

Aboubakry M'baye
Ingénieur industriel

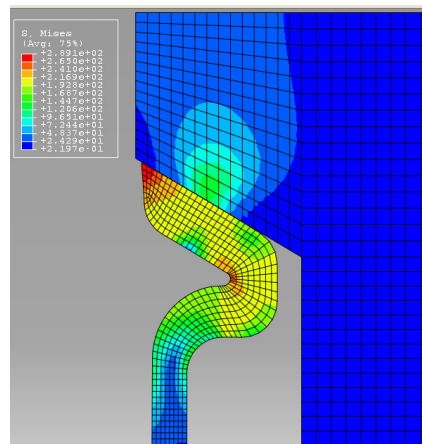
Date : 27/01/2011

Type de manuscrit : scientifique

Niveau de diffusion : public

Rapport de stage

APPLICATION DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS DANS LE DOMAINE INDUSTRIEL



www.Mcours.com

Site N°1 des Cours et Exercices Email: contact@mcours.com

SOMMAIRE

Introduction	p1
1. Présentation de la méthode des éléments finis	p2
2. Application de la méthode des éléments finis.....	p3
2.1 Hypothèses.....	p5
2.2 Résultats avec l'effort maxi (effort total limité)	p11
2.3 Résultats avec l'effort mini.....	p14
2.4 Conclusion des simulations	p16
Conclusion	p17
Bibliographie	p18
Table des illustrations	p19

INTRODUCTION

Ce manuscrit part d'un constat effectué au cours de ma formation d'ingénieur industriel et de mon expérience professionnelle : une méconnaissance de la méthode des éléments finis par les ingénieurs et techniciens de l'industrie.

Dans le domaine de l'ingénierie, on rencontre de nombreux problèmes complexes. La formulation mathématique de ces problèmes est fastidieuse et n'est généralement pas possible par des méthodes analytiques. C'est à cet instant, que l'on a recours à l'utilisation des techniques numériques. Plus particulièrement à la méthode des éléments finis qui est un outil très puissant pour obtenir la solution numérique d'un large éventail de problèmes d'ingénierie.

Cette méthode est très peu abordée au cours de leurs formations des ingénieurs et techniciens de l'industrie. Ceci est très certainement dû au fait que la méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. En effet, les industriels n'étudient généralement que les outils traditionnels de résolutions de problèmes (TPM, AMDEC...). C'est la raison pour laquelle, par la suite une fois actif en entreprise, cela ne vient pas directement à l'esprit d'un professionnel de l'industrie d'utiliser la méthode des éléments finis.

Lors de la réalisation de plusieurs études scientifiques et techniques en entreprise, j'ai été amené à travailler sur des sujets très difficiles. L'autre difficulté était qu'il m'était impossible de modéliser puis simuler les solutions retenues, avant de les appliquer concrètement. En effet, cela aurait permis de réaliser des gains financiers non négligeables sur les coûts des études. De plus, très souvent, la modélisation et la simulation prennent beaucoup moins de temps qu'une application concrète. Le délai de réalisation des études aurait pu être également significativement réduit.

Cependant, la méthode des éléments finis est très peu utilisée dans le domaine industriel contrairement à d'autre domaine tel que le génie civil. Ce manuscrit a pour but de démontrer l'utilité de cette méthode et de généraliser son utilisation dans le monde industriel.

Je débute, ce manuscrit, par une présentation succincte de la méthode. Puis, je termine par une application concrète de la méthode (étude réalisée pour un grand groupe industriel).

TPM = Total Productive Maintenance

AMDEC = Analyse des modes de défaillances et de leurs criticités

1. Présentation de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire. Celle-ci peut, par exemple, représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.).

Le concept de base est qu'un organisme ou une structure peut être divisé en plusieurs petits éléments de dimensions finies appelé « éléments finis ». Le corps d'origine ou la structure est alors considéré comme un assemblage de ces éléments reliés à un nombre fini de joints appelé « nœuds » ou « points nodaux ». Les propriétés des éléments sont formulées et combinées pour obtenir les propriétés de l'ensemble du corps.

La sous-division d'un organisme ou d'une structure en éléments finis doit satisfaire aux exigences suivantes :

1. Deux éléments distincts peuvent avoir des points communs que sur leurs frontières communes, si ces limites existent (aucun chevauchement est autorisé). Les frontières communes peuvent être des points, lignes ou des surfaces.

2. L'élément assemblé ne doit pas laisser d'espace entre les sous-éléments et approcher la géométrie du corps réel ou de la structure d'aussi près que possible.

3. Lorsque la limite d'une structure ou d'un organisme ne peut être exactement représentée par les éléments sélectionnés alors une erreur apparaîtra. Cette erreur ne peut être évitée. Elle est appelée erreur de discrétisation géométrique et peut être diminuée en réduisant la taille des éléments ou en utilisant des éléments permettant de devenir des frontières courbes.

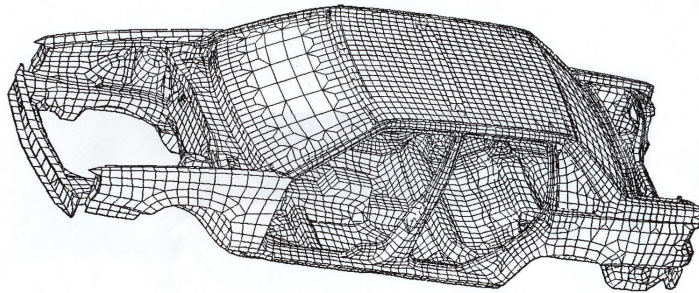


Illustration n°1 : Analyse par éléments finis d'une automobile

Les équations d'équilibres pour l'ensemble de la structure ou de l'organisme sont obtenues en combinant l'équation d'équilibre de chaque élément de telle sorte que la continuité soit assurée à chaque nœud. Les conditions aux limites nécessaires sont alors imposées et les équations d'équilibres peuvent être résolues pour déterminer les contraintes, les déformations...

2. Application de la méthode des éléments finis

J'ai réalisé cette étude pour un groupe industriel mondial (fabricant de tubes pour canalisation de frein d'automobile).

Problématique : On dispose de très peu de renseignement sur le comportement d'un tube lors de son montage sur le récepteur. Le but de l'étude est de définir la zone permettant d'assurer l'étanchéité de l'épanoui¹ lors de son montage. Pour cela, il est nécessaire de mettre en évidence les contraintes et les déformations sur l'extrémité du tube lors du montage.

Cela nous permettra également d'identifier la zone, sur l'extrémité du tube, sur laquelle il est impératif nécessaire d'effectuer un contrôle qualité. Actuellement, c'est toute la surface de l'épanoui qui est contrôlée. L'objectif est de redéfinir la zone à contrôler de manière optimale.

Zone actuellement contrôlée (voir illustration n°2) : La présence de trace ou de rayure n'est pas tolérée sur toute la surface avant de l'épanoui.

Surface avant de
l'épanoui = zone
actuellement contrôlée

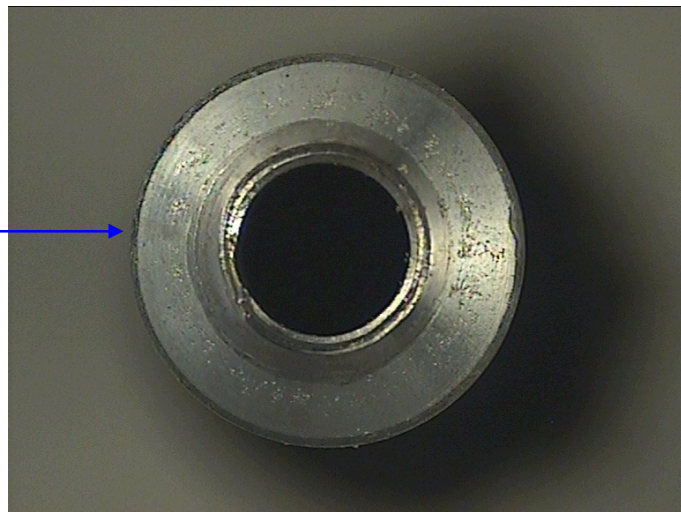


Illustration n°2 : Surface avant de l'épanoui

Description de l'assemblage :

1. Insertion de l'extrémité du tube dans le récepteur
2. Application d'un couple sur le raccord appelé couple de serrage
3. Vissage du raccord sur le récepteur selon un angle prédéfini

Le raccord est déjà installé sur le tube. Les simulations sont réalisées avec un raccord ayant un filetage M10. Le couple de serrage nominal est de 6 Nm. L'angle de serrage nominal est de 40°.

Réalisation des simulations d'assemblage avec un logiciel de calculs d'éléments finis nommé Abaqus Standard V6.7.



¹ Epanoui = forme donnée à l'extrémité du tube afin d'assurer son étanchéité lors de son vissage sur un récepteur.

Avant la réalisation des simulations, j'ai déterminé l'effort axial sur l'épanoui en fonction du couple de serrage appliqué.

Utilisation de la formule de Kellerman et Klein [1]: $F_o = C_o / [0,16 \cdot P + \mu (0,583 \cdot d_2 + Dm/2)]$

F_o : Effort axial ; C_o : couple de serrage ; P : Pas du filetage ; μ : Coefficient de frottement [2] ;
 d_2 : diamètre sur flancs [3] ; Dm : Diamètre moyen d'appui sous-tête

Pour un raccord avec un filetage M10 :

$d_2 = 9,026 \text{ mm}$; $P = 1,5 \text{ mm}$; $\mu = [0,12 ; 0,18]$; $C_o = [4,8 \text{ Nm} ; 7,2 \text{ Nm}]$; $Dm = 6,78 \text{ mm}$

$F_{\max} = 7200 / [0,16 \cdot 1,5 + 0,12 (0,583 \cdot 9,026 + 3,39)] = 5632,6 \text{ N}$

$F_{\min} = 4800 / [0,16 \cdot 1,5 + 0,18 (0,583 \cdot 9,026 + 3,39)] = 2670,5 \text{ N}$

–

On constate que $F_{\max} > 2 \cdot F_{\min}$: la planéité des surfaces en contact (raccord et épanoui) à une grande influence sur l'effort axial.

Détermination de la pression à appliquer sur l'épanoui à partir de l'effort axial :

$S = \text{surface en contact entre le raccord et l'épanoui} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (3,150^2 - 2,875^2) / 4 = 5,2 \text{ mm}^2$

(M10) $P_{\max} = F_{\max} / S = 5632,6 / 5,2 = 1083 \text{ MPa}$ et $P_{\min} = F_{\min} / S = 2670,5 / 5,2 = 513 \text{ MPa}$

(M12) $P_{\max} = F_{\max} / S = 4867,6 / 5,2 = 936 \text{ MPa}$ et $P_{\min} = F_{\min} / S = 2309 / 5,2 = 444 \text{ MPa}$

Incertitude non-prise en compte :

✓ Les variations géométriques : diamètre sur flanc du filetage du raccord ; la surface d'appui du raccord sur l'épanoui...

N.b. : Les principales caractéristiques techniques du liquide de frein sont les suivantes :

Viscosité cinématique à $40^\circ\text{C} \geq 6 \text{ mm}^2/\text{s}$

Masse volumique à $15^\circ\text{C} = 1045 \text{ kg/m}^3$

2.1 Hypothèses

Géométrie

Représentation en axisymétrie ¹ (pièces, blocage et effort de révolution)

Les pièces sont représentées selon un profil puis partitionnées de façon à guider le maillage.

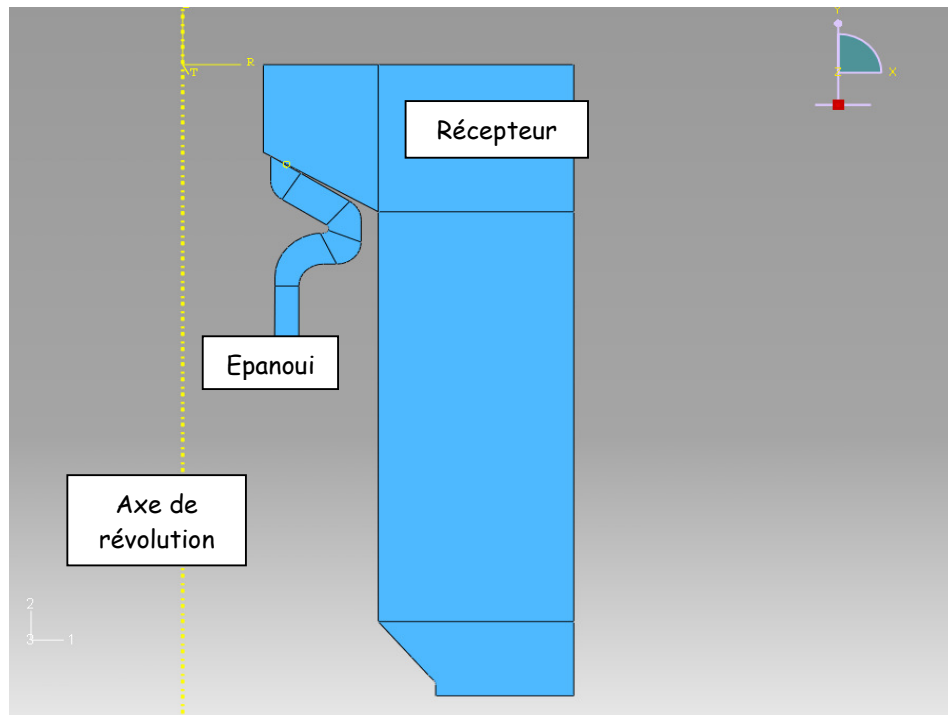


Illustration n°3 : Représentation en axisymétrie des pièces

¹ Axisymétrie = orthogonalement symétrique par rapport à un axe.

Maillage

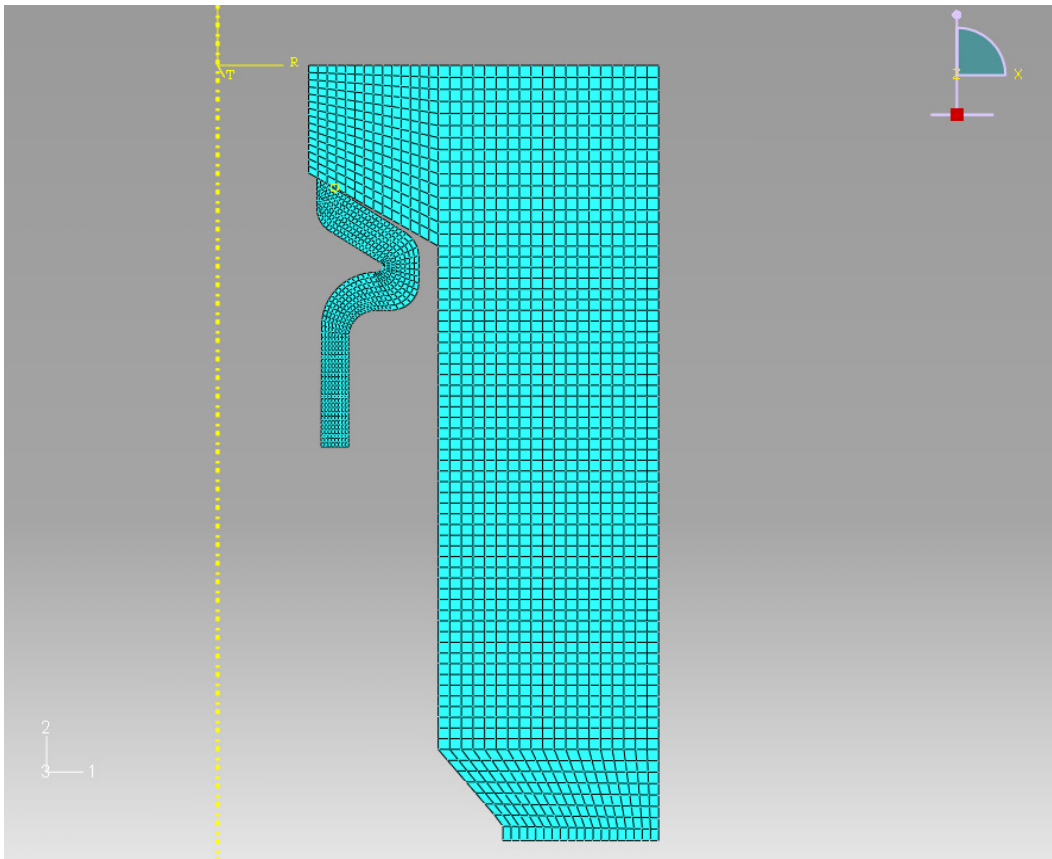


Illustration n°4 : Maillage des pièces

L'épanoui est maillé plus fin car il est amené à plus se déformer.

Les éléments utilisés sont des éléments axisymétriques de type quadrangle linéaire à intégration réduite. Le modèle a nécessité 2 160 éléments (précision du modèle).

Matériau

Le matériau utilisé est un acier pour emboutissage de type DC04. Le récepteur est en acier.

J'ai entré les propriétés suivantes :

En élasticité : $E = 208\,000 \text{ N/mm}^2$ (Module de Young) et $V = 0,3$ (Coefficient de Poisson)

En plasticité : simulation d'une loi de plasticité classique compte tenu que la déformation s'opère de manière quasi-statique lors du serrage.

Cette loi de plasticité a été déterminée à partir, de la courbe de traction (contrainte / déformation).
 (D'après la thèse de Stéphane Berbenni sur élastoviscoplasticité des aciers polycristallins en 2002 [4])

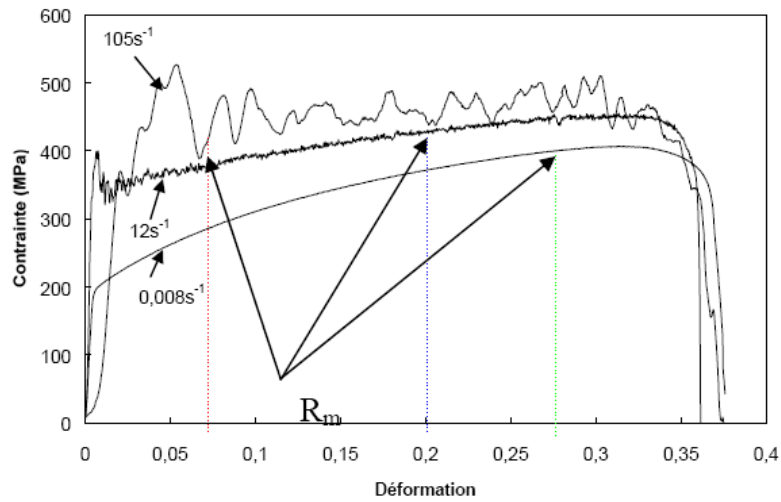


Figure IV.16. Courbes de traction obtenues à plusieurs vitesses de déformation pour l'acier DC04.

Illustration n°5 : Courbe de traction de l'acier DC04

A partir de la courbe de traction du DC04 ($v = 0,008s^{-1}$), j'ai pu en déduire la courbe de plasticité du DC04 (voir figure ci-dessous).

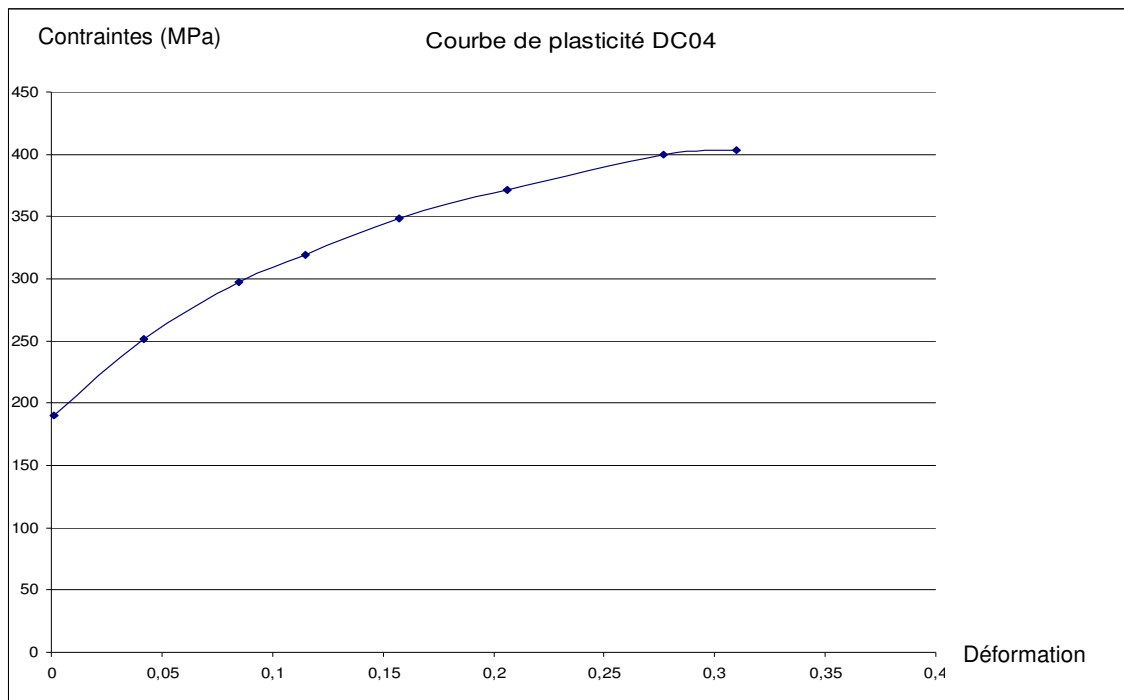


Illustration n°6 : Courbe de plasticité de l'acier DC04

<i>Déformation nominale</i>	<i>Contrainte nominale</i>
0,000	190,0
0,042	251,6
0,085	296,8
0,115	319,3
0,157	348,4
0,206	370,9
0,277	400,0
0,310	403,2

Illustration n°7 : Tableau des valeurs de la courbe de plasticité de l'acier DC04

J'ai ensuite entré sous Abaqus une table de valeur de contrainte vraie en fonction de la déformation plastique logarithmique :

<i>Déformation plastique</i>	<i>Contrainte vraie</i>
$\varepsilon_{ln}^{pl} = Ln(1 + \varepsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E}$	$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom})$
0,000	190,1
0,039	262,1
0,080	322,0
0,107	356,0
0,143	403,0
0,185	447,3
0,242	510,8
0,267	528,1

Illustration n°8 : Table de valeur de contrainte vraie



Conditions aux limites

Effort et blocage :

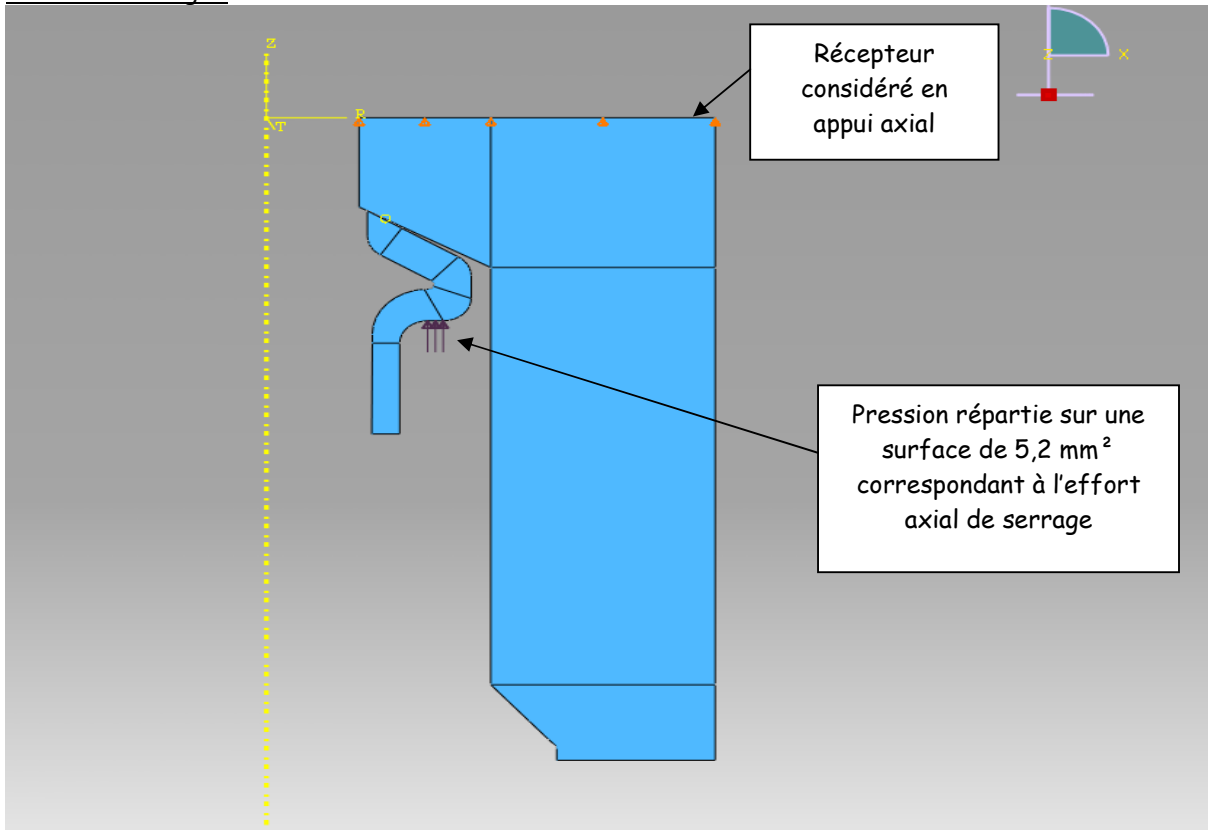


Illustration n°9 : Détermination de l'effort et du blocage

Contact entre pièces :

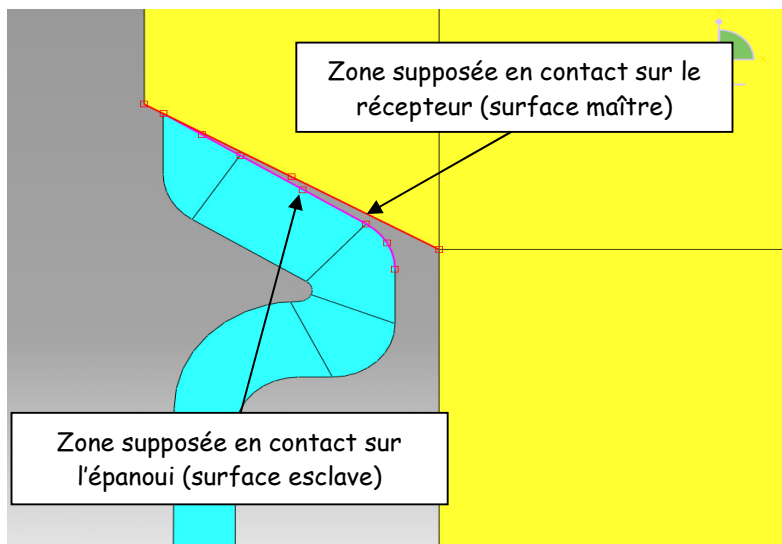


Illustration n°10 : Détermination du lieu de contact entre pièces

Type de contact utilisé (méthode de résolution) :

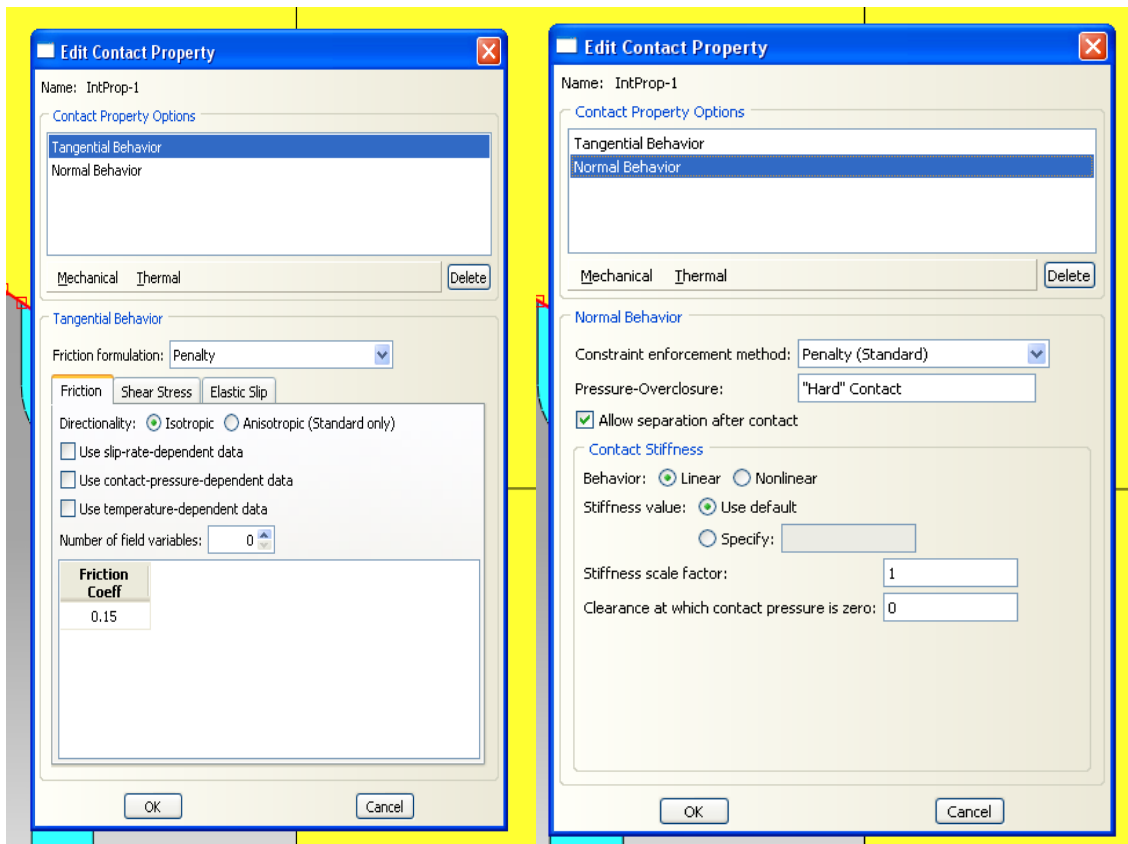


Illustration n°11 : Détermination du type de contact utilisé

Il s'agit pour le comportement tangential d'un contact avec une formulation de pénalité. De plus, le coefficient de frottement acier/acier pris en compte est : $f = 0,15$

Pour le comportement normal, il s'agit également d'une méthode par pénalité.

Ces contacts sont supposés réalisés en grand glissement, les non-linéarités géométriques ont donc été activées.

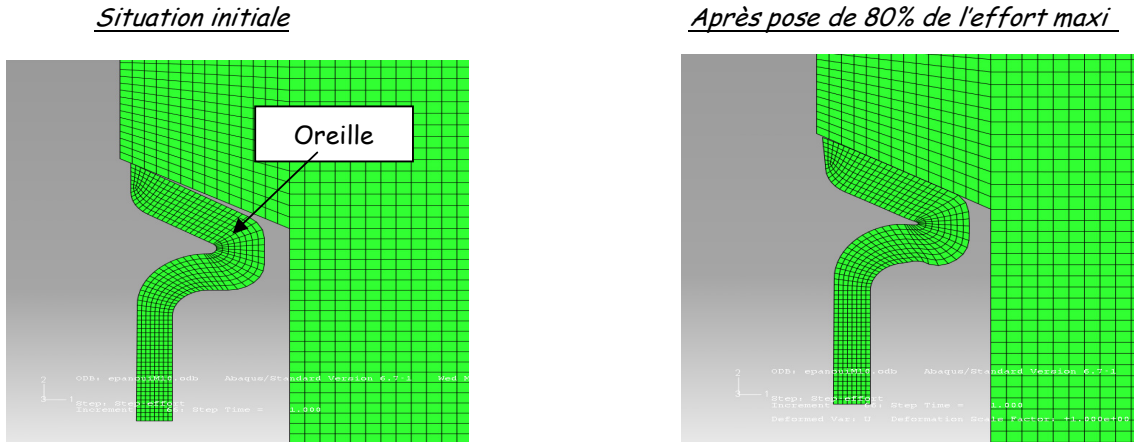
Analyse

L'analyse est conduite sur Abaqus V6.7 Standard. Elle est non-linéaire du fait des conditions de contact et des lois matérielles (plasticité).

2.2 Résultats avec l'effort maxi (effort total limité)

Application d'une pression de 800 MPa au lieu de 1083 MPa sur une surface de 5,2 mm²

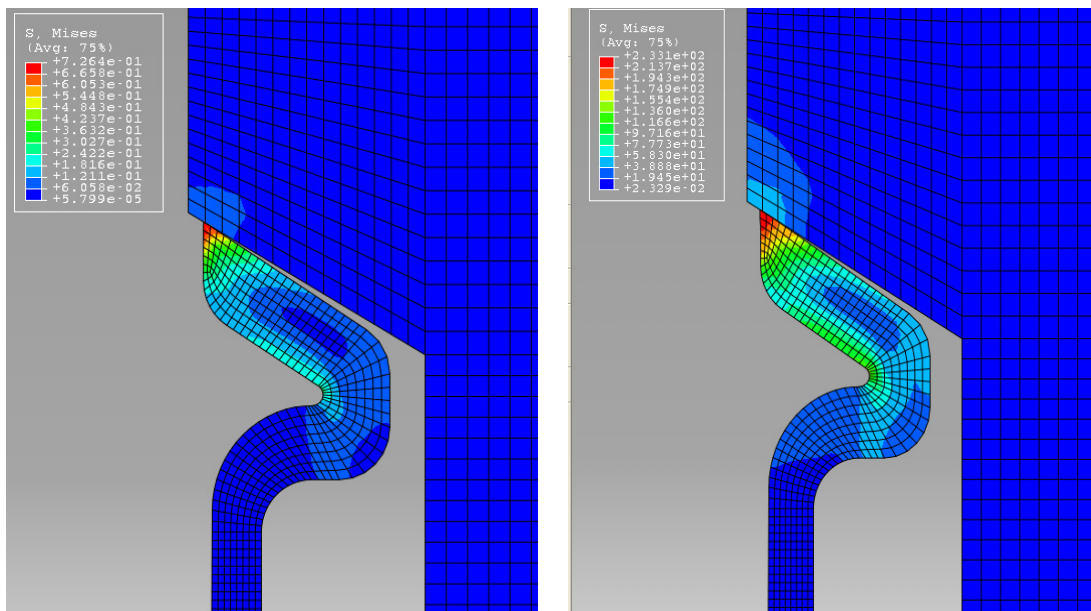
Déformée avant et après pose de 80% de l'effort

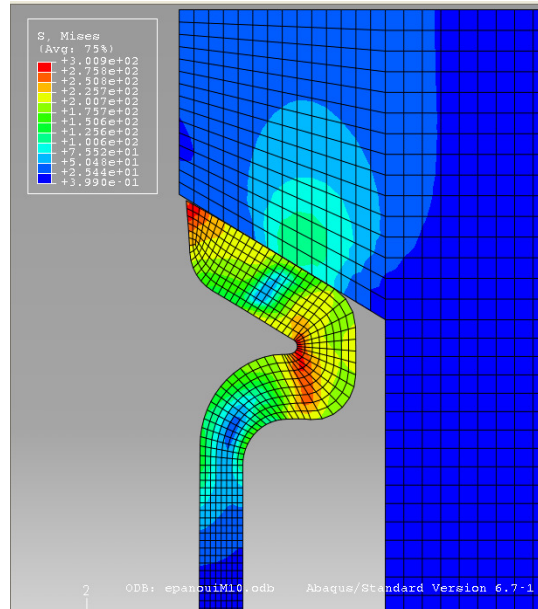
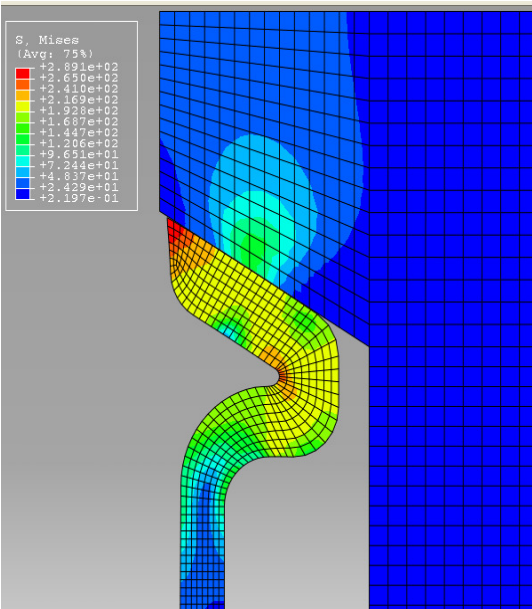
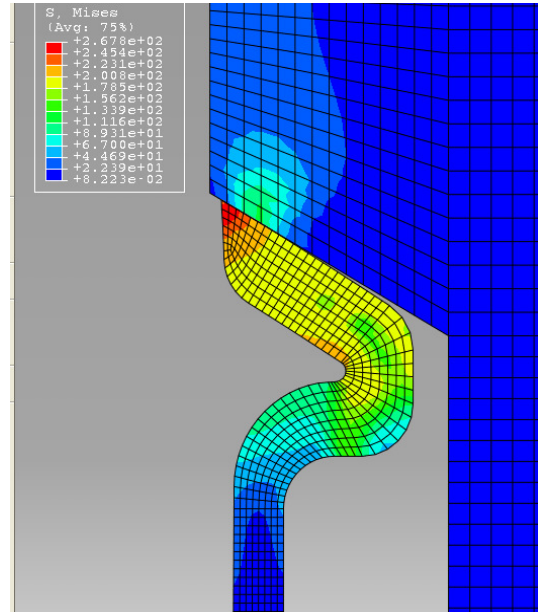
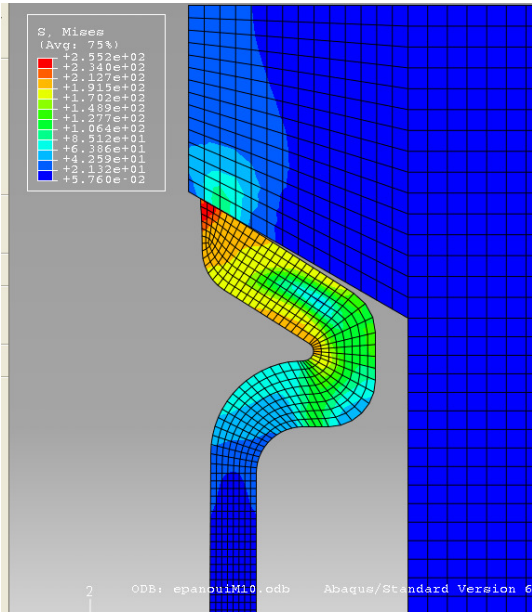


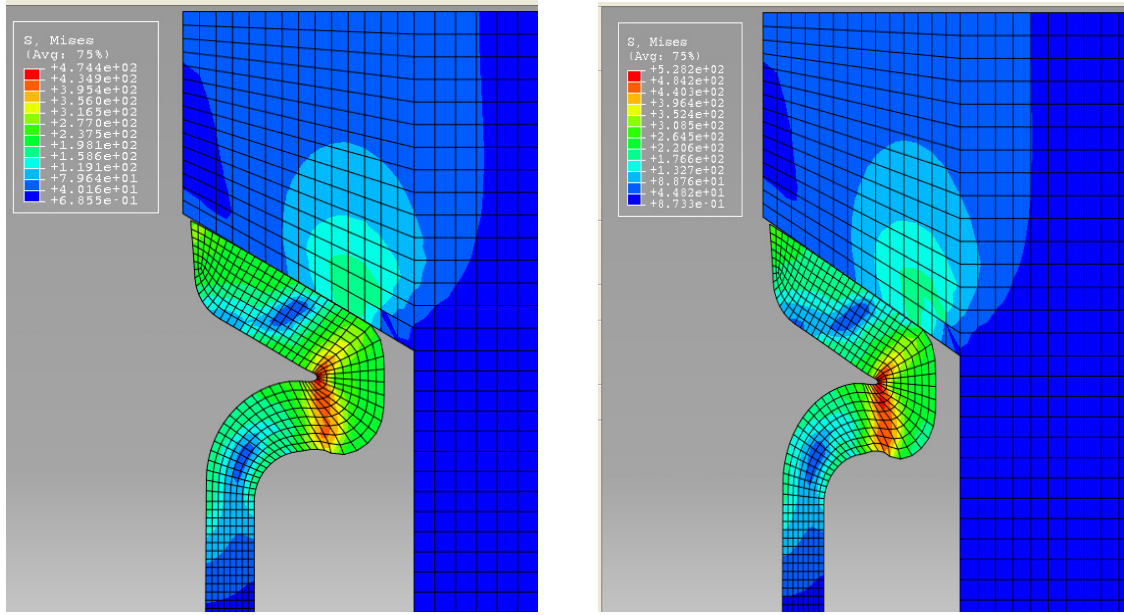
Illustrations n°12 : Déformée avant et après pose de 80% de l'effort maxi

On peut constater, après la pose de l'effort, que toute la surface avant de l'épanoui est en contact avec le récepteur. De plus, l'angle de « l'oreille » de l'épanoui s'est refermé.

Evolution des contraintes au sens de Von Mises (MPa)







Illustrations n°13 : Evolution des contraintes au sens de Von Mises (effort maxi)

Commentaires :

On remarque, au début de l'application de l'effort, que les contraintes maximales se situent principalement sur l'extrémité du tube. Au cours du temps, elles se déplacent progressivement sur toute la surface avant de l'épanoui. A la fin de l'application de l'effort, les contraintes principales se situent dans l'oreille.

Déplacements (mm)

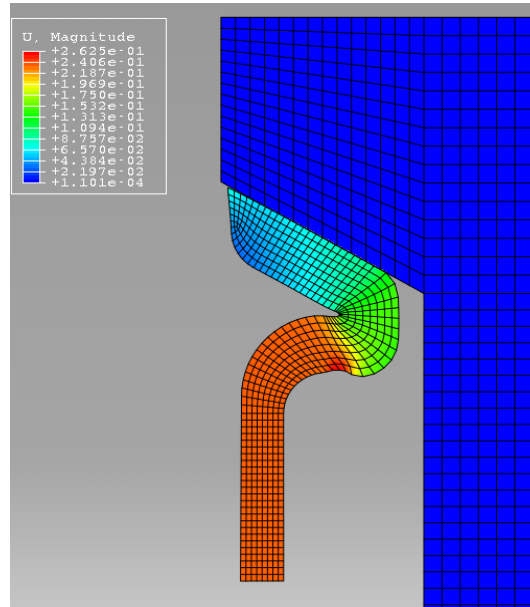


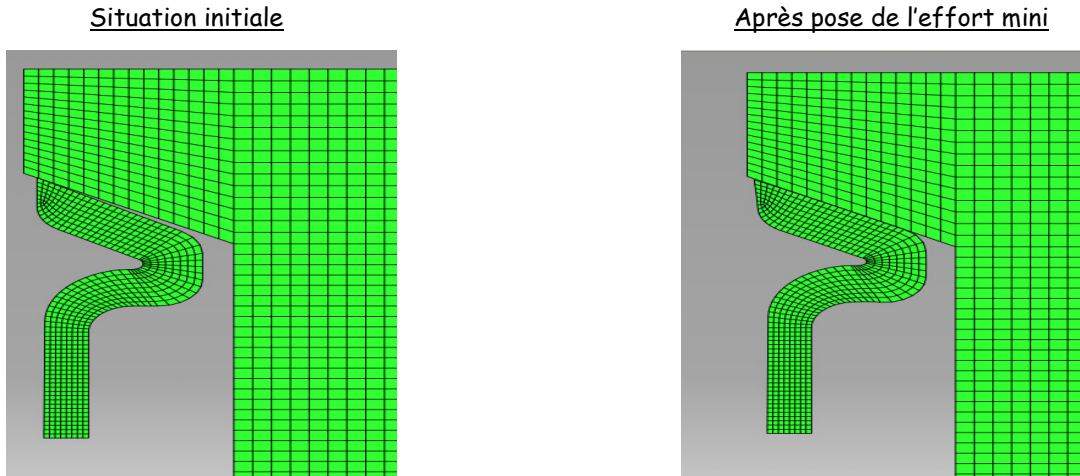
Illustration n°14 : Déplacements de l'épanoui (effort maxi)

L'épanoui s'est globalement comprimé de 0,26 mm.

2.3 Résultats avec l'effort mini

Application d'une pression de 513 MPa sur une surface de 5,2 mm².

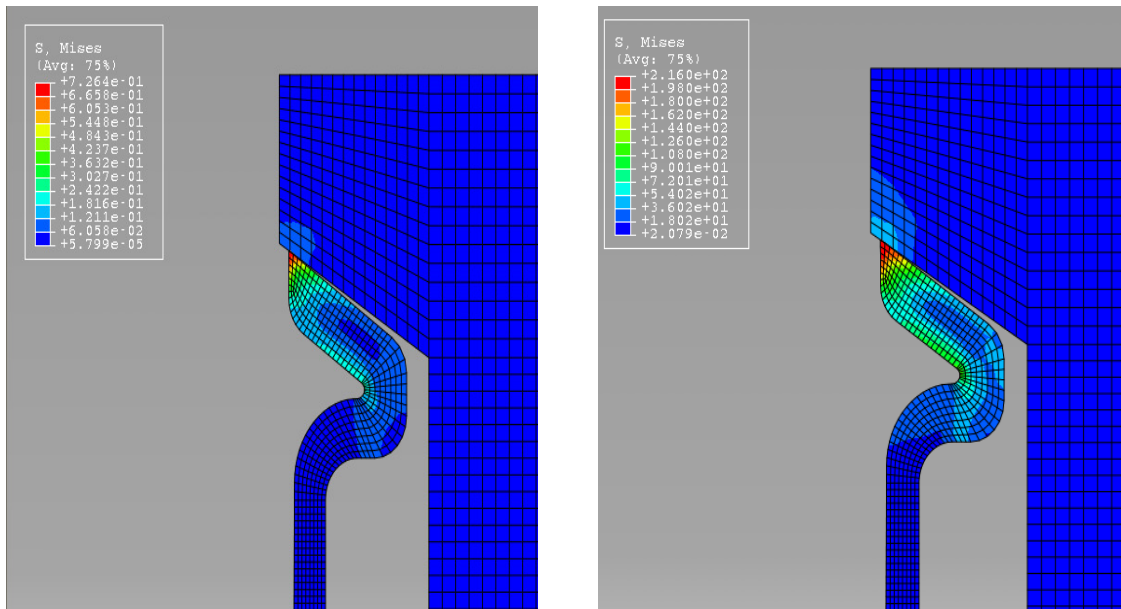
Déformée avant et après pose de l'effort mini

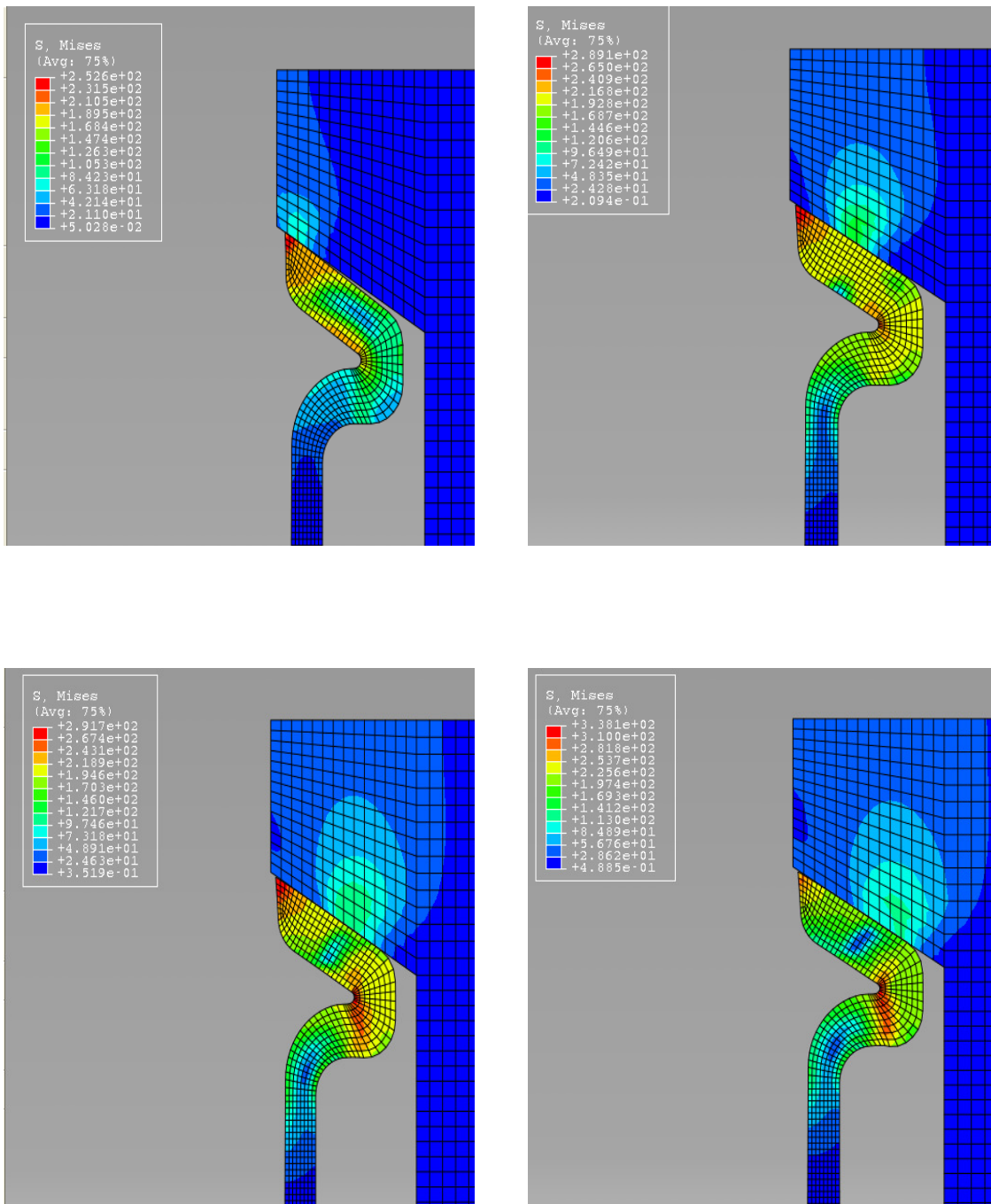


Illustrations n°15 : Déformée avant et après pose de l'effort mini

On constate également, après la pose de l'effort, que toute de la surface avant de l'épanoui est en contact avec le récepteur. L'angle de « l'oreille » de l'épanoui s'est aussi refermé.

Evolution des contraintes au sens de Von Mises (MPa)



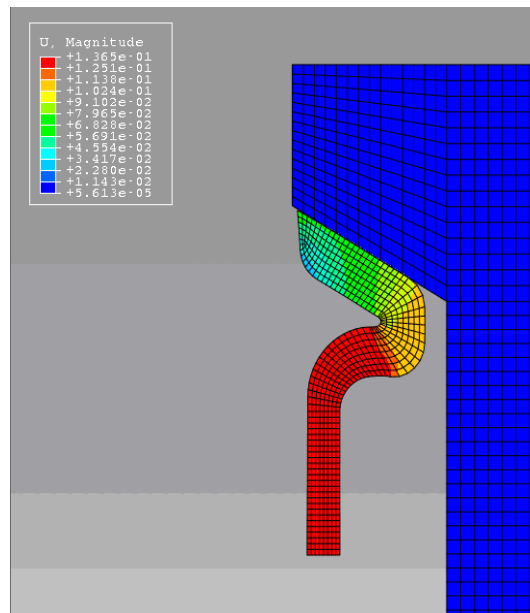


Illustrations n°16 : Evolution des contraintes au sens de Von Mises (effort mini)

Commentaires :

On remarque, au début de l'application de l'effort, que les contraintes maximales se situent principalement sur l'extrémité du tube. Au cours du temps, les contraintes sont réparties uniformément sur tout l'épanoui. A la fin de l'application de l'effort, les contraintes principales se situent sur l'extrémité du tube et dans l'oreille.

Déplacements (mm)



L'épanoui s'est globalement comprimé de 0,136 mm.

2.4 Conclusion

Ces simulations ont permis de mettre en évidence deux points très importants sur le comportement de l'épanoui lors de l'assemblage du tube :

1. En pratique l'effort appliqué sur l'épanoui se rapproche plus de l'effort minimal ($F_{\min} = 2670,5 \text{ N}$). En effet, c'est le cas le plus réaliste car avec l'effort maximal l'épanoui est totalement affaissé et les contraintes principales se situent sur l'oreille (risque élevé de cassure).

Les contraintes principales se situent principalement sur le bout de l'épanoui. Par conséquent, la nouvelle zone à contrôler sera la surface comprise entre le diamètre intérieur 3,1 mm et le diamètre 4,6 mm.

2. Selon l'effort appliqué, l'épanoui se comprime entre 0,136 mm et 0,260 mm. Par conséquent pour garantir une étanchéité correcte, l'épaisseur minimale de matière que l'on doit avoir sur l'épanoui est donc d'environ 0,14 mm (avec un raccord M10).

Les contraintes principales se situent majoritairement sur le bout de l'épanoui. Par conséquent, la nouvelle zone à contrôler sera la surface comprise entre le diamètre intérieur 3,1 mm et le diamètre 4,6 mm.

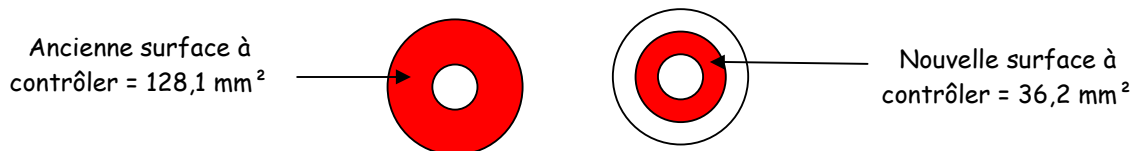


Illustration n°18 : Ancienne et nouvelle surfaces à contrôler sur l'épanoui

CONCLUSION

A travers ce manuscrit, j'ai mis en évidence toute l'utilité d'appliquer la méthode des éléments finis pour résoudre des problèmes ou bien pour effectuer des recherches dans le domaine industriel.

Pour cela, je me suis principalement appuyé sur un cas concret rencontré en entreprise et résolu grâce à cette méthode.

Exemple de domaine où l'application de la méthode est intéressante:

- Analyse des contraintes sur ailes d'un avion

- Problèmes axisymétriques

- Analyse d'écoulement de fluide

- Analyse du transfert de chaleur

- Etc.

La méthode des éléments finis doit faire partie du bagage que doit posséder chaque ingénieur et technicien de l'industrie, tant elle s'est imposée dans des domaines très divers (mécanique des solides et des fluides, thermique, électricité, magnétisme...).

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Guide des assemblages vissés : conception et montage* ; SOUVIGNET, BRAND, PEYRET ; 1986 ; CETIM ; p. 11

[2] *Norme française assemblages vissés : NF E 25-030-1* ; AFNOR ; Décembre 2007 ; p. 18

[3] *Conception et dessin* ; Claude BARLIER ; MEMOTECH ; Décembre 1998 ; p. 89

[4] *Thèse sur élastoviscoplasticité des aciers polycristallins* ; Stéphane BERBENNI ; Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM, centre de Metz) ; thèse soutenue le 14 janvier 2002 ; p. 137

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Illustration n°1 : Analyse par éléments finis d'une automobile.....	p2
Illustration n°2 : Surface avant de l'épanoui.....	p3
Illustration n°3 : Représentation en axisymétrie des pièces.....	p5
Illustration n°4 : Maillage des pièces.....	p6
Illustration n°5 : Courbe de traction de l'acier DC04.....	p7
Illustration n°6 : Courbe de plasticité de l'acier DC04.....	p7
Illustration n°7 : Tableau des valeurs de la courbe de plasticité de l'acier DC04.....	p8
Illustration n°8 : Table de valeur de contrainte vraie.....	p8
Illustration n°9 : Détermination de l'effort et du blocage.....	p9
Illustration n°10 : Détermination du lieu de contact entre pièces.....	p10
Illustration n°11 : Détermination du type de contact utilisé.....	p10
Illustration n°12 : Déformée avant et après pose de 80% de l'effort maxi.....	p11
Illustration n°13 : Evolution des contraintes au sens de Von Mises (effort maxi).....	p13
Illustration n°14 : Déplacements de l'épanoui (effort maxi).....	p13
Illustration n°15 : Déformée avant et après pose de l'effort mini.....	p14
Illustration n°16 : Evolution des contraintes au sens de Von Mises (effort mini).....	p15
Illustration n°17 : Déplacements de l'épanoui (effort mini).....	p16
Illustration n°18 : Ancienne et nouvelle surfaces à contrôler sur l'épanoui.....	p16

Abstract

Le but de ce manuscrit est de faire comprendre l'utilité de la méthode des éléments finis aux ingénieurs et techniciens de l'industrie, en vue de maîtriser sa pratique et de généraliser son utilisation. Le fonctionnement de la méthode, les difficultés à surmonter pour la mettre en pratique et ce qu'on peut en attendre sont également indiqués dans ce manuscrit.

The purpose of this manuscript is to help the engineers and technicians to understand the utility of the finite element method, for controlling its practice and spreading its use. The functioning of the method, the difficulties of putting it into practice and what we can expect are also covered in this manuscript.