COMPORTEMENT AUX CHOCS PAR EXPLOSIONS SOUS-MARINES DE PLAQUES EN COMPOSITES VERDE-RÉSINE

J. Picard, P. Seris

► To cite this version:

J. Picard, P. Seris. COMPORTEMENT AUX CHOCS PAR EXPLOSIONS SOUS-MARINES DE PLAQUES EN COMPOSITES VERDE-RÉSINE. Journal de Physique IV Proceedings, 1991, 01 (C3), pp.C3-361-C3-367. 10.1051/jp4:1991352 . jpa-00250496

HAL Id: jpa-00250496

<https://hal.science/jpa-00250496>

Submitted on 1 Jan 1991

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMPORTEMENT AUX CHOCS PAR EXPLOSIONS SOUS-MARINES DE PLAQUES EN COMPOSITES VERRE-RÉSINE

J.M. PICARD et P. SERIS

STCAN, 8, Bd Victor, F-75732 Paris cedex 15, France

Abstract: In this paper, the effects of underwater explosions on GRP plates are studied. Trials are described. A simple energetical model built up for naval architects is showed and compared to measurements and to finite elements high dynamics calculations. A fracture criteria is given.

INTRODUCTION

Le but de cette étude est de mener une première investigation visant à mieux comprendre les effets d'une explosion sous-marine sur une plaque en composite. Il ne s'agit pas d'un test de validation, ni d'une comparaison de performances. On désire connaître le mode de dégradation de la structure et mieux cerner les mécanismes de dégradation.

Les essais sur éprouvettes permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques de ces matériaux. Dans cette étude, l'approche est différente. Nous nous intéressons à la réponse et à la modélisation d'une structure simple soumise à un véritable chargement par explosions.

Le matériau choisi est celui employé pour la construction de la coque du Bâtiment Anti-Mines Océaniques. Il s'agit d'un composite verre-résine fait d'un empilement de tissus de verre E sergé de 2, 0°/90°, 830 g/m². Chaque pli est appliqué au rouleau et fait environ 1 mm d'épaisseur. Les tissus ont même orientation, la résine est polyester isophthalique et polymérise à l'ambiante.

Après avoir présenté les essais, nous nous efforcerons d'interpréter leurs résultats au travers de diverses modélisations.

1 - LES ESSAIS D'EXPLOSIONS SOUS-MARINES

1.1 - Description des essais

Les essais ont lieu en piscine calibrée à 4 g de TNT. La cible est constituée d'une plaque circulaire en composite verre-résine de diamètre 320 mm, montée au sommet d'un support métallique cylindrique (tambour). Une couronne métallique permet un encastrement de la plaque sans perçage. Ce montage étanche maintient la face inférieure en air. Les tirs d'une charge de 4 g ont lieu en eau sur l'axe vertical de la plaque.

L'instrumentation consiste en jauges de déformation et en accéléromètres montés sur la face en air de la plaque. Un témoin de pâte à modeler donne la flèche maximale au centre.

I.2 - Observations qualitatives

Une vingtaine de plaques de deux épaisseurs à quatre et huit plis a été essayée. Chaque plaque n'a subi qu'un seul tir. Pour des distances de tir décroissantes, les dommages suivants ont été observés.

STADE I Fissuration superficielle de la résine sur la face en extension de la plaque. La résine se fendille en surface selon des directions orthogonales aux fibres de verre

STADE II Délaminage à la périphérie de la partie plane de l'éprouvette, visible sur la partie extérieure au niveau du rebord.

STADE III Couronne de délaminage au centre de la plaque.

STADE IV Rupture partielle ou totale de la plaque par cisaillement à la périphérie.

	Q4	P8-Q8
Stade I	600 mm	600 mm
Stade II	400 mm	400 mm
Stade III	?	200 mm
Stade IV	250 mm	100 mm

Le tableau ci-dessus donne les distances de tir correspondant à l'apparition des différents stades. Malgré l'endommagement, aucune déformation résiduelle autre que la rupture n'a été relevée.

I.3 - Résultats quantitatifs

L'étude quantitative a été faite sur les plaques les plus épaisses, à huit plis. Elles proviennent de deux lots de fabrication différents, notés P et Q.

Les signaux bruts fournis par les accéléromètres sont difficilement exploitables. En effet les accélérations initiales de plusieurs dizaines de milliers de g ne rendent pas compte du mouvement d'ensemble de la plaque. En revanche, l'intégration de ces signaux montre une mise en vitesse quasi-instantanée et a priori uniforme de la plaque : la vitesse maximale de 10 à 12 m/s est atteinte en 50 à 90 μ s.

Trois jauges sont collées au centre, deux à la périphérie. Il n'y a pas de différences dans l'allure du signal suivant la direction des jauges. Les trois jauges au centre répondent de la même façon et il en est de même pour les jauges à la périphérie. Les différences constatées au niveau de l'amplitude de la réponse sont de l'ordre de 10 %, ce qui correspond aux incertitudes sur les mesures. Nous n'avons pas d'effets notables d'anisotropie.

Les oscillations lentes (environ 110 Hz) proviennent de la vibration en eau des plaques. Les oscillations rapides (285 Hz) sont dues soit à une harmonique, soit à une vibration sans effets dus à l'eau lorsqu'il y a cavitation au dessus de la plaque.

Les signaux de jauges font apparaître deux pics principaux, le deuxième étant légèrement supérieur. Le premier correspond à l'onde de choc primaire, le deuxième à l'onde de pression secondaire émise par la première contraction de la bulle des gaz créée par l'explosion.

Les flèches maximales relevées sont rassemblées sur la figure ci-dessous :

On constate que les flèches maximales atteignent quatre fois l'épaisseur des plaques et le dixième de leur diamètre. La modélisation devra prendre en compte les effets de membrane.

II LES MODELISATIONS.

La démarche initiale a consisté à utiliser une approche énergétique simple mise au point sur des essais avec plaques métalliques.

II.1 - Choix des paramètres.

Comme le suggèrent les résultats des essais et le modèle de la plaque métallique, nous considérons que l'onde de pression communique essentiellement une impulsion à la plaque. Celle-ci acquiert une vitesse uniforme alors que les déplacements sont encore minimes. Le mode de fixation de la plaque ou le type de matériau utilisé importe peu dans cette approche, seul compte la masse volumique de l'élément de plaque considéré.

Le paramètre qui guide ce raisonnement est la constante de temps de l'onde. Celle-ci est très petite, de l'ordre de 20 μ s. Pendant ce temps, une onde acoustique se déplace de 3 cm dans l'eau et à peine plus dans le matériau composite. Il est donc légitime de penser que le mouvement initial de la plaque est peu influencé par son mode de fixation au bord.

Les paramètres retenus pour décrire le chargement sont donc les impulsions de l'onde de choc primaire et de la première onde de pression secondaire. Elles sont données par des abaques connues.

Tant que le matériau n'est pas endommagé, le paramètre qui intéresse l'architecte naval est la flèche maximale atteinte. On peut relier celle-ci à l'impulsion initiale au travers de l'énergie de déformation élastique dans la déformée réelle, que l'on approche par la déformée sous pression statique uniforme. Les contraintes calculées par ce procédé sont comparées aux critères d'endommagement.

III - COMPARAISON ESSAIS-MODELES.

III.1 - Relation flèche-énergie.

La modélisation retenue fournit une relation entre la flèche maximale au centre et l'énergie fournie à la plaque de la forme:

$$\text{Energie} = A (\text{flèche})^2 + B (\text{flèche})^4$$

A et B dépendent de la géométrie de la plaque, des conditions aux limites et du matériau. A est relié au terme de flexion, B à celui de membrane.

En supposant un encastrement parfait et en utilisant les caractéristiques du matériau données par le fabricant d'après des essais sur éprouvettes, on obtient la courbe A qui correspond à notre premier modèle.

Au vu des résultats des essais en caisson hyperbare, on constate que les coefficients A et B calculés précédemment sont incorrects. On peut mettre en cause un défaut d'encastrement ou une imprécision sur les caractéristiques du matériau. La courbe B est ajustée sur les essais statiques.

Les essais d'explosions sous-marines fournissent également une relation flèche-énergie représentée par la courbe C. Cette dernière courbe correspond à des mesures dynamiques alors que les autres s'appuient sur des données en statique.

Il subsiste un écart entre les courbes B et C. Il semblerait que l'on mette en évidence les effets de l'endommagement du matériau au cours des essais d'explosions.

Relation flèche énergie

III.2 - La rupture.

La rupture a l'allure d'un cisaillement. Nous allons rechercher la contrainte de cisaillement équivalente, en supposant que cette dernière est constante à travers l'épaisseur h de la plaque à sa périphérie.

Soit P_{eq} la pression donnant la même énergie de déformation à la plaque en statique. La force transversale appliquée à la plaque est $P_{eq} \cdot \pi a^2$, où a est la surface de la plaque. Le cisaillement τ à la périphérie permettant d'équilibrer cette force vérifie :

$$\tau \cdot h \cdot 2\pi a = P_{eq} \pi a^2$$

II.2 - Le modèle analytique.

Un modèle simple représente l'interaction de l'onde de choc avec la plaque: la réflexion d'une onde plane de mêmes paramètres sur une plaque infinie de même masse surfacique qui sépare l'eau de l'air.

Ce problème a une solution analytique. Soient:

$P(t)$	Pression incidente sous forme d'exponentielle de constante θ
$V(t)$	Vitesse de la plaque
μ	masse volumique de l'eau
c	vitesse du son dans l'eau
m	masse surfacique de la plaque

L'équation du mouvement s'écrit: $m(dV/dt) = 2.P(t) - \mu.c.V(t)$

Le mouvement de la plaque donne une dépression derrière elle.

La pression réfléchie est: $P_r(t) = \mu.c.V(t)$.

L'onde de choc peut se représenter par une exponentielle de constante de temps θ . La vitesse passe par un maximum: $V_{\max} = (2.P_{\max}/\mu.c).B^{1/(B-1)}$ en $t = \theta.\log(B)/(B-1)$, où $B = (\mu.c.\theta)/m$

Dans les applications numériques, B est de l'ordre de l'unité, la vitesse maximale est atteinte en un temps comparable à celui de θ . Lorsque la plaque atteint la vitesse $V_{\max}$, la pression derrière la plaque s'annule et tend à devenir négative: il y a cavitation et le chargement sur la plaque devient nul. L'interaction d'une onde plane avec la plaque encasturée est donc modélisée par une mise en vitesse instantanée et uniforme de la plaque entière.

Si le tir est proche, l'onde de pression n'est plus plane mais sphérique. L'impulsion communiquée n'est plus identique en tout point. Les calculs liés à ces tirs conduisent à des corrections sur l'énergie cinétique communiquée à la plaque.

Un matériau isotrope équivalent est défini par identification de la relation flèche sous pression statique - énergie de déformation. L'approche énergétique des grandes flèches de plaque décrite dans le Timoshenko - Plaque et Coques a été adoptée. Elle prend en compte les déformations de flexion et de membrane. Les résultats sont rassemblés sur la figure suivante.

Pour une distance de tir de 300 mm, on observe les effets du rapprochement de la bulle des gaz lors de sa première oscillation: ϵ_{ps2} est alors sensiblement supérieur à ϵ_{ps1} .

Le modèle prédit des flèches inférieures à celles mesurées. Afin d'expliquer ces différences, la relation flèche-énergie de déformation de la plaque a été corrigée après passage du dispositif en caisson hyperbare. Un léger écart subsiste entre modèle et essais.

II.3 - Les modèles numériques.

Deux modèles ont été réalisés avec les logiciels de dynamique rapide AUTODYN et PLEXUS. Tous deux prennent en compte les interactions fluide-structure et les effets de la cavitation par minoration de la pression par zéro. Les calculs ont été fait en axisymétrique sur une colonne d'eau surmontant une plaque encasturée. Une onde de pression de même impulsion et de même énergie que l'onde réelle pour une distance de tir de 500 mm a été créée à une extrémité du maillage fluide. Les vitesses impulsionnelles sont bien retrouvées, les déplacements restent légèrement inférieurs.

Sur la courbe ci-dessous, nous avons reporté ces valeurs du cisaillement en fonction de la distance de tir. Si l'on suppose que le cisaillement a un profil parabolique dans l'épaisseur, sa valeur maximale est obtenue en multipliant ces courbes par 1,5.

La valeur limite du cisaillement mesurée sur des éprouvettes est:
(dans une hypothèse parabolique)

4 couches	45 à 49 MPa
9 couches	42 à 44 MPa

Une autre méthode d'essai (méthode IOSIPESCU) donne les résultats suivants :

4 couches	58 MPa
9 couches	72 à 78 MPa

La rupture par explosion est indiquée sur la figure. Le cisaillement atteint est du même ordre de grandeur que les données sur éprouvettes. Ainsi l'hypothèse d'une rupture par cisaillement semble la plus probable. Cependant, il ne faut pas oublier que les tensions de membrane et de flexion sont également très forte lors de la rupture. La rupture est due à la combinaison de ces trois effets.

CONCLUSION

Les essais d'explosions sous-marines ont pour but de mieux connaître les mécanismes de dégradation spécifiques d'une structure navale, afin d'améliorer la conception et le dimensionnement de navires avec une coque en composite. Ce type d'expériences a l'avantage sur les essais sur éprouvettes de soumettre le matériau au chargement réel, tout en restant relativement facile de mise en œuvre et peu onéreux. En revanche, son interprétation détaillée s'avère plus complexe. Il permet cependant d'élaborer des modèles globaux, tels que celui présenté ici, accessibles aux bureaux d'études.

- BLAZYNSKI T. Z. : Materials at high strain rates
Elsevier Applied Science
- COLE Robert H. : Underwater explosions
Princeton University Press 1948
- HENRYCH Josef : The dynamics of explosion
Elsevier 1982
- KENNARD E. H. : Migration of underwater gas globes due to gravity and neighboring surfaces. (1943)
- S. LAROZE, J.J. BARRAU : Calculs des structures en matériaux composites
Mécaniques des structures, Tome 4 Eyrolles Masson. 1987
- M. CALEDEC, X. GUILPIN : Projet de fin d'études ENSTA (1986 STCAN)
Comportement de bordés de fond de navire soumis à une explosion sous-marine
- Note Technique N° 115/85 Gerpy
Etude à échelle réduite des effets d'une explosion sous-marine.
- Note Technique N° 70/86 Gerpy
Considération énergétique et étude du collage de la bulle.
- Note Technique N° 1570/88 Gerpy
Eléments pour la détermination de la mise en vitesse de bordées de navires lors des explosions sous marines.
- Note Technique N° 108/89 Gerpy
Analyse numérique de la réponse de plaques circulaires à comportement élasto-plastique sous l'effet d'une onde de choc sous marine.
- CAPRINO G., CRIVELLI VISCONTI I., DI ILIO A. : "Composites materials responses under low velocity impact"
Composites Structures 2 (1984) 261-271
- LAL K. M. : "Low velocity transverse impact behavior of 8 ply, Graphite-Epoxy laminates" Journal of Reinforced Plastics and Composites 2 (oct 83) 216-225
- LAL K. M. : "Residual strength assesment of low velocity impact damage of Graphite-Epoxy laminates" Journal of Reinforced Plastics and Composites 2 (oct 83) 216-225
- BEAUMONT N., PENAZZI L., CAZENEUVE C. : "Etude de l'impact d'une bille sur une plaque composite à fibres longues et à matrice organique" Compte rendu de la 5^e journée nationale DYMAT