

FINITE ELEMENT SIMULATION OF THE WELDING PROCESS AND STRUCTURAL BEHAVIOUR OF WELDED COMPONENTS

J. M. LOCCI, A. de ROUVRAY

Engineering System International S.A., 20 rue Saarinen, F-94150 Rungis Siliç, France

B. BARBÉ, J. POIRIER

*Commissariat à l'Énergie Atomique, Centre d'Études de Bruyères le Châtel,
B.P. n° 561, F-92542 Montrouge Cedex, France*

SUMMARY

In the field of inelastic analysis of nuclear metal structures, the computation of residual stresses in welds, and their effects on the strength of welded components is of major importance.

This paper presents an experimentally checked finite element simulation with the general nonlinear program PAM NEP-D, of the electron beam welding of two thick hemispherical shells, and the behaviour of the welded sphere under various additional thermomechanical solicitations.

Description of the problem. — Welding is achieved through melting of the metal, due to a localized thermal energy input which is moved along the equator of the sphere. In time, the melted zone propagates partially through the thickness of the shell, and then solidifies, welding the hemispheres over a fraction of their thickness in the equatorial plane.

Approach and assumptions. — This complex three-dimensional problem is approached in view of further industrial applications; therefore minimizing the amount of input physical data and the cost of numerical simulations. The thermal and mechanical problems are decoupled. The thermal problem is first solved, and its solution is improved until good agreement is reached with experimental results. The mechanical problem is then solved, and a close comparison with experimental results, together with a parametric study of the input data and model characteristics show the capabilities and limitations of this fast numerical solution (about 10 mn CDC 7600). Since the residual mechanical state is axisymmetric, an equivalent axisymmetric solution is sought. Rather simple models are used: a non-isothermal Von Mises model with strain hardening is fitted to bilinear uniaxial stress-strain relations with monotonic reversible temperature dependence. Phase changes and time effects are not taken into account.

Finite element solution and experimental comparison. — A transient thermal analysis is carried out, starting from an equivalent axisymmetric heat input near the equator. The computed transient temperatures are checked experimentally on the faces. The calculated melted area is checked by metallographic analysis.

Using the calculated temperature patterns and the temperature dependent material characteristics, a thermo-elasto-plastic incremental analysis simulated the transient mechanical states, and the build up of the residual welding stresses and strains. The deflections and surface strains are checked experimentally.

Results and applications. — Close agreement between the experimental and calculated transient thermal distributions across a meridional section of the welded sphere is achieved with realistic assumptions on the equivalent axisymmetric initial heat input distribution. Further development is suggested to find general links between the equivalent bidimensional heat input and the characteristics of the welding apparatus.

In spite of the apparent crudeness of some assumptions in the mechanical analysis, good agreement is reached between calculated and experimental transient and residual deflections and surface strains. The reliability of the numerical results is assessed by parametric studies (mesh refinement, solution procedure, strain hardening model).

The "welded" model is used to study the behaviour of the welded sphere under various solicitations: internal pressure, heat post treatment, etc. Limitations of the model are discussed (absence of high temperature creep for example) for further development.

1. Introduction

Ce papier présente les résultats d'une étude de modélisation numérique du soudage de deux demi sphères épaisses. Cette simulation qui met en jeu des phénomènes mécaniques de nature thermoplastique, est effectuée au moyen d'un code de calcul aux "éléments finis" PAM - NEPD .

L'état actuel de la technique, dans le domaine de la simulation numérique du soudage est analysé dans des publications synthétiques de RADAJ [1], MASUBUCHI [2], et MARCAL [3]. Dans ce contexte, le travail présenté dans ce papier, se caractérise par des hypothèses "classiques". L'accent a été mis sur l'analyse des capacités et des limitations du modèle numérique utilisé, dans l'optique d'applications industrielles.

Cette analyse a fait l'objet de vérifications expérimentales, dont quelques unes sont rappelées ici.

2. Hypothèses générales

Compte tenu de la grande difficulté du problème, il a fallu, sans trop nuire à l'exactitude du phénomène étudié, adopter des hypothèses simplificatrices qui ont permis de le résoudre, et d'obtenir des valeurs quantitatives.

2. 1. - Les problèmes thermiques et mécaniques sont supposés découplés, le premier servant de condition initiale au deuxième.

2. 2. - La torche de soudage, par exemple un faisceau d'électrons, qui se déplace le long de l'équateur est assimilé à un flash thermique de révolution fig 1. 1. . De cette façon, le problème tridimensionnel est transformé en problème de révolution bidimensionnel. Cette hypothèse, retenue par de nombreux auteurs, suppose que le phénomène de soudage et toutes ses conséquences thermiques, métallurgiques et mécaniques sont de révolution, dans la partie courante. Les régions de la pièce qui correspondent au retour de la torche à son point de départ ont sans doute des caractéristiques différentes.

2. 3 - Le comportement du matériau est représenté par un modèle élastoplastique de VON MISES, non isotherme, susceptible d'écrouissage isotrope ou cinématique [4] .

Les courbes constitutives expérimentales fig 1. 2. sont approchées par un faisceau de courbes bilinéaires fig. 1. 3. , correspondant à des variations monotones avec la température, du module de YOUNG, de la contrainte élastique et du taux d'écrouissage.

Le domaine de fusion du matériau est représenté par des caractéristiques mécaniques faibles.

Les variations, avec la température, des autres caractéristiques mécaniques et physiques du matériau sont "lissées" de manière à éliminer l'effet des changements de

phase, de microfissurations, et de transformations non réversibles. En particulier, la diffusivité thermique est supposée constante dans tout le domaine d'existence solide du matériau. De même, les chaleurs latentes de transformation ainsi que le fluage sont négligées.

2. 4. - La modélisation par éléments finis est représentée sur la figure 1. 4. maillage "grossier" et sur la figure 1. 5. maillage "fin". Ces maillages sont utilisés pour l'analyse thermique et l'analyse mécanique.

3. Analyse thermique

3. 1. - Présentation

La résolution du problème thermique est menée à bien en utilisant les hypothèses qui viennent d'être décrites. Ainsi, le flash thermique correspond à une quantité de chaleur Q que l'on suppose répartie à l'instant zéro dans un petit volume de révolution symétrique par rapport à l'équateur. La grandeur et la taille de ce volume dépendent de la forme de cordon de soudure que l'on désire obtenir. Sur la figure 1. 1., on représente une coupe méridienne de la sphère avec les dimensions du volume initial fondu. Afin de mieux simuler la répartition de la densité d'énergie dans une section de la torche de soudage, ce volume est constitué par deux parties distinctes, l'une dont la grande dimension est dirigée suivant l'épaisseur de la pièce, l'autre qui s'étend parallèlement à la surface.

La répartition de la température en fonction du temps est obtenue par une méthode analytique qui fait intervenir des développements en série de polynômes de LEGENDRE et de fonctions de BESSEL. La généralisation de cette approche, à des problèmes de révolution quelconques, est faite numériquement en adoptant un maillage d'éléments finis, parmi lesquels, ceux situés de part et d'autre de l'équateur reçoivent, pendant un temps très court, une quantité de chaleur donnée par une expression de la forme :

$$Q = \int_0^t q v dt$$

. Le temps t de dépôt est suffisamment petit pour que l'on puisse assimiler l'état initial à un flash. La quantité de chaleur Q est très supérieure à celle nécessaire pour fondre la zone de dépôt.

3. 2. - Résultats

3. 2. 1. Une telle modélisation permet d'obtenir, en adaptant les paramètres du flash, la forme de cordon de soudure que l'on désire, sachant que celle-ci est obtenue par l'enveloppe de l'isotherme de fusion qui évolue en fonction du temps. A titre d'illustration, on a rassemblé sur les figures 2. 1. à 2. 5., différentes formes de cordon obtenues pour une même géométrie de volume fondu initial, et pour des quantités

de chaleur Q croissantes. Sur les figures les temps sont exprimés en secondes.

3.2.2. Il faut remarquer, sur la figure 2.6., que la profondeur du cordon croît d'autant plus vite que le volume restant à fondre avant de percer la sphère est plus petit. Cette constatation doit permettre de régler les paramètres de soudage, afin d'obtenir la profondeur moyenne de cordon que l'on désire.

3.3.3. Il y a quelquefois avantage à préchauffer la pièce afin de minimiser les contraintes résiduelles, et l'apparition de structures métallurgiques fragiles.

4. Analyse mécanique

4.1. - Présentation

La carte thermique transitoire obtenue pour la sphère soudée est transposée en une carte où chaque point de la sphère possède à chaque instant une loi de comportement qui lui est propre. Le problème mécanique revient à calculer une succession d'états d'équilibres qui tiennent compte des propriétés mécaniques intrinsèques instantanées.

Pour un temps suffisamment grand, l'équilibre thermique est retrouvé, et l'on obtient un nouvel état d'équilibre mécanique présentant des déformations et des contraintes résiduelles.

En termes plus concrets :

L'analyse thermoplastique incrémentale utilise une matrice de rigidité élastoplastique tangente, et une correction d'équilibre au début de chaque incrément.

Des essais préalables, ont permis d'assurer une convergence correcte du calcul en une centaine d'incrémentes.

La reproductibilité des résultats mécaniques a été éprouvée en utilisant deux maillages, le deuxième étant beaucoup plus fin que le premier.

4.2. - Résultats

4.2.1. Les résultats fournis par la simulation numérique sont résumés sur les figures 3.1. à 3.6. qui présentent la distribution thermique initiale, la distribution thermique finale avec l'extension maxima de la zone fondue et, afin de mieux comprendre l'évolution du phénomène, quatre états thermiques transitoires. A chacun de ces résultats thermiques correspond un état de la pièce déformée fig. 3.7. à 3.12.

On remarque que pendant la phase d'échauffement, la pièce a tendance à augmenter de volume, tandis qu'elle se rétracte en se plastifiant, au fur et à mesure qu'elle se refroidit.

4.2.2. Les résultats obtenus pour deux maillages différents, donnent une concordance satisfaisante entre les états déformés fig. 4.1. et 4.2. . De même, la distribution des iso- contraintes de VON MISES est sensiblement la même pour les deux maillages fig. 4.3. .

4. 2. 3. Un calcul de simulation, initialisé au début de la phase de refroidissement fig. 3. 3. , conduit à une déformée résiduelle sensiblement différente fig. 4. 4. , par contre a un état de contrainte résiduel proche fig. 4. 5. de celui du calcul de référence.

4. 2. 4. Un calcul de simulation utilisant un mode d'écrouissage cinématique effet BAUSCHINGER , conduit à une déformée résiduelle très proche fig. 4. 6 , et a un état de contrainte résiduel sensiblement différent fig. 4. 7. de celui du calcul de référence.

5. Vérifications expérimentales

Ces vérifications expérimentales sont de quatre ordres différents ; thermique, métallurgique, métrologique et extensométrique.

5. 1. - Thermique

La mesure des températures atteintes localement par des thermocouples placés au voisinage de la zone fondue est en accord satisfaisant avec les valeurs de simulation. De même, pour des domaines de températures moins élevées, des jauges de températures montrent que celles-ci évoluent, en fonction du temps, en gardant un même ordre de grandeur que les valeurs de simulation.

5. 2. - Métallurgique

L'examen des structures métallographiques sont actuellement l'objet d'essais d'identification, mais déjà sur des alliages d'uranium et des aciers inoxydables austénitiques, on observe que la structure métallographique est conforme à celle que prévoient les vitesses du refroidissement calculées par simulation numérique. Ainsi, on confirme que la grosseur de grain et leur orientation sont des paramètres tout à fait sensibles aux cinétiques de refroidissement.

5. 3. - Métrologique

Dans le cas d'une structure soudée de révolution, il est relativement facile de mesurer la géométrie de la pièce déformée, et de la comparer à la géométrie de la pièce originelle. Cette confrontation permet de localiser les endroits qui ont été les plus déformés. C'est ce que montre la figure 5. 1. qui donne l'écart entre le profil initial avant soudure, et final après soudure. On voit que cet écart prend une valeur maximum au droit du cordon de soudure. Les valeurs expérimentales et théoriques sont assez proches et de l'ordre de 15/100 mms dans le plan de symétrie.

5. 4. - Extensométrique

En cours de soudage, des jauges de déformation à trois directions, collées dans des positions de distance croissante à partir du cordon de soudure, donnent des

valeurs qui se recourent avec les valeurs théoriques

6. Application

Comportement sous charge de la sphère soudée.

Les résultats de la simulation d'une mise en pression de la sphère soudée sont rassemblés sur les figures 6.1. à 6.8. , qui font apparaître :

6.1. - Les déformées sur lesquelles on peut remarquer que la partie équatoriale non soudée a tendance à s'ouvrir sous l'action de la pression.

6.2. - Les états de contraintes, circonférentiels, longitudinaux, et de VON MISES avant, et après mise en pression - La comparaison de ces deux états montre que la contrainte équivalente locale subit peu de modifications, tandis que les autres ont une distribution notablement différente.

7. Conclusion

Cet ensemble de résultats permet de valider le modèle relativement simple et économique utilisé pour ces simulations.

Ainsi, un état de contraintes résiduelles, peut s'obtenir par un calcul (5 mn de C.D.C. 7 600) initialisé au début de la phase de refroidissement de l'assemblage soudé. Par contre, un état de déformations résiduelles, impose un calcul "complet" (environ 10 mn de C.D.C. 7 600) , mais ne présente qu'une faible sensibilité à la nature de l'érouissage du modèle.

La prise en compte de phénomènes physiques tels que l'effet de passes multiples, l'effet de traitements thermiques de détensionnement n'est toutefois pas accessible par ce modèle, qui ignore le comportement en fluage des matériaux.

Références

- 1 D. RADAJ. "Welding stress analysis with elastoplastic finite elements"
Smirt 1976, M 2/6
- 2 MASUBUCHI, K. "Report on the state of the art of numerical analysis of stresses, strains, and other effects produced by welding".
IIW - DOC
X 738 - 74.
- 3 MARCAL, P. "Weld Problems".
Structural mechanics computer programs
University Press of Virginia, Charlottesville.
- 4 SHARIFI, P YATES, D. N. "Non linear thermoelastic - plastic and creep analysis by the finite element method".
Missiles systems Division, Lockheed, Sunnyvale, Calif.

Fig. 1.1.
Hémisphères soudées

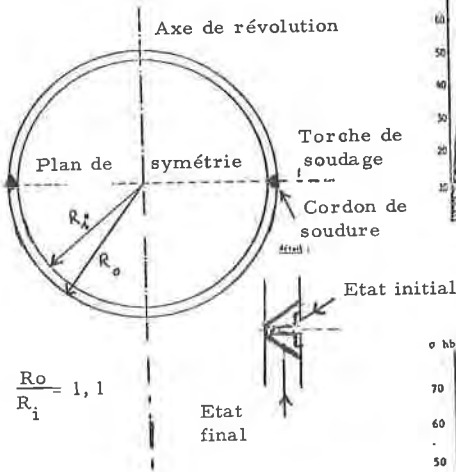


Fig. 1.2.
Courbes constitutives expérimentales

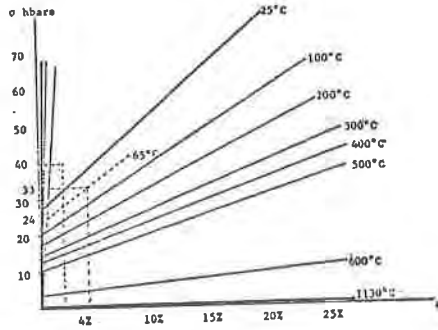
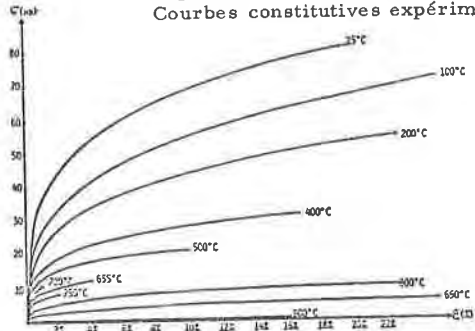


Fig. 1.3.
Courbes constitutives schématisées

Fig. 1.5.
Maille fin

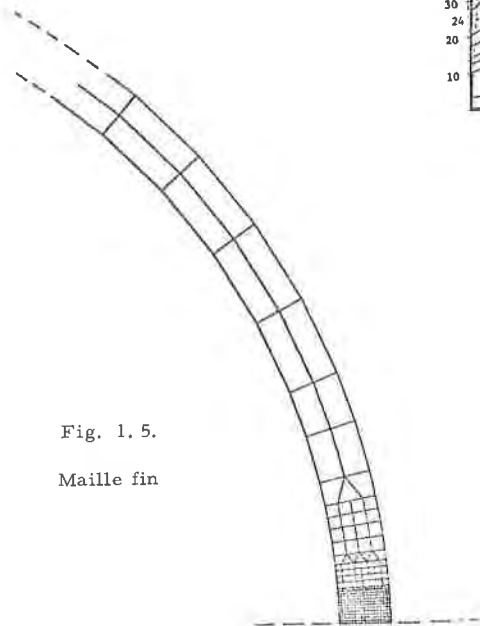


Fig. 1.4.
Maille grossier

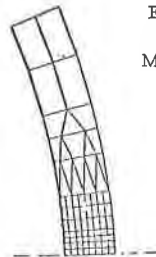


FIGURE 1 - DESCRIPTION GENERALE

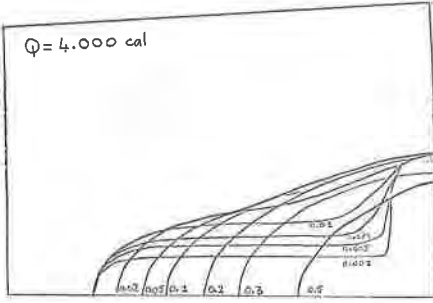


Fig. 2. 1.

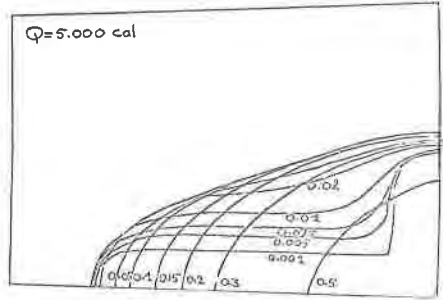


Fig. 2. 2.

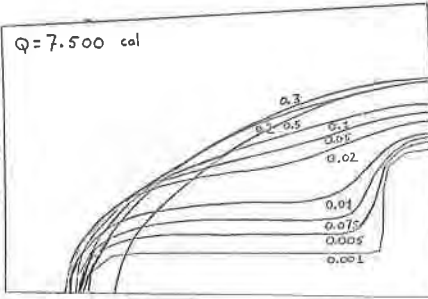


Fig. 2. 3.

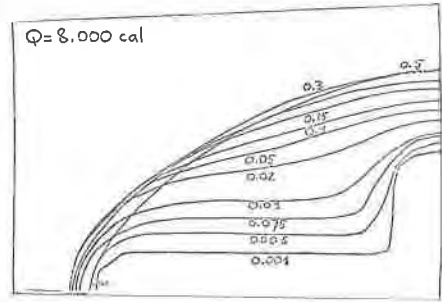


Fig. 2. 4.

Les nombres inscrits en regard de chaque isotherme expriment de secondes

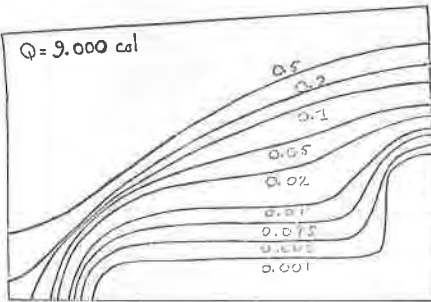


Fig. 2. 5.

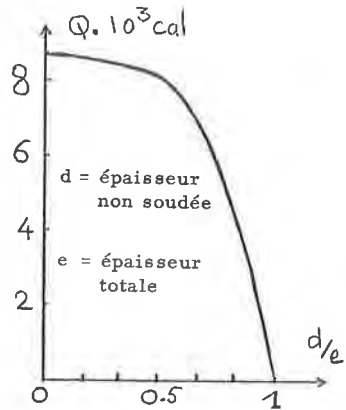


Fig. 2. 6.

ETATS INITIAUX

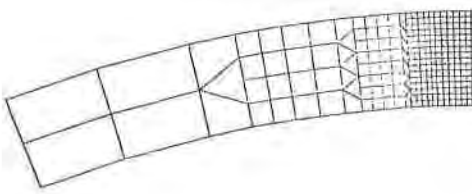


Fig. 3.7.
Configuration
initiale

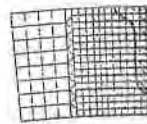


Fig. 3.1.
Distribution mécanique
initiale

ETATS TRANSITOIRES

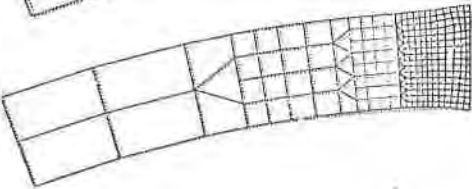


Fig. 3.8
Dilatation

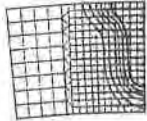


Fig. 3.2.
Echauffement

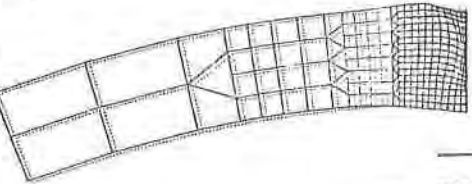


Fig. 3.10
Refroidissement

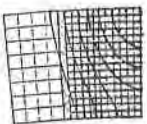


Fig. 3.4.
Refroidissement

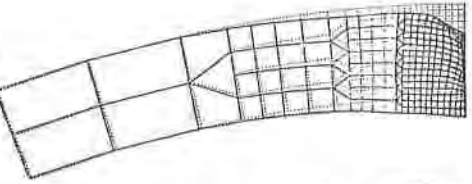


Fig. 3.11
Compression

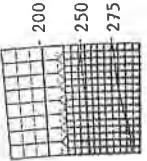


Fig. 3.5.
Refroidissement

ETATS RESIDUELS



Fig. 3.12
Déformée résiduelle

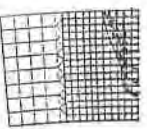


Fig. 3.6.
Cordon de soudure

DEFORMES TRANSITOIRES

ETATS

Distributions thermiques transitoires



Fig. 4.1.

maillage "grosier"
écrouissage isotrope

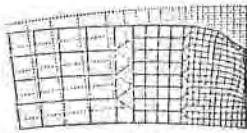


Fig. 4.2.

maillage "fin"
écrouissage isotrope
calcul initialisé en phase de
refroidissement

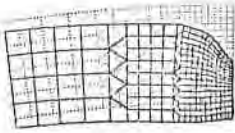


Fig. 4.4.

Maillage "fin"
écrouissage cinématique



Fig. 4.6.

maillage "fin"
—
maillage "grosier"

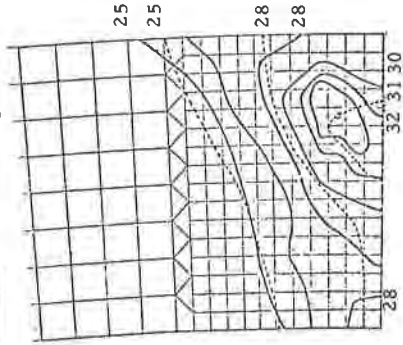


Fig. 4.3.

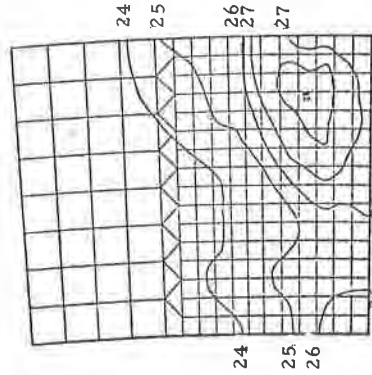


Fig. 4.5.

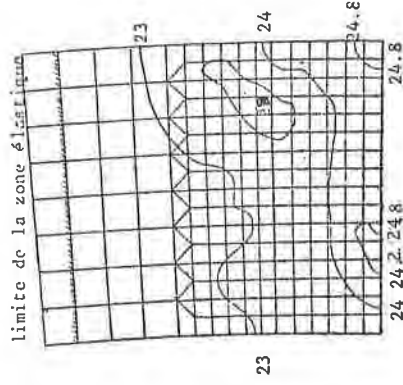


Fig. 4.7.

Déformée schématique due
à la soudure et flèche maxima

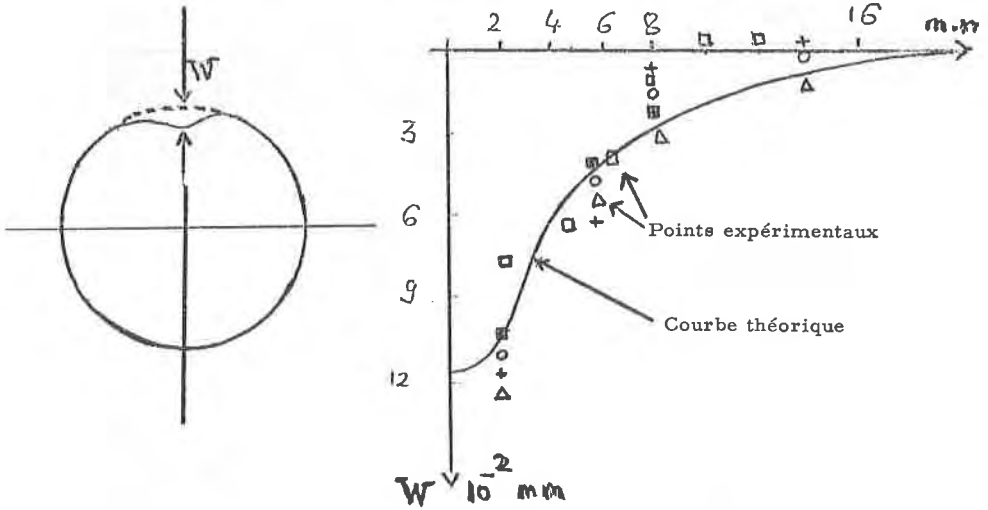
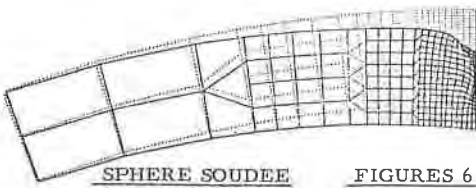
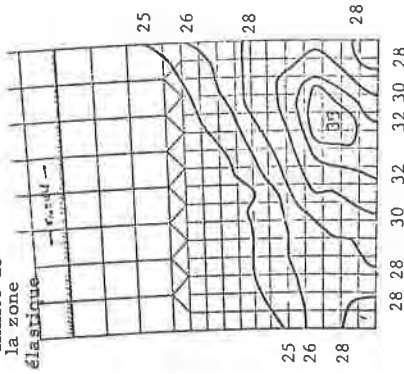


FIGURE 5

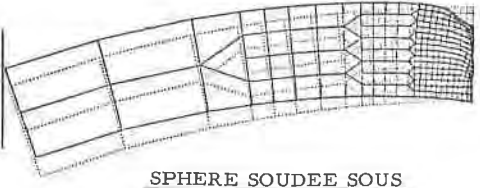


FIGURES 6

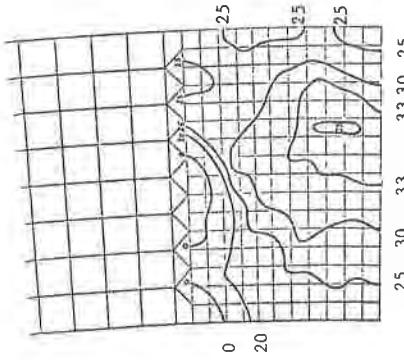
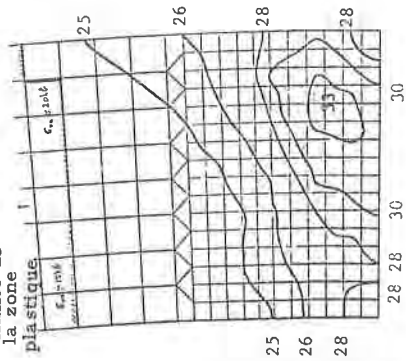
limite de la zone élastique



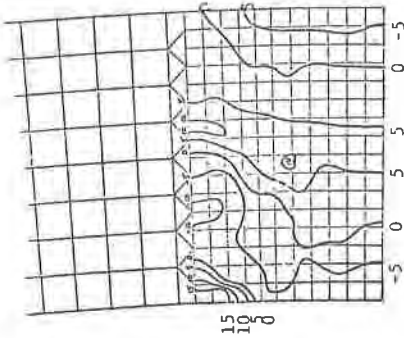
Déformées



limite de la zone plastique



σ CIRCONFÉRENTIEL



σ VERTICAL

