

5

LA CONCEPTION DE STRUCTURES NAVALES EN SANDWICH: UN PROBLEME INVERSE

D. HOLM*, B. ESPING*, O. ROMELL*, F. CAMPION **

Résumé - Une approche intégrée est présentée pour la résolution du problème inverse: quelles sont les orientations des couches, constitution du stratifié, densité de l'âme et combinaison des épaisseurs permettant d'atteindre un objectif précis ? La solution optimale est obtenue par l'utilisation de méthodes numériques d'optimisation sous contraintes (MMA- Méthode des Asymptotes Mobiles) couplées avec un code de calcul par éléments finis, des modules de pré et post-traitement graphiques interactifs et un modelleur paramétrique, fonctionnalités intégrées dans le code OASIS-ALADDIN. Cette approche a été appliquée à l'optimisation de la conception de la coque d'un NES en sandwich-PVC/verre/polyster. L'objectif était de minimiser le poids du navire en identifiant les valeurs optimales des épaisseurs des peaux et âmes de la structure ainsi que de l'espacement entre membrures, tout en respectant les restrictions sur la rigidité des panneaux et les contraintes maximales imposées par les règlements du DnV. Le gain de poids obtenu est de 5%.

Mots clés: optimisation, sensibilité, problème inverse, composite, sandwich

INTRODUCTION

Les composites sont de plus en plus utilisés dans les structures navales pour lesquelles le poids et les performances sont critiques. La nature hétérogène des composites stratifiés renforcés de fibres permet à l'ingénieur de concevoir à la demande un matériau et une structure offrant une solution optimale, tant sur le plan technique qu'économique. Etant donné le nombre de paramètres à prendre en compte, la meilleure conception possible ne peut être obtenue que par un long processus itératif d'analyse et de modification.

Nous présentons une approche intégrée pour la solution du problème inverse. Quelles sont les orientations des couches, constitution du stratifié, densité de l'âme et combinaison des épaisseurs qui permettent d'atteindre un/des objectifs donnés?

La solution optimale est obtenue par l'emploi de méthodes d'optimisation sous contraintes (la Méthode des Asymptotes Mobiles - MMA) couplées avec un solveur éléments finis, des pré- et post- processeurs graphiques interactifs et un modelleur paramétrique, tels qu'implantés dans OASIS-ALADDIN.

* ALFGAM Optimering , Stockholm, Suède

** ABAX Computational Mechanics, Malmö, Suède

Il est alors possible d'optimiser la géométrie locale et globale, l'épaisseur des couches et stratifiés, l'orientation des matériaux (ex. les repères d'orthotropie), et la qualité des matériaux (ex. la densité du matériau d'âme dans un sandwich). Le concept d'optimisation de formes est fondé sur les formulations de modélisation paramétrique et est complètement 3D.

Les fonctions objectifs et restriction peuvent être la masse, le moment d'inertie, la rigidité, la fréquence propre, les contraintes et les coûts matériaux, ainsi que toute combinaison linéaire arbitraire. Elles peuvent également être définies comme des fonctions linéaires explicites des variables de conception. L'objectif peut être décrit comme la minimisation ou la maximalisation d'une fonction seule ou de la combinaison de plusieurs fonctions, ou encore comme la minimisation du maximum d'un ensemble de fonctions.

Afin d'illustrer cette approche, nous allons décrire son application au dimensionnement optimal d'une coque de NES en sandwich PRV, à l'aide d'OASIS-ALADDIN. L'objectif est de minimiser la masse du navire en déterminant les épaisseurs optimales des peaux et de l'âme dans les éléments portants ainsi que l'espacement des couples. Des restrictions sur la rigidité des panneaux et les contraintes maximales sont imposées afin de satisfaire aux règlements Det norske Veritas. Quatre cas de charge sont pris en compte en accord avec les règles de classification.

Cette étude prouve qu'avec des techniques modernes d'optimisation, il est possible d'automatiser une grande partie du dimensionnement d'une structure sandwich composite, avec pour effet une notable réduction des délais et des coûts de conception. Un autre avantage est lié à l'obtention de meilleurs résultats en comparaison avec les méthodes traditionnelles.

MATERIAUX COMPOSITES

Les composites offrent de très intéressantes propriétés en comparaison de matériaux conventionnels en contrepartie d'une complexité accrue. Ils sont constitués de fibres de renforcement - généralement continues - noyées dans une matrice polymère. Ces matériaux définis en tant que plis - couches ou lamina - sont ensuite empilés, en une séquence donnée, pour former un stratifié.

Un stratifié peut être constitué d'un nombre quelconque de plis, eux-mêmes composés de quelque combinaison et proportion de fibres et matrice, que ce soit, avec des coordonnées d'orthotropie différentes ou non pour chaque couche en rapport du repère global. Un sandwich est un cas particulier de stratifié dans lequel le pli situé au plan moyen est excessivement épais et léger en comparaison des autres.

La théorie classique des stratifiés indique que la constitution des plis, leur orientation et épaisseur, le nombre de couches et la séquence d'empilement définissent les propriétés globales du stratifié. L'hétérogénéité intrinsèque des composites permet de modifier chacun de ces paramètres et donc d'influencer les propriétés globales du stratifié.

A chaque itération, une analyse par éléments finis de la structure est réalisée afin d'évaluer les données nécessaires (les fonctions objectif et restriction). Ensuite, les dérivées de ces fonctions sont calculées en fonction des variables de conception. Basé sur ces données, le sous-problème approché est formulé et résolu, et les nouvelles valeurs des variables de conception sont calculées (fig. 1)

OASIS-ALADDIN

OASIS-ALADDIN est un code spécialisé pour l'optimisation des structures mécaniques dans le domaine linéaire. OASIS-ALADDIN intègre autour d'une base de données associative, un solveur EF et des pré- et post-processeurs interactifs. Des fonctionnalités spécifiques aux composites sont disponibles pour la modélisation des matériaux et l'analyse des résultats. Le repère local d'orthotropie en fonction de la géométrie est directement calculé. Les modèles générés dans ALADDIN sont complètement paramétrés (Esping, 1987, 1988).

OASIS, le moteur d'optimisation, effectue l'analyse de sensibilité et contient plusieurs algorithmes d'optimisation et options permettant de résoudre une large gamme de problèmes: approximation linéaire/inverse et MMA requérant des données sur les fonctions objectif et restriction ainsi que leurs dérivées en fonction des variables de conception (Esping 1986).

Le calcul des gradients dans OASIS est fondé sur les dérivées obtenues semi-analytiquement, ce qui assure une efficacité élevée. L'accroissement du coût en fonction du nombre de variables de conception est seulement linéaire, permettant ainsi à des problèmes comportant un nombre important de variables, 1000 ou plus, d'être traités sans coût CPU prohibitif. Les variables de conception sont :

- la géométrie (coordonnées des points de contrôle),
- l'épaisseur des coques et membranes (et des couches et stratifiés pour les composites),
- les angles d'orthotropie (ex. la direction des fibres),
- la qualité du matériau (ex. sélection de la densité de l'âme dans un sandwich),
- la section de barres.

Les variables de conception peuvent être continues ou discrètes, et toutes combinaisons des deux peuvent être actives simultanément autorisant ainsi l'optimisation concurrente de forme et de dimensionnement. Les variables de forme se combinent afin de définir des variables esclaves, et peuvent également être utilisées comme paramètres passifs de conception.

Les caractéristiques suivantes sont utilisées en tant que fonctions objectif et de restriction: la masse structurelle, le moment d'inertie, la rigidité, la fréquence propre, les contraintes, le coût matière, ainsi que toute combinaison arbitraire linéaire de ces dernières.

PROBLEME INVERSE EN DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES

Les méthodes numériques récentes, telle la méthode des éléments finis, sont aujourd'hui couramment employées pour la validation du dimensionnement des structures, en accord avec un cahier des charges plus ou moins complexe.

A moins que le dimensionnement initial ne réponde au cahier des charges, il est nécessaire de lancer un processus itératif de modification et d'analyse jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit obtenue. Ce processus peut rapidement devenir pesant lorsque de nombreux paramètres - et leur interaction - doivent être pris en compte, comme dans le cas des composites.

L'utilisation de techniques d'optimisation sous contraintes, avec des méthodes d'analyse de sensibilité et de programmation mathématique performantes, permet d'inverser et d'automatiser ce processus, en définissant en un seul problème l'objectif, les restrictions et les variables de conception. La résolution de ce type de problème peut être définie comme la solution d'un problème inverse. En termes mathématiques, le problème est souvent décrit:

$$\begin{array}{lll} \text{minimiser:} & w(x) & \text{fonction objective} \\ \text{d'après:} & g_i(x) \leq \bar{g}_i, i = 1, I & \text{contraintes} \\ & \underline{x}_j \leq x_j \leq \bar{x}_j, j = 1, J & \text{paramètres} \end{array}$$

où $w(x)$ est la fonction objectif à minimiser, et $x_j, j= 1, J$ l'ensemble des variables de conception. \underline{x}_j et \bar{x}_j sont les limites inférieures et supérieures, $g_i(x), i= 1, I$ sont les restrictions et \bar{g}_i leurs limites.

Dans le cas des matériaux composites, les variables de conception peuvent être les orientations des plis, leur épaisseur, la qualité du matériau, qui varient, produisant ainsi des stratifiés dotés de caractéristiques spécifiques ou de masse minimale, tout en satisfaisant des contraintes admissibles maximales ou une rigidité minimale.

MÉTHODOLOGIE DE L'OPTIMISATION

L'optimisation est un problème non-linéaire implicite et ne peut être résolu directement. Donc, une séquence de sous-problèmes explicites convexes doit être créée qui peut alors converger vers un optimum. Chaque sous-problème est une approximation basée sur les valeurs de premier ordre des fonctions objectif et restriction, et de leur dérivées en fonction des variables.

La procédure est itérative, chaque itération comprenant une phase analyse et une phase modélisation. Partant d'une modélisation initiale, ou d'un dimensionnement existant, le processus itératif et automatique d'analyse et de modification va améliorer la conception jusqu'à ce que la solution converge, ou qu'une solution satisfaisant l'ingénieur soit obtenue.

Les fonctions objectif et restriction peuvent également être définies comme des fonctions linéaires explicites des variables de conception. L'objectif se définit comme la minimisation ou la maximalisation d'une simple fonction ou de la combinaison de plusieurs fonctions, ou comme la minimisation du maximum d'un ensemble de fonctions. Plusieurs restrictions peuvent être appliquées simultanément.

ALGORITHME D'OPTIMISATION

MMA est une méthode d'approximation convexe développée par K. Svanberg (Svanberg, 1991). MMA est une méthode itérative: à chaque itération un sous-problème, qui approche le problème initial, est généré et résolu. Un rôle important est joué dans la génération de ces sous-problèmes par un ensemble de paramètres qui influencent la "courbure" de l'approximation et agissent en tant qu'"asymptotes" pour le sous-problème. En déplaçant ces asymptotes à chaque itération, la convergence du processus complet est stabilisée.

FORMULATION ELEMENT FINI

Le type d'élément utilisé est un élément de coque isoparamétrique stratifié à double courbure, avec huit noeuds et cinq degrés de libertés par noeud développé par Wennerström et Bäcklund (Wennerström, 1983, 1984, 1985). La formulation est issue des mêmes approximations fondamentales suggérées par Ahmad, Irons et Zienkiewicz (Ahmad, 1968, 1969, 1970), complétée par les techniques dites d'intégration réduite développées par Zienkiewicz (Zienkiewicz, 1971) et par Pawsey and Clough (Pawsey, 1971, 1973). Le principal avantage de cette technique d'intégration numérique améliorée consiste en la possibilité d'analyser également des structures modélisées en coques minces (Irons).

Les faces supérieures et inférieures sont considérées être en contrainte plane: les effets de flexion et de cisaillement ne sont pas pris en compte. La matrice de rigidité de l'âme est modifiée afin d'introduire une rigidité en cisaillement transverse.

Cet élément est bien adapté à l'analyse des stratifiés sandwich avec des peaux anisotropes. Voir fig. 2, 3 pour la définition de la position des noeuds, des propriétés géométriques et des variables.

APPLICATION Á LA CONCEPTION OPTIMALE DE LA COQUE EN SANDWICH PRV D'UN NES

Formulation du problème - Quelles sont les valeurs optimales de l'épaisseur des peaux et âmes des élément structurels en sandwich ainsi que de l'espacement des membrures pour que la masse du navire soit minimale, tout en satisfaisant aux règlements Det norske Veritas quant à la rigidité des panneaux et aux contraintes maximales.

Une approche en deux étapes est adoptée pour la formulation du problème afin d'en réduire la taille. L'optimisation est réalisée en deux phases, la première focalisée sur l'identification de l'espacement optimal, et la seconde sur la distribution globale des épaisseurs optimales des peaux et âmes. Dans la première analyse, une moitié d'une section symétrique couple à couple de la coque seulement est soumise à une pression de slamming et la fonction objectif est définie comme la masse par unité de longueur (fig. 4). Les variables de conception sont associées à l'épaisseur des peaux et de l'âme dans 23 zones différentes ainsi qu'à la longueur de la section. La seconde étape inclut trois sections complètes de la coque dans toute sa largeur, sujettes à une torsion longitudinale, et à une flexion longitudinale et transversale. Dans ce cas, l'espacement entre couple est constant et la fonction objectif est définie comme la masse structurale absolue (fig. 5). Tous les détails et données peuvent être obtenus dans Gullberg (Gullberg, 1991).

Modélisation - La géométrie et la construction de la coque sont décrites à l'aide d'ALADDIN. Toutes les informations requises par le calcul EF et l'optimisation: chargement, conditions aux limites, propriétés matériaux, variables de conception, fonctions objectif et restriction, sont directement associées à modèle CAO. Les variables de conception de la forme sont connectées aux points de contrôles du modèle CAO et agissent donc directement et automatiquement sur la géométrie.

Le modèle EF initial comporte 298 éléments de coque isoparamétrique stratifié à huit noeuds, 96 éléments de barre à 3 noeuds et 2 éléments de barre à 2 noeuds. 42 variables de conception contrôlant l'épaisseur des peaux et de l'âme en différents zones de la structure sont définies ainsi qu'une variable sur la géométrie associée à l'espacement entre couples. Le modèle EF pour la seconde étape comporte 840 éléments de coque à 8 noeuds, dont 678 sont associés à des variables sur l'épaisseur, 536 éléments de barre à 3 noeuds et 12 éléments de barre à 2 noeuds.

Matériaux et stratifiés - Les propriétés des peaux sont typiques de stratifiés polyester renforcés de fibres de verre avec un taux de renfort de 50%. Trois densités d'âme différentes en mousse PVC sont utilisées dans différentes parties de la structure. 28 empilements différents au total sont utilisés dans le modèle, dont 23 sont associés à des variables de conception.

Variables de conception - Les variables de conception sont associées à l'épaisseur des peaux et de l'âme dans différentes zones de la structure, ainsi qu'à l'espacement entre couples. Les valeurs de départ sont issues de la proposition de projet initial. 229 éléments de coque sont associés à des variables sur l'épaisseur, 42 variables sur l'épaisseur des peaux et de l'âme sont actives dans 23 empilements différents. Un seul de ces 23 empilements a une seule variable associée à l'épaisseur de l'âme, alors que 11 sont symétriques et ont donc deux variables indépendantes chacun, tandis que les 11 autres empilements ont trois variables indépendantes chacun.

Des limites sur certaines variables sont introduites afin de représenter les exigences du cahier des charges envers la résistance à l'impact, ainsi que

celles liées à la mise en oeuvre et à la production. Les épaisseurs des stratifiés intérieurs sont autorisées à descendre jusqu'à 1.5mm et dans certains cas jusqu'à 1mm (dans les couples). La limite inférieure dans les stratifiés extérieurs est fixée à 4 mm.

Chargements - Les chargements appliqués à la structure sont basés sur les spécifications des règles de classification édictées par Det norske Veritas (DnV, 1985). Les chargements sont définis par des expressions combinant la masse structurelle et les dimensions du navire avec les vitesses, les accélérations et les hauteurs de vagues, etc. représentatives, afin de prendre en compte le cas de chargement le plus catastrophique.

Restrictions - Les restrictions sont affectées aux contraintes maximales survenant dans les peaux et l'âme, et aux déformations de la coque. Toutes les restrictions sont définies d'après les règles et spécifications DnV. Les restrictions sur les contraintes sont appliquées à tous les éléments du modèle, en spécifiant une valeur maximale admissible du critère de Tsai, un critère normalisé basé sur les contraintes effectives. Les restrictions sur les déformations sont appliquées individuellement sur les panneaux de coque, ainsi que stipulé par DnV. La déformation maximale admissible en milieu de panneau est définie comme un pourcentage de la longueur du côté le plus court du panneau.

Résultats - Les résultats suivants sont obtenus.

Phase 1

1. La masse par unité de longueur est réduite de 14%;
2. Les contraintes et déformations satisfont les limites imposées;
3. La distance entre couples est augmentée de 27%;
4. L'épaisseur de la plupart des stratifiés est réduite, en moyenne de 33% dans la coque et 27% dans les couples;
5. L'épaisseur de quelques sandwich dans la coque est augmentée.

Phase 2

1. La masse par unité de longueur est réduite de 5%;
2. Les contraintes et déformations satisfont les limites imposées;
3. L'épaisseur de la plupart des stratifiés est réduite;
4. L'épaisseur de la plupart des sandwich est réduite.

L'ajustement des limites sur les variables associées à l'épaisseur des stratifiés permet encore de réduire la masse par unité de longueur jusqu'à 17% dans la phase 1, et 7% dans la phase 2 (fig. 6, 7, 8).

Il est cependant nécessaire lors de l'examen des résultats, de conserver à l'esprit quelques unes des limitations de cette étude : Les phénomènes de flambement ne sont pas pris en compte. Cependant, les valeurs minimales de l'épaisseur des peaux et de l'âme sont déterminées en partie pour limiter ces effets. Les effets locaux, contraintes locales et concentration de contraintes, ne sont pas réellement pris en compte.

EXTENSION

Il est certainement utile de présenter deux autres applications de l'approche décrite pour la solution de problème inverse:

- Dimensionnement d'une caisse de voiture de chemin de fer en sandwich composites avec des caractéristiques dynamiques spécifiques. La formulation du problème est la suivante. Comment dimensionner la structure en sandwich pour que la plus basse fréquence propre en flexion longitudinale soit au minimum de 8Hz, tout en minimisant l'accroissement de masse. Les variables de conception sont associées à l'épaisseur de l'âme et des deux faces. 63 variables au total sont actives durant l'optimisation. En comparaison du projet initial, la plus basse fréquence propre est effectivement montée de 4.77Hz à 8Hz alors que la pénalisation sur la masse n'est que de 15%.

- L'approche décrite est actuellement étendue à la conception d'une pôle d'hélice en composites dotée de caractéristiques adaptatives. Le but est de tirer parti des propriétés anisotropes des composites pour obtenir une pôle avec un pas variable en fonction de son chargement. La pôle doit se déformer afin de présenter un angle d'attaque plus faible lorsque la pression augmente, avec pour résultats une diminution des phénomènes vibratoires, acoustiques et de cavitation.

Le problème consiste à déterminer les stratifiés, les séquences d'empilement et les angles qui permettent d'obtenir les caractéristiques requises. Les résultats des tests préliminaires sont prometteurs. Malheureusement, aucune donnée n'est encore disponible pour des raisons de confidentialité.

CONCLUSION

Les composites offrent l'unique possibilité d'être conçus sur mesure afin de répondre précisément à des spécifications particulières. La conception et le dimensionnement de structures en composites tendent naturellement vers la formulation d'un problème inverse.

Un outil puissant de résolution de problèmes inverses dans la conception/dimensionnement de structures sandwich a été développé par l'intégration de méthodes numériques récentes, analyse par Eléments Finis et optimisation non-linéaire, avec des techniques spécialisées de modélisation paramétrique, telles qu'implantées dans OASIS-ALADDIN.

Il est maintenant possible d'automatiser une bonne partie du dimensionnement de structures sandwich de grandes dimensions, ainsi démontré lors de l'étude du NES, avec pour résultats des performances supérieures, des délais raccourcis et des coûts réduits en comparaison avec les méthodes de conception traditionnelles

AHMAD S., IRONS B.M. and ZIENKIEWICZ O.C., 1968, "Curved Thick Shell and Membrane Elements with Particular Reference to Axi-symmetric Problems", Proceedings Second Conference on Matrix Methods in Structural Mechanics, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio

AHMAD S., 1969, "Curved Finite Elements in the Analysis of Solid, Shell and Plate Structures", Ph.D Thesis, University of Wales, Swansea

AHMAD S., IRONS B.M. and ZIENKIEWICZ O.C., 1970, "Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Finite Elements", *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, vol. 2, pp. 419-451

DnV, 1985, "Rules for Classification of High Speed Light Craft", Det norske Veritas, H. vik

ESPING B., 1986, "The OASIS Structural Optimization Package", *Computers & Structures*, vol. 23, 3.

ESPING B. and HOLM D., 1987, "A CAD Approach to Structural Optimization", NATO ASI "Computer Aided Optimal Design", Lisbon, in "Computer Aided Optimal Design: Structural and Mechanical Systems" ed. C.A. Mota Soares, Springer-Verlag

ESPING B. and HOLM D., 1988, "Structural Shape Optimization using OASIS", IUTAM Symposium on Structural Optimization, Melbourne, Feb 9-13, in "Structural Optimization" ed. G.I.N Rozvany and B.L. Karihaloo, Kluwer Publishers

GULLBERG O. and ROMELL O., 1991, "Structural Optimization of a High Performance GRP-Sandwich Ship Hull", FAST'91, Trondheim, June 17-21

IRONS B.M. and RAZZAQUE A., 1973, "A Further Modification to Ahmad's Element", *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, vol. 5, pp. 588-589

PAWSEY S.F. and CLOUGH R.W., 1973, "Improved Numerical Integration of Thick Shell Finite Elements", *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, vol. 3, pp. 575-586

PAWSEY S.F., 1973, "Discussion of Papers by O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor and J.M. Too, and S.F. Pawsey and R.W. Clough", *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, vol. 4, pp. 449-450

SVANBERG K., 1991, "The Method of Moving Asymptotes (MMA) with some Extensions" in Lecture Notes for the NATO/DFG ASI "Optimization of large structural systems", Berchtesgaden, Sept 23-Oct 4

WENNERSTRÖM H. and BÄCKLUND J., 1983, "Plate Finite Elements for Static Analysis of Stiffened Sandwich Construction", Dept. of Aeronautical Structures and Materials, The Royal Institute of Technology, Report 83-6, Stockholm

WENNERSTRÖM H. and BÄCKLUND J., 1984, "Cylindrical Finite Elements for Static Analysis of Stiffened Sandwich Construction", Dept. of Aeronautical Structures and Materials, The Royal Institute of Technology, Report 84-3, Stockholm

WENNERSTRÖM H. and BÄCKLUND J., 1985, "General Curved Finite Elements for Static Analysis of Sandwich Shell Structures", Dept. of Aeronautical Structures and Materials, The Royal Institute of Technology, Report 85-1, Stockholm

ZIENKIEWICZ O.C., TAYLOR R.L. and TOO J.M., 1971, "Reduced Integration Technique in General Analysis of Plates and Shells", *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, vol. 3, pp. 275-290

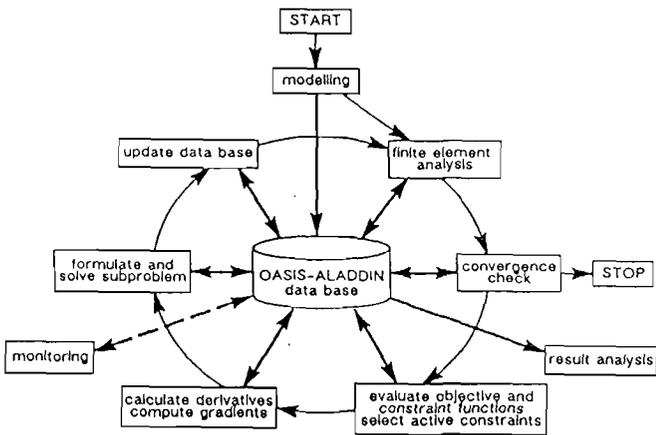


Fig. 1. Optimization iterative procedure
Processus itératif d'optimisation

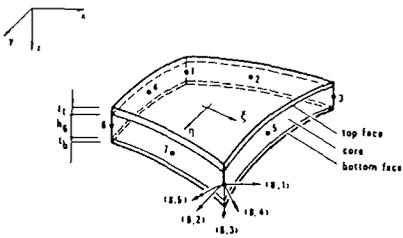


Fig. 2. General doubly curved stacked sandwich shell element
Element de coque sandwich stratifié à double courbure

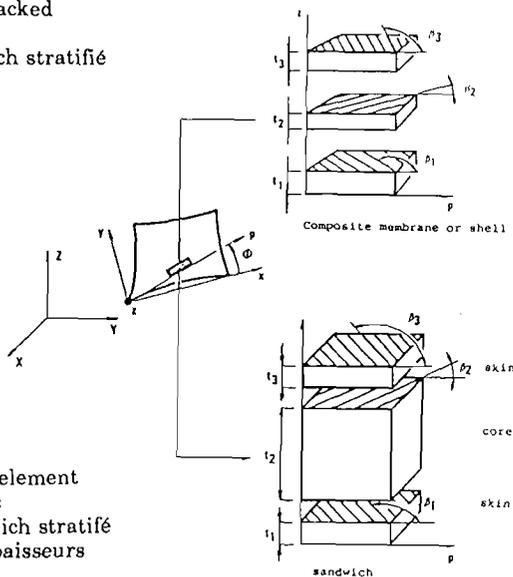


Fig. 3. Stacked sandwich shell element with thickness variables
Element de coque sandwich stratifié avec variables sur les épaisseurs



Fig. 4. Step 1 FE-model with loading
Modèle EF avec chargement Phase 1

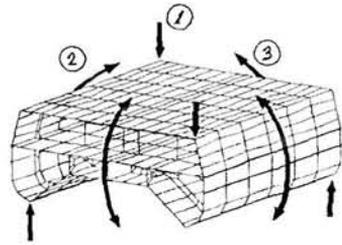


Fig. 5. Step 2 FE-model with additional loadings
Modèle EF avec chargement complémentaire Phase 2

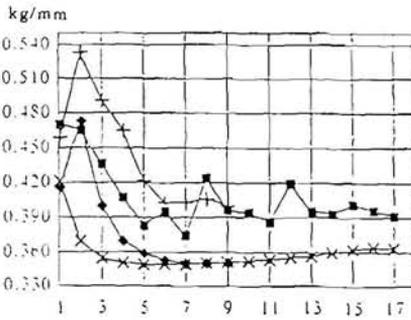


Fig. 6 Weight versus iteration number
Poids à chaque itération

Tsai factor (normalized effective stress)
Critère de Tsai

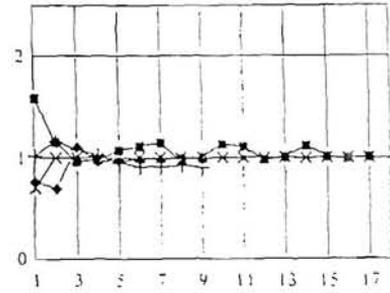


Fig. 7. Maximum stress versus iteration number
Contraintes maxi à chaque itération

Normalized deflection
Déflexion normalisée

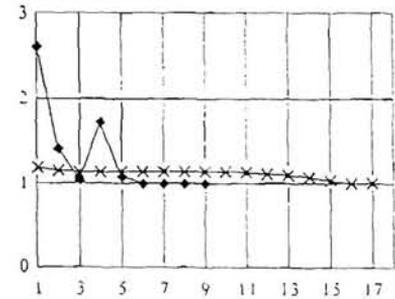


Fig. 8. Maximum deflection versus iteration number
Déflexion maxi à chaque itération

- x Step/Phase 1
 - + Step/Phase 2
 - ◆ Step/Phase 1*
 - Step/Phase 2*
- * refined limits on design variables
* limites des variables de conception ajustées