

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA -JIJEL

Faculté des Sciences et de Technologie

Département de Génie Mécanique

جامعة جيجل
مكتبة كلية العلوم والتكنولوجيا
الرقم البريدي M.2497

Projet de Fin d'Études

*Pour l'Obtention du Diplôme
De Master 2 en Génie Mécanique
Option Mécanique des structures et des matériaux*

Thème

**Simulation numérique de l'interaction verre-métal
Application : Aux récepteurs du capteur solaire
cylindro-parabolique**

Les membres du jury :

*Dr.R Belhadef.
Mr .H.Feninech
Mr.S.Bouneche
Dr.Y.Damegh*

*Président
Examineur
Encadreur
co-Encadreur*

Présenté par :

*BOUKELOUHA Hamza
BOUCHEMOT Radhawan*

Promotion 2016

Université de Jijel

Remerciement :

Nous remercions en premier lieu Dieu le tous puissant de nous avoir accordés la volonté et la foie pour mener à bien nos études.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre reconnaissances notre promoteur Mr S. Bounneche et Dr Y. Demagh assistant à l'université d'avoir guidés et conseillés pour accomplir ce modeste travail.

Nous aimerons remercier l'ensemble des enseignements qui ont contribué de près ou loin à notre formation ; sans oublier nos collègues de classe Master mécanique des structures et des matériaux.

En fin, nous n'oublions pas tous ce que nous ont aidé de proche où de loin pour la réalisation de ce travail.

Hamza et Radhwane





Dédicace

Grâce à dieu, ce mémoire a été réalisé c'est avec une très grand joie que je dédie ce travail à :

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

*A toute ma grande famille, **BOUCHEMOT.***

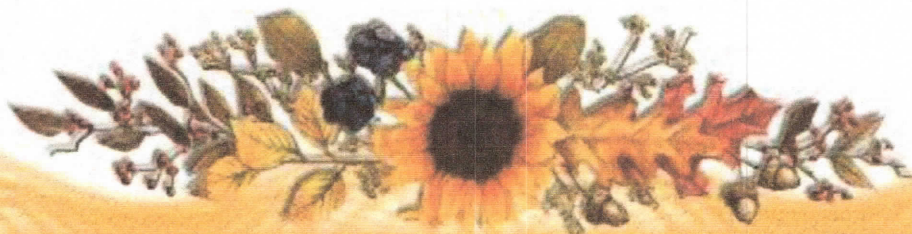
*A tout le groupe **MSM/2016***

A Tous ceux que j'aime et je respecte.

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mon cher binôme

***Boukelouha Hamza** et toute sa famille.*

bou.radhwane





Dédicace

À la mémoire de mon père,

Requiescat in pace !

Je dédie ce mémoire

À mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs

Encouragements.

À mes frères.

À ma sœur Amira et mon cousin Azaddine

À mes amies et mes camarades.

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du

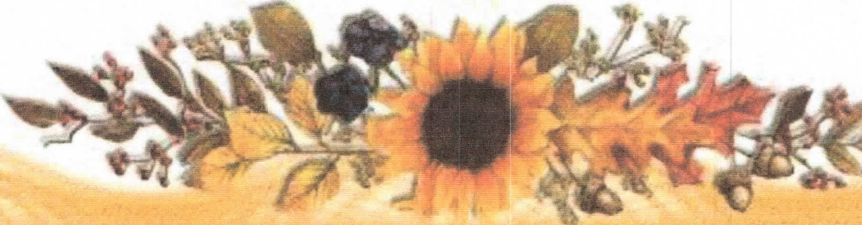
Primaire, du moyen, du secondaire ou de

L'enseignement supérieur.

À la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mon cher

binôme Bouchemat Radhwane et toute sa famille.

Bou. Hamza



Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Recherche bibliographique	
I.1 Introduction	3
I.2 Différents travaux de recherches.....	3
I.3. Conclusion	8
Chapitre II : Position du problème	
II.1. Introduction	20
II.2. Structure d'un concentrateur cylindro-parabolique (CCP).....	20
II.2.1. Le collecteur.....	20
II.2.1.1.Réflecteur.....	21
II.2.1.2. Le Mécanisme de poursuite.....	21
II.2.2. Le Tube récepteur.....	22
II.2.2.1.Les composantes d'un tube récepteur.....	22
II.3. L'enveloppe de récepteur	23
II.3.1.les matériaux possible utilise dons un enveloppe.....	24
II.3.1.1.la partie métallique.....	25
II. 3.1.2. la partie de verre.....	26
II.4. problématique	32

Chapitre III : Introduction COMSOL Multiphasiques 5.3a et Modélisation de la structure étudiée

III.1.COMSOL Multiphasiques 5.3a.....	28
III.2.Présentation Générale de COMSOL.....	28
III.3. Les éléments finis.....	29
III.3.1.Fonctionnement d élément fini.....	29
III.3.2.Application de la méthode des éléments finis à la mécanique.....	29
III.3.2.1.Définitions et notations.....	29
III.3.2.2.Travail d'une force et d'un moment.....	31
III.3.3.Équations fondamentales.....	31
III.3.3.1.Équations d'équilibre local	31
III.3.3.2.Relations déformations-déplacements.....	31
III.3.3.3.Formulation générale (méthode directe).....	33
III.3.4.Processus de calcul (cas statique)	34
III.3.5.Critère de von Mises (critère de l'énergie de distorsion élastique).....	35
III.3.6. Les équations qu'utilisées dans le COMSOL.....	37
III.4.Principe d'utilisation.....	40
III.5.Module.....	40
III.6. Utilisation COMSOL.....	41
III.6.1. Choix du modèle.....	41
III.6.2.Géométrie de la structure étudiée.....	42
III.6.3. Physique du modèle.....	42
III.6.3.1.Définition du matériau	42

III.6.3.2. Définition des conditions aux limites	42
III.6.4. Maillage.....	43
III.6.5. Simulation	43
III.6.6. Visualisation des résultats.....	43
III.7. Modélisation Numérique par COMSOL MULTIPHYSICS.....	43
III.7.1. L'interface de COMSOL.....	43
III.7.2. Création du modèle de simulation.....	45
III.7.3. Géométrie.....	46
III.7.4. Ajout des propriétés du matériel composant les deux tubes.....	46
III.7.5. Ajout des conditions aux limites.....	47
III.7.6. Maillage.....	48
III.7.7 Simulation et traitement des résultats.....	49
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1. L'Effet du changement de la profondeur de tube de métal inclus dans le tube de verre.....	51
IV.2. L'Effet du changement de l'épaisseur de tube de métal inclus dans le tube de verre.....	54
VI.3. Conclusion	56
Conclusion et perspectives.....	57

Liste des Figures

Fig.I.1 : Schéma de l'installation de chauffage par induction.....	4
Fig.I.2 : Effet du CET sur les efforts axiaux.....	4
Fig.I.3 : Gain de poids de la couche d'oxyde pour différentes températures.....	5
Fig.I.4 : Distribution de contrainte dans le tube de verre.....	7
Fig.I.5 : L'effet de l'épaisseur sur la contrainte axiale maximum.....	7
Fig.I.6 : Le soudage de fonte usine tout en fabriquant un joint de tube solaire en employant la technique flamboyante.....	8
Fig.I.7 : La distribution de la contrainte axiale.....	8
Fig.I.8 : La distribution de la contrainte circumferential.....	9
Fig.I.9 : Le profil de la composante de la contrainte résiduel le long de X-X (le graphe bleu) et le long de Y-Y (le graphe rouge).....	9
Fig.I.10 : Les dimensions des composants de l'enveloppe.....	10
Fig.I.11 : l'effet de l'épaisseur de tube de métal sur le tube de verre	11
Fig.I.12 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes épaisseurs de tube de métal.....	11
Fig.I.13 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes épaisseurs de tube de verre.....	12
Fig.I.14 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes Diamètre de tube de verre.....	13
Fig.I.15 : La distribution de contre sur l'extrémité de tube métallique.....	14
Fig. I.16 : Différentes formes de coupe du contact de tube en métal à l'intérieur du mur de tube de verre.....	15
Fig.I.17 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes formes de Tube de métal, le long de direction radiale (Y-Y).....	15
Fig.I.18 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes formes de tube de métal, le long de tube de verre (X-X).....	16

Liste des Figures

Fig. I.19 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle suivant l'axe z pour différentes profondeurs de pénétration du tube en métal incluse dans le tube en verre.....	17
FigI.20 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes Profondeurs de tube en métal incluse dans le verre.....	18
Fig. II. 1 : Composante de concentrateur cylindro-parabolique.....	20
Fig. II.2 : Représente les différentes épaisseurs d'un réflecteur de CCP.....	21
Fig.II.2 : Mécanisme de poursuite	22
Fig.II.4 : les différents composants d'un tube récepteur.....	23
Fig. II. 5 : L'enveloppe d'un tube récepteur.....	24
Fig.II.6 : Le tube métallique de l'enveloppe tube récepteur.....	24
Fig.II.7 : Partie de verre d'enveloppe tube récepteur.....	26
Fig.III.1 : Géométrie de la structure étudiée.....	42
Fig. III.2: L'interface de comsol 3.5a.....	44
Fig. III.3: Choisir la dimension et modale mécanique	45
Fig. III.4: Précision de modale utilise.....	45
Fig.III.5 : Définition le démontions de la système.....	46
Fig.III.6 : Définition les propriétés de chaque élément de système.....	47
Fig.III.7 : Condition aux limites.....	48
Fig. III.8: Maillage.....	49
Fig.III.9. Le résultat.....	50
Fig. IV .1. . Différentes profondeurs choisies du tube métal inclus dans le tube de verre.....	52

Liste des Figures

- Fig. IV.2.** . Contours du contrainte de Von Mises au sein de le joint verre-métal pour différentes profondeur de tube métal inclus dans le tube de verre.....53
- Fig .IV .3.** Différentes épaisseurs choisies du tube métal inclus dans le tube de verre..... 54
- Fig .IV.4** . Contours de la contrainte de Von Mises au sein de le joint verre-métal pour différentes de tube métal inclus dans le tube de verre..55
-

Liste des Tableaux

Tab.I.1 : résultats de force d'étanchéité.....	5
Tab.I.2 : résultats d'essais de traction.....	6
Tab.I.3 : dimension de différentes formes de tube en métal.....	14
Tab.I.4 : tableau de quelque résultat de recherche bibliographique	19
Tab.II.1 : les composantes de kovar.....	25
Tab.II.2 : les composantes de SS430.....	25
Tab.II.3 : les composantes de verre borosilicate.....	26
Tab.VI.1 . la profondeur de tube de métal.....	56
Tab.VI.2 . L'épaisseur de tube de métal.....	56

Nomenclature

Nomenclature

<i>Symboles</i>	<i>Désignations</i>	<i>Unités</i>
σ_x	contrainte axiale	MPA
K	différent coefficient de dilatation thermique	%
T	Température	°c
T	Temps	min
σ_θ	contrainte circonferentielle	MPA
τ_{xy}	contrainte tangentielle	MPA
t_m, t_g	épaisseur	mm
M	moments	Nm/m
P	forces de cisaillement	N/m
E	Module de Yong.	N/m ²
β	facteurs de flexibilité	
α	coefficient de dilatation thermique	
ΔT	changement de température	°c
ν	coefficient de Poisson	-
R	rayon moyen	mm
X	distance de l'interface	mm
θ	l'angle de rotation	
K, K', K''	facteurs de flexibilité	
S	l'aire	mm ²
ε	tenseur des déformations	-
G	module de cisaillement.	-
Ω		

Nomenclature

Abréviations	
CCP	Concentrateur cylindro-parabolique
CET	coefficient de dilatation thermique
MTS	Machine de traction
G	Verre
M	Métal
K	La matrice de raideur
M	La matrice de masse
U	le vecteur des déplacements
W	L'énergie de déformation

Introduction Générale

Introduction générale :

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 après la signature du protocole de Kyoto qui prévoit une baisse de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre des pays riches sur la période de 2002-2012 par rapport à 1990.

L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très long temps, sous diverses formes.

Parmi les formes qui deviennent l'énergie solaire est produit de l'électricité par la technologie des capteurs cylindro-paraboliques est utilisée dans la plus grande centrale thermique solaire au monde à Kramer Junction en Californie, Dans une centrale CSP, la production de chaleur dépend essentiellement du niveau d'ensoleillement. Afin d'obtenir la température nécessaire, le rayonnement solaire est concentré par les capteurs cylindro-paraboliques groupés en champs de miroirs.

Ces capteurs peuvent mesurer plus de 600 mètres de long et sont constitués de segments de miroirs paraboliques. Les capteurs suivent la trajectoire quotidienne du soleil et captent le rayonnement solaire dans la ligne focale des miroirs pour le diriger vers le 'cœur' de la centrale CSP : les tubes récepteurs sous vide munis d'un revêtement spécial. Les tubes récepteurs convertissent le rayonnement solaire en énergie thermique. Leur durabilité et leur rendement est donc essentiel à une rentabilité durable de la centrale solaire. Circulant dans le tube récepteur, le fluide caloporteur est chauffé puis utilisé pour produire de la vapeur.

L'efficacité globale de la centrale électrique est déterminée par la température de service maximale du fluide caloporteur employé.

L'huile thermique servant le plus communément de fluide caloporteur accepte une température de 400° C maximum.

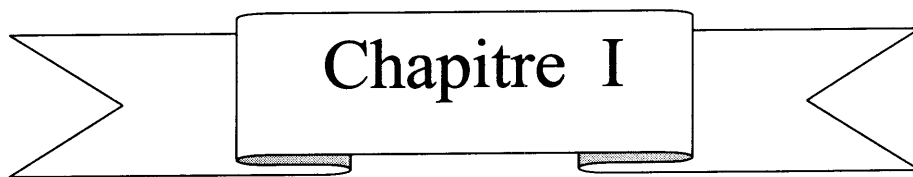
Une innovation essentielle pour augmenter le rendement de la centrale consiste à employer

Une méthode de transfert de chaleur pouvant fonctionner jusqu'à 550° C, comme les sels fondus ou la vapeur directe.

Dans ce travail, l'étude concerne l'enveloppe de tube absorbeur l'un des plus important composant de ces concentrateurs cylindro-paraboliques (CCP). L'objectif est de calculer la distribution des contraintes dans la partie de jonction verre-métal et de déterminer par la suite quelques paramètres pour la minimisation de l'influence de ces contraintes sur la jonction.

introduction

Une simulation numérique de la jonction verre-métal et l'analyse des contraintes sont présentés pour des enveloppes de différentes longueurs et épaisseurs du tube métal inclus dans le tube en verre. Les calculs numériques sont fait à l'aide du code COMSOL Multiphysiques. Les résultats numériques obtenus montrés au chapitre (IV).



Recherche bibliographique

I.1. Introduction :

Les systèmes solaires à concentration offrent la possibilité de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, les températures peuvent aisément dépasser les 500 °C et le rendement de conversion est généralement élevé. En exploitant le rayonnement solaire direct, considéré comme la source principale et reste très considérable à l'échelle planétaire, ces technologies offrent une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts ainsi que la possibilité de l'hybridation de ces installations.

Dans le domaine de l'électricité solaire, il semble que la technologie des concentrateurs cylindro- paraboliques (CCP) soit la plus économique et la plus robuste.

Ces technologies font toujours l'objet de perfectionnement dans le but d'améliorer leurs rendements. D'une façon générale, les recherches sont axées sur l'enveloppe de récepteur, partir de jointe verre - métal.

I.2. Différents travaux de recherches :

I.2.1. Les recherche des travaux expérimentaux :

En 2010 **D. Lei et al [1]** ont fait une étude expérimentale sur le procédé de chauffage par induction pour faire la jonction verre-métal où ils ont utilisés le matériel représenté dans la fig.I.1.

- Support coulissant : pour facilite le déplacement du verre.
- Fin de course : pour déterminer la profondeur de métal dans verre.
- Thermomètre infrarouge : pour déterminer la température de chauffage.
- Bobines d'induction : pour chauffer le kovar.
- Tube de kovar (compensateur dilatation thermique).
- Tube de verre (enveloppe).

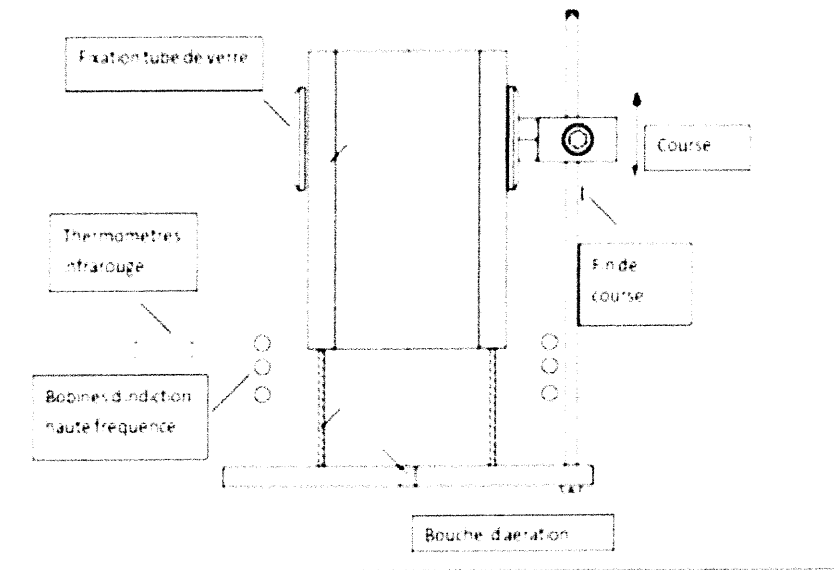


Fig. I.1 : Schéma de l'installation de chauffage par induction

En 2010 D. Lei et al, après leurs expériences, ont proposé que pour obtenir une bonne jonction verre-métal la condition suivante doit être satisfaite :

La contrainte axiale doit être inférieure à 5MPa. La figure I.2 montre que pour la contrainte axiale $\sigma_{xg} \leq 5\text{PA}$, la différence entre les coefficients de dilatation thermique du verre et du métal doit être inférieur à 7% ($k \leq 7\%$).

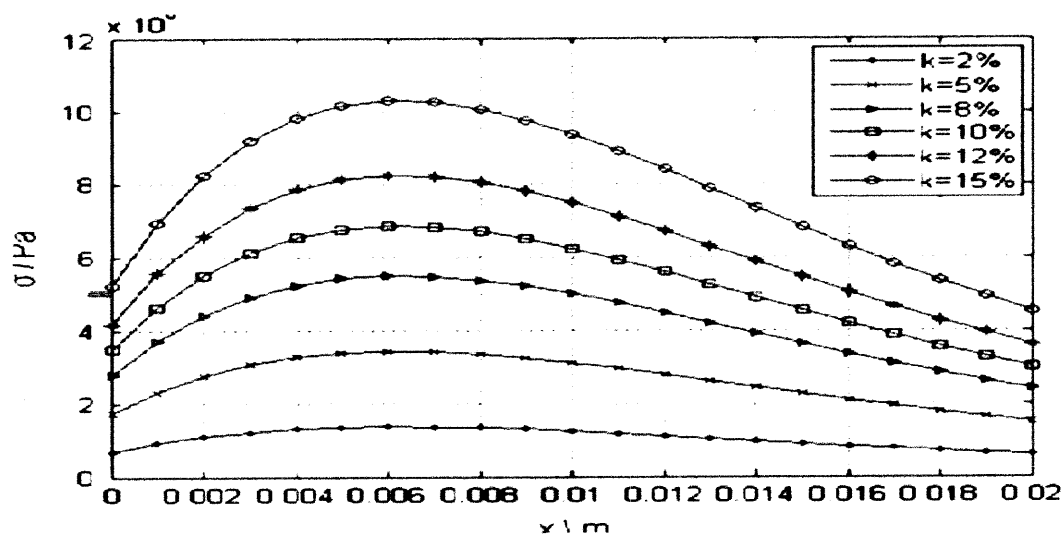


Fig. I.2: Effet du CET sur les efforts axiaux.

En 2012 D. Lei et al [2] ont utilisé le kovar pour la partie métal. Cette expérience consiste à mesurer le poids de film d'oxyde et son influence sur la force d'étanchéité.

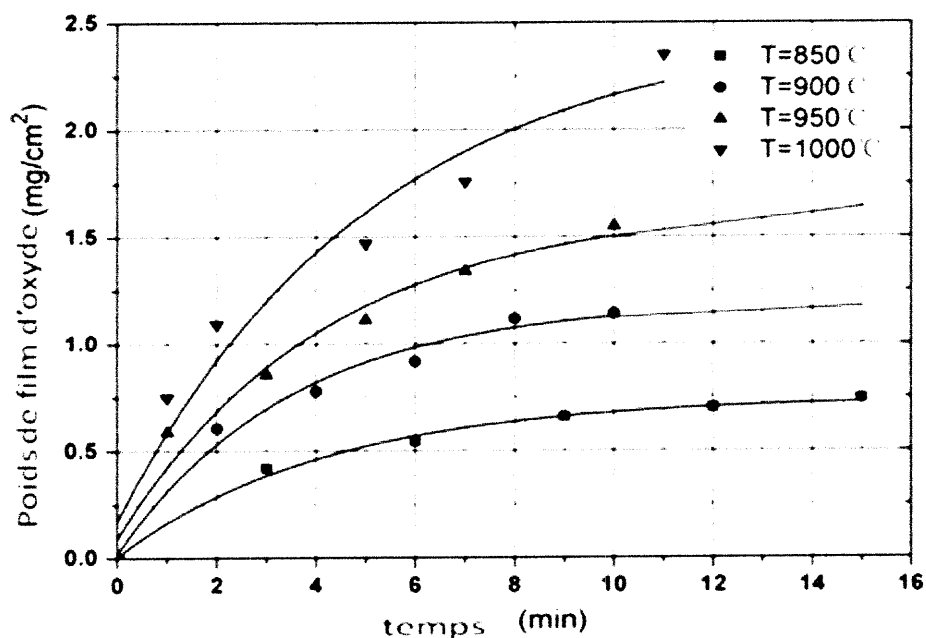


Fig. I.3: Gain de poids de la couche d'oxyde pour différentes températures.

La température et le temps sont les facteurs qui déterminent la formation du film d'oxyde. Si le film d'oxyde est épais, ce dernier est facilement séparé de la surface du Kovar quand le Kovar est refroidi à la température ambiante.

Si le film d'oxyde est trop mince, il sera absorbé, le verre ne peut pas mouiller efficacement le métal.

groupe	nombre	T c°	L'oxyde(mg/cm2)	de contrainte(Mpa)
1	1	850	0.328	4.20
	2	850	0.426	8.91
	3	900	0.724	3.83
	4	950	0.816	2.69
2	1	850	0.496	7.54
	2	900	0.595	6.86
	3	950	0.657	6.39
	4	900	0.883	3.73

Tab.I.1 : Résultats de force d'étanchéité.

Le poids de film d'oxyde varie de $[0.3-0.8] \text{ mg/cm}^2$. La force de soudage est en relation direct avec le gain du poids. Une excellente jonction verre-kovar est obtenue avec un poids de film d'oxyde du kovar de $0.3 \text{ à } 0.8 \text{ mg/cm}^2$.

En 2010 **D. Lei et al [3]** ont effectué une analyse mathématique de la théorie des coques minces et un essai de traction sur la machine MTS, au fur et à mesure que l'épaisseur de verre augmente la résistance à la traction augmente.

Épaisseur du tube de verre (mm)	Résistance à la traction (MPa)
2.2	1.96
2.6	2.11
3.0	2.42
3.3	2.56

Tab.I.2 : résultats d'essais de traction

La contrainte circonférentielle σ_θ a des valeurs négative c-à-d que c'est une contrainte de compression donc elle affecte la surface intérieure et comme le verre peut supporter des efforts importants de compression cette contrainte est négligée.

La contrainte tangentielle τ_{xr} a des valeurs très petites donc elle n'affecte pas le verre donc elle est négligée.

La contrainte axiales σ_{xg} a des valeurs positive c'est à dire que c'est une contrainte de tension donc elle affecte la surface extérieure et le verre ne peut pas supporter l'effort de tension donc ces forces devrait être principalement analysé.

$$\sigma_{xg} = \frac{6M(2 + \frac{2\beta_g M}{P} + \frac{P}{\beta_g M})}{t_g^2 \sqrt{1 + (1 + \frac{2\beta_g M}{P})^2}} e^{(-\beta_g X_0)} + \frac{t_m^2 E_m E_g \Delta t (\alpha_m - \alpha_g)}{t_g (t_m E_m + t_g E)_g}$$

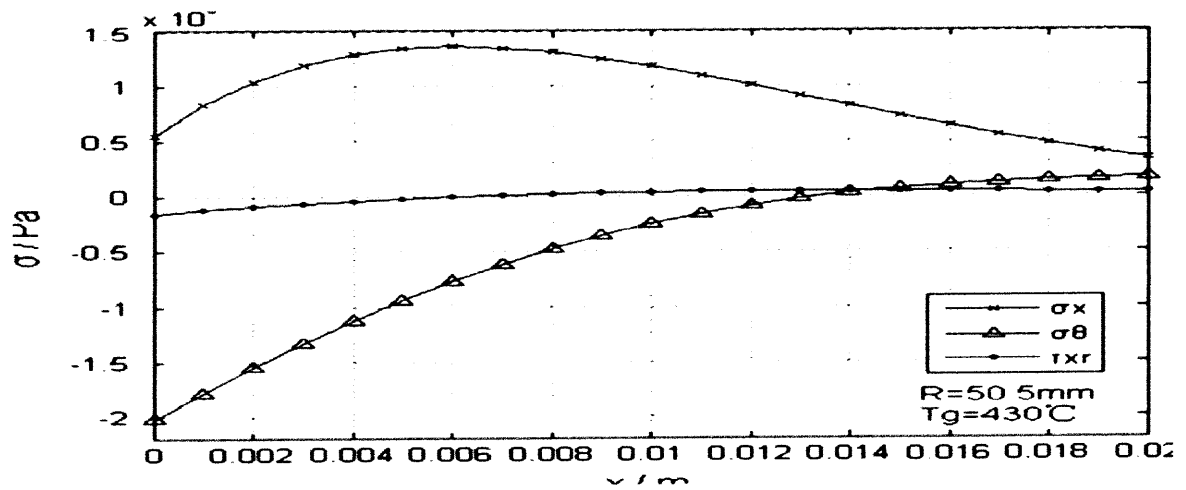


Fig. I.4 : Distribution de contrainte dans le tube en verre.

La figure I.5 représente la variation de la contrainte axiale en fonction des épaisseurs des deux tubes en verre et du kovar. Nous remarquons que plus l'épaisseur du tube de kovar augmente la contrainte axiale augmente tandis que plus l'épaisseur du tube en verre augmente la contrainte axiale diminue.

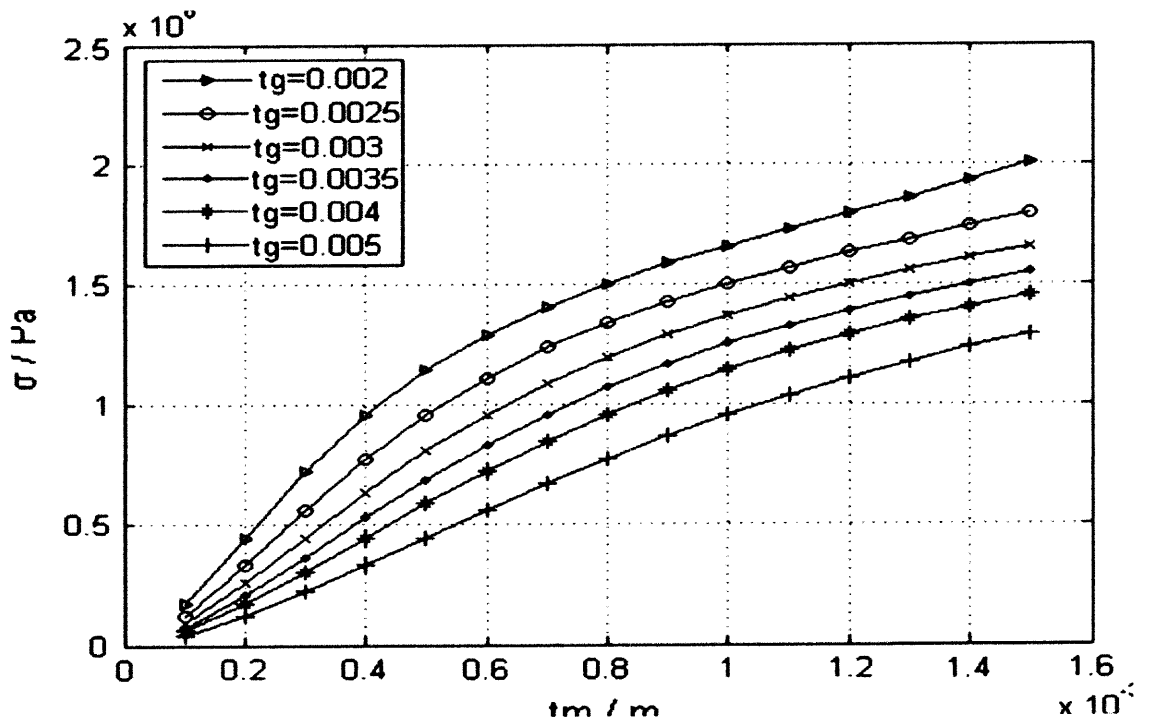


Fig. I.5: L'effet de l'épaisseur sur la contrainte axiale maximum.

En 2014 **O. Shekoofa et al** [4] ont réalisé une étude expérimentale sur le procédé de chauffage par chalumeau pour la jonction verre-métal.

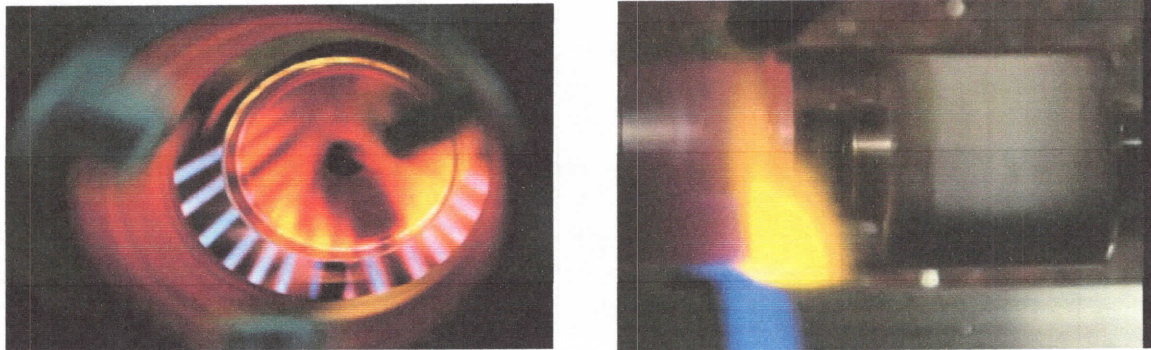


Fig.I.6 : Le soudage de fonte usiné tout en fabriquant un joint de tube solaire en employant la technique flamboyante.

En 2010 **D. Lei et al** ont réalisé une étude numérique sur la distribution de la contrainte axiale et la contrainte circonférentielle par le logiciel ANSYS.

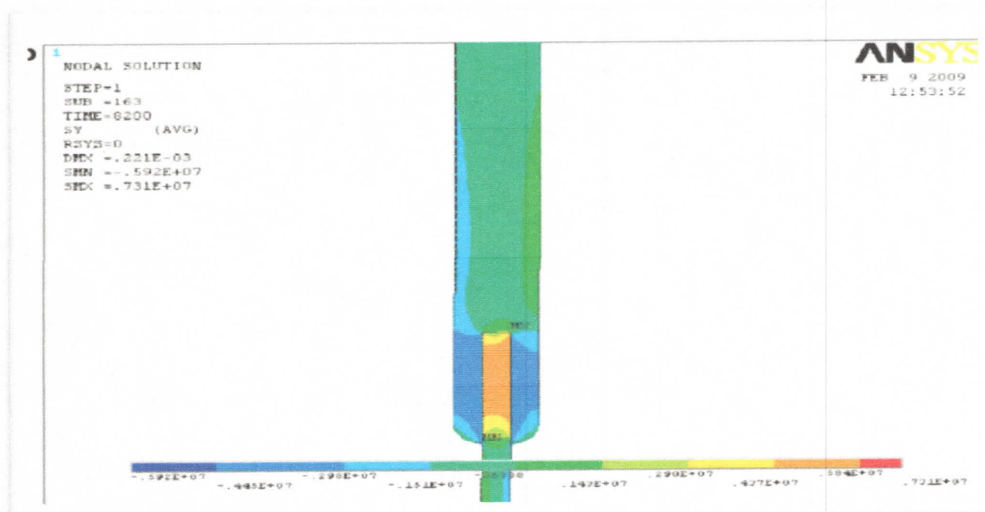


Fig. I.7 : La distribution de la contrainte axiale.

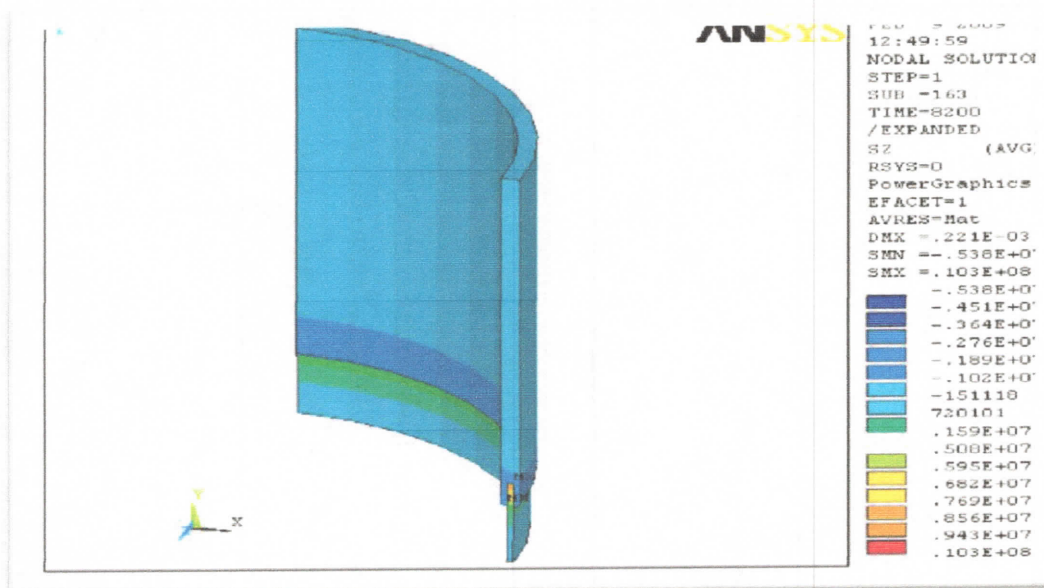


Fig. I.8 La distribution de la contrainte circonférentielle.

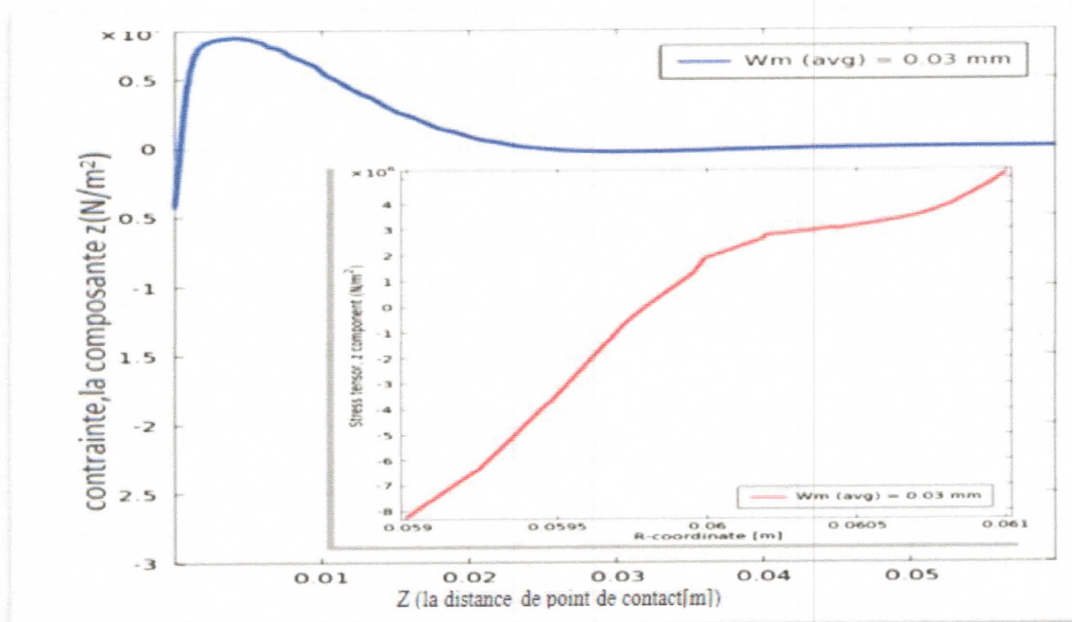


Fig. I.9 : Le profil de la composante de la contrainte résiduel le long de X-X (Le graphe bleu) et le long de Y-Y(le graphe rouge).

- Le graphe bleu :

La contrainte maximale a lieu quelques millimètres au-dessus du contact de métal-verre

- Le graphe rouge : représente les efforts sur la jonction verre métal
 - ✓ Coté externe : la valeur d'effort est positive (de tension)
 - ✓ Coté intérieur : la valeur est négative (compression)

-Effets des dimensions des composantes :

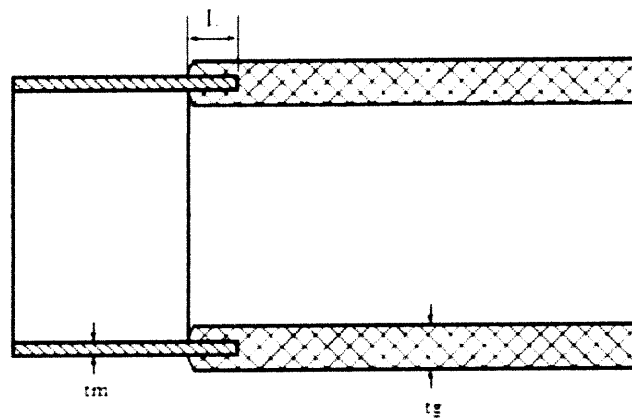


Fig. I.10 : Les dimensions des composants de l'enveloppe.

Cette étude paramétrique a été réalisée par la méthode d'élément finis pour déterminer comment l'effort a été affecté par des changements de dimensions des composants, les gammes des variables n'ont pas été prévues pour représenter les matériaux réels, mais ont été choisies pour entourer tous les matériaux possibles et raisonnables, quand un paramètre a été varié, les autres ont été maintenus aux valeurs représentatives de vraies matières employées dans cette expérience.

a. L'épaisseur de tube en verre et le tube en métal :

Les épaisseurs du tube de verre et de tube en métal sont des paramètres importants pour la configuration de joint. Quand l'épaisseur (t_m) de tube en métal et l'épaisseur (t_g) de tube en verre changent, l'effort axial maximum sur la surface du tube de verre changera suivant les indications de **fig. I.8** quand (t_g) augmente, l'effort axial diminue. Cependant, quand (t_g) augmente, le coût de tube de verre augmente et la transmission de chaleur de verre diminue.

Quand (t_m) augmente, la contrainte axiale augmente. Par conséquent, afin de réduire les efforts résiduels, le tube en métal devrait être aussi mince que possible.

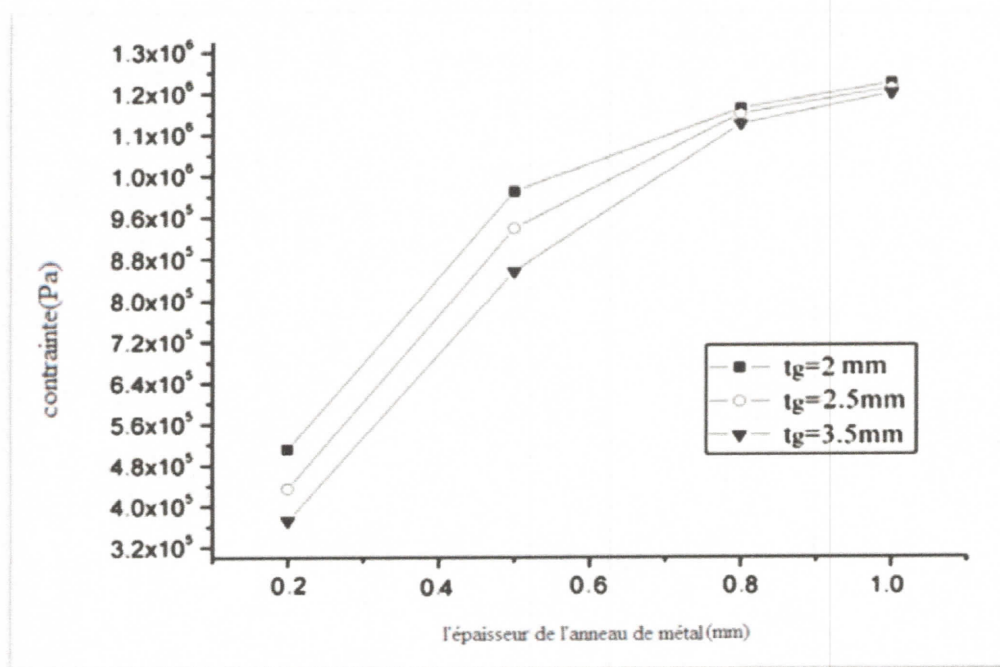


Fig.I.11: l'effet de l'épaisseur de tube de métal sur le tube de verre .

En 2014 Shekoofa et al ont fait une simulation numérique sur de différentes dimensions de forme et de l'épaisseur sur logiciel COMSOL.

a.1. Epaisseur de métal : La simulation montre que plus l'épaisseur de métal augmente plus la contrainte augmente

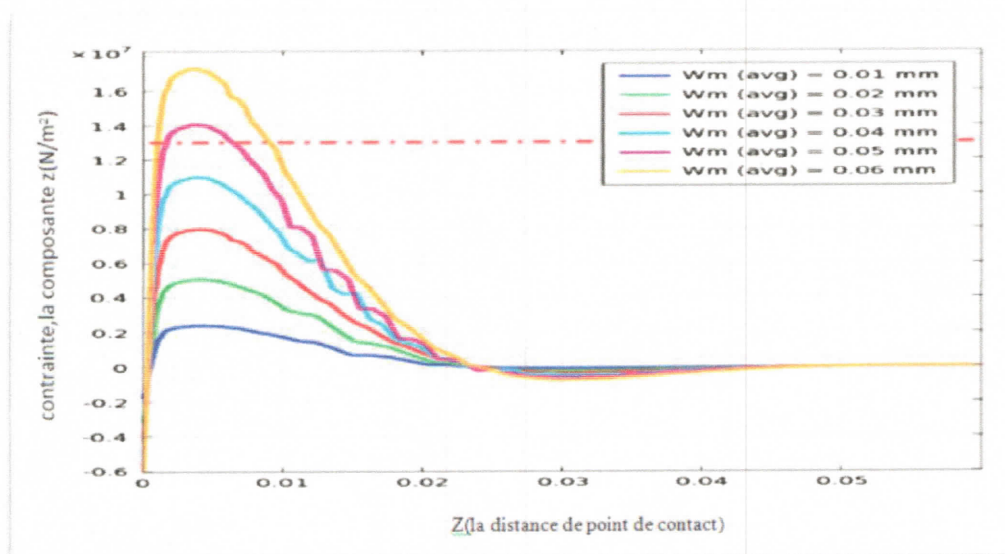


Fig.I.12 : variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes épaisseurs de l'anneau de métal.

a.2. Epaisseur de verre :

La simulation montre que plus l'épaisseur de verre augmente plus la contrainte diminue.

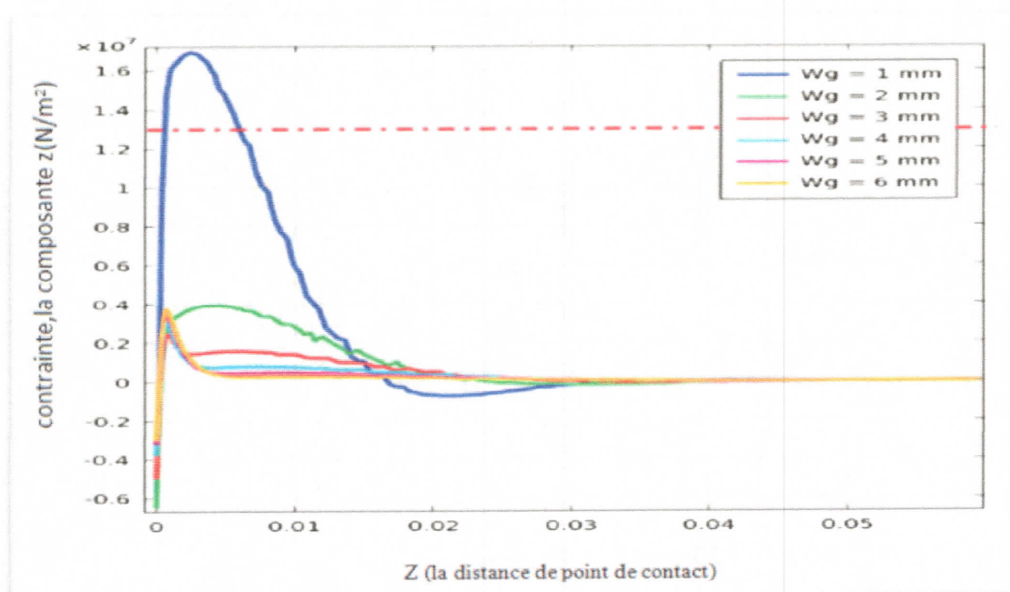


Fig. I.13: Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes épaisseurs de tube de verre

b. Rayon du tube de verre :

L'impact de la variation du rayon de verre de tube sur le comportement de la contrainte résiduelle a été étudié. Le graphe prouve que la contrainte résiduelle augmente très légèrement quand un tube de verre avec un plus grand rayon est utilisé. Par conséquent, l'effort résiduel n'est pas un facteur principal en déterminant le rayon de verre optimum de tube.

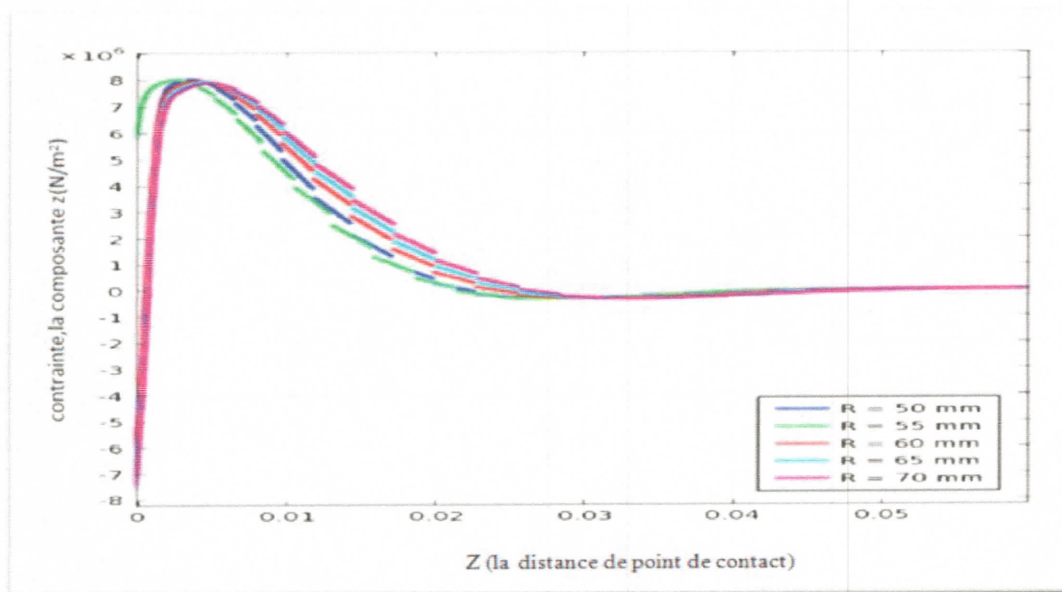


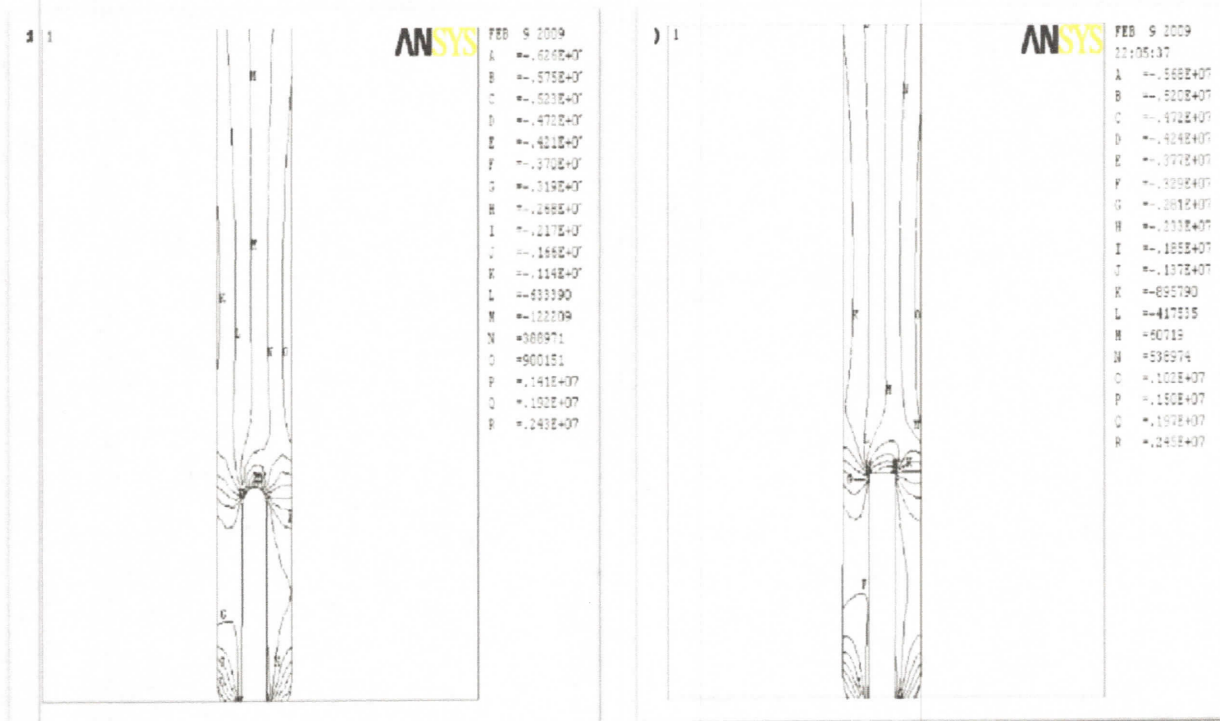
Fig. I.14 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différents diamètres du tube en verre.

C. Forme de la fin de tube de métal :

Afin d'étudier l'effet de la forme du bout du tube en métal D. **Lei et al** ont fait cette étude à l'aide d'éléments finis pour :

- Bout arrondie.
- Bout franc.

La distribution de contraintes axiales résiduelles a été simulée par le programme ANSYS comme présenter sur les deux figures I.15a, I.15b. On remarque que les contraintes axiales au bout arrondi sont inférieures à ceux du bout franc.



a)

b)

Fig. I.15 : La distribution de contrainte sur le bout du tube en métal.

- Différentes formes de tube en métal :

Les dimensions de ces différentes formes des quatre-éléments de $[W_a, W_b, W_c, W_d]$ sont présentés dans le tableau suivant :

Configuration	W_a	W_b	W_c	W_d
Forme(1)	0.015	0.015	0.015	0.015
Forme(2)	0.02	0	0	0.04
Forme(3)	0	0.02	0.04	0
Forme(4)	0.01	0.01	0.02	0.02
Forme(5)	0.02	0.02	0.01	0.01

Tab. I.3 : Dimensions de différentes formes de tube en métal.

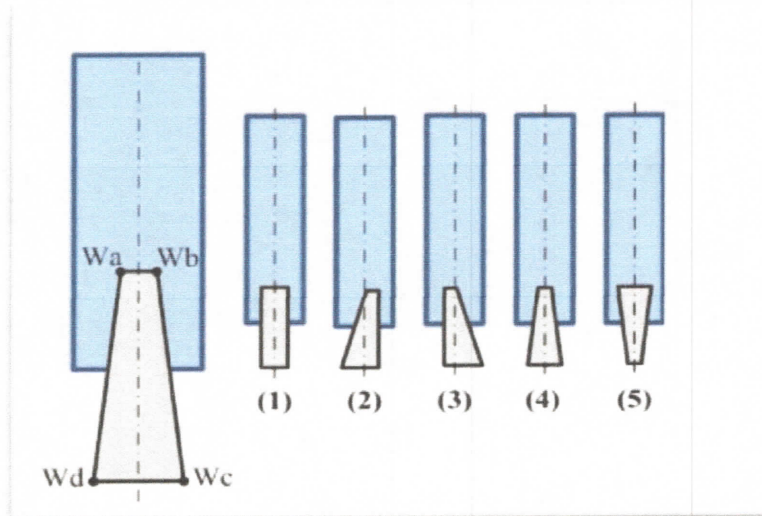


Fig. I.16 : Différentes formes de coupe du contact de tube en métal à l'intérieur du mur de tube en verre.

En 2010 **D. Lei et al** ont réalisés une multitude de simulations sur différentes formes de tube en métal, l'épaisseur moyenne de tube en métal dans tous les cas est $30 \mu\text{m}$.

Les figures I.17 et I.18 montrent et comparent les changements du profil de contrainte résiduelle dû aux différentes formes de tube en métal selon les résultats. La forme de tube en métal a un impact important sur le niveau et le profil de la composante Z de la contrainte résiduelle.

La forme trapézoïdale de contact mène à des contraintes plus faible.

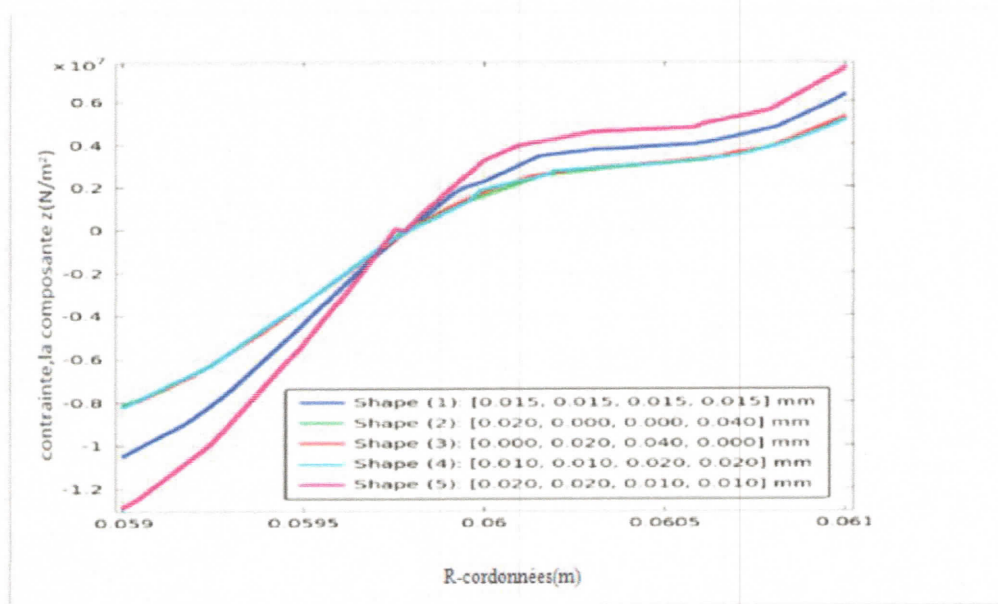


Fig. I.17: Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes formes de tube de métal, le long de direction radiale (Y-Y).

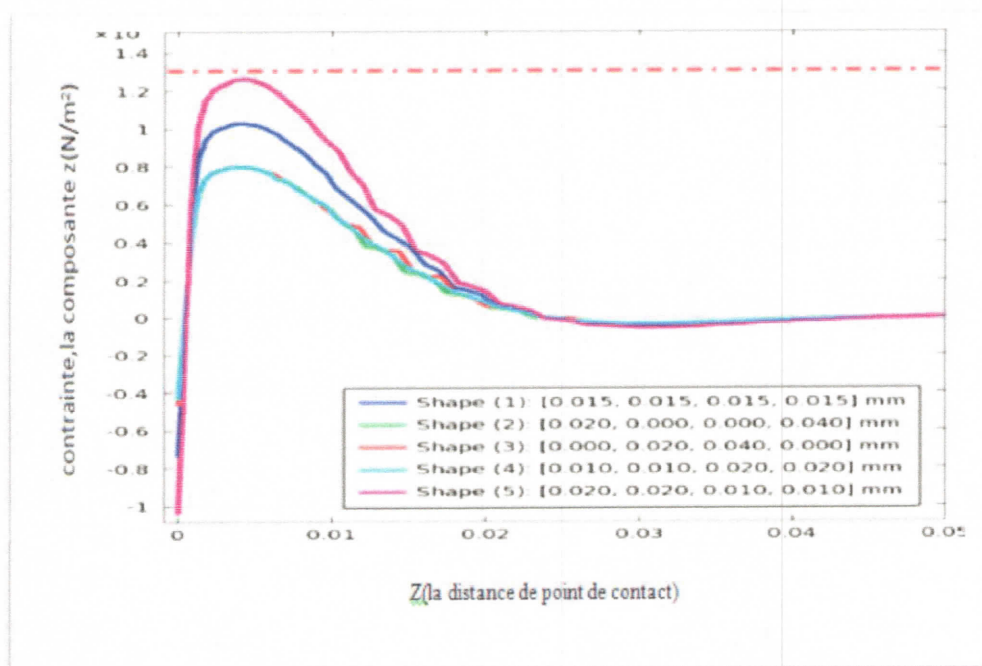


Fig. I.18 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes formes de tube de métal, le long de tube de verre (X-X).

Exactement une forme en coupe de rectangle n'est pas celle facile à fabriquer utilisant de telles épaisseurs minces en métal. Ainsi la fabrication de tube en métal avec une forme trapézoïdale est plus pratique. Elle peut mener à un niveau plus bas de contrainte.

- Effet de la profondeur de tube en métal sur le tube en verre :

En 2010 D. Lei et al ont simulé la distribution de la contrainte axiale pour différentes profondeurs. La profondeur de tube de métal inclus dans le tube en verre est un important, facteur influe sur les contraintes et la résistance du joint.

Quand l'absorbeur du récepteur solaire est en service, la jonction verre-métal sera sollicitée par une contrainte de tension axiale car la température du tube central en métal est beaucoup plus haute que la température du tube en verre.

La distribution de la contrainte de traction dans le joint est dangereuse. Cette contrainte est toujours appliquée sur la partie externe du joint et aussi au bout du tube en métal inclus dans le verre. La contrainte axiale maximum diminue avec l'augmentation de la profondeur de pénétration de 2mm à 10mm. La contrainte circonférentielle maximum a la même tendance.

Donc cette simulation montre que la résistance du joint augmente avec l'augmentation de la profondeur de pénétration du tube en métal dans le tube en verre.

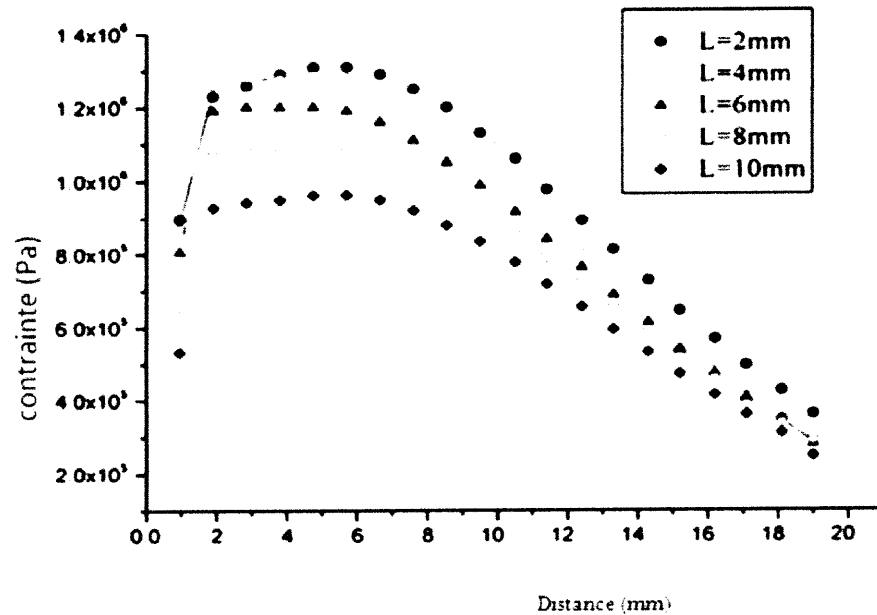


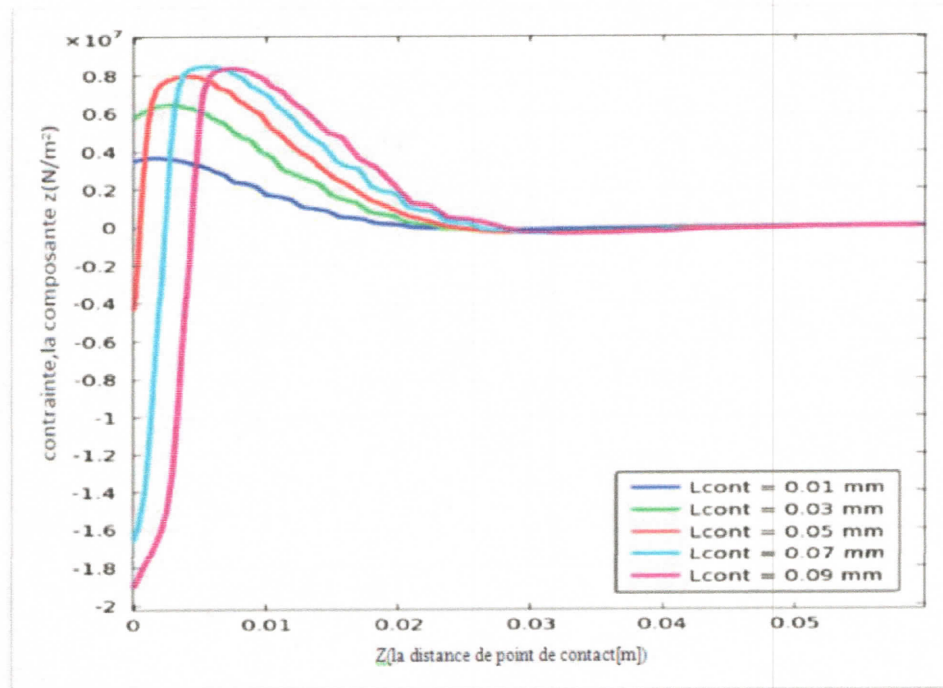
Fig I.19 : Variation de la composante de la contrainte résiduelle suivant l'axe z pour différentes profondeurs de pénétration du tube en métal incluse dans le tube en verre.

En 2014 **Shekoofa et al** ont simulé la distribution de la contrainte axiale pour différentes profondeurs de pénétration.

La profondeur de tube en métal inclus dans le tube en verre exerce également un effet relativement élevé sur la contrainte.

Suivant les indications de la fig. I.20, l'effort devient inférieur avec une profondeur de pénétration plus courte. Cependant, une profondeur plus courte de contact peut mener à une contrainte faible.

Par conséquent, la profondeur du métal est fixée à 5 millimètres.



FigI.20 : variation de la composante de la contrainte résiduelle pour différentes Profondeurs de tube en métal incluse dans le verre

I.3. Conclusion :

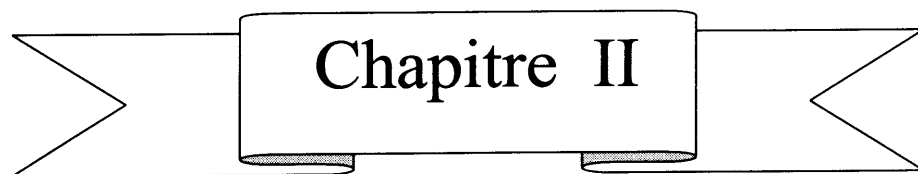
A partir des résultats cités dans les articles de **Sheekofa et al** et aussi **D. Lei et al** on peut conclure que le joint verre-métal dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- Les épaisseurs des tubes en verre et en métal ;
- La forme du bout du tube en métal ;
- La profondeur de pénétration du tube en métal dans le tube en verre ;
- Différence des coefficients de dilatation thermique du verre et du métal ;
- Poids d'oxyde qui provoque une faiblesse du joint et une mauvaise étanchéité.

Pour éviter ces problèmes on prend en considération quelque résultats des études suscités dans le tableau suivant :

Object à réaliser	Savant	Résultats
Poids d'oxyde	D. Lei et al	0.3 à 0.8 mg/cm ²
Forme du bout du tube en métal inclus dans le tube en verre.	Shekoofa et al	forme trapézoïdale
Profondeur de pénétration du tube en métal inclus dans le tube en verre.	Shekoofa et al	5 mm
Différence entre les coefficients de dilatation thermique du verre et du métal	D. Lei et al	<7%
Profondeur de pénétration du tube en métal inclus dans le tube en verre.	D. Lei et al	<8 mm

Tab.I.4. Tableau de quelque résultat de recherche bibliographique.



Position du problème

II.1. Introduction :

Tous capteurs cylindro-parabolique est constitué d'un réflecteur parabolique linéaire, qui concentre le rayonnement solaire direct sur un récepteur positionné le long de la ligne focale du réflecteur, dans lequel circule un fluide caloporteur. Pendant la journée, le réflecteur suit le soleil le long d'un axe unique.

Le fluide qui peut être de l'huile de synthèse, atteint une température d'environ 400°C au cours de son écoulement à travers le récepteur, afin de quoi il sera utilisé comme source de chaleur pour un système de génération de l'énergie électrique.

Aujourd'hui, les systèmes cylindro-paraboliques constituent la technologie la plus répandue avec un rendement électrique variant de 11 à 14% [5]

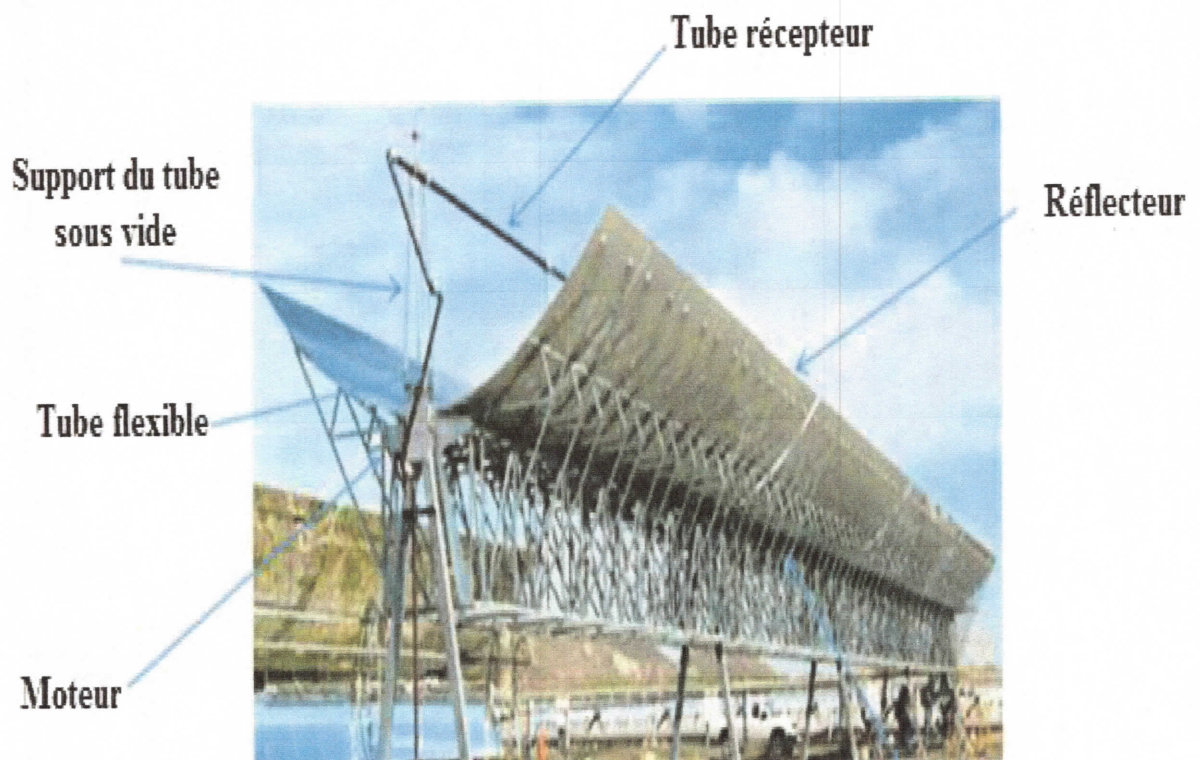


Fig.II. 1 : composante de concentrateur cylindro-parabolique

II.2. Les composants d'un concentrateur cylindro-parabolique [6] :

II.2.1. Le collecteur :

Le collecteur est la composante de base du champ solaire. Il est constitué d'un réflecteur cylindro-parabolique (miroir), d'une structure métallique (en acier), d'un tube récepteur et d'un système de poursuite solaire.

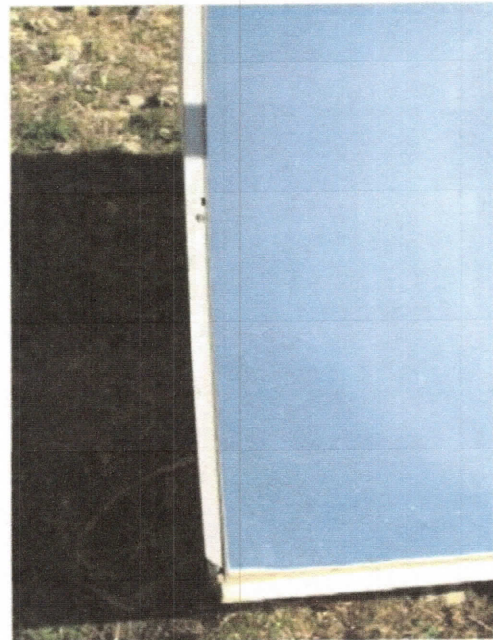
- La structure métallique doit être suffisamment solide afin de résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent.

II.2.1.1. Réflecteur

Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer dont le coefficient de transmission atteint les 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure et d'un enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident.



(a)



(b)

Fig .II.2 : représente les différentes épaisseurs d'un réflecteur de CCP.

(a)Miroir mince: [0.8 : 1]mm, (b) Miroir épais:[3 : 4]mm [6]

II.2.1.2. Le Mécanisme de poursuite :

Le rôle du mécanisme de poursuite est l'adaptation de l'inclinaison du capteur pour que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur. De cette manière, la radiation est réfléchiée sur la ligne focale se concentrant ainsi sur le tube récepteur. La (Fig.II.3) désigne le mécanisme de poursuite [6].



Fig.II.2 : Mécanisme de poursuite [6].

II.2.2 tube récepteur :

Afin d'augmenter la température du liquide caloporteur, on utilise des capteurs isolés avec vitrage. Pour cela, l'absorbeur doit être enfermé dans un tube de verre vidé de son contenu, l'air. Tout en laissant le rayon solaire pénétrer, la vitre empêche les rayons infrarouges diffusés de sortir : on réalise ainsi "l'effet de serre". Le verre fragile peut être remplacé par certains matériaux plastiques ayant la propriété de réaliser "l'effet de serre"; l'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de leurs certaines propriétés avec le temps. Il faudrait utiliser un tube en cuivre ou en acier (à bon coefficient de conduction) à revêtement sélectif [6].

II.3.1.les composantes d'un tube récepteur :

Un récepteur solaire de cuvette parabolique est l'un des éléments les plus importants dans le système d'alimentation thermique solaire pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique Le récepteur se compose a :

1) Un tube de métal : c'est un tube noir sert à absorber l'énergie solaire et véhiculer Le fluide caloporteur

2) Un tube de verre : est un tube transparent sert principalement à réduire de manière significative la perte de chaleur aux températures de fonctionnement élevées et pour protéger la surface sélective solaire d'amortisseur contre l'oxydation.

3) un absorbeur de gaz : L'invention concerne un procédé d'introduction d'un gaz inerte qui se trouve dans un contenant situé dans une chambre annulaire d'un tube absorbeur, entre le tube d'enveloppe externe et le tube métallique interne de celui-ci. Le contenant est ouvert par un procédé de perforation au laser consistant à diriger le faisceau laser sur le contenant à travers l'enveloppe tubulaire externe et à irradier le contenant jusqu'à créer une ouverture dans celui-ci et libérer le gaz inerte.

4) compensateur dilatation thermique : Appelé aussi le soufflet sert à réaliser la clôture son coefficient de dilatation thermique est nécessaire et à l'adapter pour la différence de dilatation thermique.

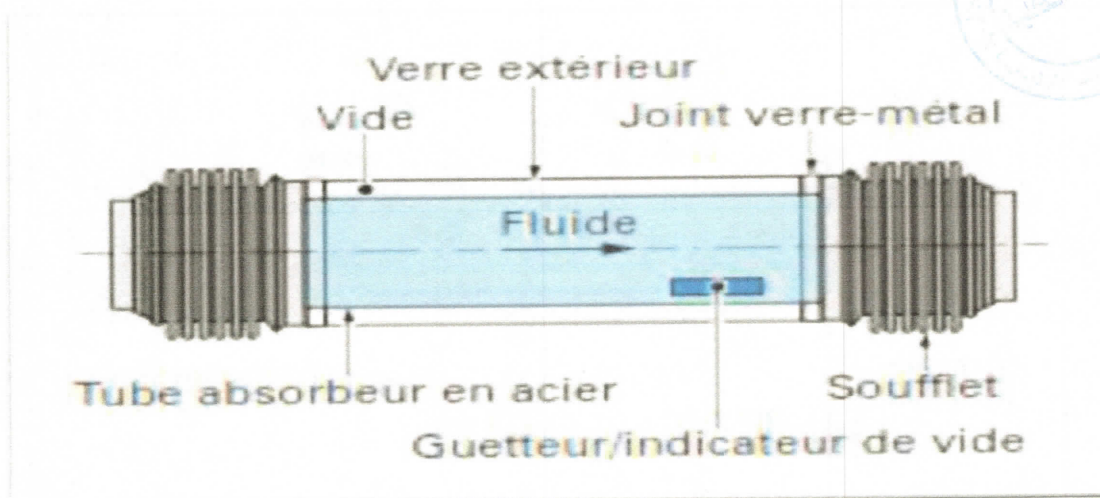


Fig.II.4 : les différents composants d'un tube récepteur [6].

II.3. L'enveloppe du récepteur :

L'enveloppe est un élément extérieur du récepteur qui est constitué principalement d'un tube long en verre placé au milieu et de deux tubes courts en métal. Ces deux derniers sont liés aux extrémités du tube en verre par soudage appelé jonction verre-métal :

- Partie métallique : les deux tubes de métal inoxydable ont un coefficient de dilatation thermique semblable à celle du tube en verre pour éviter les déformations thermiques irrégulières au niveau de la jonction et assurer l'étanchéité.
- La partie en verre : le tube en verre, enveloppe de l'absorbeur, doit être transparent afin de donner l'occasion aux rayons solaires de se pénétrer à travers sa surface latérale vers l'absorbeur. Le tube en verre a une épaisseur de quelque millimètre et une bonne résistance aux températures élevées (environ 450°C). L'existence du tube en verre a pour objet de protéger l'absorbeur contre la corrosion et la conservation de l'énergie thermique reflétée par l'absorbeur c'est à dire minimisation des pertes d'énergies.

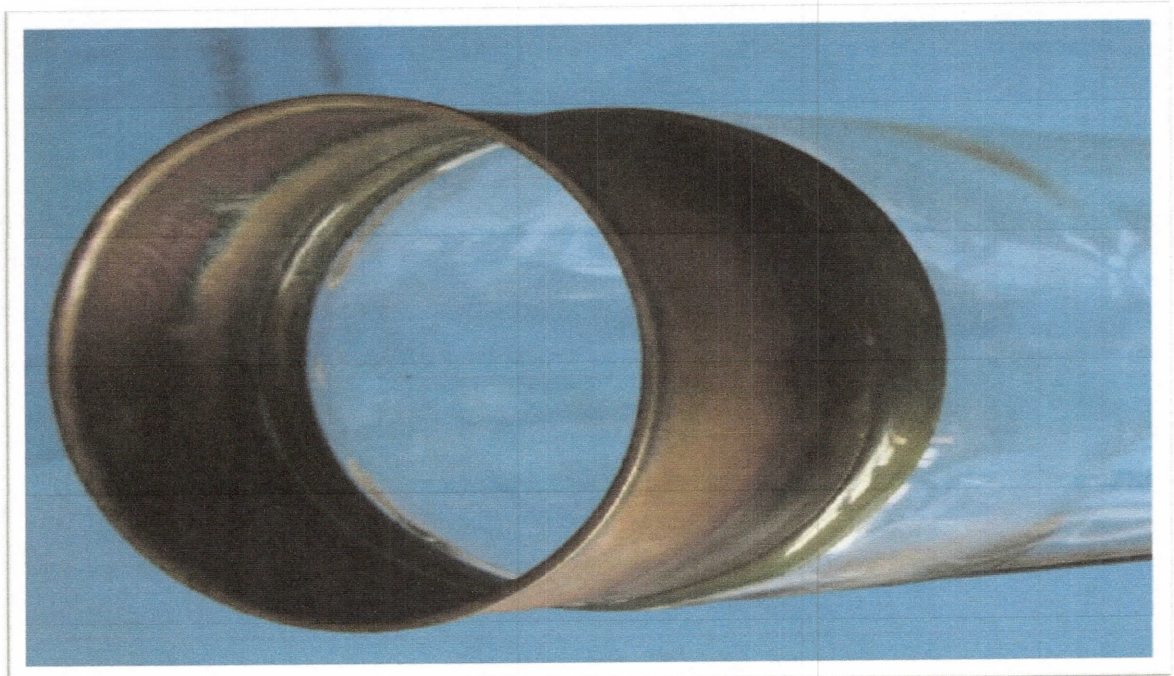


Fig.II. 5 : L'enveloppe de l'absorbeur.

II.3.1. Les différents matériaux utilisés dans une enveloppe :

II.3.1.1. La partie métallique :

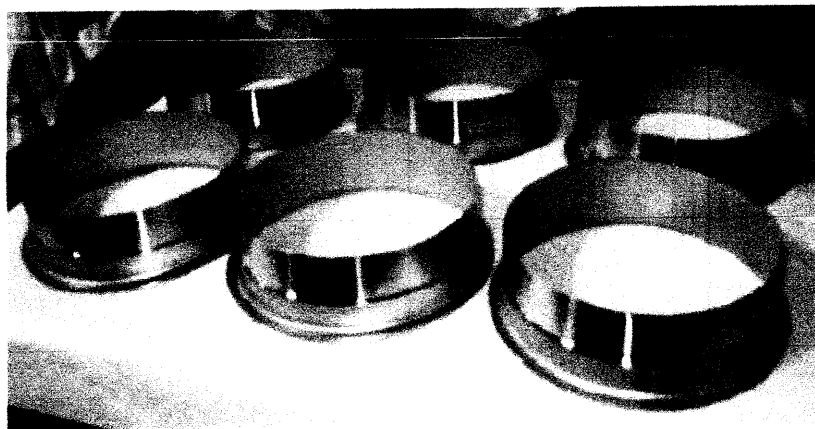


Fig.II.6 : le tube métallique de l'enveloppe tube récepteur.

Les métaux les plus favorables et les plus utilisés dans ce cas sont ceux qui ont les coefficients de dilatation thermique les plus proche de celle du tube en verre. Parmi lesquels on peut citer [7] :

- a. **Le kovar** : est un alliage de Fer-Nickel-Cobalt avec un coefficient de dilatation thermique égale à $6,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/m} \cdot ^\circ\text{K}$ qui est semblable à celui du verre, les proportions de ces composants sont présentées dans le tableau suivant :

Composante	Symbole	Pourcentage %
Nickel	N _i	29
Cobalt	C _o	17
Magnésium	M _n	0.30
Silicium	S _i	0.10
Fer	F _e	BALANCE
Carbone	C	0.02

Tableau II.1 : les composantes de kovar

- b. **Acier inoxydable SS430** : est un acier de ferrite anti-calorique de chrome est résistant à la corrosion atmosphérique son coefficient de dilatation thermique est égale à $10,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}/^\circ\text{C}$, les proportions de ces composants sont présentées dans le tableau suivant [7] :

Composante	Symbole	Pourcentage %
Nickel	Ni	2
Chrome	Cr	16.3
Manganèse	Mg	45
Carbone	C	4
Silicium	Si	40
Fer	Fe	BALANCE

Tableau II.2 : les composantes de SS430.

II.3.1.2. La partie de verre :

Le verre utilisé doit être résistant à la haute température et moins sensibles aux chocs thermiques la température de ramollissement est faible ces conditions sont satisfaites dans le verre borosilicate.



Fig.II.7 : partie de verre enveloppe du tube récepteur.

➤ **Le verre borosilicate :**

Le verre borosilicate ou verre à base de borosilicate est un type de verre supportant de hautes températures. Ce type de verre présente une température de travail intermédiaire entre les verres traditionnels à base de soude et les verres cristallins à base de plomb. Ce verre a un faible coefficient de dilatation thermique et est moins sensible aux chocs thermiques. Il est beaucoup employé comme composant principal dans les capteurs solaires thermiques à tube sous vide. Les proportions de ces composants sont présentées dans le tableau suivant [8] :

Symbole	Composante	Pourcentage(%)
SiO ₂	Dioxyde de silicium	70 – 80
B ₂ O ₃	Sesquioxyde de bore	7 – 13
Na ₂ O	Oxyde de sodium	4- 8
K ₂ O	Oxyde de potassium	4 – 8
Al ₂ O ₃	Oxyde d'aluminium	2 – 7

Tab.II.3 : les composantes de verre borosilicate.

II.4. Problématique :

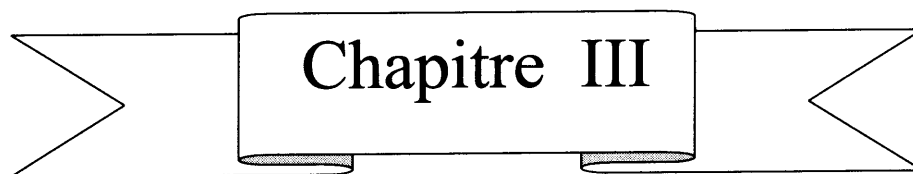
Le tube solaire du récepteur est un composant clé dans le système d'alimentation thermique solaire de cuvette parabolique. La rupture de la jonction verre-métal de l'enveloppe est la cause principale d'amputation des récepteurs aux centrales existantes.

Ces ruptures sont dues aux contraintes produites non seulement à l'interface de verre-métal mais également sur la surface externe du tube de verre près de la zone de joint.

Les contraintes résiduelles produites dans le joint ont été simulés par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL. L'objectif principal de cette simulation est la détermination de l'influence du tube en métal sur le tube en verre au niveau joint en fonction de :

- La profondeur de tube en métal inclus dans le tube en verre.
- L'épaisseur de tube de métal.

Notre problème d'origine était la réalisation expérimentale de la jonction verre-métal et à cause des divers problèmes rencontrés (manques du matériel), nous sommes décidés de simuler le problème posé par les méthodes numériques en utilisant l'un des logiciels existant. La méthode numérique que nous métrisons est la méthode des éléments finis et le logiciel COMSOL multiphysics est l'un des logiciels utilisant cette méthode. Donc nous allons utilisés le logiciel COMSOL multiphysics pour résoudre notre problème.



Chapitre III

Introduction COMSOL Multiphasiques 3.5a

III.1. COMSOL Multiphasiques :

COMSOL est un logiciel de simulation par éléments finis (FEM) permettant de résoudre tout type de problème pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles. Dans ce logiciel, les équations différentielles sont modélisées par des petits volumes permettant de transformer le problème continu en un problème comportant un nombre fini d'équations et d'inconnues. Le système d'équations algébriques obtenues peut être résolu à l'aide des techniques d'algèbre linéaire. Il faut noter que plus le volume de discrétisation est petit plus le modèle discret s'approche du modèle continu.

III.2. Présentation Générale de COMSOL

La simulation sur ordinateur est devenue une partie essentielle de la science et de l'ingénierie. L'analyse numérique des composants, en particulier, est importante pour de nouveaux produits ou l'optimisation des conceptions. Aujourd'hui, un large éventail d'options est disponible pour la simulation. Les chercheurs utilisent tout à travers les langages de programmation de base à différents niveaux de haut niveau par la mise en œuvre de méthodes avancées. Chacune de ces techniques a ses propres caractéristiques uniques, ils partagent tous un intérêt commun.

Pouvez-vous compter sur les résultats :

Il est utile de rappeler l'objectif lorsque l'on considère que le logiciel est fiable (lorsque l'on considère ce qui rend le logiciel fiable, il est utile de rappeler l'objectif). Vous voulez un modèle qui décrit avec précision ce qui se passe dans le monde réel.

L'environnement de simulation sur ordinateur est tout simplement une traduction des lois physiques du monde réel dans leur forme virtuelle, la simplification prend lieu dans le processus de traduction permet de déterminer l'exactitude du modèle résultant.

L'idéal serait donc de disposer d'un environnement de simulation qui comprend la possibilité d'ajouter un effet physique à votre modèle, c'est ce que COMSOL est tout sur.

C'est une plateforme flexible qui permet même aux utilisateurs de modéliser tous les aspects physiques pertinents de leurs conceptions, les utilisations avancées peuvent aller plus loin et utiliser leurs connaissances pour développer des solutions personnalisées applicables à leur situation particulière.

Pour installer et démarrer (exécuter) vous pouvez prendre votre simulation au niveau de production, par l'optimisation de tout aspect de votre modèle. Balayages de paramètres et des

fonctions de cible peut être exécuté droite dans l'interface utilisateur, du début à la fin COMSOL est un outil complet de résolution problème.

Comme vous devenez un utilisateur plus expérimenté de COMSOL votre confiance en simulation va croître, vous allez devenir un modéleur plus efficace et les résultats montreront qu'il le reste de cette introduction est dédié à vous donner un bon début pour atteindre cet objectif après une introduction générale à l'interface utilisateur plusieurs tutoriels ne vous guidera pas à pas à travers différents modèles types qui mettent en évidence caractéristiques importantes. Les tableaux d'informations vous donnent une idée de COMSOL capacité de fichiers associés, les fonctions et options intégrées. À la fin vous voulez bien sur votre façon de récolter tous les avantages, que COMSOL à offrir.

III.3. Les éléments finis :

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de référence pour le calcul des solutions de problèmes aux limites. Le principe de la méthode est directement issu de l'approche vibrationnelle.

L'idée de base de la méthode des éléments finis est de remplacer l'espace de Hilbert V sur lequel est posée la formulation vibrationnelle par un sous espace de dimension finie. Le problème approché posé sur V_h se ramène à la résolution d'un système linéaire dont la matrice est appelée matrice de rigidité.

Historiquement les premières prémices de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940 mais ce sont les mécaniciens qui ont développé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1950-1960. Après ces premiers succès pratiques, des mathématiciens ont considérablement développés les fondations théoriques de la méthode et proposés des améliorations significatives [11].

III.3.1. Fonctionnement d'élément fini :

En calcul de structures, un élément fini est caractérisé par deux matrices :

- La matrice de raideur [K]
- La matrice de masse [M]

III.3.2. Application de la méthode des éléments finis à la mécanique :

III.3.2.1. Définitions et notations :

On cherche ici à déterminer le vecteur des déplacements $\{U\}$, C'est un vecteur dont chaque composante est également appelée degré de liberté (ddl)

- 3 ddl de translation : U_x, U_y, U_z
- 3 ddl de rotation : $\theta_x, \theta_y, \theta_z$

On écrit alors le tenseur des déformations $[\varepsilon]$, qui modélise la façon dont le matériau va se déformer par rapport à sa position initiale [14].

Sous l'hypothèse des petites déformations, on a :

$$(A'B')^2 = (d_x + \frac{\partial u}{\partial x} d_x)^2 + (\frac{\partial v}{\partial x} d_x), \quad \varepsilon_x = \frac{A'B' - AB}{AB}$$

Comme $AB = d_x$, on a $A'B' = (1 + \varepsilon_x)d_x$

$$\implies 2\varepsilon_x + \varepsilon_x^2 = 2\frac{\partial u}{\partial x} + (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial x})^2$$

Sous l'hypothèse des petites déformations, on néglige les termes d'ordre 2 :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \tag{III.1}$$

Remarque : ε est sans dimension.

On écrit ensuite le tenseur de contraintes $[\sigma]$, qui représente les efforts internes qui s'appliquent dans la structure.

- $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$: contraintes normales
- $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$: contraintes de cisaillement

Une contrainte est homogène à une pression (N/m²).

Ces deux tenseurs sont liés par une loi de comportement. On considère la loi de Hooke :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ (sym) & & & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ & & & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 \\ & & & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{pmatrix} \tag{III.2}$$

Avec :

- E: module de Young (N/m²)
- ν : coefficient de Poisson (sans dimension)

On utilise parfois le module de cisaillement :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{III.3})$$

Pour un matériau isotrope, il n'y a que deux paramètres indépendants. Il y en a 6 pour un matériau isotrope transverse, 9 pour un matériau orthotrope et 21 pour un matériau anisotrope.

En notation matricielle, on écrit :

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (\text{III.4})$$

[D] : est appelée matrice d'élasticité du matériau.

L'énergie de déformation W s'écrit :

$$W = \frac{1}{2} \int_V \sigma \cdot \varepsilon \cdot d_v \quad (\text{III.5})$$

III.3.2.2. Travail d'une force et d'un moment

C'est le produit de la force par le déplacement de son point d'application :

$$T_F = \frac{1}{2} F \cdot U_F \quad (\text{III.6})$$

C'est la mesure d'une action entraînant une rotation, proportionnelle à la force et à la longueur du bras de levier entre le centre de rotation du solide et le point d'application de la force.

III.3.3. Équations fondamentales :

III.3.3.1. Équations d'équilibre local :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + F_z &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

III.3.3.2. Relations déformations-déplacements :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \mu}{\partial x} \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \varepsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial z} \quad (\text{III.8})$$

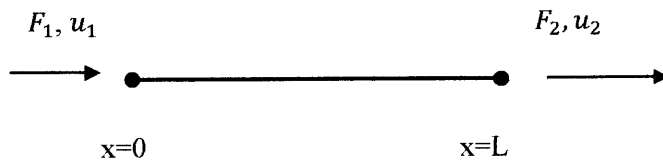
$$\begin{aligned} \gamma_x &= \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial \mu}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

$$\gamma_y = \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$

Symboliquement, on écrit $\{\varepsilon\} = [S]\{U\}$ (III.10)

Si on applique au barreau une contrainte σ , on observe un rétrécissement dans la direction y correspondant à une déformation $-\frac{v\sigma_x}{E}$

- **Exemple de formulation : barre en traction**



On suppose que le déplacement en tout point de la barre est donné par un polynôme du 1^{er} degré :

$$u(x) = a_1 + a_2 x \quad (\text{III.11})$$

On a :

$$u(0) = u_1 \text{ et } u(L) = u_2$$

D'où a

$$u(x) = u_1 \left(1 - \frac{x}{L}\right) + \frac{x}{L} u_2 \quad (\text{III.12})$$

Qu'on écrit symboliquement :

$$u(x) = [N(x)]\{U\} \quad (\text{III.13})$$

Avec ;

$$[N(x)] = \left[\left(1 - \frac{x}{L}\right); \left(\frac{x}{L}\right) \right], \quad \{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

On en déduit :

$$\varepsilon = \left[-\frac{1}{L}; \frac{1}{L} \right] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = [B]\{U\} \quad (\text{III.15})$$

$$\sigma = E \left[-\frac{1}{L}; \frac{1}{L} \right] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = [D]\varepsilon \quad (\text{III.16}),$$

D'autre part, on a par définition :

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sigma S \\ \sigma S \end{Bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Où S : est l'aire de la section de la barre.

On pose :

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = [A]\sigma \quad (\text{III.18})$$

avec :

$$[A] = S \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

On obtient finalement :

$$\{F\} = [A][D][B]\{U\} \quad (\text{III.20})$$

Soit une relation du type :

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (\text{III.21})$$

avec :

$$[K] = [A][D][B] \quad (\text{III.22})$$

En explicitant :

$$[K] = \frac{ES}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

On voit que la matrice de rigidité se calcule comme le produit de trois matrices :

$[B]$: Transformation des déplacements aux déformations

$[D]$: Matrice d'élasticité du matériau

$[A]$: Transformation des contraintes en forces

III.3.3.3. Formulation générale (méthode directe) :

La démarche est la suivante :

On exprime le déplacement $\{u(x)\}$ en tout point de l'élément en fonction des déplacements aux nœuds

$$\{u(x)\} = [N(x)]\{U\} \quad (\text{III.24})$$

D'où

$$\{\varepsilon(x)\} = [S]\{N(x)\}\{U\} = [B(x)]\{U\} \quad (\text{III.25})$$

On écrit la loi de comportement du matériau qui relie les contraintes aux déformations :

$$\{\sigma(x)\} = [D]\{\varepsilon(x)\} \quad (\text{III.26})$$

On écrit que le travail des forces externes appliquées à la structure pour un déplacement virtuel δU est égal au travail interne des contraintes pour ce même déplacement :

$$\{\delta U\}^T \{F\} = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dv \quad (\text{III.27})$$

En explicitant, on a :

$$\{\delta U\}^T \{F\} = \{\delta U\}^T \left(\int_V [B]^T [D] [B] dv \right) \{U\} \quad (\text{III.28})$$

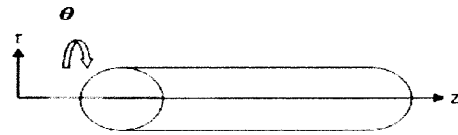
Comme cette relation est vraie pour tout déplacement virtuel, on en déduit :

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (\text{III.29})$$

Avec $[K]$ sous sa forme plus générale :

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dv \quad (\text{III.30})$$

➤ **Cas particulier : les éléments axisymétriques**



Décomposition en série de Fourier :

$$u(r, \theta, z) = \sum_n u_n^s(r, z) \cos(n\theta) + \sum_n u_n^s(r, z) \sin(n\theta)$$

L'axisymétrie correspond à la restriction $n = 0$ de cette décomposition.

$$u(r, \theta, z) = u_n^s(r, z)$$

Remarque :

Pour utiliser ce type d'élément, le problème doit être globalement axisymétrique :

- La géométrie
- Les conditions aux limites
- Le chargement

III.3.4. Processus de calcul (cas statique) :

1. Maillage
2. Construction de la matrice de raideur de chaque élément $[K^e]$
3. Assemblage des matrices élémentaires dans la matrice globale $[K]$
4. Construction du vecteur chargement $\{F\}$
5. Introduction des conditions aux limites et résolution du problème : $\{U\} = [K^e]\{F\}$
6. Calcul des quantités dérivées de

$$\{\varepsilon^e\} = [B^e]\{U^e\} \quad \text{(III.31)}$$

$$\{\sigma^e\} = [D^e]\{\varepsilon^e\} \quad \text{(III.32)}$$

$$W^e = \frac{1}{2} \{\varepsilon^e\}^T \{\sigma^e\} \quad \text{(III.33)}$$

III.3.5. Critère de Von Mises (critère de l'énergie de distorsion élastique)

Le critère dit de Von Mises fut formulé par Maxwell en 1865. Huber (1904) la développa partiellement dans un article en polonais. Cependant, sa paternité est généralement attribuée à Von Mises (1913).

On parle aussi parfois de la théorie de Maxwell–Huber–Hencky–Von Mises, ou de critère de Prandtl-Reuss.

Le critère de Von Mises est un critère énergétique : l'énergie de déformation élastique s'écrit dans les cas simples :

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad \text{en traction-compression}$$

ou

$$U = \frac{1}{2} \tau \gamma \quad \text{en cisaillement}$$

et de manière générale

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (\text{III.34})$$

avec la convention de sommation d'Einstein.

Cette énergie peut se séparer en deux termes :

$$U = U_v + U_f$$

Avec

U_v : énergie due au changement de volume sans changement de forme,

$$U_v = \frac{1}{2} \text{tr}(\sigma' \varepsilon') = \frac{1}{6} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_{ij})^2 = \frac{1-2\nu}{6E} (I_1)^2 \quad (\text{III.35})$$

U_f : énergie due au changement de forme sans changement de volume, ou énergie de distorsion élastique

$$U_f = \frac{1}{2} \text{tr}(\sigma'' \varepsilon'') = \frac{1}{6} s_{ij} e_{ij} = \frac{1+2\nu}{4E} s'_{ij} s'_{ij} \quad (\text{III.36})$$

Notations

- $\sigma' = pI$: tenseur sphérique, isotrope,
 - ✓ p : pression isostatique,
 - ✓ I : matrice unité ;
- σ'' : déviateur du tenseur des contraintes ;
- E : module de Young ;
- ν : coefficient de Poisson ;
- G : module de cisaillement.

Comme indiqué précédemment, la dilatation/compression isotrope n'est pas susceptible de provoquer un écoulement plastique, le critère de plasticité ne porte donc que sur U_f . On peut écrire :

$$\begin{aligned}
 U_f &= \frac{1}{12G} ((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)) \\
 &= \frac{1}{12G} ((\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2) \quad \text{(III.37)} \\
 &= \frac{J_2}{2G}
 \end{aligned}$$

Où J_2 est le second invariant du déviateur du tenseur des contraintes et G est le module de cisaillement. Cette énergie ne doit pas dépasser une valeur limite si l'on veut rester dans le domaine élastique. La valeur critique de l'énergie est donc, en prenant comme référence la traction uni axiale ($\sigma_I = \sigma_{III} = 0, \sigma_{II} = R_e$ à la limite) :

$$U_f^{cr} = \frac{1}{6G} R_e^2 \quad \text{(III.38)}$$

En contraintes plans, le critère de Von Mises s'écrit :

$$\sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 - \sigma_I \sigma_{II}} \leq R_e \quad \text{(III.39)}$$

Ce qui est l'équation d'une ellipse, ou encore

$$J_2 \leq \frac{1}{3} R_e^2 \quad \text{(III.40)}$$

Ceci peut également s'écrire

$$(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2 \leq 2R_e^2 \quad \text{(III.41)}$$

Ou encore

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2} \leq R_e$$

La surface limite est un cylindre dont l'axe est la trisectrice des trois axes $(\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III})$.

La fonction d'écoulement plastique peut s'écrire

$$f(\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2} - R_e$$

$$f(J_2, J_3) = \sqrt{3J_2} - R_e \quad (\text{III.42})$$

Dans le cas de poutres soumises à une flexion (générant une contrainte normale maximale σ_{\max}) et à une torsion (générant une contrainte tangentielle maximale τ_{\max}), le critère devient (forme de Huber)

III.3.6. Les équations utilisées dans le COMSOL

Dans le logiciel COMSOL Multiphasiques, généralement, les équations aux dérivées partielles (EDPs) peuvent être déclarées directement sous les trois formes suivantes ([com, n.d.b], [com, n.d.a]) :

- la forme Coefficient est souvent considérée pour les EDPs linéaires.
- la forme générale est souvent considérée pour les EDPs non-linéaires.
- la forme faible utilise la formulation faible des EDPs, cela nous donne une grande flexibilité pour la description des équations aux dérivées partielles dans ce code.

Les détails des équations de forme Coefficient et de forme faible sont présentés dans ([com,n.d.b], [com, n.d.a]). Dans ce paragraphe, nous présentons la forme générale qui correspond aux équations de nos modèles.

La forme générale des équations aux dérivées partielles est décrite dans COMSOL Multiphasiques sous la forme suivante avec l'option d'analyse temporelle :

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = F \quad \text{sur } \Omega \quad (\text{III.43})$$

$$-n\Gamma = G + \left(\frac{\partial R}{\partial u}\right)^T \mu \quad \text{sur } \partial\Omega \quad (\text{III.44})$$

$$0 = R \quad \text{sur } \partial\Omega \quad (\text{III.45})$$

où :

- Ω est le domaine dans lequel les EDPs seront résolues, $\partial\Omega$ est la frontière du domaine considéré Ω .
- \mathbf{u} est le vecteur des variables dépendantes qui est également la solution du problème, \mathbf{n} est le vecteur unitaire normal extérieur à la frontière $\partial\Omega$.
- $\boldsymbol{\mu}$ est le multiplicateur de Lagrange.
- $\mathbf{e}_\alpha, \mathbf{d}_\alpha, \Gamma, \mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{R}$ sont des coefficients de l'équation, ils peuvent être éventuellement fonctions des coordonnées spatiales.

L'équation (3.1) représente les équations aux dérivées partielles utilisées dans COMSOL Multiphysiques (Forme Générale) et les deux dernières équations ((III.44) et (III.45)) expriment respectivement les conditions aux limites de Neumann (conditions aux limites naturelles) et Dirichlet (conditions aux limites essentielles).

L'utilisation appropriée des coefficients des équations ci-dessus (III.43), ((III.44) et(III.45)) nous permet d'obtenir la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{F} & \text{sur } \Omega \\ -\mathbf{nT} = 0 & \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{III.46})$$

L'équation (III.46) a été utilisée pour décrire des équations d'évolution des variables dissipatives dans nos modèles de comportement. Dans ce cas, le vecteur \mathbf{u} des variables dépendantes représente le vecteur des variables dissipatives (déformations plastiques ou la proportion volumique des phases, par exemple).

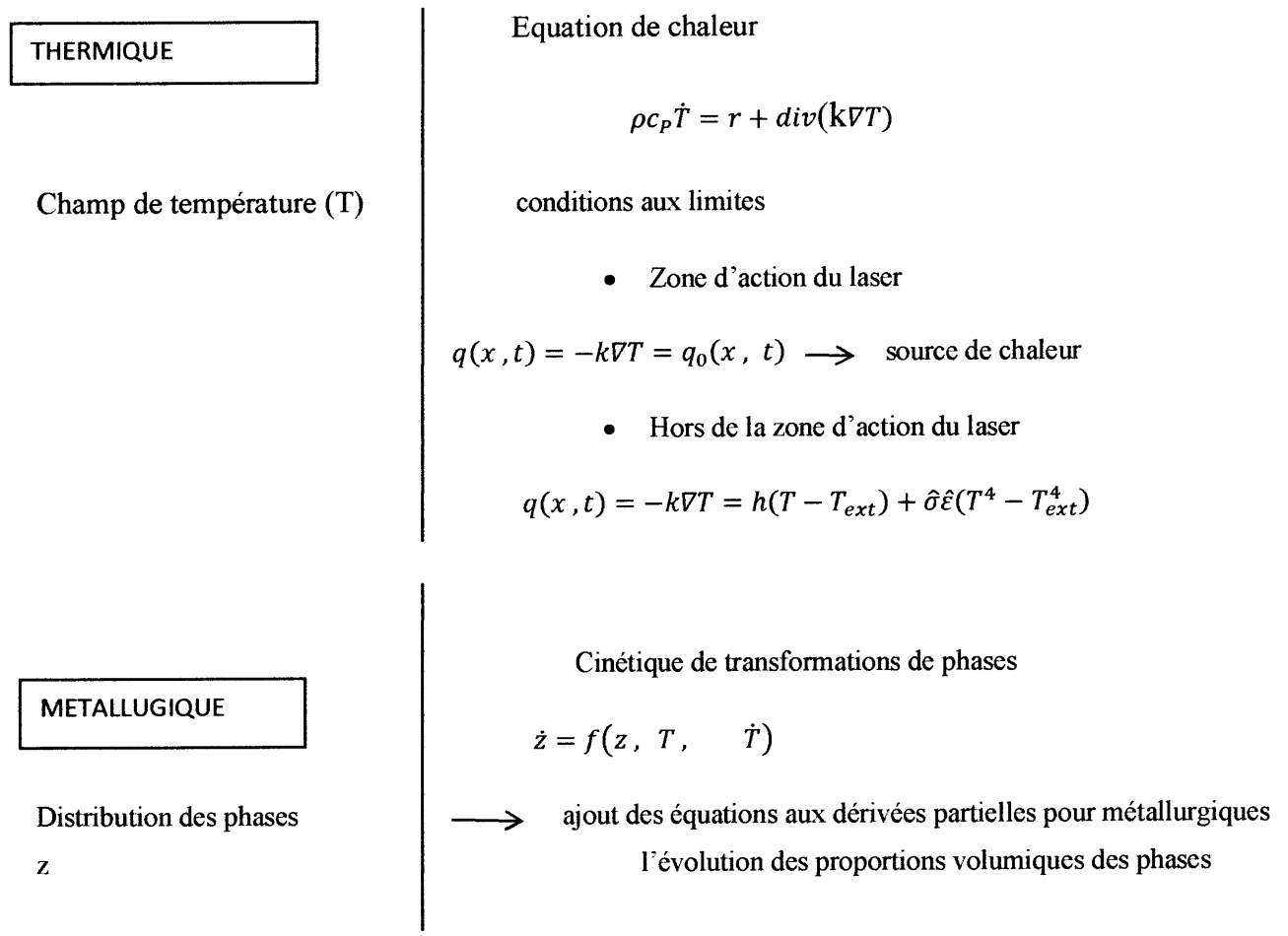
Lorsque la description des équations d'évolution est terminée, COMSOL Multiphysiques collecte toutes les équations ainsi que les conditions aux limites déclarées par l'utilisateur dans un système d'équations. Ces équations sont ensuite discrétisées et on obtient un système d'équations algébriques (DAE system - Différentiel Algébrique Equations system).

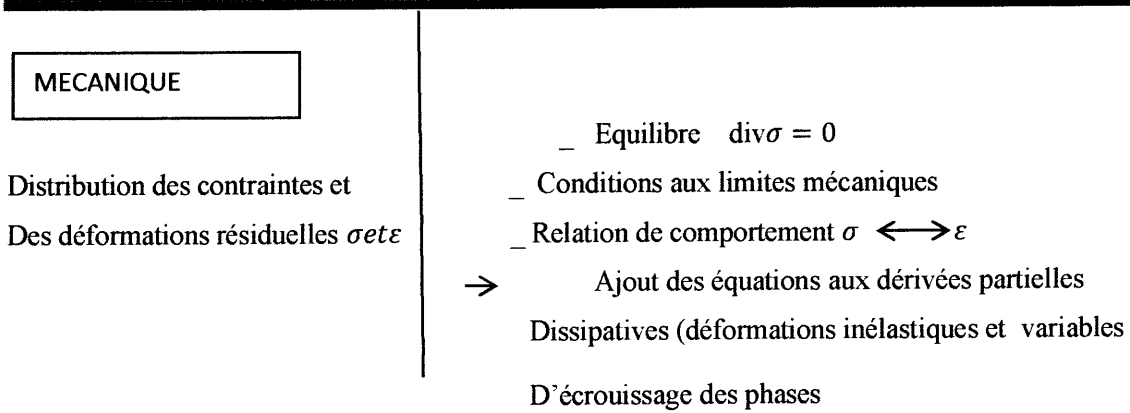
Dans COMSOL Multiphysiques, la résolution du système d'équations algébriques est réalisée par la méthode BDF(Backward Differentiation Formula). Le schéma implicite en temps est utilisé, ce qui conduit éventuellement à résoudre un système non-linéaire d'équations à chaque pas de temps. Dans ce cas, la méthode itérative de Newton-Raphson est utilisée, le logiciel résout ensuite le système résultant avec un solveur du système linéaire. Dans COMSOL Multiphysique, pour la résolution du système linéaire, en fonction du problème traité, on peut choisir un solveur

approprié qui peut être solveur direct (UMFPACK, SPOLES, TAUCS), solveur GMRES, Gradients Conjugués ou Géométrie Multigrille [com, n.d.b].

Les tolérances relatives et absolues définies par l'utilisateur permettent de déterminer le critère de convergence pour chaque pas de temps.

Les équations aux dérivées partielles de type (III.46) ont été ajoutées pour décrire l'évolution des proportions volumiques des phases, des variables des déformations inélastiques ainsi que des variables d'érouissage des phases métallurgiques [15].





III.4. Principe d'utilisation :

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - définir la géométrie, les propriétés des matériaux, le maillage, choisir la ou les propriétés physiques, résoudre et afficher les résultats. La résolution et l'affichage des résultats sont intégrées dans une seule interface.

Des modules d'applications optionnels offre des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, Génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence corrosion, Plasma suivi particule optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et MATLAB.

Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL MULTIPHYSICS autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbre-différentiels (EAD) sont également possibles [13].

III.5. Module :

AC/DC Module

• Acoustics Module :

Batteries & Fuel Cells Module :

• CAD Import Module :

• Corrosion Module :

• ECAD Import Module

• Electrochemistry Module

• Electrodeposition Module

• Fatigue Module

• File Import for CATIA V5

• Geomechanics Module

• Heat Transfer Module

• LiveLink for AutoCAD

• LiveLink for Creo Parametric

• LiveLink for Pro/ENGINEER

• LiveLink for Solid Edge

• LiveLink for SolidWorks

• LiveLink for SpaceClaim

• Material Library

• MEMS Module

• Microfluidics Module

• Molecular Flow Module

• Multibody Dynamics Module

• Nonlinear Structural Materials Module

• Optimization Module

• Particle Tracing Module

• Pipe Flow Module

• Plasma Module

• RF Module

• Semiconductor Module

• Structural Mechanics Module

• Subsurface Flow Module

• Wave Optics Module

III.6. Utilisation COMSOL:

III.6.1. Choix du modèle :

Au démarrage de COMSOL nous devons choisir quel type de simulation nous voulons faire afin de limiter les calculs (en effet si le problème est mécanique inutile de résoudre l'équation de Poisson pour connaître la répartition de charges électriques !). Nous choisissons tout d'abord de faire des simulations avec un modèle 3D, qui, s'il prend beaucoup plus de temps de calcul qu'un modèle 2D, donne des résultats plus proche de la réalité. Nous choisissons ensuite un modèle mécanique du solide et plus particulièrement pour commencer un modèle d'analyse statique, puis dans un deuxième temps nous utiliserons un modèle d'analyse des fréquences propres. Le modèle mécanique est un modèle dans lequel les variables vont être les déplacements (u , v , w) pour chacun des éléments élémentaires que COMSOL va devoir résoudre en fonction du système que nous allons décrire.

III.6.2. Géométrie de la structure étudiée :

La structure étudiée est une structure tubulaire soudée en forme de cylindre Elle est composée d'un tube de verre de diamètre (d) et de longueur (l) et l'épaisseur (t_g) relié à un tube métallique de diamètre (D) et de longueur (L) épaisseur (t_m) par un soudure. Sa géométrie est représentée par les figures suivantes :

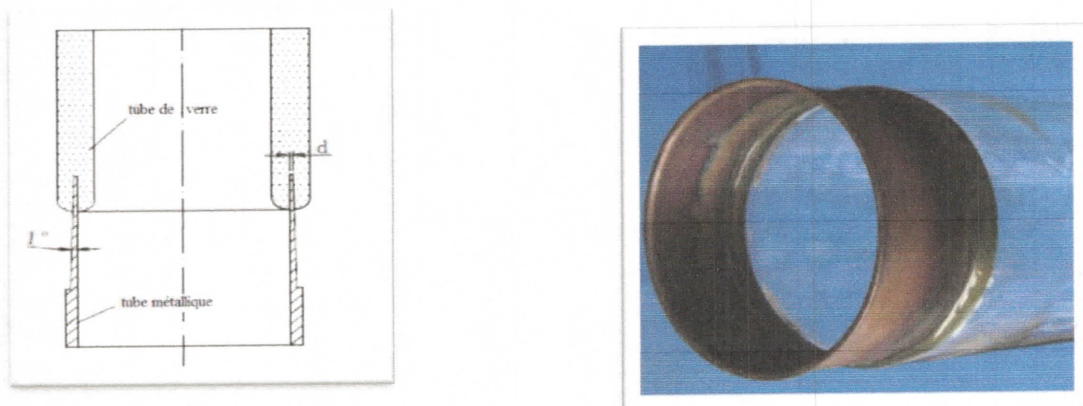


Fig.III.1. Géométrie de la structure étudiée [10]

III.6.3. Physique du modèle :

III.6.3.1. Définition du matériau :

On définit pour chaque volume le matériau utilisé. On utilise une bibliothèque permettant de définir simplement toutes les constantes physiques du matériau. On choisira ici le métal (kovar) et le verre(borosilicate).

III.6.3.2. Définition des conditions aux limites :

Cette étape importante permet de signaler aisément les valeurs connues de certaines variables du système en des endroits précis. Par exemple on sait que l'extrémité des ressorts en contact avec le substrat est fixe, et l'on va ainsi lui imposer un déplacement nul. Si certains plans présentent des symétries, il sera aussi possible de limiter les déplacements qu'ils peuvent avoir. En général les contraintes aux limites sont imposées sur des surfaces de la structure.

III.6.4. Maillage :

Cette étape sert à définir les volumes élémentaires pour permettre la discrétisation du système continu. La dimension de la maille peut être modifiée afin de diminuer le nombre d'élément et de réduire l'utilisation de la mémoire - et augmenter la vitesse de calcul. On pourra aussi affiner le maillage dans les zones de rapide changement, et avoir un maillage plus grand dans les zones se déformant peu. Pour tester si le maillage est 'assez' fin on peut essayer de le raffiner et voir si les résultats changent ou non [12].

III.6.5. Simulation :

On lance la simulation correspondant au modèle sélectionné... et on attend !

III.6.6. Visualisation des résultats :

COMSOL permet tout un ensemble de représentation des variables sous forme de couleur, de courbe, de champ de vecteurs... qui peut être appliqué sur le dessin de la structure elle-même ou sur la structure déformée.

De plus si à la base COMSOL ne résout le problème que pour un nombre limité de variables (ici les déplacements v), il est possible de visualiser d'autres variables (secondaires), comme les contraintes mécaniques, qui sont liées aux variables d'origine (loi de Hooke)

III.7. Modélisation Numérique par COMSOL MULTIPHYSICS version 3.5a, soude un anneau de métal et un tube de verre présence la température :

III.7.1. L'interface de COMSOL:

Peut être séparée en quatre parties. à gauche, on retrouve la bibliothèque de model où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème (Paramètres), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh).

La bibliothèque de model comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results)

La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans Le bibliothèque de model, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans (Geometry). C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis.

En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc.

Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre.

Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, le progrès des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée

Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 3.5a.

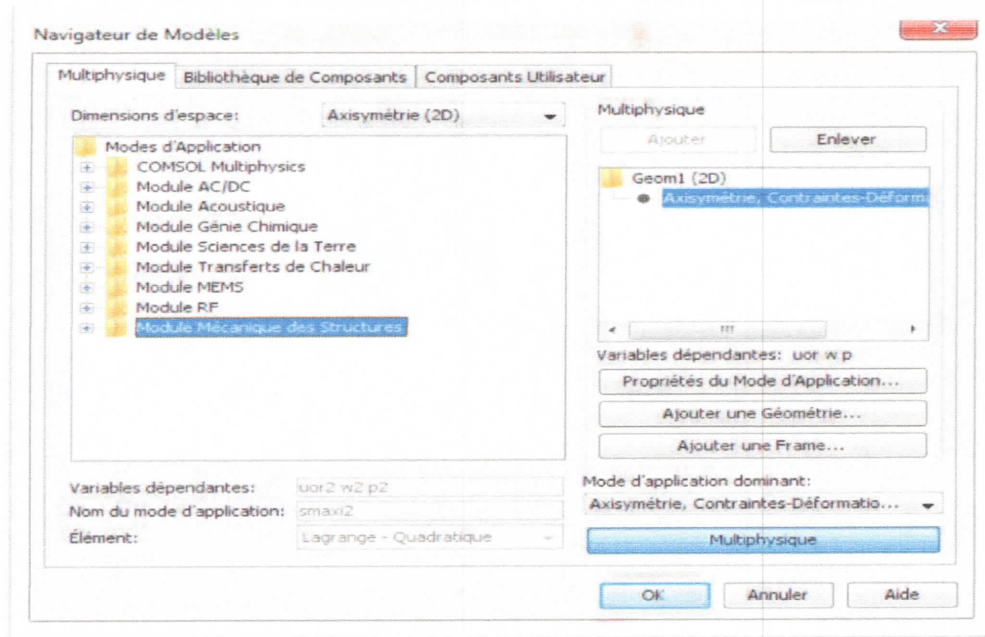


Fig .III.2 :l'interface de comsol 3.5a

III.7.2. Création du modèle de simulation :

Premièrement il faut choisir la dimension d'espace (2D axisymétrie) et ajouter un physique, Choisir Mécanique de structure voir le fig.III.3

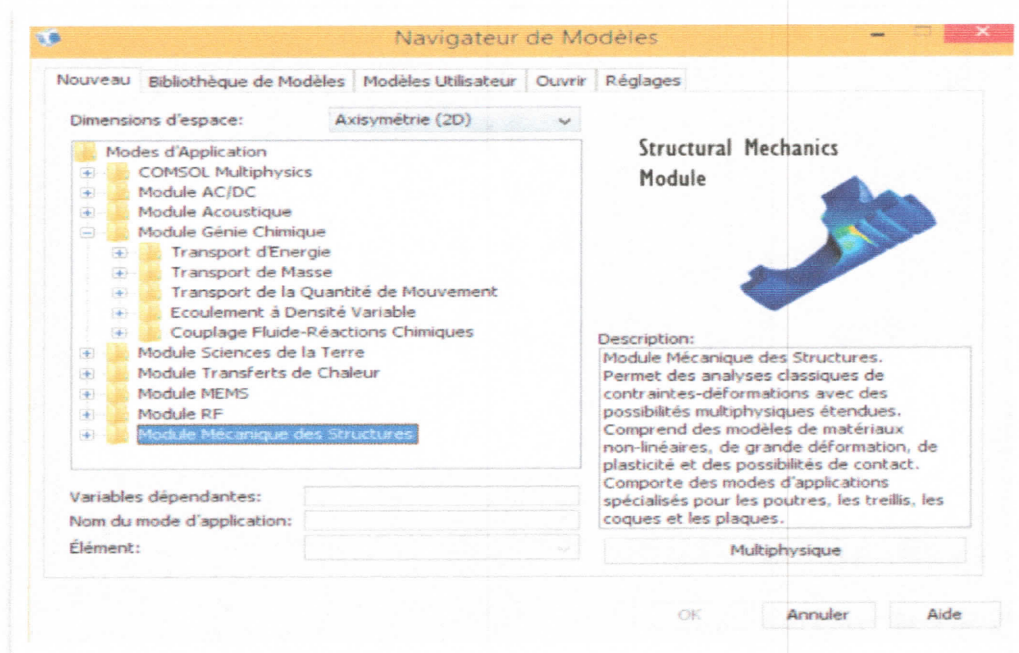


Fig.III.3choisir la dimension et module mécanique.

Après cliquer sur flache de terminé on se trouve cette fenêtr suivant voir la **fig.III.4** choisir le module physique couplage mécanique – thermique.

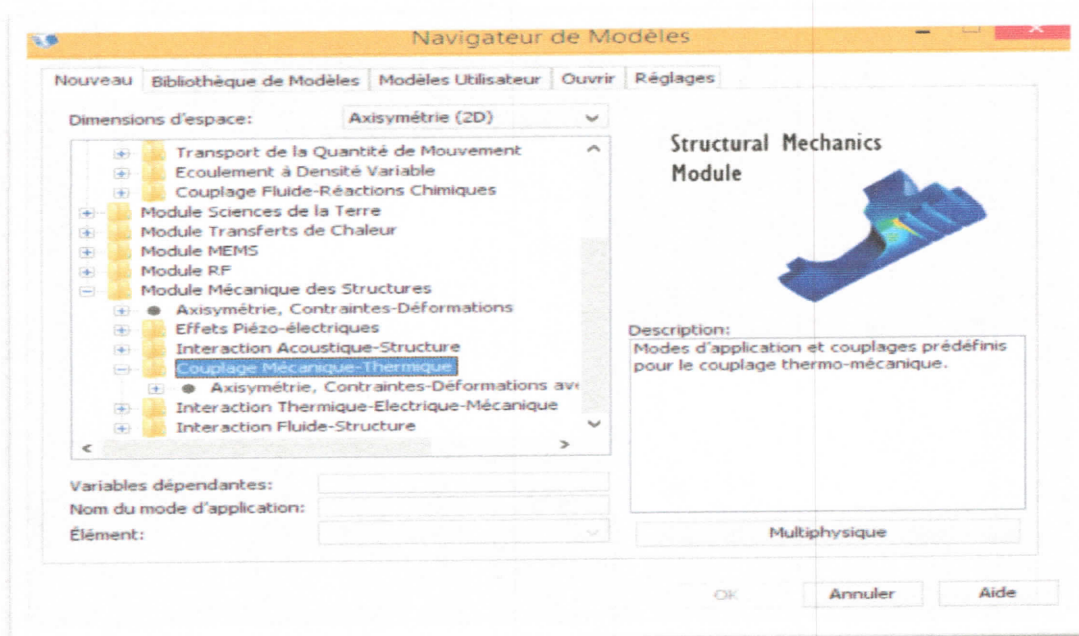


Fig.III.4. Précision de module utilise

III.7.3. Géométrie :

Clique sur la fenêtr géométrie

Créé un tube (verre) la longueur $L=150$ mm, $D_{int}=101$ mm , $t_g=0.003$ m

Et après créé un tube (métal) de longueurs $L_1= 21$ mm, $D_{int}= 102$ mm , $t_m=0.001$ mm

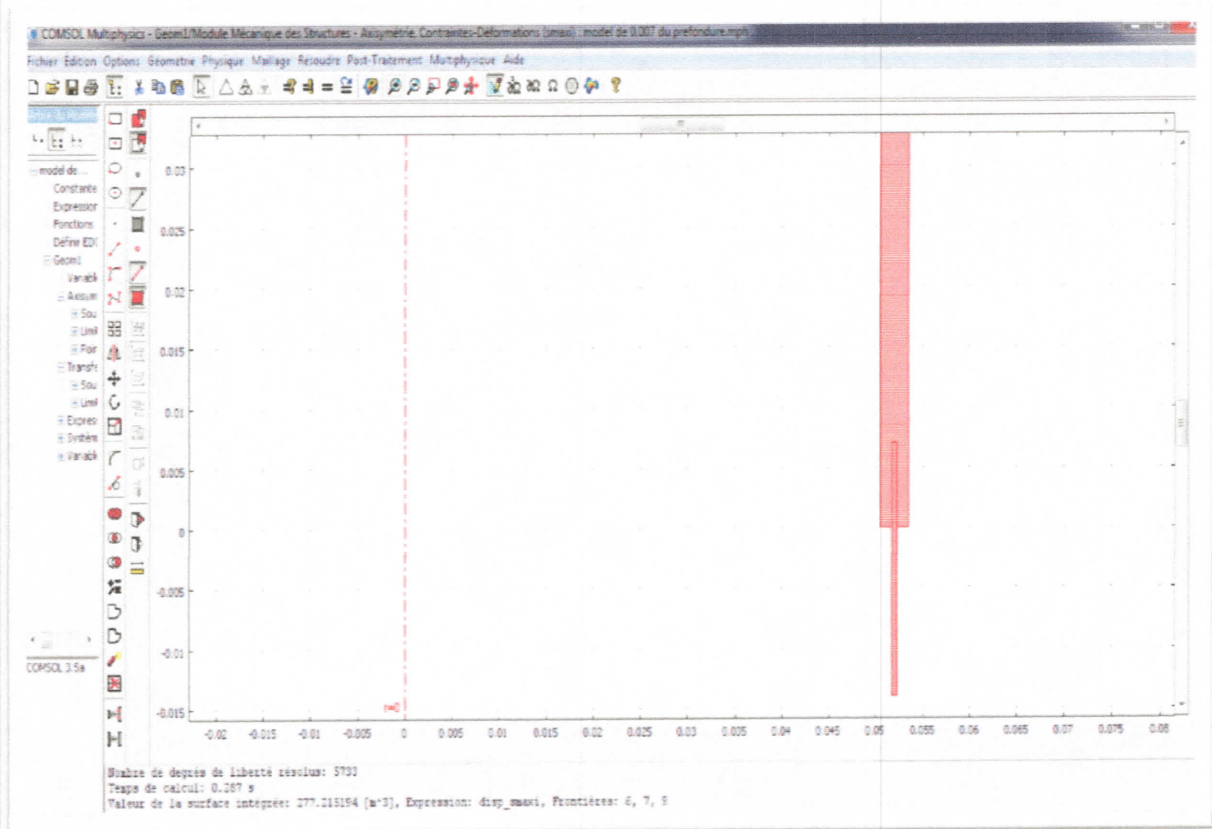


Fig.III.5. Définition le démontions du système

III.7.4. Ajout des propriétés du matériel composant les deux tubes :

Faites apparaître le menu « physique » et cliqué sur le « sous-Domains » puis sélectionnez ouvert chargement des donnees Choisissez le verre borosilicate choisissez le métal kovar

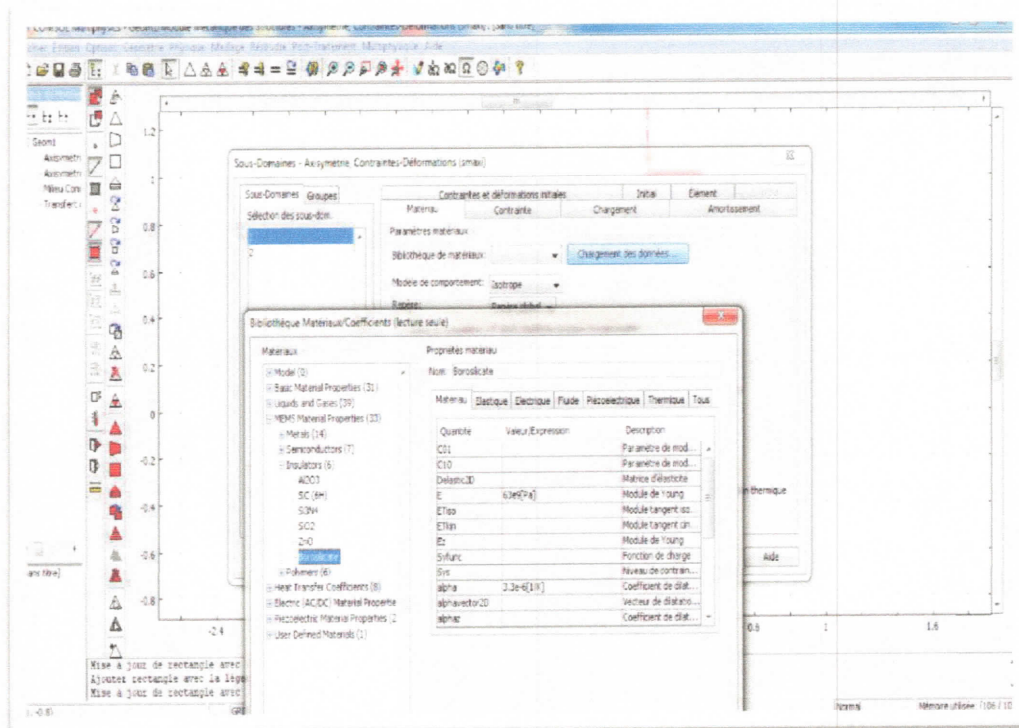


Fig.III.6. Définition les propriétés de chaque élément de système.

III.7.5. Ajout des conditions aux limites :

Dans transfert de chaleur (ht), ajoutez les conditions aux limites.

Les paramètres des autres conditions sont :

- Température initiale $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$
- Résistance mécanique du joint à la traction : 2.5 KN

Les surface qui contacte à l'atmosphère est isolation électrique pour soudée le métal dans le verre.

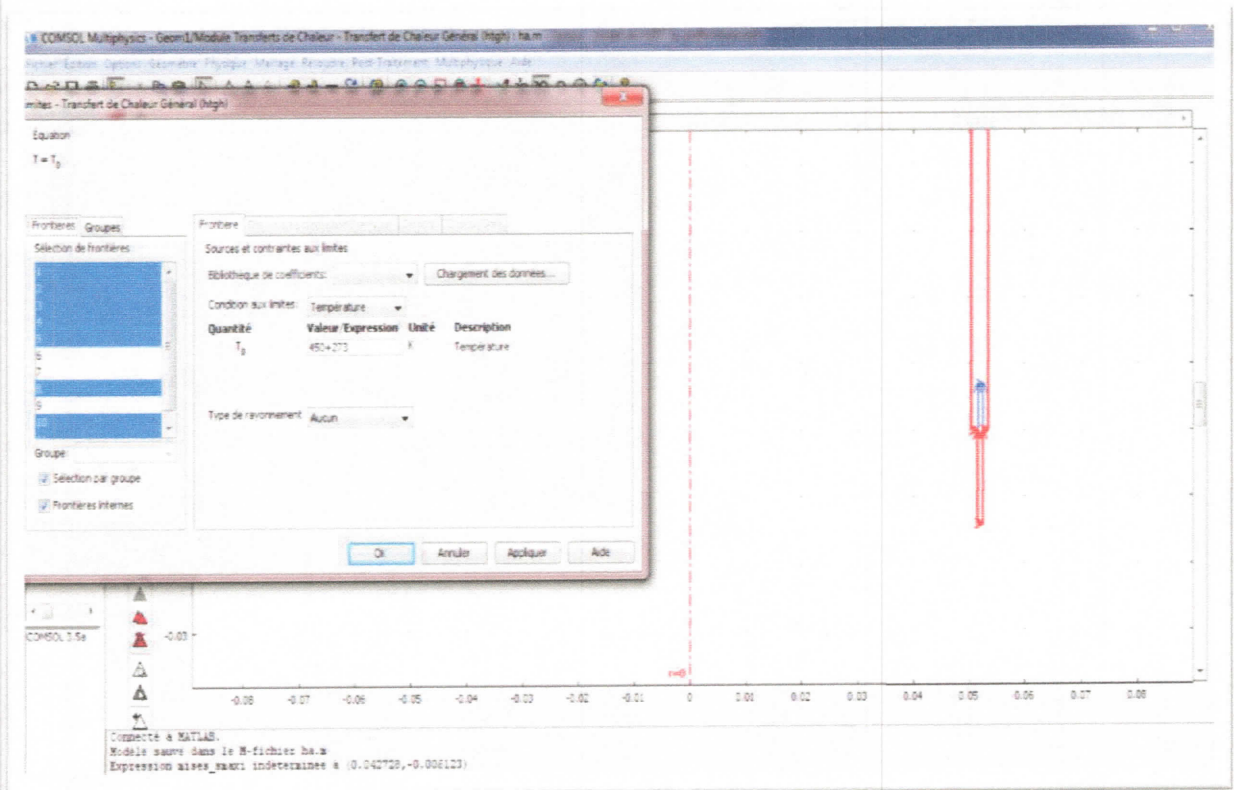


Fig.III.7. Condition aux limites.

III.7.6. Maillage :

Cliquez sur Maillage et choisissez comme taille de maillage laissez le maillage.

Cliquez sur construire tout, il est maintenant possible de voir le maillage triangulaire.

Il est possible de définir manuellement les paramètres de maillage.

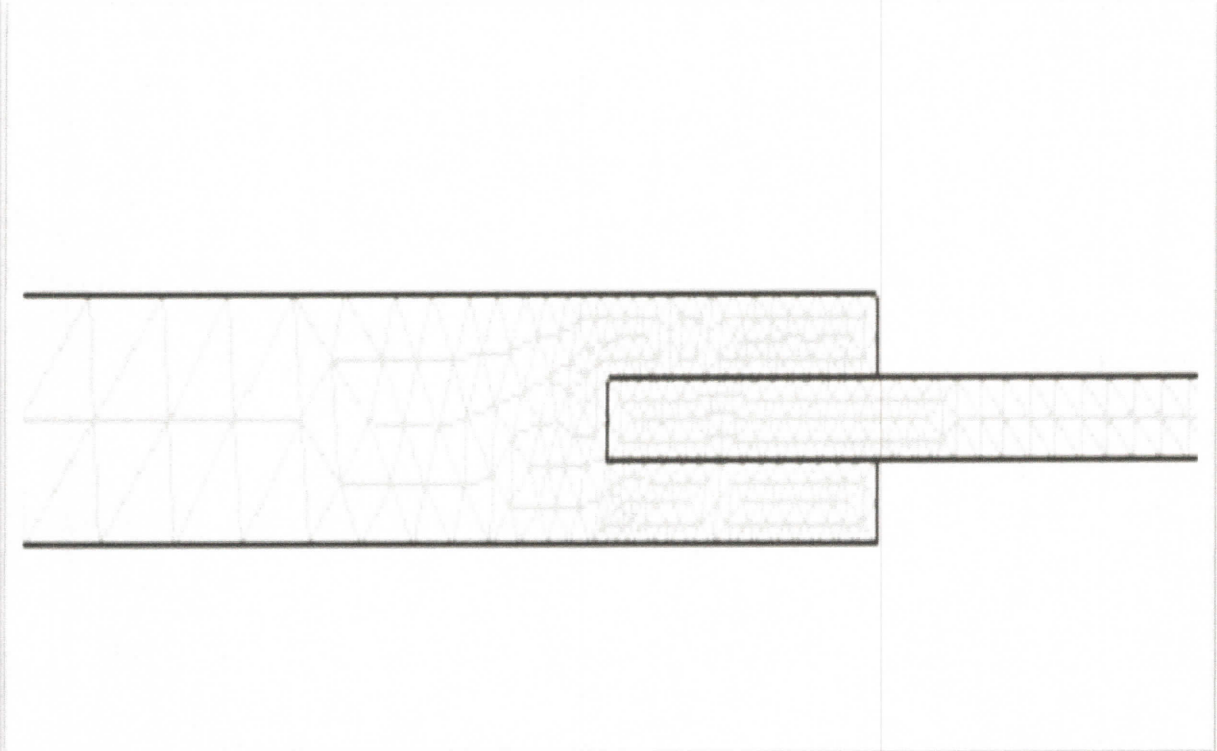


Fig .III.8.Maillage

III.7.7. Simulation et traitement des résultats :

Pour effectuer la simulation, cliquez droit sur dans étude puis sur calcule

Charge de choisir les paramètres du solveur en fonction des modèles physiques choisis Si vous désirez.

Changer les paramètres du solveur, ces derniers sont accessibles à partir de l'onglet étude, mais cela le résultat que vous devriez obtenir le contour de joint verre -métal.

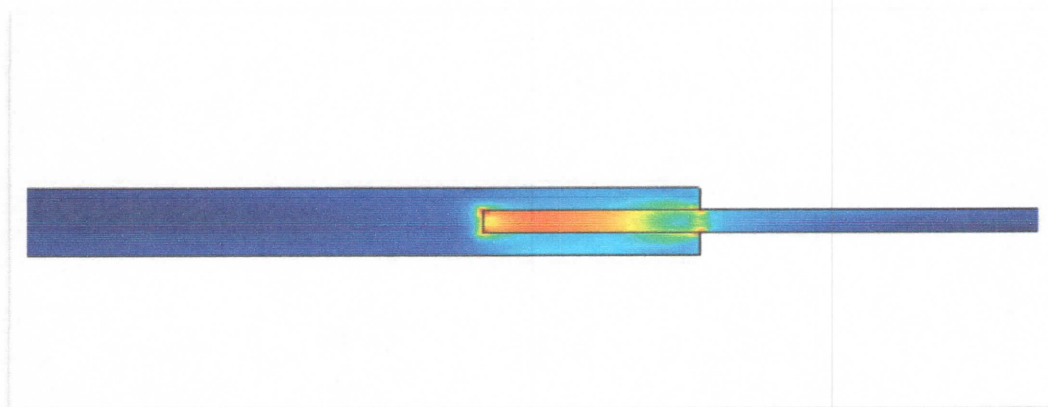
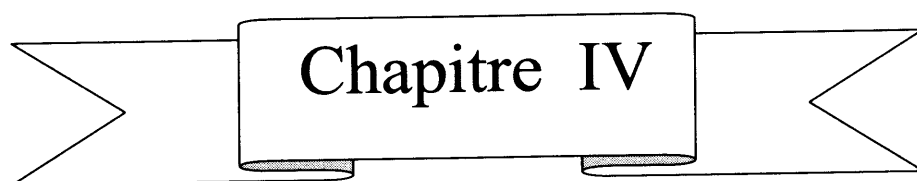


Fig.III.9. le résultat



Résultats et discussion

L'étude numérique traite des contraintes qui infectent la zone de jonction verre-métal (Enveloppe) en fonction des facteurs géométriques de la structure de tube de métal qui pénètre le verre. Cette contrainte est représentée dans le code comsol par des couleurs différentes, à partir des contraintes faibles (bleu) aux contraintes Dangereuses (rouge) classées dans une colonne graduée qui indique sa valeur et son unité en [Pa].

Dans notre étude en propose deux paramètres majeurs qui canalisent la valeur de la contrainte citer ci-dessous :

- 1- La profondeur de tube de métal inclus dans le tube de verre.
- 2- L'épaisseur de tube de métal.

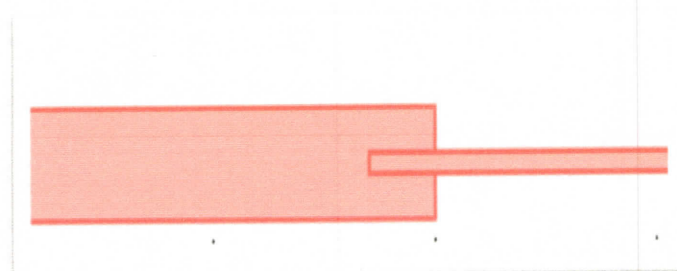
IV.1. L'Effet du changement de la profondeur de tube de métal inclus dans le tube de verre :

Le but dans cette étude est de définir la profondeur efficace qui a des contraintes plus petites. Pour augmenter la durabilité de l'absorbeur.

Dans cette étude on fixe l'épaisseur de tube métallique ($t_m=0.5\text{mm}$) avec des profondeurs (L) de tube de métal incluse dans le tube de verre qui varie dans chaque expérience à partir d'étude qui déjà existe.

Pour obtenir tous les résultants, on passe sur l'étape modélisation numérique par comsol Multiphysics (**chap III.7**)

La fig (IV-1) montre les différentes profondeurs choisies de tube de métal inclus dans le tube de verre



$$L = 3\text{mm}$$

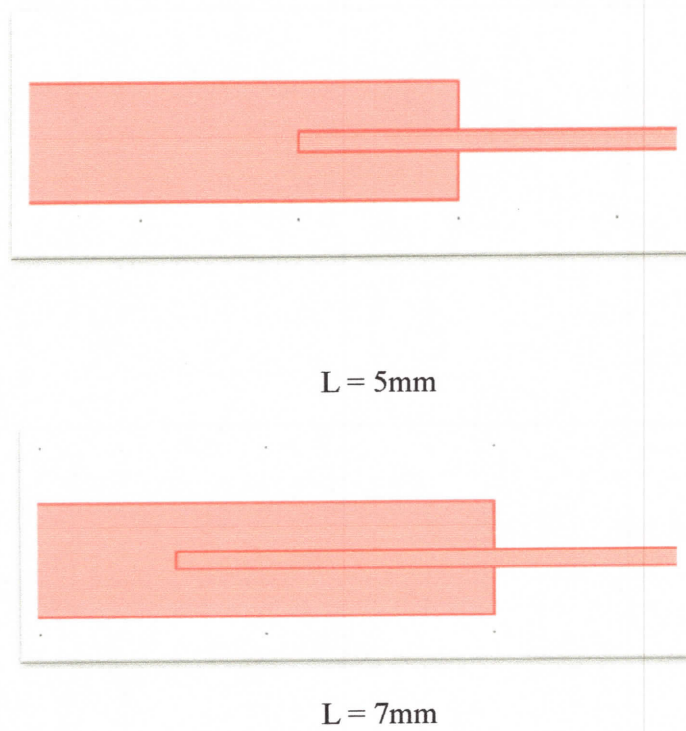
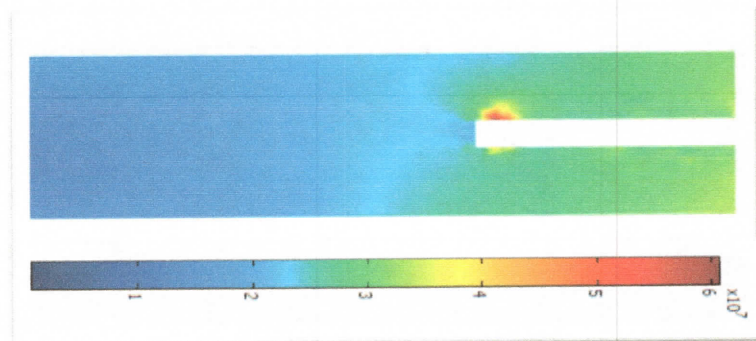
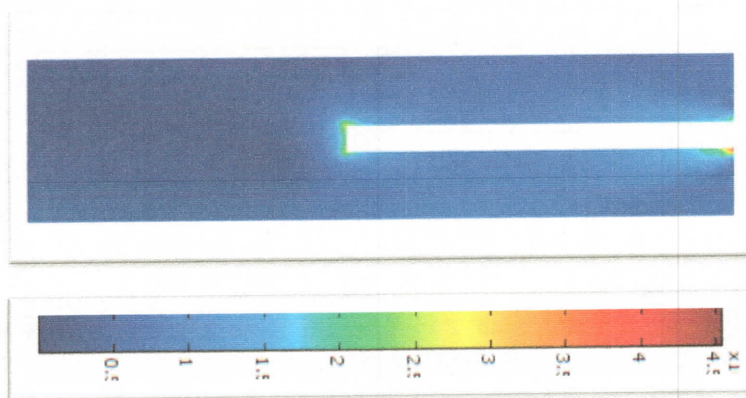


Fig .IV.1. Différentes profondeurs choisies du tube métal inclus dans le tube de verre

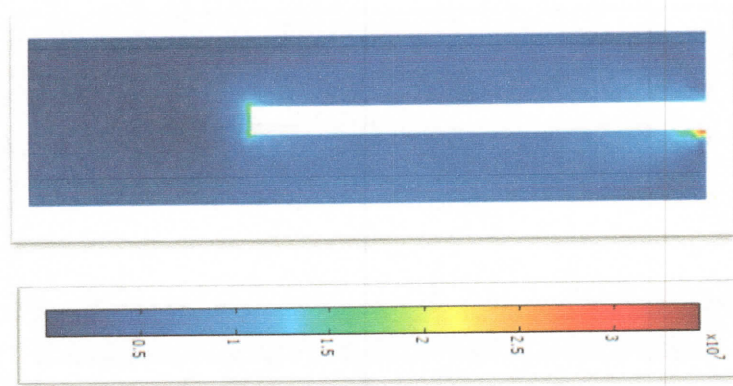
La **fig .IV.2** montre les contours de contrainte de Von mises autour de la zone de contact pour différentes profondeurs de tube métal inclus dans le tube de verre.



La profondeur de tube de métal inclus dans le tube de verre : $L = 3\text{mm}$



La profondeur de tube de métal inclus dans le tube de verre : $L = 5\text{mm}$



La profondeur de tube de métal inclus dans le tube de verre $L = 7\text{mm}$

fig .IV-2 . Contours du contrainte de Von Mises au sein de le joint verre-métal pour différentes profondeur de tube métal inclus dans le tube de verre.

Dans la **fig.IV.2.** on observe une concentration de la contrainte de Von Mises au niveau du joint verre-métal qui diminue avec l'augmentation de la profondeur de pénétration, qui est due essentiellement à l'augmentations de la surface de tube métal dans le tube de verre et diminue les contraintes tangentiellees que causent des dommages au verre.

IV.2. L'Effet du changement de l'épaisseur de tube de métal inclus dans le tube de verre :

Le but dans cette simulation est de définir l'épaisseur efficace qui conduit à des contraintes minimales, pour augmenter la durabilité de l'absorbeur.

Dans cette simulation on fixe la profondeur de tube métallique ($L=7$ mm) avec des épaisseurs (t_m) de tube de métal incluse dans le tube de verre varie dans chaque simulation à partir des simulations qui déjà existent.

Pour obtenir tous les résultants on passe à l'étape modélisation numérique par consol Multiphysics (**chap III.7**)

La fig (IV-3) montre les différentes épaisseurs choisies de tube métallique inclus dans le tube de verre

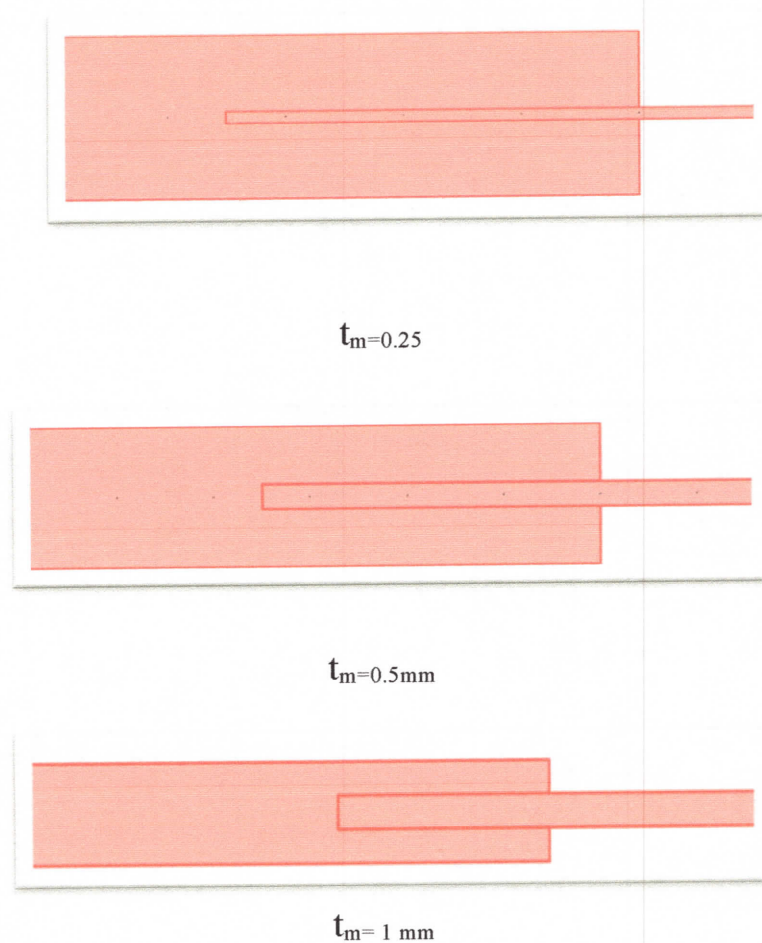
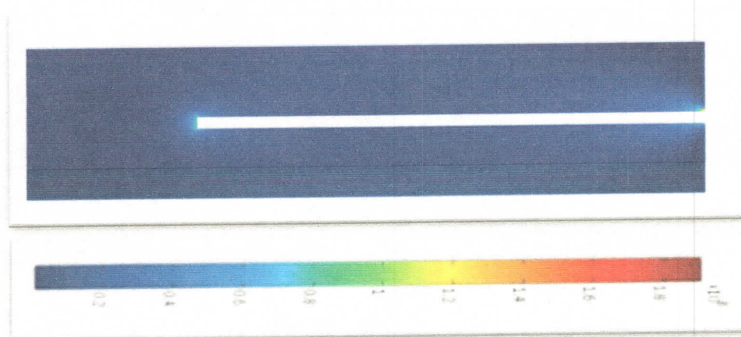
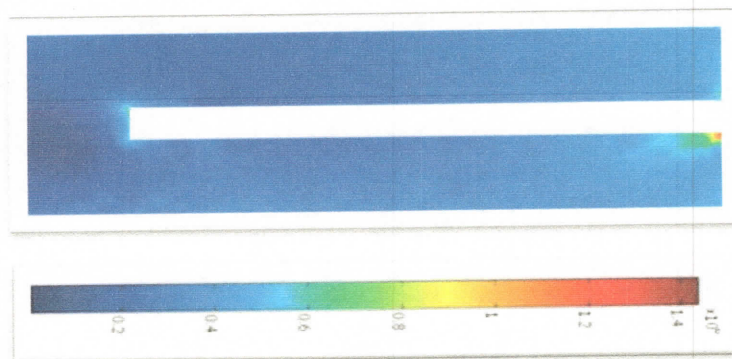


Fig .IV .3. Différentes épaisseurs choisies du tube métal inclus dans le tube de verre

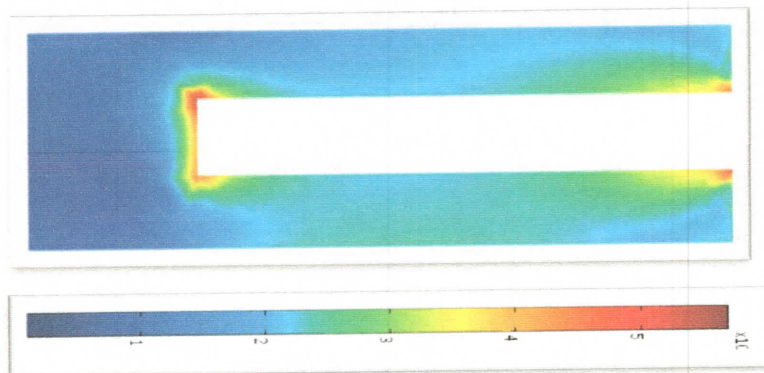
La **fig .IV.4.** Montre les contours de contrainte de Von Mises autour de la zone de contact pour différentes épaisseurs de tube métal inclus dans le tube de verre.



L'épaisseur de tube de métal inclus dans le tube de verre $t_m = 0.25\text{mm}$



L'épaisseur de tube de métal inclus dans le tube de verre $t_m = 0.5\text{mm}$



L'épaisseur de tube de métal inclus dans le tube de verre $t_m = 1\text{ mm}$

fig .IV.4 . Contours de la contrainte de Von Mises au sein de le joint verre-métal pour différentes de tube métal inclus dans le tube de verre.

La **fig.IV.4** représente l'influence de L'épaisseur du tube métallique dans le verre et la répartition des contraintes de Von Mises au tour de la zone de contact

Au tour de joint verre-métal la contrainte varie, et hors de cette partie (joint verre-métal) on voit des faibles valeurs des contrainte de Von Mises.

Les contraintes de Von Mises dépend l'épaisseur de tube en métal inclus dans le tube de verre, où

- l'épaisseur est augmenté les contraintes augmente.
- l'épaisseur est diminué donc les contraintes est diminué.

VI.3. Conclusion :

Dans les deux tableaux suivant on a traité les résultats de trois meilleur cas par rapport aux autres :

la profondeur(mm)	Valeur de contraint(MPa)	Résultats
L=3	50	Rupture
L=5	30	Bon partiel
L=7	25	Bon

Tab.VI.1. la profondeur de tube de métal

D'après le tableau précédentes, on choisit $L=7\text{mm}$

L'épaisseur (mm)	Valeur de contraint (MPa)	Résultats
$t_m = 0.25$	40	Bon
$t_m = 0.5$	50	Rupture
$t_m = 1$	60	Rupture

Tab.VI.2. L'épaisseur de tube de métal

D'après le tableau précédent, on choisit $t_m=0.25\text{mm}$

On a trouvé que nos résultats ne diffèrent pas beaucoup des résultats des études numériques. On a proposé différentes épaisseur et profondeur du tube métallique inclus dans le tube de verre.

D'après les données et les résultats on conclure :

- La zone qui est tjrs affecter par les contraintes est la partie de contact entre le verre et le métal.
- L'épaisseur et la profondeur de tube métallique ont une grande influence sur les valeurs des contraintes.



Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est l'amélioration de la compréhension des phénomènes thermiques et mécaniques qui existent dans une installation d'un récepteur solaire cylindro-parabolique. La finalité de ce travail est de réaliser une étude de simulation numérique de la jonction verre-métal utilisée dans le montage de l'enveloppe du récepteur solaire. Notre étude est basée sur l'effet de l'épaisseur du tube en métal inclus dans le tube en verre et de la profondeur de pénétration sur les contraintes produites dans le joint.

Notre travail comprend deux parties principales. La première consiste à comprendre les différentes études réalisées et les résultats publiés dans la littérature sur le thème étudié. Tandis que la seconde partie vise à réaliser des simulations, à l'aide du code COMSOL MULTIPHYSIC, sur le comportement mécanique de la jonction verre-métal par l'importation de la géométrie de la structure étudiée et les conditions aux limites. La validation du modèle par simulation donne des résultats satisfaisant en comparaison avec les résultats obtenus par les études numériques antérieures.

Les résultats obtenus nous ont conduits aux décisions suivantes :

- La meilleure profondeur de pénétration du tube en métal dans le tube en verre est 7mm avec une valeur de contrainte axiale égale à 25MPa.
- La meilleure épaisseur de tube en métal est 0.25mm avec une valeur de contrainte axiale égale à 40MPa.

En vus des résultats obtenus, il est conseillé aux générations futures de concentrer leurs efforts sur la géométrie de tube en métal.



[1]: D. Lei et al. / *Materials and Design* 31 (2010) 1813–1820 The analysis of residual stress in glass-to-metal seals for solar receiver tube

[2]: D. Lei et al. / *Renewable Energy* 48 (2012) 85e91 Experimental study of glass to metal seals for parabolic trough receivers

[3]: D. Lei et al. / *Renewable Energy* 35 (2010) 405–411 The calculation and analysis of glass-to-metal sealing stress in solar absorber tube

[4]: O. Shekoofa et al. / *Solar Energy Materials & Solar Cells* 128(2014)421–426 Analysis of residual stress for mis match metal –glass seals in solare vacuuated tubes

[5] : Geyer M, Lüpfert E, Osuna R, et al. (2002) euro trough – Parabolic trough collector developed for cost efficient solar power generation. 11th International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies. Zurich, Switzerland, 4–6 September.

[6]: Arconada. AetPapini.F(1980) Bilan thermique des convertisseurs de l'énergie solaire : rôle de la sélectivité et de la concentration. *Revue Phys. Appl.* 15, 163-167.

[7]: These values may be adjusted by control of process variables – consult HPM for desired values.

[8]: Verre borosilicate Source

:https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_borosilicate?oldid=121149301 Contributeurs : Fylyp22, The RedBurn, Jean-Frédéric, Bokken, Kilom691, RobotQuistnix, Aleks, Akiry, DainDwarf, Jmax, Rhadamante, Internovice, BotMultichill, SieBot, Louperibot, OKBot, Daylight, Alecs.bot, LordAnubisBOT, DumZiBoT, Mro, Bub's wikibot, LaaknorBot, Epop, Mahmudmasri, Harvey Stillnot, F.MYKIETA, Michel Awkal, Rrrrrrrrr, LoveBot, Addbot, Gratus, SyaPK et Anonyme : 9

[9]: Keywords— Solar Absorber Tube, Glass-To-Metal Seal, Residual Stress, photo-elastic technique.

Bibliographie

[10] :The analysis of residual stress in glass-to-metal seals for solar receiver tube Dongqiang Lei, Zhifeng Wang*, Jian Li.

[11] : Hervé Oudin, « Introduction à la méthode des éléments finis »version 3

[12] : R. H. GALLAGHER, "Introduction aux Eléments Finis", EDITIONS PLURALIS, Version Française (1976).

[13]: CEE 504: Finite Element Methods in Structural Mechanics Winter 2009 Using COMSOL Multiphysics to solve structural mechanics problems.)

[14] : Méthode des éléments finis — Wikipédia.html

[15]: These : Sur la Modélisation du Comportement Thermomécanique et Métallurgique des Aciers (en 2008 par Ngoc Thuy TRINH)
