
- BAU (3,0m)
- BN4 (0,5m)

Le tablier est un pont mixte, constitué de deux poutres métalliques entretoisées de 3,20 m de haut et d'une dalle de couverture en BHP précontrainte transversalement. La figure 5.3.1 et la figure 5.3.2 représentent le profil en long et le demi profil en travers de l'ouvrage.

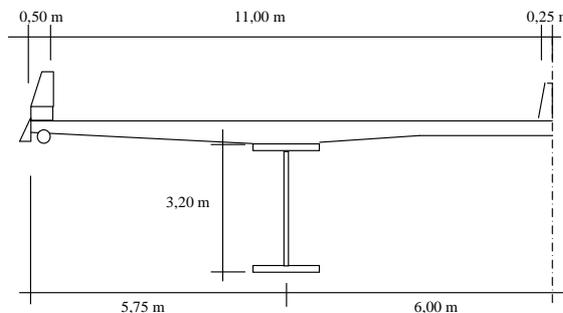


Figure 5.3.2 Demi profil en travers

Trois solutions ont été étudiées :

Solution 1 : Ouvrage entièrement en acier S355

Les poutres comportent cinq types de sections.

Chaque zone se caractérise par des épaisseurs d'âmes et de semelles différentes. Les dimensions extérieures restent constantes : $h = 3200\text{mm}$, $b_s = 1200\text{mm}$ pour la semelle supérieure, et $b_i = 1400$ ou 1600mm pour la semelle inférieure (selon le type de section).

Section	Âme S355	Semelle inférieure S355	Semelle supérieure S355
Type 1	30 mm	1400×45 mm	1200×40 mm
Type 2	36 mm	1600×110 mm	1200×110 mm
Type 3	40 mm	1600×150 mm	1200×150 mm

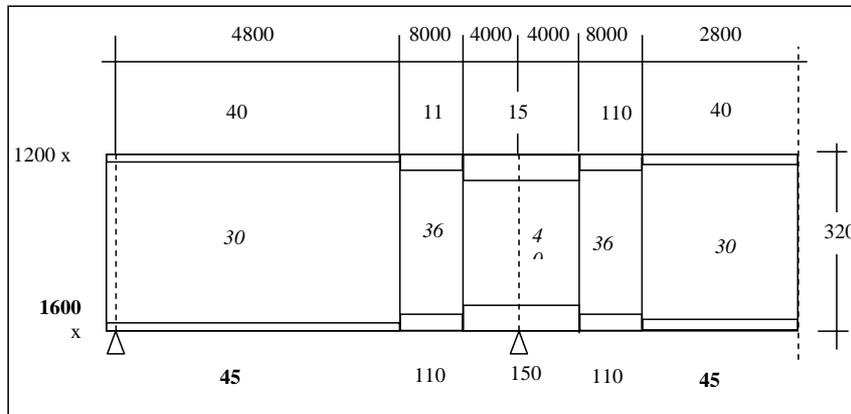


Figure 5.3.3 Répartition matière solution 1 (S355)

NB : il est d'usage de faire en sorte (pas appliqué ici) que les variations d'épaisseur de semelles n'excèdent pas 0,5 fois l'épaisseur de la semelle la plus mince.

-Le guide « résistance à la fatigue » des ponts métalliques et mixtes de 1998 du Sétra, le préconisait. Au delà ce guide indiquait qu'il faut dans la vérification à la fatigue des soudures bout à bout, majorer la contrainte de calcul par un coefficient $k = 1 + 0,4 (t_2/t_1 - 1,5)$. t_2 = épaisseur de la semelle épaisse, t_1 épaisseur de la semelle mince. Par exemple, pour $t_2/t_1 = 110/45$, on obtient $k = 1,37$.

- L'EN 1993-1-9 ne reprend pas ce coefficient sur le changement d'épaisseur et ne donne pas de limite. Il est « juste » demandé au tableau 8.3 d'avoir un délardage de la tôle épaisse avec une pente $\geq \frac{1}{4}$ (comme dans la norme EN 1090-2).

Il faut noter que l'EN 1993-1-9, 6.3 indique l'application d'un coefficient de concentration de contrainte k_f : coefficient de concentration de contraintes qui rend compte d'une augmentation locale des contraintes, liée à la géométrie du détail non prise en compte dans la courbe $\Delta\sigma$ R-N de référence. Il est précisé que des coefficients k_f peuvent être trouvés dans la littérature ou par des calculs aux éléments finis appropriés. (Ce coefficient serait à appliquer en cas de non respect du délardage).

- Précisons que le guide «ponts mixtes acier-béton» de 2010 du Sétra, chapitre 2.1.3 page 44, reprend la préconisation du guide fatigue de 1998 et indique qu'il est fortement souhaitable de limiter les variations des d'épaisseur des tôles de semelle inférieure à +50% et -33%.

- Notre exemple n'est pas calé sur cette bonne disposition - de plus être au-delà de +100% est selon nous vraiment une limite à ne pas dépasser - et on peut souligner là qu'une solution en S355 pour cet ouvrage large et de 80m de portée, génère des tôles épaisses de 150mm sur pile. Et que pour de bonnes transitions d'épaisseurs, il faudrait donc insérer une section intermédiaire plus épaisse entre la tôle de 45mm et la tôle de 110. Il adviendrait dans le comparatif qui suivra (bilan du tonnage acier et chapitre évaluation économique) que les solutions en HLE seraient encore plus avantageuses que cette solution S355.

Les positions des joints de chantier ont été fixées de manière à limiter le poids des tronçons à 60 tonnes.

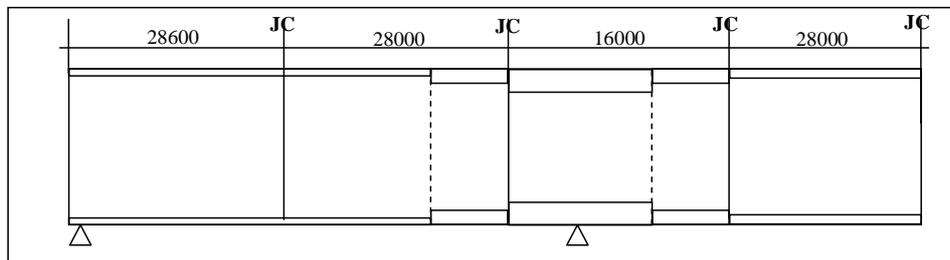


Figure 5.3.4

Solution 2 : Ouvrage avec des poutres hybrides S355/S460

Les poutres comportent trois types de sections.

Chaque zone se caractérise par des épaisseurs d'âmes et de semelles différentes. Les dimensions extérieures restent constantes : $h = 3200\text{mm}$, $b_s = 1200\text{mm}$ pour la semelle supérieure, et $b_i = 1200$ ou 1400mm pour la semelle inférieure (selon le type de section).

Section	Âme S355	Semelle inférieure S460	Semelle supérieure S460
Type 1	30 mm	1200×35 mm	1000×30 mm
Type 2	35 mm	1400×75 mm	1200×60 mm
Type 3	35 mm	1400×100 mm	1200×100 mm

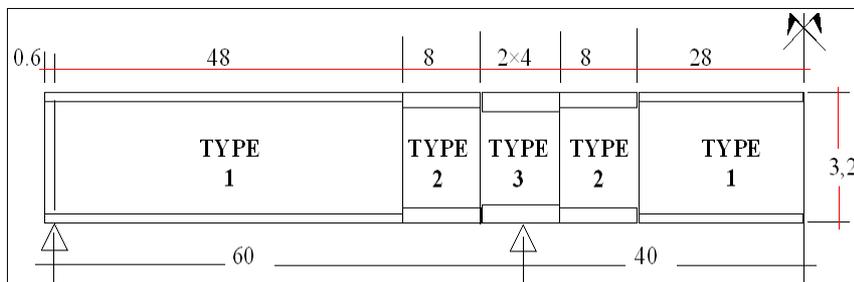


Figure 5.3.5 : Répartition matière solutions 2 et 3 (poutres hybrides)

Solution 3 : Ouvrage avec des poutres hybrides S460/S690

Les poutres comportent trois types de sections.

Chaque zone se caractérise par des épaisseurs d'âmes et de semelles différentes. Les dimensions extérieures restent constantes : $h = 3200\text{mm}$, $b_s = 1200\text{mm}$ pour la semelle supérieure, et $b_i = 1200$ ou 1400mm pour la semelle inférieure (selon le type de section).

Section	Âme S460	Semelle inférieure S690	Semelle supérieure S690
Type 1	28 mm	1200×30 mm	1000×25 mm
Type 2	30 mm	1400×60 mm	1200×50 mm
Type 3	32 mm	1400×85 mm	1200×80 mm

5-3-2 Hypothèses pour le dimensionnement des solutions hybrides

a. Matériaux

La dalle est constituée d'un béton **C50/60**. Ses caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

$$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 36\,773 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 4,07 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Les aciers de charpente sont de nuance S355, S460 ou S690 selon la solution étudiée.

f_y = variable en fonction de la nuance et de l'épaisseur

$$E_s = 210\,000 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Coefficients partiels :

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

$$\gamma_{M1} = 1,10$$

$$\gamma_{Mser} = 1,00$$

b. Phasage de bétonnage de la dalle

La dalle de couverture est bétonnée en **25 plots** de 8 m chacun selon le schéma suivant. Le poids de l'outil coffrant est de **47 kN/m**.

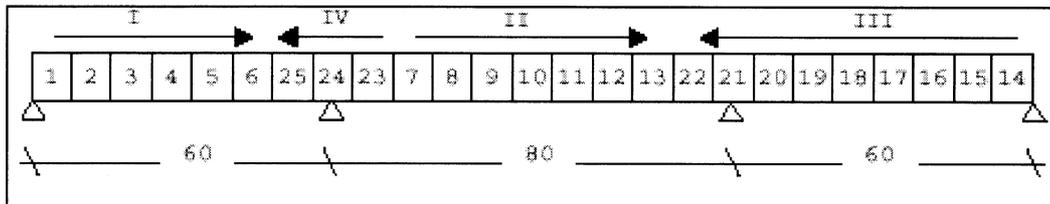


Figure 5.3.6 : Phasage de bétonnage de la dalle

c. Ferrailage longitudinal de la dalle

Le ferrailage minimum de la dalle est calculé selon EN 1994-2 § 7.4.2.

	Dalle
$f_{ct,eff}$	4,07 MPa
k	0,8
k_s	0,9
h_c	0,320 m
z_0	0,806 m
k_c	1,0
σ_s	280 MPa
ρ_{min}	1,05%

On prendra donc pour les calculs d'inertie un taux de ferrailage de **1,0%** dans la dalle.

d. Température

On prend en compte un gradient de $\pm 10^\circ\text{C}$ entre la poutre et la dalle, se traduisant par une déformation imposée $\varepsilon = \pm 100 \mu\text{m/m}$ dans la dalle en béton.

e. Charges de trafic

Les charges de trafic sont celles du **modèle 1** défini dans l'EN 1991-2, avec un trafic de **classe 2** (le modèle 2 n'est pas dimensionnant).

Découpage de la chaussée en voies

- La barrière centrale est considérée comme fixe, on raisonne sur un demi ouvrage
- Largeur de chaussée : $w = 11,00$ m
- Nombre de voies : $n_1 = 3$
- Largeur d'aire résiduelle : $w_r = 2,00$ m

Valeurs des charges prises en compte

◦ **Tandem TS**

Tandem voie 1 : $\alpha_{Q1} Q_{1k} = 0,9 * 300 = 270$ kN (par essieu)

Tandem voie 2 : $\alpha_{Q2} Q_{2k} = 0,8 * 200 = 160$ kN (par essieu)

Tandem voie 3 : $\alpha_{Q3} Q_{3k} = 0,8 * 100 = 80$ kN (par essieu)

◦ **Charge répartie UDL**

Voie 1 : $\alpha_{q1} q_{1k} = 0,7 * 9 = 6,3 \text{ kN/m}^2$

Voie $i \geq 2$: $\alpha_{qi} q_{ik} = 1,0 * 2,5 = 2,5 \text{ kN/m}^2$ (nb chargement partiel de la voie 5)

Aire résiduelle : $\alpha_{qr} q_{rk} = 1,0 * 2,5 = 2,5 \text{ kN/m}^2$

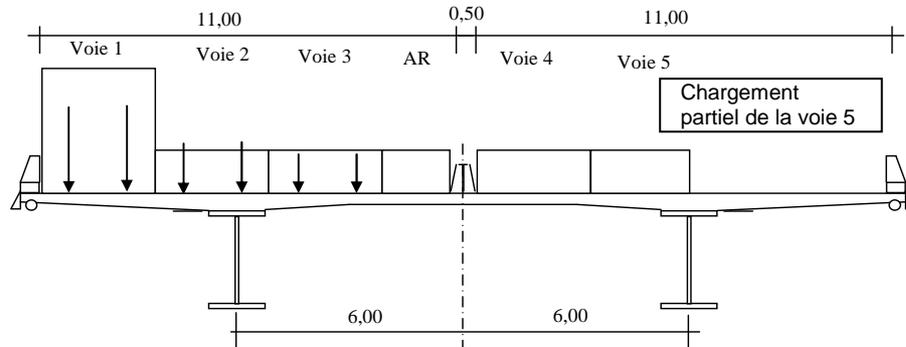


Figure 5.3.7 Disposition des charges de trafic

Combinaisons

ELS quasi-permanent : $G \pm 0,5T$

ELS fréquent : $G + \max \begin{cases} 0,75 TS + 0,4 UDL \pm 0,5T \\ \pm 0,6T \end{cases}$

ELS caractéristique : $G + \max \begin{cases} 0,75 TS + 0,4 UDL \pm T \\ TS + UDL \pm 0,6T \end{cases}$

ELU : $1,35 G_{max} + G_{min} + \max \begin{cases} 1,35 (0,75 TS + 0,4 UDL) \pm 1,5 T \\ 1,35 (TS + UDL) \end{cases}$

f. Retrait

La structure est justifiée à long terme. Le retrait de dessiccation est estimé à l'aide de l'annexe 1 de l'EC2-1-1. Les deux retraits (retrait de dessiccation et retrait endogène) ont des **cinématiques différentes**. Dans les combinaisons ELS et ELU, il faudra donc considérer **2 cas pour chaque combinaison** : sans retrait, avec retrait de la dalle seule,

Retrait de la dalle

$$\beta_{sc} = 8 \text{ (ciment à prise rapide et haute résistance)}$$

$$\beta_{RH} = 0,756 \text{ (pour RH = 80\%)}$$

$$\beta_s (100_{\text{ans}} - t_0) = 0,94 \text{ (négligé)}$$

$$\epsilon_{cs\infty} = 3,63 \cdot 10^{-4}$$

Remarque : cette valeur est sans doute surestimée pour un BHP (à affiner lors de l'étude suivante, en fonction des adjuvants utilisés).

g. Fluage - Coefficients d'équivalence

Le coefficient d'équivalence à court terme vaut $n_0 = E_s / E_{cm} = 5,71$

Le rayon moyen de la section vaut $r = 2 A_c / u$:

$$A_c = 8,453 \text{ m}^2 \text{ (aire de béton),}$$

$$u = 45,11 \text{ m (périmètre de béton au contact de l'atmosphère)}$$

$$r = 0,375 \text{ m}$$

Les coefficients d'équivalence sont calculés selon l'annexe 1 de l'EC2-1-1, pour une humidité relative RH = 80% :

Type de charge	j (âge du béton)	ϕ_0	$\beta_c(\infty - t_0)$	$\phi(\infty, t_0)$	ψ_L	n
Retrait de dessiccation	1 jour	2,759	1,000	2,759	0,55	14,37
Bétonnage	45 jours	1,354	1,000	1,354	1,1	14,22
Superstructures	90 jours	1,186	1,000	1,186	1,1	13,16

5-3-3 Détermination des zones fissurées (solutions hybrides)

La figure suivante montre les valeurs d'inerties utilisées pour le calcul des contraintes (on notera l'effet de traînage de cisaillement).

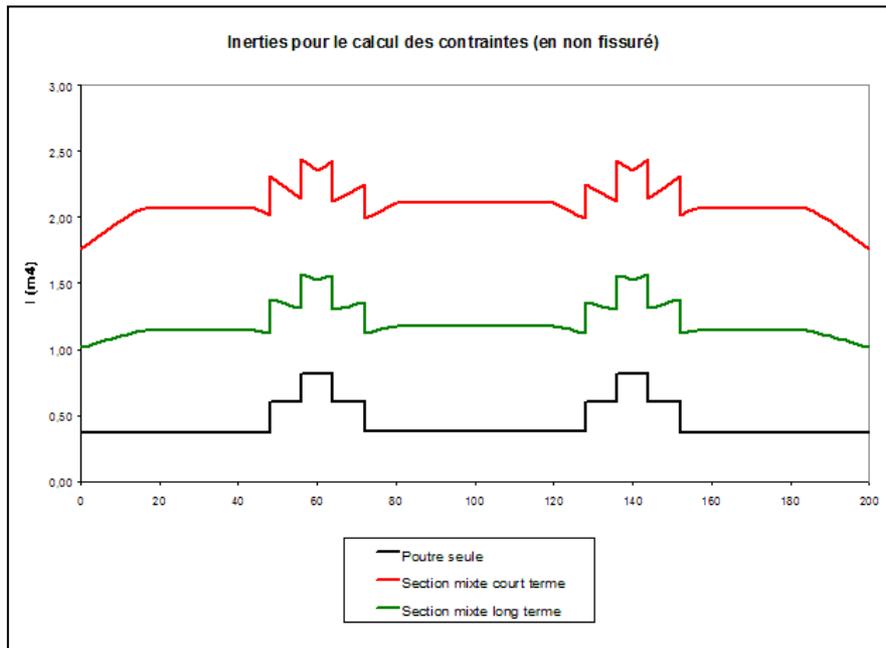


Figure 5.3.8 Inerties pour le calcul des contraintes dans la dalle

On calcule alors les enveloppes de contraintes dans la dalle à l'ELS caractéristique. Sur les courbes suivantes ont été représentées également les valeurs limites $2 f_{ctm} = -8,1$ MPa pour la dalle

Là où ces valeurs limites sont dépassées, le calcul des sollicitations se fera en considérant la dalle fissurée.

On en déduit les inerties à prendre en compte pour le calcul des sollicitations, comme indiqué dans le tableau suivant.

Abscisse x	[0 - 4m]	[4 - 48]	[48 - 56]	[56 - 64]	[64 - 72]	[72 - 100]
État de la dalle supérieure	Non fissurée	Non fissurée	Non fissurée	Fissurée	Non fissurée	Non fissurée



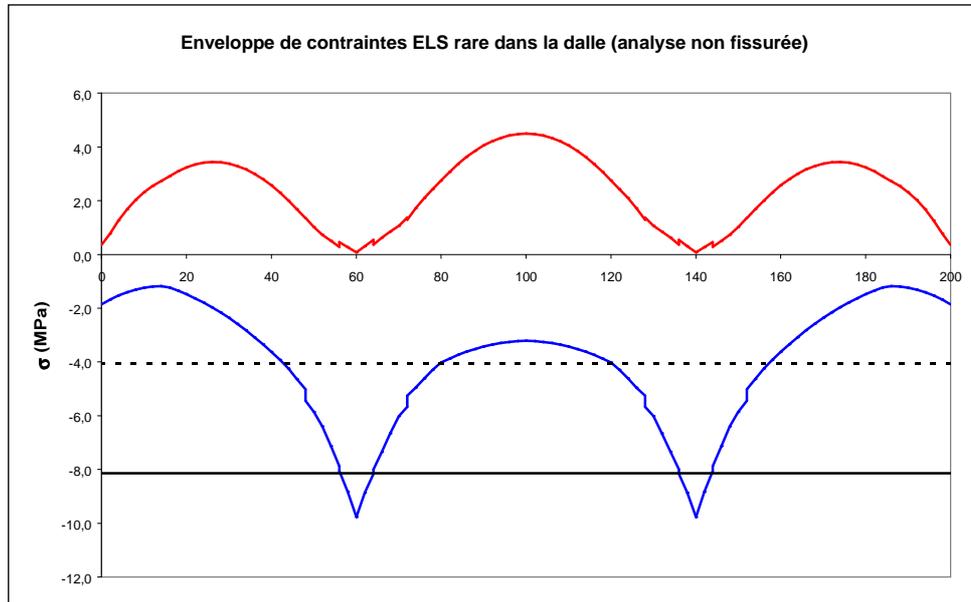


Figure 5.3.9 Détermination des zones fissurées

5-3-4 Exemple de justification d'une solution hybride - solution 2.

5-3-4 -1 Justifications à l'ELS

a. Principe de calcul des contraintes

Le calcul des contraintes est fait combinaison par combinaison. Pour une combinaison donnée et une section donnée, le calcul se fait en plusieurs étapes :

- calcul des contraintes dues à N et M en section non fissurée (poutre + dalle), avec prise en compte des effets isostatiques du retrait de la dalle;
- si la traction dans la dalle dépasse f_{ctm} , on refait un calcul de contraintes en négligeant le béton et en ne considérant que la poutre + armatures dalle), sans tenir compte de l'effet isostatique du retrait de la dalle.

Le calcul se fait en tenant compte des effets du traînage de cisaillement dans la dalle , mais sans tenir compte du voilement local éventuel de l'âme.

b. Contraintes sous charge ELS caractéristique

Les graphiques suivants montrent les enveloppes de contraintes sous charges ELS caractéristique :

- contraintes longitudinales en semelle supérieure
- contraintes longitudinales en semelle inférieure
- contraintes de cisaillement dans l'âme
- contraintes de Von Mises dans l'âme
- contraintes longitudinales dans la dalle supérieure (calcul fissuré et non fissuré)

Ces deux derniers graphiques sont également utiles pour le calcul des contraintes à l'état-limite de **fatigue**.

Les contraintes de traction sont comptées négativement.

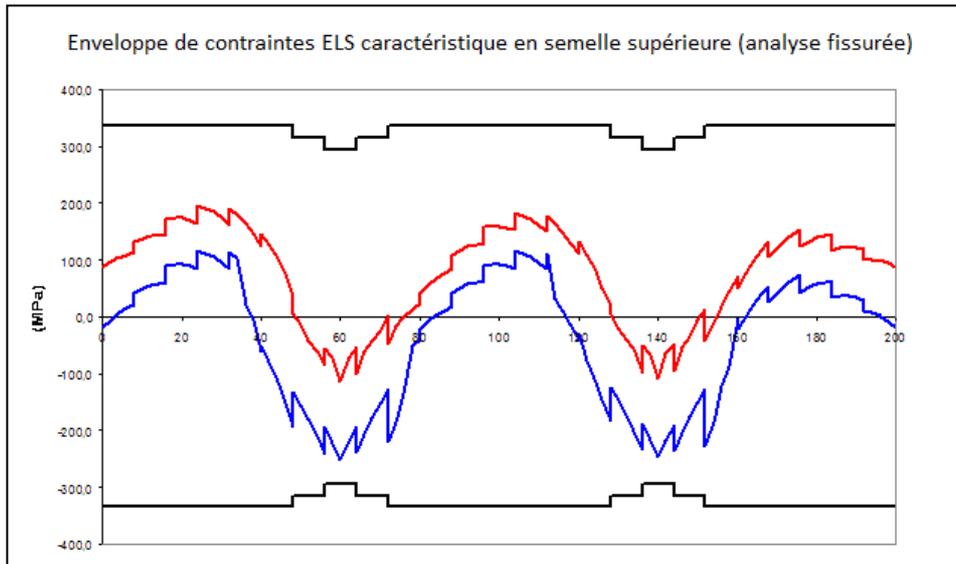


Figure 5.3.10 Enveloppe de contraintes à l'ELS caractéristique en fibre supérieure

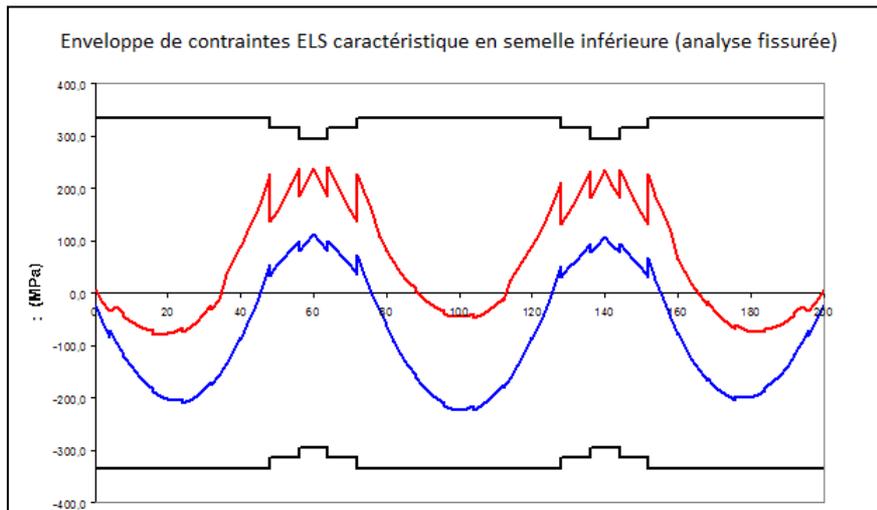


Figure 5.3.11 Enveloppe de contraintes à l'ELS caractéristique en fibre inférieure

(NB les vérifications ELS ne sont pas dimensionnantes $\sigma_{admissible} > \sigma_{solicitante}$.)

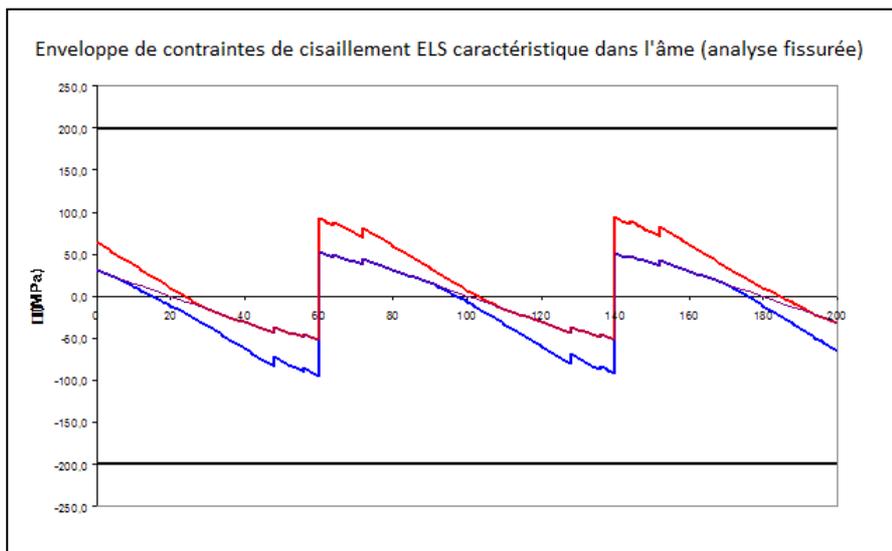


Figure 5.3.12 Enveloppe de contraintes de cisailment dans l'âme à l'ELS caractéristique

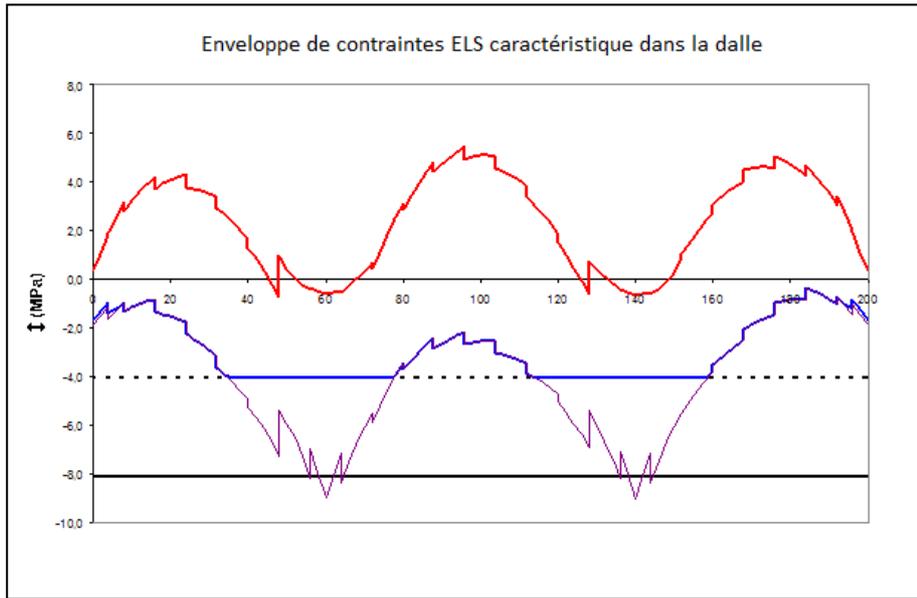


Figure 5.3.13 : Contrainte Von Mises à la jonction âme-semelle à l'ELS caractéristique

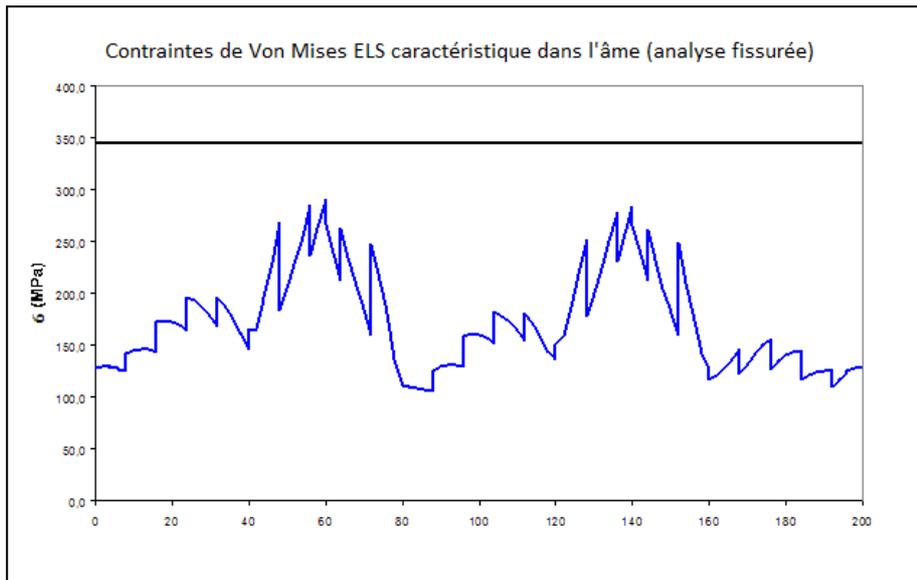


Figure 5.3.14 : Enveloppe de contraintes dans la dalle à l'ELS caractéristique

5-3-4-2 Justifications à l'ELU

a. Classification des sections

Le classement se fait en utilisant pour l'âme le f_y des semelles (cf EN 1993-1-5, 4.3 (6)b et EN 1993-1-12 qui n'apporte pas de modification à la 1-5)

Sous moment positif, l'axe neutre plastique est toujours situé dans la dalle supérieure quel que soit le type de poutre. Les sections sont donc de classe 1.

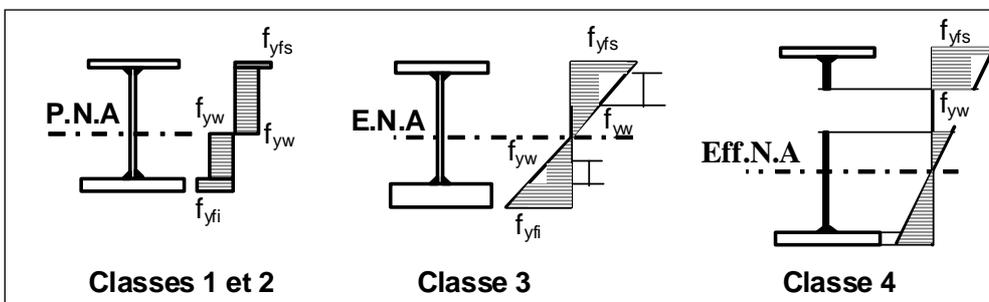
Sous moment négatif, l'axe neutre plastique est dans l'âme. La classification dépend donc du rapport de contraintes ψ . Compte tenu des élancements d'âme et des rapports obtenus, on constate que les sections de type I sont de classe 4, tandis que les sections de type II et III sont de classe 3.

Les sections de classe 3, peuvent être assimilées à des sections de classe 2 moyennant une section efficace de l'âme (voir EN 1994-1-1, §4.3.3.1(3)).

En résumé, on aboutit aux classifications suivantes :

Type de section	Classe sous $M > 0$	Classe sous $M < 0$
Type I	Classe 1	Classe 4
Type II	Classe 1	Classe 3 assimilée 2
Type III	Classe 1	Classe 3 assimilée 2

- A l'Etat Limite Ultime, les vérifications sont à mener en prenant en compte l'effet de la plastification dans l'âme ;



Selon le type de section, on devra donc faire 2 types de vérifications :

- pour les sections de type I, sous moment négatif, on fera un calcul de contraintes avec prise en compte du voilement local ; les contraintes de calcul devront rester inférieures à la limite élastique de l'acier ;
- pour les sections de type II, III sous moment négatif, le moment devra rester inférieur au moment plastique résistant « efficace » ;
- pour les sections de tout type, sous moment positif, le moment devra rester inférieur au moment plastique résistant.

Notons que la prise en compte du voilement local pour les sections de type I sous moment négatif modifie très peu les contraintes car la réduction d'âme est faible (l'élançement est proche de l'élançement limite de la classe 3).

b. Résistance en flexion

1. Limitation en contraintes :

Comme expliqué précédemment, ce critère concerne uniquement les sections de type I sous moment négatif.

La figure suivante montre les enveloppes de contraintes en semelle supérieure et inférieure à l'ELU. On vérifie que dans les sections de type I, les contraintes limites sont bien respectées (les **zones grisées** correspondent aux zones admettant la plastification, pour lesquelles cette vérification n'a pas de sens).

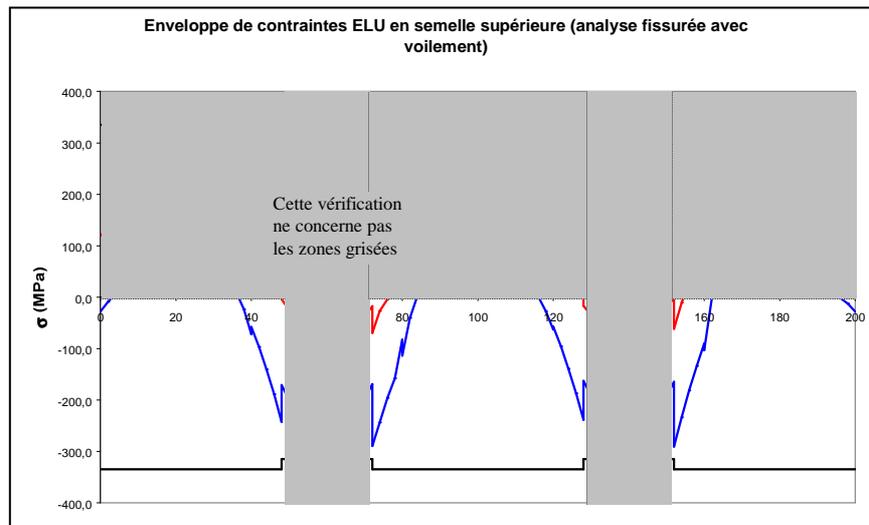


Figure 5.3.15 Enveloppe de contraintes ELU section type I (fibre supérieure)

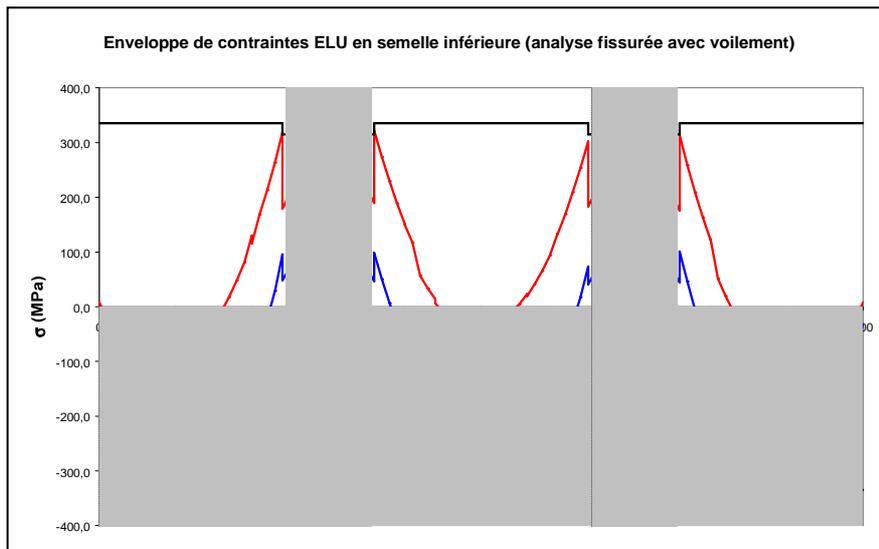


Figure 5.3.16 Enveloppe de contraintes ELU section type I (fibre inférieure)

2. Limitation en moment (sous moment positif):

Le tableau suivant donne les valeurs des moments résistants pour les différentes sections admettant la plastification.

	Moment plastique résistant
Sections pouvant plastifier sous moment positif	
Type I	$M_{pl,Rd} = 173,2 \text{ MNm}$
Sections pouvant plastifier sous moment négatif	
Type II	$M_{pl,Rd}^* = -199,9 \text{ MNm}$
Type III	$M_{pl,Rd}^* = -241,2 \text{ MNm}$

La figure 5.3.17 montre l'enveloppe de moments à l'ELU ; ces moments ont été calculés sans prendre en compte les effets isostatiques des retraits de la dalle, puisqu'on admet la plastification. En revanche, les effets hyperstatiques des retraits sont pris en compte.

Les zones en grisé sont les zones qui ne peuvent pas plastifier.

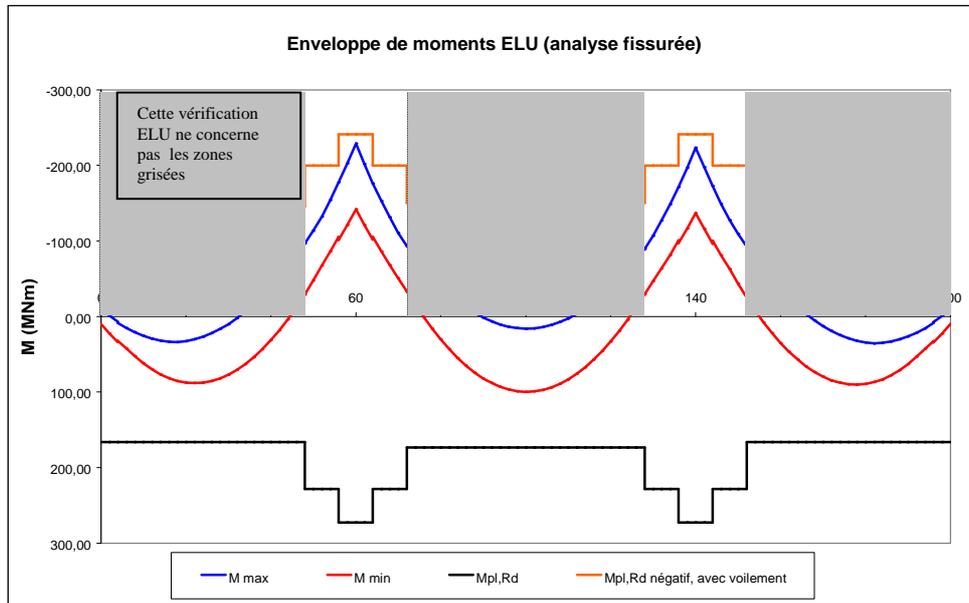


Figure 5.3.17 Enveloppe de moments ELU

Commentaire : la section est juste dimensionnée sur appui. Elle a « de la marge » en travée.

c. Résistance à l'effort tranchant

La résistance des sections à l'effort tranchant est déterminée par la résistance de l'âme au voilement par cisaillement, d'après EN 1993-1-5.

Le graphique suivant montre l'enveloppe d'effort tranchant à l'ELU, ainsi que les valeurs limites $V_{c,Rd}$.

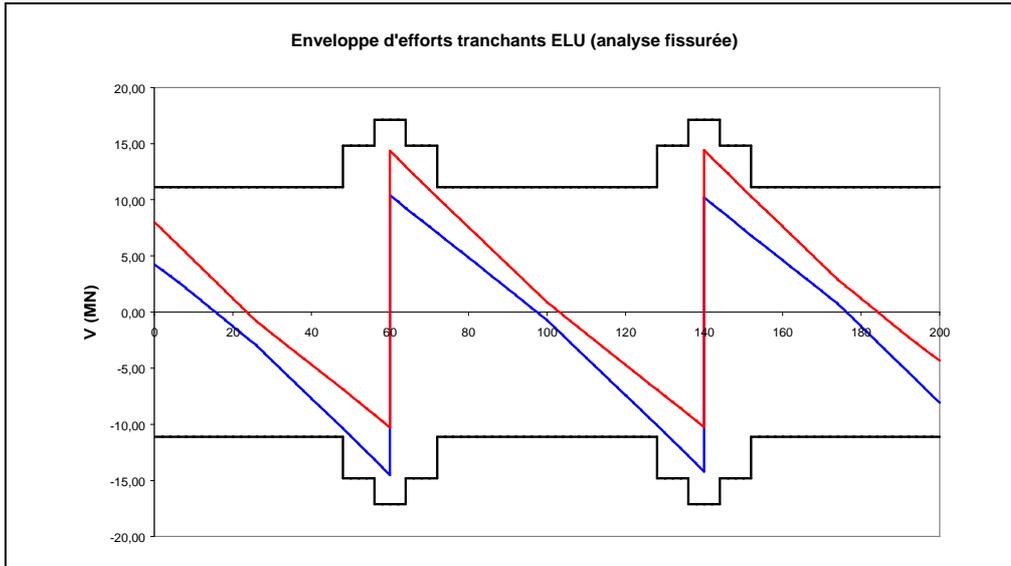


Figure 5.3. 18 Enveloppe d'effort tranchant ELU

d. Interaction M/V

On vérifie l'interaction entre moment et effort tranchant par le critère suivant :

$$\eta_1 + \left[1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right] [2\eta_3 - 1]^2 < 1,0$$

Cette expression est valable quelle que soit la classe de la section, à la fois en moment positif et en moment négatif :

- lorsqu'on est en calcul élastique, $\eta_1 = \sigma / f_{yw}$ et $\eta_3 = V / V_{c,Rd}$
- lorsqu'on est en calcul plastique, $\eta_1 = M / M_{Rd}$ et $\eta_3 = V / V_{c,Rd}$

La figure suivante représente l'enveloppe du critère d'interaction : le critère est bien sûr dimensionnant sur appui.

Commentaire : sur appui, le rapport $M_{f,Rd} / M_{pl,Rd}$ est proche de 1 : le fait de supprimer l'âme réduit peu la résistance de la section. Le terme d'interaction est donc affecté d'un coefficient $[1 - M_{f,Rd} / M_{pl,Rd}]$ proche de 0. Cela explique qu'on ait pu dimensionner les sections sur appui avec à la fois η_1 et η_3 proches de 1 (voir paragraphes précédents).

Remarque : en toute rigueur, il aurait fallu considérer l'interaction M/N/V, l'effort normal étant dû aux effets thermiques à l'ELU. En fait, l'effort normal est très faible devant l'effort normal résistant, ce qui rend nul le terme d'interaction.

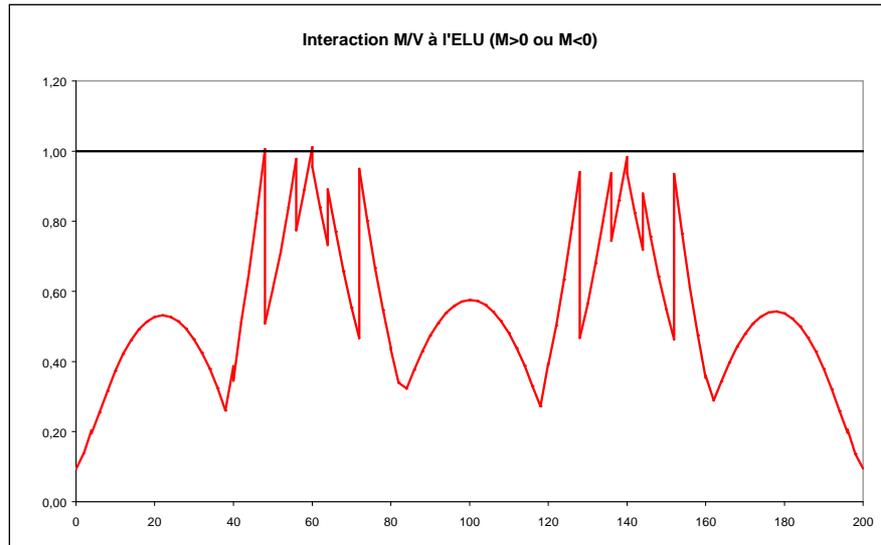


Figure 5.3.19 Interaction M/V à l'ELU

NB : l'EC3 demande la vérification au feuillet moyen de semelle. Ici c'est la contrainte au niveau de la fibre extrême qui est tracée.

5-3-5 Tonnage d'acier

Le tableau ci-dessous présente les quantités d'acier nécessaires pour les trois solutions présentées précédemment. Toutes les comparaisons se basent sur le tonnage des poutres principales, sans tenir compte des éléments transversaux. La diminution du poids d'acier est de 33 %, ce qui correspond à un gain de poids de 7% sur le poids total du tablier (acier, béton, superstructures).

	SOLUTION 1 Poutres S355	SOLUTION 2 Poutres hybrides S355/S460	SOLUTION 3 Poutres hybrides S460/S690
Tonnage d'acier	857 tonnes (+ les quelques tonnes sup liées aux sections intermédiaires de transition)	627 tonnes	566 tonnes
Écart de poids/solution 1		-17,00%	-34%
Écart de poids/solution 2			-10%

Pour la solution S355/460 la diminution de poids d'acier est de 17% par rapport à la solution de base S355. La solution S460/690 permet de réduire le poids de 34% par rapport à la solution de base et de 10% par rapport à la solution S355/460.

⇒ Le chiffrage économique comparatif de ces solutions est traité au chapitre 5-6

5-3-6 Vérifications à la fatigue

Détermination des zones fissurées

Pour le calcul des contraintes sous des actions de fatigue, il convient de calculer les contraintes à l'état limite de service (NF EN 1993-1-9 §5 (1)).

On calcule alors les enveloppes de contraintes dans la dalle sous les combinaisons ELS caractéristiques. Si la contrainte est supérieure à la valeur limite $2 f_{ctm}$, le calcul des sollicitations et des contraintes sous des actions de fatigue dans cette zone se fera en considérant la dalle fissurée.

$$2 f_{ctm} = -8,1 \text{ MPa} \quad (\text{cf chapitre 5-3-3})$$

5-3-6-1 Justification à la fatigue

➤ La justification vis-à-vis de la fatigue consiste à vérifier :

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}$$

Où :

- $\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \phi_2 \Delta\sigma$ Etendue de contrainte équivalente pour 2.10^6 cycles
- $\Delta\sigma$ Etendue de contrainte de référence en considérant l'état de fissuration de la dalle sous l'enveloppe des combinaisons ELS caractéristiques
- ϕ_2 Coefficient dynamique égal à 1 pour les ponts routiers
- $\Delta\sigma_c$ Catégorie de détail
- $\gamma_{Ff} = 1$
- λ Coefficient d'équivalence de dommage = $\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4$
 - λ_1 tient compte de la longueur de la ligne d'influence.
 - λ_2 tient compte du volume et de la composition du trafic annuel.
 - λ_3 durée d'utilisation
 - λ_4 effet de croisement.

λ_1

Pour les moments :

Lieu de la section	Longueur de la ligne d'influence	Valeur de λ_1
Travée C0-P1	51 m	2.14
Sur appui P1	21 m	1.835
En travée P1-P2	56 m	2.09
Sur appui P2	21 m	1.835
Travée P2-C3	51 m	2.14

λ_2

λ_2 rend compte de la composition du trafic : $\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \left(\frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{\frac{1}{5}}$

Le nombre indicatif de véhicules lourds prévus par an et par voie lente doit être donné par le cahier des charges du projet. A défaut de cahier des charges, le guide retient les hypothèses suivantes :

- une catégorie de trafic 2 (soit "route et autoroute avec un trafic de camions moyens"). Le nombre indicatif de véhicules lourds prévus par voie lente est alors de $N_{obs} = 0,5 \cdot 10^6$;
- une composition du trafic longue distance définie pour le modèle de charge de fatigue n°4 (FLM4). Le poids moyen Q_{m1} des camions par voie lente est alors $Q_{m1} = \left(\frac{\sum n_i Q_i^5}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{5}} = 445 \text{ kN}$.
- $Q_0 = 480 \text{ kN}$ (poids de FLM3)
- $N_0 = 0,5 \cdot 10^6$.

On obtient finalement $\lambda_2 = 0,927$.

λ_3

λ_3 est fonction de la durée de vie souhaitée de l'ouvrage.

Pour un ouvrage d'art, elle est de 100 ans et $\lambda_3 = 1,00$.

λ_4

On a deux voies lentes sur l'ouvrage

$$\lambda_4 = \left[1 + \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 \right]^{\frac{1}{5}}$$

$$\eta_1 = 15.75/12 = 1.3125$$

$$\eta_2 = 3.75/12 = 0.3125$$

On prendra ici $N_1 = N_2$ (autant de poids lourds sur chaque voie lente) et $Q_{m1} = Q_{m2}$ (même type de camion sur les deux voies lentes).

donc $\lambda_4 = 1,0002$.

Ainsi les valeurs finales de λ et λ_{max} sont :

Pour les moments :

Lieu de la section	Longueur de la ligne d'influence	Valeur de λ_{max}	Valeur de λ
Travée C0-P1	51 m	2	1.984
Sur appui P1	21 m	1.8	1.701
En travée P1-P2	56 m	2	1.938
Sur appui P2	21 m	1.8	1.701
Travée P2-C3	51 m	2	1.984

➤ Effet de l'épaisseur

La variation d'épaisseur entre deux semelles principales soudées bout à bout est limitée à une fois l'épaisseur de la semelle la plus mince. Si cette variation d'épaisseur excède 0.5 fois l'épaisseur de la semelle la plus mince, la vérification à la fatigue se fait en majorant la contrainte de calcul par un coefficient k donné par la relation :

$$k = 1 + 0.4 \times \left(\frac{t_2}{t_1} - 1.5 \right)$$

Avec t_2 : ép. de la semelle épaisse et t_1 : ép. de la semelle mince

Pour les soudures transversales à la direction des contraintes normales, les catégories de détail doivent être pondérées par $\left(\frac{25}{t_1} \right)^{1/4}$ pour la prise en compte de l'effet de forte épaisseur ($t_1 > 25$ mm).

➤ Coefficient partiel de sécurité

Détail non accessible et élément non redondant $\gamma_{Mf} = 1,35$

Détail accessible et élément non redondant $\gamma_{Mf} = 1,15$

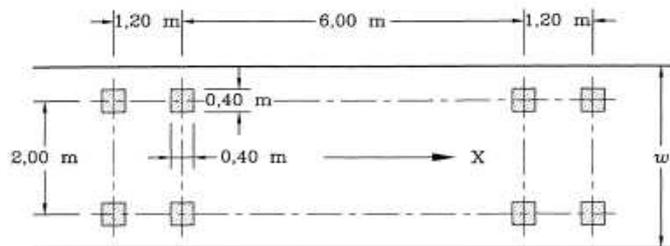
Tableau 3.1 — Valeurs recommandées pour les facteurs partiels de résistance à la fatigue

Méthode d'évaluation	Conséquence de la ruine	
	conséquences peu importantes	conséquences importantes
Tolérance de l'endommagement	1,00	1,15
Durée de vie sûre	1,15	1,35

➤ Convoi de fatigue

Le pont dans son état final étant à deux sens de circulation, on a deux voies lentes sur le tablier et ainsi l'effet de croisement est à prendre en compte.

L'étendue de contraintes en service routier est due au modèle de fatigue 3 de l'Eurocode (FLM3). Ce modèle consiste en quatre essieux, chacun ayant deux roues identiques et le poids de chaque essieu est égal à 120 kN.



Légende

- w_1 largeur de la voie
- X axe longitudinal du pont

Figure 4.8 — Modèle de charge de fatigue 3

On utilise le modèle du pont en service en considérant les zones de la dalle fissurée et l'action du modèle de fatigue 3.

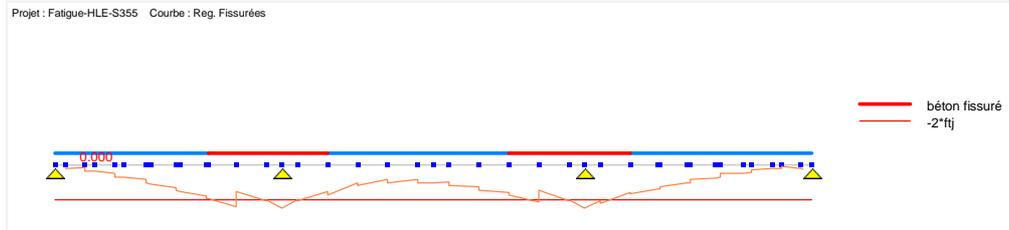
Le modèle de charge FLM3 est majoré par le coefficient λ

➤ Catégories de détail à vérifier

- Détail 1 - Semelle inférieure - soudure d'âme de montant 80
- Détail 2 - Semelle supérieure en présence des goujons 80

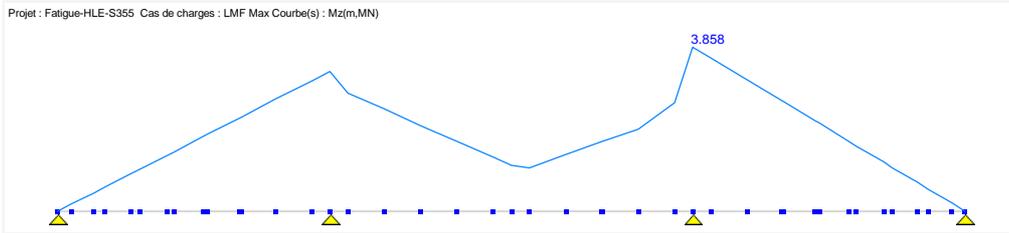
Solution avec acier S355

- Zone de fissuration sous l'enveloppe ELS caractéristique

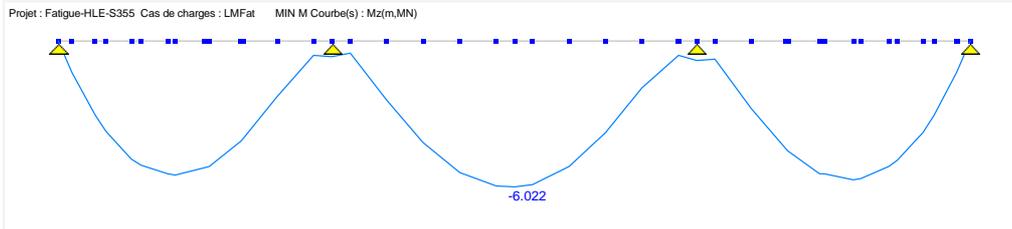


- Moment sous le passage du convoi LMF3

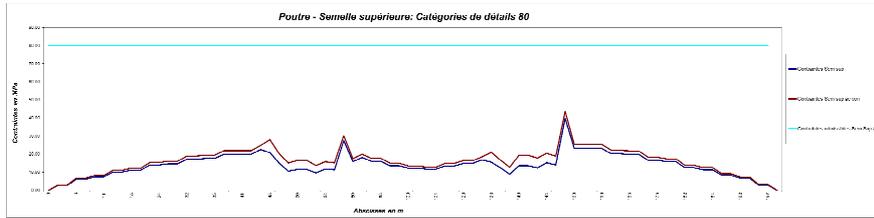
M max



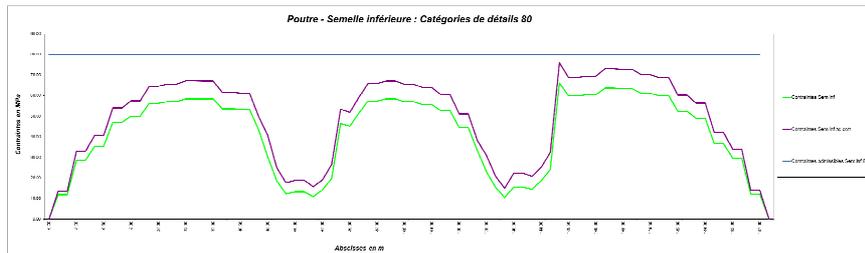
M min



➤ Vérification du détail 1 - semelle supérieure



➤ Vérification du détail 2 - semelle inférieure

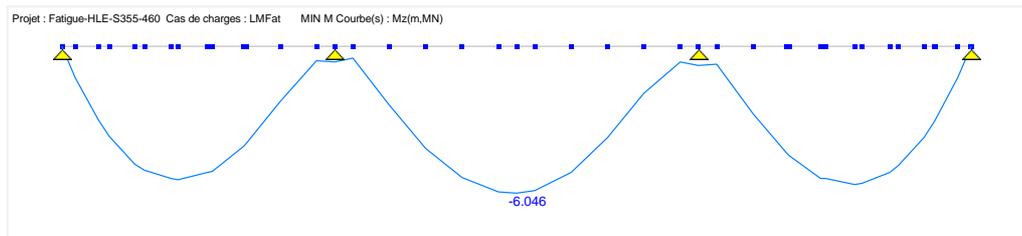
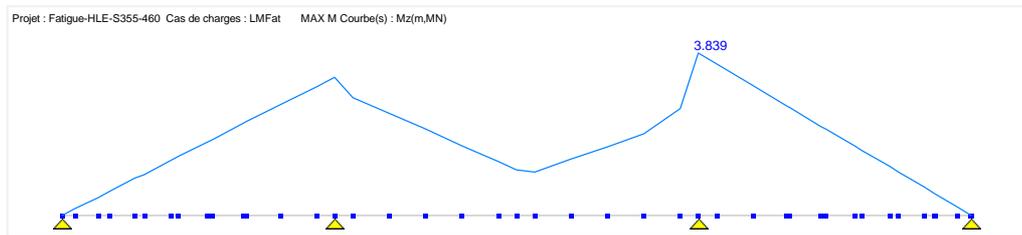


PRS Hybrides avec acier S460 pour les semelles et 355 pour l'âme

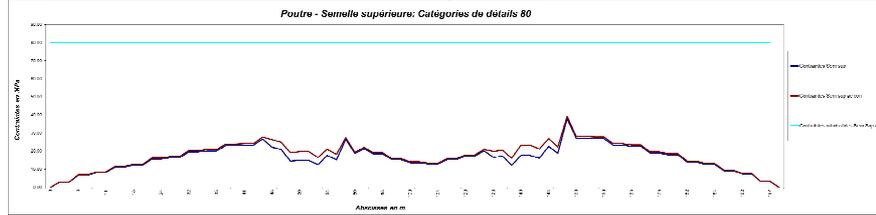
➤ Zone de fissuration



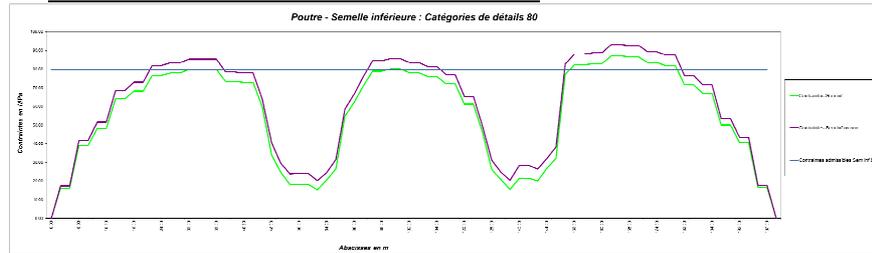
➤ Moment sous le passage du convoi LMF3



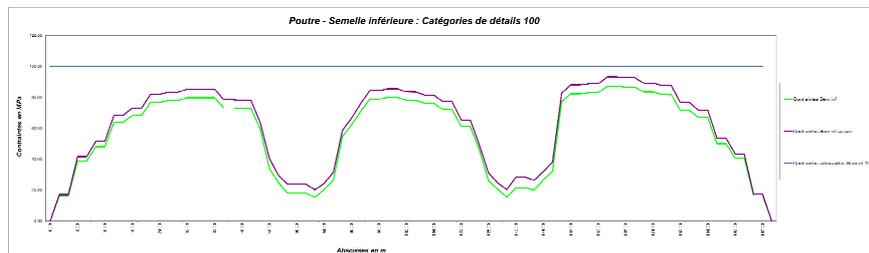
➤ Vérification du détail 1 - semelle supérieure



➤ Vérification du détail 2 - semelle inférieure



Le détail 2 de la semelle inférieure de la solution 2 présente un dépassement des soudures en travée. Le résultat avec un parachèvement a montré une tenue à la fatigue satisfaisante pour cette solution.

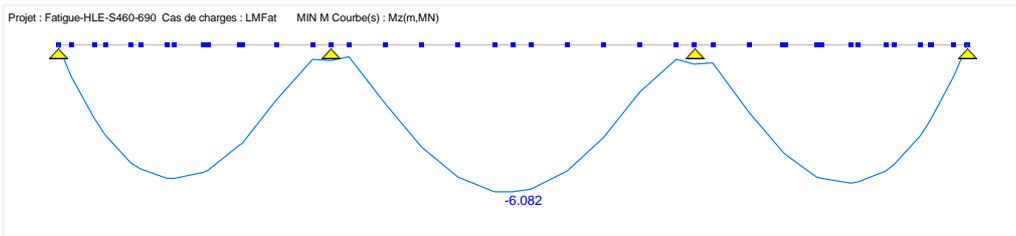
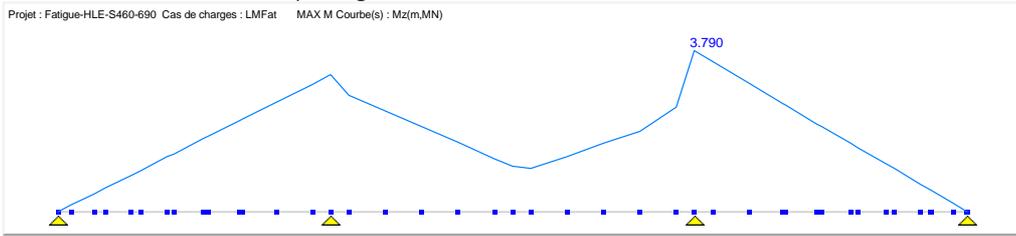


PRS Hybrides avec acier S690 pour les semelles et 460 pour l'âme

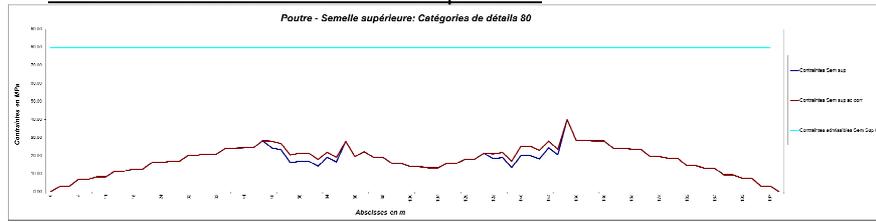
➤ **Zone de fissuration**



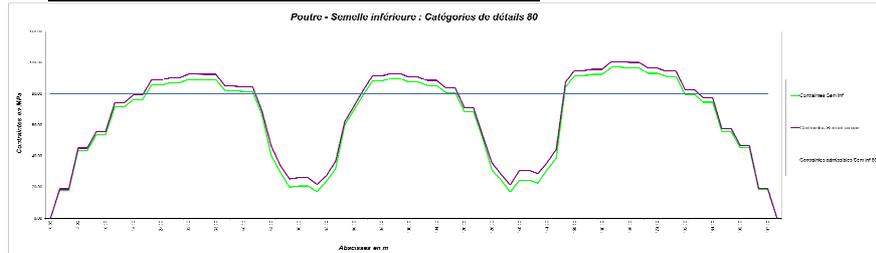
➤ **Moment sous le passage du convoi LMF3**



➤ Vérification du détail 1 - semelle supérieure



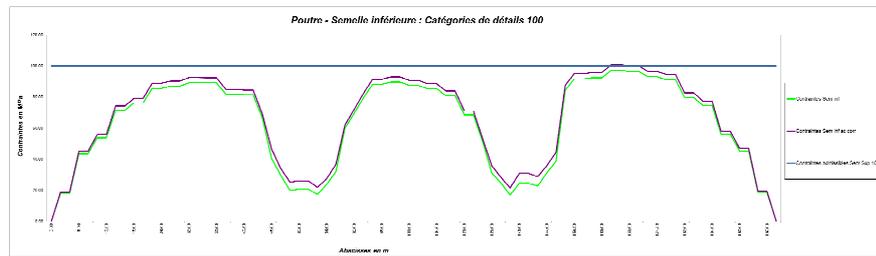
➤ Vérification du détail 2 - semelle inférieure



Le détail 2 de la semelle inférieure de la solution 3 présente un dépassement des soudures en travée.

Le résultat avec un parachèvement a montré une tenue à la fatigue satisfaisante pour cette solution.

(Le parachèvement est une solution. Une autre peut être un changement d'épaisseur.)



5-4 CAISSONS MIXTES HYBRIDES (travée principale 120 m)

5-4-1 Présentation des deux solutions (S355 - S460/S690)

L'ouvrage est un pont routier à cinq travées, constitué de deux travées de rive de 90 m et de trois travées principales de 120 m, de hauteur constante. L'ouvrage supporte quatre voies de circulation de 3.50 m et deux bandes d'arrêt d'urgence de 2.06 m, soit une largeur totale de 21.50 m. Il s'agit d'un caisson mixte, constitué d'un caisson ouvert métallique de 4.00 m de haut, dont le fond de caisson et les âmes sont raidis longitudinalement par des augets métalliques, et d'une dalle en béton armé d'une épaisseur moyenne de 0.325 m. La Figure 5.3.1 et la Figure 5.4.2 représentent le profil en long et le profil en travers de l'ouvrage

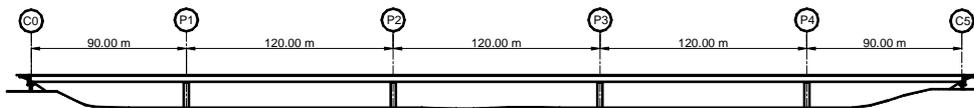


Figure 5.4-1 : Profil en long

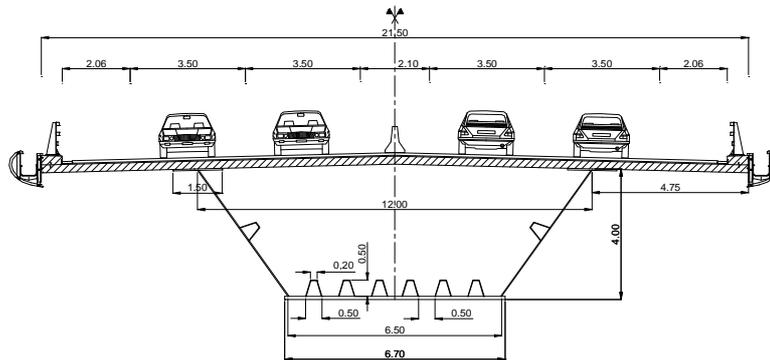


Figure 5.4-2 : Profil en travers

Deux dimensionnements ont été effectués :

- le 1^{er} ouvrage est entièrement en acier S355. Etant données la portée et la largeur de l'ouvrage, une semelle additionnelle est nécessaire au niveau des membrures supérieures du caisson autour des appuis intermédiaires.

- le 2^{ème} ouvrage est en acier S460 et S690. Dans les zones proches des piles, la section du caisson est hybride avec les membrures supérieures en S690, et les âmes et la membrure inférieure en S460. Le caisson métallique est entièrement constitué d'acier S460 dans le reste de l'ouvrage. La Figure 5.4-3 représente les zones homogènes et hybrides de l'ouvrage.

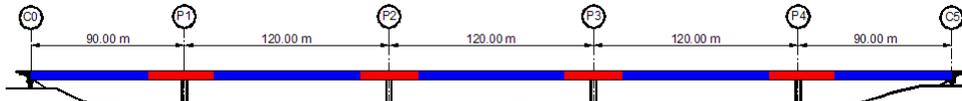


Figure 5.4-3 : Ouvrage S460/S690 : sections homogènes (en bleu) et hybrides (en rouge)

Les deux figures ci-dessous représentent la répartition de matière des deux ouvrages.

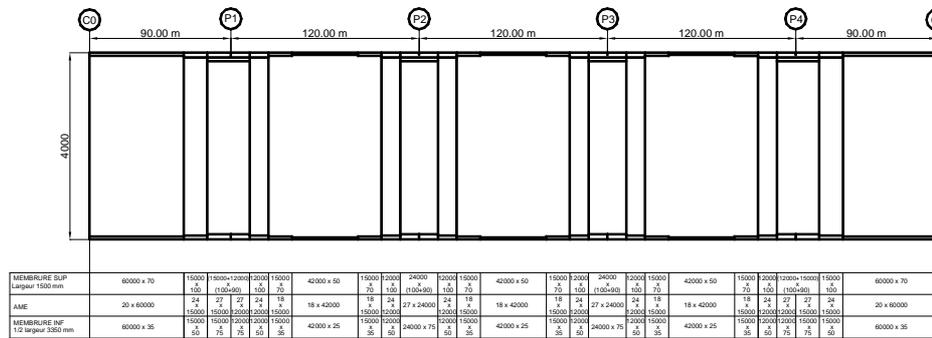


Figure 5.4-4 : Répartition de matières de l'ouvrage en acier 355

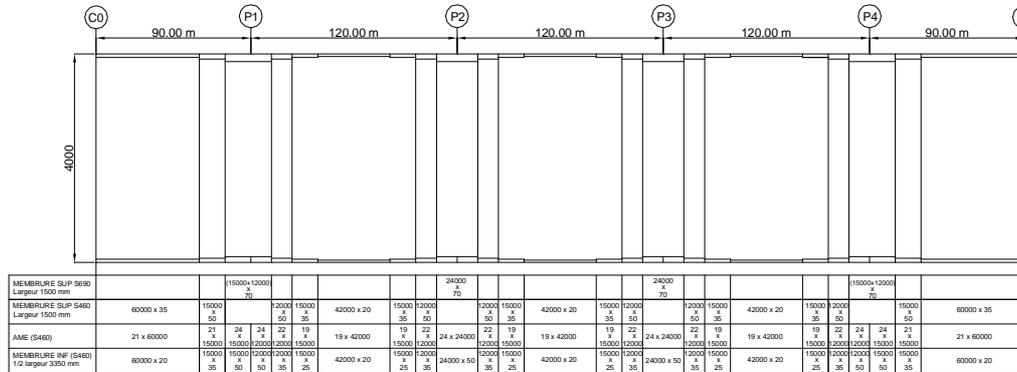


Figure 5.4-5 : Répartition de matières de l'ouvrage en acier S460 et S690

5-4-2 Diagrammes des efforts M et V à l'ELU dans les deux ouvrages

Vérification des sections sur appui et à mi-travée

Figure 5.4-6 et Figure 5.4-7 présentent les efforts (moment et effort tranchant) à l'état limite ultime dans les deux ouvrages (S355 et S460-S690).

On observe une diminution de la valeur absolue du moment de flexion sur pile de 6%, accompagnée d'une augmentation en travée de 4%. Cet écart s'explique d'une part par une diminution du poids propre de la charpente métallique dans l'ouvrage S460-S690, et d'autre part par un ratio "Inertie sur pile / Inertie à mi-travée" plus faible dans le cas de l'ouvrage S460-S690, attirant moins de moments sur piles.

La valeur de l'effort tranchant sur pile de l'ouvrage S460-S690 est également plus faible que celle de l'ouvrage S355 (de l'ordre de 5%).

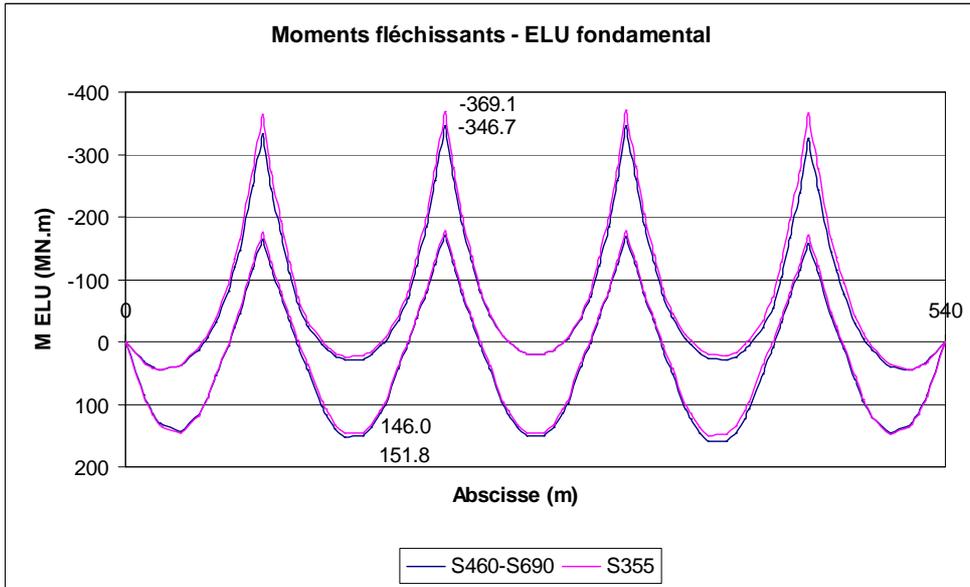


Figure 5.4-6 : Moments fléchissants à l'état limite ultime dans les deux ouvrages

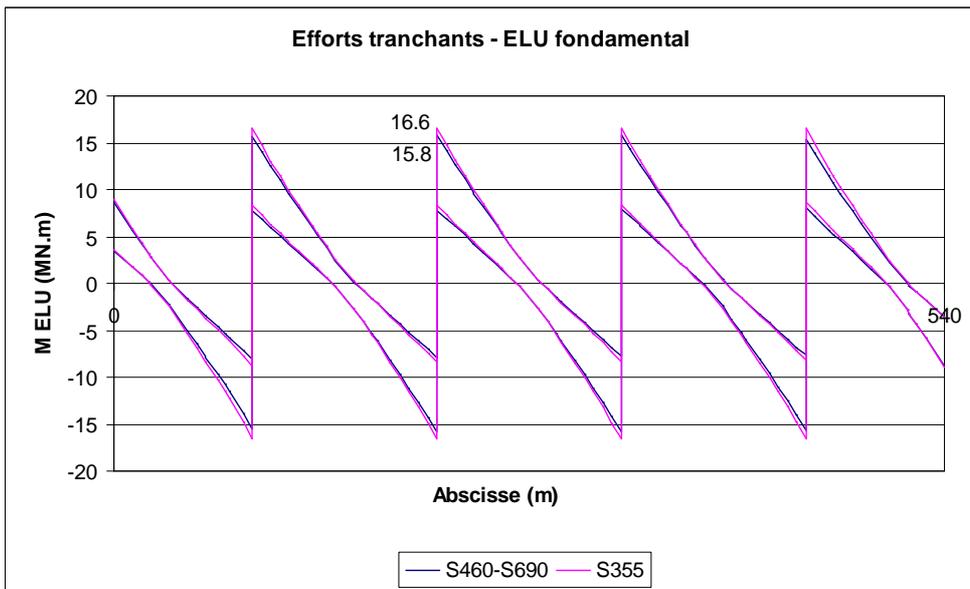


Figure 5.4-7 : Efforts tranchants à l'état limite ultime dans les deux ouvrages

Vérification à l'ELU des sections sur appui, selon les Eurocodes

Les contraintes normales à l'ELU dans la section sur pile la plus sollicitée sont représentées sur la Figure 5.4-8 pour l'ouvrage en S355, et sur la Figure 5.4-9 pour l'ouvrage en S460-S690.

Elles sont calculées en tenant compte, pour le fond de caisson, du voilement des sous-panneaux, du voilement d'ensemble de la plaque raidie, et du traînage de cisaillement, ainsi que du voilement de l'âme (qui est de classe 4). Le raidisseur de l'âme a été négligé.

Pour l'ouvrage S460-S690, on note une plastification de l'âme sur une hauteur d'environ 60 centimètres.

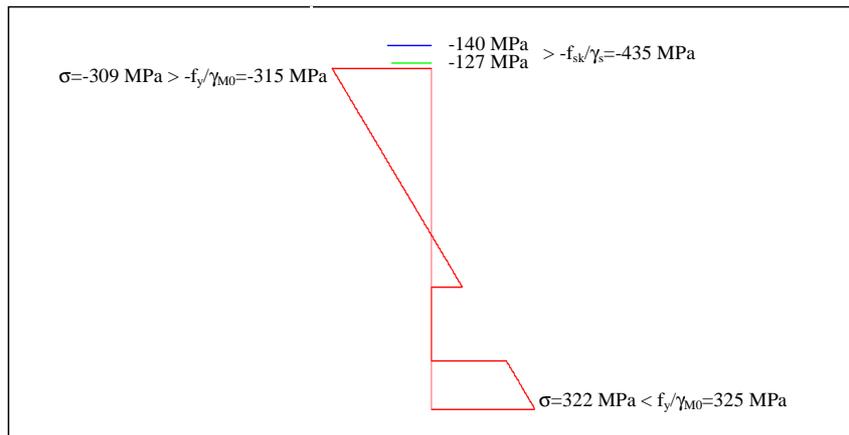


Figure 5.4-8 : Contraintes normales sur appui à l'ELU, ouvrage S355

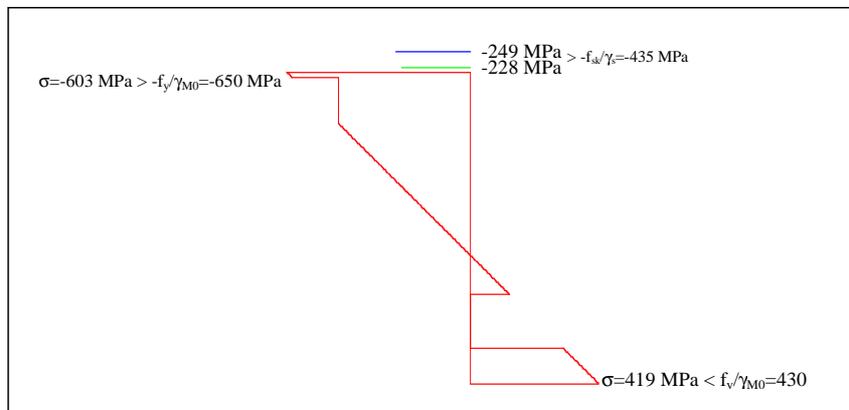


Figure 5.4-9 : Contraintes normales sur appui à l'ELU, ouvrage S460-S690

Le cisaillement dans les âmes au niveau des appuis intermédiaires est également vérifié (cisaillement et voilement par cisaillement). La section considérée comprend un auget longitudinal au milieu de la hauteur de l'âme, présent dans les sections proches des appuis intermédiaires, et un raidisseur vertical à 2.5 m de l'appui. Le tableau ci-dessous récapitule les principales étapes de la vérification du voilement par cisaillement.

	Ouvrage S355	Ouvrage S460- S690
Voilement des sous-panneaux		
<i>Elancement du sous-panneau</i>	75	87
<i>Coefficient de voilement par cisaillement</i> k_{τ}	8,0	8,1
<i>Elancement λ_w</i>	0,9	1,1
Voilement du panneau entier raidi		
<i>Elancement du panneau entier raidi</i>	170	195
<i>Coefficient de voilement par cisaillement</i> k_{τ}	46	41
<i>Elancement λ_w</i>	0,5	0,6
<i>Vérification du voilement par cisaillement avec le λ_w le plus grand</i>		
<i>Elancement λ_w retenu</i>	0,9	1,1
χ_w	0,96	0,75
$V_{b,Rd}$	21,5 MN	19,6 MN
$V_{Ed} ELU$ (projeté sur l'âme)	20,7 MN	19,3 MN
$\eta\beta$	0,97	0,99
$\eta\beta < 1,0$?	OUI	OUI

Tableau 5.4-1 : Voilement par cisaillement

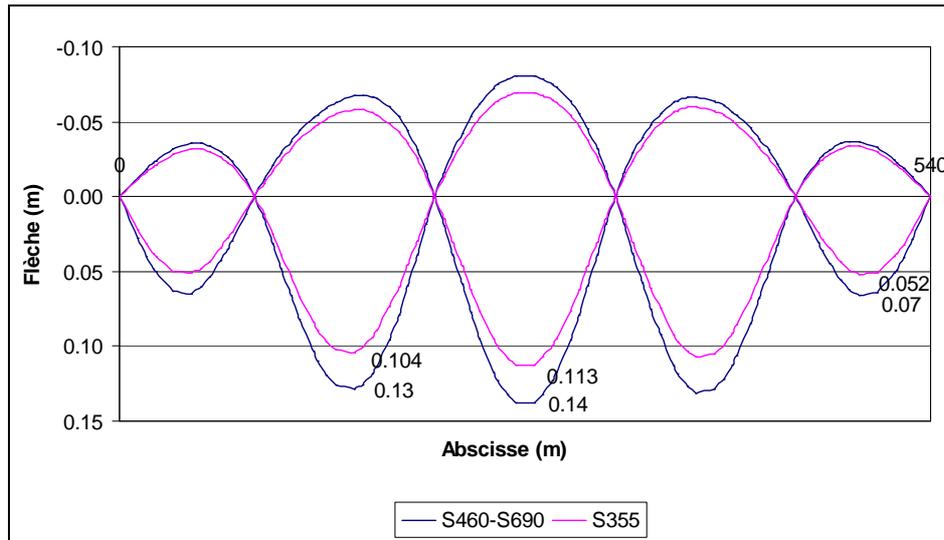
Vérification à l'ELU des sections à mi-travée, selon les Eurocodes

Le domaine d'application de la norme NF EN 1994-2 va jusqu'aux aciers S460 inclus. En cas de vérification plastique d'une section contenant de l'acier S420 ou S460, la norme EN 1994-2 (art 6.2.1.2 (2)) pondère le moment plastique admissible par un coefficient $\beta \leq 1,0$. En cas de section sous moment positif contenant des aciers S690, les documents du marché pourront proposer de vérifier les sections avec une analyse élastique puisque le coefficient β n'a pas été calibré pour l'acier S690. Cependant dans notre cas la

section à mi-travée est entièrement en acier S460 et est de classe 4, elle est donc justifiée avec une analyse élastique.

Flèches

Les flèches sous charges de trafic caractéristiques (LM1) sont présentées ci-dessous. On observe logiquement des flèches plus importantes dans l'ouvrage comprenant des aciers à haute limite d'élasticité (+ 25 % environ). Cependant, il n'y a pas de limitation de flèche dans les ponts routiers français, et les valeurs obtenues pour les deux ouvrages sont inférieures aux limitations de flèche de nos voisins européens.



5-4-3 Tonnage d'acier et chiffrage des différentes solutions

Le tableau ci-dessous présente les quantités d'acier nécessaires dans les deux caissons présentés précédemment. Toutes les comparaisons se basent sur l'acier des caissons, sans tenir compte des cadres ou diaphragmes et des éventuels raidisseurs longitudinaux des âmes (seuls sont comptées les semelles des caissons, les âmes, et les raidisseurs longitudinaux du fond de caisson). La diminution du poids d'acier est de 33 %, ce qui correspond à un gain de poids de 7% sur le poids total du tablier (acier, béton, superstructures).

	Caisson S460/S690	Caisson S355
Acier caisson (sans les cadres)	2470 tonnes	3540 tonnes
Acier S355	/	3540 tonnes
Acier S460	2301 tonnes	/

Acier S690	170 tonnes	/
------------	------------	---

Tableau 5.4- 2 : Tonnage d'acier des deux caissons

La diminution de poids d'acier, qui est en moyenne de 33%, varie selon les sections entre 23% et 41%. La réduction de poids la plus forte se rencontre logiquement dans les zones autour des appuis où l'acier S690 a été utilisé en membrure supérieure. La Figure 5.4-10 présente le gain d'acier dans les différentes sections de l'ouvrage.

Le coût de l'acier de la charpente diminue également, de 20% en moyenne pour cet exemple. La Figure 5.4-11 présente le coût de l'acier de charpente dans les différentes sections de l'ouvrage.

Le Tableau 5.4-3 présente le gain de poids et de prix des membrures supérieures, du fond de caisson, et des âmes. Seules les âmes reviennent plus cher dans l'ouvrage S460/S690 que dans l'ouvrage S355, une alternative aurait consisté à laisser les âmes en S355 dans l'ouvrage S460/S690.

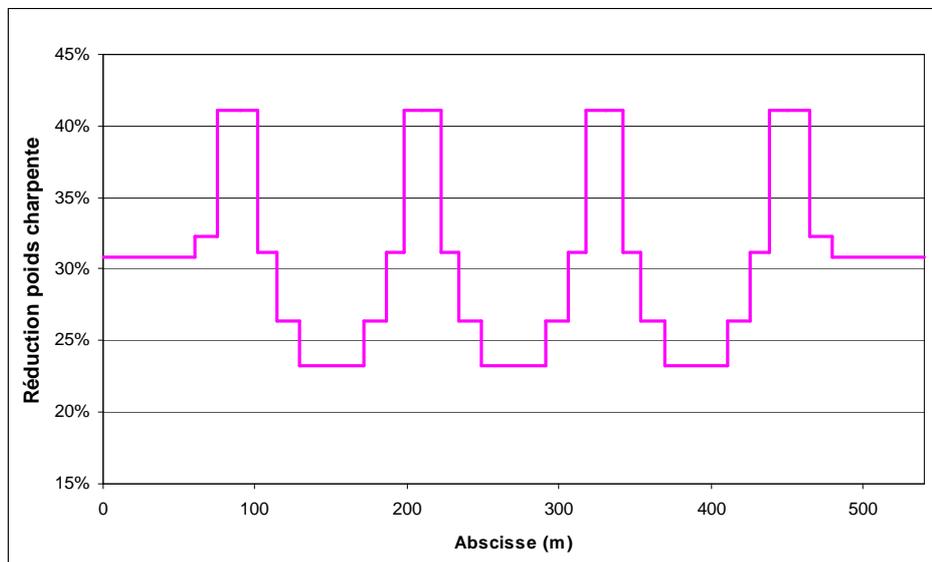


Figure 5.4-10 : Gain d'acier de charpente entre l'ouvrage S460-S690 et l'ouvrage S355

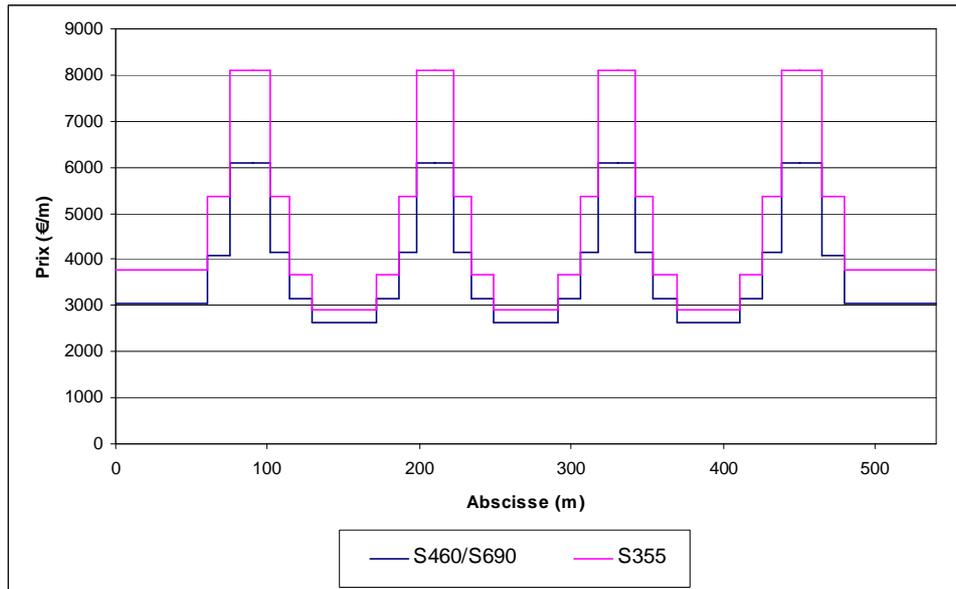


Figure 5.4-11 : Coût de la fourniture d'acier de charpente des deux ouvrages (2008)

	<i>Caisson entier</i>	<i>Membrures supérieures</i>	<i>Fond de caisson</i>	<i>Ames</i>
<i>Différence de poids</i>	-33 %	-56 %	- 32 %	- 2 %
<i>Différence de prix</i>	-20 %	-44 %	-21 %	+15 %

Tableau 5.4-3 : Différences de poids et de prix de l'acier de charpente entre le caisson S355 et le caisson S460/S690

5-5 BIPOUTRE MIXTE INNOVANT AVEC POUTRES HYBRIDES (travée principale 130 m)

5-5-1 Présentation des deux solutions (S460 - S460/S690)

L'ouvrage est un pont routier à trois travées, constitué de travées de rive de 95 m et d'une travée principale de 130 m, de hauteur constante. La largeur totale de l'ouvrage est de 21.5 m, c'est à dire la même que pour l'ouvrage décrit précédemment. Le tablier est un bipoutre mixte acier-béton, avec des poutres en I de 5.0 m de hauteur et des membrures de 1.20 m de large.

Deux dimensionnements ont été effectués :

- le 1^{er} ouvrage est entièrement en acier S460, avec une dalle classique en béton armé. Il comporte des pièces de pont tous les 4 mètres.
- le 2^{ème} ouvrage est en acier S460 et S690. Dans les zones proches des piles et au milieu de la travée centrale, la section du bipoutre est hybride avec les membrures inférieures en S690, et les âmes et les membrures supérieures en S460. La section métallique est entièrement constituée d'acier S460 dans le reste de l'ouvrage. La Figure 5.4-14 représente les zones homogènes et hybrides de l'ouvrage. La dalle a également été modifiée, puisqu'il s'agit d'une dalle alvéolaire en béton fibré ultra-performant (BFUP), inspirée de la dalle du projet national MIKTI. La Figure 5.4-13 représente le profil en travers de cet ouvrage, avec la dalle en BFUP. La présence de cette dalle permet de remplacer les pièces de pont tous les 4 m par des entretoises disposées tous les 8 m environ, sauf au niveau des appuis intermédiaires où des cadres intermédiaires ont été ajoutés. Les superstructures de cet ouvrage ont également été allégées, en considérant une couche de roulement de 6 cm et en supprimant la couche d'étanchéité.

Position des appuis	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
Longueur (m)	70	16	18	16	21	38	21	16	18	16	70
Épaisseur membrure supérieure (mm) - S460	30	35	40	40	35	30	35	40	40	35	30
Épaisseur membrure inférieure (mm) - S460	35	45	60	40	40	40	40	40	60	45	35
Nuance d'acier membrure inférieure	S460	S460	S690	S460	S460	S690	S460	S460	S690	S460	S460
Épaisseur de l'âme (mm) - S460	20	22	22	22	20	18	20	22	22	22	20

Figure 5.4-12 : Ouvrage S460/S690 : répartition des matières pour une poutre

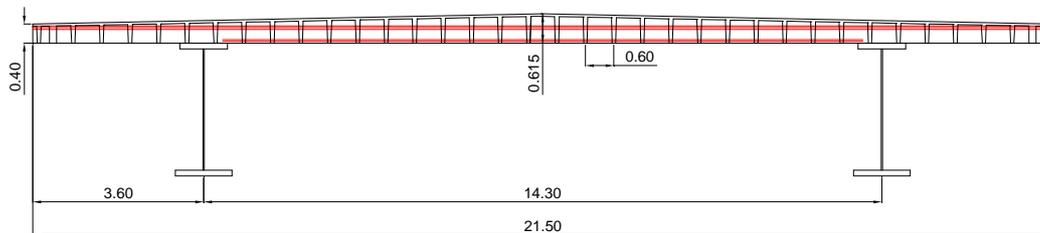


Figure 5.4-13 : Ouvrage S460/S690 : profil en travers

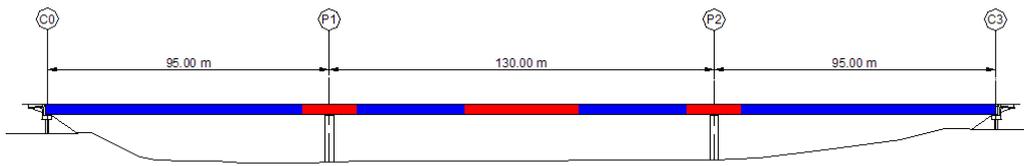


Figure 5.4-14 : Ouvrage S460/S690 : sections homogènes (en bleu) et hybrides (en rouge)

5-5-2 Tonnage d'acier et chiffrage des différentes solutions

Le Tableau 5.4-4 récapitule les poids des deux variantes. L'ouvrage innovant, avec poutres hybrides, aciers HLE et dalle BFUP a une dalle 10% plus légère que l'ouvrage classique. La présence de la dalle BFUP permet également de remplacer les traditionnelles pièces de pont (pour cette largeur d'ouvrage) par des entretoises plus espacées, qui consomment moins d'acier. Le gain de poids sur la charpente métallique est d'environ 40%.

Au final, la réduction de poids sur l'ouvrage entier est d'environ 25%, en prenant en compte le poids de la dalle, de la charpente et des superstructures.

Au niveau du coût d'un tel ouvrage innovant, on constate une diminution du prix de la charpente métallique d'environ 25%, mais une augmentation sensible du prix de la dalle en béton, due à la cherté de ce matériau de pointe et du moule spécifique qu'il faudrait fabriquer. Un ouvrage innovant de ce type pourrait devenir compétitif à condition de partager le prix du moule sur plusieurs ouvrages ayant la même dalle alvéolaire.

		Ouvrage innovant (S460-S690-BFUP)	Ouvrage de référence (S460)	Réduction de poids
Dalle	Béton dalle	3460 tonnes	4280 tonnes	10%
	Connexion	180 t		
	Câbles transversaux	69 t		
	Câbles longitudinaux	138 t		
Charpente métallique	Charpente métallique	990 t	1390 t	42%
	Eléments transversaux	192 t	652 t	
Superstructures	Superstructures	1270 t	2130 t	40%
Dalle + charpente + superstructures	Poids total de l'ouvrage	6290 t	8450 t	26%
	Part de la dalle	61%	51%	
	Part de la charpente	19%	24%	
	Part des superstructures	20%	25%	

Tableau 5.4-4 : Comparaison de poids

6. ASPECTS ECONOMIQUES ET ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

6-1 ASPECTS ECONOMIQUES

L'objet du présent chapitre est de donner quelques repères d'ordre économique permettant de comparer plusieurs possibilités de nuances d'acier dans le cadre de l'exemple traité au paragraphe 5.3.

Les choix des différentes qualités d'acier ont été dictés par :

- AN NF 1993-2 tableau 3.1 du §3.2.3(2) pour le palier de 30mm.
- l'usage issu de l'ex CIPACAS pour le palier de 80mm des aciers S355N /NL fréquent dans les cahiers des charges.

Il est à noter que ce palier de 80mm, peut-être adapté par l'utilisation adéquate du tableau 2.1 §2.3.2 de l'EN 1993-1-10 qui reste la règle générale en l'absence de stipulation contractuelle plus sévère. Il y a donc moyen, en particulier dans le cas de structures peu sollicitées réalisées dans des lieux à température clémente, d'affiner au mieux certains paliers.

Nous détaillons 3 possibilités :

Solution 1 :

Une solution de base, traditionnelle en acier S355K2, S355N, S355NL.

Nous rappelons à ce stade que la géométrie (portées, largeur) a été choisie de façon à obtenir, dans le cas de la solution 1, des épaisseurs de 150mm en S355NL c'est-à-dire le maximum des épaisseurs certifiées à ce jour dans le cadre de la marque NF.

Une solution 1bis a été aussi envisagée avec des aciers thermomécaniques S355M(L) seuls. Elle n'est pas viable du fait qu'actuellement ces produits sont limités par certification NF à une épaisseur maximale de 122mm trop faible.

Deux solutions variantes faisant appel à des « nouveautés » que sont les aciers HLE (S460M(L), S690Q(L)) d'une part et le concept de poutre hybride d'autre part.

Solution 2 :

S355K2, N, NL / S460M, ML

Solution 3 :

S355K2 / S460M (L) / S690Q (L)

Nous mentionnons ci-après quelques impératifs communs aux trois solutions de façon à réduire le champ des variantes.

- Des poids de tronçons <60T et des longueurs <48m usuellement transportables et manipulables en atelier.
- Des largeurs de semelles constantes permettant un guidage latéral aisé lors d'une mise en œuvre par lancement.
- Des aciers de construction issus des normes NF EN 10025-1 à NF EN 10025-6.
- Un calcul effectué selon EN1990, EN1991, EN1992, EN1993, EN1994 avec en particulier l'utilisation de sections de classe 4 et la constitution de poutres hybrides. Notre analyse économique portera sur le prix d'achat des aciers ainsi que sur la soudure atelier et chantier. Elle résulte d'une étude conjointe Richard Ducros, Baudin-Châteauneuf faisant suite à un dimensionnement CTICM - CETE. L'étude se limitera aux poutres longitudinales nues c'est-à-dire sans montants en té, sans raidisseurs longitudinaux, raidisseur transversaux, d'appuis ou de vérinage...), mais en incluant la soudure des goujons. La base de prix est celle de 2006/2007/2008 d'après des barèmes communiqués par des forges.

En préambule, et de façon à fixer les enjeux, nous détaillons:

1) la ventilation du tonnage d'acier dans un pont bipoutre mixte

2) le prix de revient du métal dans un pont bi-poutre mixte

ELEMENTS	TONNAGE %	OUVRAGE METAL	COÛT %
Poutre PRS	85%	Etudes	4%
Habillage	6%	Achat	36%
Entretoises	6%	Fabrication	20%
Divers	3%	Transports	5%
		Montage	30%
		Divers montage	5%

Plus précisément, la soudure chantier représente 20% du prix du montage soit environ 6 à 7% du coût global.

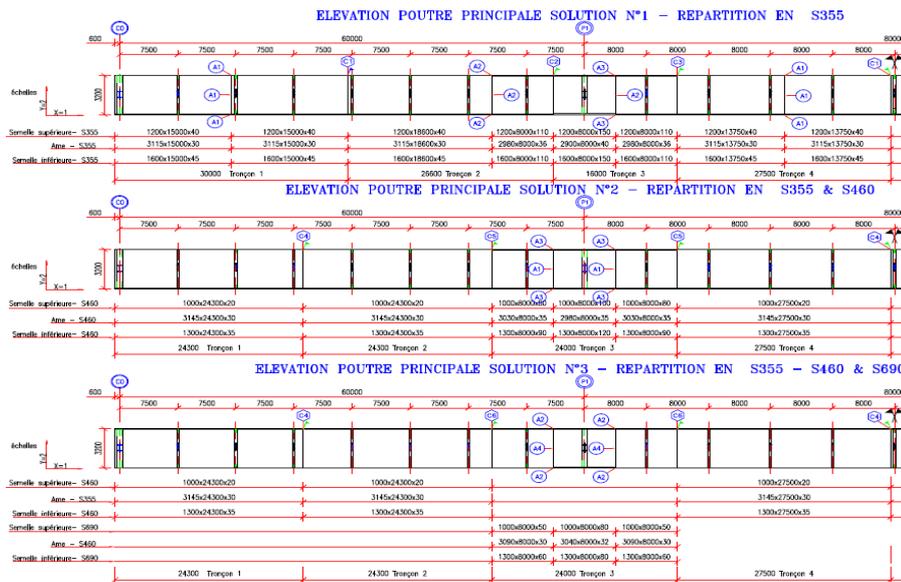
3) Les différentes étapes de fabrication

ETAPES DE FABRICATION	TRONÇON	OUVRAGE
Débit	11%	10%
Soudure bout à bout	12%	11%
Reconstitution	15%	14%
Habillage	52%	48%
Goujonnage	4%	4%
Expédition	6%	5%
	100%	92%
Entretoises, divers		8%

Entrent dans le cadre de notre étude les soudures bout à bout (pleine section des âmes et semelles) ainsi que la reconstitution du PRS.

Ces opérations représentent 25% du coût de la fabrication et donc environ 5% du coût global.

Nous avons ainsi classé par ordre décroissant d'importance de coût, les achats matière, la soudure chantier, et la soudure d'atelier de nos poutres nues. Nous analyserons ces différents postes par ordre chronologique de réalisation.



	SOLUTION 1		SOLUTION 2		SOLUTION 3	
Tronçons	Lg (m)	Poids (t)	Lg (m)	Poids (t)	Lg (m)	Poids (t)
T1	30,00	50,27	24,3	30,49	24,3	30,49
T2	26,60	57,25	24,3	30,49	24,3	30,49
T3	16,00	59,74	24	60,69 (!)	24	45,38
T4/5	28,50	45,96	28,50	35,76	28,50	35,76
Métré 16 tronçons	201,20	856,7	201,20	627,3	201,20	566,2

Dans la solution 3, nous constatons qu'il serait loisible de déplacer le joint de chantier C6 de façon à regrouper les tronçons T1 et T2 tout en restant dans des longueurs et poids admissibles. Un gain est alors prévisible en terme de transport, manutention, remplacement de joint chantier par joint d'atelier...

Nous analysons par la suite la constitution d'un prix de fourniture d'acier pour voir sur quels leviers il est possible d'agir dans le cadre d'une optimisation :

Composition du prix

Un prix est souvent composé d'un prix de base négocié sur de l'acier S185 auquel on ajoute différentes plus values. Celles-ci proviennent des écarts de nuances et de qualités, des écarts dimensionnels (épaisseur-largeur, épaisseur-longueur, poids unitaire), des certificats (ex.3.1), du transport (fer ou route). D'autres majorations sont encore à envisager : celles pour le poids du lot, les essais de Striction, d'essais particuliers (ultra-sons, Z...), des majorations d'alliage, le grenailage et la peinture éventuels.

Exemple de barème de forges (Source Dillinger Hütte GT5)

1. Prix de base	1	9. Ecart pour essais particuliers	9
2. Ecart de nuances	2	10. Ecart pour grenailage et peinture	10
3. Ecart dimensionnels	3	11. Autres majorations/minorations	11
4. Ecart pour contrôles ultra-sons	4	12. Frais de vacation pour aciers pour construction navale	12
5. Ecart pour taux de striction garanti dans le sens perpendiculaire à la surface	5	13. Conditions de livraison et de paiement	13
6. Barèmes à l'échantillon/tonnages par échantillon	6	14. Conditions générales de vente	14
7. Majorations/minorations pour alliages Majoration/Minoration pour valeur ferraille	7	15. Supplément de fret pour livraison franco de port marché allemand	15
8. Majorations pour certificats de réception et essais	8	16. Supplément de fret pour livraison franco de port marché français	16

Les barèmes -s'ils existent, et s'ils couvrent les dimensions concernées- sont des éléments d'optimisation du tronçonnement et du positionnement des joints d'atelier. Ils sont donc utiles dès les phases de conception!

A titre d'exemple nous détaillons ci-après la constitution du prix (valeur 2008) d'achat de la solution 2 .

Solution 2: S460M(L); S355M (âmes)

Désignation	Nuance qualité	Ep.	larg. (mm)	long. (m)	quantité	poids métré (t)	format commandé		Nbre de tôles commandées	poids d'une tôle cdée	poids total par format	prix de base	écart nuance	écart alliage
							Largeur	Longueur						
iem sup.	S460M	20	1000	24,3	4	15,260	2,055	24,35	2	7,856	15,712	850	188	162
iem sup.	S460M	20	1000	24,3	4	15,260	2,055	24,35	2	7,856	15,712	850	188	162
iem sup.	S460ML	80	1000	8	8	40,192	2,055	16,05	2	20,713	41,426	850	208	162
iem sup.	S460ML	100	1000	8	4	25,120	2,055	16,05	1	25,891	25,891	850	283	162
iem sup.	S460M	20	1000	28	4	17,584	2,055	28,05	2	9,050	18,100	850	188	162
Sem inf.	S460M	35	1300	24,3	4	34,717	2,650	24,35	2	17,729	35,458	850	188	162
Sem inf.	S460M	35	1300	24,3	4	34,717	2,650	24,35	2	17,729	35,458	850	188	162
Sem inf.	S460ML	90	1300	8	8	58,781	2,650	8,05	4	15,071	60,286	850	233	162
Sem inf.	S460ML	120	1300	8	4	39,187	2,650	8,05	2	20,095	40,190	850	283	162
Sem inf.	S460M	35	1300	28	4	40,004	2,650	28,05	2	20,423	40,846	850	188	162
Ame	S 355 M	30	3145	24,3	4	71,991	3,200	24,35	4	18,350	73,401	850	83	0
Ame	S 355 M	30	3145	24,3	4	71,991	3,200	24,35	4	18,350	73,401	850	83	0
Ame	S 355 M	35	3030	8	8	53,280	3,080	16,1	4	13,624	54,497	850	83	0
Ame	S 355 M	35	2980	8	4	26,200	3,030	16,1	2	13,403	26,806	850	83	0
Ame	S 355 M	30	3145	28	4	82,953	3,200	28,05	4	21,138	84,554	850	108	0

Tonnage

627,237

641,738

Désignation	Nuance qualité	Ep.	larg. (mm)	long. (m)	quantité	écart épaisseur	écart épaisseur	écart poids	Certificat 3.1 F4 TIII	Grenailage	Franco usine	Prix €/tonne	Prix total €
iem sup.	S460M	20	1000	24,3	4	15	28	0	24	28,800	21,56	1317,36	20699
iem sup.	S460ML	80	1000	8	8	36	20	41	24	20,000	19,60	1380,60	57193
iem sup.	S460ML	100	1000	8	4	56	20	56	24	16,000	19,60	1486,60	38490
iem sup.	S460M	20	1000	28	4	15	36	0	24	28,800	23,52	1327,32	24024
iem inf.	S460M	35	1300	24,3	4	15	28	0	24	28,800	21,56	1317,36	46711
iem inf.	S460M	35	1300	24,3	4	15	28	0	24	28,800	21,56	1317,36	46711
iem inf.	S460ML	90	1300	8	8	56	10	0	24	16,000	19,60	1370,60	82628
iem inf.	S460ML	120	1300	8	4	56	10	41	24	16,000	19,60	1461,60	58742
iem inf.	S460M	35	1300	28	4	15	36	41	24	28,800	23,52	1368,32	55890
me	S 355 M	30	3145	24,3	4	30	28	41	24	28,800	21,56	1106,36	81208
me	S 355 M	30	3145	24,3	4	30	28	41	24	28,800	21,56	1106,36	81208
me	S 355 M	35	3030	8	8	30	13	0	24	28,800	19,60	1048,40	57135
me	S 355 M	35	2980	8	4	30	13	0	24	28,800	19,60	1048,40	28104
me	S 355 M	30	3145	28	4	30	36	56	24	28,800	23,52	1156,32	97771

Prix total

797 212

Nous synthétisons les différents prix obtenus à des périodes différentes :

Achat (€)	2006	Fin 2007	2008	Écart (%)
Solution 1	852939	935115	981218	
Solution 2	665491	783072	797212	-18.7%
Solution 3	697118	740001	762070	-22.3%

Remarques et premières conclusions concernant le poste achat :

Peu d'ouvrages d'art sont réalisés avec du S355M(L) seul.

L'exercice est effectué à nombre de tronçons constants ce qui pénalise la solution 3.

Le joint chantier 110mm/150mm va être très pénalisant pour la solution 1.

Des développés moindres dans les solutions 2 et 3 procurent des gains en peinture non analysés ici.

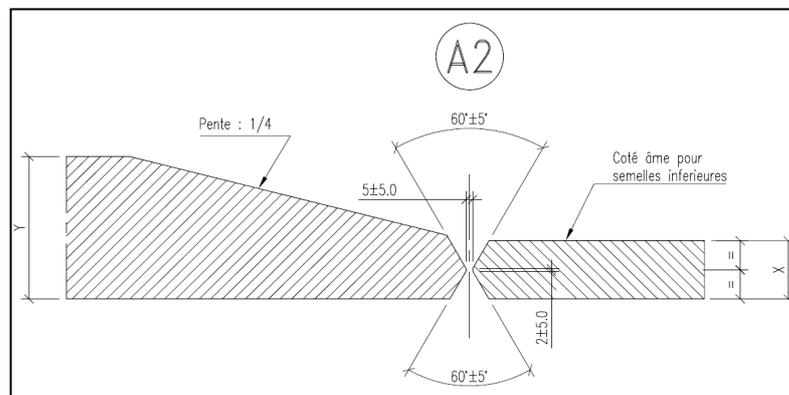
Des changements d'épaisseur limites: 20mm sur 80mm (fatigue, moments)

Recommandation: +50% par rapport à l'épaisseur la plus fine en semelle inférieure

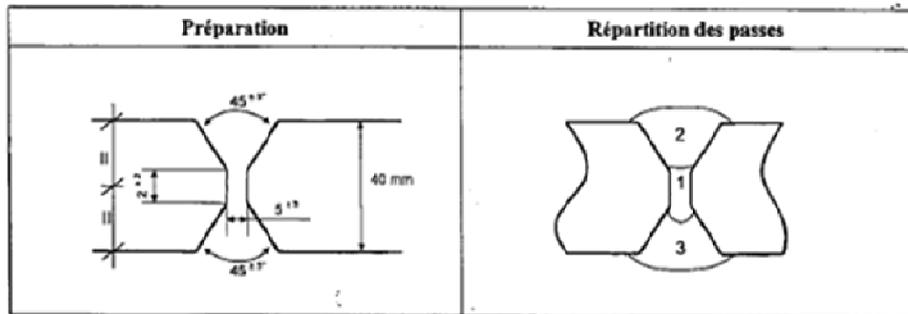
Prendre un prix moyen (2006/2007/2008) compte tenu de « variabilité » des prix d'acier sur cette période.

Soudure atelier : exemple du bout à bout de semelles du joint A2 S690QL1 / S690QL1 :

Nous reproduisons ci-après un projet de QMOS S690QL1/S690QL1 que nous comparons à un DMOS S460ML/S460M pour observer en particulier les différences sur les températures de pré et post-chauffage ainsi que sur les températures maximales entre passes :



Matériaux de base : S690	Repère du joint : Atelier - Raboutage semelles joints A2	OMOS - P.V.N° /
------------------------------------	--	---------------------------



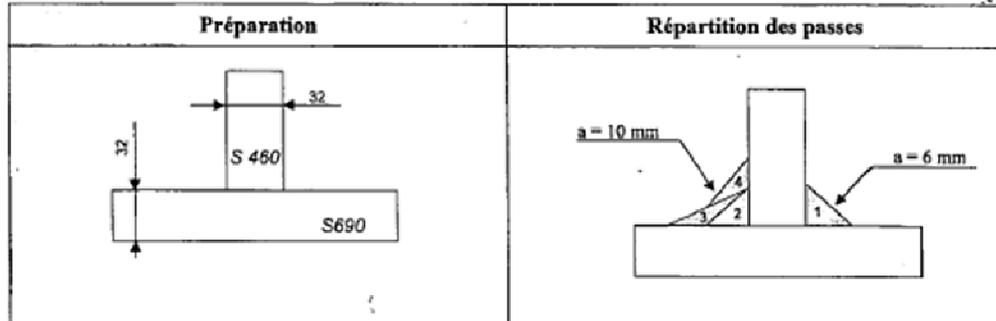
Préparation des bords : Oxcoupage Meulage /

Procédé de Soudage utilisé : Fil fourré sous gaz actif (136) + Arc submergé (121)

1	Limite d'épaisseur :	20 à 80 mm		
2	Repère de passes :	1	2	3
3	Position de soudage :	PA	PA	PA
4	Fill : Marque	LINCOLN	LINCOLN	
	Type	OUTERSHIELD 690 H	LAC M2	
5	Diamètre du fil en mm :	1,2	4	4
6	Protection : Marque et type	LINDE - MISON 12	LINCOLN - 688	
7	Débit en l/mm :	18 ±2	/	/
8	Polarité :	+	+	+
9	Température minimale de préchauffage (°C) : E < 30mm	150 ±25°C	150 ±25°C	150 ±25°C
10	Température minimale de préchauffage (°C) : E ≥ 30mm	150 ±25°C	150 ±25°C	150 ±25°C
11	Intensité I (Ampères) :	200 à 240	445 à 495	445 à 495
12	Tension U (Volts) :	24 à 31	28 à 31	28 à 31
13	Vitesse d'avance (mm/s) :	2,5 à 2,8	3,83 à 5,25	3,83 à 5,25
14	Température maximale entre passes (°C) :	≤ 180	≤ 180	≤ 180
15	Energie (kJ/mm) :	1,5 à 2,1	1,6 à 2,3	1,6 à 2,3
16	Postchauffage :	200°C minimum pendant 2 heures		
TTAS		oui <input type="checkbox"/>	non <input checked="" type="checkbox"/>	Rev <input type="checkbox"/>

Soudures atelier âme semelles : S690QL1 / S460M :

Matériaux de base : S460 / S690	Repère du joint : Atelier - Assemblage âme / semelle	QMOS - P.V.N° /
---	--	---------------------------



Préparation des bords : Oxycoupage Meulage /

Procédé de Soudage utilisé : Arc submergé (121)

1	Limite d'épaisseur :	≥ 5	
2	Repère de passes :	1 et 2	3 à 4
3	Position de soudage :	PB	PB
4	Fil : Marque	OERLIKON	
	Type	SD3 1Ni 0.25Mo	
5	Diamètre du fil en mm :	4	
6	Protection : Marque et type	OERLIKON - OP 121 TT	
7	Débit en l/mm :	/	
8	Polarité :	+	
9	Température minimale de préchauffage (°C) : E < 30mm	150 ±25°C	
10	Température minimale de préchauffage (°C) : E ≥ 30mm	150 ±25°C	
11	Intensité I (Ampères) :	≥ 475	≥ 475
12	Tension U (Volts) :	≥ 27	≥ 27
13	Vitesse d'avance (mm/s) :	≤ 8.6	≤ 8.6
14	Température maximale entre passes (°C) :	≤ 180	≤ 180
15	Energie (kJ/mm) :	≥ 1.98	≥ 1.98
16	Postchauffage :	200°C minimum pendant 2 heures	

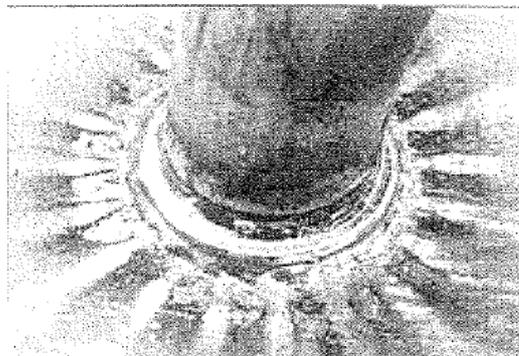
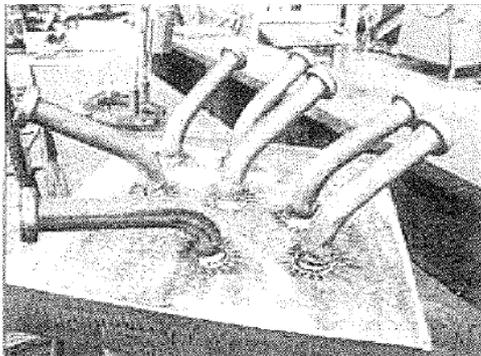
Le post-chauffage sur une poutre en mouvement peut entraîner une immobilisation de machine :



Photo 6.1.1 : Banc de soudage âme/semelle PRS (Photo CTICM - D. Bitar)

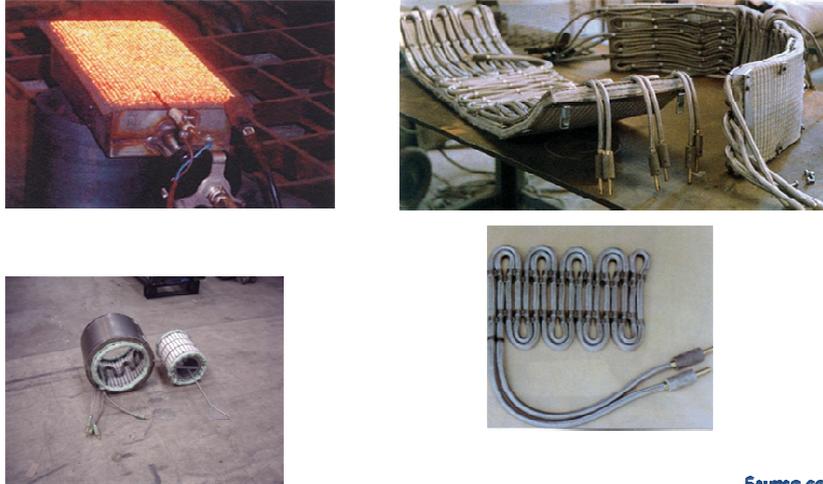
Les goujons :

Soudage sans post-chauffage de connecteurs type goujons Nelson KB 22 S235J2 sur un métal de base S690QL1.



Ce résultat est important économiquement car un post-chauffage de l'ensemble de la semelle goujonnée eut été complexe et donc coûteux.

A ce titre voici quelques dispositifs de pré ou post-chauffage de technologie soit électrique soit à gaz :



Source ceth

Photo 6.1.2 : Dispositifs de pré ou post-chauffage (Photo CTICM - D. Bitar)

Investissements nécessaires à la mise en œuvre de la solution 3 :

		Coûts (k€)
QMOS atelier	6u	12
QMOS chantier	3u	6
Rampes de chauffage	26ml	25,3
Régulation thermique, calorifugeage	1u	

Il y a lieu de prêter attention à la durée de vie des QMOS en cas d'utilisation trop occasionnelle (EN1090-2). Les rampes de chauffage concernent dans notre exemple plusieurs postes de travail, l'investissement considéré restant évidemment propres à chaque entreprise... Nous arrivons ici à un total d'investissements de 78 300 €.

Soudure chantier :

Nous constatons sur notre exemple que la soudure chantier des aciers S690Q(L) concerne en fait uniquement des assemblages hétérogènes. Comme les propriétés les moins sévères des 2 aciers définissent celles du fil, il est loisible de considérer un fil déjà utilisé pour les bout à bout en S460ML, à savoir le fil NR400. A noter qu'il est aussi utilisé pour les soudures montantes ainsi que pour les fortes épaisseurs (S355NL).

Son taux de dépôt est de l'ordre de 63% de celui du fil NR232, couramment employé en chantier sur de l'acier S355N.

Il était important d'obtenir un fil facilement disponible sur le marché et dont l'achat puisse se faire sur des quantités importantes.

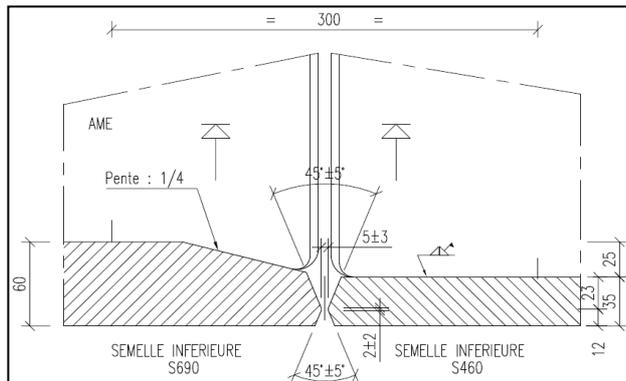
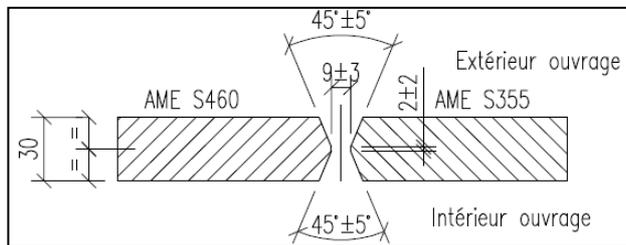
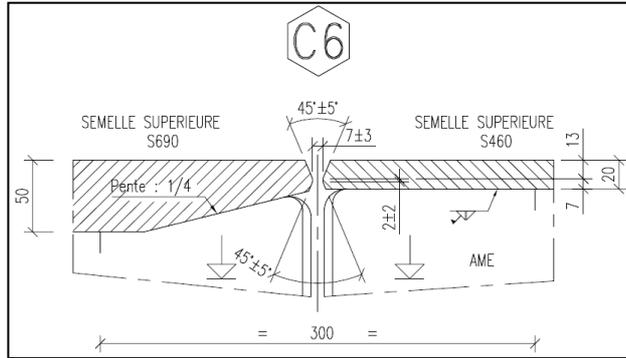
	Diamètre (mm)	Stick-out électrique (mm)	Vitesse de dévidage (cm/min)		Intensité (approx. A)	Tension d'arc (V)	Taux de dépôt (kg/h)	Ratio kg fil/kg métal déposé
NR400 →	2.0	19	150	280	150	16.5	1.20	1
			230	230	225	19.5	1.85	1.37
			280	280	265	20.5	2.35	1
	Diamètre (mm)	Stick-out électrique (mm)	Vitesse de dévidage (inch/min cm/min)		Intensité (approx. A)	Tension d'arc (V)	Taux de dépôt (kg/h)	Ratio kg fil/kg métal déposé
NR232 →	1.7	12-25	110	280	170	19	1.7	1.33
			170	430	250	21	2.7	1.33
			320	810	400	26	5.1	1.33
	1.8	12-25	80	200	130	17	1.5	1.22
			170	430	250	21	2.9	1.22
			285	730	350	24	3.0	1.22

Taux de dépôt Fil NR400 ≙
0,63 x Fil NR232

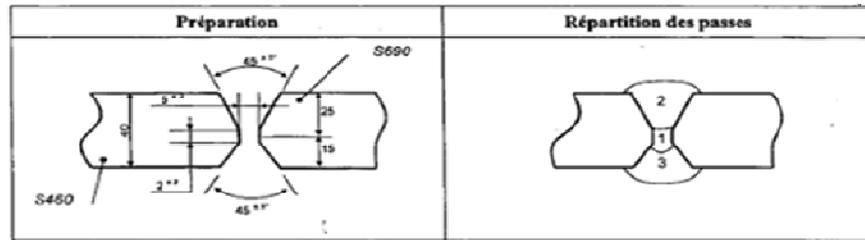
NR400
EN758 T 42 6 1Ni Y N2 H10

Mechanical tests / Caractéristiques mécaniques					Test N°: 3740		
Tension test / Essai de traction					Charpy V - notch test / Essai de résilience		
cond.	Test temp. (°C)	ReH (N/mm²)	Rm (N/mm²)	A5 (%)	Test temp. (°C)	CVN ind. values (J)	CVN aver. (J)
AW	20	512	584	27	-60	110 70 103	94

Exemples des joints de chantier solution 3 type C6: S690QL1 / S460M :



Matériaux de base : S460 / S690	Repère du joint : Chantier - joint C6	QMOS - P.V.N° 3
---	---	---------------------------



Préparation des bords : Oxycoupage Meulage /

Procédé de Soudage utilisé : Fil fourré sans gaz (114)

	20 à 80 mm		
	1	2	3
1 Limite d'épaisseur :			
2 Repère de passes :	1	2	3
3 Position de soudage :	PA	PA	PE
4 Fil : Marque	LINCOLN	LINCOLN	LINCOLN
Type	NR 400	NR 400	NR 400
5 Diamètre du fil en mm :	2	2	2
6 Protection : Marque et type	/	/	/
7 Débit en l/mm :	/	/	/
8 Polarité :	-	-	-
9 Température minimale de préchauffage (°C) : E < 30mm	150 ±25°C	150 ±25°C	150 ±25°C
10 Température minimale de préchauffage (°C) : E ≥ 30mm	150 ±25°C	150 ±25°C	150 ±25°C
11 Intensité I (Ampères) :	250 à 335	305 à 380	265 à 320
12 Tension U (Volts) :	19 à 22	21 à 24	18 à 22
13 Vitesse d'avance (mm/s) :	2,8 à 3	7 à 8,2	2,5 à 2,8
14 Température maximale entre passes (°C) :	≤ 180	≤ 180	≤ 180
15 Energie (kJ/mm) :	1,25 à 2,10	0,63 à 1,04	1,35 à 2,25
16 Postchauffage :	200°C minimum pendant 2 heures		

Soudure chantier :

Les solutions sont d'abord comparées sur la base des quantités de métal déposé découlant directement des préparations de joints soudés, elles mêmes propre à chaque entreprises. Ces valeurs sont pondérées par les différents taux de dépôt des fils. Viennent ensuite des durées estimées de préchauffage, de post-chauffage, ainsi que les temps d'attente de refroidissement entre passes.

	Métal déposé		Main d'œuvre soudage	Préchauffage meulage
	NR232 (kg)	NR400 (kg)	(h)	(h)
Solution 1	169	510	1680	202
Solution 2	7	228	729	88
Solution 3	7	223	712	118?

	Attente	Post-chauffage	Total	Écart
	(h)	(h)	(h)	%
Solution 1	0	0	1882	0
Solution 2	0	0	817	-56
Solution 3	14?	24?	868 ?	-54



(?) Estimation théorique demandant à être validée et affinée par un retour d'expériences

On constate 39% de temps en plus pour les joints C6 par rapport à C5. Dans la solution 1, les 4 joints C2 consomment à eux seuls 1010h, les 4 joints C3 consomment 317h.

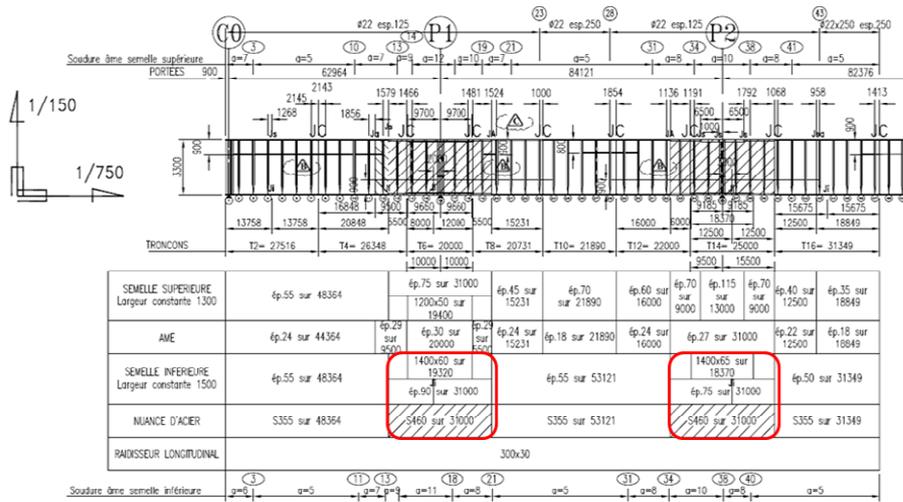
Nous listons ci-après quelques points dignes d'attention pour mettre en œuvre des aciers HLE S690Q(L). Ils nécessiteront des formations des personnels, des actions pédagogiques, ainsi que le respect de consignes plus pointues qu'avec des aciers K2, N ou M. Des achats d'équipements individuels (thermomètres laser, écrans thermiques, couvertures isolantes...) seront à envisager.

Des temps pour un redressage éventuel des semelles lors de la mise en œuvre d'épaisseur faible et de parois élancées (1000X20) devront être budgétisés. Des immobilisations de postes de travail pourront intervenir lors d'opérations de post chauffage. Il faudra faire attention à la géométrie de l'intrados des ouvrages sur piles qui feraient appel à des opérations de forgeage.

D'une manière plus générale, il y aura lieu d'apporter un intérêt particulier à l'ELS en phase provisoire. En effet un calcul des réductions d'inertie montre que les contre flèches à mettre en œuvre seront de l'ordre de 25 à 35% en plus. Il s'en suit de plus grandes difficultés de définition géométrique des éléments transversaux dans le cas d'ouvrages courbes ou dissymétriques, des aléas plus importants, un respect du profil en long plus délicat et des coefficients de chutes plus importants.

On rencontre des ouvrages de type bi-poutres de plus en plus gros qui nécessiteraient d'utiliser des épaisseurs d'acier situées au delà des limites actuelles des produits certifiés (ep.150mm pour S350NL ; ep.120mm pour S460ML). Pour pallier cela tout en restant dans un gabarit vertical constant, les constructeurs ont plusieurs possibilités. Ils peuvent mettre en œuvre des largeurs de semelles très importantes qui interdisent des approvisionnements en double largeur et induisent des coefficients de chutes conséquents du fait de la largeur minimale des brames. Ils peuvent aussi se tourner vers l'emploi de semelles additionnelles ou encore panacher les deux solutions.

Exemple de semelles additionnelles S460M (90mm+60mm et 75mm+65mm) sur le pont sur la rivière Saint-Etienne (la Réunion) :



Réalisation de semelles additionnelles sur les viaducs d'accès du 6^{ème} pont sur la Seine à Rouen.



En guise de conclusions, cette étude a montré qu'il fallait être attentif à la « fenêtre » de température de soudage comprise entre la température de préchauffage et la température maxi entre passes. Il en découle des critères de choix de fils. Les résultats, bien que partiels sont encourageants. En particulier, aucune impossibilité technique ou technologique n'a été relevée. Nous avons mis en évidence le fait qu'il faut utiliser le bon acier au bon endroit au bon moment. Le tronçonnement doit être judicieux: les joints de chantier de forte épaisseur (C2!) doivent être évités ou limités. Enfin, le besoin technique d'aciers HLE est réel du fait de l'évolution du marché, et son utilisation doit être encouragée par les donneurs d'ordre nécessairement au moyen de prescriptions.

6-2 ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

6-2-1 Les atouts de l'acier face au développement durable

L'acier peut se recycler indéfiniment et à 100 %, sans altération de ses qualités. Il possède des vertus magnétiques sans équivalent qui permettent sa séparation et sa récupération parmi les déchets de toute nature.

En France et dans le monde, la part de production d'acier issue du recyclage de ferrailles avoisine les 40 %. C'est autant de minerai préservé (même si le minerai de fer est un des éléments les plus abondants de la croûte terrestre), avec des conséquences positives sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Economie de la ressource, performances environnementales

Pour les ouvrages d'art les caractéristiques mécaniques naturelles de l'acier (rapport élevé résistance/poids notamment, d'autant plus marqué pour les aciers HLE) autorisent la création de structures porteuses élancées qui peuvent franchir de larges brèches en minimisant le nombre de piles et l'importance des fondations.

Le poids propre du tablier s'en trouve allégé. Il est alors possible, soit de réduire le volume des fondations (les charges transmises au sol étant plus faibles), soit d'adapter la longueur des travées et l'emplacement des piles en fonction de la portance du sol, soit d'augmenter les charges d'exploitation et par conséquent le trafic.

La préfabrication en atelier des éléments constructifs en acier réduit au strict minimum les nuisances de chantier. Relevant de la filière sèche, les solutions acier ne nécessitent pas d'eau sur le chantier, ce qui économise la ressource et évite les écoulements.

Les bâtiments et ouvrages d'art en acier, peuvent faire l'objet assez facilement d'une évolution, d'un élargissement pour répondre à de nouvelles utilisations ou problématiques, tout en limitant les impacts environnementaux (déchets, consommation d'énergie...).

Une construction en acier présente l'avantage de se démonter, en toute sécurité et proprement, en facilitant la séparation des matériaux et leur recyclage, sans mise en décharge. Lors de la déconstruction, les constituants de l'ouvrage sont plus facilement séparés. L'acier, aisément récupéré grâce à sa filière parfaitement organisée, permet ainsi de valoriser les autres déchets et de mieux rentabiliser l'opération de déconstruction dans son ensemble. Confort, esthétique, sécurité, économie, préservation des ressources : autant d'atouts pour la construction, autant de contributions à la démarche de haute qualité environnementale HQE.

L'acier HLE encore plus vert

Au vu des nombreux atouts des aciers HLE évoqués dans ce guide, en l'occurrence le gain de poids par rapport à un acier ordinaire et les conséquences en termes de réduction de consommation d'énergie, d'émissions de CO₂, de diminution des quantités de transport, de fondation, de soudage, etc. l'utilisation de ces aciers permet d'améliorer encore le bilan environnemental par rapport aux aciers standards.

6-2-2 Déclaration environnementale des aciers de construction (EPD)

Une déclaration environnementale (de type EPD) conforme à la norme internationale ISO 14025 a été publiée en 2010 pour les aciers de construction utilisés dans les bâtiments et ouvrages d'art.

Les sidérurgistes fabricant des produits en acier pour la construction se sont réunis pour établir et signer une déclaration environnementale de produits concernant les poutrelles et les produits plats de forte épaisseur. Celle-ci est basée sur les caractéristiques liées à l'élaboration de l'acier, au processus de fabrication des produits (filière fonte et filière électrique), mais aussi sur les données liées à la construction métallique elle-même, à la phase de vie en œuvre et à la fin de vie.

Cette déclaration établie par l'organisme de promotion allemand de la construction en acier « bauforumstahl » reprend de manière détaillée :

- la définition du produit et des notions de physique du bâtiment,
- des informations sur les caractéristiques et l'origine du matériau,
- la description de la fabrication du produit,
- des indications relatives à la transformation du produit,
- des informations sur les conditions d'utilisation, les impacts extraordinaires et la fin de vie,
- les résultats de l'évaluation du cycle de vie

Cette analyse de cycle de vie (ACV) prend en compte la matière première, la consommation énergétique, le transport de la matière première et la phase de production proprement dite de l'acier de construction, ainsi que son recyclage en fin de vie. Elle se rapporte à un kg d'acier de construction.

Les résultats de cette ACV, qui s'applique aux profilés, aux aciers marchands et aux tôles fortes indiquent les valeurs de différents paramètres environnementaux, notamment les consommations d'énergie primaire, renouvelable et non renouvelable, le potentiel de réchauffement global (abréviation GWP en anglais) exprimé en kilogramme équivalent CO₂ et le potentiel d'acidification (AP) exprimé en kilogramme équivalent de SO₂.

Aciers de construction : profilés laminés à chaud et tôles fortes				
Paramètre	Unité par kg	Production	Fin de vie	Total
Energie primaire, non renouvelable	MJ	19,48	-7,70	11,78
Energie primaire, renouvelable	MJ	0,65	-0,08	0,57
Potentiel de réchauffement global (GWP à 100 ans)	kg CO ₂ -eqv	1,68	-0,88	0,80
Potentiel d'acidification (AP)	kg SO ₂ -eqv	3,47 E-03	-1,68 E-03	1,79 E-03

Tableau 1 : Résultats de l'analyse de cycle de vie pour 1 kg d'acier de construction

Cette démarche de déclaration environnementale concerne donc le matériau intrinsèquement ; nous allons voir maintenant l'approche globale développement durable pour les ponts métalliques.

6-2-3 Une approche développement durable pour les ponts métalliques

Les évaluations développement durable des ouvrages d'art sont en général réalisées selon plusieurs axes: LCC (life cycle cost), LCA (life cycle assessment) et LCP (life cycle performance), intégrant l'évaluation sociale.

Les résultats des études d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) récentes soulignent l'importance des étapes de "production des matériaux" et de "vie en œuvre", qui décrivent les processus de réalisation des matériaux et de maintenance des structures. Ils soulignent également la nécessité de considérer attentivement l'articulation des différents processus en jeu, et donc de privilégier une approche globale pour un traitement efficace des interfaces.

6-2-3-1 L'approche globale de l'ouvrage

L'ouvrage d'art participe à la constitution d'un lien. Pour une infrastructure structurante, les impacts liés aux enjeux qui dépendent de ce lien sont bien plus importants que ceux imputables à sa réalisation et sa maintenance. D'un point de vue environnemental par exemple, les niveaux actuels d'émissions de gaz à effet de serre (GES) liés à l'usage des véhicules dépassent les valeurs associées au cycle de vie des infrastructures (réf 1).

Les processus de conception, de surveillance, de maintenance et de fin de vie constituent avec la production des matériaux les maillons d'une chaîne spécifique. Il convient donc de privilégier une approche globale de l'ouvrage (figure 1) et d'agir sur les différentes étapes de son cycle de vie pour optimiser son aptitude au service.

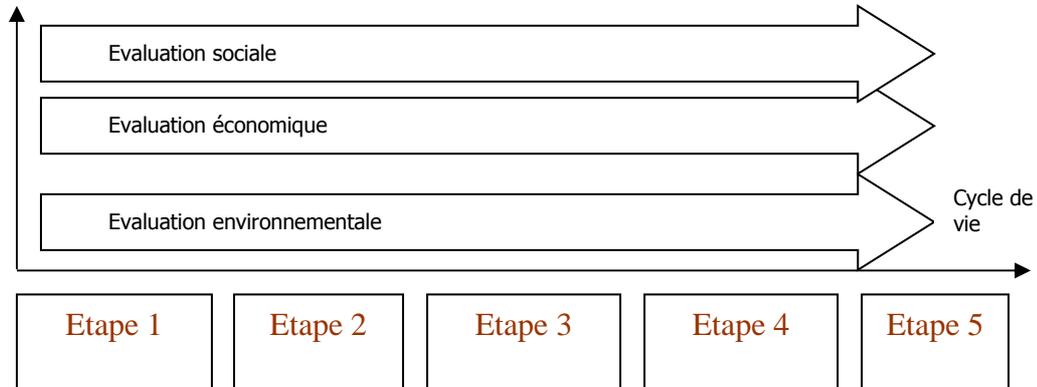


Figure 1 : principe d'évaluation globale sur les différentes étapes du cycle de vie

Cette démarche fait l'objet de plusieurs projets et recherches du Réseau Scientifique et Technique (RST) du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL). Elle peut notamment être illustrée sur des ouvrages d'art mixtes acier-béton par des choix de conception étudiés dans le projet de recherche européen « Sustainable steel-composite BRIdges in built environment » (SBRI) financé par le Fond de Recherche pour le Charbon et l'Acier : associée à une recherche de conception innovante, on retiendra en particulier l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité (HLE) et d'aciers autopatinables.

6-2-3-2 Les matériaux à hautes performances (influant sur les étapes 1, 2, 3 de l'ACV)

La possibilité offerte par les Eurocodes d'utiliser les aciers HLE, notamment dans les membrures des poutres métalliques hybrides, ouvre de nouvelles perspectives dans la conception des ouvrages mixtes. Les projets de conception en cours ou achevés (réf 2) ont permis d'évaluer des réductions significatives de quantités d'acier dans la structure en choisissant des nuances S460 et S690. L'utilisation des aciers HLE trouve sa principale justification vis-à-vis de l'étape de production des matériaux (réf 4a). Les processus associés à l'obtention de ces résistances plus élevées ne sont pas déterminants en termes d'impacts environnementaux (réf 4b). Outre une préservation de ressources naturelles, cette solution permet également des gains en termes de transport et de mise en œuvre des charpentes (soudage par exemple). En ce qui

concerne le bilan économique, les économies de matière et de soudures réalisées dépassent les surcoûts unitaires de production des aciers HLE (voir chapitre 5.6 précédent).

Du point de vue des performances, une attention particulière doit être portée aux détails de fatigue : la durabilité équivalente d'un ouvrage restant le paramètre déterminant dans le cadre d'une évaluation globale.

En considérant des critères environnementaux tels que la préservation des ressources naturelles, une analyse globale peut donc contribuer à faire émerger des matériaux à performances élevées tels que les aciers HLE et de manière générale, faciliter l'intégration des produits et procédés innovants dans le génie civil.

Nous avons tenté d'évaluer le bilan en Kg CO2 pour les 3 solutions envisagées au chapitre 5-3 et pouvons donner les ordres de grandeur suivants :

bilan CO2	Solution 1	Solution 2	Solution 3
bilan global tout compris (bétons dalle, appuis, fondations, enrobé,...)	5 400 000 kg	4 900 000 kg	4 700 000 kg
Gain global		- 9,4 %	-12,8 %
Décomposition de ces gains			
Part fourniture aciers		-6,6 %	-9 %
Part transport aciers		-0,4 %	-0,5 %
Part soudures-fabrication		- 1,4%	-1,5%
Part gain de béton (yc fourniture, transport, et HA)		-1 %	-1,8 %
	La dalle est massive et « invariable » pour les 3 solutions. On ne gagne que sur les appuis et les fondations et en fait peu car le poids de dalle et des surcharges minimise le gain de descente de charge.		

Tableau : bilan CO2 comparé entre les 3 solutions du chapitre 5-3 (S355 // S355 +S460M // S355+S460M+S690Q)

6-2-3-3 La préservation de la durabilité (étape 4)

Les ouvrages d'art calculés aux Eurocodes sont construits pour une durée de service de 100 ans. Grâce aux systèmes de certification en vigueur (NF Acier, NF BPE, AFCAB, ACQPA, ...), la qualité des matériaux permet d'envisager un accroissement significatif de la durée de vie des ouvrages bénéficiant d'une bonne conception et réalisation,

soumis à une surveillance et un entretien adaptés. Ces conditions réunies, la limite prévisionnelle pourrait donc s'en trouver repoussée de manière significative.

Les méthodes de surveillance sont étroitement liées à la durabilité des structures métalliques. Il faut pouvoir détecter très tôt l'apparition des désordres et opérer un suivi rigoureux de leur évolution.

Passé le stade du diagnostic grâce à des contrôles non destructifs, les opérations d'entretien spécialisé et les travaux de réparation doivent être conduits rapidement, sous peine d'endommagement aggravé de la structure et de surcoûts induits.

En matière de maintenance, la gestion du système anticorrosion, entretien essentiel pour un ouvrage métallique, est un exercice complexe qui peut faire appel à différents procédés. Un programme d'entretien de structure métallique peut réduire les impacts et coûts globaux en combinant astucieusement différents types d'interventions et en adaptant ainsi la maintenance aux pathologies constatées.

6-2-3-4 L'évolution de l'exploitation de l'ouvrage intégré dès le stade de la conception (étapes 3, 4, 5)

Comme il a déjà été évoqué, en raison des niveaux de trafic routiers élevés les interventions sur ouvrages génèrent des perturbations importantes. Les opérations de surveillance et d'entretien deviennent de ce fait extrêmement contraintes et ne peuvent malheureusement pas toujours être réalisées dans les conditions optimales.

Une analyse de risques à long terme doit permettre d'anticiper les évolutions de besoins d'un gestionnaire, en fonction notamment de la situation de l'ouvrage (réf 6). A titre d'exemple, si le profil en travers le permet, une augmentation de circulation peut-être envisagée sur un passage inférieur autoroutier de type bipoutres mixte en transformant la bande d'arrêt d'urgence (BAU) en voie lente (avec des mesures de sécurité d'exploitation en accompagnement) : les vérifications à la fatigue ne requièrent alors qu'un faible surdimensionnement de la structure en contrepartie de l'augmentation des flux de charges lourdes (réf 4). Sur les axes fortement circulés, le surcoût induit est alors largement compensé par les frais d'exploitation épargnés et les coûts aux usagers associées aux congestions de trafic, voire à la reconstruction d'un ouvrage.

6-2-4 Conclusion

Assurer durablement la continuation d'un itinéraire sur une brèche requiert donc une réflexion élargie. L'ouvrage métallique doit être pensé comme un investissement à long terme, soumis à de nombreuses contraintes assorties d'incertitudes quant à leur

évolution. Par ailleurs, l'acceptabilité sociale de l'ouvrage contribue à sa préservation: adaptation au milieu qui l'accueille, caractère emblématique, esthétique, accessibilité sont autant de paramètres justifiant d'un investissement raisonné (réf 7).

Les contraintes environnementales et sociales deviennent des axes d'évaluation à part entière. Ainsi, la gestion des déchets issus d'une démolition ou d'opérations d'entretien constitue un enjeu important, et doit conduire à un meilleur recyclage ou valorisation des éléments constitutifs d'une structure. Si l'acier présente de ce point de vue un aspect particulièrement intéressant, il convient de poursuivre les efforts pour généraliser la démarche.

L'approche développement durable des ouvrages d'art métalliques (analyse de cycle de vie complet de la structure) ouvre ainsi un champ de possibles en matière d'innovations techniques et de gestion de patrimoine : les évaluations globales (économique, environnementale et sociale) constituent une clé pour l'émergence de solutions plus performantes. En effet, il est intéressant (et satisfaisant) de noter une concordance des améliorations sur tous les différents aspects, comme ici pour les HLE, avec d'une part une construction en matériau plus performant techniquement, plus performant économiquement et plus performant sur l'éco-évaluation générale.

(1) Observatoire Energie Environnement des Transports (OEET) - Evaluation énergie - environnement des infrastructures de transport - Méthodologie V1, avril 2011

(2) L. DAVAINÉ, A. PETEL, J. RAOUL, "Une synthèse du projet européen COMBRI", Bulletin

Ouvrages d'Art n°62, Sétra, Décembre 2009.

(3) Projet SBRI - Mid term report, mars 2011

(4a) J. RAOUL, N. ROBERT, Y. TARDIVEL, N. Binh TA, A. ORCESI, C. CREMONA, "Projet européen SBRI" - AFGC 2011

(4b) R. Stroetmann, P. Deepe (Technische Universität Dresden) - Anwendung höherfester Stähle zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen

(5) Méthode ultrasons "Phased array" - Mid term report SBRI, mars 2011

(6) Guide méthodologique "Maîtrise des risques", Sétra - A paraître.

(7) Guide méthodologique "Ouvrages d'art et qualité de vie", Sétra - A paraître.

7. LES ACIERS A HAUTES PERFORMANCES DANS LE MONDE

Les principaux aciers à haute performance, identifiés dans le monde, sont d'origine américaine et japonaise et sont récapitulés dans le tableau ci-après et abordés dans les § 7.1 à 7.2.

Les aciers « européens » cités à titre de référence, ont été présentés de façon détaillée dans les chapitres précédents.

Pays	Désignation du HLE	R mécanique* MPa (<100mm)		Analyse chimique (max.%)* (*de la norme)									
		Re	Rm	C	Mn	S	P	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V
USA	HPS-70W	485	586-760	-	1.1-1.35	-	-	0.3-0.5	0.25-0.40	0.25-0.40	0.45-0.70	0.02-0.08	0.04-0.08
	HPS-100W	690	760-895	-	0.95-1.50	-	-	0.15-0.35	0.15-0.50	0.70-1.00	0.40-0.65	0.40-0.60	0.03-0.08
Japon	BHS 500W	500	570-720	-	-	-	-	-	0.30-0.40	0.05-0.30	0.45-0.75	-	-
	BHS 700W	700	780-970	-	-	-	-	-	0.30-0.50	0.30-2.00	0.45-0.80	-	0.20
Europe	S460M	400	500-680	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S690Q	650	760-930	0.20	1.70	0.010	0.020	0.80	0.50	2.0	1.50	0.70	0.12

7-1 LES ACIERS A HAUTES PERFORMANCES AUX USA

7-1-1 Historique du développement des aciers HPS 70 et HPS 100 W

En 1992, l'administration des routes «The U.S. Federal Highway Administration (FHWA)», a entrepris de développer avec le support de l'« American Iron and Steel Institute (AISI) » et de l'« US Navy », des aciers à Hautes Performances (HPS = High Performance Steel) pour les ouvrages d'art. L'objectif était d'améliorer non seulement, les caractéristiques de traction, mais conjointement, la soudabilité, la résistance à la rupture fragile et d'améliorer la qualité générale et l'aptitude à la mise en œuvre des aciers utilisés pour la construction des ouvrages d'art aux Etats Unis. De plus, il a été demandé de développer des qualités d'aciers, présentant également une bonne résistance à la corrosion atmosphérique (Acier « W » comme Weathering steel).

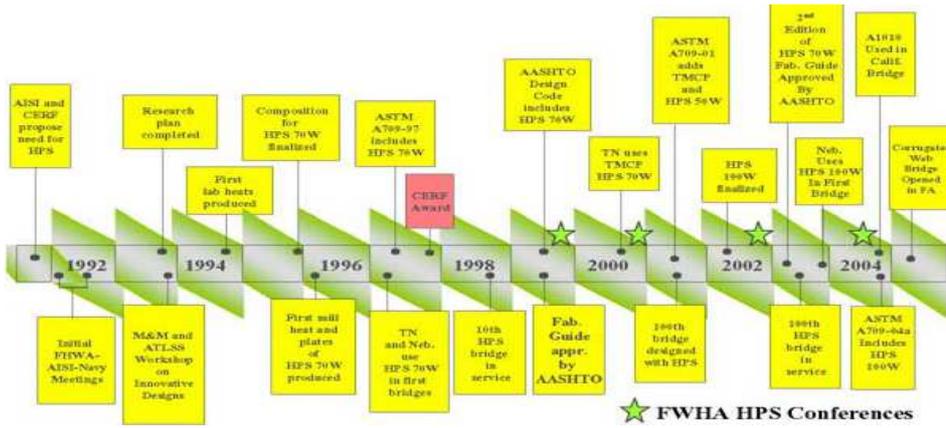


Fig. 7.1 : Chronologie du programme de développement du (des) HPS aux USA

En 1997, la nouvelle nuance HPS 70 W (ASTM A70997) a été utilisée pour la première fois pour la construction d'ouvrages d'art, comme en témoigne le Snyder bridge illustré ci-après. Pont Snyder-Nebraska : double caissons en HPS 70 W et double travées 36,60-36,60 m

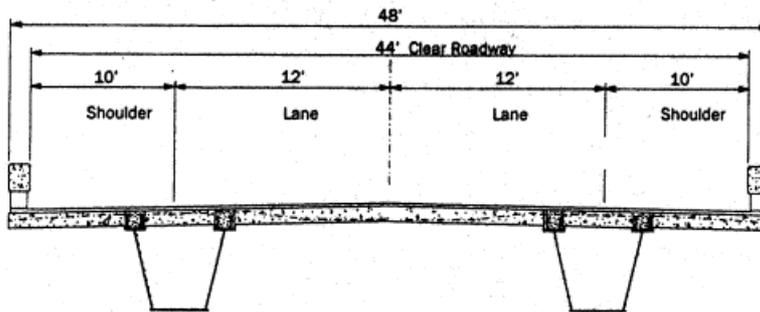


Fig. 7.2 : coupe transversale du Pont Snyder-Nebraska



Photo 7.1 : Pont Snyder-Nebraska

Aujourd'hui plusieurs centaines d'ouvrages d'art ont été conçu avec ces aciers HPS. L'année 2002 a vu la finalisation du développement des aciers HPS 100 W, qui ont été utilisés pour la première fois en 2003 pour la construction d'un ouvrage d'art.

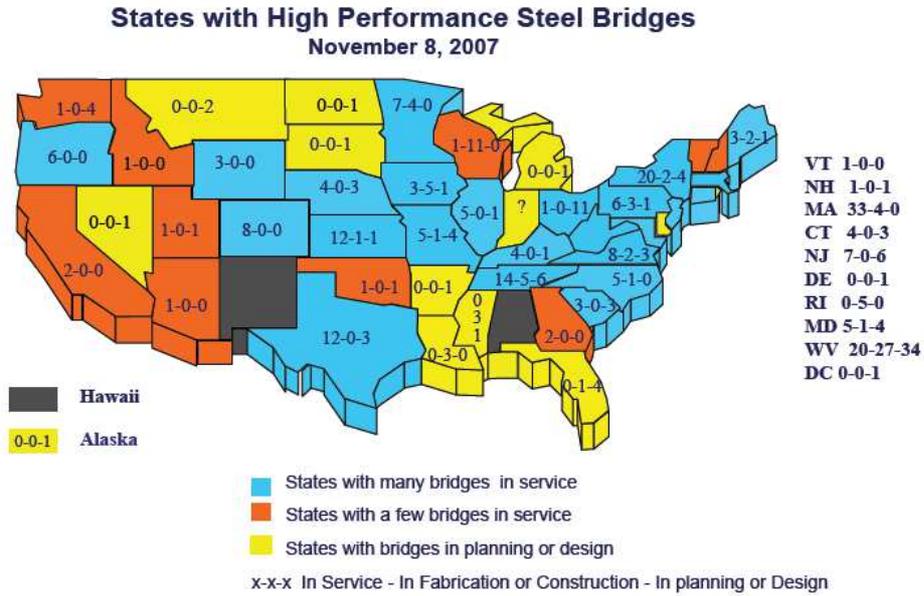


Figure 1: Roy Teal Memorial HPS Scoreboard.

Fig. 7.3 : Un inventaire de 2007 (cf carte ci-dessus) dénombrait 200 ponts en service utilisant des aciers HPS et 200 ponts en projet ou en cours de construction.

7-1-2 Les propriétés des aciers HPS 70 et HPS 100 W

- Les caractéristiques mécaniques

	HPS 50W < 100 mm	HPS 70W < 100 mm	HPS 100W < 64 mm
Re (MPa) min.	345	485	690
Rm (MPa) min.	485	586-760	760-895
CVN (48J)	-12°C	-23°C	-34°C

(CVN = Charpy V Notch (entaille))

Fig 7.4

- Les teneurs analytiques maxi (norme) sur coulée, de ces nouveaux aciers sont indiquées dans le tableau ci-après.

	%	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V
Old 70W	Min	-	0.80	-	-	0.25	0.20	-	0.40	-	0.02
	Max	0.19	1.35	0.035	0.04	0.65	0.40	0.50	0.70	-	0.10
HPS 70W & HPS 50W (1)	Min	-	1.10	-	-	0.30	0.25	0.25	0.45	0.02	0.04
	Max	0.11	1.35	0.020	0.006	0.50	0.40	0.40	0.70	0.08	0.08
Traditional 100 W (2)	Min	0.10	0.60	-	-	0.15	0.15	0.70	0.40	0.40	0.03
	Max	0.20	1.00	0.035	0.035	0.35	0.50	1.00	0.65	0.60	0.08
HPS 100W Cu Ni (3)	Min	-	0.95	-	-	0.15	0.90	0.65	0.40	0.40	0.04
	Max	0.08	1.50	0.015	0.006	0.35	1.20	0.90	0.65	0.65	0.08

(1) : traitement au calcium pour contrôle forme inclusionnaire ; Al [min 0.010 - max 0.040] ; N [max 0.015]

(2) : traitement au calcium pour contrôle forme inclusionnaire ; épaisseur maxi 65mm ; B [0.001]

(3) : traitement au calcium pour contrôle forme inclusionnaire ; ép maxi 65mm ; Nb [min 0.01 - max 0.04] ; Al [min 0.02 - max 0.05] ; N [max 0.015]

Fig 7.5

- Exemple de courbes de transition CVN typiques

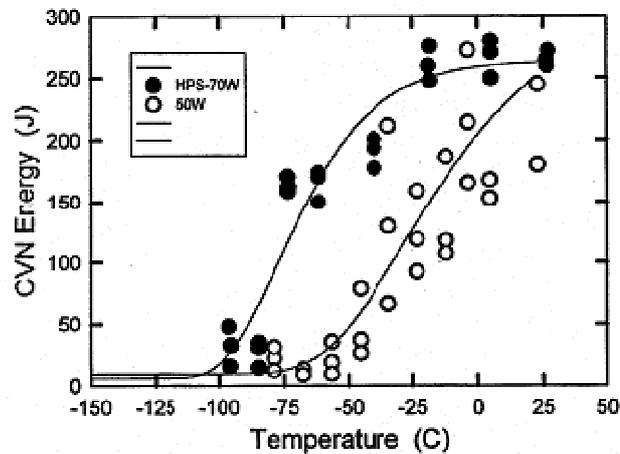


Fig 7.6

7-1-3 Mise en œuvre des aciers HPS 70 et HPS 100 W

La mise en œuvre est effectuée par des procédés de soudage à l'arc électrique et est réalisable suivant les modalités du chapitre 3.

Ces aciers sont soudables en maîtrisant les risques de développement de « fissures à froid », dans des conditions plus économiques et fiables que celles utilisées pour des aciers plus anciens de type AASTHO M270 grade 70, et nécessitent des préchauffages à des températures moins élevées, comme en témoigne les conditions reprises dans le tableau ci-dessous.

Température de préchauffage minimum	Hydrogène diffusible (*ml/100g)		
	H4*	H8*	H16*
	Ep. ≤35mm	35 mm < Ep. ≤70mm	Ep. >70mm
AASTHO M270 grade 70 W	100°C	120°C	120°C
Nouvel HPS 70 W	21°C	38°C	66°C

(*) : H4 signifie 4ml d'Hydrogène fusible pour 100g de métal de soudure déposé

Fig. 7.7

Pour plus de détails, le lecteur consultera le guide « The AASTHO - HPS Guide » ; le code de soudage « AWS - Supplementary requirements applicable to HPS » ; le guide « Use and Application of High-Performance Steels for Steel Structures » de IABSE, AIPC, IVBH.

7-1-4 Performance en résistance à la corrosion atmosphérique

Les aciers HPS 70 et HPS 100 présentent un très bon positionnement selon l'index Townsend et l'ASTM G 101, le graphe ci-dessous, situe ces aciers en terme d'index de corrosion et de pertes d'épaisseur, obtenues sur une durée d'exposition de 4 ans en milieu maritime, par rapport à un acier courant l'A36 (~S235 ordinaire).

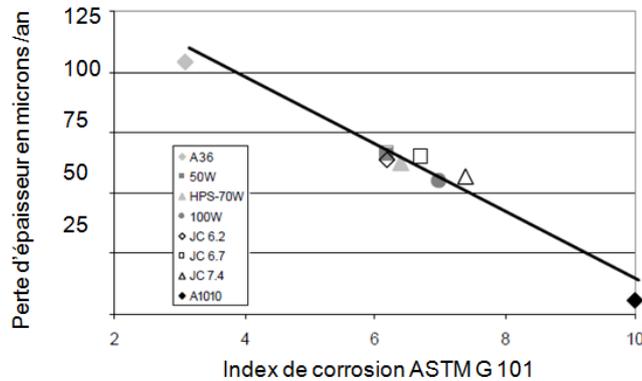


Fig. 7.8 : Perte par corrosion après 4 années d'exposition en milieu côtier océanique

7-2 LES ACIERS A HAUTES PERFORMANCES AU JAPON

7-2-1 Historique du développement des aciers BHS 500 et BHS 700

Au Japon, de nombreux efforts ont été réalisés par le passé (depuis 1960) pour utiliser les aciers à haute limite d'élasticité ($R_e \sim 460$ MPa) dans les ouvrages d'art, ce qui fait de ce pays celui qui a le plus utilisé les aciers HLE. Ces aciers avaient été standardisés selon les JIS (en 1968 nuance SM58, désormais SM570). Ces aciers étaient utilisés majoritairement pour les ouvrages de longue portée. L'utilisation de ces aciers avait progressé régulièrement pour atteindre 22% de l'ensemble des ouvrages d'art construits en 1999. Parmi ces 22%, 15% des ouvrages intégraient des aciers non seulement SM570, mais dans des qualités présentant une résistance améliorée à la corrosion atmosphérique.

Aujourd'hui, l'utilisation de ces aciers, s'est encore développée, bien qu'aucune démarche marketing notable n'ait été mise en place.

Afin d'accentuer encore l'utilisation de ces aciers, le Tokyo Institute of Technology et le Japan Iron and Steel Federation ont proposé ensemble un acier innovant spécifique à l'usage des ponts, appelé BHS « Bridge High Performance Steel » : l'un avec une limite d'élasticité de 500 MPa, l'autre avec une limite d'élasticité de 700 MPa, ainsi que ces mêmes nuances mais associées à des propriétés de résistance améliorée à la corrosion atmosphérique W, soit les nuances et qualités : BHS 500, BHS 700, BHS 500 W, BHS 700 W.



Photo 7.2 : Tokyo Bay Bridge conçu avec des aciers BHS (travée centrale de 440m) (Photo Construiracier - JM. Vigo)

A titre d'exemple le Tokyo bay bridge incorpore près de 4000 tonnes d'acier dont 30% d'acier BHS 500. Selon le maître d'ouvrage « Ministry of Land, Infrastructure and Transport », l'utilisation de ces aciers a permis de réduire le poids de l'ouvrage principal (760 mètres de longueur) de 3% et son coût de 12%.

7-2-2 Les propriétés des aciers BHS 500 et BHS 700

- Les caractéristiques mécaniques

	BHS 500 /W < 100 mm	BHS 700W < 100 mm
Re (MPa) min.	500	700
Rm (MPa) min.	570-720	780-970
KV (100J)	-5°C (KVT)	-40°C (KVL)

- Les teneurs analytiques maxi sur coulée et typiques, de ces nouveaux aciers sont indiquées dans le tableau ci-après.

	%	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Pcm
BHS 500 Std. (norme)	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max	0.11	2.00	0.020	0.006	0.55	-	-	-	-	0.20
BHS 500 Typique		0.09	1.58	0.011	0.003	0.30	-	-	-	-	0.19
BHS 500W Std. (norme)	Min	-	-	-	-	-	0.30	0.05	0.45	-	-
	Max	0.11	2.00	0.020	0.006	0.50	0.50	0.30	0.75	-	0.20
BHS 500W Typique		0.05	1.35	0.006	0.002	0.21	0.33	0.26	0.47	-	0.17
BHS 700W Std. (norme)	Min	-	-	-	-	-	0.30	0.30	0.45	-	-
	Max	0.14	2.00	0.015	0.006	0.50	-	2.00	0.80	0.60	0.32
BHS 700W Typique		0.06	1.30	0.004	0.001	0.26	1.13	1.46	0.59	0.44	0.28

7-2-3 Mise en œuvre des aciers BHS 500 W et BHS 700 W

Encore une fois, comme en témoignent les tableaux ci-après, la bonne aptitude au soudage et en particulier la résistance à la fissuration à froid de ces aciers est vérifiée par les résultats d'essai TEKKE. Seule la nuance BHS 700W demandera un préchauffage à une température de l'ordre de 50°C (donc plus proche d'un dégourdissage), pour s'affranchir du risque de fissuration à froid.

Résultat de l'essai TEKKEN sur BHS 500

Epaisseur (mm)	Procédé	Métal apport (Ø)	Ej (KJ/mm)	Température (°C) hygrométrie (%)	Résultat sans préchauffage
40	SMAW	L62-CF (4.0)	1.7	20 °C /60%	Sans fissure
	GMAW	YM60C (1.2)			Sans fissure

Résultat de l'essai TEKKEN sur BHS 700 W

Epaisseur (mm)	Procédé	Métal apport (Ø)	Ej (KJ/mm)	Température (°C) hygrométrie (%)	Résultats	
					Sans préchauffage	Préchauffage 50°C
60	SMAW	L80EL(4.0)	1.7	20 °C /60%	17% fissures	Sans fissure
	GMAW	YM80C(1.2)			Sans fissure	Sans fissure

7-3 REFERENCES D'UTILISATION

L'objectif de ce chapitre est de donner quelques exemples d'utilisation d'aciers HLE pour des applications très variées, mais non exhaustives.

7-3-1 Ouvrages d'art

Ouvrages fixes

Les ouvrages de grandes portées (> 100m) utilisent de nos jours et régulièrement des aciers HLE S460 associés à des **dalles orthotropes** à des fins d'allègement. Des ouvrages comme le pont de Normandie (S 420 M), mis en service en 1995 et plus près de nous le viaduc de Millau (S 460), mis en service en 2004, en témoignent. A noter que les pylônes du viaduc de Millau utilisent également des aciers en S460 en fortes épaisseurs en raison des contraintes auxquelles ils sont soumis et à la nécessité d'en réduire le poids propre afin d'optimiser le poids de la structure globale en raison des conditions d'installation « Un pylône et ses haubans sont installés en tête afin de limiter la déflexion du bec en phase de lancement », mais également compte tenu des opérations de mise en place des autres pylônes après clavage qui intègrent roulage sur l'ouvrage et les opérations de pivotement des pylônes.



Photo 7.3-1 : Viaduc de Millau
Tablier et pylônes - S460 (Photo Construiracier - JM. Vigo)



Photo 7.3-2 : Pont de Normandie - S 420 (Photo Sétra - G. Forquet)

Ces aciers THLE peuvent également constituer des **poutres à treillis** allégées mais extrêmement résistantes, comme en témoigne le pont suspendu d'Akashi Kaikyo au Japon, qui intègre des nuances allant de 400 MPa à 780 MPa. L'intérêt étant double puisque l'allègement était de rigueur compte-tenu de sa portée 1991m (record du monde) mais aussi de la nécessité de réduire les masses suspendues dans une région à risque sismique particulièrement élevé.



**Photo 7.3-3 : Akashi Kaikyo au Japon (record du monde de portée 1991 m)
- S 780 (Photo Construiracier - JM. Vigo)**

Pour l'ouvrage ci-dessous, situé en Allemagne sur la Nesenbachtal, l'utilisation d'acier S690 a permis de réduire considérablement l'épaisseur de son tablier de type **poutre caisson** et cela à des fins architecturales.

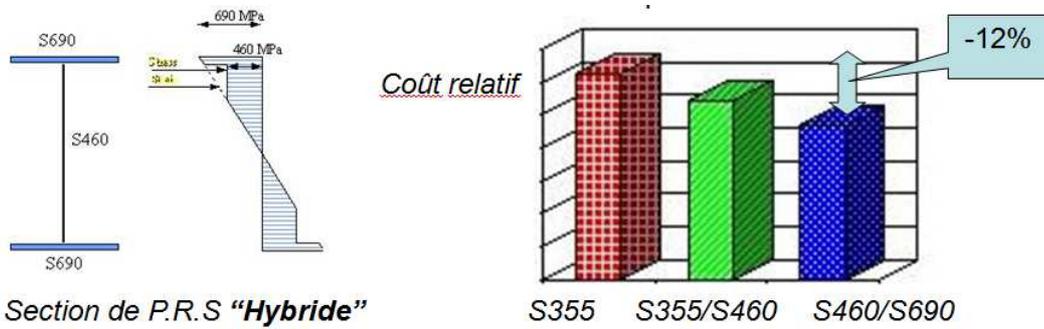


**Photo 7.3-4 : Pont sur la Nesenbachtal en Allemagne - S 690
(Photo Construiracier - JM. Vigo)**

L'EN 1993-1-5, permet aujourd'hui de concevoir des P.R.S comprenant des matériaux hybrides dans une même section. Si la limite d'élasticité des semelles ne dépasse pas deux fois celle de l'âme, la plastification de l'âme peut être admise à l'état limite ultime. Pour les ponts les contraintes doivent toutefois rester dans le domaine élastique à l'état limite de service. Pour ce bipoutre Suédois de moyenne portée, la conception à partir de poutres reconstituées soudées (P.R.S) hybrides a permis de réduire de 12% le coût global de la structure en acier, installée, en comparaison à une solution traditionnelle qui aurait utilisé une nuance S355.



Photo 7.3-5 : Pont de moyenne portée en Suède
(Photo Construiracier - JM. Vigo)



PRS de section hybride S460 + S690 & gain économique

Ouvrages fixes - panorama de quelques ponts récents



**Photo 7.3-6 : 2008 : Viaduc du Ribeyrol (A89 ouest) :
1500t dont 215t S460M(L). ep. max.100mm
(Photo Baudin-Chateauneuf - S. Pauvert)**



**Photo 7.3-7 : 2010 : Pont sur la Maine à Angers :
2550t dont 100t S460M(L) dans l'arc. ep. max. 80mm
(Photo Baudin-Chateauneuf - S. Pauvert)**



Photo 7.3-8 : 2011 : Viaduc de Bernard (A89 est) : 1030t dont 230t S460M(L).
ep. max. 55mm (Photo Baudin-Chateauneuf - S. Pauvert)



Photo 7.3-9 : 2011 : Viaduc de Buvet (A89 est) : 1290t dont 330t S460M(L).
ep. max. 80mm (Photo Baudin-Chateauneuf - S. Pauvert)



Photo 7.3-10 : (2011) Viaduc de Brévenne (A89 est) : 1445t dont 520t S460M(L). ep. max. 85mm (Photo Baudin-Chateauneuf - S. Pauvert)



Photo 7.3-11 : (2012) Viaduc de la rivière Saint-Etienne (île de la Réunion) : 4546t dont 1400t S460M(L) ep. max. 120mm (Photo Baudin-Chateauneuf - S. Pauvert)

Ouvrages mobiles

Pour les ouvrages mobiles la tendance est bien sûr d'alléger les tabliers, en faisant des choix associant dalles orthotropes et aciers THLE, afin de minimiser les charges à lever et en conséquence les efforts sur l'ensemble de la chaîne mécanique et treuils. Le pont levant Gustave Flaubert à Rouen en est un témoignage.



Photos 7.3-12 : Pont levant Gustave Flaubert à Rouen, installation des tabliers - Aciers S460 M (Photo Eiffage CM)

7-3-2 Construction offshore, construction hydraulique

Les besoins en aciers pour le marché offshore et la construction hydraulique sont liés aux contraintes environnementales, qui sont bien plus sévères que celles rencontrées habituellement.

Eoliennes et plates-formes Offshore mers froides

Pour les éoliennes offshore, par exemple, plusieurs aspects doivent être pris en compte :

- économiquement, les installations doivent être rentables et nécessitent l'utilisation de turbines lourdes, d'hélices de grands diamètres et de mâts de plus grande taille. Ainsi, les premières éoliennes de 5MW de puissance voient aujourd'hui le jour au large des côtes européennes, comme illustré par l'exemple du projet « Alpha Ventus », avec ses 12 éoliennes (photo 7.3-13) ;
- les aciers doivent être capables de résister aux pressions résultant des courants marins et des vents forts ;
- les zones marines pouvant accueillir des éoliennes offshore sont souvent profondes. Les exigences concernant les structures de fondations sont de ce fait plus sévères ;
- Les installations doivent pouvoir résister à la corrosion en milieu marin ;

- La production doit pouvoir être automatisée, sécurisée et économiquement rentable ;
- Les périodes d'installation sont limitées par les conditions climatiques et la maintenance se fait dans des conditions difficiles.



**Photos 7.3-13 : le projet « Alpha Ventus »
(© Sif Group bv 2008 - C. Manuelli)**

Si l'on relie ces facteurs environnementaux et économiques aux caractéristiques de l'acier, différents besoins apparaissent. Tout d'abord, les matériaux sont soumis à des contraintes statiques et dynamiques, avec de ce fait un intérêt pour la limitation du poids de l'acier mais des besoins d'épaisseurs plus fortes à cause des dimensions des ouvrages. Ensuite, il est nécessaire d'avoir des niveaux de résilience élevés (résistance à la rupture fragile) pour une sécurité de fonctionnement optimale et des coûts de production et de maintenance réduits. Des tôles plus longues et plus larges sont nécessaires pour limiter les opérations de mise en œuvre, en particulier de soudage. Et enfin, cela demande des capacités de production suffisantes pour pallier aux défaillances éventuelles des composants.

Pour tous les aciers, il est important de prendre en compte les paramètres suivants :

- la gamme de température d'utilisation est généralement de $15\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$ (fonctionnement entre -10 °C et $+40\text{ °C}$) : pour les aciers ferritiques, pour lesquels la résilience chute brutalement à basse température, seule la limite inférieure de température est décisive. Une température de -10 °C est courante pour les constructions offshore. Il faut également tenir compte du fait que la mise en œuvre, en particulier le soudage, détériore la résilience. C'est pour cela que la plupart des fournisseurs de tôles fortes dans le domaine de l'offshore qualifient les aciers à l'aide de l'essai CTOD (Crack Tip Opening Displacement) qui consiste à suivre l'ouverture du fond d'une fissure et à

déterminer la valeur critique de ce paramètre correspondant au moment où la fissure commence à se propager.

- La nuance, avec plusieurs catégories en fonction de la limite d'élasticité :
 - ✓ les nuances standards jusqu'à 275 MPa de limite d'élasticité minimum R_{eh} (selon la norme EN 10025) ;
 - ✓ les nuances plus élevées, au-delà de 275 et jusqu'à 355 MPa de limite d'élasticité minimum R_{eh} (selon la norme EN 10025) ;
 - ✓ les nuances à haute limite d'élasticité (HLE) avec $R_{eh} > 355$ MPa (selon norme EN 10025).

Les nuances offshore pour la mer du Nord sont souvent livrées dans cette gamme de limite d'élasticité, et même jusqu'à 500 MPa. Dans des cas particuliers, tels que les crémaillères, des aciers jusqu'à 690 MPa de limite d'élasticité minimum sont même utilisés. La charge en fatigue guide le choix pour ce critère. Pour les sites d'éoliennes offshore, c'est même le critère décisif.

- Les propriétés Z dans le sens travers court (sens de l'épaisseur) : les aciers servant à la construction de structures qui subissent des contraintes dans cette direction doivent être commandés avec des propriétés Z (Z15, Z25, Z35) (selon la norme EN 10164).
- La soudabilité, exprimée par une valeur maximale de carbone équivalent, par exemple le carbone équivalent CE, couramment utilisé dans les aciers de construction, mais aussi le Pcm :

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

$$Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Mo/15 + V/10 + Ni/60 + 5B$$
- Le formage : un formage à froid au-delà de 3% n'est admis que si les tests destructifs sont réalisés sur le matériau de base. Les tests destructifs doivent normalement être effectués avec des taux de 5% de formage à froid. Si les taux de déformation sont plus élevés, l'essai est souvent réalisé avec le taux de déformation réel.

Le projet offshore Sakhalin II, un exemple de projet à exigences extrêmement sévères :

Sakhalin II, qui se situe en mer d'Okhotsk, à l'est de la Russie, devant l'île Sakhaline, comprend la construction de deux plates-formes de forage intégrant pétrole et gaz : Lunskoye (photomontage 7.3-14) et Piltun Astokhskoye. C'est sans doute la région la plus inhospitalière du monde : il y règne des conditions atmosphériques extrêmes en moyenne 187 jours par an (températures jusqu'à $-35^{\circ}C$, chutes de neige intenses, violentes

rafales de vent, vagues pouvant atteindre 19 mètres de haut, couches de glace de 1,5 mètres). Sakhalin est par conséquent considéré comme un projet d'avant-garde dans la technique off-shore dans l'Arctique.

Les deux plates-formes sont construites sur la base d'une fondation en béton quadrupède.

Les topsides et tous les cadres et armatures de la fondation en béton sont construits en tôles fortes de Dillinger Hütte GTS.

Il s'agit du défi le plus ambitieux jamais relevé dans le domaine de l'acier de construction. Les exigences du milieu arctique imposaient une ténacité extrême des matériaux.



Photomontage 7.3-14 : Projet Sakhalin II
(© Dillinger Hütte GTS - C. Manuelli)

Date de mise en service : 2007
Qualité : S450 (M et Q) avec exigences "Arctiques"
Quantité livrée : environ 17 000 t
Épaisseur de paroi : 15 à 150 mm
Exigences "Arctiques" : - Valeurs de résilience garanties pour une température d'essai de 60°C en cœur ; - Propriétés mécaniques dans le sens travers court (Z) ; - CTOD à -40°C (tests de qualification sur métal de base).

Construction hydraulique

Dans le domaine de la construction hydraulique, de nombreux composants nécessitent l'utilisation d'acier, comme par exemple les conduites forcées ou les bifurcations des centrales hydroélectriques ou encore les vannes, les turbines ou les conduites d'aspiration (photo 7.3-15). Des limites d'élasticité jusqu'à 690 MPa sont rencontrées couramment pour des tôles fortes destinées à la réalisation de conduites forcées, avec des épaisseurs pouvant aller jusqu'à 80 mm. Pour autant, bien que les aciers S690 puissent être mis en œuvre en toute sécurité aujourd'hui, même avec des conditions sur sites difficiles (dans des cavités présentant des niveaux de pente élevés), il peut être parfois intéressant d'utiliser des aciers de limite d'élasticité inférieure qui offrent de meilleures conditions de soudabilité. Cela peut présenter des avantages aussi bien pour le procédé de fabrication qu'en terme de coût et de rapidité de mise en œuvre. Ainsi, les aciers thermomécaniques jusqu'à 500 MPa sont de plus en plus utilisés pour ces applications.

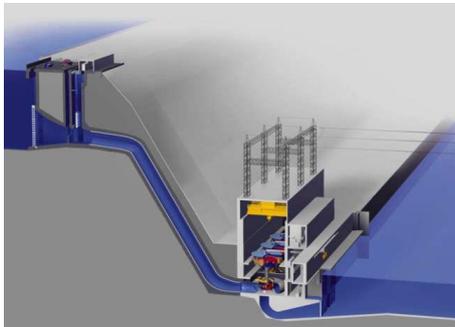


Photo 7.3-15 a : schéma d'une centrale hydroélectrique



Photo 7.3-15 b : bifurcation de la centrale hydroélectrique de Káhranjúkar en Islande
(© Voith Hydro - C. Manuelli)

7-3-3 Grues télescopiques

Les attentes du marché des grues télescopiques mobiles sont directement liées à l'augmentation des performances de levage, tout en contraignant le poids du matériel qui doit pouvoir être facilement transportable. C'est pourquoi les constructeurs de ces équipements ont utilisé depuis longtemps déjà des aciers à hautes performances. Aujourd'hui les nuances S690 à S1100 (La nuance S1100 n'est pas standardisée selon EN 10025) sont les plus utilisées.

Dans ces constructions, la conception prévoit la mise en œuvre de sections comportant des plis afin d'améliorer la résistance au flambement des éléments de mâts, prends en

compte les phénomènes de fatigue en positionnant les cordons de soudures dans les zones les moins sollicitées voire à des traitements de parachèvement des soudures si nécessaire.

	Année	1980	2006
	Longueur.flèche	10 - 31m 4 éléments	10 - 40 m 6 éléments
	Poids	8500 Kg	8300 Kg
	Capacité sur 31 m	10.8 T	16 T
	Acier	S690 QL	S1100 QL

Fig. 7.3-2 : Accroissement de 50% des performances de cette grue mobile par la substitution de la nuance S690 par la nuance S1100, tout en diminuant le poids propre de la grue.

7-3-4 Sous-marins

Compte-tenu des pressions auxquelles ils sont soumis et à la nécessité d'en contraindre le poids, les sous-marins utilisent depuis de nombreuses années des aciers THLE de type trempé et revenu et de limite d'élasticité de l'ordre de 1000 MPa.



Photos 7.3-16 : Sous-marin SNLE - acier THLE de type 100 HLES
(Photos internet DCNs Cherbourg)

7-3-5 Pipelines

Les pipelines utilisent déjà depuis de nombreuses années des aciers HLE, leur usage intensif a démarré il y a près de 30 ans par les nuances X 65 (selon API 5L et soudage selon API 1104) dont la limite d'élasticité est de l'ordre de 450 MPa. L'utilisation de ces nuances à très hautes limites d'élasticité s'est développée du fait de condition d'exploitation mettant en œuvre des pressions de service de plus en plus élevées,

associées à des conditions de pose en mer profonde très exigeantes (tant en terme de résistance mécanique que de soudabilité sans préchauffage en raisons de cadences de pose élevées). Aujourd'hui les nuances X 65 et X 70 ($Re \sim 490$ MPa) sont désormais très classiques. La nuance X 80 ($Re \sim 560$ MPa) sont utilisées couramment.

La nuance X100 ($Re \sim 700$ MPa) est en cours de développement comme en témoigne le graphique ci-dessous. Notons toutefois que la difficulté de développer ces aciers ne réside pas dans l'obtention de la limite d'élasticité, mais dans l'obtention d'une excellente soudabilité et d'une excellente résistance en condition de service HIC (Hydrogen Induced Cracking) si spécifiée, dans le cas de transport de gaz contenant des traces de gaz de type H_2S . L'X65 HIC est très répandu ; l'X70 HIC et X80HIC sont en développement.

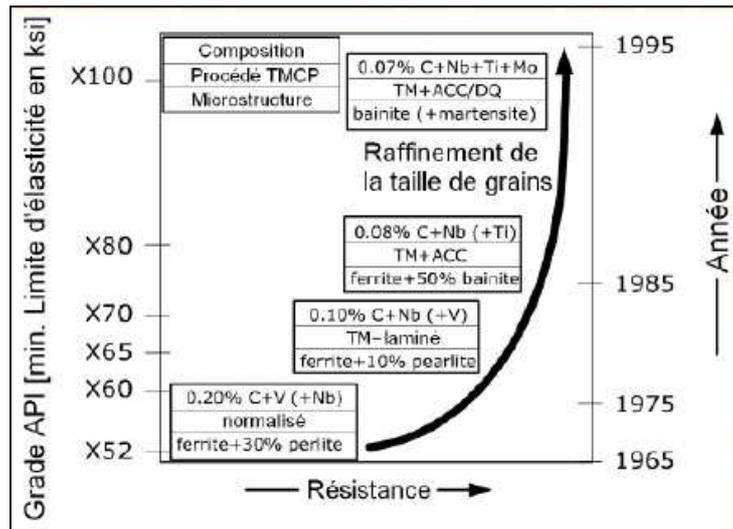


Fig. 7.3-3 : Evolution des nuances tubes et de leur processus de fabrication depuis 30 années (1 Ksi ~ 0,6895 MPa)



Fig. 7.3-4 : Soudure tubes de pipeline bout-à-bout GMAW « narrow gap » - Epaisseurs typiques rencontrées 15 à 40 mm

8. CONCLUSIONS

Grâce à la pluridisciplinarité de l'équipe de rédaction (sidérurgistes, concepteurs, entreprises de construction), ce guide traite de façon détaillée de tous les aspects techniques relatifs aux aciers HLE, tout en restant étant didactique et pratique, en s'appuyant sur des exemples concrets bien explicités.

Ce guide permet ainsi de bien appréhender :

- les modes d'élaboration et les performances des aciers HLE, leur fiabilité ;
- leur utilisation judicieuse, en particulier dans des structures hybrides, utilisant différentes nuances d'acier selon les parties de l'ouvrage ;
- les calculs aux eurocodes des structures réalisées avec des aciers HLE, y compris pour les nuances les plus élevées.

Ce guide traite bien sûr de deux points plus sensibles avec les aciers HLE :

- le soudage avec des procédures validées, maîtrisées et abordables, indispensables à la large diffusion des aciers HLE ;
- le comportement en fatigue, en proposant de bonnes dispositions constructives ou des traitements d'amélioration des assemblages soudés, afin de supporter les variations de contraintes potentiellement plus élevées dans les structures en acier HLE.

Au final, ces éléments exposés au travers de cas réels permettent à chacun de conclure que l'utilisation et la prescription des aciers HLE conduit à des structures élancées ou de plus grandes portées et aboutit à un gain multiple : gain de matériau, gain économique, gain environnemental.

Ces aciers HLE apportent donc un grand progrès à la construction métallique, un progrès déjà actuel, comme en témoignent les nombreuses utilisations et réalisations en France comme à l'étranger, et en devenir pour répondre aux enjeux d'un développement durable de notre société.

9. SIGLES ET ABREVIATIONS

A%	Allongement
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
Ac	Température de début d'austénitisation (transformation du fer α en fer γ)
Ac ₃	Transformation de fin d'austénitisation
ACC	Accelerated Controlled Cooling
AWS	American Welding Society (Règlement de soudage AWS D1-1)
ASTM	American Society for Testing and Materials
BHP	Bridge High Performance steel (Japon)
CCTG	Cahier des Clauses Techniques Générales
CEN	Comité Européen de Normalisation
CEN/TC	Comité Européen de Normalisation/Comité Technique
CEV	Carbone Equivalent
CTOD	Essai de Crack Tip Opening Displacement
CVN	Charpy V Notch
DAN	Document d'Application Nationale
ECISS	European Committee for Iron and Steel Standardization
EN	Norme Européenne
FAF	Fissuration à Froid
FAW	Flux Cored Arc Welding
FHWA	Federal Highway Administration (USA)
GTAW	Gas tungsten Arc Welding
H(*)	Hydrogène diffusible mesuré sur métal d'apport
HLE	Haute Limite d'Elasticité
HPS	High performance Steel
HV	Dureté Vickers

IIS	Institut International de la Soudure
IIW	International Welding Institute
IISI	International Iron and Steel Institute
J	Joules
JIS	Japanes Industrial Standards
KV ou KVL/T	Energie de rupture Charpy (Long /Travers) en flexion par choc
MPa	Méga Pascal
Pcm	Carbone équivalent applicable aux aciers bas carbone (origine Japon)
QMOS	Qualification de Mode Opératoire de Soudage
QST	Quenched and Self Tempered (Trempe suivi d'un auto-revenu)
QT	Quenched and Tempered
R_e	Limite d'élasticité
R_{eH}	Limite supérieure d'écoulement
$R_{p0,2}$	Limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% d'allongement
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TEKKEN	Essai de fissuration à froid en soudage
THLE	Acier à Très Haute Limite d'Elasticité
TIG	Procédé de soudage Tungsten Inert Gas
TK28	Température à laquelle l'énergie de rupture à l'essai de flexion par choc est égale à 28 Joules
TM	Acier produit par traitement thermomécanique
TMCP	Thermo-Mechanical Control Process
TRC	Transformation en Refroidissement Continu
Z (qualité)	Caractérise un acier à résistance garantie dans le sens travers court
ZAC	Zone Affectée par la Chaleur du soudage
ZAT	Zone Affectée Thermiquement

10. BIBLIOGRAPHIE

- Concepts de dimensionnement à la fatigue des ouvrages métalliques de J. Brozetti et M.A. Hirt - Construction métallique n°1 - 1987
- Conception et calcul des éléments transversaux dans les ponts-routes mixtes - JC Foucriat et J. Roche
- Ponts métalliques et mixtes - Résistance à la fatigue - SETRA - SNCF - CTICM - mai 1996
- Eurocodes partie 3 et 4
- New bridge over the Aare Channel at Hagneck, Switzerland- from D. Stucki and H.G. Dauner - in Steelbridge 2004
- Current world-wide trends in the usage of modern steel plates for bridge constructions. SCHRÖTER, M. MULLER in Steelbridge 2004
- Les ouvrages d'art courant sur la liaison avec la Sarre au Luxembourg - W. Schwarz - R. Biwer - N. Engel in BOM n°3 - OTUA
- Design of high performance bridges in the small and medium span range- Ph. RAMONDENC- in Steelbridge 2004
- Recent developments in tubular bridges and the fatigue design of their joints from A. NUSSBAUMER, S. C. STURM, A. SCHUMACHER, M. A. HIRT in Steelbridge 2004
- Composite twingirders bridges with long spans and large width from R. DUBOIS in Steelbridge 2004
- From Steelbridge 2004 - Alberto Miazzon - Verrand viaduct
- Use and application of high performance steels for steel structures - SED N° 8 - IABSE - Oct. 2005
- Les aciers thermomécaniques - AFPC - OTUA de mai 1997
- Bulletin Ouvrages Métalliques : N° 1 à N° 6 - OTUA / ConstruireAcier
- Bulletins Ponts Métalliques : N° 23 à N° 25 - OTUA / ConstruireAcier

