

## 16

### ANALYSE PAR ELEMENTS FINIS D'UN CATAMARAN SUR COUSSIN D'AIR EN SANDWICH\*

O. HERMUNDSTAD<sup>1</sup>, T. MOAN<sup>1</sup>, H. NORDAL<sup>2</sup>

**Résumé** - Cet article traite de l'analyse structurale des cadres et cloisons transversaux d'un catamaran en sandwich. Des analyses par éléments finis d'un cadre et d'une cloison ont été menées, et les résultats sont comparés à ceux obtenus à partir d'un modèle par éléments finis pour le navire tout entier. Le cadre et la cloison ont été analysés avec cinq conditions limites différentes. Quatre combinaisons de charge idéalisées ont été appliquées, et on a démontré que les modèles de cadres transversaux peuvent donner des résultats inexacts. Ceci est dû à la difficulté de choisir le montage de ressorts adéquat pour représenter l'interaction entre le cadre lui-même et les autres parties de la structure. Pour concevoir un nouveau type de bateau, il est recommandé de mener une analyse globale par éléments finis au lieu de s'appuyer sur les modèles de cadres.

mots clés : Catamaran à coussin d'air, structure sandwich, analyse par éléments finis.

## INTRODUCTION

Dans la conception structurale d'un navire, il est important d'évaluer la résistance et la rigidité des cadres et cloisons transversaux. Ceci est spécialement vrai pour la conception de catamarans puisque la résistance transversale est un facteur critique pour ce genre de navire.

Les méthodes utilisées pour analyser ces cadres transversaux peuvent varier des modèles de la simple poutre à d'importants calculs par éléments finis. Dans ce dernier cas, la structure peut être modélisée avec un haut degré de précision en utilisant des éléments suffisamment petits avec des déplacements et des champs de contrainte appropriés.

Cependant, une imprécision importante demeure, suivant le choix des conditions limites. Quand seule une partie du navire est modélisée, les conditions limites devraient représenter l'interaction entre le cadre et le

---

\* traduit de l'anglais.

<sup>1</sup> The Norwegian Institute of Technology, Division of Marine Structures.

<sup>2</sup> Ulstein International a.s.

reste de la structure. Ceci peut être réalisé en introduisant des ressorts, comme il est montré à la figure 1. La méthode est bien connue des analyses de cadres pour les navires conventionnels tels que les pétroliers, mais un catamaran en sandwich a un arrangement structural très différent.

La question est de savoir s'il est correct d'appliquer cette méthode à un catamaran, et si non, comment des conditions limites incorrectes peuvent influencer les résultats.

Afin de répondre à ces questions, un catamaran à coussin d'air (NES), construit en sandwich avec une âme de mousse PVC et des peaux en polyester renforcées de fibres de verre, a été modélisé en utilisant la méthode par éléments finis (figures 3 et 4). En plus de ce modèle global, des modèles locaux des cadres et cloisons transversaux ont été générés (figure 5).

En imposant différentes conditions limites aux modèles locaux, et en comparant les réponses de ces modèles avec celle du modèle global, l'influence des conditions limites peut être recherchée.

## **MODELES PAR ELEMENTS FINIS**

### **REMARQUES GENERALES**

La longueur totale du bateau est de 38 mètres et sa largeur est de 11,6 mètres. Le poids est d'environ 185 tonnes en pleine charge, et sa vitesse est d'environ 45 nœuds.

L'analyse est statique et linéaire. Le code par éléments finis SESAM (SESAM User's manuals) est utilisé. Tous les panneaux sont modélisés en utilisant des éléments de coque multicouches subparamétriques à 8 nœuds (MCQS). Les poutres et les paramètres d'ouverture sont représentés par des éléments de poutre isotropes à 3 nœuds (SECB).

### **MODELES LOCAUX DE CADRES TRANSVERSAUX**

Deux différents membres structuraux transversaux ont été choisis pour les modèles locaux (figure 5). L'un d'entre eux (TB195) a une ouverture assez petite et peut être considéré comme une cloison. L'autre (TB139) a une grande ouverture et ressemble plus à un cadre. Tous les deux représentent des modèles par éléments finis types qui seraient utilisés dans le procédé de conception.

La figure 6 montre l'emplacement des deux membres considérés. Ils sont situés à respectivement 13,9 et 19,5 mètres de la perpendiculaire arrière.

Un maillage élémentaire plus perfectionné est utilisé pour les modèles locaux, comme il est visible en comparant les figures 6 et 5. Une

autre différence est que les cabines de passagers du bas ne sont pas considérées dans les modèles locaux, alors qu'elles y sont dans le modèle global. Ceci est fait parce que la superstructure n'est pas supposée être incluse dans les calculs de conception, suivant les normes DNV (Det Norske Veritas, 1991). Un des modèles (TB195) a été utilisé pour les calculs de conception.

L'effet de ces deux différences a été recherché en faisant un modèle local avec un maillage équivalent à celui du modèle global, avec les cabines de passagers du bas incluses dans le modèle local. L'influence de ces changements s'est avérée petite.

La partie de la structure longitudinale à mi-chemin de chaque cadre/cloison adjacent est incluse dans ces modèles. Les bords avant et arrière de chaque modèle sont bloqués en translation longitudinale (x) et en rotation autour des axes de tangage (y) et de lacet (yaw) (z).

Seuls les cas de charge symétriques sont utilisés dans ces analyses, de sorte que seul le côté babord de la structure est modélisé. Les nœuds dans le plan de la poutre centrale sont bloqués dans le degré de liberté de translation transverse (y) et en rotation autour des axes de roulis (x) et de lacet (yaw) (z).

Pour prévenir un mouvement non désiré dans la direction de houle (z), quelques nœuds doivent être bloqués dans cette direction et/ou des ressorts verticaux doivent être introduits.

Des analyses ont été réalisées en utilisant cinq combinaisons différentes de ressorts et de points fixes pour les deux modèles locaux. Ces conditions limites sont montrées à la figure 7. La première (LM-1) est le résultat de l'application de la méthode utilisée lors de la conception des cadres pour les pétroliers. Aucun nœud n'est bloqué dans la direction de la houle (z). Des ressorts sont distribués le long des bords avant et arrière des modèles. Seuls les bords verticaux ou proches de la verticale ont une distribution de ressorts (figure 1). Les raideurs de ressort sont évaluées en calculant la rigidité du membre longitudinal auquel les ressorts sont attachés. Cette rigidité est trouvée en supposant que les cadres/cloisons adjacents sont fixés sans déformation. Seule la rigidité en cisaillement est considérée, et la raideur totale des ressorts est distribuée uniformément à chaque nœud.

## MODELE GLOBAL

Le modèle global par éléments finis consiste en 1451 éléments de coque dont 627 éléments de poutres. Le nombre total de degrés de liberté est de 44982.

La contribution à la rigidité du cockpit et des cabines de passagers supérieures est considérée comme négligeable, et est donc exclus de ce modèle. Les poids de ces parties sont pris en considération dans ce modèle en augmentant la densité des éléments dans la zone considérée.

Des ressorts sont utilisés comme supports, et ils sont situés dans les sections avant et arrière. Aucun nœud n'est bloqué dans aucun degré de liberté.

Le matériau sandwich est représenté par une âme isotrope avec une peau orthotrope de chaque côté. Le matériau d'âme est du Divinycell de grade H, et différentes densités sont utilisées pour différentes parties de la structure. Les modules élastiques utilisés dans l'analyse sont fournis par le fabricant.

Le stratifié consiste en plusieurs couches de roving tissé (WR) avec des orientations de fibres 0/90, et un mat à fibres courtes (CSM). La quantité relative de WR et de CSM et le nombre de couches varient d'une place à l'autre.

Les modules élastiques dans le plan des différents stratifiés sont calculés avec le programme MIC-MAC sur PC (Patterson & Tsai), et les modules d'Young ( $E_1$  et  $E_2$ ) ont été trouvés de 13 à 14 GPa pour tous les stratifiés. Le module de cisaillement ( $G_{12}$ ) est d'environ 3,31 GPa, tandis que le coefficient de Poisson ( $\nu_{12}$  et  $\nu_{21}$ ) est d'environ 0,15 pour tous les stratifiés.

Les modules de cisaillement hors du plan sont évalués à 2,8 GPa par des calculs "à la main".

Les épaisseurs de stratifiés varient entre 1,1 et 3,7 mm selon les calculs MIC-MAC. La densité moyenne des stratifiés était d'environ 1625 kg/m<sup>3</sup>.

Pour avoir une indication de comment le modèle global représente le vrai navire, des mesures ont été entreprises pour trouver la rigidité en torsion de la structure réelle (Hermundstad *et coll.*, 1992). Cette rigidité a été mesurée en soulevant le navire par deux points opposés en diagonale tandis que les déflexions et les forces étaient mesurées. Les mêmes forces ont été appliquées au modèle par éléments finis. La rigidité en torsion mesurée était d'environ 200 MNm/rad, alors que les valeurs calculées étaient de 133 ou 172 MNm/rad suivant que les quatre supports étaient libres de mouvement dans la direction horizontale ou pas. Le déplacement horizontal des supports n'a pas été mesuré. La raison pour laquelle le modèle par éléments finis est trop flexible est probablement que les renforts locaux (réservoirs, stratifiés de fixation, etc) et les renforts des supports ne sont pas modélisés. Le modèle a prédit des déformations importantes à ces points, ce qui réduit la rigidité calculée. Ces différences ne sont pas considérées comme importantes pour la comparaison avec les modèles de cadre.

Pour LM-2, tous les ressorts ont été retirés, et un nœud est bloqué dans tous les degrés de liberté en translation. Ce nœud est situé à la base de la poutre centrale dans le plan du cadre/cloison.

La troisième condition limite (LM-3) est similaire à la deuxième dans le sens qu'il n'y a pas de ressorts. La différence est que pour LM-3, il y a deux nœuds fixes situés dans le coin supérieur droit des modèles,

un à l'avant et un à l'arrière du modèle local.

LM-4 est le même que LM-1 sauf que les ressorts sont distribués le long de la poutre centrale et que les autres poutres longitudinales sont retirées.

Dans le dernier cas (LM-5), la distribution des ressorts reste la même que pour LM-1, mais toutes les raideurs de ressorts sont un dixième des valeurs originales.

## CAS DE CHARGE

Quatre cas de charge ont été sélectionnés pour le modèle global. Comme il peut être vu à la figure 8, il y a deux distributions longitudinales différentes ainsi que deux distributions transverses différentes.

Dans deux des cas de charge (L11 et LA11), les pressions sont constantes suivant la longueur du navire, tandis que pour les deux autres cas de charge (M11 et MA11), la pression est appliquée à seulement une petite partie du bateau, dans la zone de la mi-longueur. Deux cas de charge (L11 et M11) n'ont pas de pression appliquée à la structure en croix plate (pont mouillé).

Suivant la réglementation du DNV, une accélération de conception égale à l'accélération de la gravité,  $g$ , devrait être utilisée. Pour simuler la force d'inertie (agissant vers le bas) due à l'accélération, la constante de gravité est prise égale à  $2g$  dans les analyses.

Une pression constante de  $4,8 \text{ kN/m}^2$  est appliquée à la totalité du pont principal pour tous les cas de charge. Ceci implique que les forces qui agissent vers le bas sont les mêmes dans les quatre cas. De façon à obtenir un équilibre global, l'amplitude des pressions varie d'un cas à l'autre.

A cause de la faible surface sur laquelle la pression est appliquée dans le cas de charge M11, les amplitudes de pression sont plus élevées que celles qui seraient utilisées dans un procédé de conception. Cependant, on doit garder à l'esprit que ces cas de charge doivent seulement être utilisés pour des comparaisons entre les modèles global et locaux, et pas dans un but de conception.

Les mêmes charges sont appliquées aux modèles locaux. Les cas de charge M11 et MA11, cependant, ne sont pas définis pour le modèle TB139, puisque ce cadre est situé en-dehors de la zone où la pression est appliquée.

Toutes les pressions sont appliquées comme forces linéaires dans le plan des cadres/cloisons. L'intention est d'isoler le comportement global de la déformation en flexion locale des panneaux.

## RESULTATS

La réponse utilisée pour la comparaison est le déplacement relatif entre les six différents points dans le plan du cadre (figure 2). Les déplacements relatifs sont un critère important pour la conception de ce type de navire, et les contraintes dans la structure sont indirectement en relation avec les déplacements relatifs. Les déplacements relatifs qui sont utilisés sont :  $\Delta 1Z = Z_2 - Z_1$  ;  $\Delta 2Z = Z_3 - Z_1$  ;  $\Delta 3Z = Z_4 - Z_1$  ;  $\Delta 4Z = Z_5 - Z_1$  ;  $\Delta 1Y = Y_5 - Y_1$  ;  $\Delta 2Y = Y_6 - Y_1$  où  $Y_i$  et  $Z_i$  sont les déplacements dans les directions  $y$  et  $z$  respectivement pour le point numéro  $i$ .

Les mêmes déplacements sont enregistrés pour chaque modèle local, et pour le modèle global pour le cadre et la cloison correspondant.

Les résultats sont montrés au tableau 1 pour le modèle TB139 et au tableau 2 pour le modèle TB195. Dans la colonne numéro 3, les déplacements relatifs pour le modèle global sont indiqués pour chaque cas de charge. Les colonnes suivantes montrent les mêmes déplacements obtenus à partir du modèle local correspondant, pour différentes conditions limites. De plus, deux paramètres, CORR et FACT, sont indiqués pour chaque cas. CORR est le coefficient de corrélation qui indique dans quelle mesure les différences relatives entre les déplacements sont les mêmes pour les modèles locaux et global. Si la forme déformée du modèle local est similaire à celle du modèle global, CORR est proche de 1,0.

Une valeur de CORR de 1 ne signifie pas nécessairement que les amplitudes de déplacement sont les mêmes. En divisant chaque valeur de déplacement du modèle global (sauf  $\Delta 2Z$ ) par la valeur correspondante du modèle local, et en prenant la moyenne, on obtient la valeur FACT. Si FACT est de 2,0, les déplacements calculés à partir du modèle global sont en moyenne deux fois plus grands que ceux trouvés pour le modèle local.

## DISCUSSION ET CONCLUSION

Il est évident à partir des tableaux 1 et 2 que la réponse calculée des modèles locaux est de beaucoup influencée par le choix des conditions limites. La correspondance entre le modèle local et le modèle global est aussi très sensible à la variation de la charge.

Les conditions limites originales (LM-1) conduisent à des déformations qui sont bien plus petites que celles calculées à partir du modèle global.

Quand les raideurs de ressort sont réduites à un dixième de leurs valeurs originales, la correspondance est meilleure, mais la variation d'un

cas de charge à l'autre est grande.

Egalement, pour les trois conditions limites où les ressorts sont complètement ou en partie retirés, les résultats sont très dispersés.

Pour un cas de charge donné, quelques conditions limites conduisent à des mêmes résultats pour certains paramètres de réponse, mais pour d'autres paramètres ou pour un autre cas de charge, les résultats peuvent être non-conservatifs.

Si une distribution de ressorts doit être utilisée, il est nécessaire de trouver une meilleure façon de calculer les raideurs de ressort. Quand on analyse un cadre dans un pétrolier, les cadres adjacents sont aussi soumis à une déformation, mais les cloisons sont considérées comme rigides. Ceci est une supposition raisonnable, et permet de calculer tout de suite les raideurs de ressort.

Pour un catamaran sandwich, la situation est différente. La forme d'une cloison dans un catamaran fait qu'elle est moins rigide, et la supposition qu'elle ne se déforme pas ne sera pas valable dans beaucoup de cas. Le problème est plus important quand un matériau sandwich est utilisé, puisque dans ce cas il n'y a pas de transition nette entre les cadres et les cloisons (figure 6). Les raideurs de ressort seront très dépendantes de la déformation des cadres/cloisons adjacents, mais il est très difficile de prévoir comment ils se déformeront avec un simple modèle. Leur déformation dépendra à la fois des distributions de charge longitudinales et transversales aussi bien que de la rigidité relative des composants transversaux et longitudinaux.

Les raideurs de ressort correctes varieront, de ce fait, d'un cas de charge à l'autre, et même pour un cas de charge donné, il sera très difficile de les calculer.

Une possibilité de réduire ces problèmes serait d'inclure davantage de la structure environnante dans le modèle local. En incluant un ou deux cadres/cloisons adjacents de chaque côté, la réponse du cadre/cloison original sera probablement moins sensible aux conditions limites. Le travail supplémentaire nécessaire peut être réduit en modélisant la structure environnante d'un façon moins détaillée, ou simplement en copiant le cadre/cloison original et en utilisant la technique de superéléments, à condition que les cadres/cloisons adjacents ne soient pas trop différents des originaux.

Cependant, quand un nouveau type de navire doit être conçu, il est recommandé de faire un modèle par éléments finis de la structure entière de façon à obtenir des résultats fiables.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier M. Dag McGeorges pour sa contribution à la modélisation du modèle global par éléments finis. Nous remercions également la Royal Norwegian Navy pour son aide pour les analyses, et Ulstein-Eikejford a.s. pour leur aide lors des mesures de rigidité en torsion.

---

DET NORSKE VERITAS, 1991, Tentative rules for classification of high speed and light craft.

HERMUNDSTAD O., McGEORGES D., MOAN T., 1992, Analysis of deformations and stresses in a sandwich aircushion catamaran by the finite element method (en norvégien), Div. of Marine Structures, Norwegian Institute of Technology.

PATTERSON J.M., TSAI S.W., Mic-Mac - A program for micro-mechanic analysis, U.S. Air Force Materials Laboratory, Dayton, Ohio, USA.

SESAM USER'S MANUALS, 1984, 87, 88, 89, 90, Veritas Sesam Systems, Høvik, Norvège.

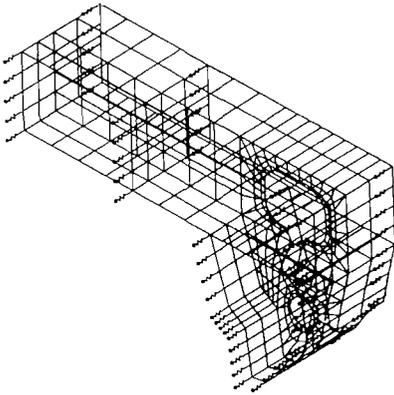


Fig.1. Modèle d'Eléments Finis avec le montage des ressorts.  
*Finite element model with spring support.*

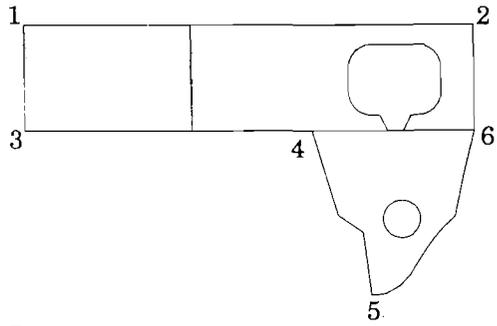


Fig.2. Points d'enregistrement des déplacements.  
*Points for the registration of displacements.*



Fig.3. Catamaran à coussin d'air de 38m.  
*38 meter sandwich aircushion catamaran.*

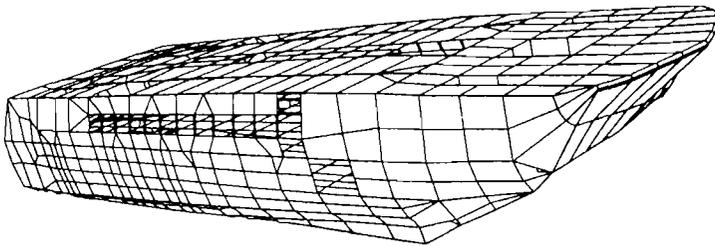


Fig.4. Modèle global d'Eléments Finis.  
*Global finite element model.*

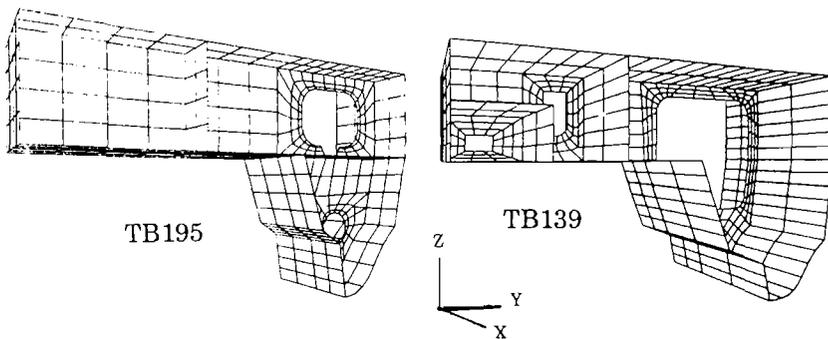


Fig. 5. Modèles locaux d'Eléments Finis.  
Local finite element models.

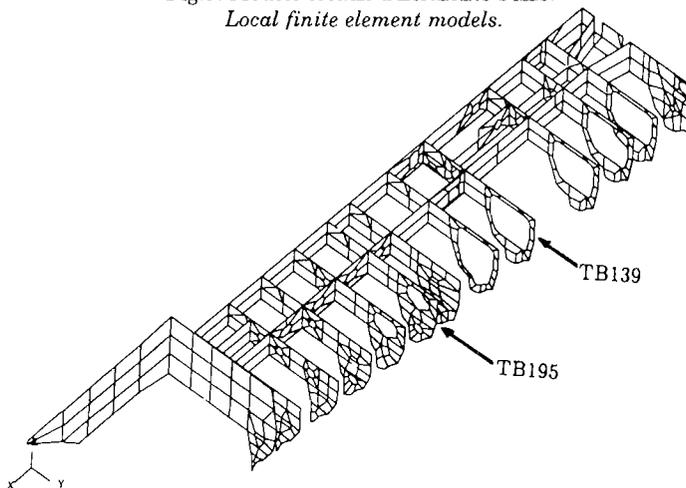


Fig. 6. Position du cadre et de la cloison à l'intérieur de la structure interne du modèle global.  
Location of the frame and the bulkhead within the internal structure of the global model.

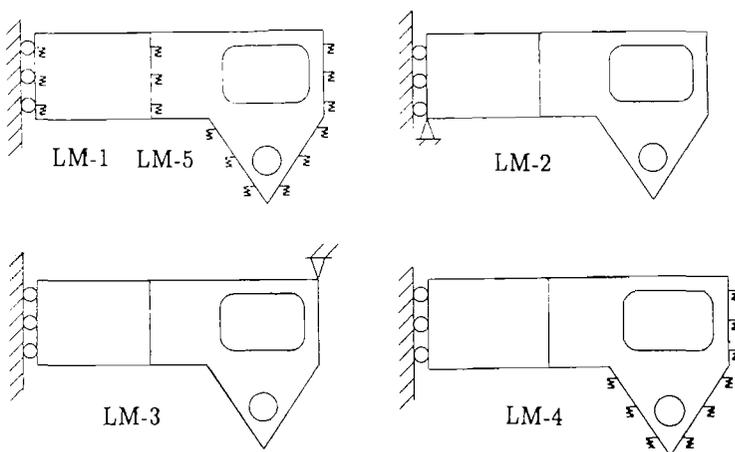


Fig. 7. Conditions aux limites.  
Boundary conditions.

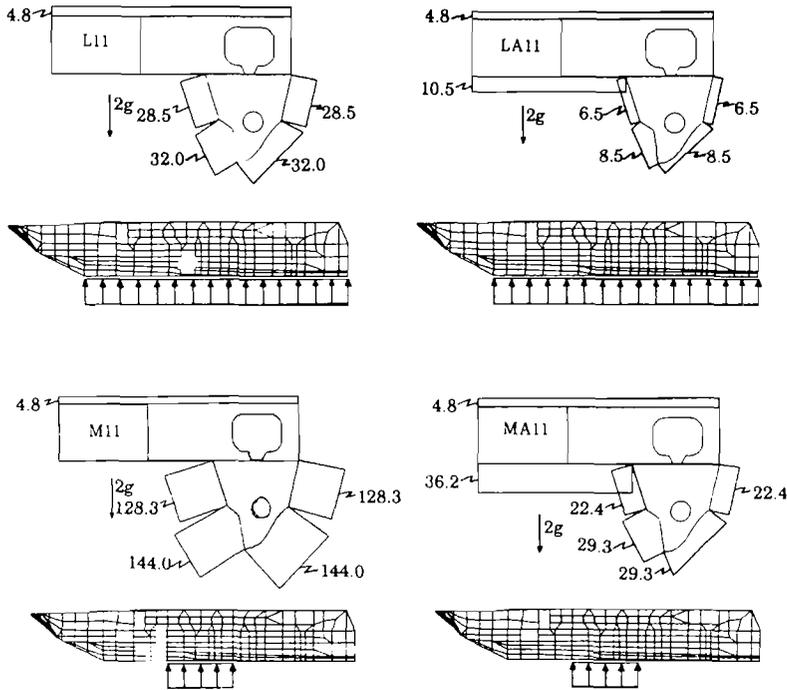


Fig.8. Cas de charge. Toutes les pressions sont données en  $\text{kN/m}^2$ .  
*Loadcases. All pressures are given in  $\text{kN/m}^2$ .*

Load	Msd.	Global	LM-1	LM-2	LM-3	LM-4	LM-5	
L11	$\Delta 1Z$	27.00	6.51	297.11	-115.03	12.05	20.81	
	$\Delta 2Z$	0.00	0.12	-6.89	0.00	0.09	0.09	
	$\Delta 3Z$	15.00	7.47	72.61	8.00	11.63	13.01	
	$\Delta 4Z$	20.00	7.24	184.11	-48.70	12.35	17.11	
	$\Delta 1Y$	8.37	-4.40	193.00	-106.00	-2.64	3.46	
	$\Delta 2Y$	-4.87	-8.96	44.00	-30.80	-8.14	-6.89	
	<i>CORR</i>			0.84	0.82	-0.47	0.90	0.99
	<i>FACT</i>			2.27	0.11	0.55	1.78	1.35
LA11	$\Delta 1Z$	-9.00	-4.47	39.41	-157.38	-15.90	-20.54	
	$\Delta 2Z$	0.00	0.42	-2.89	1.00	0.50	0.50	
	$\Delta 3Z$	-3.00	-1.93	16.81	-14.00	-9.99	-5.40	
	$\Delta 4Z$	-7.00	-3.02	28.81	-159.00	-13.42	-12.90	
	$\Delta 1Y$	-6.15	-3.07	20.30	-122.00	-7.34	-14.50	
	$\Delta 2Y$	-2.62	-1.13	5.92	-29.80	-3.23	-4.54	
	<i>CORR</i>			0.98	-0.96	0.95	0.89	0.98
	<i>FACT</i>			2.04	0.28	0.09	0.61	0.51

Tab.1. Comparaison des résultats du modèle global et du modèle local TB139.  
*Comparison of results from the global model and the TB139 local model.*

Load	Msd.	Global	LM-1	LM-2	LM-3	LM-4	LM-5
L11	$\Delta 1Z$	21.10	3.22	71.56	0.09	8.83	9.72
	$\Delta 2Z$	0.00	0.08	-2.24	0.07	0.06	0.07
	$\Delta 3Z$	16.10	3.02	35.36	6.15	7.49	6.95
	$\Delta 4Z$	20.30	3.80	49.46	5.41	8.93	8.92
	$\Delta 1Y$	9.50	-0.19	39.50	-6.92	1.17	2.68
	$\Delta 2Y$	1.10	0.19	4.02	0.10	0.55	0.60
	<i>CORR</i>		0.90	0.93	0.41	0.96	0.99
	<i>FACT</i>		14.60	0.33	50.64	16.93	2.43
LA11	$\Delta 1Z$	-10.20	-2.68	13.14	-359.68	9.36	-10.26
	$\Delta 2Z$	0.10	0.23	-1.36	0.30	0.25	0.30
	$\Delta 3Z$	-3.30	-1.75	9.04	-11.00	-7.03	-4.68
	$\Delta 4Z$	-5.60	-2.06	10.84	-19.50	-8.15	-6.68
	$\Delta 1Y$	-7.69	-1.12	4.62	-27.30	-2.76	-6.23
	$\Delta 2Y$	-0.61	-0.15	0.70	-2.04	-0.58	-0.60
	<i>CORR</i>		0.84	-0.79	0.74	-0.36	0.97
	<i>FACT</i>		3.87	0.84	0.24	1.22	0.96
M11	$\Delta 1Z$	102.90	4.83	410.00	-142.00	4.21	6.80
	$\Delta 2Z$	0.00	0.07	-17.64	0.00	0.06	0.00
	$\Delta 3Z$	30.80	7.33	210.46	-15.00	6.98	14.00
	$\Delta 4Z$	61.90	8.57	287.46	-53.10	8.07	14.50
	$\Delta 1Y$	102.00	-4.49	219.00	-140.00	-4.79	-9.40
	$\Delta 2Y$	17.80	-0.03	22.80	-7.98	-0.10	0.18
	<i>CORR</i>		-0.06	0.84	-0.97	-0.09	-0.15
	<i>FACT</i>		129.76	0.37	1.38	47.16	26.27
MA11	$\Delta 1Z$	-44.60	-16.01	107.05	-224.04	-66.36	-61.34
	$\Delta 2Z$	1.00	0.60	-9.95	1.00	0.70	0.70
	$\Delta 3Z$	-26.60	-10.50	67.05	-68.00	-49.90	-28.40
	$\Delta 4Z$	-33.60	-13.10	82.35	-122.90	-58.93	-41.10
	$\Delta 1Y$	-14.40	-6.39	44.90	-170.00	-19.20	-36.50
	$\Delta 2Y$	0.00	-1.13	5.54	-12.90	-4.47	-3.83
	<i>CORR</i>		0.99	-0.99	0.80	0.49	0.94
	<i>FACT</i>		2.03	0.31	0.19	0.51	0.58

Tab.2. Comparaison des résultats du modèle global et du modèle local TB195.  
*Comparison of results from the global model and the TB195 local model.*