

DEVELOPPEMENT, IMPLEMENTATION, MAINTENANCE ET FUTUR DES REGLEMENTS STRUCTURAUX COMMUNS DE L'IACS POUR LES VRAQUIERS ET PETROLIERS A DOUBLE COQUE

Philippe BAUMANS

Bureau Veritas, Département Développement, Paris-La-Défense (France)

SOMMAIRE

Ce document expose les défis rencontrés dans le développement effectué par l'IACS des Règlements Communs pour la Structure (Common Structural Rules, CSR) des vraquiers et des pétroliers, en ce qui concerne les techniques de modélisation utilisées et intégrées dans les hypothèses de chargement, les réponses structurales et les critères d'acceptation.

Il précise également comment l'IACS répond au besoin de cohérence pour l'application de ces Règlements et de leur maintien dans le futur.

Comme tout document contenant des prescriptions réglementaires, il est nécessaire de trouver un juste équilibre entre l'intégration de méthodes de pointe de haute technicité d'une part, et les besoins d'applications déterministes et pratiques d'autre part, sachant que l'Industrie souhaite de plus en plus utiliser des modèles de pointe au stade du projet tout en voulant, à la fois, un procédé lui fournissant aussi bien des ébauches rapides de conception que des cycles rapides de construction. Tout cela sans jamais perdre de vue l'objectif principal: le développement de Règlements allant dans le sens de la sécurité, de la solidité et de la durée dans le temps, ce que demande la société dans son ensemble.

Au cours du développement des critères des CSR, la nécessité de cet équilibre a conduit à incorporer des prescriptions de Règlements existants et des approches basées sur le risque pour identifier les dangers et leurs conséquences afin de concentrer, dans le développement des nouveaux règlements, l'attention sur les zones les plus critiques. Alors que les CSR ont tendance à reprendre des parties de Règlements de Sociétés de Classification ou des parties de Règles Unifiées (UR) de l'IACS, il faut savoir que de nombreuses parties ont été développées ou validées à l'aide de techniques plus avancées et d'une analyse des risques et de leurs conséquences.

Parallèlement à la rédaction des CSR, commençait, à l'Organisation Maritime Internationale (OMI), le développement de normes de construction des navires neufs en fonction d'objectifs (goal-based standards ou GBS) et destinées à fixer les normes de base utilisées pour la conception des navires. Les personnes en charge des CSR suivaient en permanence ces développements pour inclure dans les CSR les critères qui semblaient pertinents.

Ce document traite aussi des nouvelles relations qui se sont établies entre les Sociétés de Classification et l'Industrie grâce au processus de consultations mis en place durant la phase de développement. La rédaction des CSR par les dix membres de l'IACS représente une étape dans la manière de fonctionner de l'IACS et de satisfaire les règles d'administration de chacun de ces membres. Du fait de la rédaction des CSR, l'IACS se trouve devant une nouvelle nécessité : la maintenance des règlements des CSR. Des processus ont été mis en place pour garantir une maintenance efficace des CSR, avec consultation régulière de l'Industrie. Des interprétations et des retours d'information ou d'expérience ont été collectés auprès de toutes les sociétés de l'IACS et auprès de l'Industrie, et ce qui en a découlé a été accepté et adopté par tous les membres. Par ailleurs un programme visant à harmoniser les versions actuelles des CSR pour les pétroliers et les vraquiers a été établi dans l'éventualité d'une future extension à d'autres types de navires.

NOMENCLATURE

- CSR Règlements Communs de l'IACS concernant la Structure. Applicables aux pétroliers à double-coque et aux vraquiers à simple ou double-coque.
- GBS Normes de construction des navires neufs en fonction d'objectifs (Goal-Based Standards) développées par l'OMI.
- IACS Association Internationale des Sociétés de Classification (International Association of Classification Societies).

1 INTRODUCTION

Ce document retrace le travail commun de développement des règlements entrepris par les sociétés de classification de l'IACS afin de formuler de nouveaux Règlements pour la Structure (CSR) des vraquiers et des pétroliers. L'objectif étant de donner une idée générale des défis et difficultés rencontrés au cours du processus de développement et du travail important fourni par les membres de l'IACS en charge du projet. Il précise quelques-uns des aspects de modélisation des règlements communs et la façon dont ils ont été développés et calibrés pour les charges et les réponses structurales.

Les prescriptions réglementaires doivent être un compromis entre les besoins intégrant des méthodes de pointe de grande technicité et ceux d'une application déterministe pratique. L'industrie, globalement, réclame de plus en plus l'emploi de moyens de pointe au stade du projet pour l'application des règlements alors qu'elle attend aussi des règlements permettant d'établir rapidement la conception initiale d'un projet et la possibilité de satisfaire les exigences réglementaires dans des cycles rapides de conception et de construction. Tout cela ne faisant pas oublier à l'IACS que son objectif principal reste le développement de règles et règlements allant dans le sens de la sécurité, de la solidité et de la durée dans le temps, qui correspondent à l'attente de la société au sens large.

Au cours du développement des critères des CSR, ce même compromis a amené à incorporer des prescriptions de Règlements existants et des approches basées sur le risque pour identifier les dangers et leurs conséquences afin de concentrer,

dans le développement des nouveaux règlements, l'attention sur les zones les plus critiques. Alors que les CSR ont tendance à reprendre des parties de Règlements de Sociétés de Classification ou des parties de Règles Unifiées (UR) de l'IACS, il faut savoir que des parties ont été développées et validées à l'aide de techniques de pointe et d'analyses des risques et de leurs conséquences.

Alors que les CSR étaient en cours de rédaction commençant, à l'Organisation Maritime Internationale, le développement de normes de construction des navires neufs en fonction d'objectifs et destinées à fixer les normes de base utilisées pour la conception des navires. Les personnes en charge des CSR suivaient en permanence ces développements pour inclure dans les CSR les critères qui semblaient pertinents

Après la publication de la première édition des CSR et des données techniques ayant servi à son élaboration, des périodes d'examen étaient accordées à l'Industrie pour leur permettre de prendre connaissance du projet, d'en vérifier l'application et de transmettre leurs commentaires. Ces périodes étaient aussi un bon moyen de perfectionner et d'ajuster le projet en augmentant le nombre de tests dans les développements et les applications réglementaires. Les règlements et documents supports s'en trouvant, par la même occasion, affinés.

En plus des améliorations techniques apportées, la rédaction des règlements évoluait pour inclure les corrections et les clarifications jugées utiles à la suite des commentaires reçus.

2 OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT INITIAUX

Les premières mesures dans le processus de développement des CRS consistent à fixer les objectifs du projet, en mettant en évidence les besoins toujours croissants de sécurité, de solidité et de longévité des navires. Le développement de ces objectifs sous-jacents et de leur cadre était essentiel pour garantir une compréhension et une orientation mutuelles du projet. Ces objectifs peuvent se résumer comme suit :

- Éliminer toute compétition entre les sociétés de classification pour tout ce qui touche aux exigences structurales et aux standards, situation qui, si elle n'était pas abandonnée,

pouvait aboutir au final à une évaluation et une vérification incompatibles de l'intégrité structurale de la coque et donc mettant en péril la sécurité du navire. L'idée consiste à placer la compétition ultérieure sur le plan des services apportés aux clients.

- Cerner par anticipation les intentions des exigences de l'OMI pour les normes de construction des navires neufs en fonction d'objectifs (GBS).
- Exploiter toute l'expérience des sociétés IACS pour développer un standard unique accepté, ou un jeu de règlements et procédures, et ainsi aboutir à des prescriptions structurales identiques quelle que soit la société qui classe le navire.
- Garantir à tout navire satisfaisant les nouveaux règlements d'être reconnu par l'Industrie comme présentant au moins la même sécurité, la même solidité et la même longévité qu'en application de n'importe quels autres règlements existants.
- Réduire le coût de l'utilisation de plusieurs règlements qui bien que similaires sont malgré tout différents.
- S'assurer que les règlements et procédures résultant sont rédigés de façon à conduire à des exigences identiques en matière d'échantillonnage.

Ces objectifs ont été développés, pour chaque jeu de règlements, par l'équipe constituée pour le projet et par le comité de pilotage, en réponse aux demandes des armateurs et des chantiers pour une standardisation déjà en place dans d'autres industries et aussi, en réponse aux propositions nationales de coordonner les prescriptions d'échantillonnage qui avaient été faites au sein de l'OMI.... A l'OMI, les exigences reposeront sur des normes d'objectifs de plus haut niveau.

La finalité des CSR est la création d'un standard unique reconnu permettant la vérification de la structure des pétroliers à double-coque de longueur supérieure ou égale à 150 m et développé par le groupe IACS responsable du Projet commun pour les pétroliers (JTP) d'une part, et des vraquiers à simple ou double-coque de longueur supérieure ou égale à 90 m et développé par le groupe IACS responsable du Projet commun pour les vraquiers (JBP) d'autre part, développement fait, dès le départ, en

collaboration étroite avec la communauté maritime.

3 TECHNIQUES DE MODÉLISATION

3.1 Concept d'épaisseur nette

Les formules des CSR sont exprimées en utilisant le concept d' 'épaisseur nette'. Le principe repose sur le fait que les éléments de structure se corroderont tous durant la durée de vie du navire, mais de façon plus ou moins importante. Cette approche en « épaisseur nette » permet de déterminer et de vérifier l'échantillonnage minimum de la structure à conserver tout au long de la vie du navire, et ce dès sa construction, pour satisfaire les prescriptions de résistance. La distinction est clairement faite entre l'épaisseur nette et la surépaisseur dépendant de la corrosion qui se produira au cours de la phase opérationnelle du navire.

Les concepts de base qui ont été couramment utilisés aux navires en service pré-CSR ont été codifiés dans ces règlements CSR. Ceci consiste à appliquer une perte moyenne globale sur la poutre navire et les éléments primaires telle que la résistance globale de ces éléments soit assurée. La résistance de ces éléments est vérifiée en utilisant une marge de corrosion moyenne moindre. Cependant ces grands ensembles sont composés d'éléments locaux tels que mailles élémentaires locales et raidisseurs ordinaires dont la résistance est vérifiée en utilisant la totalité de la marge de corrosion locale. D'une manière générale, la résistance des éléments de structure est vérifiée en utilisant leur capacité structurale dans l'état corrodé, c.à.d. en épaisseur nette, tout en appliquant les charges extrêmes présumées. Ceci assurera au navire de posséder une résistance minimale alors qu'il pourra se trouver en conditions extrêmes vis-à-vis de la corrosion considérée. La fatigue étant un mode de défaillance cumulatif qui démarre dès le premier jour de mise en service, le navire étant neuf, jusqu'à son dernier jour d'exploitation où l'on peut supposer le navire dans son état de corrosion le plus avancé, l'épaisseur nette associée à la poutre navire et aux épaisseurs locales pour vérifier la résistance à la fatigue est moyennée et prise égale à la moitié des marges totales de corrosion.

La structure du navire est contrôlée en service en utilisant des références d'épaisseur similaires

à celles prises en compte lors de la vérification de la structure au niveau du projet. En effet les surépaisseurs de corrosion au neuvage sont définies dans chaque règlement (pour le règlement CSR/Pétrolier en Section 6/3 et les limites de corrosion en service en Section 12/1; pour le règlement CSR/Vraquier respectivement au Chap 3, Sec 3 et Chap 13, Sec 2) Pour la cohérence, les surépaisseurs de corrosion au neuvage et les limites de corrosion en service sont liées entre elles par une marge de réserve afin de couvrir la corrosion qui peut se produire dans l'intervalle de temps entre 2 visites successives. L'épaisseur nette est illustrée à la Figure 1

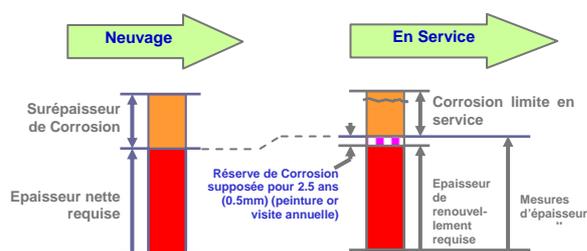


Figure 1 : Principe de l'épaisseur nette

Les valeurs de corrosion introduites dans les règlements ont été établies sur la base d'un travail approfondi du groupe de travail IACS sur la résistance (WP/S) qui a rassemblé une base de données de 600.000 mesures d'épaisseur [1]. Cette base de données couvre les mesures effectuées sur une large amplitude de corrosion de structures exposées à un environnement marin comme les cales de vrac, les citernes de pétrolier, les citernes de ballastage, soumises à différentes températures, etc. pour lesquelles les marges de corrosion s'appliquent. Le processus de propagation de la corrosion depuis son déclenchement initial a été étudié par le biais de la masse importante de données collectées sur ces mesures. Un modèle de corrosion a été développé sur la base d'une théorie probabiliste pour estimer la diminution des éléments structuraux. Une analyse statistique des données a été effectuée pour déterminer les marges de corrosion associées à une probabilité d'usure de 95% de la marge sur une période de 25 ans. Il est cependant noté que des éléments de structure sont peints de manière à combattre les effets de la corrosion. Bien qu'il soit admis que les peintures assurent cette fonction, les effets protectifs des peintures ne sont pas directement inclus dans l'application des surépaisseurs de corrosion utilisées pour la vérification de la

conception. En d'autres termes, les surépaisseurs de corrosion ne peuvent pas être réduites par la présence de peinture. La raison principale de cette décision repose sur le fait établi que les peintures se fissurent en fin de compte en certains points et qu'il n'est pas toujours possible de repeindre ces endroits lorsque le navire est en opération et exposé à des conditions environnementales difficiles. Par ailleurs, l'efficacité des peintures durant la vie du navire dépend des conditions d'application et de la politique de maintenance de l'armateur. Même en appliquant les normes de l'OMI pour le comportement des revêtements de protection des citernes spécialisées ballastées à l'eau de mer de tous les types de navires et des espaces de double muraille des vraquiers (PSPC), ces conditions ne peuvent pas être prise en compte pour l'évaluation des éléments de structure au neuvage.

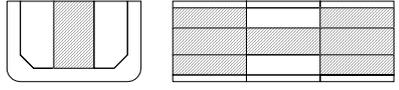
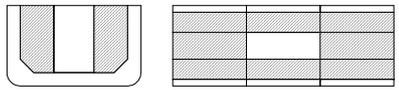
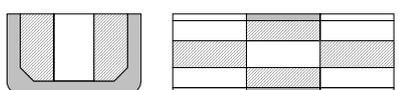
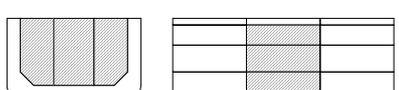
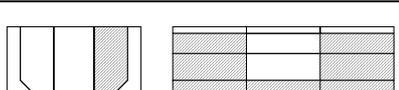
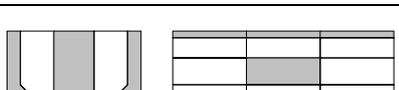
La philosophie de l'approche en échantillonnage net et les valeurs de surépaisseurs de corrosion ont été adoptées dans les règlements IACS CSR pour les pétroliers et les vraquiers.

3.2 Charges

L'élément fondamental sur lequel les règlements reposent est constitué par les charges à appliquer. Ces charges à appliquer entraînent 2 autres éléments également fondamentaux dans le processus de vérification : la définition des formules de résistance et les critères de validation. Les charges sont décomposées en 2 parties majeures qui sont respectivement les composantes statique et dynamique. La composante statique, ou en eau calme, représente typiquement les charges associées aux conditions de chargement telles que le poids lège, la cargaison, les ballastes, la poussée hydrostatique de mer. La Figure 2 illustre des exemples de dispositions de chargement utilisés pour de grands pétroliers (VLCC) et vraquiers ayant des dispositions classiques de citernes/cales. La partie dynamique, ou induite par les vagues, représente les charges associées aux mouvements du navire et accélérations imposées au navire par la mer.

Les charges dynamiques sont basées sur les paramètres fondamentaux du navire de manière à calculer en premier lieu les mouvements et accélérations caractéristiques du navire et ensuite d'obtenir les composantes dynamiques des charges de pression extérieure, des moments

et efforts tranchants appliqués à la poutre navire et des charges internes. Les charges dynamiques associées aux phénomènes de ballotement (sloshing), d'impact local sur les fonds plats à l'avant et sur les parties avant de la muraille, les paquets de mer sur ponts,... sont également spécifiés. Beaucoup de ces charges sont basées sur des exigences unifiées de l'IACS (UR) développées dans le cadre de groupes de travail sur les données et charges de mer, disponibles sur le site web de l'IACS www.iacs.org.uk

Chargements	Dispositions de chargement	Tirant d'eau
A1 ⁽³⁾		0.9 T _{sc}
A2 ⁽³⁾		T _{sc}
A3 ⁽⁴⁾		0.6 T _{sc} (4)
A4		0.6 T _{sc}
A5		0.6 T _{sc}
A6		0.6 T _{sc}
A7 ⁽⁵⁾		T _{LC}
A8 ⁽⁶⁾		T _{balH}

Les efforts dynamiques sont évalués pour différents scénarios de chargement afin de couvrir l'étendue des opérations associées aux exigences réglementaires. Pour la vérification de la résistance d'ensemble, les charges caractéristiques sont obtenues en utilisant les conditions météorologiques et états de mer extrêmes que le navire peut rencontrer, basés sur une probabilité de dépassement de 10-8.

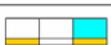
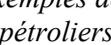
No.	Description ⁽¹⁾	Draught	Loading Pattern	Aft	Mid	Fore	Load Case (Design Wave)		
							Still water vertical bending moment ⁽²⁾		
1	Full Load (2.1.3)	T _s					P1		
							0.5M _{sw,2}		
2	Full Load (3.2.1)	T _s					P1		
							0.5M _{sw,2}		
3	Slack Load (3.2.2)	T _s					P1		
							0		
4	Slack Load (3.2.2)	T _s					P1		
							0		
5	Deepest Ballast (3.2.3)	T ₁₀₀					R1	R1	P1
							M _{sw,H}	M _{sw,S}	M _{sw,2}
6	Multi Port -3 (3.3.3)	0.67T _s					H1		
							M _{sw,2}		
7	Multi Port -3 (3.3.3)	0.67T _s					H1		
							M _{sw,2}		

Figure 2 : Exemples de cas de chargement pour des pétroliers et des vraquiers

Ces charges représentent les efforts extrêmes rencontrés lors d'une exposition dans l'environnement de l'Atlantique Nord défini par la recommandation n°34 de l'IACS, pour une durée de vie de conception de 25 ans. Il a bien été noté lors du développement des règlements que de nombreux navires évoluent leur vie durant sans jamais transiter par l'Atlantique Nord ; cependant l'Atlantique Nord a été sélectionné comme l'environnement de référence pour la conception de façon à ne pas limiter une flexibilité future. De plus, l'Industrie et le public ont réclamé que soient incorporées dans les règlements une sécurité accrue, une plus grande robustesse et solidité ; l'utilisation d'un environnement marin plus sévère est une des pistes suivies pour atteindre ce principe. Les efforts dynamiques sont introduits par le biais d'une série de facteurs de combinaison de charge (LCF) pour prendre en compte la superposition des nombreuses composantes dynamiques des charges en un point donné au moment précis où la composante majeure considérée de la charge atteint son amplitude maximale. Les facteurs de combinaison sont appliqués en liaison avec les chargements statiques comme montré à la Figure 2.

Les règlements spécifient les conditions de chargement et les dispositions de chargement à considérer lors de la vérification de la résistance de la structure. Ces dispositions correspondent aux conditions opérationnelles les plus courantes que le type et la taille du navire doivent satisfaire. Ils constituent le niveau minimal en terme de chargement que les pétroliers ou les vraquiers doivent vérifier et viennent en complément des conditions de chargement spécifiées dans le manuel de chargement propre au navire.

Pour les vraquiers, les dispositions de chargement sont basées sur les exigences unifiées de l'IACS pour la résistance appelée UR S25. Cette exigence unifiée a été introduite en juin 2002 à la suite d'une discussion entre l'IACS et l'Industrie initiée par une lettre de l'Association des Armateurs de Hong Kong qui exprimait leurs inquiétudes relatives aux défauts de conception des vraquiers existants. Cette exigence UR S25 a été développée pour éviter la conception de navire basée uniquement sur des conditions de chargement spécifiques présentées dans le manuel de chargement du navire concerné et également la situation qui bien qu'approuvée, ne puisse donner à l'armateur l'utilisation de la totalité de son potentiel dans un grand nombre de cas.

Pour évaluer la résistance à la fatigue, des efforts caractéristiques sont utilisés pour représenter le grand nombre des amplitudes de charge modestes et cycliques, basés sur une probabilité de dépassement de 10⁻⁴. Sachant que les résultats de calculs en fatigue sont extrêmement sensibles aux charges et à l'application de l'amplitude de contraintes correspondante, les charges les plus représentatives sont appliquées de manière à éliminer au mieux les hypothèses les plus conservatives. Il faut remarquer que les méthodes de calculs en fatigue requièrent des marges de sécurité dans la méthode et dans les critères d'échantillonnage eux-mêmes, de sorte qu'il n'est pas nécessaire d'imposer des mesures plus sévères au stade de la détermination des efforts. Bien entendu comme indiqué ci-avant, l'environnement Atlantique Nord est utilisé.

Les efforts réglementaires dynamiques, déterminés pour le niveau extrême 10⁻⁸ ou pour le niveau représentatif de la fatigue à 10⁻⁴ ont été extensivement développés et vérifiés en utilisant des calculs directs hydrodynamiques.

L'introduction des facteurs de combinaison de charge pour les différents aspects, constitue la partie majeure du travail effectué dans les règlements. Les efforts sont combinés par cas de chargement en appliquant des paramètres spécifiques maximaux corrélés avec les autres composants correspondants du cas de chargement de manière à approcher la vague équivalente pour représenter des charges dynamiques réalistes. Les paramètres dynamiques de charge tels que moment de flexion d'ensemble, pression extérieure,

pression interne, etc. sont chacun maximisés pour imposer les efforts statiques et dynamiques sur les différents éléments de structure. Les règlements définissent des cas de chargement spécifiques à utiliser durant le processus d'examen de la structure.

3.3 Exigences structurales

La portée générale des exigences structurales est similaire à celle des règlements actuels des Sociétés de Classification. Les prescriptions structurales couvrent la résistance de la poutre navire, des éléments primaires et des éléments locaux. Elles recourent à des principes de dimensionnement compréhensibles et transparents à travers le concept d'épaisseur nette et d'application des charges résumé précédemment en association avec les critères de validation. Ces critères sont définis en fonction des cas de chargement et du mode de rupture considérés.

En plus de l'objectif de transparence dans la définition et la description des critères de dimensionnement, la cohérence est également un objectif principal de sorte que des charges, des modes de rupture et des critères de dimensionnement similaires conduisent à des exigences réglementaires semblables.

3.3.1 Résistance d'ensemble

Les prescriptions pour la résistance d'ensemble de la poutre navire relatives à la documentation à bord et aux formulations des critères de résistance réglementaire sont en accord avec les exigences unifiées de l'IACS (UR S1, S7, S11 en général et S17 et S25 pour les vraquiers). Les prescriptions réglementaires couvrent les procédures détaillées pour l'examen de la structure soumise aux charges statiques et dynamiques de flexion et de cisaillement. L'évaluation de la résistance au flambement des tôles et raidisseurs ordinaires est également effectuée à ce stade pour les contraintes induites par la flexion et le cisaillement d'ensemble combinés.

3.3.2 Eléments primaires

Les exigences prescriptives relatives aux éléments primaires sont introduites dans le règlement CSR Pétrolier pour le double fond, la double coque, les porques de cloison longitudinale, les transversales de pont, les tirants et les serres de cloison. Les dispositions de chargement des citernes et les combinaisons

de charge pour ces éléments sont spécifiées de façon que les efforts résultants soient maximisés lors de la vérification des modes adéquats de rupture en utilisant des formules de dimensionnement basées sur les charges. Des exemples généraux de ces prescriptions sont donnés aux équations (1) et (2) pour respectivement la flexion et le cisaillement. Il est aisé de comprendre la combinaison entre les charges et les contraintes admissibles pour la flexion ou le cisaillement. Une configuration typique de l'anneau renforcé d'un VLCC est donnée à la Figure 3 pour illustrer quelques uns des paramètres des formules réglementaires.

La disposition structurale des vraquiers n'est pas propice à cette approche prescriptive pour les éléments primaires. Par exemple, la structure du double fond est constituée de varangues et de carlingues se soutenant mutuellement ; il est donc difficile de donner des formules simples pour pré-dimensionner ces éléments.

Pour les Règlements CSR, des critères additionnels de hauteur ou d'épaisseur minimale sont introduits pour limiter les déformations globales des panneaux raidis, donner une robustesse minimale et effectuer une première analyse sommaire vis-à-vis du flambement des panneaux ou de la stabilité des raidisseurs.

Les éléments primaires sont vérifiés par après par l'utilisation de méthodes de calculs directes en éléments finis. L'analyse par éléments finis est incomparablement plus performante pour déterminer l'interaction entre les éléments de structure tels qu'éléments participant à la flexion d'ensemble, effets de grillage, déformation de cisaillement d'ensemble, etc. qui ne peut pas toujours être complètement prise en compte dans une approche prescriptive. Les exigences prescriptives basées sur les charges sont donc typiquement plus conservatives que celles basées sur une analyse en éléments finis ; en conséquence, dans les zones où une analyse en éléments finis n'est pas pratiquée les exigences prescriptives demandent une résistance nécessaire.

Cependant, pour le règlement CSR / Pétrolier uniquement, dans les zones où l'analyse en éléments finis est effectuée, une réduction de 15% de l'échantillonnage par rapport aux exigences prescriptives est autorisée sous réserve que les résultats associés aux éléments finis satisfassent les critères relatifs ces calculs.

$$Z = \frac{1000 M}{C_{s-pr} \sigma_{yd}} \quad \text{cm}^3 \quad (1)$$

Où:

- M** Moment de flexion de conception, en kNm
 $= c P S l_{bdg-vw}^2$
- P** Pression de conception pour le cas de chargement considéré, en kN/m².
- l_{bdg-vw}*** Portée de flexion, en m.
- S** Espacement des porques, en m
- C_{s-pr}*** Facteur de contrainte de flexion admissible
- σ_{yd}** Résistance élastique minimale spécifiée du matériau, en N/mm²
- C** Coefficient correspondant à la disposition structurale

$$A_{shr} = \frac{10 Q}{C_{t-pr} \tau_{yd}} \quad \text{cm}^2 \quad (2)$$

Où:

- Q** Effort tranchant de conception, en kN:
 $= S [c_u l_{vw} (P_u + P_l) - h_u P_u]$
- P_u*** Pression de conception pour le cas de chargement considéré calculée à mi-hauteur du gousset supérieur de la porque, *h_u*, situé à mi citerne, en kN/m²
- P_l*** Pression de conception pour le cas de chargement considéré calculée à mi-hauteur du gousset inférieur de la porque, *h_l*, situé à mi citerne, en kN/m²
- l_{vw}*** Longueur de la porque, en m
- S** Ecartement des porques, en m
- h_u*** Longueur effective de cisaillement du gousset supérieur de la porque, en m
- h_l*** Longueur effective de cisaillement du gousset inférieur de la porque, en m

- c_u Coefficient correspondant à la disposition structurale
- C_{t-pr} Facteur de contrainte de cisaillement admissible donné en 2.6.2.2
- $\tau_{yd} = \frac{\sigma_{yd}}{\sqrt{3}}$ N/mm²
- σ_{yd} Résistance élastique minimale spécifiée du matériau, en N/mm²

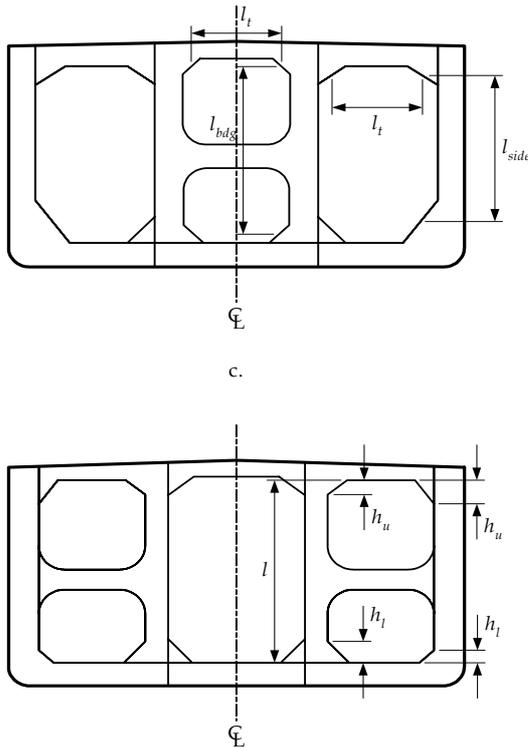


Figure 3 : Exemple de prescription pour les éléments primaires

3.3.3 Eléments de support locaux

Les prescriptions pour les éléments de support locaux sont exprimées pour la coque extérieure et la structure interne telle que double fond, double coque, pont, cloison longitudinale et transversale, etc. Les efforts utilisés pour la vérification de l'enveloppe externe des citernes/cales proviennent des chargements maximaux possibles pour des conditions correspondant à une capacité pleine d'un côté et vide de l'autre côté de l'élément considéré et inversement pour que tous les scénarios soient envisagés. Sur le même principe, la coque extérieure est examinée pour une charge externe maximale correspondant au tirant d'eau maximal sans contre pression interne et pour la situation opposée, une charge interne maximale (cale/citerne pleine) associée à une charge

externe minimale correspondant aux conditions de ballast. Les modes de défaillance utilisés dans les formules de dimensionnement sont ainsi développées pour les tôles et les raidisseurs ordinaires. Les prescriptions relatives aux raidisseurs ordinaires incorporent l'examen des détails en extrémité de portée avec la prise en compte ou non de la présence d'une mise ou d'un plat de raidissage dans le plan de son âme.

Les éléments locaux sont vérifiés dans une étape ultérieure pour les critères de contraintes dans le cadre des calculs par éléments finis. L'analyse en éléments finis est plus adéquate pour considérer l'interaction entre les éléments de structure et leur influence locale sur les éléments locaux comme les tôles de muraille, de double coque, de cloisons transversales et longitudinales, etc. qui ne peuvent pas toujours être pleinement prises en compte dans les exigences prescriptives. Cette vérification est établie par rapport à la limite élastique et la résistance au flambement ou résistance ultime.

Les éléments de support locaux incluent également les exigences pour la vérification de la raideur des cloisons ondulées et des tôles locales la constituant, ainsi que la structure des caissons de ces cloisons.

Des prescriptions supplémentaires concernant les épaisseurs minimales, les ratios pour l'âme ou la semelle des raidisseurs ou d'autres critères locaux sont appliquées pour s'assurer de la robustesse minimale et pour obtenir un premier examen des panneaux et de la stabilité des raidisseurs ordinaires.

3.3.4 Eléments structuraux des citernes avant et arrière

Les éléments de structure des citernes les plus en avant ou en arrière sont vérifiés dans le Règlement CSR/Pétrolier par utilisation de la même procédure que celle exigée pour les éléments participant à la résistance d'ensemble dans les zones de transition et également en utilisant les exigences requises pour la vérification locale. Une procédure générale est également introduite pour appliquer les résultats obtenus par l'analyse de la partie centrale par éléments finis aux citernes en dehors de la région des 0.4 L de part et d'autre du maître couple.

3.3.5 *Éléments de structure à l'avant, dans la machine ou à l'arrière*

Les éléments de structure à l'avant, dans la machine et à l'arrière du navire sont vérifiés par le biais des prescriptions détaillées introduites dans le règlement. La structure avant est vérifiée pour les impacts sur les fonds (*slamming*) et la muraille en considérant les différents tirants d'eau et remplissages des capacités utilisés pour l'opération du navire.

En plus des prescriptions mentionnés ci-dessus, des exigences générales vis-à-vis du soudage, des matériaux, des moyens de fermeture, des superstructures, des équipements de mouillage, etc. sont données dans les règlements CSR.

3.3.6 *Conformité à la SOLAS XII/6.5.1 & 3 pour les Vraquiers*

Le nouveau chapitre XII de la SOLAS qui est entré en vigueur le 1er juillet 2006 (date de pose de quille) a introduit une exigence supplémentaire pour les dommages des raidisseurs ordinaires installés à la périphérie de la cale à vrac. L'exigence exacte s'exprime en 6.5.3 comme suit : « *La structure de la tranche de la cargaison doit être telle que la défaillance d'un quelconque élément structural de raidissement n'entraîne pas une défaillance immédiate d'autres éléments structuraux pouvant à son tour entraîner l'effondrement de l'ensemble des parois latérales renforcées.* ».

Dans le cadre de l'IACS, l'exigence unifiée UR S12 rev 4 a été discutée depuis mi-2002 jusqu'au début de 2004. La conséquence de ces discussions a entraîné l'introduction dans le règlement CSR / Vraquier des résultats du groupe ISR ISWG ¼ et SOLAS XII/6.5.3. L'objectif à l'origine était d'accroître la résistance de la structure de muraille (membrures mais également leurs goussets ainsi que les lisses les soutenant). Par la suite, la discussion a évolué sur la façon d'éviter un effet domino par déversement des membrures.

Les principes suivants ont été appliqués :

- Déformation locale de 20 mm imposée aux raidisseurs de la structure bordant la cale pour la vérification de la résistance ultime du panneau raidi soumis à 80% des charges de houle (moments de flexion et pression)
- Si le dommage est une cassure ou un problème de soudage, nécessité d'éviter une rupture fragile.

Les exigences sur la redondance structurale données en SOLAS XII/6.5.1 et 6.5.3 ont été introduites dans le règlement CSR / Vraquier au travers des prescriptions présentées par l'IACS et acceptées par l'OMI :

- 80% des charges dynamiques sont appliquées
- Facteur de sécurité de 1.15 requis pour les calculs de résistance ultime des panneaux raidis bordant les cales de cargaison (sauf le pont)
- Grade D/DH exigé pour les goussets inférieurs de membrures et la tôle de muraille située à la jonction avec la tôle du caisson inférieur de ballast latéral.

3.4 *Analyse en éléments finis*

Les règlements CSR/Pétroliers et Vraquiers exigent qu'une vérification de la structure soit effectuée par une analyse en éléments finis sur une modèle de 3 cales/citernes.

Comme mentionné ci-dessus, l'objectif de cette analyse structurale consiste à s'assurer que les niveaux de contraintes et la capacité de résistance au flambement des éléments primaires et de la structure de la coque soumis à des efforts statiques et dynamiques restent dans des limites acceptables. De plus, la résistance à la fatigue de détails de structure sélectionnés doit également être validée.

La vérification structurale repose sur un calcul en éléments finis en 3 dimensions (3D) décrit dans une procédure détaillée dans les règlements. Cette procédure couvre différents aspects comme les détails de modélisation, les chargements, les conditions aux limites à appliquer, et les critères de dimensionnement pour valider la disposition et l'échantillonnage des éléments. Les règlements détaillent aussi les analyses à mener sur des modèles fins et très fins à effectuer pour évaluer les zones à fortes concentrations de contraintes et les détails de structure dans ces zones.

La Figure 4 donne deux exemples de modèles globaux de 3 cales ou citernes. La Figure 5 montre des exemples de modèles très fins imbriqués dans des modèles fins.

L'étendue des modèles fins ou globaux, la densité de maillage associé, les épaisseurs nettes à prendre en compte, les critères de dimensionnement à appliquer à chaque type d'élément structural, les charges réglementaires

et le type d'analyse à utiliser sont spécifiés dans les règlements.

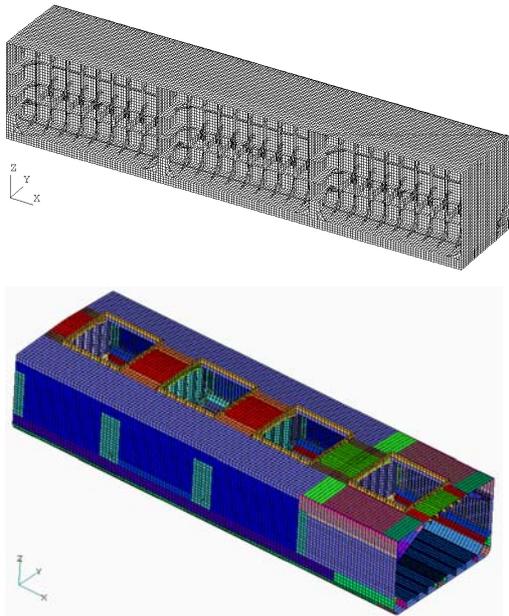


Figure 4 : Modèles globaux (3 cales/citernes)

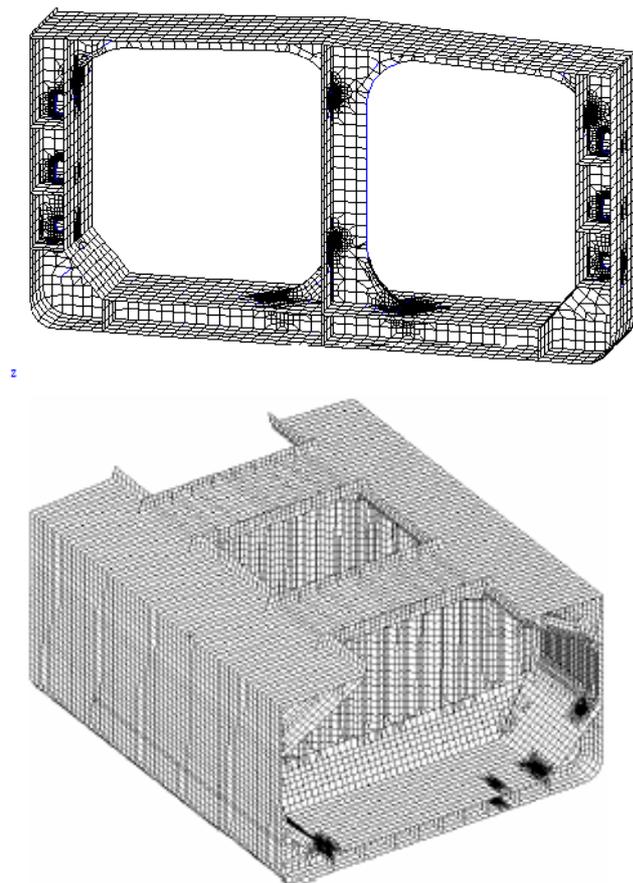


Figure 5 : Modèles fins

3.5 Résistance ultime de la poutre navire

Les règlements CSR requièrent un examen simplifié de la résistance ultime de la poutre navire de manière à donner un niveau supplémentaire de vérification de la résistance d'ensemble par rapport à l'approche courante élastique provenant des exigences IACS UR S11, elles-mêmes reprises dans les règlements. Cet examen simplifié n'a pas pour objet de reproduire une vérification complète de la résistance ultime de la poutre navire dans laquelle toutes les charges et les courbes de capacité de tous les éléments participant à la résistance d'ensemble seraient développées par une approche typique non linéaire. En effet, une méthode a été développée pour vérifier la capacité en résistance ultime d'une section transversale de façon à exclure les navires dont la conception pour ce mode de défaillance pose problème.

Pour la section transversale considérée des pétroliers et des vraquiers, un niveau supplémentaire de sécurité est ainsi introduit pour les conditions de navigation en pleine mer dont le moment de flexion total correspond au moment de flexion admissible en eau calme et en houle de probabilité égale à 10^{-8} . De plus pour les vraquiers, des conditions d'avarie sont également examinées ; elles correspondent au cas d'envahissement de n'importe quelle cale associées à un moment de houle réduit.

Il s'avère que les conditions en contre arc produisent la plus faible capacité en résistance ultime. Le règlement CSR / Pétrolier donne de ce fait uniquement des critères pour ces conditions de contre arc.

3.6 Fatigue

Le but général du contrôle en fatigue introduit dans les règlements consiste à s'assurer que la structure du navire soumise à des charges de fatigue c.à.d. des charges cycliques dynamiques a une durée de vie en fatigue adéquate par rapport à la durée de vie de conception du navire.

La procédure donne une approche orientée sur la conception et permet la vérification de la résistance en fatigue de certains détails structuraux par une méthode dite simplifiée au lieu de méthodes plus élaborées comme par exemple la méthode d'analyse spectrale. Le terme « approche simplifiée » est utilisé ici afin de distinguer cette approche de méthodes d'analyse plus élaborées.

Les critères introduits dans les règlements ont été développés et proviennent de sources diverses telles que le modèle de dommage linéaire de Palmgren Miner, les méthodologies des courbes SN, les données environnementales à long terme de l'océan Atlantique Nord (IACS Wave Data), etc. et supposent que la qualité de fabrication est acceptable pour les experts de la Société de Classification et reste dans les limites des standards établis. La capacité de la structure à résister à la fatigue est exprimée en dommage de fatigue pour assurer aux concepteurs la plus grande flexibilité possible.

La procédure de calcul est axée sur l'évaluation de la résistance en fatigue des détails de structure à leurs connexions soudées et est basée sur une méthode simplifiée. La vérification est applicable aux détails des extrémités de lisse en utilisant la théorie des poutres basée sur l'approche par contrainte nominale ; les autres détails tels que la connexion du double fond, de la tôle de caisson inférieur et de la carlingue latérale en abord se fait par la détermination du point chaud directement par un calcul en éléments finis.

Les principales hypothèses utilisées sont données ci-dessous :

- Modèle de dommage cumulatif linéaire (loi de Palmgren-Miner) utilisé en liaison avec les courbes SN correspondantes,
- Contraintes cycliques due aux charges utilisées et incluses dans les effets des contraintes moyennes,
- Durée de vie de conception égale à 25 ans,
- Données environnementales correspondant à l'Atlantique Nord,
- Les amplitudes des contraintes long terme d'un détail de structure peut être caractérisé par une loi de distribution statistique à un paramètre (ξ),
- Les détails de structure sont idéalisés, pour les pétrolier une classe de fatigue et pour les vraquiers par un facteur de concentration de contrainte, précisé dans les règlements,
- Pour les connexions en extrémité de lisses, la contrainte nominale obtenue par une la théorie des poutres utilisant les charges réglementaires est amplifiée par des formules empiriques basées sur des calculs en éléments finis pour une série de détails semblables pour déterminer le facteur de

concentration de contrainte applicable au détail considéré.

La classification des détails structuraux dans les règlements est basée sur une connexion géométrique soumise à des charges élémentaires. Des exemples de connexions typiques et leur classe de fatigue correspondante sont montrés à la Figure 6 pour les pétroliers et les facteurs de concentration de contrainte à la Figure 7 pour les vraquiers.

Lorsque la géométrie ou les chargements deviennent trop complexes pour entrer dans une classification par nature simplifiée, un calcul par éléments finis du détail doit être mené pour en déterminer la contrainte à prendre en compte. Des conseils sur l'analyse en éléments finis requise pour déterminer le point chaud du joint soudé sont donnés dans la procédure. Les détails devant être analysés par fatigue en éléments finis sont pour les 2 types de navire l'angle formé par le double fond et le caisson inférieur en abord et pour les vraquiers, indiqués à la Figure 8.

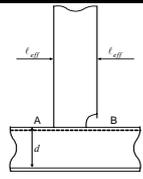
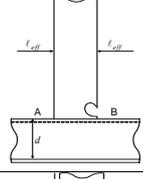
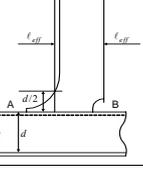
ID	Connection type	Critical Locations	
		A	B
1		F2	F2
2		F2	F2 (see note iv)
3		F	F2

Figure 6 : Classification des joints en fatigue

2	a	watertight	$dw \leq d < 1.5dw$	1.45	1.1	1.15	1.4
			$1.5dw \leq d$	1.4	1.05	1.15	1.35
f	non-watertight	watertight	$dw \leq d < 1.5dw$	1.55	1.1	-----	-----
			$1.5dw \leq d$	1.5	1.05	-----	-----
f	non-watertight	watertight	$dw \leq d < 1.5dw$	1.1	1.05	1.15	1.1
			$1.5dw \leq d$	1.05	1.05	1.1	1.05

Figure 7 : Facteurs de concentration de contrainte

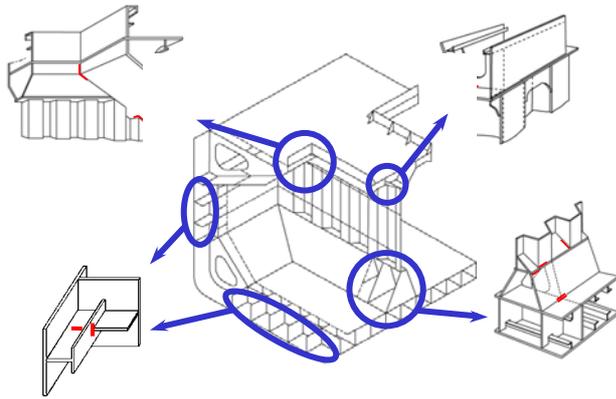


Figure 8 : Exemples des détails de structure de vraquier à vérifier pour la fatigue

Les règlements permettent également l'utilisation optionnelle de méthodes spectrales plus détaillées pour la vérification en fatigue. Cependant ces analyses plus fines ne peuvent pas conduire à des réductions par rapport aux prescriptions réglementaires.

4 NORMES DE CONSTRUCTION DES NAVIRES NEUFS EN FONCTION D'OBJECTIFS

Au moment où les règlements CSR ont été développés, l'Organisation Maritime Internationale (OMI) démarrait les grandes lignes des normes de construction des navires neufs en fonction d'objectifs dont l'abréviation anglaise est connue sous le sigle GBS, ayant pour but de déterminer les normes de base qui seront utilisées pour établir les règlements des Sociétés de Classification. Le développement de ces GBS est toujours en cours à l'OMI. L'Organisation envisage 2 formats pour ces normes : une approche « prescriptive » et une approche par « niveau de sûreté ». Indépendamment du format, l'OMI est donc en train de développer un « règlement pour les règlements » de sorte que les règlements des Sociétés de Classification devront satisfaire un niveau minimal de base de sûreté. Lors du développement des règlements communs, les évolutions en cours des GBS ont été suivies de façon à incorporer les critères pertinents dans les CSR. Ainsi la durée de vie de conception de 25 ans et la houle correspondant à l'Atlantique Nord ont été introduites dans les CSR.

Récemment, l'IACS a accepté de tester les règlements CSR dans le processus des GBS par le biais d'un projet pilote. Ce projet pilote sera utilisé pour améliorer les GBS et en parallèle d'identifier les zones d'amélioration des CSR.

5 IMPLEMENTATION DES REGLEMENTS COMMUNS DE L'IACS

En juin 2003, le Conseil de l'IACS réagit à des initiatives venant de l'OMI et de l'Industrie et décide de développer un jeu de règlements et de procédures communs pour la détermination des échantillons de structure des pétroliers et des vraquiers. Le 1er avril 2006, ces règlements entrent en vigueur. Ils incorporent les changements et améliorations antérieures et proposent une approche harmonisée pour la structure du navire et ce pour l'ensemble des Sociétés de Classification de l'IACS.

5.1 Maintenance des CSR

Au moment où les règlements communs entrent en application, l'IACS crée 2 équipes de projet sous la supervision du « Hull Panel » de l'IACS. Chaque équipe se voit confier la charge de la maintenance de l'un des 2 jeux de CSR. La Figure 9 montre l'organisation de l'IACS pour les CSR.

Chaque équipe est composée de 4 membres de l'IACS, 3 appartenant aux Sociétés de classification qui ont développé le règlement du type de navire concerné et un autre membre.

A ce jour, la maintenance des règlements est assurée comme suit :

- CSR / Pétroliers
 - DNV,
 - ABS,
 - LRS,
 - BV
- CSR / Vraquiers
 - ClassNK,
 - BV,
 - GL,
 - ABS

Une rotation des membres est prévue tous les 2 ans.

A la suite des demandes d'interprétation et des questions posées par les membres de l'IACS, les équipes de maintenance proposent des errata et des propositions de mise à jour réglementaires. Les errata concernent principalement les amendements éditoriaux des règlements alors

que les propositions de mise à jour réglementaires doivent recevoir l'aval des comités techniques de chaque membre de l'IACS avant son adoption définitive par le Conseil.

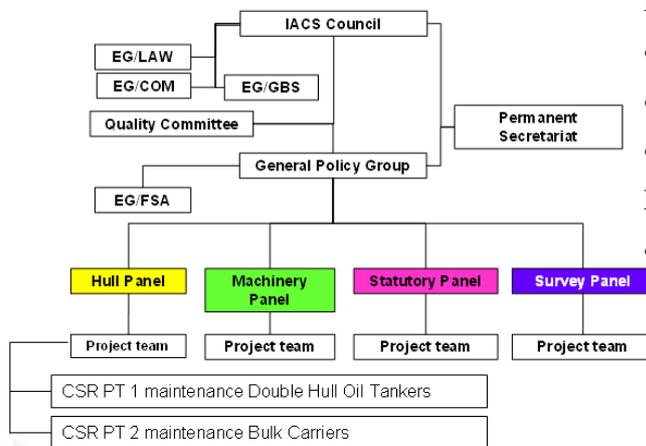


Figure 9 : Organisation de l'IACS

5.2 Interprétations des CSR

Les équipes impliquées dans la maintenance des CSR doivent également effectuer des interprétations des règlements. Ces interprétations peuvent constituer un moyen pour appliquer une exigence de la même façon par tous les membres de l'IACS. Elles établissent une étape possible vers une mise à jour réglementaire en proposant une solution temporaire aux membres et aux concepteurs de navires.

Ces interprétations sont enregistrées dans une base de données accessible aux membres de l'IACS. Lorsqu'elles sont jugées utiles pour l'Industrie, le secrétariat de l'IACS les rend disponibles sur le site internet de l'IACS.

Une fois par an, les équipes de maintenance passent en revue les interprétations pour proposer au « Hull Panel » une liste d'amendements réglementaires.

5.3 Harmonisation des CSR

Les règlements communs des pétroliers et vraquiers ont commencé à des moments différents et dès leur origine ont suivi des cheminements de développement également différents. Les membres de l'IACS se sont accordés pour harmoniser les 2 approches et un degré important d'harmonisation a été déjà atteint entre les 2 jeux de règlements. Les termes adoptés par chacune des sociétés par rapport aux

CSR sont identiques et un travail d'harmonisation plus ample continue.

Le processus a été divisé en 3 phases : un processus à court, moyen et long termes

La phase à court terme s'est concentrée sur :

- Les efforts tranchants verticaux de houle
- Les marges et surépaisseurs de corrosion
- La résistance ultime de la poutre navire

La phase à moyen terme sur :

- Les exigences prescriptives de flambement
 - Flambement sous les efforts d'ensemble hors éléments finis
 - Comparaison des analyses par calculs directs
- Analyse par calculs directs
 - Elimination des problèmes majeurs entre les 2 procédures pour un échantillonnage commun
 - Analyse comparative des structures de pétroliers et vraquiers par les équipes JTP (Projet Pétrolier) et JBP (Projet Vraquier)

Et la phase à long terme sur :

- Harmonisation des charges
- Fatigue

Les tâches des phases à court et moyen termes ont été menées à bien et leurs résultats incorporés aux textes réglementaires des CSR. Les projets à long terme ont d'abord été affectés au « Hull Panel ». Cette phase devait démarrer après une période d'implémentation afin de glaner un retour d'expérience dans son application.

Dès la fin 2007, le Conseil de l'IACS a créé un groupe de projet spécifique pour effectuer l'harmonisation des 2 règlements CSR, appelé Project Management Team (PMT). Ce groupe est codirigé par deux responsables, l'un venant du Bureau Veritas et l'autre du Det Norsk Veritas. Ce groupe répond au SG/CSR (Small Group/ CSR) mis en place par le Conseil pour l'aider directement sur les problèmes des CSR. L'organisation est décrite à la Figure 10.

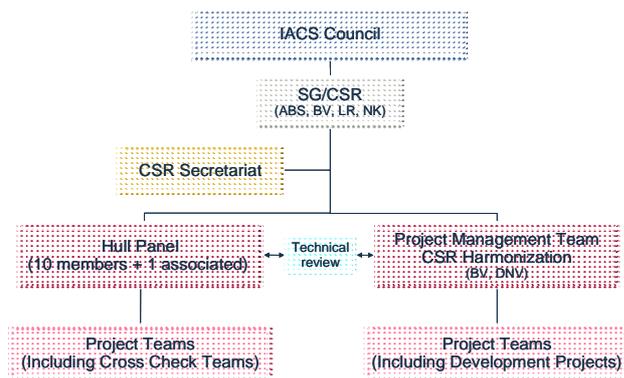


Figure 10 : Organisation de l'IACS pour les CSR

Le groupe PMT a proposé un plan de travail sur 4 ans pour produire un seul règlement harmonisé comportant une partie commune aux 2 types de navire et une partie spécifique à chacun des 2 types. Son objectif est de partir de l'existant et de faire converger les exigences qui sont parfois extrêmement proches et de proposer des solutions pour les méthodes qui le sont moins.

Les équipes de projets suivantes ont été créées en 2008 :

- Charge de mer
- Flambement
- Eléments finis
- Soudage
- Surépaisseurs de corrosion

De plus le PMT supervise 2 autres projets, l'un traitant de la mise à jour du règlement vraquier relative à la fatigue sous mer de trois-quarts et l'autre géré par le « Survey Panel » pour le suivi en service des navires.

Ce plan 2008 sera complété lors des années à venir par d'autres équipes de projet (fatigue, etc....) pour atteindre l'objectif final.

5.4 Manifestation de la conformité aux CSR

Les pétroliers et vraciers dont le contrat de construction est signé après le 1er avril 2006 et qui relèvent de l'application des règlements communs de l'IACS se voient attribuer une mention de service complémentaire CSR ajoutée à la mention de service pétrolier ou vraquier, signifiant que le navire satisfait aux exigences CSR ou Common Structural Rules. Cette procédure est appliquée par toutes les Sociétés de Classification de l'IACS.

6 CONCLUSIONS

Le développement des CSR par l'IACS a été esquissé dans ce papier. Des exemples d'équilibre entre les méthodes de calculs techniquement développées et les besoins d'approches déterministes et pratiques ont été présentés. A l'époque où les règlements CSR furent développés, les normes de construction des navires neufs en fonction d'objectifs (GBS) de l'OMI étaient sous surveillance pour en incorporer les critères pertinents dans les CSR.

Les rapports nouveaux entre Sociétés de Classification et l'Industrie, conséquence directe des processus de consultation effectués durant les phases d'élaboration des règlements ont été décrits avec l'entrée en force et la maintenance des CSR par les 10 membres de l'IACS.

7 REFERENCES

- [1] Common Structural Rules for Bulk Carriers, Jan 2006, NR522 DT R00 E
- [2] Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, Jan 2006, NR523 DT R00 E

Auteur

Philippe Baumans est responsable du Département Développement au sein de la Branche Marine au siège du Bureau Veritas, à Paris-la-Défense. Il est à ce titre responsable du développement des divers règlements du Bureau Veritas pour les navires et l'offshore ainsi que de celui des outils informatiques. Anciennement représentant du BV au « Hull Panel » de l'IACS, il a été nommé coresponsable du groupe PMT pour l'harmonisation des règlements communs.