

# Acoustique et Vibrations dans les navires à passagers

**Sylvain Branchereau**

STX Europe

Service Acoustique & Vibrations

BP 61775

44617 Saint Nazaire CEDEX

Tél : 02 51 10 41 76

E-mail : sylvain.branchereau@stxeurope.com

**STX**

Europe est un des rares chantiers navals au monde à construire des navires à passagers de forte valeur ajoutée : la livraison de navires comme le transatlantique Queen Mary 2 en 2003, les paquebots MSC Fantasia, MSC Splendida et le NCL Norwegian Epic livrés ces 2 dernières années illustrent le savoir-faire d'une société d'environ 2 300 personnes et de ses co-réalisateur.

Le confort des quelque 4 000 à 5 000 passagers est de première importance pour un armateur de paquebots. Il se caractérise entre autres par de faibles niveaux sonores et vibratoires qui, lorsqu'ils sont inférieurs aux valeurs de référence, permettent à l'armateur d'obtenir de la part des sociétés de classification un label appelé marque de confort.

Le développement des technologies et des moyens de calcul ont permis de réduire et de maîtriser ces niveaux, et de les ramener à des seuils comparables à ceux des grands hôtels. La demande croissante des armateurs pour une marque de confort a stimulé le développement et l'évolution des moyens de contrôle et de validation des niveaux sonores et vibratoires.

Cet article rappelle les spécificités des cahiers des charges acoustique et vibratoire sur les navires à passagers actuels et présente les types d'études menées, en se concentrant plus précisément sur les calculs et investigations réalisées avec les Eléments finis.

## Le confort à bord

En Acoustique et Vibrations, les critères de confort se définissent essentiellement en se référant à 4 types de mesures.

Les deux premiers sont des niveaux mesurés en tout lieu du navire en navigation :

- le niveau de bruit de fond exprimé en dB(A),
- le niveau vibratoire exprimé en mm/s pic ou RMS se référant à deux versions possibles (1984 et 2000) de l'ISO 6954 «Vibrations mécaniques — Lignes directrices pour le mesurage, l'établissement de rapports et l'évaluation des vibrations affectant l'habitabilité à bord des navires de commerce et des paquebots».

P = 22MW (1980)	P= 24MW (1985)	P=40MW (1995)	P= 40MW (2000)	P=86MW (2001)	P=48MW (2006)
pas de niveau vibratoire requis	4mm/s pic	2mm/s pic	1.5mm/s pic	1.5-2mm/s pic	1.5mm/s pic
niveau sonore: 60dB(A) dans cabines	niveau sonore: 45 dB(A) dans cabines	niveau sonore: 45 dB(A) dans cabines	niveau sonore: 45 dB(A) - 50dB(A) dans cabines	niveau sonore: 45 dB(A) - 50dB(A) dans cabines	niveau sonore: 44-49 dB(A) dans cabines

Tabl. 1 : Évolution des critères vibratoires et sonores en navigation sur les paquebots

		SPL in dB(A)			
		Hg = 1			
		DNV 2007	LRS 2007	DNV 2005	
PASSENGER AREAS	Passenger top level cabins	45	45	44	
	Passenger standard cabins	49	49	49	
	Restaurants, cafeteria and type B spaces	55	55	55	
	Outside installations (swimming pools, sport decks...)	65 (*)	67 (*)	65 (*)	
	Public shops, passages (type D)	60	60 (*)	55	
	Passenger rooms (type A)	65	55	55	
	Passenger rooms (type C)	53	55	55	
CREW AREAS		SPL in dB(A)			
		Hg = 2			
		DNV 2007	LRS 2007	DNV 2005	
		Wheehouse	63	65	68
		Radio room	57	60	55
		Crew cabins	55	55	55
		Offices	64	60	68
		Crew public spaces, mess rooms	68	60	68
		Hospital	57	55	55
		Engine control room	74	75	78
		Crew open recreation area	73	72 (*)	78
		Galley	73	75 (*)	
		Workshops	65	65	
Gateways, staircases and passages in crew areas	73	75			

Type B = restaurant, bar, cinemas, casinos, lounges  
 Type D = halls, atrium, shops, corridors, stairs, sports room, gym  
 Type A = discotheque or equivalent  
 Type C = Lecture rooms, libraries, theatres  
 (\*) : 3 dB(A) exceedance allowed in the accommodation above the propellers, for 3 decks above the mooring deck  
 (\*\*) : 5 dB(A) exceedance allowed within 3m of air inlets / outlets  
 (\*\*\*) : Shops only for LRS 2007  
 (\*\*\*\*) : 85 dB(A) at 1m of individual items (canopy / hoods)

Tabl. 2 : Comparaison des différentes classes de confort pour les zones Passagers et Équipage. Niveaux de bruit.

		Sound indices E <sub>1</sub> in dB				
		Hg = 1				
		DNV 2007	LRS 2007	DNV 2005		
PASSENGER AREAS	Cabin / Cabin (top level)	35	45	46		
	Cabin / Cabin (standard)	47	49	49		
	Corridor / Cabin (top level)	57	49	49		
	Corridor / Cabin (standard)	58	58	58		
	Stairs / Lifts / Cabin (top level)	48	50	56		
	Stairs / Lifts / Cabin (standard)	48	47	53		
	Machinery rooms / Cabin		55	55		
CREW AREAS	Engine rooms / Corridor		59	64		
	Public space / Cabin (top level)	53	55	56		
	Public space / Cabin (standard)	53	52	55		
	Discotheque - show room / Cabin	64	60	65		
	Discotheque - show room / Stairwells and other public spaces		52			
			Sound indices E <sub>1</sub> in dB			
			Hg = 2			
DNV 2007			LRS 2007	DNV 2005		
Cabin / Cabin			33	36	33	
Corridor / Cabin			33	32	32	
Stairs / Corridor			37	32	45	
Public space / mess / Cabin			65	45	45	
			Impact index L <sub>1</sub> in dB			
			Hg = 2			
			DNV 2007	LRS 2007	DNV 2005	
CREW AREAS			Cabin in general (with carpet and soft materials)	58	58	58
			Cabin below hard deck coverings (wood, marble...)	68	59	68
			Cabin below sport courts & dance floor + tables	45	47	45

Tabl. 4 : Comparaison des différentes classes de confort - Niveaux d'indices d'isolement.

Ces mesures sont très généralement effectuées à la vitesse de service qui est à environ 85% de la puissance propulsive maximale. Le tableau 1 fait ainsi part de l'évolution significative des critères et ceci, malgré une augmentation significative de la taille et de la puissance propulsive des navires ces quinze dernières années.

Les deux derniers critères qui complètent le cahier des charges concernent l'indice d'isolement aux bruits aériens et les bruits d'impacts.

Ces notions définies précédemment sont désormais regroupées et proposées par l'ensemble des sociétés de classification dans des classes de confort.

Celles-ci sont devenues, de nos jours, incontournables et permettent aux armateurs de s'y référer comme argument de marketing. Elles comportent 3 degrés de confort : le degré 1, systématiquement demandé par les armateurs pour les zones Passagers, correspondant aux niveaux les plus exigeants de la marque. Le degré 2 est quant à lui généralement demandé pour les zones Équipage.

Les classes de confort les plus demandées sont celles émises par le DNV (Det Norske Veritas), le BV (Bureau Veritas) et le LRS (Lloyd's Register). Les autres, comme celles émises par le GL (Germanischer Lloyd's), le RINA (Registro italiano Navale) ou encore l'ABS (American Bureau of Shipping) sont très rarement, voire pas du tout, requises.

		Overall frequency weighted velocity (1/80 Hz) in mm/s rms		Vibration velocity in mm/s peak for single frequency components between 5 and 100 Hz		
		Hg = 1				
		DNV 2007	LRS 2007 (*)	LRS 2007 (**)	DNV 2005	
PASSENGER AREAS	Passenger top level cabins	1,7	1,5	1,5	1,5	
	Passenger standard cabins	2	1,8	1,5	1,5	
	Restaurants, cafeteria and type B spaces	2,2	2	1,5	1,5	
	Outside installations (swimming pools, sport decks...)	3	2,5 (*)	2,5 (*)	2,5	
	Public shops, passages (type D)	4	2	1,5	1,5	
	Passenger rooms (type A)	4	2	1,5	1,5	
	Passenger rooms (type C)	2	2	1,5	1,5	
CREW AREAS		Overall frequency weighted velocity (1/80 Hz) in mm/s rms		Vibration velocity in mm/s peak for single frequency components between 5 and 100 Hz		
		Hg = 2				
		DNV 2007	LRS 2007 (*)	LRS 2007 (**)	DNV 2005	
		Wheehouse	3,5	3,5	5	3,5
		Radio room	3,5	3,5	5	4,5
		Crew cabins	3	3,5	5	3,5
		Offices	3,5	3,5	5	3,5
		Crew public spaces, mess rooms	3,5	3,5	5	3,5
		Hospital	3	3,5	5	
		Engine control room	5	5	6	4,5
		Crew open recreation area				
		Galley	6	5	6	4,5
		Workshops	6	5	6	4,5
Gateways, staircases and passages in crew areas	6	3,5	5			

(\*) : 0,3 mm/s exceedance allowed in the aft body directly above the propellers  
 (\*\*) : Possibility is given to choose between the two version of ISO 6954 (i.e. 1984 or 2000)

Tabl. 3 : Comparaison des différentes classes de confort - Niveaux vibratoires.

## Comportement vibratoire basse fréquence

Pour valider le comportement dynamique d'ensemble d'un navire à passagers, plusieurs étapes sont menées au sein de STX Europe :

- une phase de modélisation en éléments finis avec ANSYS qui sert aussi à l'évaluation de la structure pour répondre aux exigences de la société de classification. Ce modèle est utilisé pour étudier et valider le comportement dynamique afin d'étudier la réponse forcée due aux excitations provenant des moteurs de propulsion et des hélices (excitation créée par le passage des pales ou communément appelée pression fluctuante) ;
- après la mise en eau du navire lors de son achèvement, des essais sont menés avec une machine à balourd simulant l'excitation des principales sources vibratoires et pouvant injecter jusqu'à 20 tonnes d'effort dans la structure. Les résultats de ces essais peuvent apporter un complément utile aux résultats de calculs dynamiques ;
- les mesures de vibrations sont effectuées dès la première sortie en mer, pour vérifier le comportement de la structure, l'objectif étant d'atteindre les niveaux contractuels sans recourir à des modifications coûteuses et délicates à mener à quelques semaines de la livraison du navire.

En premier lieu, la modélisation se fait en créant un maillage le plus fidèle possible du raidissage principal de la structure (couples renforcés, épontilles, ponts, fond, double-fond, cloisons, hiloires, barrots...), avec des éléments plaques ou poutres 3D.

En second lieu, les calculs dynamiques d'ensemble sont réalisés avec un modèle complété par des éléments Fluide et des chargements spécifiques pour les hélices et les diesels.

Les excitations des hélices sont préalablement étudiées en tunnel de cavitation où l'on mesure les fluctuations de pression que l'on intègre en efforts résultants équivalents qui sont restitués fidèlement dans les calculs dynamiques pour 2 cas : les 2 hélices excitant la structure en phase et en opposition de phase.

Les diesels constituent également un risque d'une forte énergie pouvant être transmise dans la structure malgré le découplage mécanique réalisé par des plots élastiques. Cet effort est estimé à partir des mesures vibratoires que nous effectuons en usine.

Les fréquences principales d'excitation des diesels alternateurs (semi-rapides) sont dans une très grande majorité de l'ordre de 8,5 Hz et 10 Hz ; les fréquences fondamentales d'excitation provenant des hélices, étant elles liées au nombre de pales et à la vitesse de rotation des lignes d'arbres, varient généralement entre 9 et 12,5 Hz. Les 2 premières harmoniques peuvent aussi être énergétiques à des fréquences 2 et 3 fois plus élevées.

Des modes de sous-structures à de telles fréquences peuvent donc concerner des surfaces très significatives et les solutions doivent être compatibles avec la disposition générale des emménagements du navire.

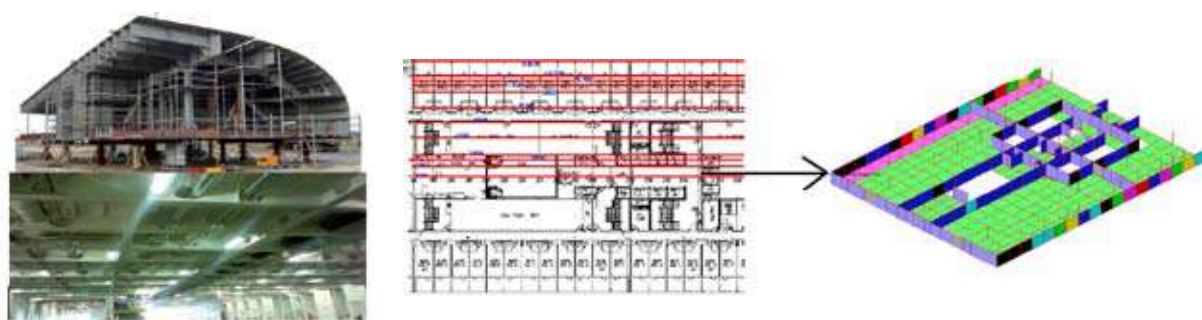


Fig. 1 : Structure type - principe de maillage

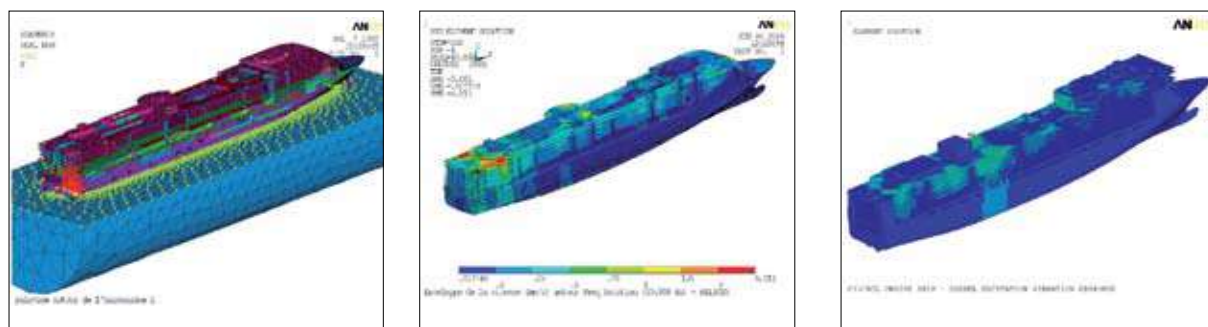


Fig. 2 : Modèle Elfi ; réponse forcée pour un cas de chargement hélice ; avec excitation des diesels.

L'étude des hélices se limite habituellement aux deux premières harmoniques de la fréquence de passage de pales des hélices, et à la fréquence de rotation des diesels ; les calculs sont menés dans une plage de + ou - 10% autour des fréquences principales.

L'approche est différente lorsque la spécification se réfère à l'ISO 6954-2000 qui préconise des niveaux « overall » se référant à une bande de fréquences allant de 1 à 80 Hz, et associant une pondération plus ou moins importante selon les bandes de fréquences.

Ce niveau global pondéré se veut plus proche du ressenti vibratoire perçu par les humains (à l'image des filtres de pondération A, B, C créés pour le bruit) contrairement à la version précédente de 1984 qui se limite à l'analyse des niveaux vibratoires pour des fréquences singulières.

Une méthodologie a été mise en place avec l'aide de PRINCIPIA [1] pour mieux appréhender la réponse vibratoire des navires à passagers face aux excitations de type large bande de cette norme. Elle consiste à distinguer 2 types de calcul qui séparent les contributions d'excitations de type déterministe d'une part, et de type aléatoire (broadband) d'autre part et le niveau global pondéré est ensuite estimé en faisant la somme quadratique de ces deux contributions pour chaque tiers d'octave.

Cette méthodologie a notamment été utilisée pour le dernier navire NCL – Norwegian Epic livré à Saint Nazaire, et a permis d'obtenir la pleine satisfaction du client en ne dépassant pas les 1,5mm/s rms pondéré sur l'ensemble du navire, y compris dans les zones au-dessus des hélices.

Pour conclure, la maîtrise au sein du chantier des capacités aussi bien de calculs que de mesures, s'avère indispensable pour comprendre les phénomènes et établir des corrélations calculs/mesures en essais mer et garantir les niveaux spécifiés. Dans la perspective d'une définition de structure au juste besoin, il nous est important de mieux connaître par exemple :

- les impacts d'une évolution de la répartition des masses au cours du projet,
- l'influence de l'amortissement apporté par les différents revêtements en isolation mis en place à bord.

### Etudes acoustiques

Une analyse détaillée des contributions aérienne et solide des principales sources comme les hélices, les diesels, les compresseurs HVAC, les lignes d'échappement est réalisée pour chacun des navires prototypes. Ceci est fait avec l'aide d'outils internes développés principalement avec la société SECAV depuis environ 20 ans.

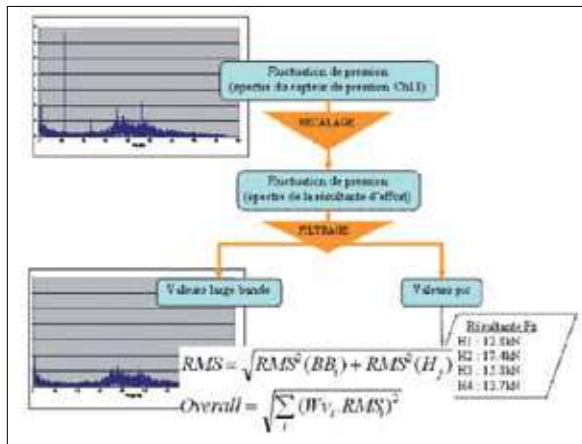


Fig. 3 : Illustration de la méthodologie mise en place pour les calculs de type ISO 6954-2000

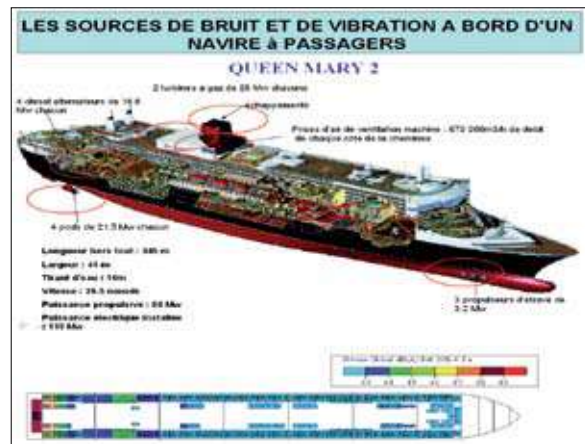


Fig 4 : Nombreuses sources à étudier sur QM2/ Exemple de prévision pour un pont passager

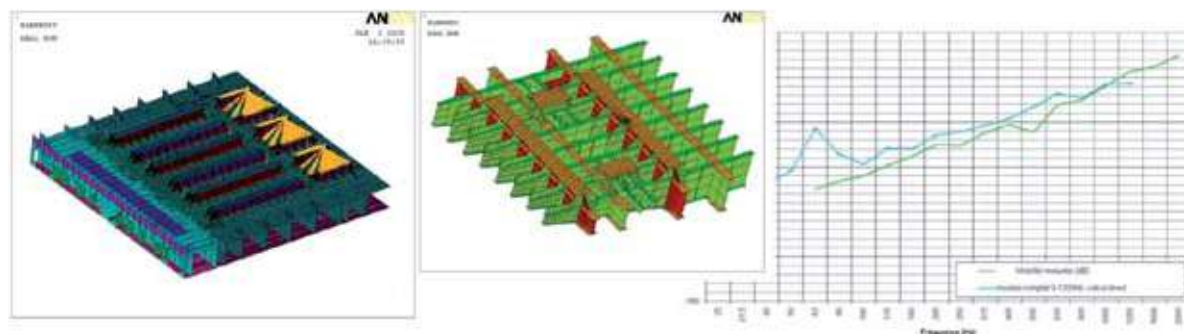


Fig. 5 : Modélisation des carlingages de moteurs – Corrélation menée entre mesures à bord et les calculs réalisés avec ANSYS au sein de STX Europe.

Des prévisions sont ainsi réalisées pour les zones Passagers et Équipage lorsque le navire navigue à 85% de la puissance propulsive maximale. Les systèmes isolants et autres revêtements sont ainsi préconisés et validés par nos soins pour s'assurer de l'obtention des niveaux contractuels de bruit de fond, d'indice d'isolement aux bruits aériens et bruits d'impact.

Dans ces études de propagation dans les structures, nous pouvons citer un autre exemple d'application de calculs en éléments finis qui permet de mieux quantifier l'énergie transmise par les sources comme les moteurs diesels ou électriques. Une modélisation est effectivement régulièrement réalisée sur les structures supportant ces équipements pour estimer leur raideur dynamique et quantifier ainsi leur capacité de transmission vibro-acoustique (Figure 5). Le calcul éléments finis s'avère aussi ainsi d'une grande utilité pour réaliser des estimations de bruit dans une gamme de fréquence (i.e en basse fréquence) dans laquelle les mesures sont difficiles à réaliser avec précision.

## Conclusions

Le confort à bord des navires à passagers restera toujours la priorité n° 1 des armateurs en termes de satisfaction client. En effet, ils ne sont pas prêts à accepter de dégrader les performances de bruit et vibrations pour réduire le coût du navire.

Par contre, ils sont de plus en plus créatifs pour trouver des activités nouvelles, comme bowling, surf, génératrices de bruit et de vibrations, mais permettant d'attirer les clients.

Tous ces nouveaux concepts doivent pouvoir être intégrés dans nos études pour maintenir notre compétitivité.

La concurrence mondiale est évidemment féroce et se concrétise par une recherche continue et acharnée de nouvelles technologies et de solutions innovantes qui peuvent aider notamment à réduire le poids, le coût et les délais de construction des navires souvent faits à l'unité. L'utilisation des éléments finis s'avère dans notre expertise de plus en plus utilisée pour poursuivre cette optimisation de structure et d'isolation.

De nos jours, des échanges techniques se font, au travers d'un réseau Euroyards, qui regroupe les grands chantiers européens de construction navale, au sein duquel des groupes se sont formés dont un sur l'acoustique et les vibrations. Au niveau national il n'existe plus vraiment de réseaux propres à la construction navale, ces réseaux se sont éteints avec la fermeture des autres grands chantiers français mais les nouveaux développements de mutualisation de R&D (FUI, pôles de compétitivité, IRT etc.) aux niveaux régional et national sont peut-être signes de nouvelles perspectives pour l'avenir.

## Références bibliographiques

[1] Besnier F., Buannic N., Jian L., Blanchet A., Branchereau S., Broadband excitation induced by propellers and ship comfort evaluation, 1st international Conference on Marine Structures, Glasgow 12-14 March 2007

[2] Babin G., Branchereau S., Cordier S., Lemoine L., Morand L., The Royal institution of Naval Architects, Norwegian Epic Performance, STX France S.A., 2011