

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE
U.F.R. DE MATHÉMATIQUES

THESE

Pour obtenir le titre de
Docteur de l'université de Lille I
Discipline : Mécanique
Présentée et soutenue publiquement
Par

Cathy DEPREEUW-GOGNAU

Le 10 octobre 2000.

Titre :

**« Détermination analytique et numérique des contraintes
dues aux efforts transmis par une tubulure à une virole cylindrique :
application au dimensionnement des appareils à pression. »**

Jury composé de :

Président : M. Moussa NAIT ABDELAZIZ, Professeur, EUDIL
Rapporteurs : Mme Geneviève INGLEBERT, Professeur, ISMCM Saint-Ouen
M. Guy GUERLEMENT, Professeur, Faculté Polytechnique de Mons
Examineurs : M. Rainier GAUMY, Ingénieur, DRIRE Nord
M. Saïd HARIRI, HDR, Ecole des Mines de Douai
Melle Claude ROBIN, Professeur, Ecole des Mines de Douai
Melle Rachel VAUCHER, Docteur, Ecole des Mines de Douai

RESUME

Les appareils à pression sont constitués d'enceintes fermées reliées par des réseaux de tubulures. Ces tubulures doivent être prises en compte dans tout dimensionnement, pour les discontinuités géométriques qu'elles génèrent ainsi que pour les efforts qu'elles transmettent.

Notre étude porte sur les jonctions entre une tubulure et une virole cylindriques d'axes orthogonaux. Nous déterminons les contraintes dans la virole dues aux efforts transmis par la tubulure (effort normal, moment longitudinal et moment circonférentiel). Les paramètres retenus sont le rapport entre l'épaisseur de la virole et son diamètre ainsi que le rapport des rayons de la tubulure et de la virole.

Nous réalisons, dans un premier temps une étude analytique en développant la solution en double série de Fourier. Nous tirons de cette étude l'évolution de la contrainte maximale atteinte dans la structure en fonction des paramètres précédemment cités en vue d'un dimensionnement optimal. Nos résultats sont comparés à ceux disponibles dans la littérature. Puis nous donnons pour un couple de paramètres fixés la répartition des contraintes dans la structure.

Dans un deuxième temps, nous réalisons une étude numérique afin de valider la précédente. Nous réalisons une modélisation tridimensionnelle par éléments finis en tenant compte des symétries géométriques de la structure et de chacun des chargements. Nous réalisons le même type de dépouillement des résultats que pour la partie analytique. Les résultats sont comparés entre eux, et le modèle analytique est validé.

TITLE

« Analytical and numerical determination of stresses due to external loading transmitted from piping to a cylindrical shell: application to pressure vessel design. »

ABSTRACT

In industrial plants, pressure vessels are often joined to pipes by nozzles. Nozzles have to be considered in pressure vessel design for two main reasons. The first one is that the junction between the vessel and the nozzle is a geometrical singularity inducing stress concentrations. The second one is that the nozzles transmit efforts and moments from the pipes to the vessels, which can produce a stress increase at the junction.

Our study deals with a cylindrical nozzle normally intersecting a cylindrical shell. We determine stresses at the junction due to radial loading, longitudinal and circumferential moments. The chosen parameters are ratio between the thickness and the diameter of the vessel and diameters of nozzle and vessel ratio.

At first, a solution using a development with double Fourier series is found. The maximal stress is given as a function of the study parameters. Results are compared to the literature ones, more particularly to the experimental ones. For a given couple of parameters, the stress repartition around the junction is described.

Secondly, in order to validate the analytical solution, the problem is studied numerically. The model is a three-dimensional finite element one using geometry and loading symmetry. The same type of results as analytically are examined. By comparing these results, our analytical modelling is proven to be a good and quick means for designing pressure vessels with nozzles.

MOTS-CLES

Appareil à pression – Dimensionnement - Eléments finis - Jonction de coques – Modèle analytique – Piquage - Singularités géométriques.

Sommaire

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CHAPITRE I NOTIONS PRÉLIMINAIRES ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE

I.1 Notions de géométrie des surfaces

- I.1.1 Première forme quadratique de la surface
- I.1.2 Deuxième forme quadratique de la surface
- I.1.3 Dérivées des vecteurs de base
- I.1.4 Dérivées covariantes

I.2 Notions de théorie des coques

- I.2.1 Hypothèses générales des coques minces
- I.2.2 Hypothèses cinématiques
 - I.2.2.1 Théorie de la membrane
 - I.2.2.2 Théories du 1^{er} ordre
 - I.2.2.3 Théories du 3^{ème} ordre
- I.2.3 Champ de déformation
- I.2.4 Equilibre d'une coque
 - I.2.4.1 Eléments de réduction des contraintes
 - I.2.4.2 Les équations d'équilibre
 - I.2.4.2.1 Equilibre des forces
 - I.2.4.2.2 Equilibre des moments
 - I.2.4.3 Analyse élastique

- I.2.5 Application aux coques cylindriques
 - I.2.5.1 Equations d'équilibre
 - I.2.5.2 Déformations d'une coque cylindrique
 - I.2.5.3 Analyse élastique
 - I.2.5.4 Recherche de solution pour les coques axisymétriques
 - I.2.5.4.1 Solution membranaire
 - I.2.5.4.2 Solutions de flexion

I.3 Problème de jonction

I.4 Contexte de l'étude

CHAPITRE II LES MÉTHODES D'ANALYSE

II.1 Méthodes analytiques

- II.1.1 Méthode Bijlaard
 - II.1.1.1 Approche utilisée
 - II.1.1.2 Formulation du problème
 - II.1.1.3 Résolution
 - II.1.1.4 Solution du problème pour les différents cas de chargement
 - II.1.1.4.1 Effort normal, N
 - II.1.1.4.2 Moment longitudinal, M_L
 - II.1.1.4.3 Moment circonférentiel, M_C
- II.1.2 Méthode d'Eringen
 - II.1.2.1 Approche du problème par Eringen
 - II.1.2.2 Systèmes de coordonnées et notations
 - II.1.2.3 La solution de membrane
 - II.1.2.3.1 Solution de membrane sur la tubulure fermée
 - II.1.2.3.2 Solution de membrane pour la virole
 - II.1.2.4 Flexion aux bords
 - II.1.2.4.1 Flexion aux bords de la tubulure
 - II.1.2.4.2 Flexion au niveau de la virole
 - II.1.2.5 Conditions de jonction des deux coques
 - II.1.2.5.1 Continuité des déplacements
 - II.1.2.5.2 Continuité de la rotation de la normale
 - II.1.2.5.3 Equilibre des forces au niveau de la jonction
 - II.1.2.6 Recherche de solutions

II.2 Méthodes numériques

II.2.1 Méthode des Eléments Finis appliquée à l'élasticité

II.2.1.1 Position du problème

II.2.1.2 Les équations du problème en élasticité linéaire

II.2.1.3 Formulation variationnelle

II.2.1.4 Discrétisation

II.2.2 Modèle éléments finis associé à notre étude

II.2.2.1 Modèle nécessitant le quart de la structure

II.2.2.1.1 Etude de l'effort normal N

II.2.2.2 Modèles nécessitant la moitié de la structure

II.2.2.2.1 Etude du moment longitudinal M_L

II.2.2.2.2 Etude du moment circonférentiel M_C

II.3 Méthodes expérimentales

CHAPITRE III APPLICATIONS ANALYTIQUES

III.1 Contraintes maximales

III.1.1 Influence de l'effort normal, N

III.1.1.1 Efforts normaux associés à N

III.1.1.2 Moments de flexion associés à N

III.1.1.3 Composantes du tenseur des contraintes associées à N

III.1.1.4 Comparaison des résultats pour un effort N avec ceux de la littérature

III.1.1.4.1 Rapport $H/D = 1/20$

III.1.1.4.2 Rapport $H/D = 1/50$

III.1.1.4.3 Rapport $H/D = 1/125$

III.1.1.5 Conclusion partielle

III.1.2 Influence du moment longitudinal, M_L

III.1.2.1 Efforts normaux dus à M_L

III.1.2.2 Moments de flexion dus à M_L

III.1.2.3 Composantes du tenseur des contraintes associé à M_L

III.1.2.4 Comparaison des résultats obtenus pour M_L avec la littérature

III.1.2.4.1 Rapport $H/D = 1/20$

III.1.2.4.2 Rapport $H/D = 1/50$

III.1.2.4.3 Rapport $H/D = 1/125$

III.1.2.5 Conclusion partielle

III.1.3 Influence du moment circonférentiel, M_C

III.1.3.1 Effort normaux dus à M_C

III.1.3.2 Moments de flexion dus à M_C

III.1.3.3 Composantes du tenseur des contraintes associé à M_C

III.1.3.4 Comparaison des résultats obtenus pour M_C avec ceux de la littérature

III.1.3.4.1 Rapport $H/D = 1/20$

III.1.3.4.2 Rapport $H/D = 1/50$

III.1.3.4.3 Rapport $H/D = 1/125$

III.1.3.5 Conclusion partielle

III.2 Répartition des contraintes

III.2.1 Efforts normaux

III.2.1.1 Evolution des contraintes circonférentielles en fonction de x

III.2.1.2 Evolution des contraintes circonférentielles en fonction de θ

III.2.2 Moment longitudinal

III.2.3 Moment circonférentiel

III.3 Conclusion

CHAPITRE IV VALIDATION NUMÉRIQUE

IV.1 Résultats numériques

IV.1.1 Effort normal N

IV.1.1.1 Présentation du modèle

IV.1.1.2 Résultats

IV.1.2 Moment longitudinal M_L

IV.1.2.1 Présentation du modèle

IV.1.2.2 Résultats

IV.1.3 Moment circonférentiel M_C

IV.1.3.1 Présentation du modèle

IV.1.3.2 Résultats

IV.1.4 Conclusion partielle

IV.2 Comparaison des différents modèles

IV.2.1 Effort Normal N

IV.2.2 Moment longitudinal M_L

IV.2.3 Moment circonférentiel M_C

IV.3 Conclusion

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXE I WRC 107

ANNEXE II RÉSULTATS ANALYTIQUES

ANNEXE III RÉSULTATS NUMÉRIQUES

Références bibliographiques

- [ADM95] AD-MERKBLATER
Technical Rules For Pressure Vessels.
English Edition, Carl Heymanns Verlag. Köln. Germain, 1995.
- [ASM98] A.S.M.E.
Boiler and Pressure Vessel Code
American Society of Mechanical Engineers, New-York, 1998.
- [BAT90] BATOZ J.L., DATT G.
Modélisation des structures par éléments finis.
Volume 1- Solides élastiques.
Paris : Hermès, 1990.
- [BAT92] BATOZ J.L., DATT G.
Modélisation des structures par éléments finis.
Volume 3 – Coques.
Paris : Hermès, 1990.
- [BER94] BERNADOU M.
Méthodes d'éléments finis pour les problèmes de coques minces.
Paris : Masson, 1994. –361 p.
- [BIJ54] BIJLAARD P.P.
Stresses from radial loads in cylindrical pressure vessels.
The welding journal, 1954, 33(12), Reseach supplement, p. 615s-635s.
- [BIJ55a] BIJLAARD P.P.
Stresses from local loading in cylindrical pressure vessels.
Transaction ASME77, 1955, N° 6, p. 805-816.
- [BIJ55b] BIJLAARD P.P.
Stresses from radial loads and external moments in cylindrical pressure vessels.
The welding journal, 1955, 34(12), Reseach supplement, p. 608s-617s.
- [BS82] BS 5500
Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels.
British Standard Institution, 1982.
- [COD95] CODAP
Code Français de Construction des Appareils à Pression (non soumis à la flamme).
Syndicat National de la Chaudronnerie, de la Tôlerie et de la Tuyauterie Industrielle,
Paris, 1995.
- [CUB94] CUBIER A.
Analyse et simulation numériques de jonction de coques minces. – 209 p.
Thèse : Mathématiques appliquées : Paris VI : 1994.
- [DEC78a] DECOCK J.
External loadings on nozzles in cylindrical shells. – 1st Progress Report.
CRIF MT 122, March 1978.

-
- [DEC78b] DECOCK J.
External loadings on nozzles in cylindrical shells. – 2nd Progress Report.
CRIF MT 128, December 1978.
- [DEC79] DECOCK J.
External loadings on nozzles in cylindrical shells. – 3rd Progress Report.
CRIF MT 132, June 1979.
- [DEC82] DECOCK J.
External loadings on nozzles in cylindrical shells. – 4th Progress Report.
CRIF MT 146, April 1982.
- [DEC83a] DECOCK J.
External loadings on nozzles in cylindrical shells. – 5th Progress Report.
CRIF MT 155, May 1983.
- [DEC83b] DECOCK J.
Stresses in cylindrical shells with nozzles submitted to internal loadings and external pressure.
WTCM MT 156, August 1983, 50 p.
- [DES90] DESTUYNDER P.
Modélisation des coques minces élastiques.
Collection physique fondamentale et appliquée, Masson, 1990.
- [ERI65a] ERINGEN A.C., NAGHDI A.K., THIEL C.C.
State of stress in a Circular Cylindrical Shell with a Circular Hole.
Welding Research Council Bulletin, 1965, N° 102, p. 1-21.
- [ERI65b] ERINGEN A.C., SUHURI E.S.
Stress Distribution at two normally intersecting cylindrical shells.
Nuclear structural engineering, 1965, 2, p. 253-270.
- [ERI69] ERINGEN A.C., NAGHDI A.K., MAHMOOD S.S. et al.
Stress concentrations in two normally intersecting cylindrical shells subject to internal pressure.
Welding Research Council, 1969, N° 139, p. 1-34.
- [GIL70] GILL S.S.
The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Components.
Oxford : Pergamon press, 1970. – 592 p.
- [GOG99a] GOGNAU-DEPREEUW C., HARIRI S., VAUCHER R., ROBIN C.
Jonction coque-tubulure : application au dimensionnement des appareils à pression.
14^{ème} Congrès Français de Mécanique, Association Universitaire de Mécanique,
Association Française de Mécanique, Thème 17, 30 août – 3 septembre 1999, Toulouse.
- [GOG99b] GOGNAU-DEPREEUW C., HARIRI S., VAUCHER R.
Jonction coque-tubulure : Recherche et validation de solutions en vue d'applications aux appareils à pression.
4^{ème} Congrès de Mécanique, Société Marocaine des Sciences Mécaniques,
session B4, 13 – 16 avril 1999, Mohammadia - Maroc.
-

-
- [GOL61] GOL'DENVEISER A.L.
Theory of elastic thin shells
Pergamon Press, 1961.
- [GRE54] GREEN A.E., ZERNA W.
Theoretical Elasticity. – 2nd Edition.
Oxford : Clarendon Press, 1968. – 457 p.
- [HAM96] HAMITOUCHE Y.
Sur l'analyse et la recherche des solutions analytiques au niveau du raccordement du
coques axisymétriques.- 153 p.
Thèse : Mécanique : Lille I : 1996.
- [HAN69] HANSBERRY J.W., JONES N.,
A theoretical study of elastic behavior of two normally intersecting cylindrical shells.
Journal of Engineering for Industry, August 1969, p. 563-572.
- [IMB84] IMBERT J.F.
Analyse des structures par éléments finis.
Editions Cépadues, 1984.
- [KOV96] KOVES W.J., NAIR S.
A finite element for the analysis of shell intersections.
Journal of Pressure Vessels Technology, 1996, Vol. 118, p. 399-406.
- [LEK72] LEKKERKERKER J.G.
Stresses distribution at two normally intersecting cylindrical shells.
Nuclear Engineering and Design, 1972, 20, p. 57-84.
- [LOV44] LOVE A.E.H.
A treatise on the mathematical theory of elasticity.
Dovar Publication, 4th Ed., New-York, 1944.
- [MER87] MERSHON J.L., MOKHTARIAN K., RANJAN G.V. et al.
Local Stresses in Cylindrical Shells Due to External Loadings on Nozzles – Supplement
to WRC Bulletin No. 107.
Revised WRC Bulletin No. 297, September 1987, 88 p.
- [MOK91] MOKHTARIAN K., ENDICOTT J.S.
Stresses in intersecting cylinders subjected to pressure
WRC Bulletin 368, 1991, p. 1-32.
- [NAD93] NADARAJAH C.
A design study of nozzles and attachments in pressure vessels – 398 p.
Ph. D Thesis, University of Strathclyde : Glasgow : 1993.
- [NAD96a] NADARAJAH C., MACKENZIE D., BOYLE J.T.
Limit and shakedown analysis of nozzles / cylinder intersections under internal pressure
and in-plane moment loading.
Internal Journal Pressure and Piping, 1996, 68, p. 261-272.
-

-
- [NAD96b] NADARAJAH C., TOOTH A.S., SPENCE J.
The radial loading of cylindrical vessels – influence of attachments rigidity.
Internal Journal Pressure and Piping, 1996, 67, p. 65-79.
- [NAD96c] NADARAJAH C., TOOTH A.S., SPENCE J.
The radial loading of cylindrical vessels – influence of large displacement.
Internal Journal Pressure and Piping, 1996, 67, p. 81-94.
- [NOV64] NOVOZHILOV N.V.
Thin Shell Theory.
Noordhoff, 1964. – 372 p.
- [ONG96] ONG L.S., JOHN CHEUNG S.T., TOOTH A.S.
Cylindrical shell subject to local loads applied on arbitrarily shaped area.
International Journal of Solids Structures, Vol. 33, 1996, N° 10, p.1375-1386.
- [RED85] REDDY J.N., LIU F.C.
A higher order shear deformation theory of laminated elastic shells.
International Journal of Engineering and Science, Vol. 23, 1985, p. 319-330.
- [RED87] REDDY J.N.
A small strain and moderate rotation theory of laminated anisotropic plates.
ASME International Journal of Applied Mechanics, Vol. 54, 1987, p. 623-626.
- [REI45] REISSNER E.
The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates.
International Journal of Applied Mechanics, 1945, p. 69-77
- [REI66] REISSNER E.
On the foundations of the theory of elastic shells.
Int. Proc. 11th International Congress on Applied Mechanics, Munich 1964,
Edt H. Gortler, Berlin, 1966, p. 20-30.
- [REI75] REISSNER E.
On the transverse bending of plates including the effect of transverse shear deformation.
International Journal of Solids Structures, Vol. 11, 1975, N° 5, p. 569-573.
- [SAN70] SANDERS J.L. Jr., SIMMONDS J.G.
Concentrated forces on shallow cylindrical shells.
ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 37, 1970, p. 367-373.
- [SCH61] SCHARTZ L.
Fonctions de Bessel.
In : Méthodes mathématiques pour les sciences physiques.
Paris : Hermann, 1961, p. 368-392.
- [STE81] STEELE C.R., STEELE M.L.
Reinforced openings in large steel pressure vessels : effect of nozzle wall thickness.
Shelltech report 81-5, 1981.
- [STE83] STEELE C.R., STEELE M.L.
Stresses Analysis of Nozzles in Cylindrical Vessels with External Load.
-

-
- Journal of Pressure Vessels and Technologie Transaction ASME 105, August 1983, p. 191-200.
- [STE86] STEELE C.R., STEELE M.L., KATHLAN A.
An efficient computational approach for a large opening in a cylindrical vessel.
Transaction of the ASME, Vol. 108, 1986, p. 436-442.
- [TIM61] TIMOSHENKO S., WOINOWSKI-KRIEGER S.
Théorie des Plaques et Coques.
Paris : Dunod, 1961. – 579 p.
- [TOU91] TOURATIER M.
An efficient standart plate theory.
International Journal of Engineering and Science, Vol. 29, 1991, N° 8, p. 901-916.
- [TOU92a] TOURATIER M.
A generalisation of shear deformation theories for axisymmetric multilayered shells.
International Journal of Engineering and Science, Vol. 29, 1992, N° 11, p. 1379-1399.
- [TOU92b] TOURATIER M.
A refined Theory of laminated shallow shells.
International Journal of Engineering and Science, Vol. 29, 1992, N° 11, p. 1401-1415.
- [TSU96] TSUKIMORI K.
Analysis of the effect of interaction between shear and bending loads on buckling strength of cylindrical shells.
Nuclear Engineering and Design, 1996, 167, p. 23-53.
- [WEI95] WEISS E., RUDOLPH J.
Finite element analysis concerning the fatigue strength of nozzles to spherical shell intersection.
International Journal of Pressure Vessels and Pipping, 1995, 64, p. 101-109.
- [WIC79] WIHMAN K.R., HOPPER A.G., MERSHON J.L.
Local stresses in spherical and cylindrical shells due to external loadings.
March 1979 revision of : WRC Bulletin 107 / August 1965, 70 p.
- [XUE95] XUE M.D., CHEN W., HWANG K.C.
Stresses at the intersection of two cylindrical shells.
Nuclear Engineering and Design, 1995, 154, p. 231-238.
- [XUE96] XUE M.D., HWANG K.C., LÜ W., CHEN W.
A reinforcement design method based on analysis of large openings in cylindrical pressure vessels.
Transaction ASME 118, 1996, p. 502-506.
-