

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT JUSQU'A LA RUINE D'UN PANNEAU RAIDI EN COMPRESSION

Par

M. ARAAR

Docteur - Chercheur, Institut de Génie civil, Université de Annaba

J.F JULLIEN

Professeur, INSA de Lyon

Résumé

Cet article présente quelques résultats expérimentaux qui concernent le comportement d'un panneau raidi sollicité en compression, comportement suivi jusqu'à la ruine totale, atteinte après un passage par quelques états d'instabilité intermédiaire. Ces résultats, qui peuvent contribuer à la validation des codes de calcul, portent sur l'évolution de la géométrie du panneau, de ses déplacements, ses déformations et son état de contraintes en divers points. Ils montrent les différents états d'instabilité et les modes correspondants.

Mots clés : panneau raidi • compression axiale • flambage • mode de flambage • charge critique.

1 INTRODUCTION

Nombreux sont les problèmes délicats rencontrés en mécanique des structures et qui n'ont pas de solution simple et exacte, dont la connaissance peut permettre la réduction de la marge de sécurité, souvent adoptée pour compenser l'imparfaite maîtrise de certains comportements structurels. Ces problèmes font souvent appel à des méthodes approchées ou numériques, telle que la méthode des éléments finis.

Les solutions de tels problèmes, fournies par les méthodes analytiques ou numériques, restent parfois à vérifier. L'expérience est l'une des voies qui peut conduire à de tels vérifications.

Dans cette étude on présente quelques résultats expérimentaux sur le flambage d'un type de panneaux raidis longitudinalement et sollicité en compression.

Le raidissage étant l'une des solutions adoptées pour améliorer la capacité des structures et leur tenue au phénomène de flambage. Le comportement à ce phénomène des structures raidies a attiré l'attention de nombreux auteurs ([1], [2], et [3]). Son analyse fait intervenir la géométrie de la structure, le chargement, les conditions aux limites ainsi que les différentes imperfections. Elle doit tenir compte des différents types d'instabilité, résumés en ce qui suit dans le cas d'un panneau raidi :

- instabilité générale du panneau complet,
- flambage local de la peau entre raidisseurs,
- flambage local des raidisseurs,
- flambage local du composé peau-raisseur.

Un dimensionnement optimal s'obtient en cherchant l'état d'instabilité faisant intervenir ces modes instantanément.

Le panneau raidi a fait l'objet de nombreuses recherches ([4], [5]) qui ont traité quelques paramètres relatifs à son comportement, et qui ont suggéré l'importance du recours à l'expérience pour mieux analyser un tel comportement.

Les résultats expérimentaux présentés dans cet article rentrent dans ce cadre, et peuvent servir à la validation des codes de calcul, par éléments finis ou par des méthodes analytiques. Ces résultats donnent une image claire du comportement des panneaux raidis étudiés.

2 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Les principales informations recherchées sont :

- l'évolution de la géométrie du panneau jusqu'à la ruine,
- l'évolution des déformations de la peau,
- l'évolution des déformations des raidisseurs,
- les divers modes d'instabilité et leur niveaux de chargement.

2.1 Spécimen et conditions aux limites

Le spécimen se compose de deux panneaux plans de géométrie définie ci-dessous [6]. Les deux panneaux sont accolés dos à dos de façon que les raidisseurs soient à l'extérieur, afin de suivre visuellement leur comportement. Cet assemblage permet de rendre le spécimen symétrique en réunissant deux panneaux dissymétriques.

Ces panneaux sont des plaques rectangulaires de $500 \times 1000 \text{ mm}^2$, raidies en zone centrale par 5 raidisseurs espacés de 96 mm. L'épaisseur pleine peau en zone centrale est de 1.51 mm.

L'épaisseur des bords est de 2.3 mm. Les raidisseurs ont une épaisseur de 1.4 mm et une hauteur de 10.19 mm (Figure 1).

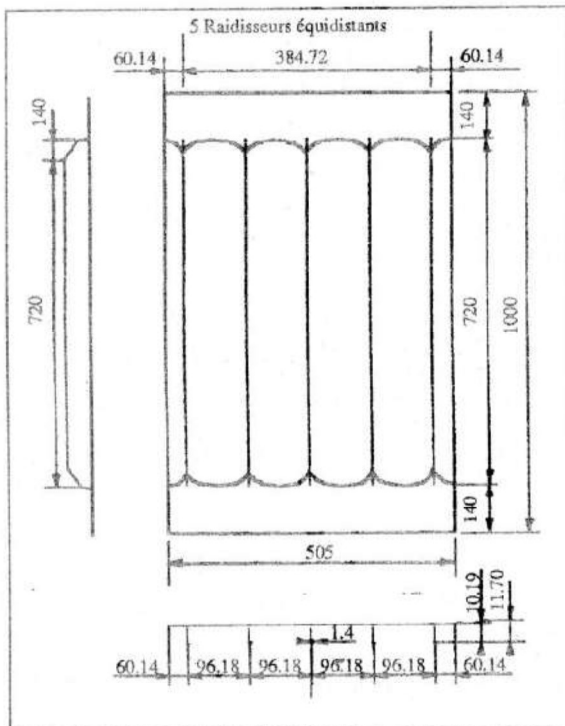


Figure 1 : Géométrie des panneaux testés.

Les conditions aux limites du spécimen (Figure 2) sont :

- un encastrement à chaque extrémité chargée, réalisé par un blocage entre brides et entretoises sur une hauteur de 70 mm,
- un appui simple pour les bords latéraux, obtenu par maintien des déplacements transversaux dans un guide en V.

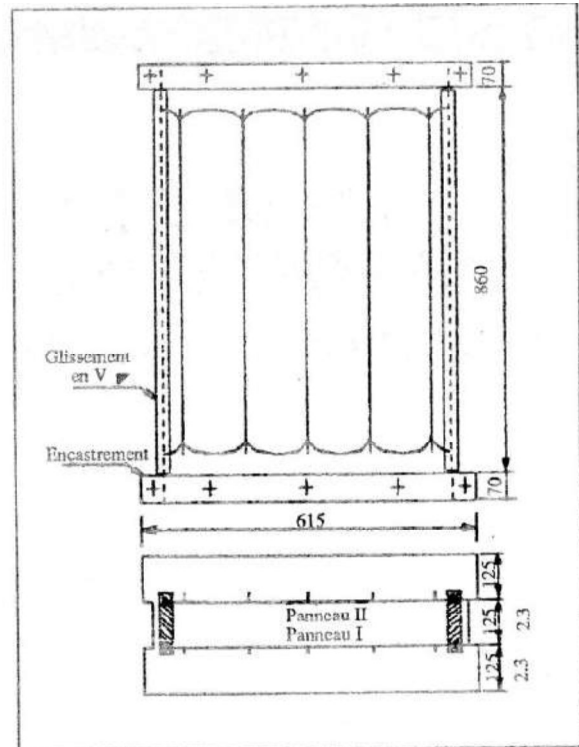


Figure 2 : Réalisation des conditions aux limites.

2.2 Chargement

Le chargement est appliqué uniformément sur le spécimen au moyen d'une compression centrée. Ce chargement est fourni par un servo-vérin de 200 KN, réglé en déplacement suivant des vitesses choisies, piloté automatiquement par microprocesseur pour permettre la visualisation des comportements recherchés. La vitesse de chargement est de quelques microns par minute. Une vue d'ensemble du dispositif est donnée sur la figure 3.



Figure 3 : Vue d'ensemble du dispositif d'essai.

2.3 Mesures

La marge appliquée est relevée par capteurs de force, de 0-100 ou 0-300 KN d'intensité, suivant le niveau de celle-ci.

Le déplacement axial est suivi en trois points, dont un dans l'axe du spécimen, au moyen de capteurs inductifs.

Les déplacements transversaux sont observés globalement sur un panneau (II), au moyen d'une méthode optique : le Moiré projeté donnant une information qualitative.

Cette observation quantitative est complétée par des mesures ponctuelles quantitatives (Figure 4), sur un panneau (I) en des points fixes au moyen de capteurs inductifs, et sur l'autre panneau (II) en balayant des portions de surface de la peau et des raidisseurs avec un capteur capacitif.

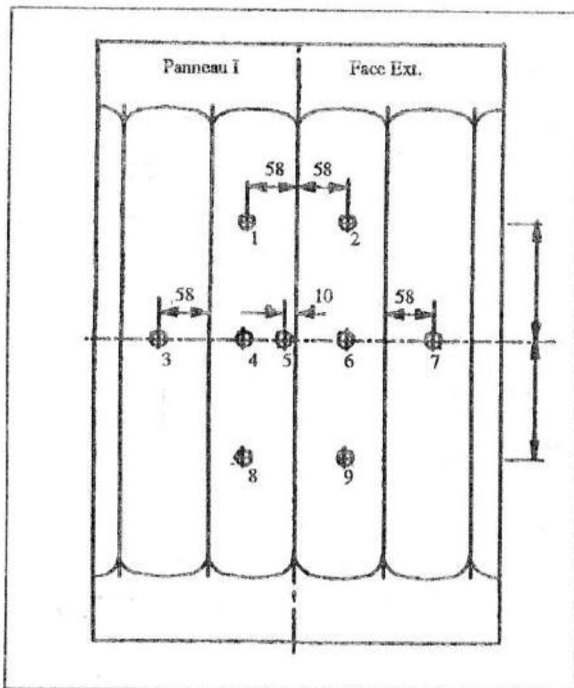


Figure 4 : Localisation des capteurs inductifs de déplacement transversal.

Les déformations sont relevées par jauges électriques unidirectionnelles ou tridirectionnelles (Figure 5), en implantant systématiquement deux jauges en vis-à-vis sur les deux faces de la peau ou du raidisseur. Ce qui permet de ressortir les quantités de membrane et de flexion.

L'ensemble des capteurs et des jauges est raccordé à trois centraux de mesure de 60 voies unitaires (Figure 3), reliés à deux micro-ordinateurs H.P. permettant l'acquisition et le traitement en temps réel de certains points de mesure représentatifs du contrôle et de la conduite de l'essai.

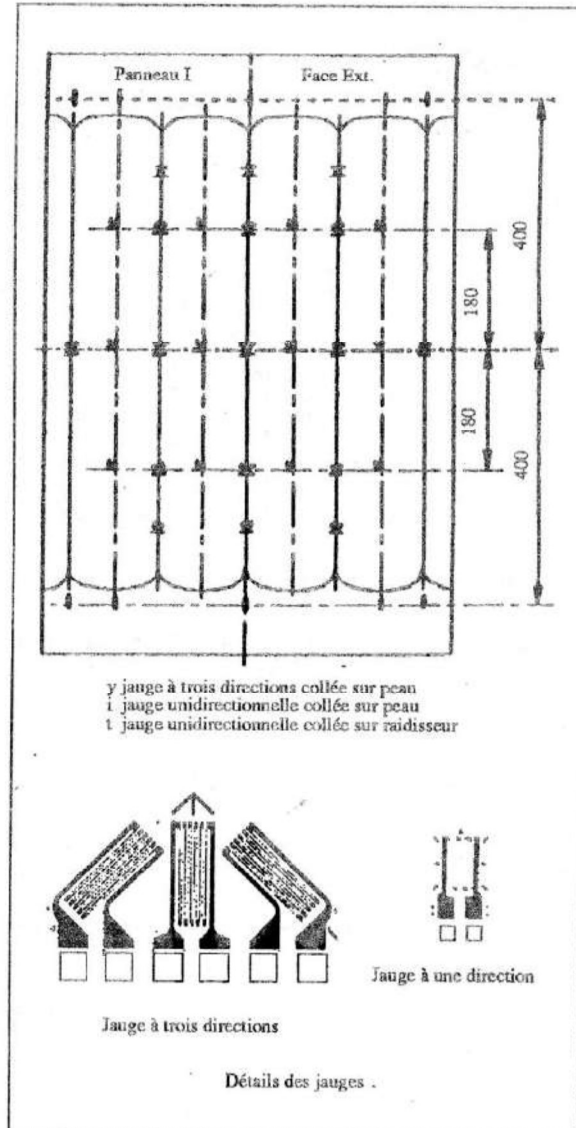


Figure 5 : Implantation des jauges électriques de déformations.

2.4 Procédure de mise en charge

Des calculs préliminaires ont indiqué une charge critique aux environs de 20 KN, associée à des écrasements de quelques centaines de microns. La gamme des capteurs et les vitesses de chargement ont été choisies en fonction de ces valeurs.

Pour permettre des mesures de la géométrie des panneaux, des arrêts de chargement sont pratiqués en six paliers constituant l'étape 1. Le réglage de la symétrie du chargement est obtenu par contrôle, sous une faible précharge, des déformations axiales sont relevées au niveau de l'encastrement.

L'étude du spécimen jusqu'à la ruine a nécessité de lui appliquer une deuxième étape de chargement. Le chemin de chargement suivi est indiqué sur la figure 6.

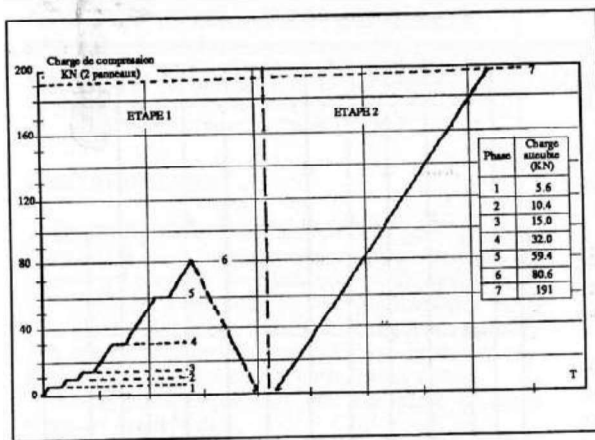


Figure 6 : Visualisation des différents paliers de mesures.

3 RESULTATS D'ESSAI

Pour mieux visualiser le comportement des panneaux testés, on a préféré la présentation graphique des résultats, basée sur les valeurs réelles relevées pendant l'essai.

3.1 Validation de la qualité du chargement

Les déformations relevées sur les bords ont permis d'observer une répartition symétrique transversalement, avec des sur-contraintes aux bords latéraux (Figure 7). Axialement, l'uniformité du comportement est observée sur la figure 8.

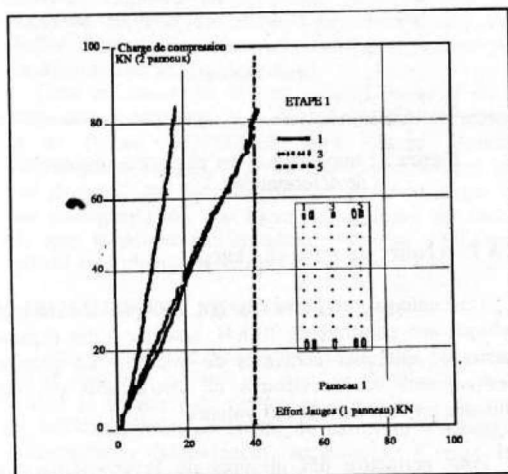


Figure 7 : Evolution de l'effort sur jauges.

3.2 Déplacements axiaux

La courbe charge-écrasement axial (Figure 9), montre un changement de rigidité, qui correspond à la mise en forme d'un mode longitudinal 1.

Dans le sens transversal, il est observé un demi-mode. Le changement de pente, associé au mode longitudinal 1, s'établit pour une charge de compression sur le spécimen environ 16 KN (début de la phase 4, 1ère étape).

La poursuite du chargement conduit sur la deuxième branche de la courbe, à l'établissement d'un mode longitudinal 2, tout en maintenant le mode transversal de 1.

Ce mode 2 apparaît sur les deux panneaux pour des niveaux de charge respectifs d'environ 160 KN, et 180 KN. Le passage du mode 1 au mode 2 a été progressif à partir de 125 KN environ.

En continuant à appliquer le chargement, on atteint un point limite à 190 KN, suivi d'une branche descendante et d'un effondrement du spécimen pour une charge de 170 KN.

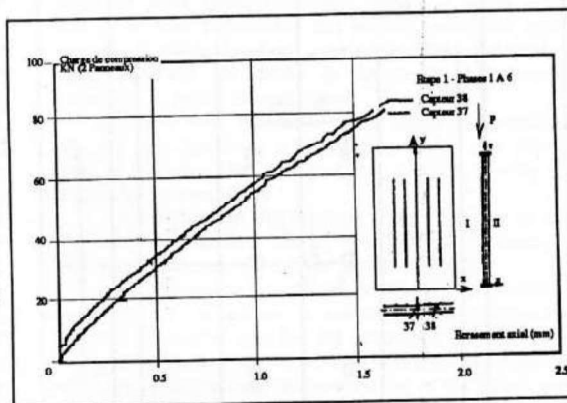


Figure 8 : Courbe charge - écrasement sur deux capteurs.

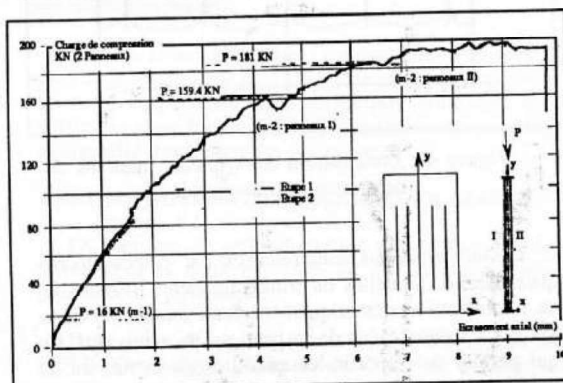


Figure 9 : Evolution du déplacement vertical.

3.3 Déplacements transversaux - géométrie pré-critique et post-critique de la peau

En considérant le premier panneau I, les indications sur les modes observés sont confirmées à partir des relevés des déplacements transversaux au cours du

chargement. Ces derniers sont tracés en fonction de la charge appliquée pour les deux étapes 1 et 2, sur les figures 10, 11 et 12.

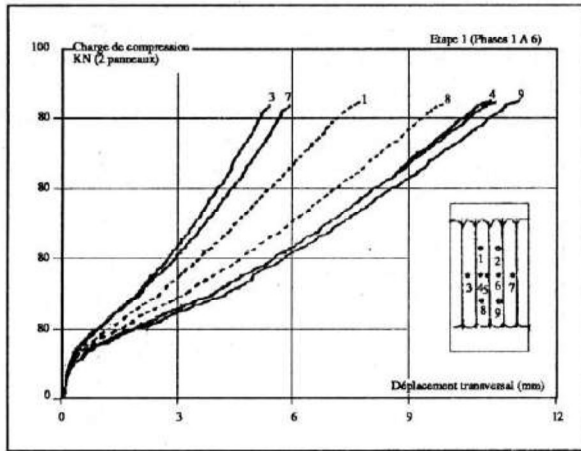


Figure 10 : Evolution du déplacement transversal.

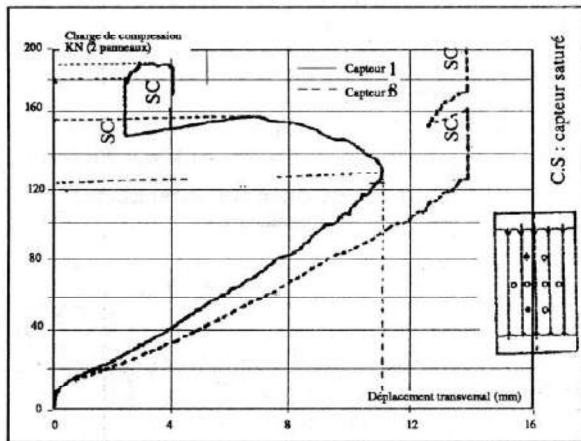


Figure 11 : Evolution du déplacement transversal.

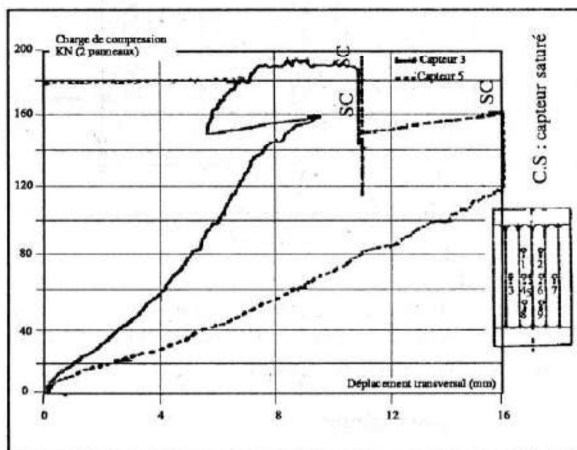


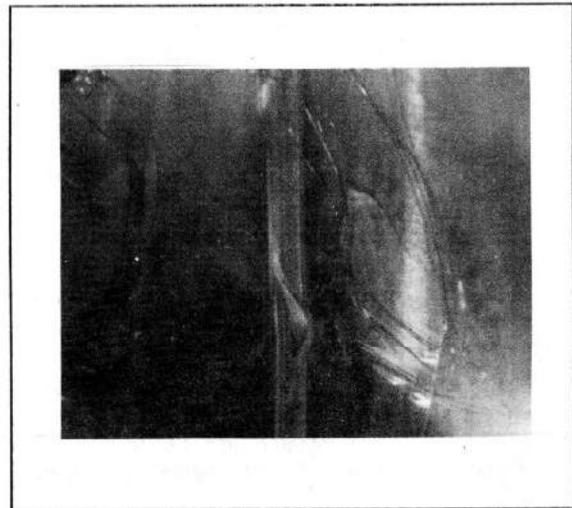
Figure 12 : Evolution du déplacement transversal.

La figure 11 traduit bien le passage du mode 1 au mode 2 à partir de la charge de 125 KN. Les tracés de l'étape 2 confirment également les niveaux des diffé-

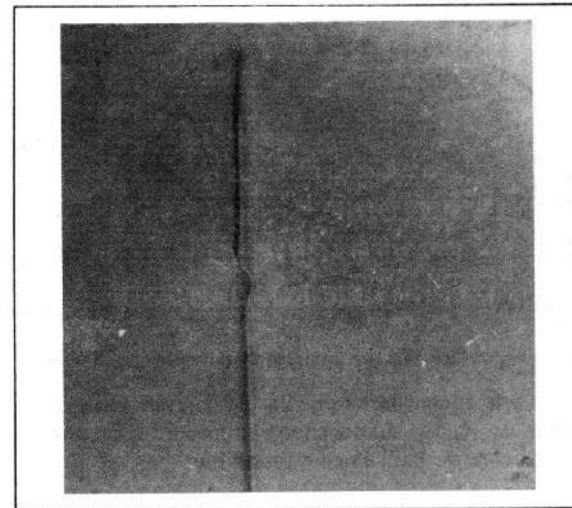
rentes instabilités. On note dans ce passage la saturation de quelques capteurs suite aux grands déplacements.

Pour le panneau II, on donne sur la figure 13 le Moiré de la géométrie pour quelques états de charge, qui visualise les modes fournis par les capteurs.

La géométrie relevée sur la face externe de ce panneau a permis de confirmer le mode de sa déformation.



a : mode 1 P = 70 KN



b : mode 2 P = 180 KN

Figure 13 : Visualisation des franges de Moiré pour quelques états de charge.

3.4 Déformation

3.4.1 Déformations de pleine peau

Les tracés des figures 14 et 15 donnent l'évolution

en fonction de la charge appliquée des déformations de la peau, mesurées sur quelques jauges, dans les directions longitudinale et transversale. Ces tracés corroborent les indications fournies par les capteurs axiaux et transversaux, à savoir :

- Changement de pente correspondant à une première instabilité à 16 KN (mode 1),
- Deuxième instabilité à 160 KN (mode 2, panneau I),
- Troisième instabilité à 180 KN (mode 2, panneau II),
- point limite correspondant à la charge maximale de 190 KN.

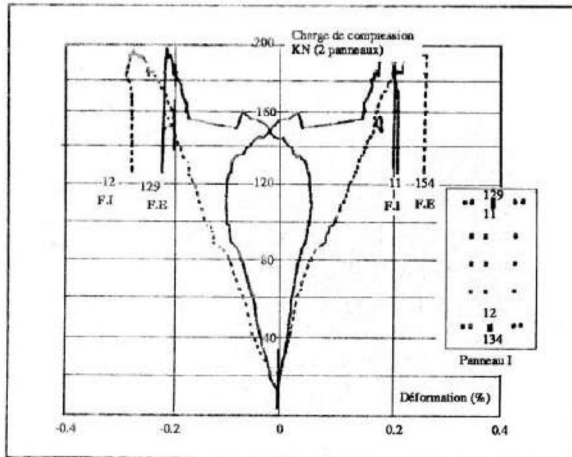


Figure 14 : Evolution des déformations de la peau.

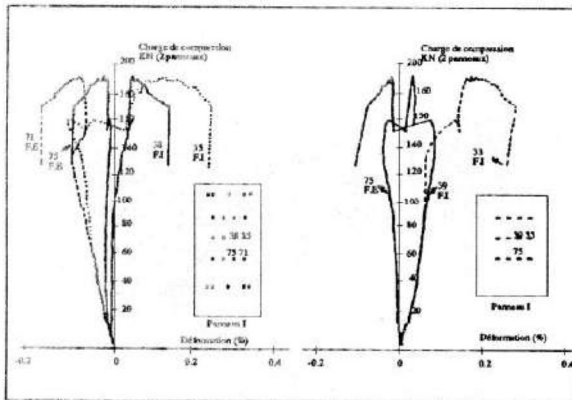


Figure 15 : Evolution des déformations de la peau.

La troisième instabilité est peu significative ; elle se situe à un niveau de charge plus élevé à cause de l'influence de la deuxième instabilité.

Ces tracés permettent aussi d'identifier la ruine du spécimen intervenant à 170 KN, après la branche descendante à partir du point limite.

Les déformations du premier panneau fournies par les jauges verticales des bords axiaux, et les jauges horizontales des bords transversaux, traduisent bien l'état des conditions aux limites. La figure 14 montre par exemple qu'au niveau des encastremets, l'état de déformation est essentiellement piloté par les effets de flexion.

3.4.2 Déformation des raidisseurs

Dans le domaine pré-critique et post-critique jusqu'à 120 KN, les raidisseurs sont le siège d'un état de membrane en compression. Au-delà de cette charge, certaines portions des raidisseurs sont soumises à la traction, compte tenu de la transformation du mode 1 en mode 2.

Les valeurs des déformations portées sur les figures 16 et 17 indiquent qu'à mi-hauteur des raidisseurs l'écoulement du matériau ne se produit qu'à l'atteinte du point limite.

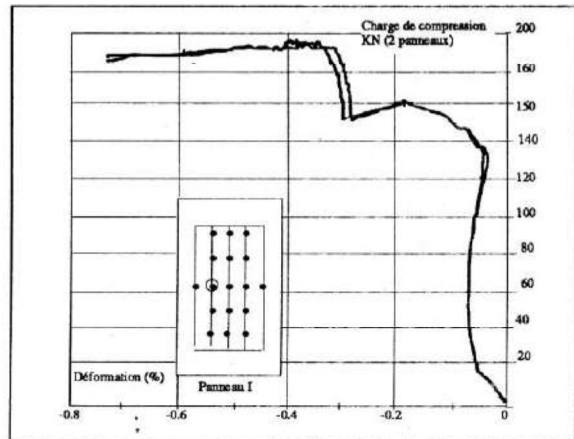


Figure 16 : Evolution des déformations des raidisseurs

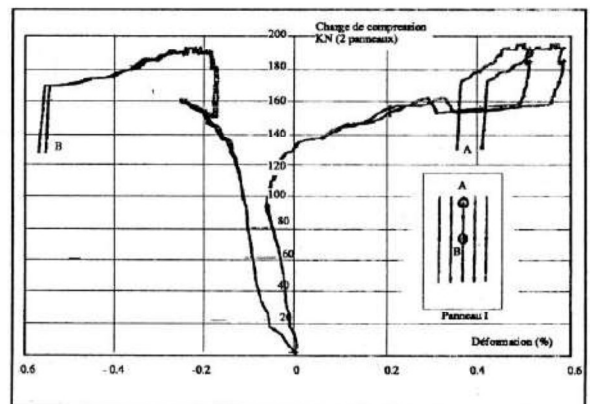
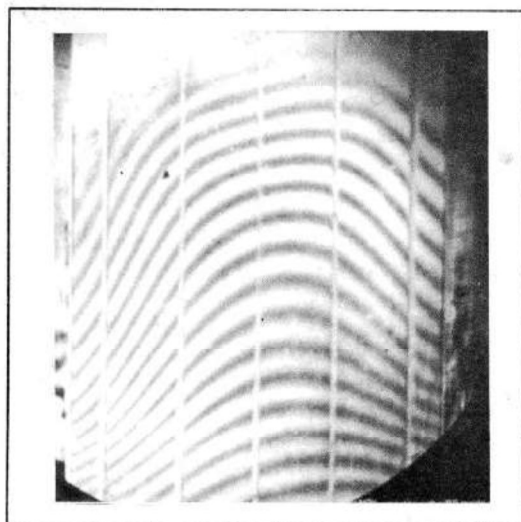


Figure 17 : Evolution des déformations de raidisseurs

Dans la branche descendante au-delà du point limite, les raidisseurs se plient localement (Figure 18) sur une longueur d'onde très courte.

3.5 Etat de contraintes

L'état de contraintes est déterminé à partir des déformations mesurées par les jauges tridirectionnelles. Le dépouillement de celles-ci nous fournit les contraintes principales pour chaque niveau de charge, en différents points de la structure.



Panneau I



Panneau II

Figure 18 : Illustration des plis des raidisseurs.

Ceci permet de calculer les contraintes équivalentes de Von Mises en ces points. Ces contraintes sont comparées à la limite élastique du matériau du spécimen afin de contrôler l'éventuelle atteinte de plasticité.

Elles sont tracées pour quelques points sur les figures 19. La caractérisation du matériau est donnée par la courbe de traction de la figure 20.

On peut bien remarquer que la contrainte équivalente reste inférieure à la limite élastique jusqu'au chargement maximal atteint. Ce qui indique que les zones concernées n'ont subi aucune plastification associée aux grands déplacements. Ceci peut être aussi confirmé à partir des tracés de déformations précédemment présentées. Dans la zone des bords axiaux les déformations atteignent localement des valeurs se trouvant sur le plateau d'écoulement.

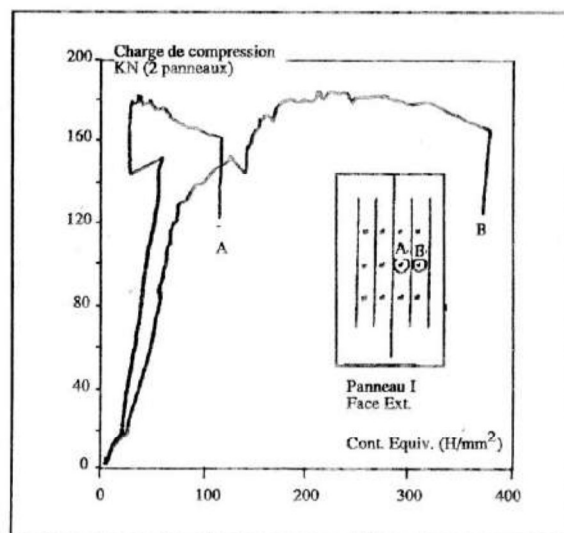


Figure 19 : Evolution des contraintes de Von Mises.

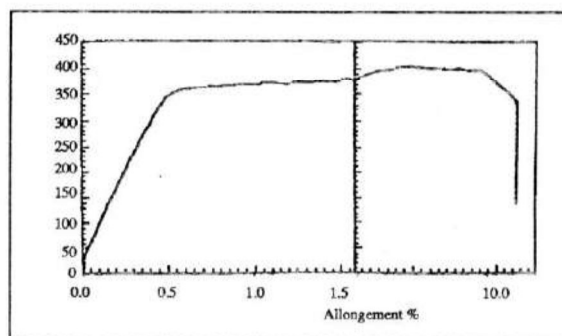


Figure 20 : Courbe de traction du matériau du spécimen.

4 CONCLUSION

Des résultats présentés ci-dessus, il peut être tiré :

- 1- la qualification des logiciels numériques et des méthodes de calcul élastique pour la recherche de l'instabilité.
- 2- la qualification des logiciels numériques pouvant traiter les problèmes à non linéarité géométrique et matérielle pour la recherche de la ruine.

Ces résultats ont montré que :

Les deux panneaux ont flambé suivant le mode 1 pour une charge de 16 KN en petits déplacements.

Un flambage secondaire en mode 2 en grands déplacements est observé sur la branche post-critique à rigidité continuellement variable pour une charge de 160 KN et 180 KN suivant le panneau. La ruine complète du spécimen intervient à 190 KN.

Aucun flambage local de pleine peau et des raidisseurs n'a été observé jusqu'à l'apparition du mode 2.

Le comportement global fait apparaître 3 rigidités :

une rigidité initiale jusqu'à 16 KN, une rigidité continuellement décroissante jusqu'à 180 KN, et une rigidité nulle à 190 KN.

Les raidisseurs donnant une dissymétrie au panneau pilotent le flambage sur le mode 1. La géométrie choisie des panneaux a favorisé le mode 2.

La plastification n'est pas globalement atteinte à la ruine.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Araar, J.F. Jullien : "Coques raidies-Analyses bibliographique"s. Rapport de synthèse, Air Liquide - INSA de Lyon, 26p. Juin 90.
- [2] D.M. Blacketter, A.P. Borelli : "A study of the stability of longitudinally ribbed rectangular pla-

tes. *Mech. Struct & Mach*, vol 17 N°4, pp 459-472, 1989.

- [3] M. Mukhopadhyay, A. Mukherjee : "Finite element buckling analysis of stiffened plates. *J. of Computers and structures*". Vol. 34, n°6, pp. 795-803. 1990.
- [4] L.I. Weiji : "Optimisation of stiffened panels under compression". *Journal of strain analysis*, Vol 21, N°3, PP 153-158, 1986.
- [5] V. Tvergaard : "Imperfection-sensitivity of a wide integrally stiffened panel under compression". *Int. J. of Solids Structures*, Vol 9, pp. 177-192, 1973.
- [6] M. Araar, J.F. Jullien, H. Richard : "Comportement d'un panneau raidi sous compression axiale". Rapport préliminaire, INSA de Lyon, 43p. avril 1990.

Réunions Scientifiques

- **Congrès Mondial 1997 - Emulsion**
Bordeaux - France 23 - 26 Septembre 1997
- ✓ Formulation et fabrication des émulsions.
 - ✓ Caractérisation, stabilité à long terme, Rhéologie.
 - ✓ Comportement de l'émulsion lors de l'utilisation
 - ✓ Applications dans les domaines industriels.

Information : CME 50 Place Marcel-Pagnol
92100 Boulogne-Billancourt France
Tél : (33-1) 47-61-76-89
Fax : (33-1) 47-61-74-65

- **Premier congrès maghrebin de génie civil**
Constantine

Information : Secrétariat du CMGC 97 - Institut de Génie Civil Université de Constantine Route de Aïn El Bey 25000 Constantine.
16, 17 - 18 Mars 1997
Tél : (04) 69-06-50

Fax : (04) 69-12-99 / (04) 69-60-81

- **Séminaire "Etat de l'art et perspectives en prévention sismique"** pour la commémoration du Bicentenaire du séisme du 09 Octobre 1790 d'Oran.

CRAAG - Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique.
Université des sciences et de la technologie
Institut de génie civil Oran 27, 28 - 29 Avril
1997 Oran

Information : Secrétariat du séminaire USTO - IGC/CRAAG BP 1505 El Mnouar 3100 Oran
Algérie

Tél : (06) 34-19-63

Fax (06) 34-19-63

ou

Secrétariat du séminaire USTO - IGC/CRAAG
BP 63 Bouzaréah 16340 Alger Algérie

Tél : (02) 94-11-18

Fax (02) 94-11-57 / (02) 94-11-18