

DE LA QUALITE ET DES REGLES DE DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE

M. Huther ¹, G. Parmentier ¹, HP. Lieurade ², I. Huther ²

¹⁾ BUREAU VERITAS

Direction Technique Marine

17 bis Place des Reflets, La Défense 2

92077 PARIS LA DEFENSE CEDEX

²⁾ CETIM

Service Fatigue Rupture

52 Av Félix Louat, BP 80067

60304 SENLIS CEDEX

RESUME: La recherche d'une meilleure compétitivité de l'Europe sur le marché mondial passe par une recherche d'une haute technicité avec réduction des coûts et extension des durée de vie des produits fabriqués. En dimensionnement en fatigue un tel objectif passe par une amélioration de la qualité des soudages, mais une telle démarche est bloquée par les règles de calcul actuellement applicables. Un rappel du contexte des règles actuelles de calculs en fatigue, illustré par les règles de dimensionnement des Société de Classification des navires et celles de l'EUROCODE fait ressortir leur côté très conservateur et pose le problème auquel se heurtent les industriels: impossibilité de profiter pleinement des progrès en qualité. Une analyse de la réalité de l'influence de la qualité sur la tenue des joints soudés en fatigue: caractéristique des cordons de soudure et traitement post-soudage, et des standards de qualité illustrés par les règles de classification des navires et les standard ISO, démontre la possibilité d'amélioration des règles actuelles. En conclusion il est rappelé l'importance de la prise en compte de la qualité pour la compétitivité des industries européennes, les résultats R&D sur le sujet et donné les axes d'amélioration possible des réglementations, utilisation de la contrainte d'entaille, acceptation de courbes S-N spécifiques dûment justifiées, établissements de courbes S-N spécifiques à des standards professionnels, caractérisation de la qualité des cordons de soudure.

MOTS-CLES: Soudures, acier, fatigue, qualité, industries mécaniques, construction navale

1. Introduction

La recherche permanente d'une meilleure rentabilité des activités industrielles et commerciales conduit dans de nombreux secteurs à rechercher une réduction des masses des équipements utilisés. Cette relation masse/rentabilité est évidente dans le secteur des transports terrestres, aériens et maritimes où chaque tonne gagnée sur les équipements ou moyens se traduit en tonne de charge payante. Mais il en est aussi de même pour des installations tels que les engins de levage, les pylônes ou les structures porteuses pour lesquels la réduction de masse se traduit par une réduction du coût d'investissement et ainsi améliore la rentabilité en service.

La réduction de masse passe par un dimensionnement au plus juste correspondant à une optimisation des marges de sécurité, soit à un niveau de contraintes sous charges de service le plus élevé possible par rapport aux résistances des matériaux. Le développement et l'amélioration des méthodes de calcul, fortement aidés par les progrès fulgurants des moyens informatiques, permettent aujourd'hui d'ajuster au mieux les conceptions aux règles applicables et, dans le cas de la vérification à la tenue en fatigue, aux niveaux de variation de contrainte qui, associés aux courbes S-N, fournissent les sommes de Miner, critères d'acceptabilité.

Les règles des codes et standards actuels utilisent pour les courbes S-N et les calculs de cumul de fatigue, soit les contraintes nominales, soit les contraintes géométriques locales, soit les contraintes d'entaille, suivant les traditions du secteur industriel ou les détails de structure analysés.

Si un ajustement aux règles des codes et standards lors de la conception est nécessaire, le retour d'expérience montre qu'il n'est pas suffisant car la durée de vie réelle d'une structure soumise à des charges cycliques est grandement affectée par la qualité de la construction. Mais comme nous allons le voir, ce facteur n'est pas actuellement pris en considération de manière explicite dans les codes et standards en application.

2. Contexte réglementaire

Pour illustrer le contexte réglementaire en vérification à la fatigue vis-à-vis du facteur qualité des soudures ou liaisons soudées, nous allons considérer les secteurs des industries mécaniques et de la construction navale, deux secteurs pour lesquels la fatigue est de première importance.

2.1. Courbes S-N de conception

Pour les secteurs industriels considérés, les règles de vérification de la tenue à la fatigue des liaisons soudées sont fournies soit par les règlements des Sociétés de Classification en construction navale, soit l'EUROCODE pour les industries mécaniques.

Pour les règlements de classification des navires, le contexte industriel est tels que ceux-ci s'appliquent à tous les navires conçus et construits dans le monde, quels que soient le pays et le chantier naval. La Société de Classification fixe les règles de vérification à la fatigue, courbes S-N et marges de sécurité, afin de permettre un niveau minimal de sécurité durant la durée de vie de projet acceptable par la Société [1]. Pour fixer les marges de sécurité il est nécessaire de prendre en considération toutes les pratiques existantes, c'est ainsi que les moins bonnes sont celles qui imposent les critères d'acceptabilité au détriment des meilleures.

Si maintenant nous considérons les courbes S-N de base des codes et standards, illustrées de manière générale par celles de l'EUROCODE 3 [2], nous constatons que celles-ci résultent de la collection et mélange de résultats d'essais sur des éprouvettes d'origines diverses et variées. Il est clair que ces résultats regroupent des éprouvettes avec des niveaux de qualité très disparates augmentant la dispersion par rapport à des productions homogènes bien identifiées. Les courbes de base étant obtenues à partir des courbes moyennes et de l'écart-type qui mesure la dispersion [3], celles-ci sont tirées vers le bas par les qualités les moins bonnes, pénalisant de nouveau les meilleures (Figure 1).

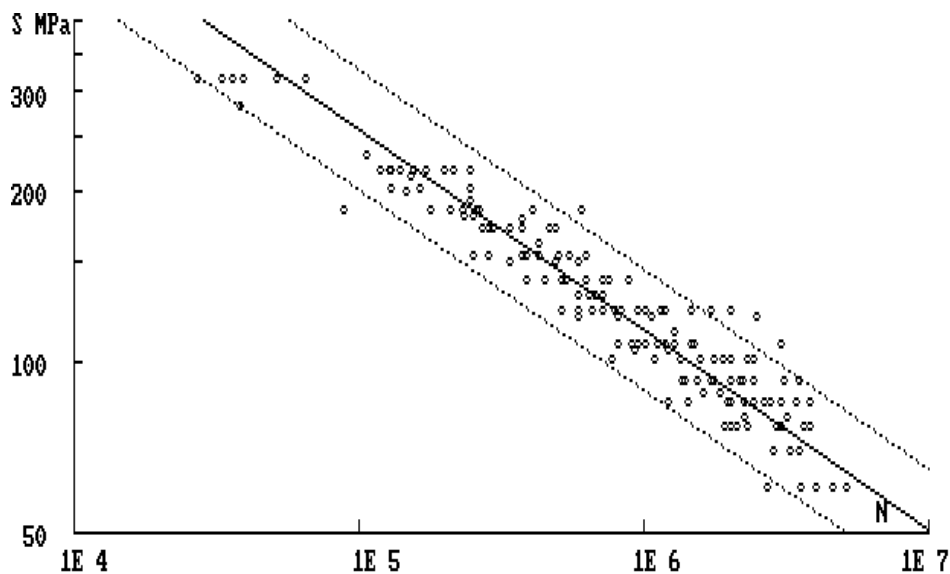


Figure 1 : Illustration de la détermination d'une courbe S-N de conception
(—— courbe moyenne - - - - - moyenne ± 2 écarts-types)

2.2. *Qualité de fabrication*

Si les codes et standards sont amenés à considérer l'ensemble des pratiques existantes, ils ne permettent pas cependant n'importe quel niveau de qualité. En construction navale, les règles de vérification en conception sont complétées par des règles ayant pour but d'assurer un niveau minimal de qualité des soudures et des liaisons soudées.

Le règlement du Bureau Veritas pour la classification des navires en acier [1], par exemple, comporte au chapitre soudage les sections suivantes

- Approbation des matériaux d'apport
- Approbation des revêtements de protection primaire des tôles à souder
- Approbation des procédures de soudage

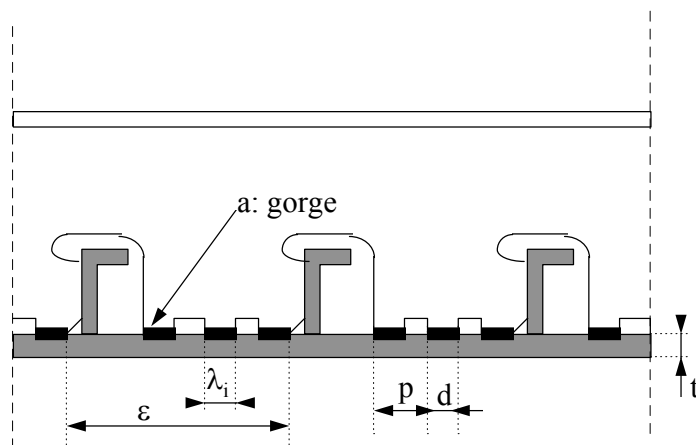
complétées par l'obligation d'une certification des soudeurs. Ces règles ont pour but de créer un contexte limitant les risques de voir des travaux de mauvaise qualité.

En complément aux règles s'appliquant au processus de fabrication il existe des règles sur la taille et la forme des cordons de soudure, tant du point de vue global (figure 2) que local (figure 3).

Mais les règles ne s'arrêtent pas à des prescriptions, elles prévoient aussi le contrôle par les experts de la Société de Classification en fixant les conditions de contrôle et de visite en cours de construction dans les ateliers et sur cale, examens visuels et/ou contrôles non destructifs suivant l'importance des soudures pour la sécurité du navire.

Pour les industries mécaniques, l'équivalent correspond aux normes ISO 5817 et 6250 [4, 13] définissant des classes de qualité des joints soudés et aux standards d'aptitude à l'emploi [5, 6, 7].

La norme ISO 6250 définit 6 groupes de catégories de qualité pour chacun desquels il est indiqué un niveau maximum admissible pour la profondeur des caniveaux au pied du cordon de soudure (figure 4) et des dimensions limites des défauts en volume (figure 5) [8].



$$a = w_F t \frac{p}{d} \frac{\varepsilon}{\sum \lambda_i}$$

Figure 2 : Disposition et taille des cordons de soudures discontinues entre anguillettes (w_F est donné en fonction du type de liaison et de sa situation sur le navire)

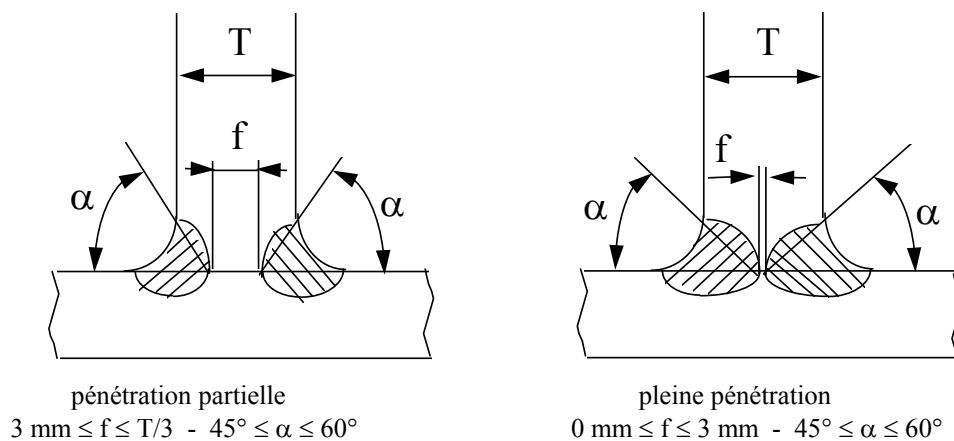


Figure 3 : Soudures d'angle symétriques

Classe de qualité	Type d'assemblage	
	soudure franc-bord	soudure d'angle
Q 100	0,025	-
Q 90	0,05	-
Q 80	0,075	0,05
Q 71	0,10	0,075
Q 63	0,10	0,10
Q 56 à 20	0,10	0,10

Figure 4 : Dimensions maximales admissibles des caniveaux en pied de cordon de soudure

Classe de qualité	Longueur max d'une inclusion de laitier en mm		Taux max de soufflures en % de la surface projetée
	Brut de soudage	Après détensionnement thermique	
Q 100	1,5	7,5	3
Q 90	2,5	19,0	3
Q 80	4,0	58,0	3
Q 71	10,0	pas de max	5
Q 63	35,0	pas de max	5
Q 56 à Q 20	pas de max	pas de max	5

Figure 5 : Dimensions limites des défauts en volume

La norme fournit aussi pour chaque catégorie de qualité un facteur d'amplification de contrainte maximal admissible induit par un désalignement [8].

Les standards d'aptitude à l'emploi fournissent, lorsque des défauts sont découverts lors d'un contrôle ou sont définis pour une classe de qualité ISO donnée, les méthodes et critères nécessaires à la vérification de leur acceptabilité suivant les contraintes ou variations de contraintes subies en service par le joint soudé.

2.3. Conséquences en compétitivité

Comme nous venons de voir, les codes et standards traitent des deux facteurs intervenant dans la tenue en fatigue des liaisons soudées:

- niveau de résistance et dispersion lors du projet
- qualité lors de la fabrication.

Mais nous pouvons constater qu'il n'y a pas actuellement de lien entre les prescriptions requises pour chacun de ces deux facteurs. Il en résulte que toute amélioration en qualité de fabrication par rapport au minimum demandé par un standard ne peut pas être pris en compte au niveau de la conception, de même qu'une amélioration constatée de résistance par rapport à une courbe de base de conception ne peut pas être utilisée.

Si l'on considère qu'un effort d'amélioration en qualité ou en résistance correspond généralement à un surcoût de fabrication, on constate qu'une société cherchant à améliorer sa qualité va perdre en compétitivité, en particulier lorsque les périodes de garantie sont courtes, ce qui est généralement le cas dans les industries mécaniques ou de transport.

3. Réalité des facteurs qualité

Bien que les codes et standards ne permettent pas la liaison qualité de fabrication et courbe S-N de conception, les résultats connus démontrent sa réalité comme nous allons le voir pour les paramètres de forme de cordon des soudures et les traitements post-soudage.

3.1. Forme des cordons de soudure et courbes S-N

Bien que la résistance à la fatigue d'une liaison soudée soit le plus souvent exprimée en contrainte nominale ou contrainte locale au point chaud, contraintes qui n'intègrent pas les effets de forme du cordon de soudure, l'observation des ruptures d'éprouvettes d'essais ou de fissures en service montre que les fissures de fatigue partent du pied de cordon (figure 6) où les contraintes (contraintes d'entaille) sont plus élevées (figure 7).



Figure 6 : Fissure observée sur un gousset à bord d'un navire

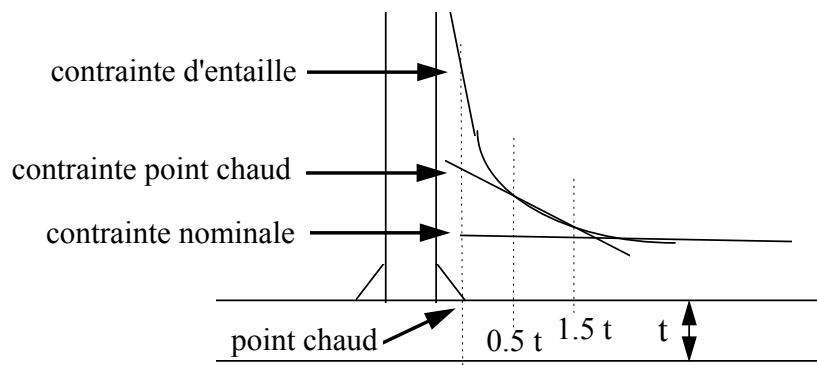


Figure 7 : Définition des contraintes à une liaison soudée

L'analyse des durées de vie sous amplitude constante en corrélation avec les grandeurs définissant la forme du cordon et du pied de cordon de soudure montre une très forte influence de ces paramètres [9].

Des calculs éléments finis montrent que l'angle de raccordement du cordon de soudure θ et que le rayon de pied de cordon r (figure 8) modifient le niveau de contrainte d'entaille (figure 6) initiateur de la fissure et moteur de sa propagation.

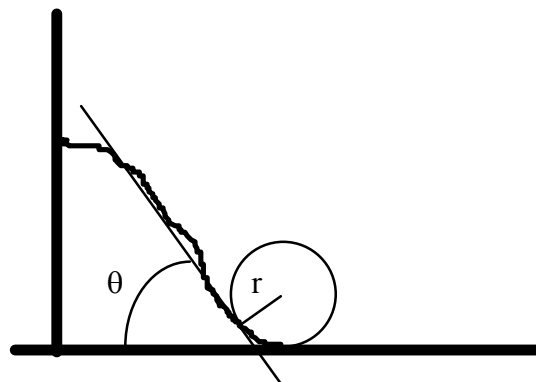


Figure 8 : Définition de l'angle de cordon et rayon de pied de cordon

Cette influence peut être représentée par un facteur de concentration de contrainte pouvant être exprimé, par exemple, par la formule suivante où l'on peut constater que lorsque θ augmente ou r diminue, K_t augmente:

$$K_t = 1 + \frac{1 - \exp\left(-0.90 \theta \sqrt{\frac{t}{2 \cdot \ell} + 1}\right)}{1 - \exp\left(-0.45\pi \sqrt{\frac{t}{2 \cdot \ell} + 1}\right)} \left[\frac{0.13 + 0.65 \left(1 - \frac{r}{t}\right)^4}{\left(\frac{r}{t}\right)^{1/3}} \right] \cdot \tanh \left[\frac{\left(\frac{2 \ell}{t}\right)^{1/4}}{1 - \frac{r}{t}} \right]$$

avec:

θ en radians

t épaisseur de la tôle au pied du cordon de soudure

ℓ longueur du pied de cordon de soudure.

On constate que, dans les standards, la pente du cordon de soudure est d'ailleurs un des paramètres intervenant dans la qualité d'une soudure [1, 10].

Si on considère que le risque de caniveau et que son effet d'entaille sont directement liés à l'irrégularité de surface du cordon et à son rayon de pied de cordon, nous trouvons une nouvelle liaison avec un paramètre qualité des standards.

Les résultats connus permettent donc d'affirmer que le niveau d'une courbe S-N est directement lié au niveau de qualité, actuellement au moins qualitativement en global, quantitativement pour quelques cas étudiés.

Mais la relation ne s'arrête pas là. Une bonne qualité correspond aussi à une bonne régularité et constance des paramètres. Des soudures de qualité présentent ainsi de plus faibles dispersions des résultats d'essais en fatigue et partant, pour une même courbe S-N moyenne (même niveau), la courbe S-N de conception (à -k écarts-types) sera plus élevée, permettant un échantillonnage plus réduit.

3.2. Traitements après soudage

Les résultats et remarques vus ci-dessus prennent toute leur valeur pour certains traitements des cordons de soudure après soudage, les traitements par refusion. Ces traitements ont pour effet de modifier le profil du cordon, et lorsqu'ils sont correctement effectués, de diminuer l'angle de raccordement du cordon et d'augmenter largement le rayon de pied de cordon (figure 9).

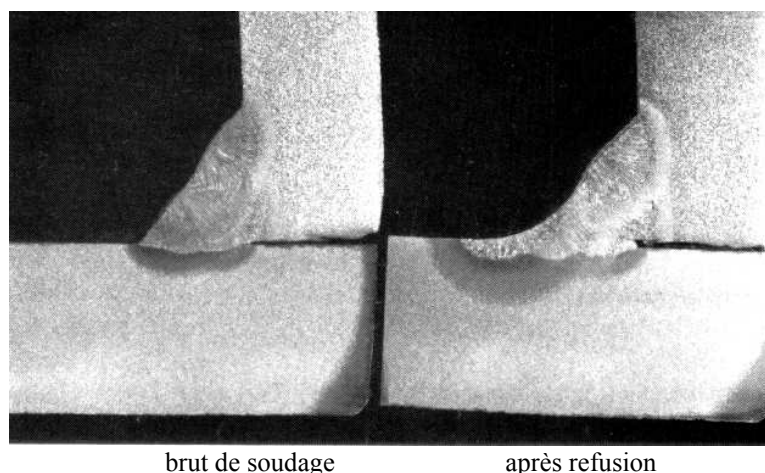


Figure 9 : Modification d'un cordon de soudure après refusion TIG

Le résultat de ces modifications du cordon est une amélioration importante de la résistance à la fatigue comme l'illustre la figure 10.

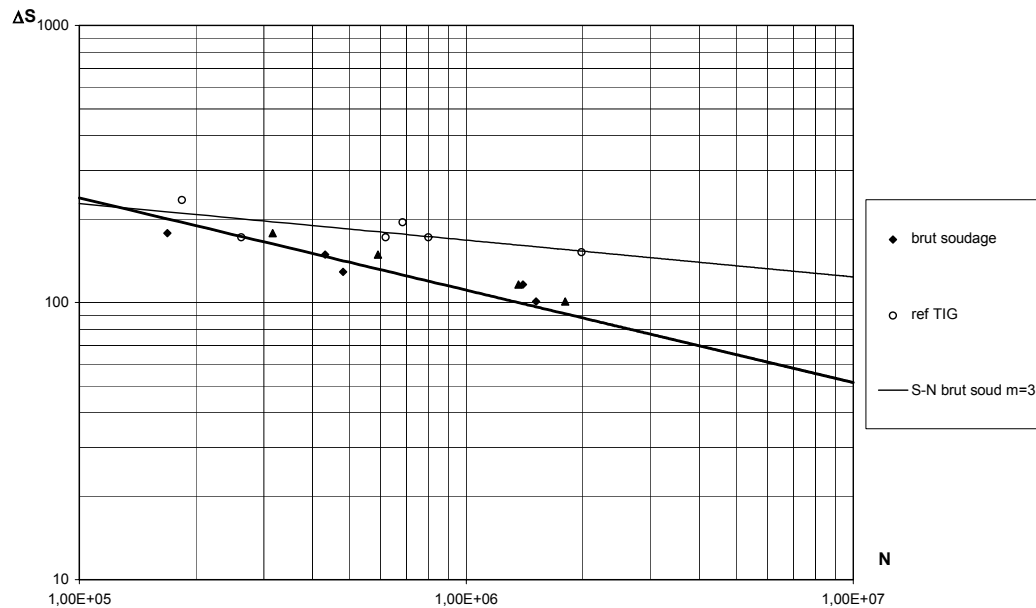


Figure 10 : Courbes S-N brut de soudage et après refusion TIG

L'intérêt de pouvoir caractériser et mesurer la qualité, et de prendre en compte ces facteurs en conception apparaît ainsi évident pour le concepteur et le fabricant ou constructeur.

3.3. Tentatives de relation courbes S-N et qualité

Malgré l'intérêt économique certain et de nombreux résultats connus, la prise en compte du niveau de qualité pour la détermination des courbes S-N n'est pas encore en pratique dans les codes et standards.

Cependant certains codes se sont préparés pour une telle pratique et des tentatives de mesure de la qualité d'un cordon de soudure et de définition de courbes S-N associées sont en cours.

Comme illustration de formulation de standard permettant la prise en compte de la qualité des soudures nous présenterons les règles pour la classification des navires du Bureau Veritas [1, 10].

La contrainte utilisée pour la vérification en fatigue des structures de navires soudées est la contrainte d'entaille (figure 6). Cette contrainte est obtenue à partir de la contrainte au point chaud, contrainte déterminée par application d'un facteur de concentration géométrique sur la contrainte nominale ou par calculs éléments finis, et un coefficient de concentration d'entaille uniquement fonction de facteurs liés à la qualité du cordon de soudure.

Actuellement le coefficient d'entaille K_f est fonction de deux facteurs θ et λ :

$$K_f = \lambda \sqrt{\frac{\theta}{30}}$$

θ angle du cordon de soudure en degrés

λ fonction du type de soudure et d'un traitement post soudage

En fait, la formule intègre implicitement le rayon de pied de cordon puisque des études ont montré que l'angle de cordon de soudure θ et le rayon de pied de cordon sont corrélés [9].

Le facteur λ correspond au niveau de qualité, retour d'expérience, puisqu'il diffère suivant le type de soudure, franc-bord ou d'angle, pleine pénétration ou pénétration partielle, types dont les qualités de réalisation sont connues comme étant bien différentes quelles que soient les précautions prises. Le coefficient diffère aussi suivant que la soudure reste brut de soudage ou est soumise à un meulage après soudage, autre facteur de qualité (figure 11).

Type de soudure	Coefficient λ	
	Brut de soudage	Soudure meulée
Soudure franc bord <ul style="list-style-type: none"> • ΔS parallèle à la soudure - pleine pénétration - pénétration partielle 	 2,10 2,10	 1,85 1,85
Soudure en T <ul style="list-style-type: none"> • ΔS parallèle à la soudure, soudure d'angle et pénétration partielle • ΔS perpendiculaire à la soudure, soudure d'angle et pénétration partielle 	 1,80 4,50	 1,60 3,95
Soudure en croix <ul style="list-style-type: none"> • Pleine pénétration • Pénétration partielle 	 2,10 2,35	 1,85 2,05

Figure 11 : Extrait du tableau des valeurs du coefficient λ [10]

Cependant le règlement reste sur une base théorique de conception puisqu'il ne prévoit pas de contrôle en construction de ces paramètres utilisés dans la formule et donc de la réalité .

Dans le même esprit, le CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) travaille sur la détermination de la corrélation entre les conditions de soudage, les caractéristiques des cordons de soudure et le contrôle de ces caractéristiques en construction [8,11,12]. Une première étape est la définition de classes de qualité en relation avec les courbes S-N des codes et standards. Les classes de qualité sont définies en terme de défauts admissibles auxquels sont associés des moyens de contrôle [11] pour les différents types de soudures rencontrées en construction (figure 12).

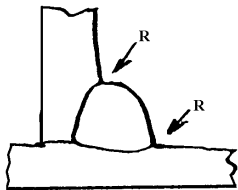
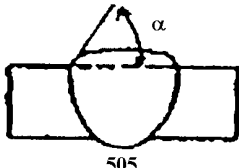
Désignation du défaut	Illustration		Critère d'acceptation	Moyen de contrôle
	Bout à bout	Angle		
Rayon de raccordement	Non Applicable		Les rayons doivent être visibles à l'oeil ce qui correspond à $R \geq 1,2 \text{ mm}$	Comparaison avec échantillons témoins
Défaut de raccordement		Non Applicable	$\alpha \leq 30^\circ$	Visuel Comparaison avec échantillons témoins

Figure 12 : Exemple de définition de défauts acceptables

Pour chaque classe une étude a déterminé les angles de raccordement des cordons de soudure [11] et en s'appuyant sur les résultats connus en essais de fatigue et sur les concepts de la mécanique de la rupture il est proposé une association classe de qualité/courbe S-N [8]. Il est ainsi fourni, par exemple, une relation classe de qualité, taille du caniveau maximum acceptable, courbe S-N (figure 13).

Classe de qualité	Rapport p/t		Courbe S-N FAT
	soudure franc-bord	soudure d'angle	
Q 100	0,025	-	100
Q 90	0,05	-	90
Q 80	0,075	0,05	80
Q 71	0,10	0,075	71
Q 63	0,10	0,10	63
Q 56 à Q 20	0,10	0,10	56 - 50 - 45
La profondeur p du caniveau doit toujours être inférieure à 1 mm			

Figure 13 : Classe de qualité, (profondeur de caniveau)/(épaisseur de plaque), et courbe S-N

Une telle approche ne peut être totalement acceptée que s'il existe des moyens de vérification des critères en fabrication et construction. En parallèle, il est donc développé des moyens de contrôle en usine et sur chantier permettant la mesure, dans des conditions économiquement acceptables, des angles et des rayons de raccordement des cordons de soudure.

Une méthode proposée utilise un rayon laser qui balaye le cordon et qui permet, après traitement informatique, de fournir les caractéristiques de qualité du cordon [12] et ainsi de vérifier si la fabrication respecte bien les données de conception.

4. Conclusion

L'évolution du contexte économique mondial de ces vingt dernières années montre clairement que la compétitivité et la croissance durable des industries européennes passent par un haut niveau technologique et une haute qualité des produits fabriqués.

Mais l'utilisation des codes et standards de conception et de construction actuels ne permet pas de prendre en compte correctement les niveaux de qualité en soudage. Cet état de fait entraîne ainsi un surcoût pour tout accroissement du niveau de qualité, le concepteur et le constructeur ne pouvant pas réduire les marges de sécurité réglementaires en conséquence.

Il apparaît donc nécessaire pour la compétitivité des industries européennes sur le marché mondial d'introduire dans les codes de calculs et standards de construction des marges de sécurité en liaison avec différents niveaux de qualité en construction.

Les résultats de R&D en cours dans le domaine des liaisons soudées montrent une relation étroite entre qualité des soudures et résistance à la fatigue. Ainsi une meilleure qualité permet des durées de vie en service plus importantes, ou à durée de vie égale, des échantillonnages plus faibles, donc des coûts de construction plus bas et en transport une charge payante opérationnelle plus importante, partant une meilleure rentabilité.

Une analyse des résultats connus montrent la possibilité d'introduire dans les codes de vérification à la fatigue actuels des critères de qualité et d'y associer les courbes S-N correspondantes, une qualité meilleure permettant une courbe S-N de conception plus élevée et en conséquence un échantillonnage de dimensionnement plus faible.

Les tentatives en cours en construction mécaniques au CETIM et en construction navale au Bureau Veritas, basées sur des classes de qualité associées à des critères de vérification de la qualité en construction et sur l'utilisation de la contrainte d'entaille en calcul de vérification de la tenue en fatigue en conception montrent

clairement la possibilité d'introduire un facteur qualité pour le choix des courbes S-N de calculs en fatigue et ainsi la possibilité d'optimiser les projets en terme de niveau de sécurité et de coût.

Cependant des travaux sont encore nécessaires pour collecter un ensemble de résultats suffisant pour convaincre les développeurs des codes et standards.

5. Références

- [1] Rules for the Classification of Steel Ships - Bureau Veritas - NR 469.3 DTM R00 E - June 2000
- [2] EUROCODE 3 - Design of Steel Structures - Chap 9 Fatigue - 1992
- [3] Recommendations for fatigue design of welded joints and components - IIW doc XIII-1539-96 / XV-845-96 - May 1996
- [4] ISO 5817 - Classes de qualité de soudures - 1992
- [5] IIW guidance on assesement of the fitness for purpose of welded structures - IIW doc SST-1157-90 - 1990
- [6] Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints - BSI PD 6493 - 1991
- [7] Méthodes d'évaluation des défauts vis à vis de la rupture fragile et de la fissuration par fatigue, dans le cas des joints soudés par fusion - JWES 2805 - 1997
- [8] HP. Lieurade - Prise en compte des défauts de soudage dans la résistance à la fatigue des constructions métalliques -
- [9] I. Huther, L. Primot, HP. Lieurade, JJ. Janosch, D. Cochen, S. Debiez - Weld quality and cyclic fatigue strength of steel welded joints - IIW doc XIII-1563-94, Welding in the World, Vol 35 N° 2 - 1995
- [10] Fatigue strength of welded ship structures - Bureau Veritas - NI 393 DSM R01 E - July 1998
- [11] I. Huther, A. Lam, L. Velluet, HP. Lieurade - Methodology to define S-N curves in connection with weld quality - IIW doc XIII-1903-01 - 2001
- [12] HP. Lieurade, I. Huther, D. Lebaillif - Weld Quality Assessment as regards to fatigue - IIW/IIS Commission XIII seminar Tokyo April 2002
- [13] ISO 6250 - Classification des défauts géométriques dans les cordons des matériaux métalliques - 1998