

27

CORRÉLATION ESSAIS-CALCUL POUR MATÉRIAUX COMPOSITES EN APPLICATION MARINE.

D. CHOQUEUSE *, P. DAVIES *, B. BIGOURDAN *

IFREMER *, CETIM **, EC NANTES ***, Bureau Véritas ****

Résumé - L'apport des calculs par la méthode des éléments finis (EF) est important pour le calcul des pièces en composites. Actuellement, peu de comparaisons entre calculs EF et essais sur structures ont été entreprises. Après avoir défini un type de géométrie représentative d'une structure marine (bordé de navire réalisé en sandwich raidi), et ainsi qu'un moyen d'essai permettant la mise sous charge (pression répartie) de ces panneaux de dimensions 1m x 2m, la modélisation de cet essai a été entreprise par quatre laboratoires différents en utilisant des codes EF différents. Les résultats obtenus (flèches et déformations) ont ensuite été comparés avec ceux d'essais. Une corrélation satisfaisante est obtenue pour les flèches (écart de l'ordre de 20% pour la flèche au centre) alors que la corrélation est médiocre pour les déformations.

Mots clefs : pression répartie, élément fini, panneau sandwich, mousse PVC, raidisseur

* IFREMER, Laboratoire de Matériaux marins, Plouzané, France
** CETIM, Département d'analyse des structures, Senlis, France
*** Ecole Centrale Nantes, Laboratoire de mécanique des structures,
Nantes, France
**** Bureau Veritas, Centre de recherche et développement, Rueil
Malmaison, France

PRÉSENTATION

Dans le programme Européen BRITE-EURAM (COMAST COMposite for MARine STRuctures and components), une corrélation essai-calcul a été menée sur deux types de structures, représentatives d'une application marine, soumises à un chargement de pression répartie, afin de valider la technique et les procédés EF et de faire une comparaison entre différents codes de calcul par éléments finis.

TYPE DE STRUCTURES ÉTUDIÉES

Les structures considérées sont des panneaux sandwich raidis. Ces panneaux sont assimilables à une maille de bordé de navire type NES ou chasseur de mines.

Les panneaux, de dimensions 1m x 2 m, sont composés de deux peaux verre - résine et d'une âme centrale en mousse à cellules fermées.

Les peaux sont réalisées par moulage au contact à partir de tissus quadriaxiaux ($90^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ$) de grammage 1034 g/m² de verre E et d'une résine époxy (référence Sicomin SR 1500). L'épaisseur de chaque peau est de 3.4 mm. Le matériau d'âme, d'épaisseur 40 mm, est un PVC réticulé de masse volumique 80 kg/m³ (référence Diab-Barracuda H80).

Deux types de raidissage ont été envisagés. Pour le panneau 1 (fig 1) deux raidisseurs transversaux sont positionnés avec un écartement de 1180 mm. Le panneau 2 (fig. 2) est raidi par les deux raidisseurs transversaux, identiques à 1, et un raidisseur longitudinal placé dans l'axe centrale du panneau.

Les raidisseurs sont réalisés par stratification (moulage par contact) de deux couches de tissu quadriaxial sur un profil "oméga" en mousse de polyéthylène de masse volumique 35 kg/m³.

INSTRUMENTATION DES PANNEAUX.

Deux types de mesures ont été réalisés lors de la conduite de l'essai. Des mesures de déplacement en différents points (fig. 3) (12 pour le panneau 1, 13 pour le panneau 2), à la face supérieure des panneaux, sont effectuées au moyen de capteurs de déplacement linéaire (type LVDT). L'état de déformations (déformations ϵ_x , ϵ_y et γ_{xy}) en huit points différents, des peaux inférieure et supérieure, est donné par les indications fournies par des jauges de déformation tridirectionnelles collées sur les peaux du matériau.

TYPE DE CHARGEMENT ET DISPOSITIFS D'ESSAI.

Afin d'assurer un chargement représentatif d'une sollicitation à laquelle les bordés sont soumis, le chargement en flexion sous pression répartie a été choisi. Ce chargement est réalisé par l'intermédiaire d'un bâti d'essai qui s'inspire des travaux de REICHARD (ref.1). Le bâti (photo 1) permet de

soumettre les panneaux à une pression répartie (jusqu'à 0.5 MPa), les efforts étant repris en bloquant en rotation et translation les semelles supérieures des raidisseurs transversaux (Fig 4).

DÉMARCHE UTILISÉE.

La démarche ci-dessous a été suivie pour la réalisation de l'étude.

- 1 Définition des structures, du chargement, des matériaux.
- 2 Détermination des propriétés de base des matériaux.
Les propriétés (E_x , E_y , ν_{xy} , G_{xy}) du stratifié de base (peaux du sandwich et stratification des omégas) sont déterminées par essais de traction selon 2 directions (0° et 45°) et par calcul au moyen de logiciels de calcul adaptés (ANASTRA : micromécanique et théorie des plaques minces stratifiées et MODULEF : homogénéisation des milieux périodiques,) (ref.2). Les propriétés de cisaillement (G) de l'âme sandwich sont obtenues par essai mécanique et à partir des données du fournisseur.
- 3 Corrélation des résultats sur le point 2 et choix des propriétés à entrer dans les modèles EF.
- 4 Déterminations par calcul par éléments finis EF des flèches et déformations aux points expérimentaux pour une pression de chargement de 0.1 MPa.
Les codes EF mis en oeuvre sont : ADINA
CASTOR
SAMCEF
ABAQUS
- 5 Réalisation des chargements sur les panneaux avec suivi des paramètres flèches et déformations en fonction de la pression de chargement.
- 6 Corrélation essai-calcul EF

PROPRIÉTÉS DE BASE DES MATÉRIAUX.

Les données fournies pour la détermination des propriétés mécaniques des peaux par calcul sont les propriétés de la résine, les grammages de verre E dans chaque direction de renforcement, la séquence d'empilement et le taux de fibre escompté dans les peaux. Ce dernier paramètre (58.4% de fibre en masse) provient de résultats moyens obtenus pour la fabrication de pièces du même matériau réalisées au laboratoire IFREMER. Toutes ces données sont donc des données qui peuvent être fournies, à priori, avant réalisation d'une structure.

La détermination par essai mécanique des paramètres E_x , E_y , ν_{xy} est réalisée à partir des essais de traction à 0° (0° direction x et 90° direction y identiques). Il est important de noter la non-linéarité des courbes effort-déformation qui nous a amené à définir les paramètres par deux méthodes

différentes : tangentes initiales à l'origine de la courbe (**init**) et par régression linéaire des moindres carrés entre 10 et 50% de la contrainte maximum (**moy**).

L'essai de traction à 45° permet d'obtenir le paramètre G_{xy} . Les différents résultats sont présentés dans le tableau 1

Au point de vue module E_x , les résultats issus du calcul se situent entre les deux modules obtenus expérimentalement. Le comportement non linéaire du matériau est difficile à prendre en compte dans la suite de l'étude mais la différence de 30% notée entre les modules **init** et **moy** doit être retenue. Les différences notées entre les ν et G mesurés expérimentalement et par calcul peuvent être considérées comme faibles (<10%). Pour la suite de l'étude les résultats obtenus par ANASTRA seront pris en compte, la méthode utilisée dans ce calcul étant la plus généralement employée.

Le module de cisaillement de la mousse déterminé expérimentalement (selon la norme NFT 56-118) est de 33 MPa. Cette valeur sera prise en compte dans la suite de l'étude. Le module fourni par la documentation commerciale est de 30 MPa, soit légèrement inférieur. Rappelons que les propriétés des mousses sont en relation directe avec la densité de celles-ci (ref 3) et que la fourchette de masse volumique donnée par les fournisseurs pour une fabrication est de $\pm 10\%$, ce qui peut expliquer la différence observée. On a noté lors d'un premier essai de cisaillement sur la mousse, un module de 15 MPa, cette valeur particulièrement faible s'est avérée mauvaise en raison d'une mise en oeuvre imparfaite de l'essai. L'essai de détermination du module de cisaillement de la mousse reste délicat à mettre en oeuvre et doit être mené d'une manière très scrupuleuse (ref 4). Par manque de connaissance, le matériau d'âme est considéré comme isotrope avec un coefficient de Poisson de 0,4.

MODÉLISATION DES STRUCTURES

Quatre logiciels EF différents ont été utilisés par les quatre laboratoires. Aucune directive n'a été imposée quant au type de maillage et d'élément à utiliser. Dans le tableau 2, sont reportées, pour chacun des panneaux 1 et 2, les principales informations concernant la modélisation EF développée. Notons que le type de modélisation est similaire pour chacun des laboratoires tant au niveau de la surface maillée que du type d'élément employé.

Les résultats obtenus par les différentes modélisations sont présentés dans les tableaux 3 et 4. Pour ADINA, seuls les résultats de la modélisation linéaire ont été indiqués.

CONDUITE DE L'ESSAI

Chaque panneau, après instrumentation, a été chargé jusqu'à une pression de 0.12 MPa par pas de 0.02 MPa. Les déplacements et déformations ont été enregistrés par l'intermédiaire d'une centrale d'acquisition (Type ORION Schlumberger). Pour chaque panneau deux essais ont été réalisés. Les résultats (moyenne sur les deux essais) apparaissent dans les tableaux 3 et 4 (colonne ESSAI)

RÉSULTATS OBTENUS

Panneau 1

L'allure de la déformée du panneau est sensiblement différente en fonction du type de modèle EF mis en oeuvre (fig. 5). Les résultats ADINA et CASTOR sont tout à fait similaires. L'allure de la déformée notée sur le panneau est elle aussi différente de celles obtenues par les calculs. Les flèches au centre déterminées par les calculs sont supérieures de 10 à 25 % à celle relevée lors des essais. Les résultats du modèle non linéaire (grand déplacement) d'ADINA s'approchent un peu plus de ceux obtenus lors de l'essai dans la zone du raidisseur.

Une étude paramétrique a été réalisée en faisant varier le module de cisaillement de la mousse (ref 2) ; celle-ci fait apparaître que l'allure de la déformée ne change pas en diminuant de 33 à 15 MPa le module de la mousse, le déplacement au centre calculée évoluant de 21 à 32 mm.

Pour les déformations (fig. 6), des écarts très sensibles sont relevés entre le calcul et l'expérimentation, des différences de valeurs allant du simple au double sont très fréquentes. En outre, les valeurs obtenues par le modèle ABAQUS ne nous paraissent pas réalistes.

Panneau 2

Des écarts de l'ordre de 20% sont relevés entre les valeurs obtenues par calcul et celles notées lors de l'expérimentation. Dans ce cas, à la différence du panneau 1, les flèches notées au cours de l'essai sont généralement plus élevées que celles obtenues par les modélisations.

L'allure de la déformée du panneau dans sa partie centrale (cote $x=1000$) est visualisée (fig 7) où on note la bonne concordance entre les résultats de modélisation qui diffèrent toutefois sensiblement des résultats d'essai.

La modélisation ABAQUS donne des résultats assez différents des autres modélisation pour le déplacement, les déformations relevées n'étant pas, là non plus, réalistes.

CONCLUSION

Les résultats obtenus par les modélisations ne sont pas tous concordants, bien que les paramètres d'entrée soient identiques (conditions limites, propriétés des matériaux), et différent sensiblement des résultats obtenus lors de l'expérimentation. Les déflexions obtenues par calcul diffèrent de 20 à 30% des résultats d'essai. La corrélation essai-calcul sur les déformations reste très approximative et rend très délicate l'utilisation d'un critère (TSAI,) pour prévoir la rupture.

Un des paramètres qui pourrait permettre de mieux affiner les modèles serait d'intégrer le comportement non linéaire de la mousse, du matériau de peau.

Les structures étudiées semblent difficiles à modéliser en raison de la présence des raidisseurs et de la structure sandwich du panneau.

Une étude est en cours pour séparer les problèmes (raidisseur, structure sandwich), ainsi que pour déterminer l'influence respective des différents paramètres (propriétés des matériaux, conditions limites).

Remerciements

Nous remercions les personnes suivantes qui ont participé à la réalisation de l'étude : J. Royer, B. Pesseux (ECN), N. Sayhi, J. Peignet, H. Mallard (CETIM), C. Triay (BV), J. Croquette, L. Potin, H. Loaec, D. Petton (IFREMER).

Nous rappelons que cette étude est réalisée avec le support financier de la CEE, Programme BRITE COMAST.

Références

- 1 R.P. REICHARD, "The design of FRP Sandwich Panels for Ship and Boat Hulls", Proc. Sandwich Constructions 1, p. 349, 1989.
- 2 D. BEGIS, G. DUVAUT, A. HASSIM, "Homogénéisation par éléments finis des modules de comportements élastiques de matériaux composites", Rapport de Recherche INRIA, no. 101, 1981.
- 3 P. DAVIES, D. CHOQUEUSE, B. BIGOURDAN "Recent studies on Correlation between experimental results and Finite Element predictions at IFREMER" Charles Smith Memorial Conference, Dunfermline, July 13-14th 1992.
- 4 L.J. GIBSON and M.F. ASHBY "Cellular Solids" Pergamon Press, 1988.
- 5 K.A. OLSSON and A. LÖNNÖ, "Testing procedures for Foam Core Materials", Proceedings Sandwich constructions 1, editors K.A. Olsson and R.P. Reichard, p. 293, 1989.

TABLEAU 1
Propriétés des peaux obtenues par essais et par calculs

			essais mécaniques	ANASTRA microméca.	MODULEF homogénéis.
Ex	init moy	MPa MPa	15.51 11.28	14.11	13.84
vxy	init moy		0.31 0.33	0.31	0.34
Gxy	init	GPa	5.48	4.83	5.38

TABLEAU 2
Comparaison des différents modèles EF utilisés

	ADINA	SAMCEF	CASTOR	ABAQUS
surface maillée	1/4 du panneau	1/4 du panneau	1/4 du panneau	1/4 du panneau
type d'analyse	linéaire (L) et non-linéaire (NL)	linéaire	linéaire	linéaire
type d'élément				
nombre de noeuds par élément				
pour le stratifié	coque multicouche MITC à 8 noeuds	coque type 56 de SAMCEF	coque multicouche à 4 noeuds	coque multicouche à 8 noeuds
pour l'âme	solide à 20 noeuds	volumique type 8 de SAMCEF	solide à 8 noeuds	solide à 20 noeuds
nombre d'éléments				
pour les peaux				
panneau 1	228	420	400	272
panneau 2	196	420	400	272
pour les renforts				
panneau 1	84	40	60	48
panneau 2	92	76	92	93
pour l'âme				
panneau 1	(2*114) + 96	210 + 20	200 + 40	136 + 32
panneau 2	98 + 56	210 + 39	200 + 76	136 + 62

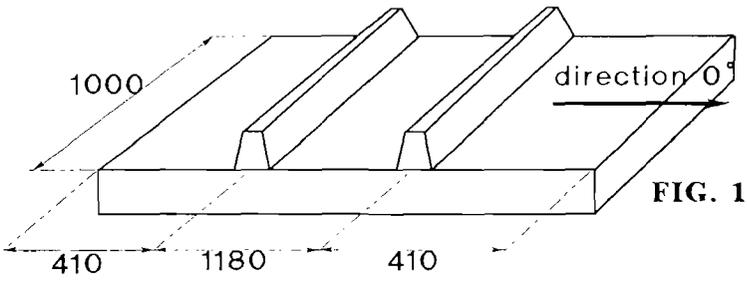
TABLEAU 3
 Résultats CACULS ESSAI panneau 1
 pour P = 0.1MPa

	PANNEAU 1				
	ADINA	SAMCEF	CASTOR	ABAQUS	ESSAI
Déplacements					
A (220/150)	2.95	-0.02	3.10	3.38	2.59
B (600/150)	7.91	9.98	8.00	8.62	9.95
C (1000/150)	21.69	24.09	22.00	31.01	21.07
D (220/500)	3.10	0.11	3.30	2.50	3.39
F (600/500)	7.63	9.66	7.80	7.12	10.59
G (800/500)	17.12	19.43	17.40	17.86	17.63
H (1000/500)	20.82	23.11	21.10	24.23	19.31
Déformations					
Cs ϵ_x	3276	3499	3190	24	2092
ϵ_x	-729	-824	-725	120	-397
γ_{xy}	123	55	43	-2200	113
Ds ϵ_x	-1001	-989	-985	99	-414
ϵ_x	68	124	81	158	10
γ_{xy}	18	3	0	-4300	-428
Ei ϵ_x	3455	3089	3020	283	1828
ϵ_x	-103	-20	-76	-378	41
γ_{xy}	-70	15	27	-2580	4
Gs ϵ_x	2115	2501	2040	169	1747
ϵ_x	-235	-327	-233	-483	-406
γ_{xy}	40	21	0	12700	106
Hi ϵ_x	-3243	-3308	-3130	-364	-1901
ϵ_x	354	454	426	203	1044
γ_{xy}	23	34	0	-4700	81
Hs ϵ_x	3068	3349	3020	376	1560
ϵ_x	-338	-413	-284	-230	837
γ_{xy}	22	-24	0	4410	41

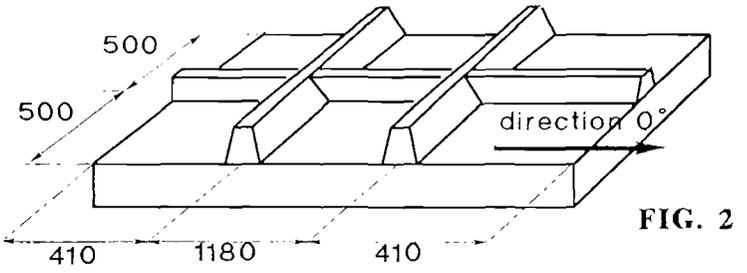
TABLEAU 4
 Résultats CACULS ESSAI panneau 1
 pour $P = 0.1 \text{ MPa}$

	PANNEAU 2				
	ADINA	SAMCEF	CAS'OR	ABAQUS	ESSAI
Déplacements					
A (220/150)	2.78	1.85	2.80	3.74	5.32
B (600/150)	5.23	5.84	5.80	5.23	8.87
C (1000/150)	13.78	14.35	15.00	15.67	15.45
D (220/500)	1.38		1.60	0.71	4.32
F (600/500)	3.30		4.15	2.18	7.38
G (800/500)	7.54	8.54	8.70	4.98	10.59
H (1000/500)	9.45	9.98	10.50	6.80	11.87
O (1000/300)	11.50	12.39	12.70		13.76
Déformations					
Cs Ex	1749	1861	1870	39	1162
Ex	-433	-497	473	169	-211
γ_{xy}	148	-88	21	-4930	-62
Ds Ex	-1957		-2055	-3	-1427
Ex	647		746	47	708
γ_{xy}	-428		-1060	-1120	97
Ei Ex	2247	1965	2150	233	1333
Ex	-395	-336	-439	-27	-100
γ_{xy}	60	-88	118	-1310	-5
Gs Ex	3489	4608	4075	27	3840
Ex	-865	-1416	-1230	634	-896
γ_{xy}	420	-1063	1060	503	-788
Hi Ex	-2342	-2171	-2330	-57	-1471
Ex	1799	1647	1630	170	1766
γ_{xy}	1	2	0	344	321
Hs Ex	5755	6385	6540	72	4498
Ex	-1251	-1976	-1090	-142	-1632
γ_{xy}	-196	-485	-113	-3010	22
Oi Ex	1089	1329	1210		681
Ey	-502	-516	-465		-275
γ_{xy}	-183	-155	0		23

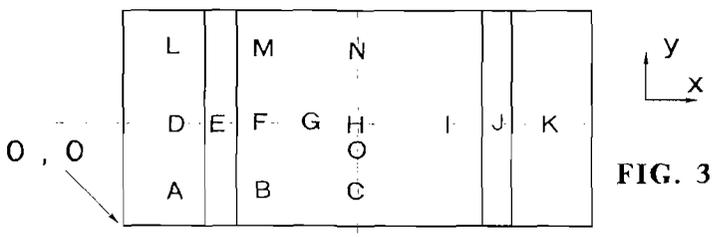
PANNEAU 1 / *PANEL 1*



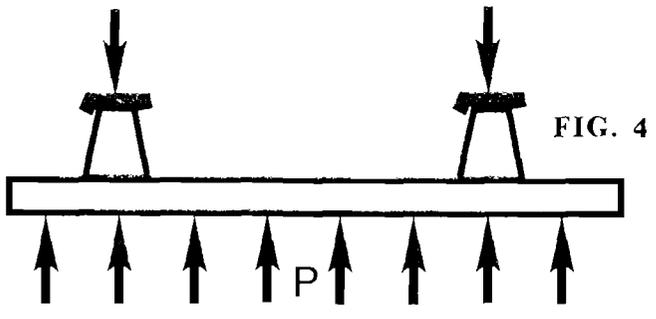
PANNEAU 2 / *PANEL 2*



INSTRUMENTATION DES PANNEAUX
PANEL INSTRUMENTATION



CHARGEMENT DES PANNEAUX
LOADING CONDITIONS



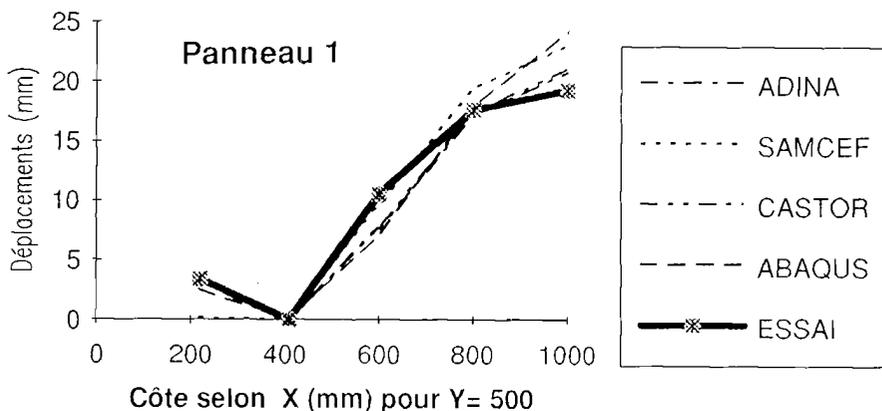


Figure 5. Déformée du panneau 1 mesurée et calculée
Predicted and measured shape of deformed panel 1

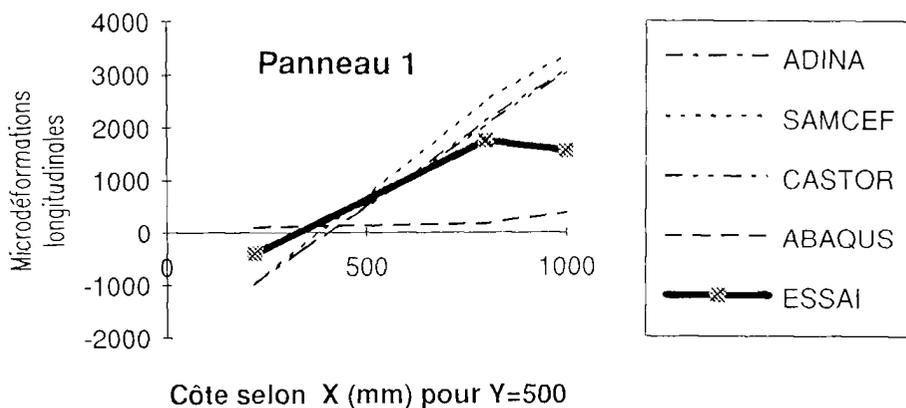


Figure 6. Déformations du panneau 1, mesurées et calculées.
Predicted and measured strains, Panel 1.

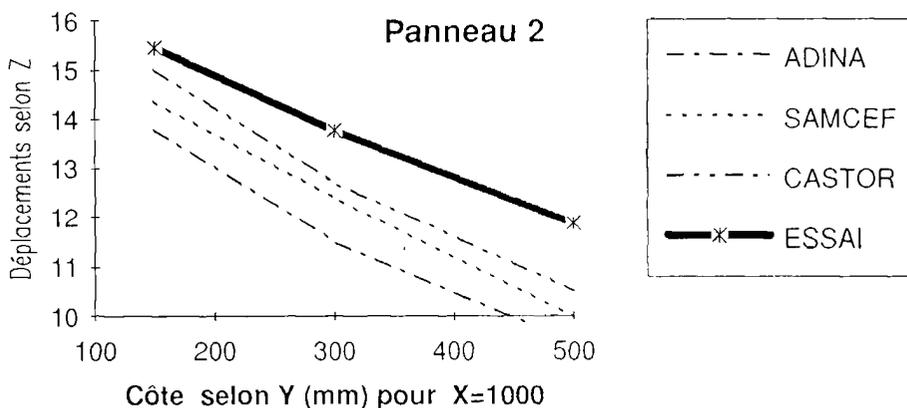


Figure 7. Déformée du panneau 2 mesurée et calculée
Predicted and measured shape of deformed panel 2