

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



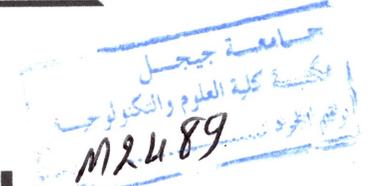
UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA -JIJEL

Faculté des Sciences et de Technologie

Département de Génie Mécanique

M/GM.MSM

2016/03



Projet de Fin d'Études

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

Thème

Etude numérique de la déformation de tube absorbeur
soumis à un champ de température non uniforme

Proposé par : Dr.Y.Demagh

Les membres du jury :

Dr.Y.Demagh Président
Mr.L.Gueraiche Examineur
Mr.S.Bounneche Encadreur
Dr.R.Belhadedef Co-Encadreur

Présenté par :

Belhadedef Hichem
Rouabi Haroun

Promotion 2016

Université de Jijel

Sommaire

Chapitre I :Généralités sur les concentrateurs cylindro-paraboliques

| | |
|---|----|
| I.1.Introduction:..... | 1 |
| I.2. Le concentrateur cylindro-parabolique :..... | 2 |
| I.2.1. Discription de CCP:..... | 2 |
| I.2.2. Le réflecteur cylindro-parabolique :..... | 3 |
| I.2.3. Structures métalliques :..... | 3 |
| I.2.4. Le tube absorbeur :..... | 4 |
| I.2.4.1. Description de tube absorbeur:..... | 5 |
| I.2.4.1.1. Les matériaux des premiers absorbeurs :..... | 5 |
| I.2.4.1.2. Les matériaux des absorbeurs d'aujourd'hui:..... | 6 |
| I.2.4.3. L'échange de chaleur dans l'absorbeur:..... | 6 |
| I.2.4.3.1. Flux de chaleur..... | 7 |
| I.2.4.3.1.1. Par conduction..... | 8 |
| I.2.4.3.1.2. Par convection..... | 8 |
| I.2.4.3.1.3 Par rayonnement..... | 8 |
| I.3. Système de concentration..... | 9 |
| I.3.1 Le système de poursuite solaire :..... | 10 |

Chapitre II :recherche bibliographique

| | |
|--|----|
| II.1. Absorbeur adopté dans la présente étude :..... | 11 |
| II.2. Problème posé :..... | 12 |
| II.3 Recherche bibliographique :..... | 12 |
| II.4. conclusion :..... | 15 |

Chapitre III : Modélisation par éléments finis

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction: | 16 |
| III.2. Cas mécanique : | 16 |
| III.2.1. Tenseur de contraintes :..... | 16 |
| III.2.2. Vecteur de contrainte:..... | 17 |
| III.2.3. Contrainte normale et tangentielle:..... | 18 |
| III.2.4. Contraintes principales et directions principales:..... | 19 |
| III.2.5. Déplacements - Déformations: | 19 |
| III.2.5.1 Champ de déplacements: | 19 |

| | |
|--|----|
| III.2.5.2. Tenseur des déformations: | 19 |
| III.2.6. Déformations principales et directions principales: | 20 |
| III.2.7. Loi de comportement:..... | 21 |
| III.2.7.1. Matériaux Anisotropes :..... | 21 |
| III.2.7.2. Matériau orthotrope : | 22 |
| III.2.7.3. Matériaux isotropes :..... | 22 |
| III.3. Cas thermique :..... | 22 |
| III.3.1. Calcul de la déformation thermique: | 23 |
| III.3.1.1. Coefficients de dilatation thermique α (cas isotrope): | 24 |
| III.3.1.2. Tenseur de dilatation thermique: | 25 |
| III.3.2. Tenseur de conductivité thermique..... | 26 |
| III.3.3. Bilan thermique et équation de la chaleur: | 26 |
| III.3.4. Forme discrétisée (éléments finis) :..... | 27 |
| III.3.4.1. Représentation du champ de températures : | 28 |
| III.5. Discrétisation de la forme intégrale faible: | 28 |
| III.6 Exemple de calcul élémentaire :..... | 29 |
| III.7. Élasticité et thermo-élasticité :..... | 29 |
| III.7.1. Déformations thermo-élastiques:..... | 31 |
| III.7.2. Élasticité : | 31 |
| III.7.2.1 Élasticité isotrope:..... | 31 |
| III.7.3. Déformation thermique et thermo-élasticité isotrope :..... | 31 |
| III.8 Critères de limite élastique:..... | 32 |
| III.8.1 Critère de Von Mises:..... | 34 |
| Chapitre IV :Modélisation numérique sur l'ABAQUS | |
| IV.1. Introduction:..... | 35 |
| IV.2. Le code de calcul ABAQUS:..... | 35 |
| IV.2.1. L'interface d'ABAQUS:..... | 36 |
| IV.2.2. Déroulement de la modélisation sous ABAQUS:..... | 36 |
| IV.3. Modèle température-déplacement :..... | 37 |
| IV.3.1. Création de module pièce:..... | 37 |
| IV.3.2. Module Mesh : | 40 |
| IV.3.3. Module property :..... | 42 |

| | |
|---|----|
| IV.3.4. Module Assembly : | 43 |
| IV.3.5. Module Steps : | 43 |
| IV.4.6. Module Interaction:..... | 44 |
| Calcul du coefficient de convection (h_c) [IV-4] :..... | 44 |
| IV.3.7. Module Load : | 47 |
| IV.3.8. Module jobs : | 50 |
| Chapitre V : Résultats et discussion | |
| V.1. Résultats : | 51 |
| V.1.1. Pour l'Acier inoxydable 316L : | 51 |
| V.1.1.1. Distribution de le température en (TEMP) [K] : | 51 |
| V.1.1.2. déformations thermique (THE) : | 53 |
| V.1.1.3. Champ de déplacement U en [m] : | 55 |
| V.1.2. Pour l'alliage de cuivre C17200: | 60 |
| V.1.2.1. Distribution de le température (TEMP) [K] : | 60 |
| V.1.2.2. Les déformations thermique (THE) : | 62 |
| V.1.2.3. Champ de déplacement U en [m] : | 64 |
| V.2. Discussion des résultats : | 68 |
| V.2.1. Température et déformation thermique : | 68 |
| V.2.2. Déplacement : | 68 |
| V.2.3. Conclusion : | 69 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I- 1: Concentrateur cylindro-parabolique..... | 2 |
| Figure I- 2: Schéma d'un concentrateur cylindro-parabolique | 2 |
| Figure I- 3: réflecteurs de rayonnement solaire..... | 3 |
| Figure I- 4: structure métallique..... | 4 |
| Figure I- 5: tube absorbeur..... | 4 |
| Figure I- 6: Structure de l'absorbeur | 5 |
| Figure I- 7: coupe transversal de tube avec les différents modes d'échange de chaleur..... | 7 |
| Figure I- 8: Système optique d'une surface cylindro-parabolique..... | 9 |
| Figure I- 9: Dimensionnement du diamètre par rapport à réflecteur | 9 |
| Figure I- 10: Les modes de poursuite solaire d'un CCP..... | 10 |
| | |
| Figure II- 1: Tube absorbeur classique droit..... | 11 |
| Figure II- 2: Tube absorbeur sinusoïdale..... | 11 |
| Figure II- 3: Distribution de champ de température sur la surface externe du tube droit..... | 12 |
| Figure II- 4: Distribution de champ de température sur la surface externe de tube sinusoïdal..... | 12 |
| Figure II- 5: la différence de la distribution de flux de solaire entre le tube d'acier droite et sinusoïde | 12 |
| Figure II- 6: Distribution du flux de chaleur su l'absorbeur | 13 |
| Figure II- 7: le rapport entre $Tdif$ de tube et la vitesse de fluide et sa température | 14 |
| Figure II-8: Le rapport entre la flexion de tube et la vitesse et la température du fluide (de 9 CCP assemblés bout à bout)..... | 13 |
| Figure II- 1: présente la déformation directionnelle calculée de 9 CCP assemblés bout à bout..... | 14 |
| | |
| Figure III- 1: Contraintes autour du point A..... | 15 |
| Figure III- 2: Contrainte normale σ et tangentielle τ en un point A | 16 |
| Figure III- 3: Contraintes principales autour du point A..... | 17 |
| Figure III- 4: calcul de déformation thermique..... | 21 |
| Figure III- 5: Le vecteur densité de flux..... | 23 |
| Figure III- 6: Matériau anisotrope | 23 |
| Figure III- 7: Matériau isotrope..... | 24 |
| Figure III- 8: Bilan thermique | 24 |
| Figure III- 9: Domaine plan discrétisé en 12 élément reliés entre eux par nœuds..... | 25 |
| Figure III- 10: élément a deux nœuds..... | 27 |
| Figure III-11: Courbe de traction (σ , ϵ) | 31 |
| | |
| Figure IV- 1: Organisation de l'abaqus..... | 36 |
| Figure IV- 2: Les coordonnées des points de la courbe sinusoïde..... | 37 |
| Figure IV- 3: demi courbe sinusoïde | 38 |
| Figure IV- 4: demi cylindre sinusoïde..... | 38 |
| Figure IV- 5: les 8 sections longitudinales..... | 38 |
| Figure IV- 6: coupe longitudinal de tube..... | 38 |
| Figure IV- 7: 3 sections premières contient 4 faces de distribution..... | 39 |
| Figure IV- 8: 5 section reste contient 3 faces de distribution..... | 39 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure IV- 9: la structure complet de tube sinusoide..... | 39 |
| Figure IV- 10: Création des propriétés des matériaux..... | 40 |
| Figure IV- 11: Création de module step..... | 41 |
| Figure IV- 12: Création des flux solaire..... | 41 |
| Figure IV- 13: Création de flux sur la section1..... | 41 |
| Figure IV- 14: Définir l'équation de la section1..... | 42 |
| Figure IV- 15: Distribution des flux solaire appliqué sur toute la structure..... | 42 |
| Figure IV- 16: Maillage de tube (mauvais maillage)..... | 43 |
| Figure IV- 17: Les éléments de maillage sur les bords de la structure..... | 43 |
| Figure IV- 18: Correction du nombre d'éléments du maillage..... | 44 |
| Figure IV- 19: Le maillage après réglage..... | 44 |
| Figure IV- 20: Création de module steps..... | 45 |
| Figure IV- 21: Création des extrémités..... | 46 |
| Figure IV- 22: Définition des extrémités du tube..... | 46 |
| Figure IV- 23: Définition des conditions aux limites..... | 46 |
| Figure IV- 24: La paroi interne de tube..... | 49 |
| Figure IV- 10: Création des propriétés de matériau..... | 42 |
| Figure IV- 11: Création de module step..... | 42 |
| Figure IV- 12: Création des flux solaire..... | 43 |
| Figure IV- 13: Création de flux sur de la section1..... | 43 |
| Figure IV- 14: Définir l'équation3 de la section1..... | 44 |
| Figure IV- 15: Distribution des flux solaire appliqué sur toute la structure..... | 44 |
| Figure IV- 16: Maillage de tube (mauvais maillage)..... | 45 |
| Figure IV- 17: Les éléments de maillage sur les bords de la structure..... | 45 |
| Figure IV- 18: Correction du nombre d'éléments du maillage..... | 46 |
| Figure IV- 19: Le maillage après réglage..... | 46 |
| Figure IV- 20: Création de module steps..... | 47 |
| Figure IV- 21: Définition des extrémités du tube..... | 48 |
| Figure IV- 22: Définition des conditions aux limites..... | 48 |
| Figure IV- 23: La paroi de tube..... | 50 |
| Figure V- 1:Variation de la température dans le tube en acier inoxydable pour $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$ et $\text{Re}=5000$ (Acier inoxydable)..... | 51 |
| Figure V- 2:Variation de la température dans le tube en acier inoxydable pour $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$ et $\text{Re}=16000$ (Acier inoxydable)..... | 52 |
| Figure V- 3: Variation de la température dans le tube en acier inoxydable pour $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$ et $\text{Re}=5000$ (Acier inoxydable)..... | 52 |
| Figure V- 4: Variation de la température dans le tube en acier inoxydable pour $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$ et $\text{Re}=16000$ (Acier inoxydable)..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figure V- 5: Variation de la déformation thermique à $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable) | 53 |
| Figure V- 6: Variation de la déformation thermique à $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable) | 54 |
| Figure V- 7: Variation de la déformation thermique à $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable) | 54 |
| Figure V- 8: Variation de la déformation thermique à $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable)... | 55 |
| Figure V- 9: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable) | 55 |
| Figure V- 10: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable) | 56 |
| Figure V- 11: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable) | 56 |
| Figure V- 12: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable) | 56 |
| Figure V- 13: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable) | 57 |
| Figure V- 14: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable) | 57 |
| Figure V- 15: Déplacement U2 avec: $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable) | 58 |
| Figure V- 16: Déplacement U2 avec: $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable) | 58 |
| Figure V- 17: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable) | 58 |
| Figure V- 18: Déplacement U3 avec: $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable) | 59 |
| Figure V- 19: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable) | 59 |
| Figure V- 20: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable) | 59 |
| Figure V- 21: Variation de la température à $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre) | 60 |
| Figure V- 22: Variation de la température à $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 60 |
| Figure V- 23: Variation de la température à $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre) | 61 |
| Figure V- 24: Variation de la température à $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 61 |
| Figure V- 25: Variation de la déformations thermique à $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)... | 62 |
| Figure V- 26: Variation de la déformations thermique à $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 62 |
| Figure V- 27: Variation de la déformations thermique à $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre) | 63 |
| Figure V- 28: Variation de la déformations thermique à $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 63 |
| Figure V- 29: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre) | 64 |
| Figure V- 30: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 64 |
| Figure V- 31: Déplacement U1 avec | 65 |
| Figure V- 32: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 65 |
| Figure V- 33: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre) | 65 |
| Figure V- 34: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 66 |
| Figure V- 35: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre) | 66 |
| Figure V- 36: Déplacement U2 avec: $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 66 |
| Figure V- 37: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre) | 67 |
| Figure V- 38: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 67 |
| Figure V- 39: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre) | 68 |
| Figure V- 40: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre) | 68 |
| Figure V- 41: Distribution de la température en [K] | 69 |
| Figure V- 42: Distribution de la déformation thermique [sans unité] | 70 |

Tableau

| | |
|---|----|
| Tableau IV- 1: Les coordonnées des points de la courbe sinusoïde..... | 37 |
| Tableau IV- 2:Les propriétés du matériau (acier inoxydable)..... | 42 |
| Tableau IV- 3:Les propriétés du matériau (alliages de cuivre)..... | 43 |
| Tableau IV- 4:Les propriétés du fluide (à 400°K)..... | 45 |
| Tableau IV- 5:Les propriétés du fluide (à 650°K)..... | 45 |

Historique

Historique

La consommation énergétique a augmenté ces dernières années avec la croissance rapide dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel. Pour le moment la demande énergétique en Algérie est assurée par les grands gisements de pétrole et surtout de gaz. Les problèmes engendrés par l'utilisation des énergies fossiles sont bien connus: pollution de l'air, effet de serre. Face à cela, Il est possible que dans certains cas précis d'autres sources d'énergie dites renouvelables comme l'énergie solaire, éolienne et géothermique soient plus rentables ou plus pratiques à mettre en œuvre. Ces 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 à la suite de la signature du protocole de Kyoto. Protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2% des émissions de gaz à effet de serre des pays riche sur la période 2002-2012 par rapport à 1990 [1]. Au premier rang de ces énergies on trouve l'énergie solaire qui caractérisée par sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile. Au niveau national, l'Algérie a élaboré un programme pour l'exploitation des énergies renouvelables depuis 2011. Ce programme pris en charge principalement par le Ministère de l'Énergie, des centrales photovoltaïques, éoliennes et solaires à Concentration seront installées progressivement jusqu'à 2030 pour atteindre les objectifs fixés dans ce programme. Les systèmes solaires, notamment les systèmes à concentration solaire sont de plus en plus sollicités pour contribuer à la satisfaction des besoins en énergie. La technologie des concentrateurs solaires vient d'atteindre un niveau très remarquable, en utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur une petite surface. Il existe quatre principaux types des concentrateurs solaires, les concentrateurs cylindro-paraboliques, les miroirs de Fresnel, les tours solaires et les concentrateurs paraboliques. La technologie des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques (CCP) est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire, il offre un bon rendement thermique jusqu'à des températures supérieures au 400°C [2]. L'application la plus importante de cette technologie est les centrales solaires à concentration (appelées aussi ConcentratingSolar Power -CSP-). Au sud de l'Algérie (HassiR'mel) une première centrale solaire hybride basée sur des réflecteurs cylindro-paraboliques a été installée en 2010[3]. Il existe d'autres applications de la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques, que le chauffage d'eau, le dessalement d'eau et le froid solaire. Le CCP peut être employé pour dessaler

Historique

l'eau, en reliant le champ solaire à une usine thermique de dessalement par les différents procédés industriels (simple effet, multiples effets et multiples étages), de plus on peut remplacer les capteurs solaires plans par un champ des concentrateurs cylindro-paraboliques dans les équipements de chauffage d'eau solaire, parce qu'il assure des grandes températures de fonctionnement avec une plus petite surface de captation par rapport aux capteurs plans. En conséquence, les demandes plus élevées peuvent être couvertes en mélangeant l'eau chaude à un autre froide, les exemples des applications avec des taux élevés de consommation d'eau chaude sont multiples les usines, les hôpitaux et les équipements des ports [4]. Dans le secteur résidentiel plusieurs recherches sont enregistrées dans la littérature pour l'optimisation de la consommation énergétique par des petits systèmes de climatisation ou de réfrigération solaires à base des concentrateurs cylindro-paraboliques. En Algérie le coût est encore trop élevé pour pouvoir espérer faire décoller rapidement le marché des concentrateurs cylindro-paraboliques à grande échelle (industrielle ou semi industrielle). Néanmoins, des installations à petite échelle (domestique) peuvent engendrer la baisse de coût, par l'intégration de ce type des concentrateurs dans des petits systèmes de chauffage eau solaire, de distillation solaire, de cuiseur solaire ou de climatisation solaire.

Le but:

L'objectif de travail est de déterminer par modélisation numérique le comportement thermomécanique de tube de forme sinusoïde.

L'étude concernera principalement le calcul de flambement des tubes dans différents conditions de travail sous l'effet de champ de température variables.

Chapitre I : Généralités sur les concentrateurs cylindro-paraboliques

I.1.Introduction:

La collection de l'énergie solaire peut être identifiée. Il existe deux techniques distinctes de collection d'énergie à savoir :

- La technique plane (capteurs plans) ;
- La technique de concentrateur solaire.

La première utilise une méthode simple de conversion d'énergie solaire incidente en énergie thermique directement utilisable, par conséquent leur domaines d'utilisation est très restreint et il présente en outre un certains nombres d'inconvénients; ce qui a poussé les spécialistes et particulièrement les constructeurs à concevoir d'autres modèles de configurations afin de trouver un prototype qui améliore le rendement au maximum et remédier aux inconvénients du technique plane (réduction du poids, manutention rapide et facile.....etc.). Tandis que la deuxième utilise un nouveau prototype appelé « concentrateur solaire », qui fournisse une quantité de chaleur considérable. L'idée de concentration de rayonnement solaire a commencée en 1980 par un groupe de chercheurs français [5]. Les capteurs plans sont utilisés pour des applications à basses et à moyennes températures, par contre les concentrateurs solaires de type cylindro-parabolique sont surtout utilisés dans les applications industriels et domestiques exigeant une température comprise entre 80°C et 160°C[6], et qui peut atteindre pour certaines installations sophistiquées des valeurs de températures plus élevé atteignant parfois 1500°C et plus, utilisés dans certaines applications telle que la production de la vapeurs surchauffé dans les centrales électriques [7].

Pour mettre plus d'accent sur l'effet de forme et de l'état de surface sur les performances thermiques des concentrateurs, on a voulu contribuer par la présente étude, avec une nouvelle idée de conception de l'absorbeur, qui conjugue la forme sinusoïdale et l'effet de concentration des capteurs cylindro-paraboliques (CCP). Un CCP comporte des absorbeurs d'énergie montés en série et fixés sur un support qui peut être orienté suivant les rayons solaires. Les absorbeurs sont reliés entre eux pour former un système hydraulique de type *serpentin*, dans le quel circule un fluide caloporteur. L'étude du chauffage de l'eau par ce concentrateur comporte deux parties essentielles : la première partie, concerne le dimensionnement mécanique, thermique et optique du CCP, la deuxième partie est entièrement réservée à l'étude thermique de l'absorbeur. Le transfert

de chaleur se fait principalement Par la convection forcée qui peut être laminaire ou turbulente [8],[9].

I.2. Concentrateur cylindro-parabolique :



Figure I-1:Concentrateur cylindro-parabolique

La technologie des CCP et actuellement la plus éprouvée, donc il y a de nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées(représentent 94 % des centrales actuellement en activité). L'énergie solaire émise au collecteur, par rayonnement, est absorbée par un tuyau métallique placé à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide (huile synthétique) qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé jusqu'à une température de 400°Cenviron. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire de la vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique[10].

I.2.1. Description du CCP:

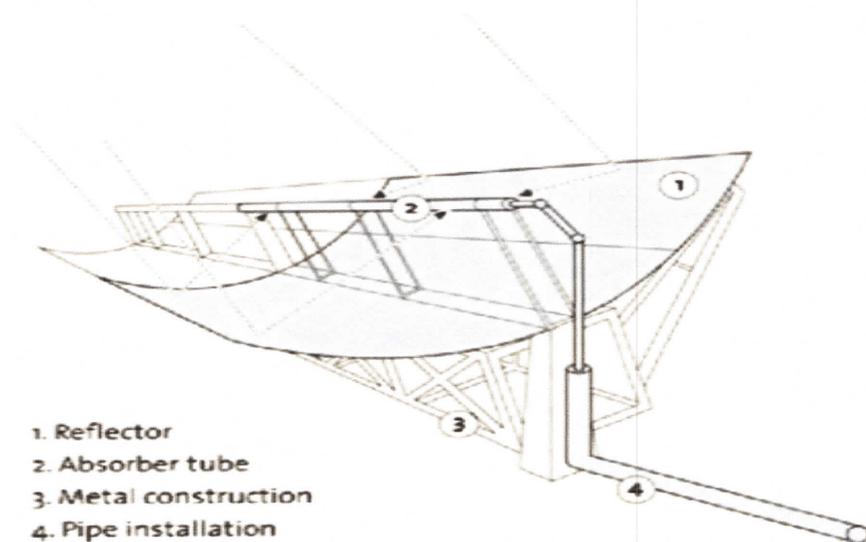


Figure I-2:Schéma d'un concentrateur cylindro-parabolique (CCP) [11]

I.2.2. Réflecteur cylindro-parabolique :

Le réflecteur du CCP est généralement un miroir ou autre métal réfléchissant. Un miroir est composé du verre pauvre en fer, ce verre est recouvert, sur sa face inférieure, d'une pellicule d'argent et d'un enduit spécial de protection [12]. Le matériau réfléchissant le mieux indiqué est l'aluminium pur, l'acier inoxydable a été expérimenté mais il n'est pas conseillé car son pouvoir de réflexion est insuffisant. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident.

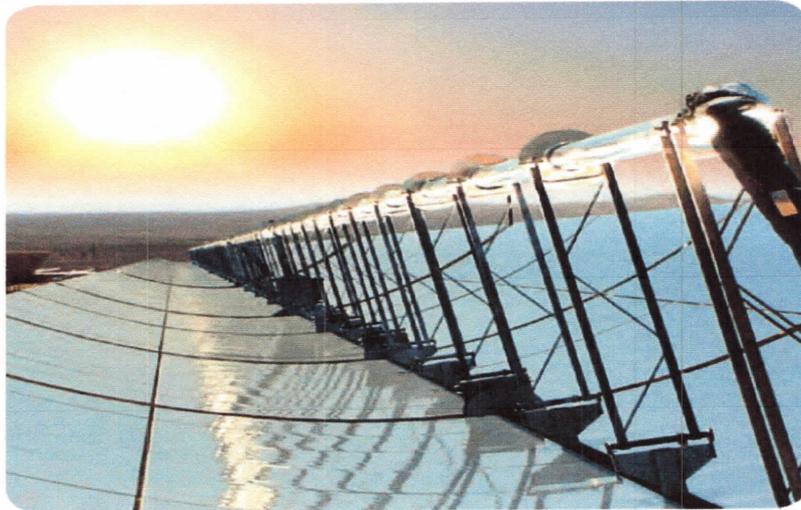


Figure I-3: Réflecteurs de rayonnement solaire

I.2.3. Support métalliques :

Le support métallique du réflecteur doit être suffisamment rigide pour résister aux importantes sollicitations produites par le vent. Il doit de plus être muni d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier et du verre.



Figure I-4: Support métallique.

I.2.4. Tube absorbeur :



Figure I-5: Tube absorbeur.

L'absorbeur est le composant principal dans le CCP, il représente généralement 30% du coût de la construction[13]. Les pertes par échanges convectifs et radiatifs à l'extérieur sont très importantes, afin de les limiter, une enveloppe en verre recouvre l'absorbeur et permet, en faisant le vide dans l'espace annulaire, d'éliminer les pertes thermiques par convection entre le tube absorbeur et l'enveloppe (tube en verre). Les pertes de chaleur peuvent être réduites aussi en réduisant l'émissivité dans l'infrarouge du tube absorbeur (cuivre ou aluminium) à l'aide des surfaces dite sélectives. Ces surfaces

sont de couleur foncée afin d'absorber le maximum de rayonnement solaire en émettant très peu d'infrarouges, de nos jours les fabricants emploient des revêtements utilisent des oxydes de chrome, de nickel ou de titane réalisé par plusieurs méthodes (projection sous vide, électrolyse, action chimique...)[12].

I.2.4.1. Description de tube absorbeur:

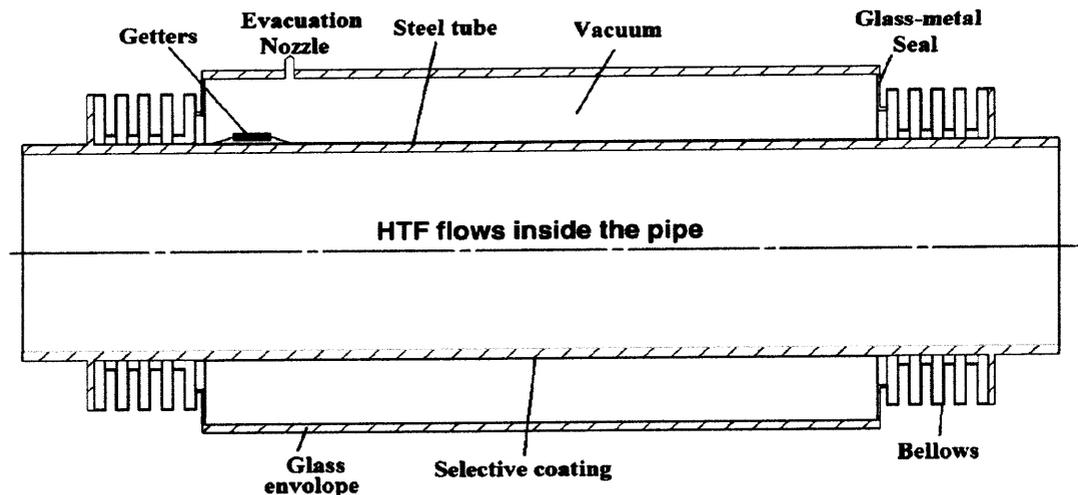


Figure I- 6: Structure de l'absorbeur[12]

I.2.4.1.1. Matériaux des premiers absorbeurs:

L'acier inoxydable : ces absorbeurs sont constitués d'un serpentin en tubes d'acier inoxydable collés entre deux feuilles d'aluminium pré-embouties, résistants à la corrosion, mais ils ont un rendement faible, à cause d'une perte de contact entre les tubes et les feuilles d'aluminium.

I.2.4.3.Echange de chaleur dans l'absorbeur:

Dans cette partie, on s'intéresse aux différents modes de transfert de chaleur (rayonnement, conduction, convection) dans l'absorbeur. D'après ce qui précède, le flux reçu par l'absorbeur est transmis à travers l'enveloppe en verre de l'absorbeur. Arrivé sur la face externe du tube, il est alors diffusé à l'autre facette /interne/ par conduction et par convection dans l'espace annulaire (Vide parfait), mais les pertes par rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe en verre doivent être pris en considération, la figure (I-7) ci-après illustre les différents échanges de chaleur dans le tube récepteur, alors absorber par l'huile en contact direct avec la paroi interne, par le processus de convection dans ce mécanisme, on peut négliger les pertes

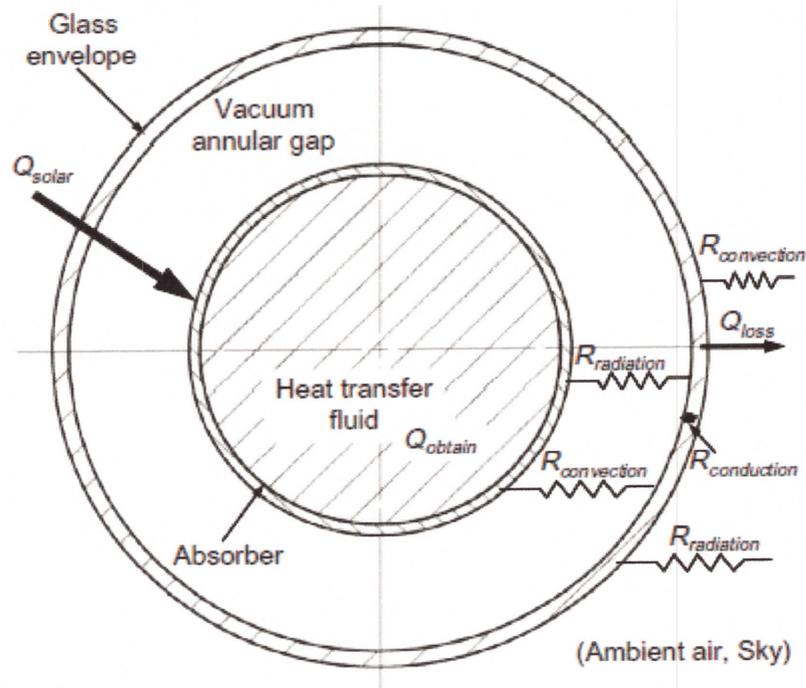


Figure I-7: coupe transversal de tube avec les différents modes d'échange de chaleur.

I.2.4.3.1. Flux de chaleur

La chaleur est transférée, sous l'influence d'un gradient de température, par conduction des points ayant des températures élevées vers les points ayant des températures moins élevées. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\phi = \frac{1}{s} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I.1})$$

où s est l'aire de la surface (m^2).

On appelle flux de chaleur, la quantité de chaleur transmise à travers la surface s par unité de temps : $\phi = \frac{dQ}{dt}$

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons :

I.2.4.3.1.1. Par conduction

Ce transport de chaleur se produit au sein d'une même phase - au repos ou mobile, mais tranquille (absence de remous) - en présence d'un gradient de température. Le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre

molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque. Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (liquides ou gaz), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.

I.2.4.3.1.2. Par convection

Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température. Par suite de l'existence du transfert de chaleur d'une phase à l'autre, il existe dans la phase mobile des fractions du fluide (ou agrégats) ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masse volumique due aux différences de températures (on parle alors de convection libre ou naturelle) ou à des moyens purement mécaniques (on parle alors de convection forcée). Lorsqu'un fluide est en écoulement, une partie du transfert de chaleur dans le fluide se fait également par conduction et, dans le cas d'un fluide transparent, un transfert de chaleur par rayonnement peut accompagner les deux transferts précédents.

I.2.4.3.1.3. Par rayonnement

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchi, une autre transmise à travers le corps (dit diathermique si tout est transmis), et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur. Si on place dans une enceinte deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique, il existe entre ces deux corps à températures différentes un échange de chaleur dû à l'absorption et à l'émission de ces rayonnements thermiques. Cet échange de chaleur est désigné habituellement sous le nom de rayonnement. Les transferts par rayonnement se poursuivent même lorsque l'équilibre thermique est atteint, mais le débit net de chaleur échangé est nul. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière, et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques. Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique de l'appareil de transfert. Nous pouvons dire dès à présent, qu'aux températures ordinaires, le transport par rayonnement est négligeable, mais il peut

devenir notable et prépondérant lorsque le niveau de température augmente. Dans ce qui suit nous allons présenter, pour les deux types de transfert de la chaleur, (conduction, convection).

I.3. Système de concentration

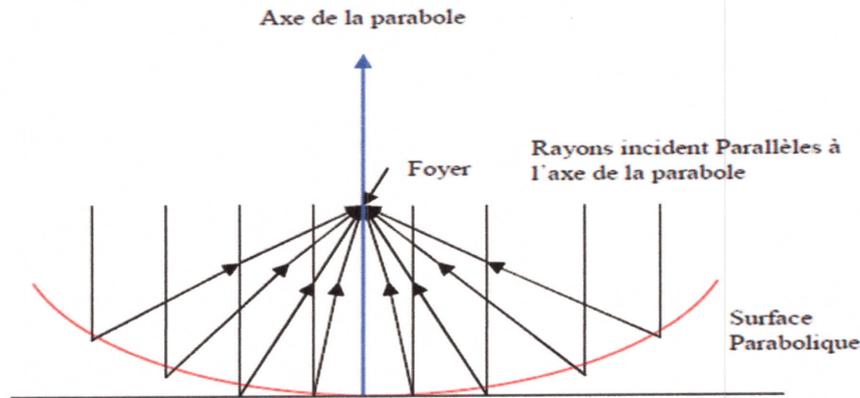


Figure I- 8: Système optique d'une surface cylindro-parabolique[14].

L'idée d'utiliser une surface cylindro-parabolique vient du fait qu'elle est stigmatique pour les points à l'infini situé sur son axe. D'après les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le foyer. Donc la parabole focalise tous les rayons réfléchis en un point appelé « foyer » [14], le diamètre extérieur minimum de l'absorbeur en fonction des dimensions du réflecteur est donné par [15]:

$$D_{ab(min)} = \frac{W \sin(0.267)}{\sin(\phi)} \quad (I-2)$$

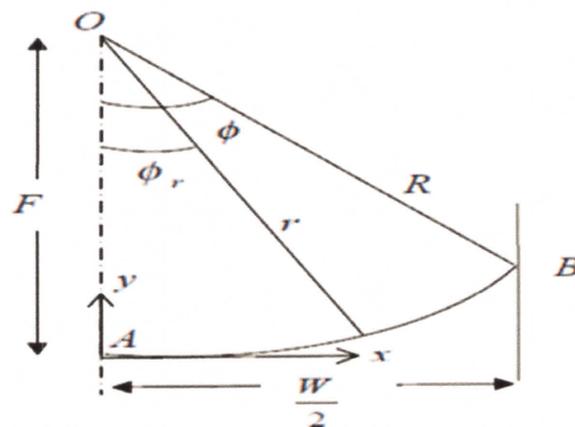


Figure I- 9: Dimensionnement du diamètre par rapport au réflecteur [15].

I.3.1 Système de poursuite solaire :

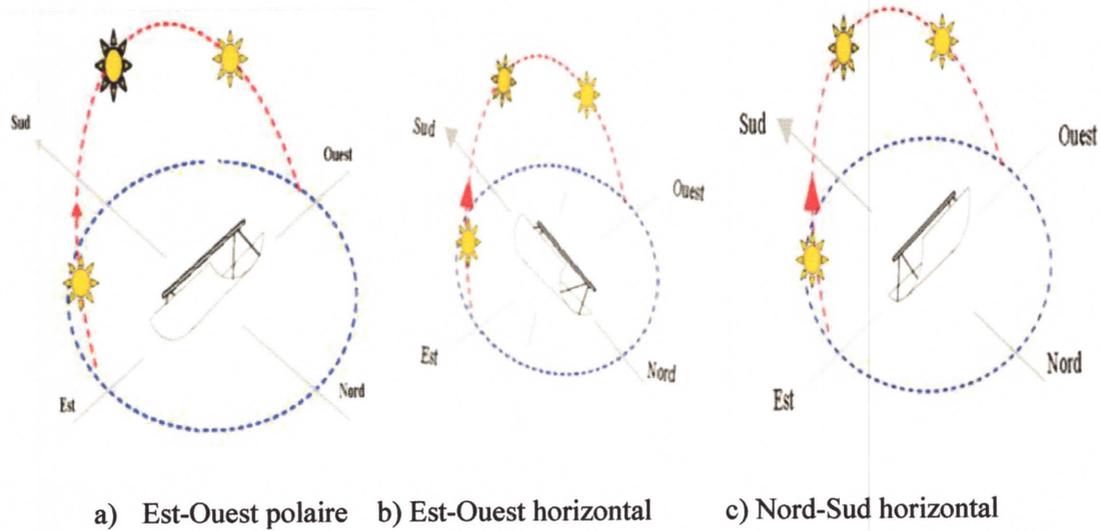


Figure I- 10:Les modes de poursuite solaire d'un CCP[16].

Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter l'inclinaison du concentrateur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au plan d'ouverture du concentrateur (angle d'incidence nulle).

- Est-Ouest horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Nord-Sud.
- Nord-Sud horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Est-Ouest.
- Est-Ouest polaire, le mouvement doit être suivant l'axe de la terre avec une inclinaison égale à la latitude du lieu.

Chapitre II :
Recherche bibliographique

II.1. Absorbeur adopté dans la présente étude :

De la recherche bibliographique il a été mis en évidence le perfectionnement des échanges de chaleur dans les tubes présentant des courbures. Afin d'améliorer le transfert de chaleur dans les absorbeurs, En 2015 Y. Demagh et al [1] proposent de remplacer le tube absorbeur droit figure (II-1), par un autre de forme sinusoïdale figure (II-2).

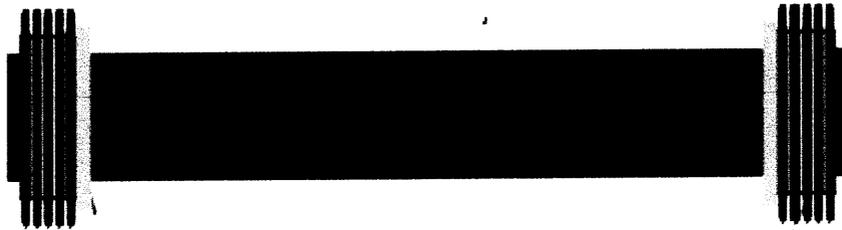


Figure II- 1: Tube absorbeur classique droit.

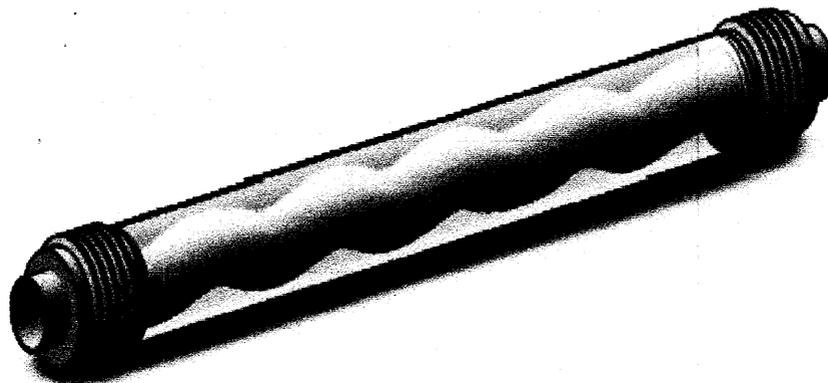


Figure II- 2: Tube absorbeur sinusoïdale

➤ Distribution de champ de température [17] :

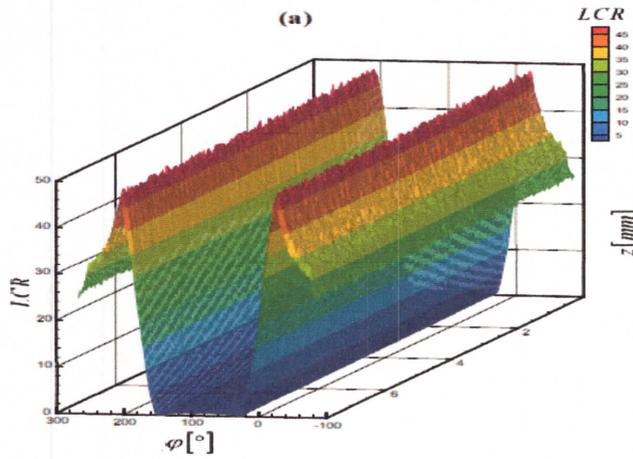


Figure II- 3: Distribution de champ de température sur la surface externe du tube droit

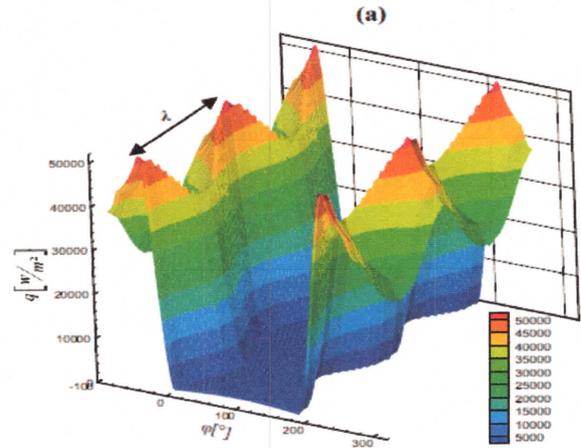


Figure II- 4: Distribution de champ de température sur la surface externe de tube sinusoïdal

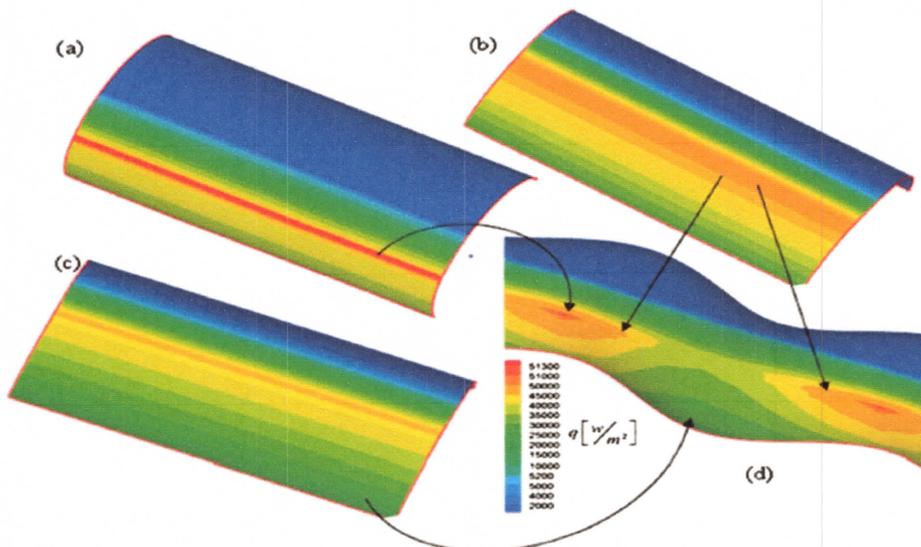


Figure II-5: la différence de la distribution de flux solaire entre le tube d'acier droite et sinusoïde

II.2. Problème posé :

Depuis 1984, les neuf premières grandes centrales cylindro-paraboliques à l'échelle commerciale, 28 ans d'expérience ont montré que la cause probable de la défaillance structurale du CCP est la flexion du tube absorbeur. Pour cela, les études et les recherches mondiales sur CCP sont basées sur la déformation de l'absorbeur. Le présent chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur ces études.

II.3. Recherche bibliographique [18]:

En 2014, Zhiyong Wu et al. ont fait une étude numérique et expérimentale sur un CCP (boucle de 36 m), pour connaître l'influence de la contrainte thermique, le montage et l'état voisin du CCP sur la déformation de l'absorbeur.

Spécifiquement, Wang et Shuai ont adopté la méthode de MCRT (traçage du rayon de Monte-Carlo), le CFD (Computational Fluid Dynamic) et le FEA (Finite Element Analysis) pour analyser les distributions de la température, l'effort thermique des récepteurs excentriques de tube.

➤ Résultats:

Le résultat de Zhiyong Wu et al. obtenu montre une distribution du flux de chaleur sur l'absorbeur non uniforme en fonction de la variation de l'angle. Cette non-uniformité crée une différence de température $T^\circ(T_{dif})$.

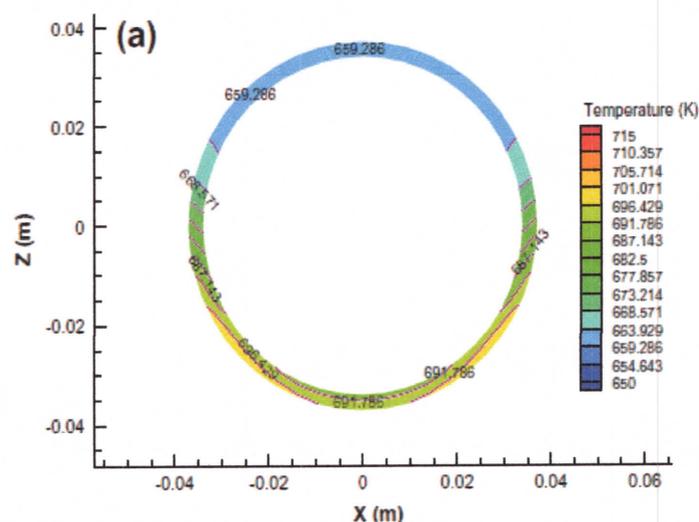
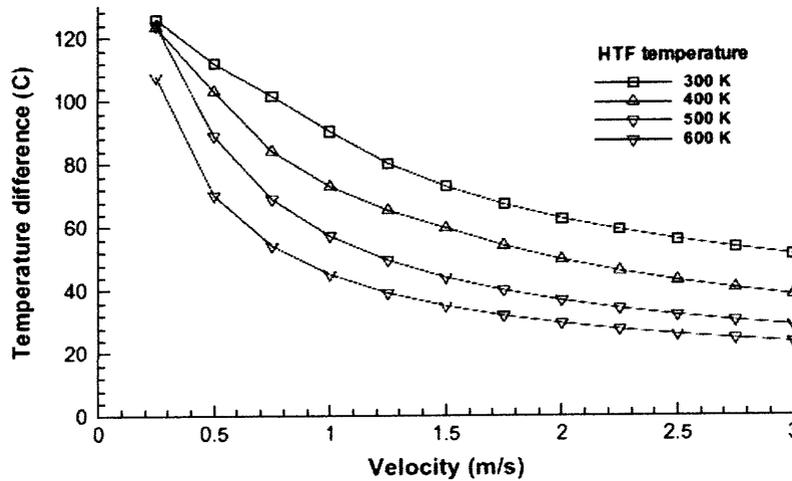


Figure II- 6: Distribution du flux de chaleur sur l'absorbeur

La figure (II.7), montre que plus la vitesse de fluide augmente, plus la T_{dif} est diminuée, et plus la température d'admission de fluide est haute, plus la T_{dif} diminue.



$$T_{dif} = T_{max} - T_{min} \tag{II.1}$$

Figure II- 7: Rotation entre (T_{dif}) de tube et la vitesse de fluide et sa température [18]

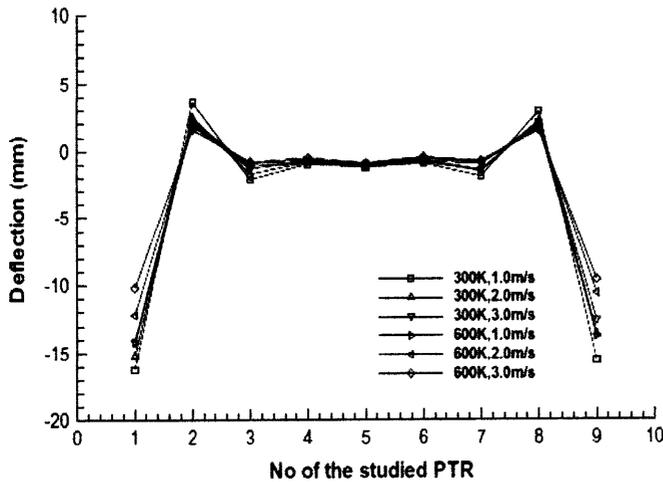


Figure II- 8: Variation de la flexion de tube en fonction de la vitesse et la température du fluide (de 9 CCP assemblés bout à bout) [18]

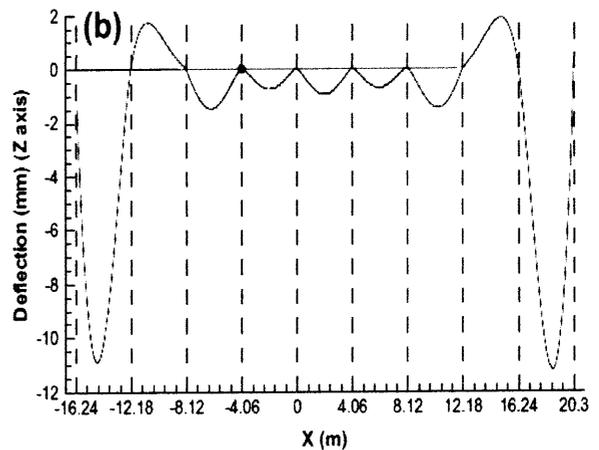


Figure II- 9: présente la déformation directionnelle calculée de 9 CCP assemblés bout à bout [18]

Cette figure montre également la variation de la flexion de tube en fonction de la température de fluide et sa vitesse. Les résultats de simulation prouvent que les flexions de 2 tubes sur les deux cotés sont beaucoup plus grandes que celui de 7 tubes du milieu. La figure (II.8) montre clairement que la flexion de tube dépend de l'effort thermique, ses conditions de support et l'état voisin de CCP.

II.4. Conclusion :

Le problème qui se pose est que l'absorbeur de forme sinusoïdale n'était jamais réalisé jusqu'à maintenant. Donc, le comportement mécanique de ce type d'absorbeur est inconnu, Pour cela , nous essayerons de faire une modélisation numérique par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel de modélisation numérique ABAQUS.

CHAPITRE III :
Modélisation par éléments finis

III.1 Introduction:

La méthode des éléments finis est une technique numérique utilisée pour la résolution des équations différentielles gouvernant un problème physique donné. Cette méthode consiste à formuler le problème posé afin d'obtenir un ensemble d'équations algébriques concernant un nombre limité de variables. La technique des éléments finis a été initialement développée pour des problèmes structurels, mais elle a été étendue à de nombreux problèmes du terrain. Le milieu continu étudié est décomposé en éléments de formes géométriques simples ayant des côtés et ou des surfaces communs. L'intersection des surfaces donne des arêtes tandis que celle des arêtes donne points (nœuds). Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures. L'opération de décomposition est le maillage. Un bon maillage doit faciliter les opérations prévues par un programme d'ordinateur.

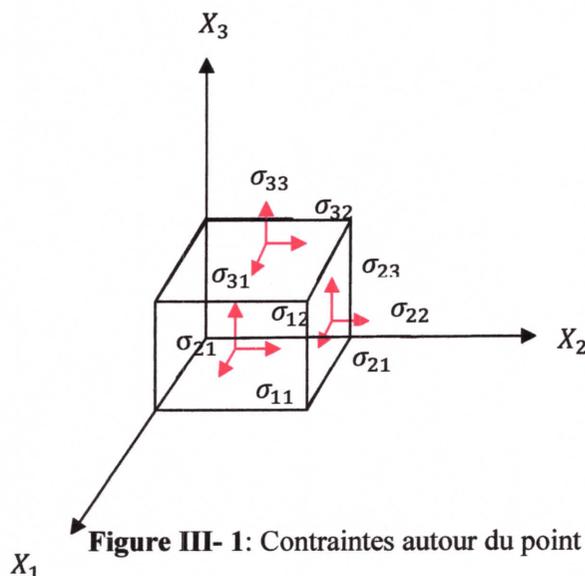
Il faut donc adopter une méthode systématique de numérotation des éléments et des nœuds.

III.2. Cas mécanique [III-1]:

III.2.1. Tenseur de contraintes :

L'état de contrainte en un point A (figure III.1) est caractérisé par le tenseur de contraintes. Ce dernier est un tenseur symétrique du second ordre. Dans une base orthonormée directe, il est représenté par la matrice σ_{ij} tel que :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \cdot & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \text{sym} & \cdot & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad \sigma_{21} = \sigma_{12}, \sigma_{31} = \sigma_{13}, \sigma_{32} = \sigma_{23}$$



Dans cette notation du tenseur de contraintes, le premier indice (i) indique la direction de la normale à la facette sur laquelle la contrainte est appliquée tandis que le deuxième indice (j) indique la direction suivant laquelle est appliquée la contrainte.

III.2.2. Vecteur de contrainte:

Soit un point A d'un solide, et une direction repérée par un vecteur unitaire \vec{n} . Soit une facette infiniment petite d'aire dS de normale \vec{n} . Le vecteur contrainte au point A suivant la direction \vec{n} s'écrit :

$$\vec{T}(A, \vec{n}) = \overline{\sigma}(A)\vec{n}$$

Soit :

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11}n_1 & \sigma_{12}n_2 & \sigma_{13}n_3 \\ \sigma_{21}n_1 & \sigma_{22}n_2 & \sigma_{23}n_3 \\ \sigma_{31}n_1 & \sigma_{32}n_2 & \sigma_{33}n_3 \end{bmatrix}$$

III.2.3. Contrainte normale et tangentielle:

Le vecteur contrainte en un point A et pour la direction \vec{n} (figure III.2) peut être projeté :

- **suivant la normale \vec{n}** : on obtient la contrainte normale :

$$\sigma = \vec{T}(A, \vec{n}) \cdot \vec{n} = \vec{n}^t \overline{\sigma}(A)\vec{n}$$

$$\sigma = [n_1 \ n_2 \ n_3] \begin{bmatrix} \sigma_{11}n_1 & \sigma_{12}n_2 & \sigma_{13}n_3 \\ \sigma_{21}n_1 & \sigma_{22}n_2 & \sigma_{23}n_3 \\ \sigma_{31}n_1 & \sigma_{32}n_2 & \sigma_{33}n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1(\sigma_{11}n_1 & \sigma_{12}n_2 & \sigma_{13}n_3) \\ n_2(\sigma_{21}n_1 & \sigma_{22}n_2 & \sigma_{23}n_3) \\ n_3(\sigma_{31}n_1 & \sigma_{32}n_2 & \sigma_{33}n_3) \end{bmatrix}$$

- **sur le plan tangent à dS** : on obtient la contrainte tangentielle τ telle que
- $$\tau^2 = [T(A, n)]^2 - \sigma^2$$

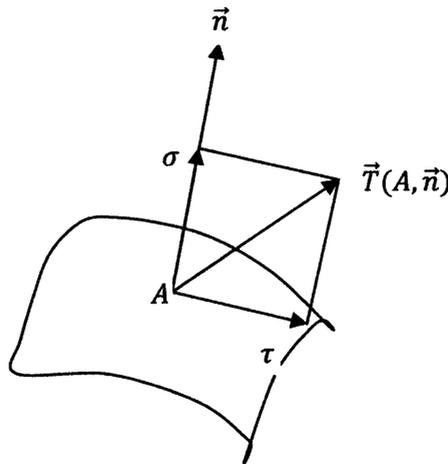


Figure III- 2: Contrainte normale σ et tangentielle τ en un point A

Les contraintes normales et tangentielles sont d'une grande importance en mécanique des milieux continus. Elles permettent en particulier de définir les conditions aux limites en pression (contrainte normale sur une face).

III.2.4. Contraintes principales et directions principales:

Mathématiquement on peut démontrer que le tenseur de contraintes étant réel et symétrique, il est diagonalisable, c'est à dire qu'il existe un réel σ_i et une direction X_i telle que:

$$\overline{\sigma}(A)\vec{X} = \sigma_i\vec{X}_i$$

les trois valeurs propres σ_i sont réelles (distinctes ou confondues);

- Si les trois valeurs propres sont distinctes, les vecteurs propres correspondants X_i sont orthogonaux.

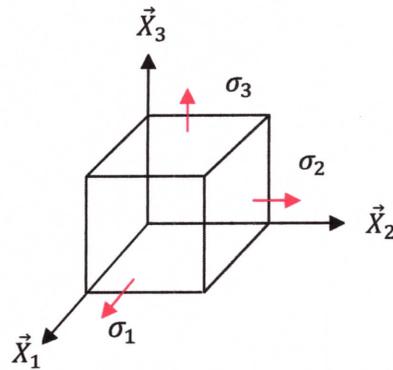


Figure III- 3: Contraintes principales autour du point A

Si les trois contraintes principales σ_1 , σ_2 et σ_3 sont distinctes, il existe trois directions principales correspondantes orthogonales entre eux X_1 , X_2 et X_3 .

Ainsi pour une telle direction X_i le vecteur contraint $T(A, \vec{X}_i) = \sigma_i\vec{X}_i$ est colinéaire à la direction \vec{X}_i .

En d'autres termes, la contrainte tangentielle pour cette direction est nulle, dans cette direction on a donc affaire, soit à une traction ($\sigma_i > 0$), soit à une compression ($\sigma_i < 0$).

Dans le repère principal la matrice des contraintes s'écrit alors :

$$\overline{\sigma}(A) = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \sigma_2 & \\ & & \sigma_3 \end{bmatrix}_{(\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3)}$$

III.2.5. Déplacements - Déformations:

III.2.5.1 Champ de déplacements:

Sous l'effet des efforts, la structure se déforme. Un point A de coordonnées (x_1, x_2, x_3) appartenant à la structure se déplace sous l'effet du chargement. Ce déplacement est caractérisé par un vecteur appelé *vecteur de déplacement* tel que :

$$\vec{U}(A) = u_1(x_1, x_2, x_3)\vec{X}_1 + u_2(x_1, x_2, x_3)\vec{X}_2 + u_3(x_1, x_2, x_3)\vec{X}_3$$

III.2.5.2. Tenseur des déformations:

On se place ici dans le cas des petites déformations. On démontre que l'état de déformation au Voisinage d'un point A est caractérisé par le tenseur des déformations. C'est un tenseur du second ordre symétrique qui se déduit du champ des déplacements par la relation :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_{21} = \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right), \quad \varepsilon_{31} = \varepsilon_{13} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \quad \varepsilon_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}, \quad \varepsilon_{32} = \varepsilon_{23} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)$$

Le tenseur des déformations s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\varepsilon(A) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ & \text{sym} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

III.2.6. Déformations principales et directions principales:

De même que pour le tenseur des contraintes, le tenseur des déformations étant réel symétrique, il est diagonalisable, c'est à dire qu'il existe un réel ε_i et une direction X_i telle que :

$$\bar{\varepsilon}(A)\vec{X} = \varepsilon_i\vec{X}_i$$

Ainsi dans une telle direction X_i il n'y a pas de glissement mais seulement un allongement.

Dans le repère principal en A, la matrice des déformations s'écrit alors :

$$\bar{\sigma}(A) = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & & \\ & \varepsilon_2 & \\ & & \varepsilon_3 \end{bmatrix}_{(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3)}$$

III.2.7. Loi de comportement:

La relation linéaire contraintes déformations, pour un matériau élastique, est décrite par la loi de Hooke généralisée : $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$

Où : C_{ijkl} est la matrice des constantes élastiques, elle contient 3^4 composantes. La relation inverse de la loi de Hooke est donnée par : $\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}$

où : S_{ijkl} est la matrice de souplesse ou de complaisance avec : $[S] = [C]^{-1}$.

À cause de la symétrie des deux tenseurs de contraintes et de déformations, la relation contraintes déformations peut être réécrite sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

où : $[C_{ij}]$ est la matrice des constantes élastiques, elle contient 36 composantes indépendantes.

La relation déformations contraintes est donnée par :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

III.2.7.1. Matériaux Anisotropes :

Un matériau **Anisotropes** est un matériau qui possède un seul plan de symétrie. La forme de la matrice de rigidité (ou de souplesse) doit être telle qu'un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce plan ne modifie pas la matrice.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

La matrice de souplesse a de même forme. Le nombre des constantes élastiques indépendantes est réduit à 13.

III.2.7.2. Matériau orthotrope :

Un matériau orthotrope possède trois plans de symétrie, perpendiculaires deux à deux. Il est à noter que l'existence de deux plans de symétrie perpendiculaires implique l'existence du troisième, la forme de la matrice de rigidité est donc obtenue en ajoutant au matériau monoclinique un plan de symétrie perpendiculaire au précédent. L'invariance de la matrice dans un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce deuxième plan conduit à une relation d'élasticité linéaire de la forme :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est réduit à 9.

III.2.7.3. Matériaux isotropes :

Un matériau est dit isotrope si ses propriétés sont indépendantes du choix de ses axes de référence. Pour un tel matériau, la loi de comportement linéaire dans le cas élastique, en notation indicielle, est :

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G\varepsilon_{ij}$$

où δ_{ij} est le tenseur de Kronecker $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$, $\delta_{ij} = 0$, si $i \neq j$

λ et G sont les coefficients de Lamé, constants pour un matériau donné.

Les relations entre les différents coefficients d'élasticité sont les suivantes :

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Inversement, on peut exprimer le tenseur des déformations à partir de celui des contraintes:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij}$$

Dans cette relation E est le module de Young et ν le coefficient de Poisson, constants pour un matériau donné.

III.3. Cas thermique [III-1] :

III.3.1. Calcul de la déformation thermique:

Les valeurs des coefficients de dilatation sont déterminées par des essais de dilatomètre qui ont lieu à partir de la température ambiante (généralement de 0°C à 20°C). De ce fait, on dispose en général des valeurs du coefficient de dilatation défini par rapport à 20°C, température à laquelle on suppose la déformation thermique nulle. Certaines études nécessitent de prendre une température de référence différente de la température ambiante (déformation thermique nulle pour une autre température que la température ambiante). Il faut alors effectuer un changement de repère dans le calcul de la déformation thermique (figure ci-dessous).

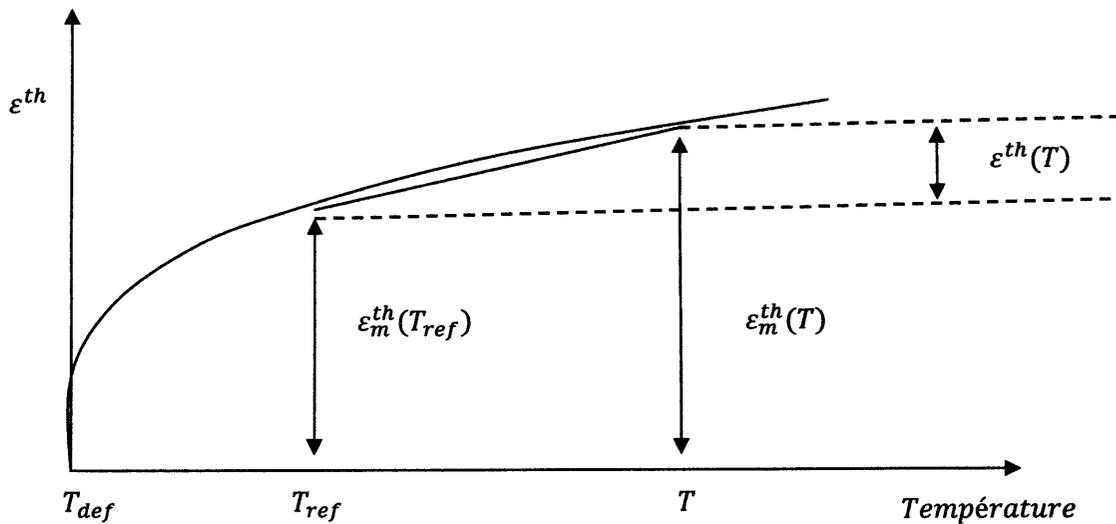


Figure III-4: calcul de déformation thermique

$$\varepsilon^{\text{th}} = \varepsilon^{\text{th}}(T) - \varepsilon_{\text{m}}^{\text{th}}(T_{\text{réf}})$$

$\varepsilon^{\text{th}}(T)$: est la déformation thermique mesurée (définie par rapport à la température ambiante)

$\varepsilon_{\text{m}}^{\text{th}}(T_{\text{réf}})$: est la déformation thermique calculée (définie par rapport à une température de référence) La déformation thermique est calculée par l'expression :

$$\varepsilon_t(T) = \alpha(T)(T - T_{\text{réf}})$$

Où $\alpha(T)$ est le coefficient de dilatation moyen à la température T déterminé par rapport à la température $T_{\text{réf}}$ ($T_{\text{réf}}$ étant la température à laquelle on considère que : $\varepsilon^{\text{th}}(T_{\text{réf}}) = 0$)

III.3.1.1. Coefficients de dilatation thermique α (cas isotrope):

On peut calculer pour tous les matériaux isotropes la variation de la longueur et donc du volume en fonction de la variation de la température : $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$

Avec : ΔL : est la variation de longueur en mètre (m) ;

α : est le coefficient de dilatation linéaire en $^{\circ}\text{K}^{-1}$;

L_0 : est la longueur initiale en mètre (m) ;

$\Delta T = T - T_0$: la variation de température en kelvin ($^{\circ}\text{K}$) ou en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ;

On peut aussi directement calculer la longueur en fonction de la température :

$$L(T) = L_0 + \Delta L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0))$$

Avec : $L(T)$: La longueur en mètre (m) en fonction de la température

T : la température considérée en kelvin ($^{\circ}\text{K}$) ou en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 : La température initiale en kelvin ($^{\circ}\text{K}$) ou en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

III.3.1.2. Tenseur de dilatation thermique:

Les matériaux cristallins non cubiques présentent une dilatation thermique anisotrope : on a pas le même coefficient de dilatation dans toutes les directions. Pour cette raison, on utilise un tenseur symétrique d'ordre 2 pour décrire la dilatation dans les matériaux anisotropes :

$$\bar{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}$$

III.3.2. Tenseur de conductivité thermique

Soit $T(x, y, z, t)$ la température au point M de coordonnées (x, y, z) à l' instant t . Si la température dépend du temps, on dit que le régime thermique est variable (ou transitoire).

Dans le cas contraire, on dit qu'il est permanent (ou stationnaire).

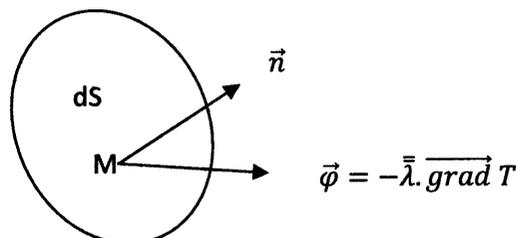


Figure III-5: Le vecteur densité de flux

Considérons en un point M un élément de surface dS infiniment petit. Soit \vec{n} un vecteur unitaire normal à dS . La puissance thermique (quantité de chaleur par unité de temps) traversant dS dans le sens de \vec{n} est égale à :

$$d\phi = \vec{n} \cdot (-\bar{\lambda} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T) dS = \vec{n} \cdot \vec{\varphi} \cdot dS \quad (\text{III.1})$$

où le tenseur de conductivité thermique du matériau $\bar{\lambda}$ a pour représentation matricielle dans le repère orthonormé $\{x, y, z\}$:

$$\bar{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \cdot & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \text{sym} & \cdot & \lambda_{zz} \end{bmatrix}$$

Le vecteur représentant la densité de flux et le gradient thermique ne sont pas nécessairement colinéaires.

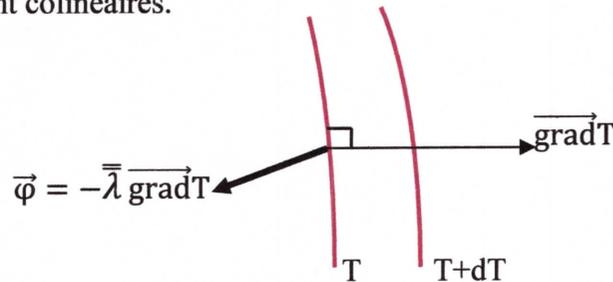


Figure III-6: Matériau anisotrope

Si le matériau est isotrope, la matrice de conductivité se réduit à :

$$\bar{\lambda} = \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le vecteur densité de flux et le gradient thermique sont colinéaires:

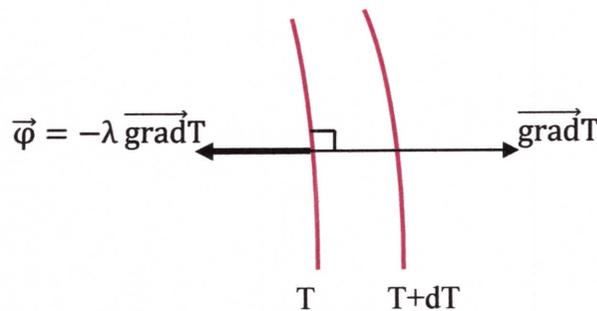


Figure III-7 : Matériau isotrope

III.3.3. Bilan thermique et équation de la chaleur:

Soit v un volume inclus dans le volume V limitée par la surface s . La puissance thermique stockée dans v est égale à la somme de la puissance thermique q générée par les sources volumiques contenues dans V et de la puissance thermique reçue sous forme de flux à travers la surface S :

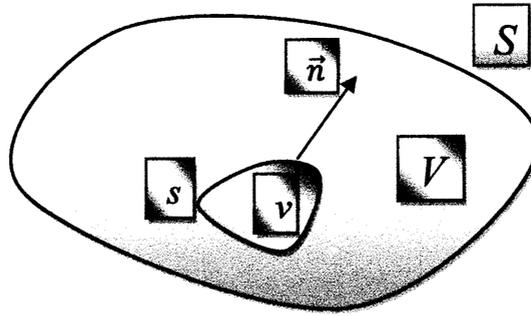


Figure III-8: Bilan thermique

$$\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int q dv + \int -\vec{n} \cdot (-\bar{\lambda} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T) ds \quad (\text{III.2})$$

Le domaine V étant arbitraire, on en déduit qu'en tout point du solide cette dernière devienne :

$$\rho c_p \dot{T} - \text{div}(\bar{\lambda} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T) - q = 0 \quad (\text{III.3})$$

Pour un matériau homogène et isotrope, l'équation (III.3) s'écrit dans le repère orthonormé $\{x, y, z\}$:

$$\rho c_p \dot{T} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (\text{III.4})$$

où : $\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t}$

III.3.4. Forme discrétisée (éléments finis) :

La solution analytique de l'équation (III.4) est en général inaccessible. On est donc conduit à chercher une solution approchée par une méthode numérique : la méthode des éléments finis. Cette méthode est un cas particulier de la méthode de Galerkin : le champ de températures et les fonctions test appartiennent au même espace de dimension finie.

Le domaine V est décomposé en sous-domaines V^e de forme géométrique simple (les éléments) reliés entre eux en des points appelés nœuds. Cette opération s'appelle le maillage.

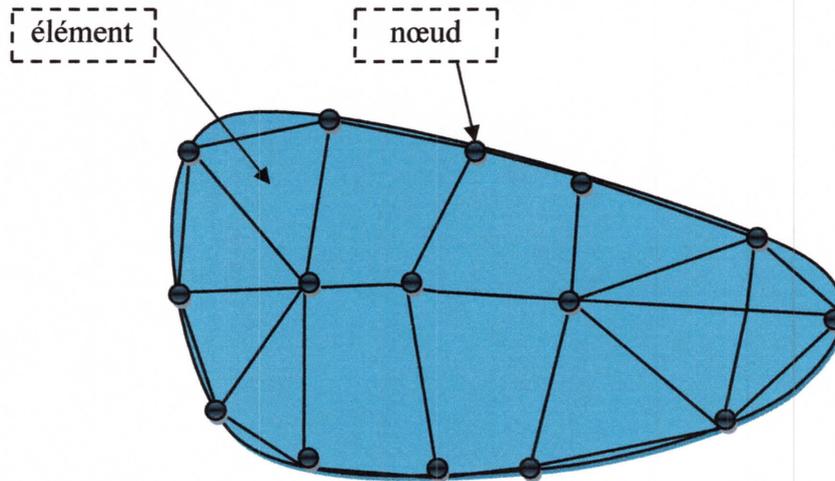


Figure III- 9: Domaine plan discrétisé en 12 élément reliés entre eux par nœuds

III.3.4.1. Représentation du champ de températures :

Le champ de températures $T(x, y, z, t)$ dans l'élément (e) a pour expression :

$$T^e(x, y, z, t) = [N_1^e(x, y, z) \dots N_i^e(x, y, z) \dots N_n^e(x, y, z)] \begin{Bmatrix} T_1^e(t) \\ \dots \\ T_i^e(t) \\ \dots \\ T_n^e(t) \end{Bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Ou :

- n : est le nombre de nœuds de l'élément ;
- $N_i^e(x, y, z)$ est la fonction d'interpolation au nœud i avec $i=1, n$;
- $N^e(x, y, z)$ est la matrice des fonctions d'interpolation de l'élément ;
- $\{T^e(t)\}$ est le vecteur des températures aux nœuds de l'élément (e).

III.5. Discrétisation de la forme intégrale faible:

L'expression du champ de température au sein d'un élément finis est :

$$T^e(x, y, z, t) = [N^e(x, y, z)]\{T^e(t)\}$$

Le gradient de température au sein de l'élément est :

$$\{\overrightarrow{\text{grad}} T\} = [B]\{T\}$$

$$[B] = [\{B_1\} \dots \{B_i\} \dots \{B_n\}]$$

où $\{B_i\}$ dépend du problème traité (uni-, bi- ou tridimensionnels) pour un problème spatial, $\{B_i\}$ s'écrit dans le repère orthonormé $\{x, y, z\}$

$$\{B_i\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix}$$

En portant ces relations dans l'équation (III. 03), il vient :

$$\{T^e\}^T ([C^e] \{T^e\} + [K^e] \{T^e\} - \{F^e\}) = 0 \tag{III.7}$$

$$[K] = \int_v [B]^T [\lambda] [B] dv + \int_s h [N]^T [N] ds$$

(III.8)

Ou : $[C^e]$ est la matrice de capacité thermique $[J/^\circ C]$

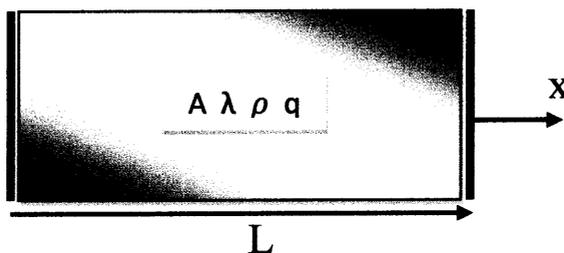
$[K^e]$ est la matrice de conductivité thermique $[W/m^\circ C]$

$\{F^e\}$ est le vecteur des flux nodaux $[W]$

$\{T^e\}$ est le vecteur des températures nodales $[^\circ C]$

III.6 Exemple de calcul élémentaire [III-1]:

Considérons un élément finis unidimensionnel à deux nœuds de longueur L dont les caractéristiques A, λ, ρ et q sont des constantes.



Les fonctions d'interpolation de l'élément considéré :

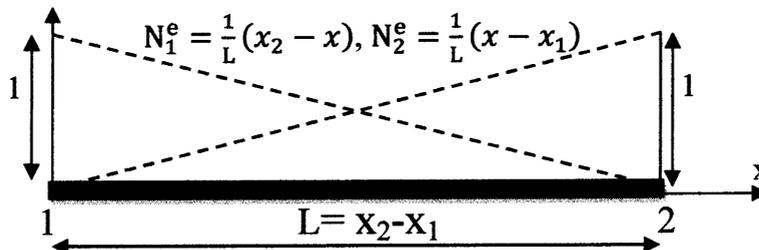


Figure III- 10: Élément finis à deux nœuds

$$T(x) = \frac{1}{L}(x_2 - x)T_1 + \frac{1}{L}(x - x_1)T_2 = \frac{1}{L}[x_2 - x, x - x_1] \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = [N]\{T\} \quad (\text{III.9})$$

Ou T_1 et T_2 les températures nodales. On en déduit la matrice $[B]$:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \end{bmatrix} = \frac{1}{L}[-1 \quad 1] \quad , \quad [B]^T = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

La matrice de conductivité $[k]$:

$$[K] = \int [B]^T \lambda [B] dv = \int_0^L \lambda A [B]^T [B] dx = \frac{\lambda A}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

La densité de flux calculée avec la formule :

$$\varphi_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda [B]\{T\} = -\frac{\lambda}{L} (T_2 - T_1) \quad (\text{III.12})$$

III.7.Élasticité et thermo-élasticité[19]:

III.7.1. Déformations thermo-élastiques:

Un incrément de déformation dans un solide peut résulter d'un changement de contrainte ou d'un changement de température imposé au système. L'origine physique de ces deux modes de déformations a été décrite dans la sous-section précédente. Nous pouvons écrire de façon générale que

$$d\varepsilon = \underbrace{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}\right)_T}_{d\varepsilon^{meca}} d\sigma + \underbrace{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T}\right)_\sigma}_{d\varepsilon^{th}} dT \quad (\text{III.13})$$

Cette relation est écrite sous forme tensorielle. Ainsi rien n'empêche qu'une contrainte appliquée dans une direction puisse générer des composantes de déformations à la fois d'élongation et de cisaillement toutes non-nulles. De même, dans le cas général, un incrément de température peut générer à lois une élongation dans toutes les directions (dilatation) mais également des cisaillements. Les paramètres $(\partial \varepsilon / \partial \sigma)_T$ et $(\partial \varepsilon / \partial T)_\sigma$ peuvent être dérivés à partir des relations qui existent entre la déformation et la contrainte ou entre la déformation et la température.

De façon générale ces paramètres peuvent varier avec la déformation et ne sont pas nécessairement des constantes. Les paramètres $(\partial \varepsilon / \partial T)_\sigma$ appelées coefficients de souplesse.

III.7.2. Élasticité :

L'expression (III.13) a été écrite de manière très générale. Dans la pratique, heureusement, le problème consistant à relier les contraintes et les déformations dans le domaine élastique peut être fortement simplifié.

Tout d'abord, les déformations élastiques dans la plupart des solides usuels restent petites, le plus souvent inférieures à 1%. La raison est associée à l'apparition de mécanismes irréversibles comme la plasticité ou l'endommagement, qui tendent à relaxer fortement les contraintes.

Ensuite, les 81 coefficients $(\partial \varepsilon^{el} / \partial \sigma)_T$ ne sont pas tous indépendants. Utilisons les notations suivantes pour les constantes élastiques : $C_{ijkl} = \partial \sigma_{ij} / \partial \varepsilon_{kl}^{el}$, tandis que les constantes de souplesse sont définies par $S_{ijkl} = \partial \varepsilon_{ij}^{el} / \partial \sigma_{kl}$, ce qui donne

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{el} \text{ et } \varepsilon_{ij}^{el} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (\text{III.14})$$

La symétrie des tenseurs de contraintes et de déformations, c.-à-d. $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ et $\varepsilon_{ij}^{el} = \varepsilon_{ji}^{el}$, impose que : $C_{ijkl} = C_{ijlk} = C_{jikl}$, ce qui réduit le nombre de constantes indépendantes à 36.

III.7.2.1 Élasticité isotrope:

Une grande part des matériaux « industriels » sont des polycristaux, c.à.d. des arrangements plus ou moins aléatoires de cristaux. La réponse élastique des polycristaux sera une réponse moyenne de celles des cristaux, indépendantes de la direction de sollicitation. Dans le cas élastique, deux constantes élastiques suffisent: le module de Young E et le coefficient de Poisson ν . Plus précisément, la matrice des constantes élastiques s'écrit pour un matériau Isotrope

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Ou les constantes λ et G sont appelées constantes de lamé sont liées a E et ν Par

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{III.16})$$

Donc : $\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon_{el}\}$

$\{\sigma\}$ = tenseur de contraintes = $[\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{yz} \sigma_{zx} \sigma_{xy}]^T$

$\{\varepsilon_{el}\}$ = vecteur de déformation élastique = $[\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zx} \varepsilon_{xy}]^T$

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Maintenant, dans le cas d'un état de contrainte quelconque, les déformations élastiques sont liées aux contraintes par la loi de Hooke complète

$$\{\varepsilon_{el}\} = [C]^{-1}\{\sigma\}$$

$$[C]^{-1} = [S] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

$$\begin{cases} \varepsilon_x^{el} = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) \\ \varepsilon_y^{el} = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)) \\ \varepsilon_z^{el} = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) \\ \varepsilon_{xy}^{el} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{xy} \\ \varepsilon_{yz}^{el} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{yz} \\ \varepsilon_{xz}^{el} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{xz} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

La loi de Hooke permet également d'évaluer les contraintes à partir de déformations

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \frac{E}{h} [(1 - \nu^2)\varepsilon_x + (\nu + \nu^2)(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \\ \sigma_y = \frac{E}{h} [(1 - \nu^2)\varepsilon_y + (\nu + \nu^2)(\varepsilon_x + \varepsilon_z)] \\ \sigma_z = \frac{E}{h} [(1 - \nu^2)\varepsilon_z + (\nu + \nu^2)(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \\ \sigma_{xy} = G_{xy}\varepsilon_{xy} \\ \sigma_{yz} = G_{yz}\varepsilon_{yz} \\ \sigma_{xz} = G_{xz}\varepsilon_{xz} \end{array} \right. \quad (\text{III.20})$$

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$h = 2\nu^3 - 3\nu^2 + 1$$

III.7.3. Déformation thermique et thermo-élasticité isotrope :

Des déformations peuvent causées également par un changement de température.

Dans le cas isotrope et en l'absence de contrainte, on a

$$\varepsilon_x^{th} = \varepsilon_y^{th} = \varepsilon_z^{th} = \alpha\Delta T \quad (\text{III.21})$$

Où $\alpha = (\partial\varepsilon/\partial T)_\sigma$ est le coefficient de dilatation thermique linéaire et ΔT correspond au changement de température. Dans la plupart des structures cristallines, un changement de température n'induit aucun cisaillement (les exceptions sont les symétries monocliniques et tricliniques).

Dans la plupart des matériaux, α est positif. La seule exception est fournie par les élastomères.

Pour le cas de 3-D, le vecteur de déformation thermique est:

$$\{\varepsilon_{th}\} = \Delta T [\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (\text{III.22})$$

$$\Delta T = T - T_{ref}$$

T : température actuelle à l'endroit en question

T_{ref} : Température de référence (étant la température à laquelle on considère que :

$\varepsilon_{th}(T_{ref})=0$.

Lorsque sont imposés à la fois une contrainte et un changement de température, la déformation totale $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th}$ est la somme d'une déformation élastique et d'une déformation thermique (auxquelles peut encore s'ajouter une déformation plastique si la limite d'élasticité est dépassée, ainsi que des déformations piézoélectriques en présence d'un champ électrique ou ferromagnétiques en présence d'un champ magnétique).

La loi de Hooke complète (valable seulement dans le cas de déformations thermo-élastiques) s'écrit alors :

$$\{\varepsilon_{tot}\} = \{\varepsilon_{th}\} + [C]^{-1} \{\sigma\} \quad (\text{III.23})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \alpha\Delta T + \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) \\ \varepsilon_y = \alpha\Delta T + \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)) \\ \varepsilon_z = \alpha\Delta T + \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)) \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{xy} \\ \varepsilon_{yz} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{yz} \\ \varepsilon_{xz} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{xz} \end{array} \right. \quad (\text{III.24})$$

La loi de Hooke permet également d'évaluer les contraintes à partir de déformations

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \frac{E}{h}[(1-\nu^2)(\varepsilon_x - \alpha\Delta T) + (\nu + \nu^2)(\varepsilon_y + \varepsilon_z - 2\alpha\Delta T)] \\ \sigma_y = \frac{E}{h}[(1-\nu^2)(\varepsilon_y - \alpha\Delta T) + (\nu + \nu^2)(\varepsilon_x + \varepsilon_z - 2\alpha\Delta T)] \\ \sigma_z = \frac{E}{h}[(1-\nu^2)(\varepsilon_z - \alpha\Delta T) + (\nu + \nu^2)(\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\alpha\Delta T)] \\ \sigma_{xy} = G_{xy} \varepsilon_{xy} \\ \sigma_{yz} = G_{yz} \varepsilon_{yz} \\ \sigma_{xz} = G_{xz} \varepsilon_{xz} \end{array} \right. \quad (\text{III.25})$$

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad , \quad h = -2\nu^3 - 3\nu^2 + 1$$

Les contraintes d'origine thermique viennent de ce qu'un matériau soumis à un changement de température est contraint de façon telle qu'il ne puisse se déformer librement. Dans ce cas, la déformation thermique est compensée par une déformation élastique.

III.8 Critères de limite élastique:

Il consiste à imposer un allongement à une éprouvette de section initiale S_0 et de longueur utile L_0 . La courbe type obtenue pour un matériau ductile est la suivante

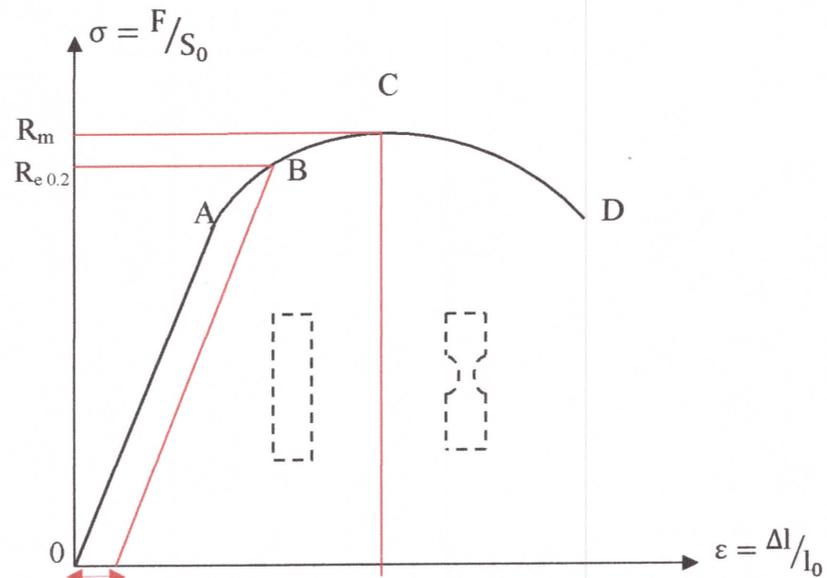


Figure III-11: Courbe de traction (σ, ε).

- La droite OA correspond à la déformation élastique réversible.
- La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène: si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente.
- Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît en D il y a rupture de l'éprouvette.

R_e : est la limite de proportionnalité ou limite élastique. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles. R_e Correspond au seuil d'écoulement plastique.

$R_{e 0.2}$: qui correspond à un allongement plastique de 0,2%.

R_m : est la résistance limite à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue.

On supposera dans la suite que la limite élastique en traction simple est égale à la limite élastique en compression simple (matériaux ductiles). Soit σ_e cette limite.

Soit un état de contrainte complexe caractérisé en un point A par les trois contraintes principales σ_1, σ_2 et σ_3 .

Il n'y a pas unicité du critère de limite élastique. Au cours de l'histoire de la mécanique des milieux continus déformables, plusieurs critères ont été proposés. Certains

sont plus ou moins bien vérifiés en fonction du type de matériau sollicité et du type de sollicitation.

III.8.1 Critère de Von Mises:

Pour ce critère, l'état limite est atteint lorsque l'énergie de distorsion par unité de volume est égale à l'énergie de distorsion unitaire limite du matériau. L'énergie de distorsion par unité de volume s'exprime en fonction des contraintes principales par:

$$\frac{dw(f)}{dv} = \frac{1+\nu}{E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \quad (\text{III.26})$$

Dans le cas de la traction simple, seule $\sigma_1 \neq 0$:

$$\frac{dw(f)}{dv} = \frac{1+\nu}{E} 2\sigma_1^2 \quad (\text{III.27})$$

Ce critère devant être valable quel que soit l'état de sollicitation, on doit donc avoir :

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \leq 2\sigma_e^2 \quad (\text{III.28})$$

La contrainte de traction simple équivalente σ_g à l'état de contrainte complexe est alors en fonction des contraintes principales telle que :

$$\sigma_g^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \quad (\text{III.29})$$

Chapitre IV:
Modélisation numérique sur l'ABAQUS

IV.1. Introduction:

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité des composants, des matériaux, des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...) et le temps de mise en œuvre des produits. De plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit. Elles sont apparues, dans le but de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O. se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...).

D'un point de vue technique, les résultats donnés par l'ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle.

IV.2. Code de calcul ABAQUS:

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est un logiciel de simulation de différents types de phénomènes physiques. L'un des problèmes qu'on peut simuler à l'aide de ce logiciel est le comportement mécanique des structures soumises à des charges, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures. Il est connu et répandu.

IV.2.1. L'interface d'ABAQUS:

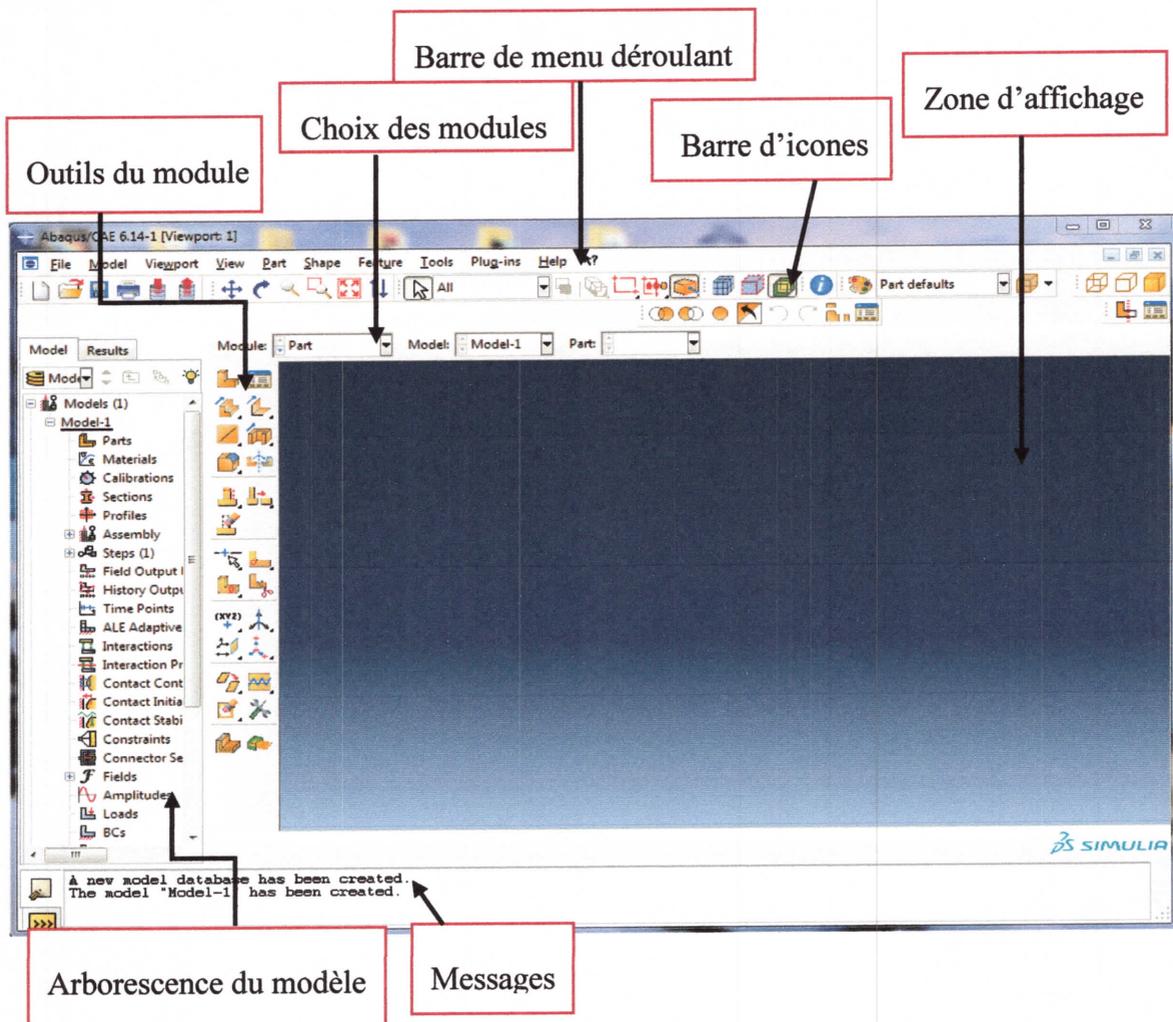


Figure IV- 1: Organisation de l'abaqus.

IV.2.2. Déroulement de la modélisation sous ABAQUS:

La modélisation de l'expansion thermique de tube sinusoïde d'acier inoxydable sous Abaqus s'effectue en trois étapes en ordresuivant:

1- Création du modèle de la pièce (géométrie et propriétés), on utilise les modules **Part**, **Property** et **Assembly**.

2- Définition des conditions initiales et aux limites ainsi que les chargements, on utilise les modules **Step**, **Load** et **interaction**.

3- Calcul et analyse, cette étape se fait par les modules suivants :

- **Mesh** pour choisir le maillage;

- **Jobs** pour lancer le calcul;
- **Results** pour avoir les résultats ;

IV.3. Modèle température-déplacement :

Dans ce modèle, nous allons faire une simulation pour voir la déformation structurale (dilatation thermique) de tube sinusoïdale sous chargement thermique non uniforme à cause des flux solaire concentré sur la partie inférieure de la surface latérale du tube par contre la partie supérieure est moins chauffée. A l'intérieur de tube circule un fluide calorifique. Pour cela on remplace l'effet du fluide sur la paroi interne du tube par un coefficient de transfert de chaleur par convection (interaction fluide-structure) et on l'applique directement sur la paroi interne du tube.

IV.3.1. Création de module pièce:

La pièce est un tube de forme sinusoïde défini par l'équation[20]:

$$y = A. \left(\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) - 1 \right) \quad [\text{IV.1}]$$

Sachant que: $A = 10\text{mm}$ est l'amplitude d'onde

$\lambda = 195\text{mm}$ longueur d'onde de la sinusoïde.

$0 \leq x \leq 195\text{mm}$ suivant l'axe focal.

- a- on utilise logiciel Excel pour calculer une gamme de points de coordonnées (x, y) de la courbe sinusoïde pour une seule onde.

| X | Y |
|-------|--------------|
| 0 | 0 |
| 0,005 | -0,000129497 |
| 0,01 | -0,000514636 |
| 0,015 | -0,00114544 |
| 0,02 | -0,002005572 |
| 0,025 | -0,003072756 |
| 0,03 | -0,004319353 |
| 0,035 | -0,005713074 |
| 0,04 | -0,007217825 |
| 0,045 | -0,008794633 |
| 0,05 | -0,010402659 |
| 0,055 | -0,012000257 |
| 0,06 | -0,013546049 |
| 0,065 | -0,015 |
| 0,07 | -0,016324454 |
| 0,075 | -0,017485107 |
| 0,08 | -0,018451901 |
| 0,085 | -0,019199794 |
| 0,09 | -0,019709418 |
| 0,095 | -0,019967573 |
| 0,1 | -0,019967573 |
| 0,105 | -0,019709418 |
| 0,11 | -0,019199794 |
| 0,115 | -0,018451901 |
| 0,12 | -0,017485107 |
| 0,125 | -0,016324454 |
| 0,13 | -0,015 |
| 0,135 | -0,013546049 |
| 0,14 | -0,012000257 |
| 0,145 | -0,010402659 |
| 0,15 | -0,008794633 |
| 0,155 | -0,007217825 |
| 0,16 | -0,005713074 |
| 0,165 | -0,004319353 |
| 0,17 | -0,003072756 |
| 0,175 | -0,002005572 |
| 0,18 | -0,00114544 |
| 0,185 | -0,000514636 |
| 0,19 | -0,000129497 |
| 0,195 | 0 |

Tableau IV- 1: Les coordonnées des points de la courbe sinusoïdale.

- b- Dans le module **Part**, on va créer un demi cylindre à partir des 20 points premiers de la sinusoïde (voir le tableau précédant) avec un profil de demi-cercle de diamètre $D_s = 7\text{cm}$ et $D_i = 6,6\text{cm}$ pour obtenir le demi cylindre. Sachant que D_s et D_i sont les diamètres supérieur et inférieur.

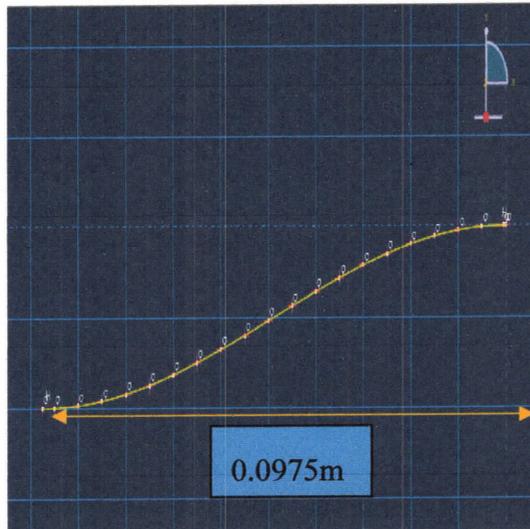


Figure IV- 2: Demi courbe sinusoidale.

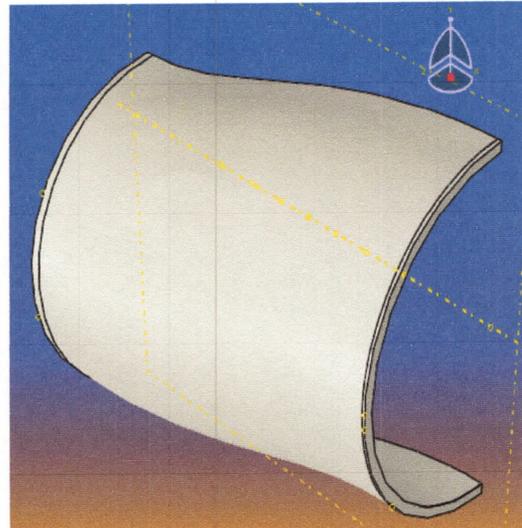


Figure IV- 3: Demi cylindre sinusoidale.

- c- On divise le demi cylindre en 8 section longitudinal, chaque section contienne des équations de distribution du flux solaire comme le montre la figure suivante .

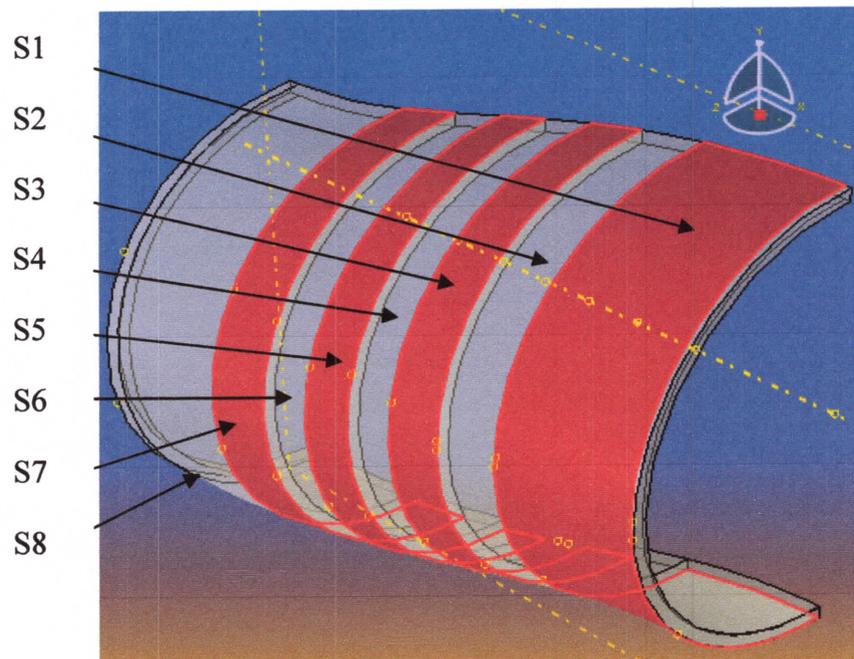


Figure IV- 4: 8 sections longitudinales.

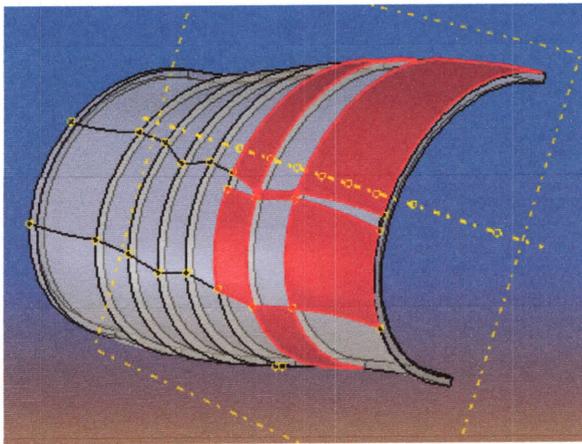


Figure IV- 5: 3 sections premières contiennent 4 faces de distribution.

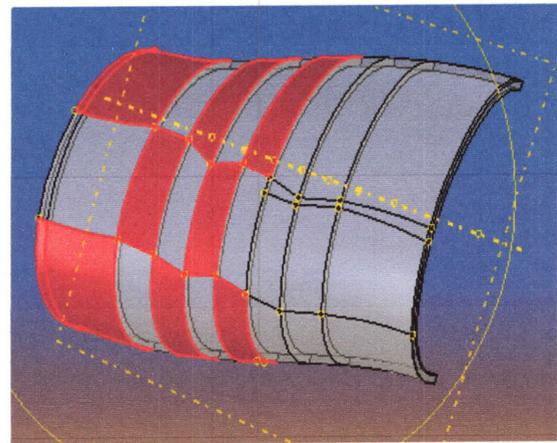


Figure IV- 6: 5 sections restantes contiennent 3 faces de distribution.

- d- Sélectionner l'outil miroir  et créé 6 miroir pour obtenir la structure de tube sinusoïde complet, un miroir par rapport au plan XY et 5 miroir par rapport au plan YZ, On obtient la forme suivante (Figure IV- 7):

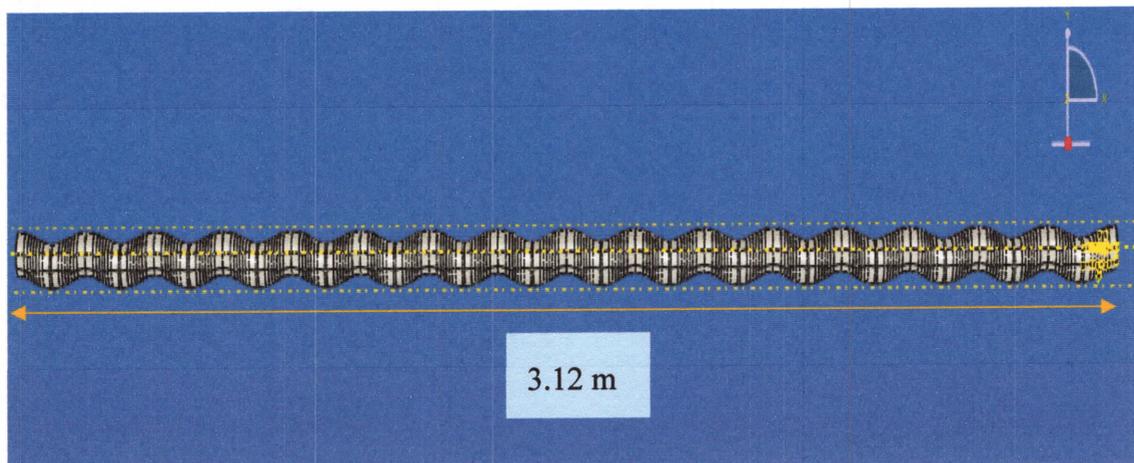
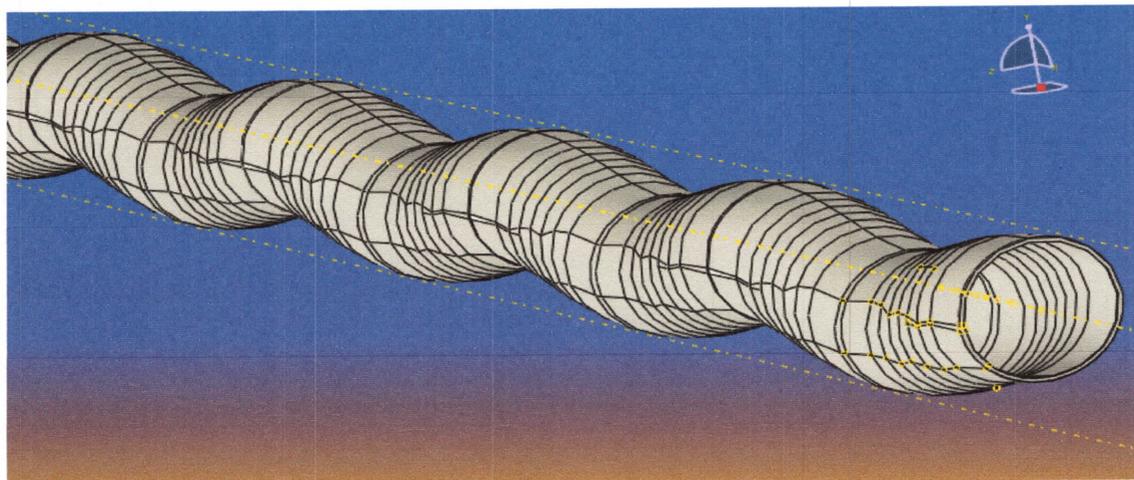


Figure IV-7: Structure complée du tube sinusoidale.

IV.3.2. Module Mesh :

Les éléments finis et les nœuds définissent la géométrie de la structure modélisée par ABAQUS. Chaque élément dans le modèle représente une portion discrète de la structure qui est représentée par les éléments interconnectés par des nœuds communs. Le type d'élément, la forme et la direction, ainsi que le nombre total d'élément ont une influence sur la précision des résultats obtenus.

Le maillage de tube

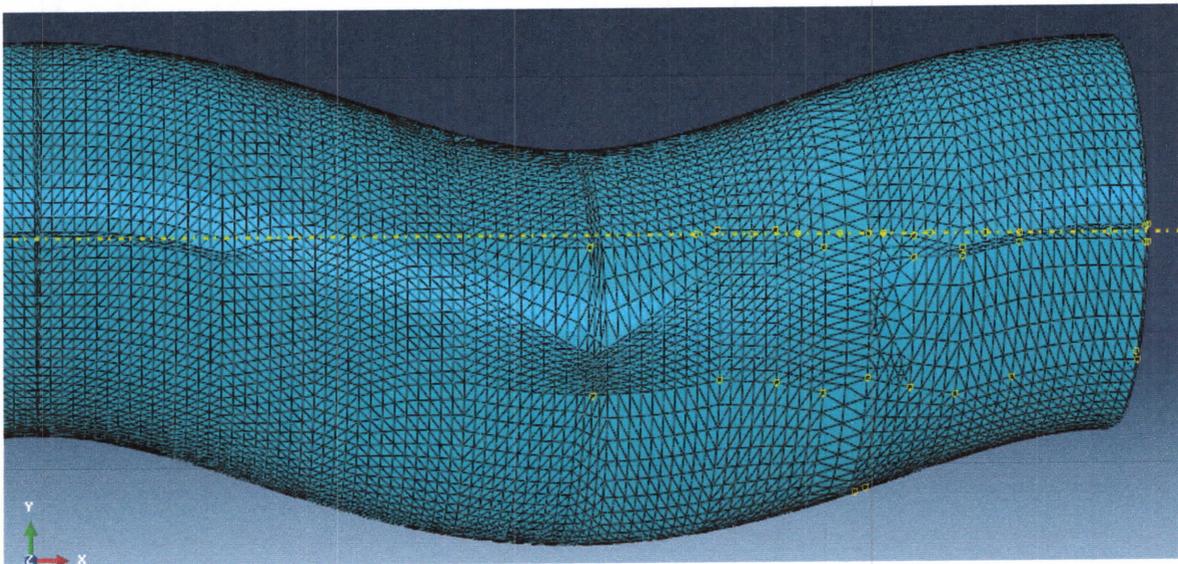


Figure IV- 8: Maillage de tube (mauvais maillage).

La figure (Figure IV- 9) montre le maillage de tube, mais on remarque que des parties de tube contient des mauvais maillages. Il est important d'imposer quelques règles pour obtenir un bon maillage.

Réglage de maillage

- a- Sélectionner la commande seededges  .

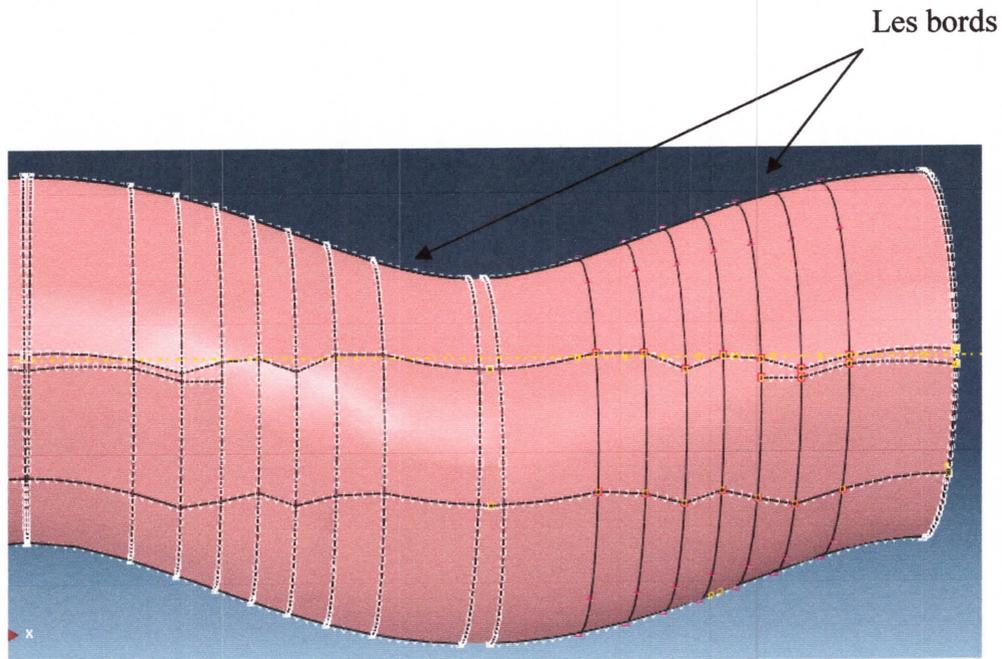


Figure IV- 9: Eléments de maillage sur les bords de la structure.

Remarque: il y a des bords dont leurs nombres d'éléments n'est pas définis.

- b- Sélectionner le mauvais bord, et dans la boîte de dialogue définir le nombre correct des éléments.

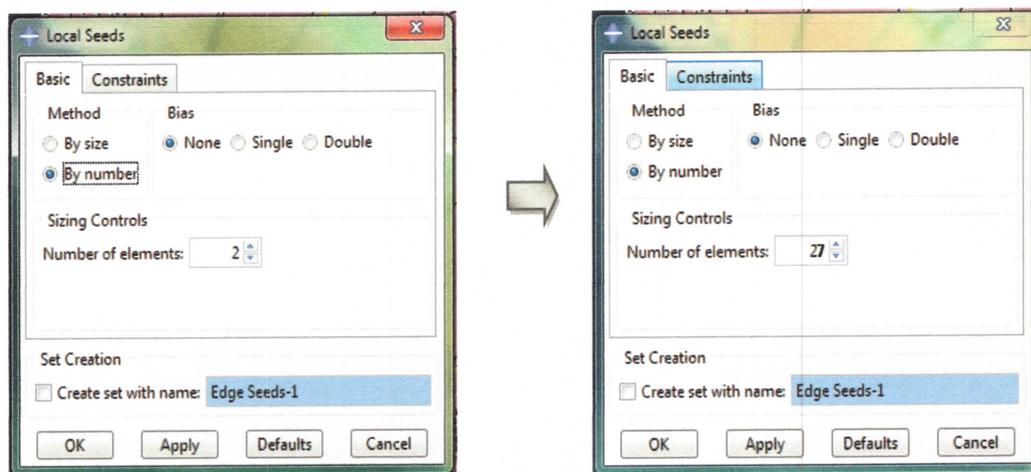


Figure IV- 10: Correction du nombre d'éléments du maillage.

- c- Après la rectification de tous les mauvais bords, on obtient un bon maillage voire figure (Figure IV- 11).

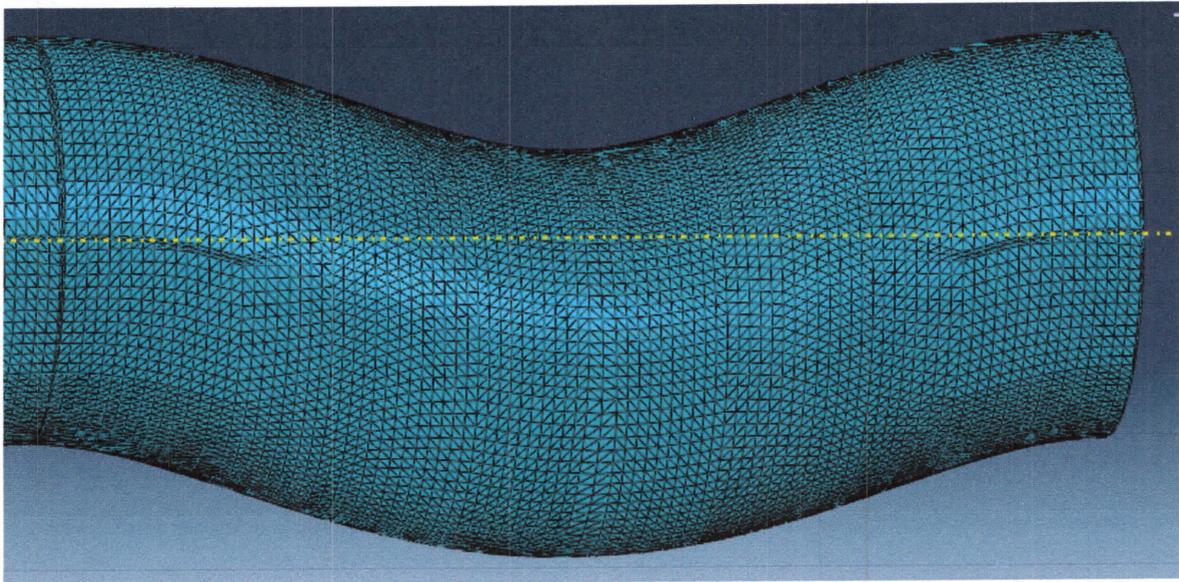


Figure IV-11: Maillage après réglage.

IV.3.3. Module property :

Dans notre travail, la simulation de la dilation thermique est basé sur la différence de la température dans le tube sinusoïdale, donc le choix du matériau est basé sur la conductivité thermique k et le coefficient de la dilation thermique α . Dans ce modèle on utilise deux matériaux, l'acier inoxydable (316L, $k=15$ W/m.°K) et l'alliage de cuivre (C17200, $k=105$ W/m.°K)[21].

Les propriétés des matériaux :

| | | |
|--|---------------|----------------------|
| Module de Young (GPa) | ε | 172 |
| Coefficient de poisson | ν | 0.25 |
| Coefficient d'expansion thermique (K^{-1}) | α | $18.5 \cdot 10^{-6}$ |
| Conductivité ($w.m^{-1}k^{-1}$) | K | 15 |
| Densité ($kg.m^{-3}$) | ρ | 7980 |

Tableau IV- 2: Propriétés du matériau (acier inoxydable 316L).

| | | |
|---|------------|----------------------|
| Module de Young (GPa) | ϵ | 125 |
| Coefficient de poisson | ν | 0.25 |
| Coefficient d'expansion thermique (K) | α | $17.8 \cdot 10^{-6}$ |
| Conductivité ($\text{w.m}^{-1}\text{k}^{-1}$) | K | 105 |
| Densité (kg.m^{-3}) | ρ | 8050 |

Tableau IV- 3: Propriétés du matériau (alliages de cuivre C17200).

Pour spécifier le matériau du tube, on clique sur la commande Matériels et dans la boîte de dialogue définir la conductivité thermique du matériau du tube

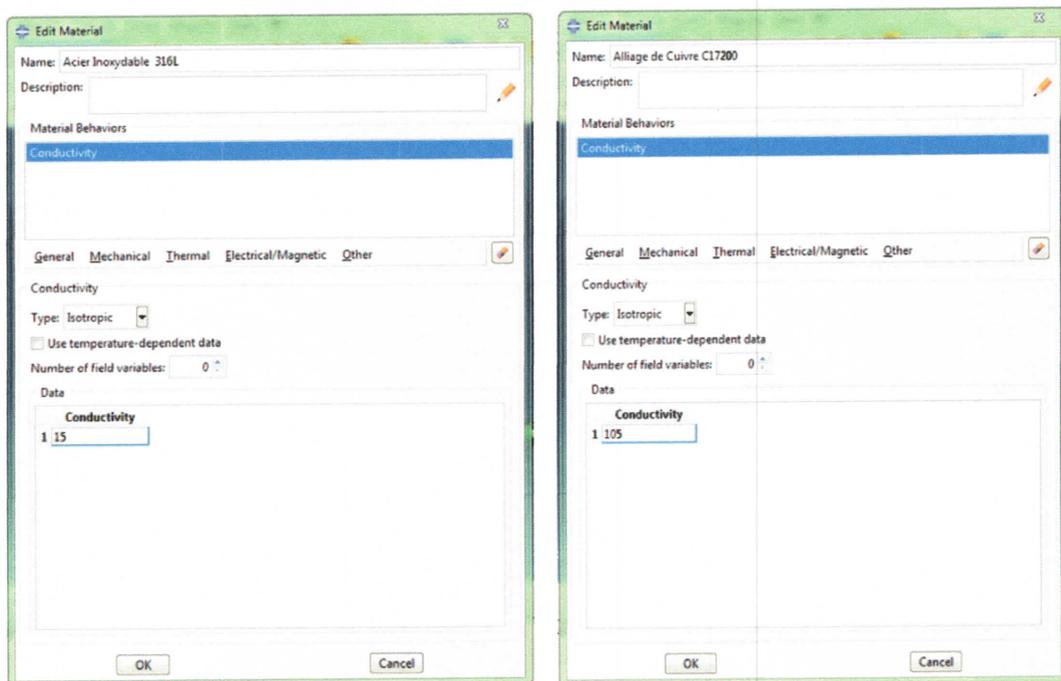


Figure IV-12: Création des propriétés des matériaux.

IV.3.4. Module Assembly :

À partir de l'icône «instance» , on crée au moins une instance. Dans le cas général, on doit sélectionner tous les éléments d'assemblage créés dans le module Parts. Ces instances seront manipulées par la suite dans le module assemblage. On peut, dans le

cas échéant, faire subir des mouvements à l'ensemble des instances pour les repositionner dans l'espace

IV.3.5. Module Steps :

On choisit le type de la procédure. Dans le modèle température-déplacement et pour simuler la dilatation thermique on choisit d'après la commande **Steps** la procédure "coupledtemp-displacement".

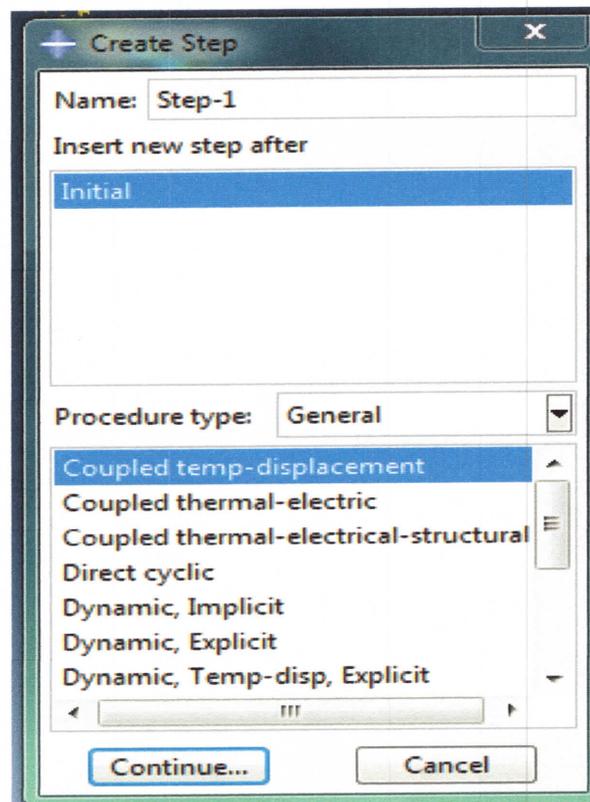


Figure IV-13: Création de module steps.

IV.3.6. Module Interaction:

Pour les températures du fluide (SYL THERM-800) [21] à l'entrée de la conduite, on a considéré deux températures 400°K et 650°K. Pour chacune de ces température, on a considéré deux valeurs pour le nombre de Reynolds (5000; 16000).

Les propriétés de fluide à température de 400°K :

| | | |
|--|-------------|-----------|
| La chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .k ⁻¹) | C_p | 1791.64 |
| La densité (kg.m ⁻³) | ρ | 840 |
| La conductivité (w.m ⁻¹ .k ⁻¹) | K | 0.1148 |
| Viscosité dynamique (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹) | μ_{dyn} | 0.0012164 |

Tableau IV- 4:Les propriétés du fluide (à 400°K).

Les propriétés de fluide à température de 650°K :

| | | |
|--|-------------|----------|
| La chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .k ⁻¹) | C_p | 2218.65 |
| La densité (kg.m ⁻³) | ρ | 578 |
| La conductivité (w.m ⁻¹ .k ⁻¹) | K | 0.0678 |
| Viscosité dynamique (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹) | μ_{dyn} | 0.000283 |

Tableau IV- 5:Les propriétés du fluide (à 650°K).

Calcul du coefficient de convection (h_c)[22] :

$$\text{On a: } h_c = \frac{N_u \cdot k}{D_{int}} \quad [\text{IV.2}]$$

Sachant que:

k : est la conductivité de fluide

$D_{int} = 0.066$ m : est le diamètre intérieur de tube

$$N_u = 0.116 \cdot (R_e)^{0.71} \cdot (P_n)^{0.4} \cdot (\delta)^{0.11} \text{ est le nombre de Nusselt} \quad [\text{IV.3}]$$

Si : $T^\circ = 400$ °k

a- Si: $R_e = 5000$ ($v = 0.1097$ m/s)

Calcul du nombre de Nusselt:

$$\text{Le rapport de courbure } \delta = \frac{D_{int}}{2R_c}, \quad R_c = \frac{\lambda^2}{(2\pi i)^2 \cdot A} = 0.09631 \text{ m} \quad [\text{IV.4}]$$

$$\delta = 0.342613$$

A est demi amplitude de la courbe sinusoïde = 0.01 m

R_c :est le rayon de courbure

$$\text{Le nombre de Prandtl : } P_n = \frac{\mu_{dyn} \cdot C_p}{K} = 18.98389 \quad [IV.5]$$

$$\text{Donc } N_u = 141.5498$$

$$\text{et } h_c = 246.21 \text{ w. m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$$

$$\text{b- Si: } R_e = 10000 \text{ (v=0.3291 m/s): } N_u = 308.7921, \quad h_c = 537.1111 \text{ w. m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$$

Si $T^\circ = 650 \text{ }^\circ\text{k}$

$$\text{a- Si: } R_e = 5000 \text{ (v= 0.1097m/s)} \quad h_c = 109.2533 \text{ w. m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$$

$$\text{b- Si: } R_e = 16000 \text{ (v=0.3291 m/s)} h_c = 249.2 \text{ w. m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$$

Pour appliquer le coefficient de transfert de chaleur par convection il suffit de cliquer sur la commande interaction dans la barre des modules et la boîte de dialogue s'affiche pour choisir le type d'interaction "surface film condition" puis sélectionné la surface intérieur de tube (Figure IV- 12), dans la deuxième boîte de dialogue pour introduire la valeur de h_c déjà calculé précédemment.

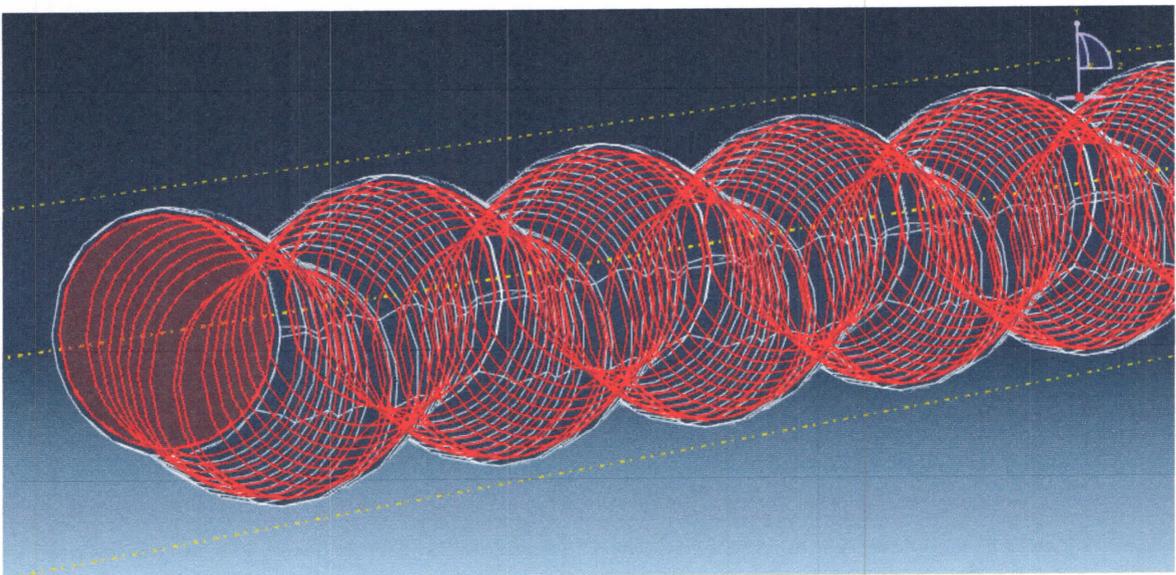


Figure IV-14: Paroi interne de tube.

IV.3.7. Module Load :

Dans ce module on peut définir les charges appliquées sur la structure et les conditions aux limites. Le chargement de la structure est une charge thermique a cause des flux solaire appliqués sur la surface latérale de tube.

- a- on clique sur le module **Load**, après avoir la boîte de dialogue, on choisit le type de chargement "surface heat flux" puis on sélectionne la surface sollicitée par cette charge.

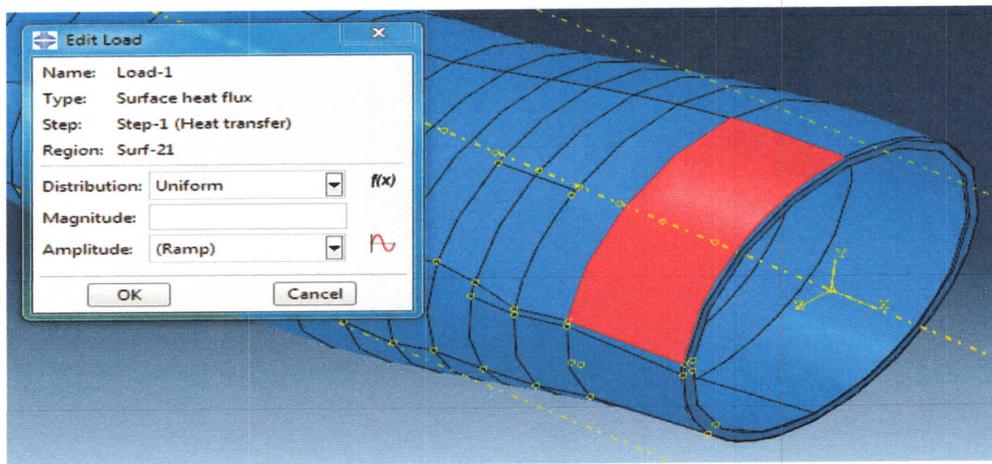


Figure IV-15: Création des flux solaire

- b- Pour chaque section et pour définir la distribution du flux, on clique sur le symbole $f(x)$ et on introduit l'équation de la distribution, on prend comme exemple la section 1:

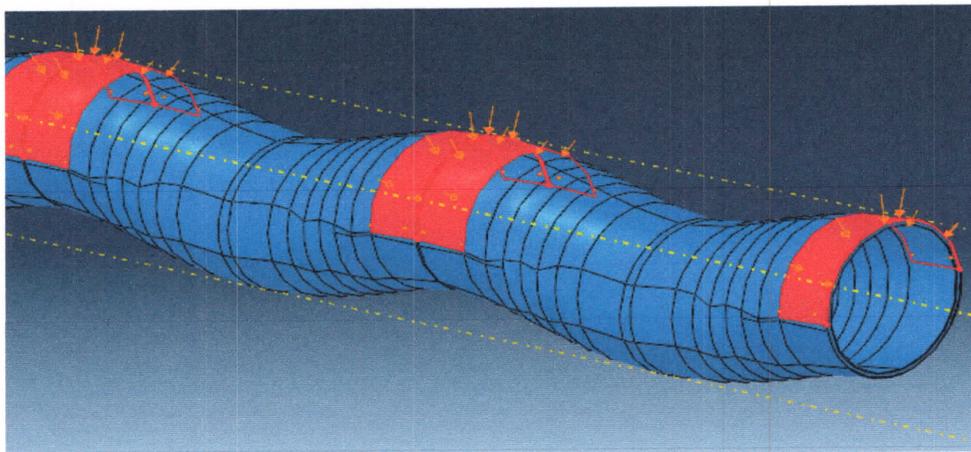


Figure IV-16: Création de flux sur la section1.

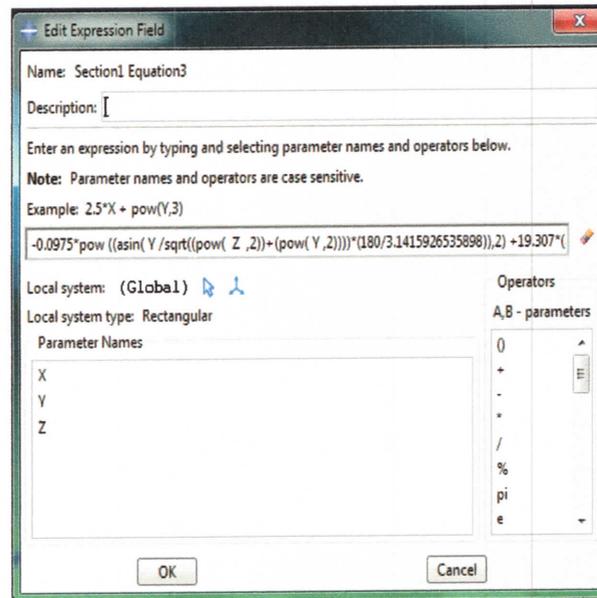


Figure IV-17: Définir l'équation de la section 1.

N.B: De même manière, on définit la distribution de toutes les 8 sections de tube. Figure (Figure IV- 13).

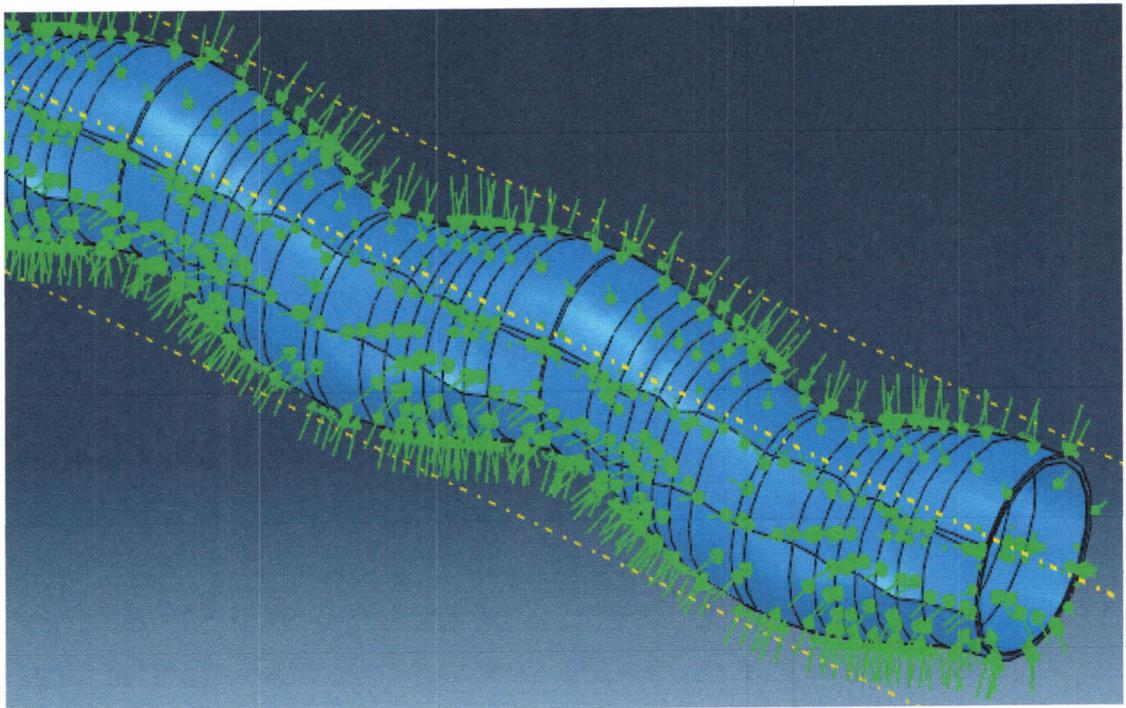


Figure IV- 18: Distribution des flux solaire appliqué sur toute la structure.

Définition de BCs : Dans ce modèle il faut définir les conditions aux limites, (BCs), aux extrémités du tube comme suit:

a- Création des extrémités de tube, on utilise la commande **Extrude**  .

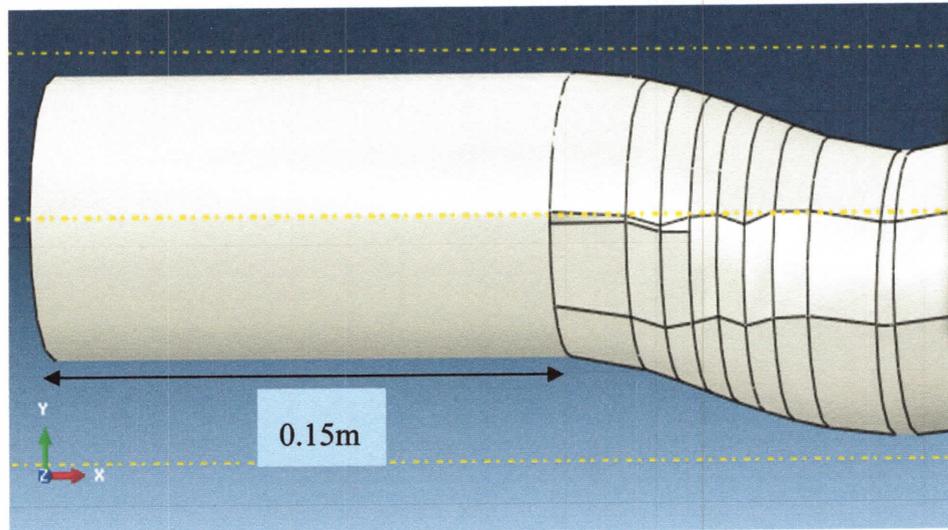


Figure IV- 19: Création des extrémités.

b- On clique sur la commande BCs  BCs

c- Dans la boîte de dialogue on choisit la catégorie Mécanique et le type Déplacement/Rotation

d- Sélectionner les deux extrémités de tube sinusoïde

e- Dans la deuxième boîte de dialogue on définit les conditions aux limites

déplacement sur $\text{dis } y = \text{dis } z = 0$

et $\text{dis } x = \text{libre}$

la rotation autour de $\text{rot } x = \text{rot } y = 0$

et $\text{rot } z = \text{libre}$

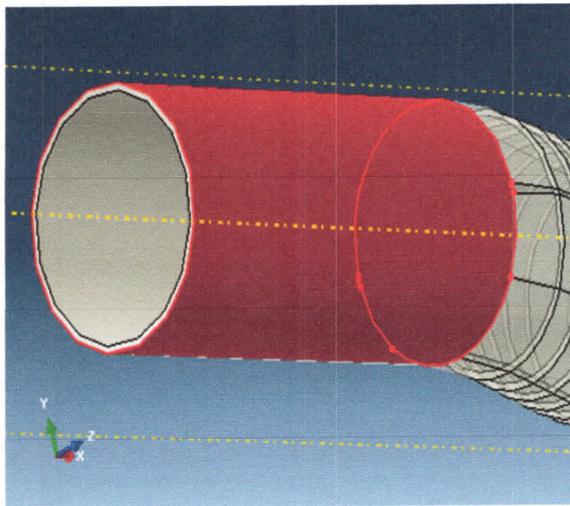


Figure IV-20: Définition des extrémités du tube.

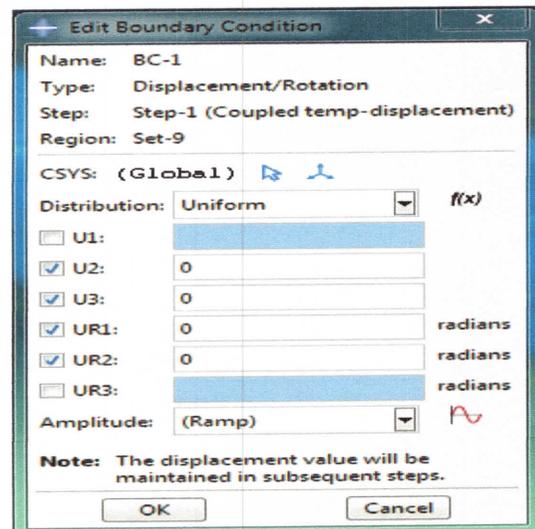


Figure IV-21: Définition des conditions aux limites.

IV.3.8. Module jobs :

Pour lancer l'analyse:

- a- Sélectionner la commande **Jobs** pour crée un nouvelle analyse.



- b- Sélectionner la sous commande "Job-1" par le bouton droit de la souri puis cliquer sur "submit".

par le bouton droit de la

Chapitre V :
Résultats et discussion

V.1. Résultats :

On présente dans ce chapitre les résultats des modélisations numériques de l'absorbeur du Capteur Cylindro-Parabolique (CCP). Cette modélisation vis à évaluer la variation de la déformation du tube sinusoïde en fonction de la distribution de température de la paroi de tube avec un échange de chaleur par convection à l'intérieur du tube.

V.1.1. Pour l'Acier inoxydable 316L :

V.1.1.1. Distribution de le température en (TEMP) [K] :

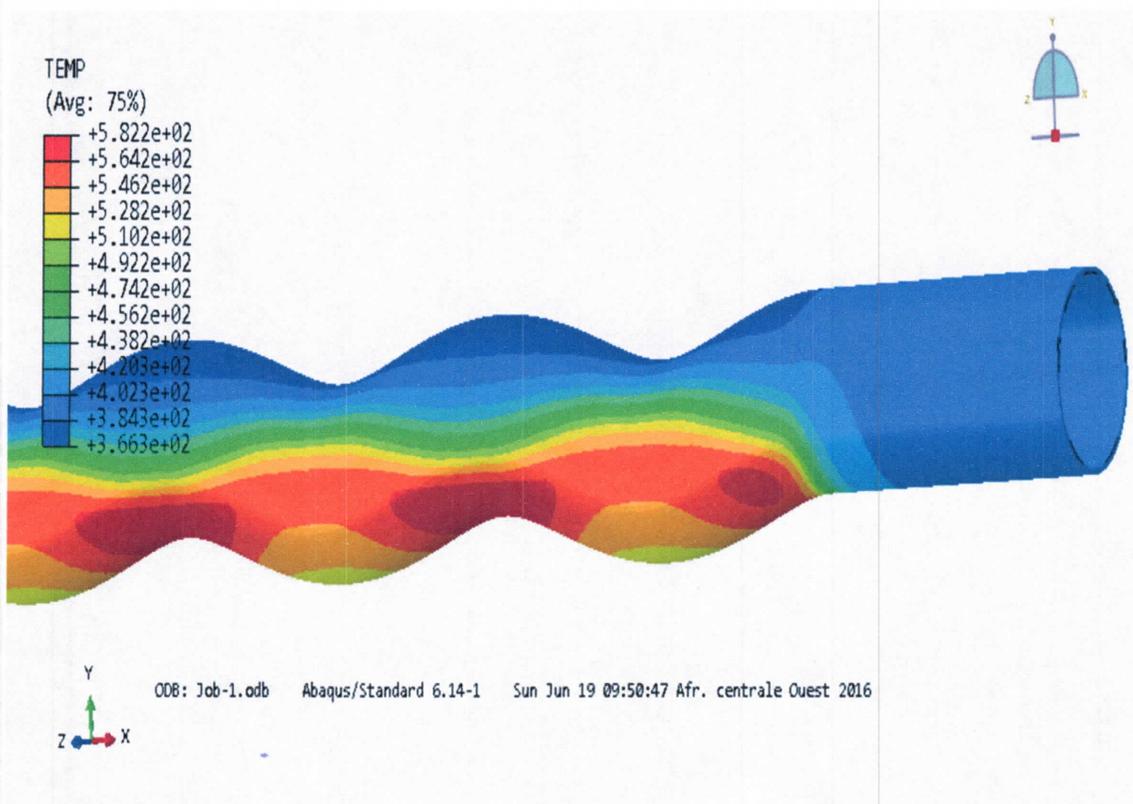


Figure V- 1: Variation de la température dans le tube en acier inoxydable pour $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$ et $Re=5000$ (Acier inoxydable), ω_1 .

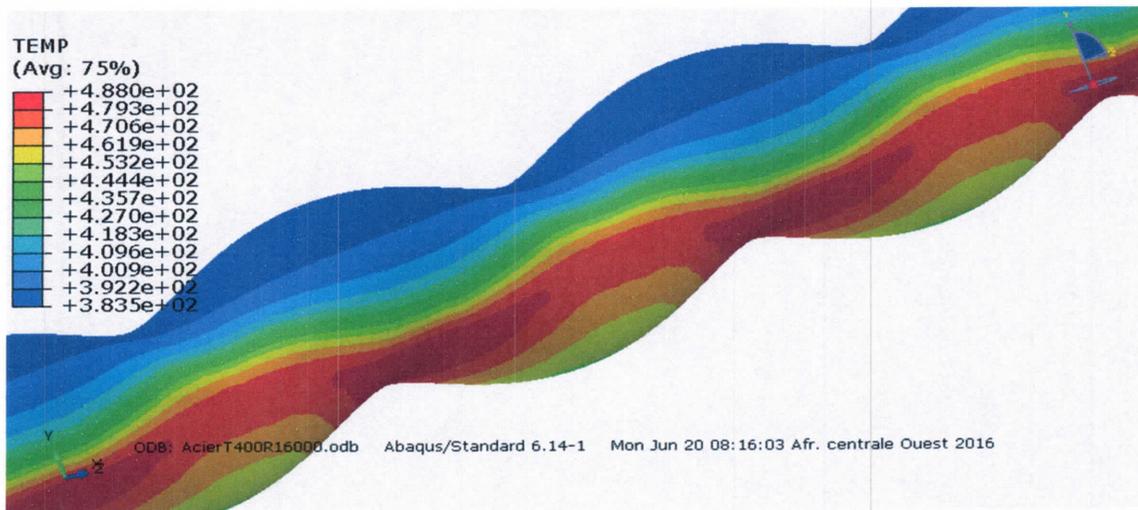
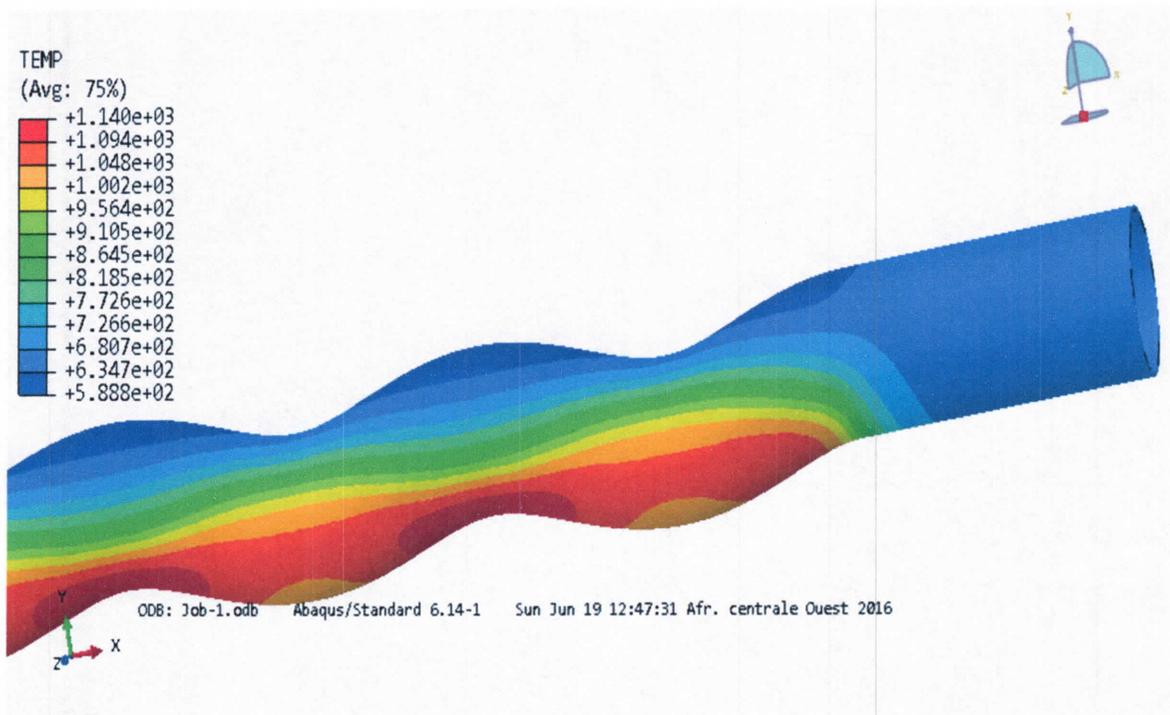


Figure V- 2: Variation de la température dans le tube en acier inoxydable pour $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$ et $Re=16000$ (Acier inoxydable)



SIMULIA

Figure V- 3: Variation de la température dans le tube en acier inoxydable pour $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$ et $Re=5000$ (Acier inoxydable)

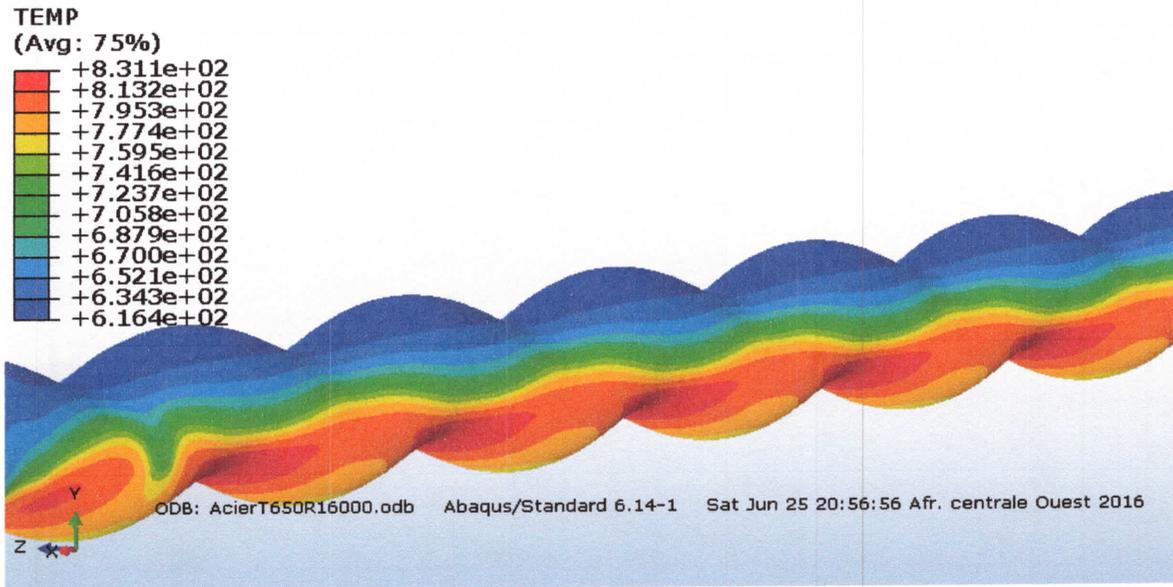


Figure V- 4: Variation de la température dans le tube en acier inoxydable pour $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$ et $Re=16000$ (Acier inoxydable)

V.1.1.2. déformations thermique (THE) :

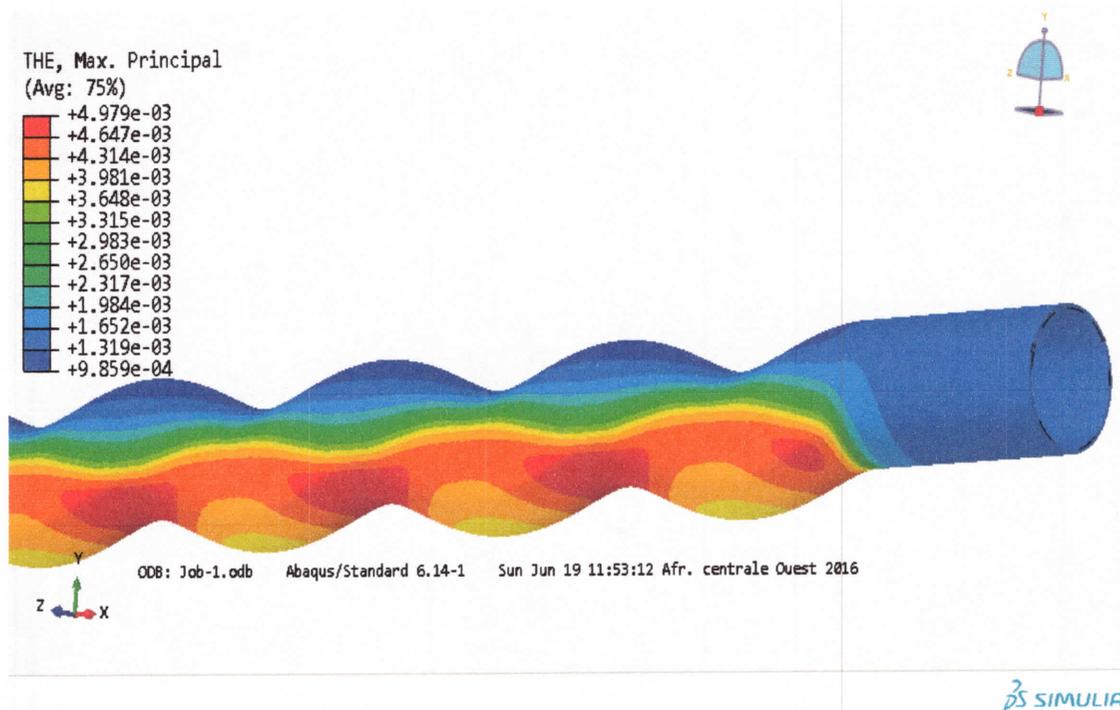


Figure V- 5: Variation de la déformation thermique à $T_{\text{fluide}} =400\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable)

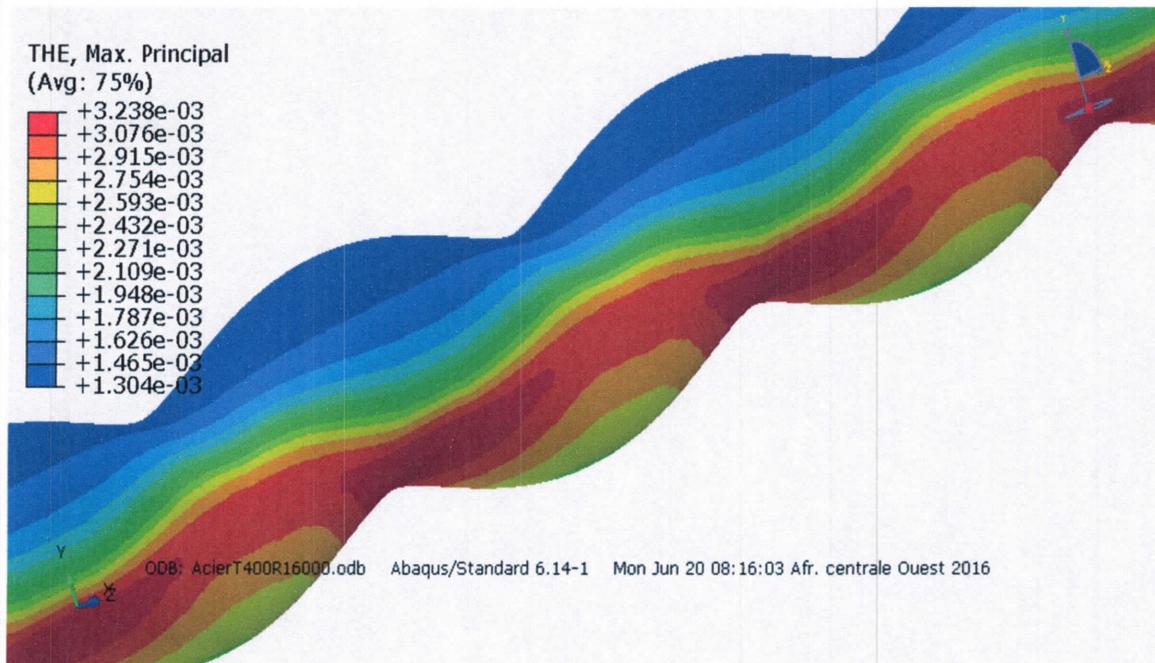


Figure V- 6: Variation de la déformation thermique à $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable)

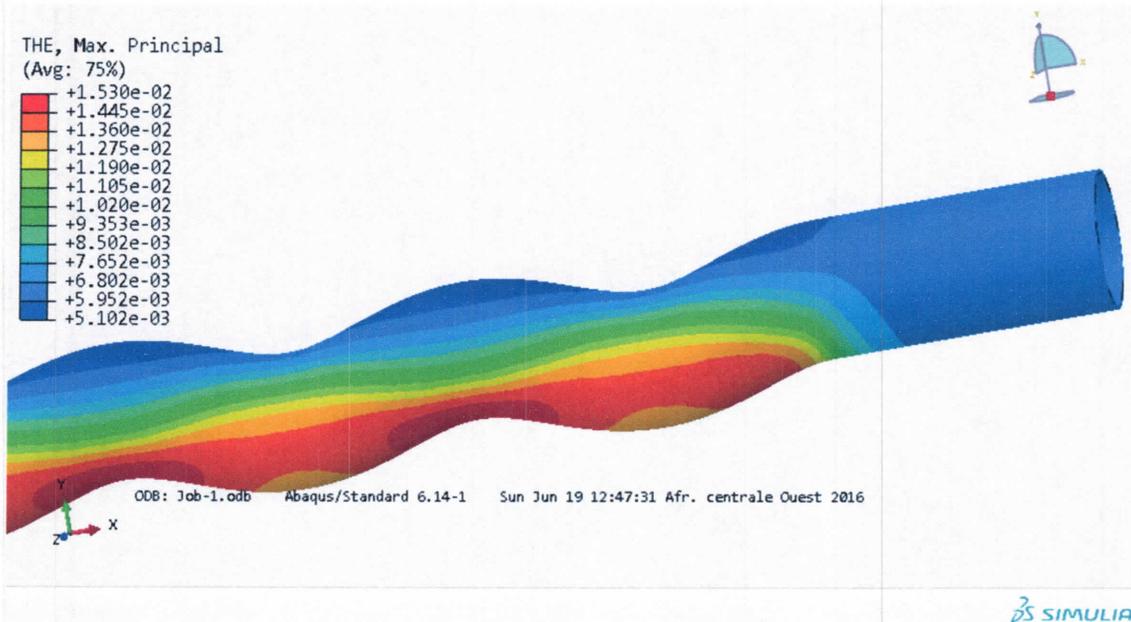


Figure V- 7: Variation de la déformation thermique à $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable)

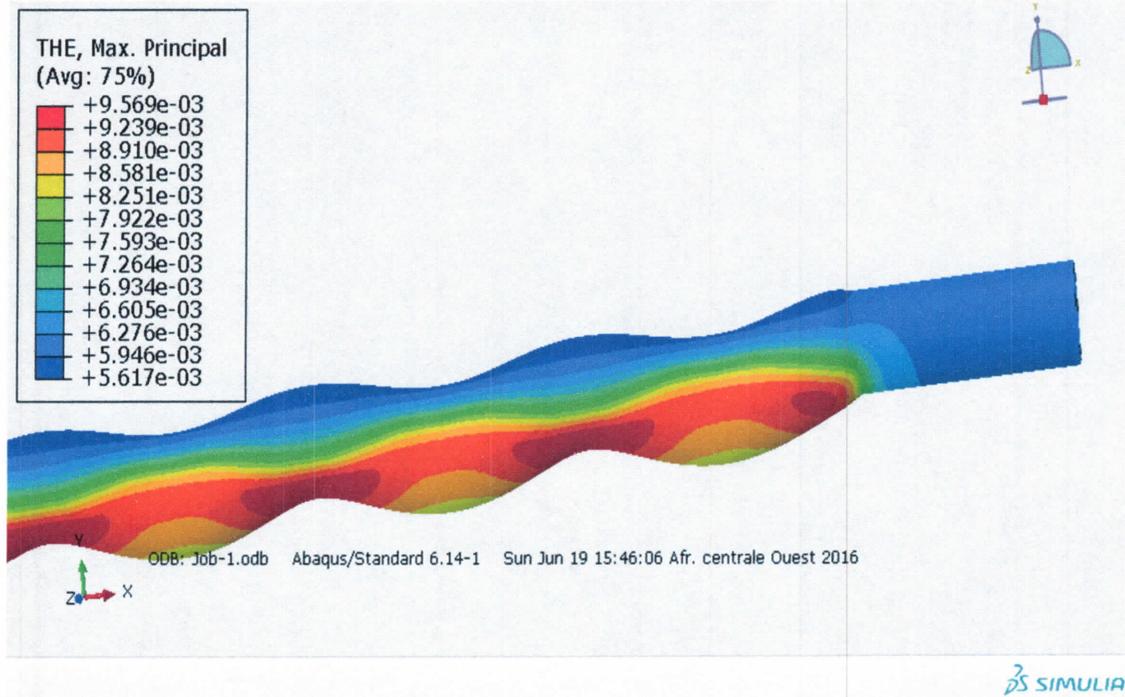


Figure V- 8: Variation de la déformation thermique à $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable)

V.1.1.3. Champ de déplacement U en [m] :

a- Déplacement du tube suivant l'axe X (U1):

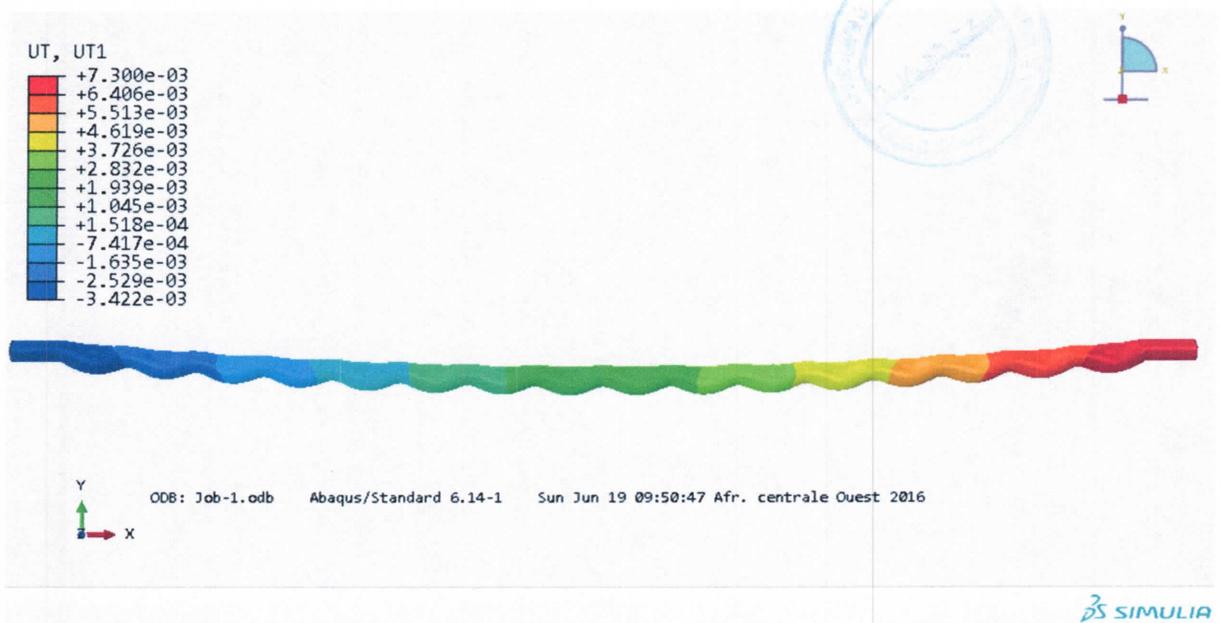


Figure V- 9: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable)

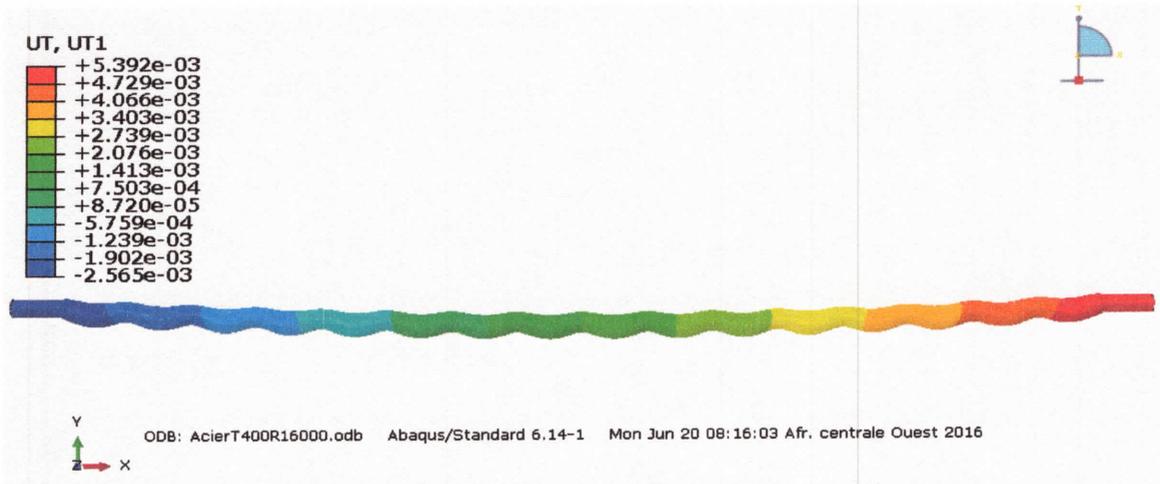


Figure V- 10: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable).

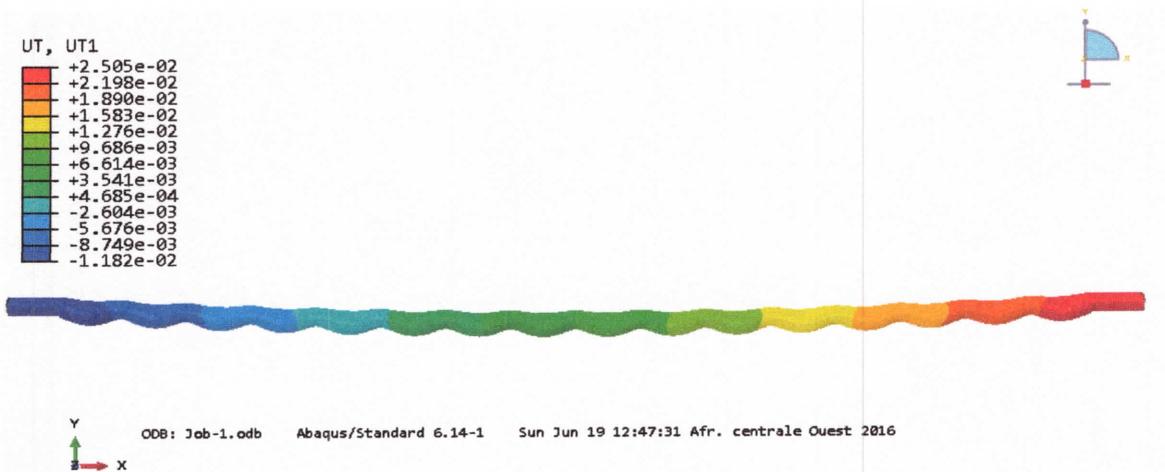


Figure V- 11: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable).

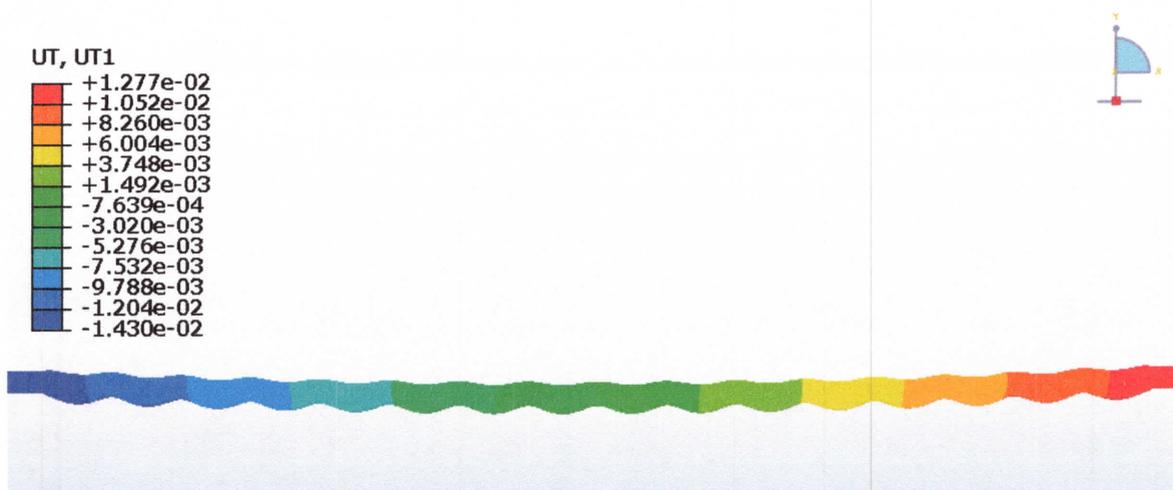


Figure V- 12: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable).

b- Déplacement du tube suivant l'axe Y (U2) :

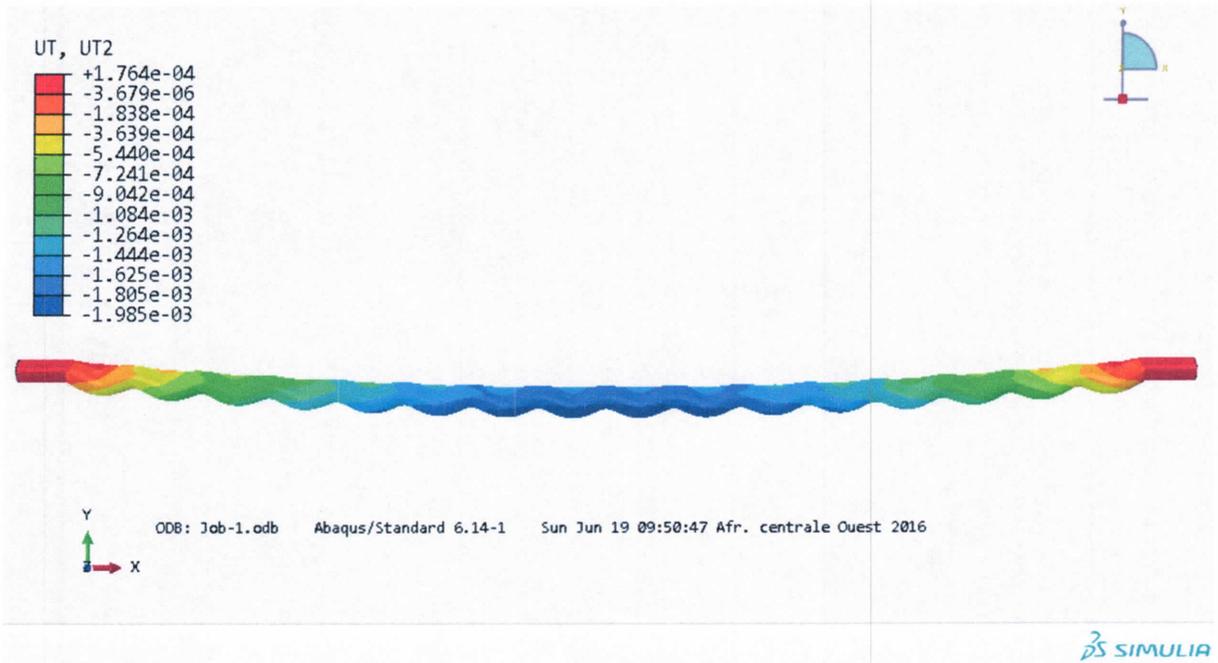


Figure V- 13: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable)

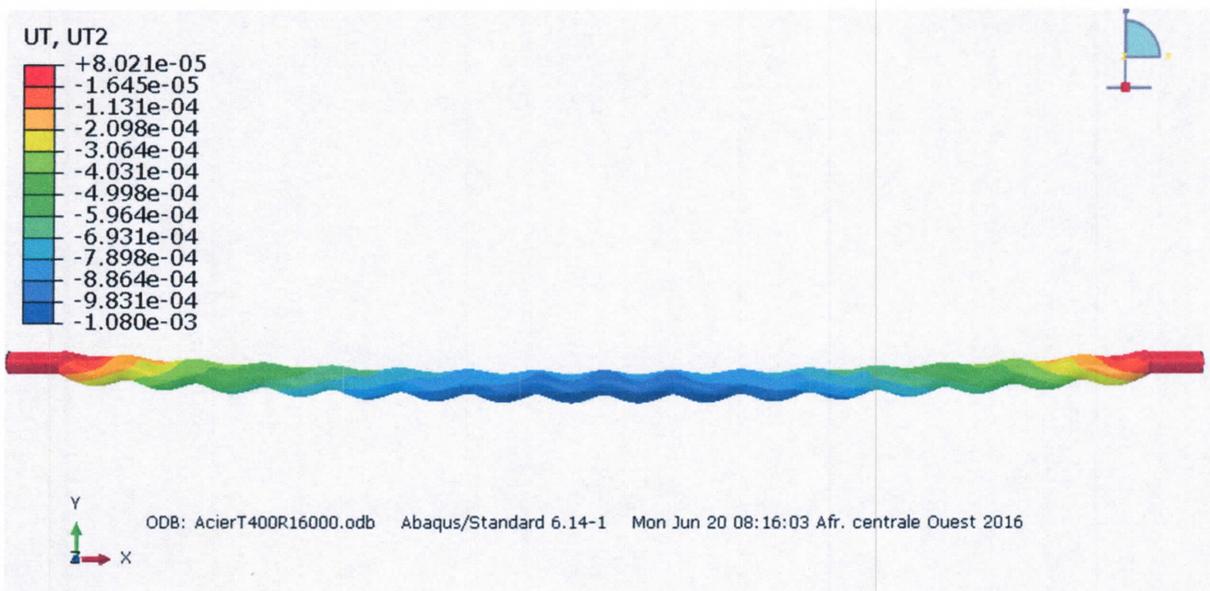


Figure V- 14: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable)

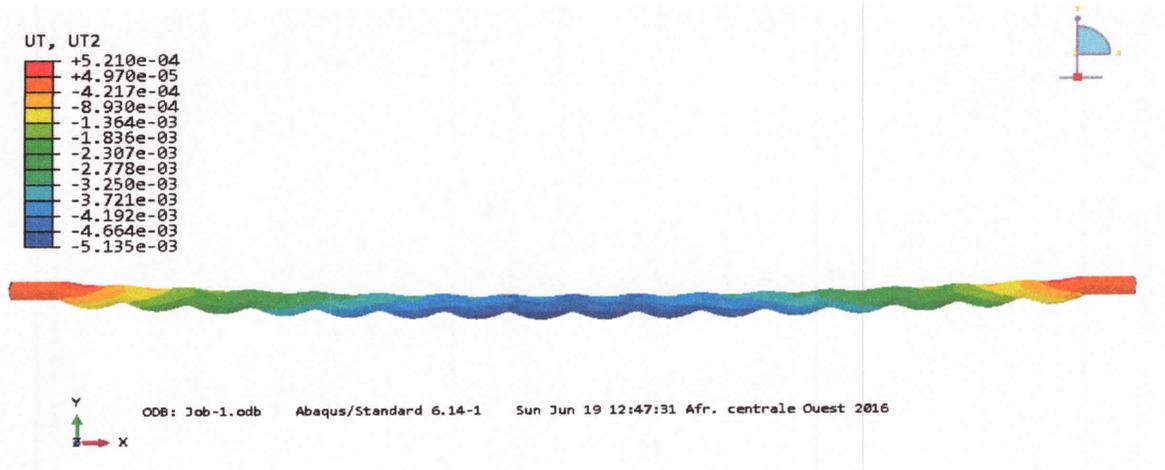


Figure V- 15: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable)

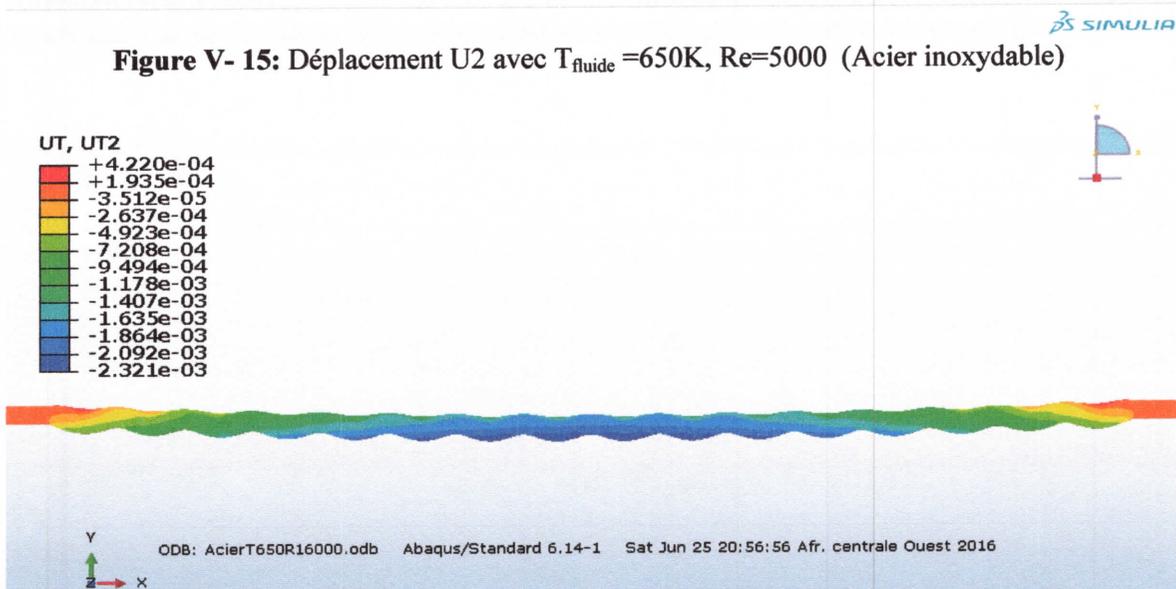


Figure V- 16: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable)

c- Déplacement du tube suivant l'axe Z (U3):

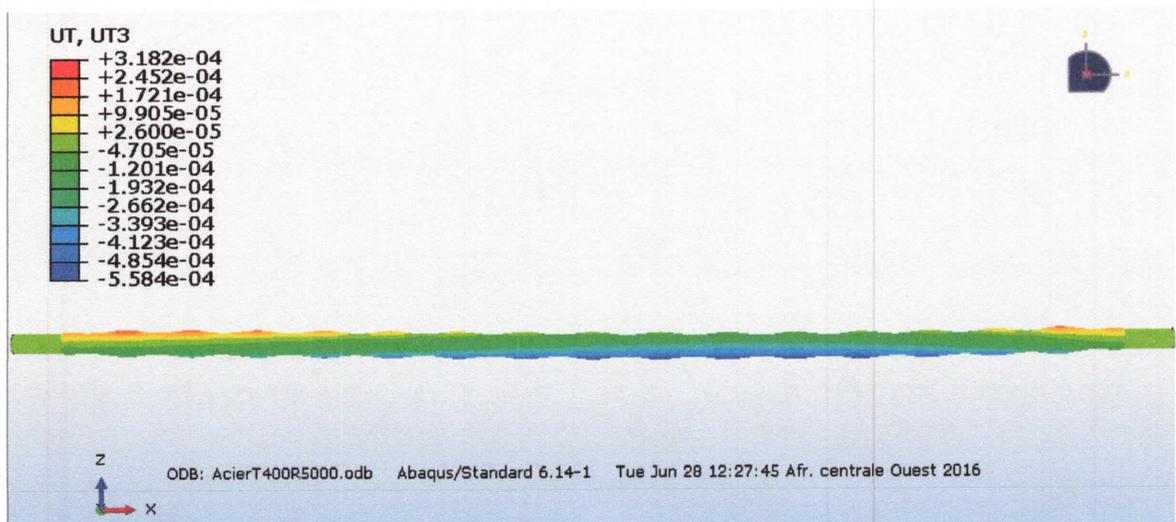


Figure V- 17: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable)

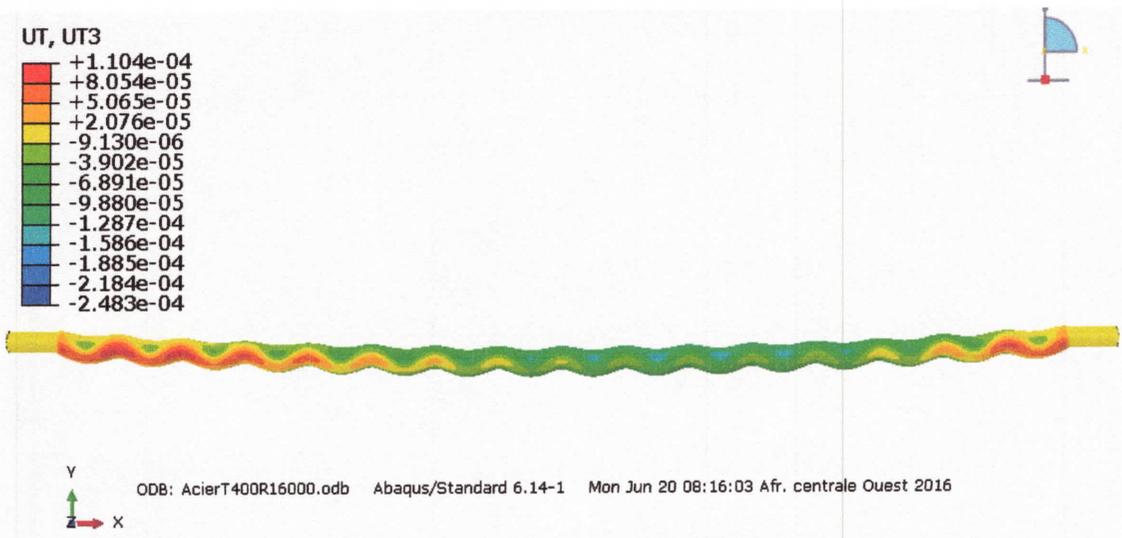


Figure V- 18: Déplacement U3 avec: $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable)

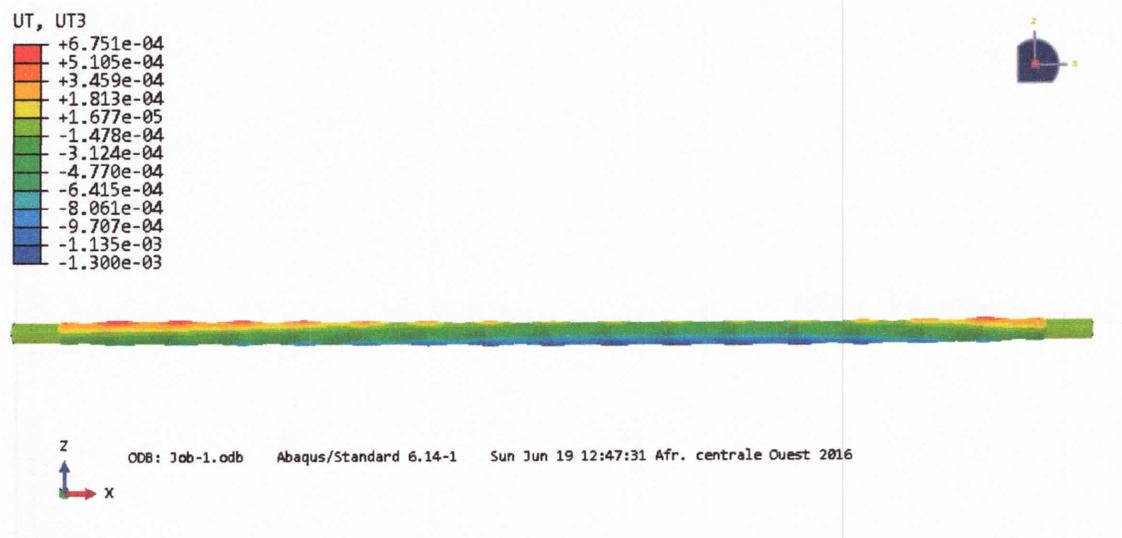


Figure V- 19: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=5000$ (Acier inoxydable)

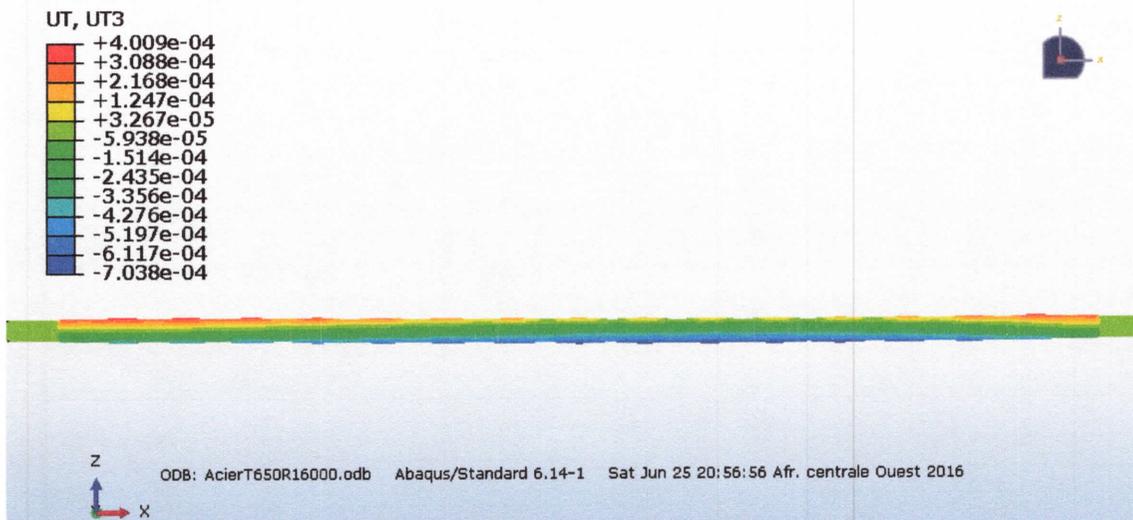


Figure V- 20: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=16000$ (Acier inoxydable)

V.1.2. Pour l'alliage de cuivre C17200:

V.1.2.1. Distribution de la température (TEMP) [K] :

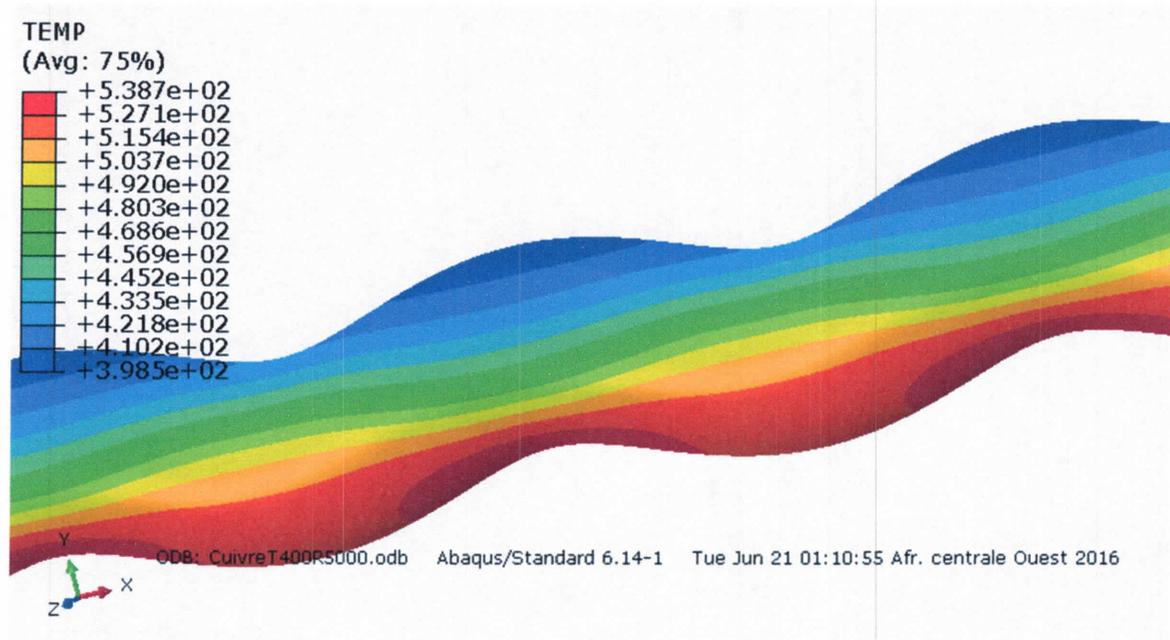


Figure V- 21: Variation de la température à $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

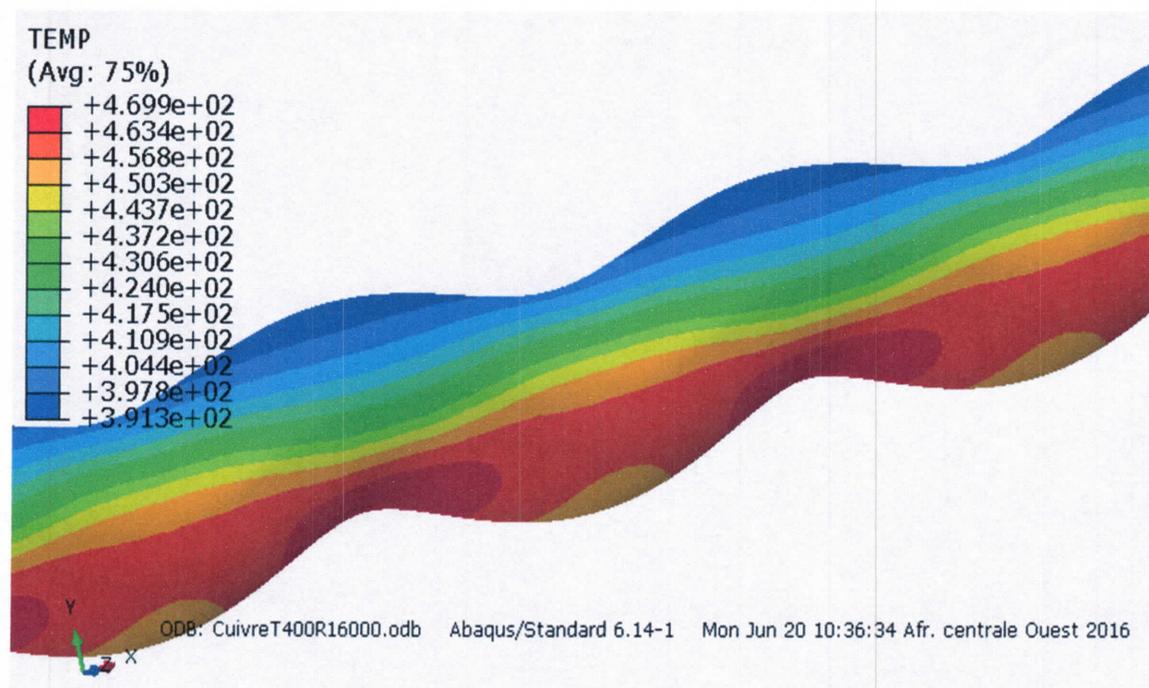


Figure V- 22: Variation de la température à $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

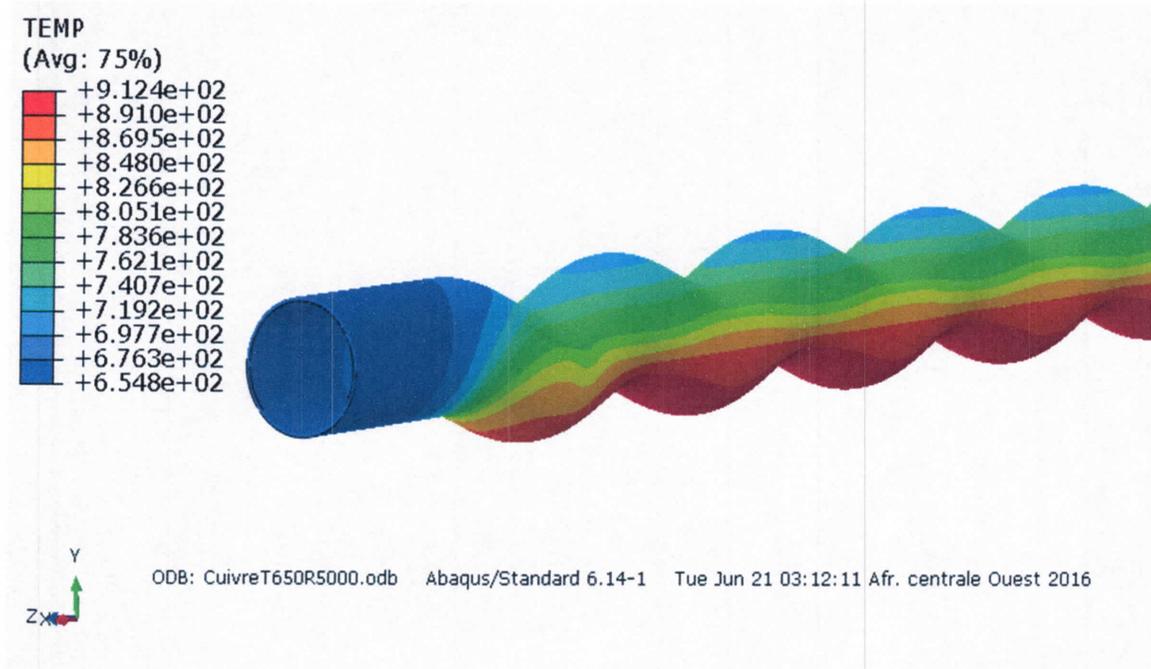


Figure V- 23: Variation de la température à $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

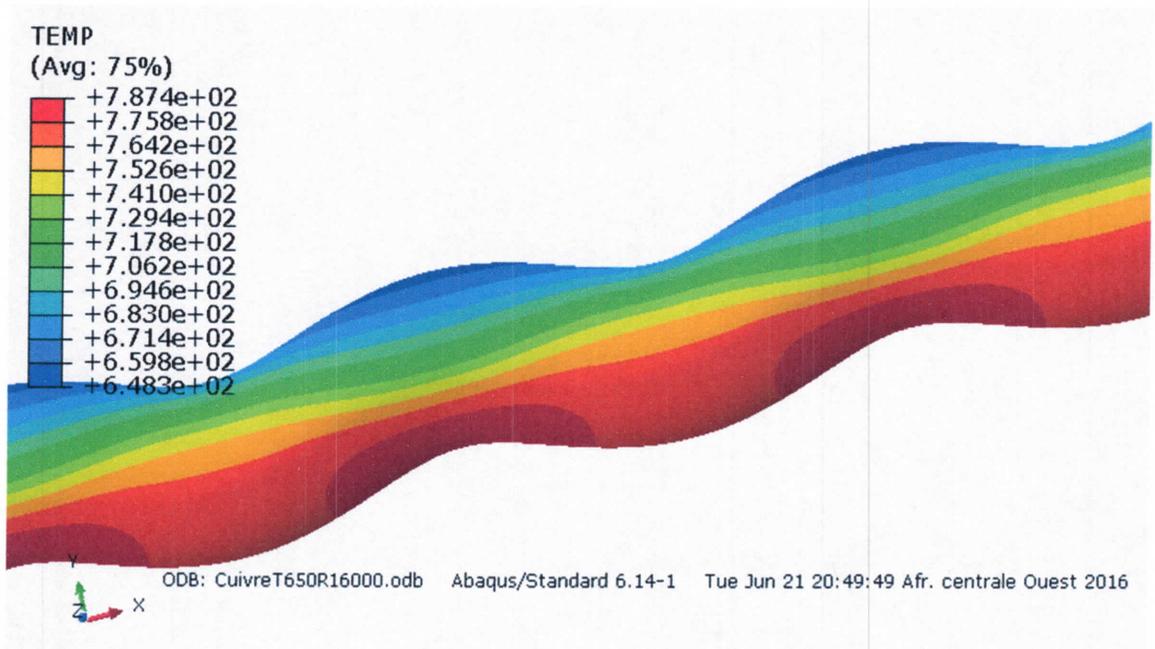


Figure V- 24: Variation de la température à $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

V.1.2.2. Les déformations thermique (THE) :

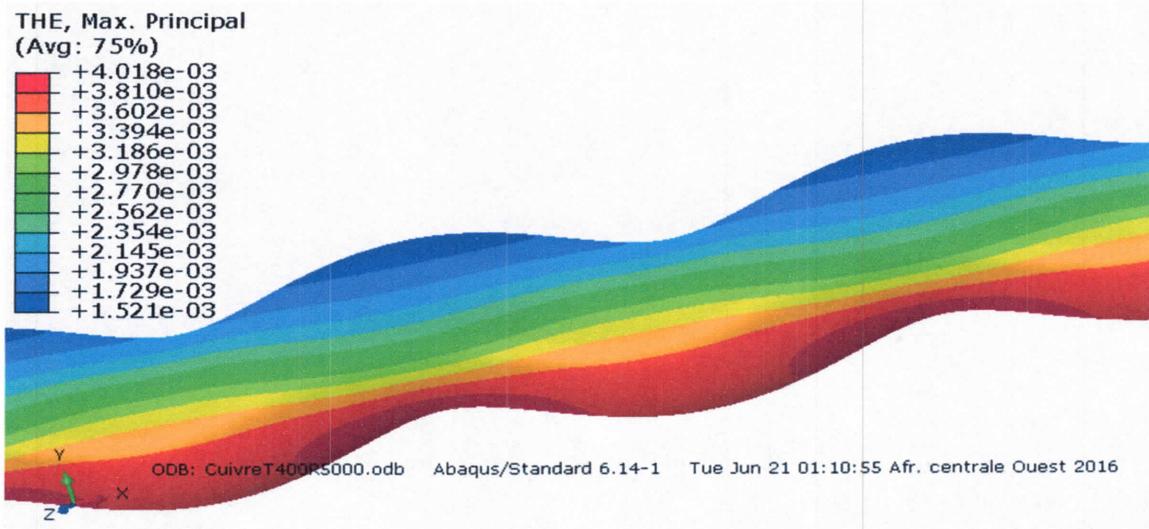


Figure V- 25: Variation de la déformations thermique à $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

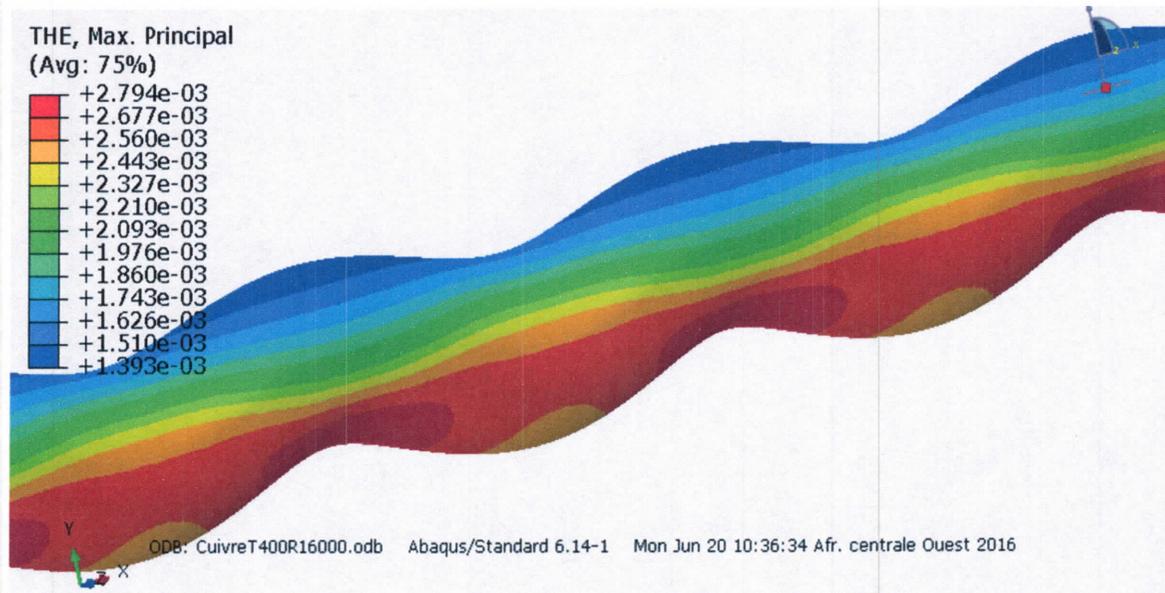


Figure V- 26: Variation de la déformations thermique à $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

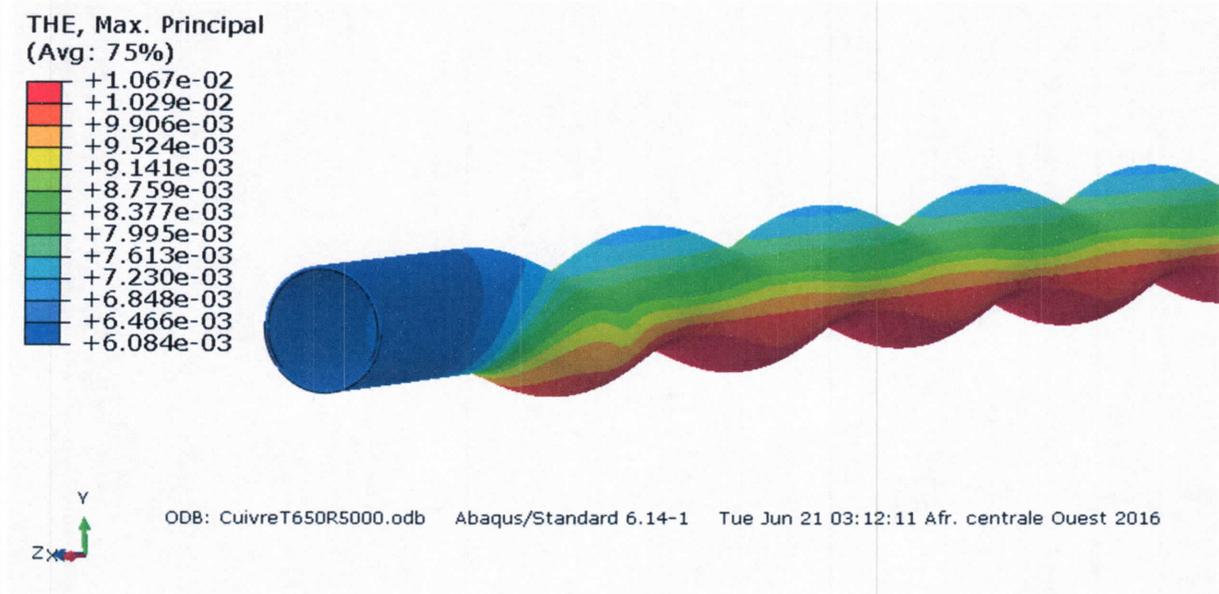


Figure V- 27: Variation de la déformations thermique à $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

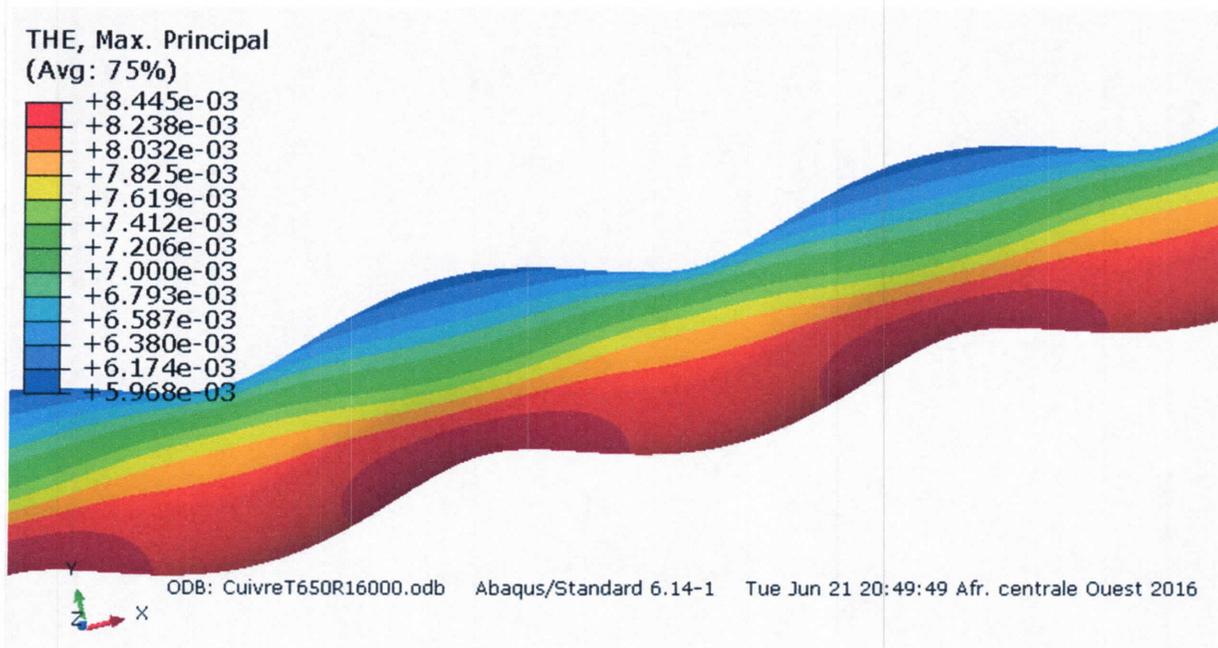


Figure V- 28: Variation de la déformations thermique à $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

V.1.2.3. Champ de déplacement U en [m] :

a- Déplacement suivant U1 :

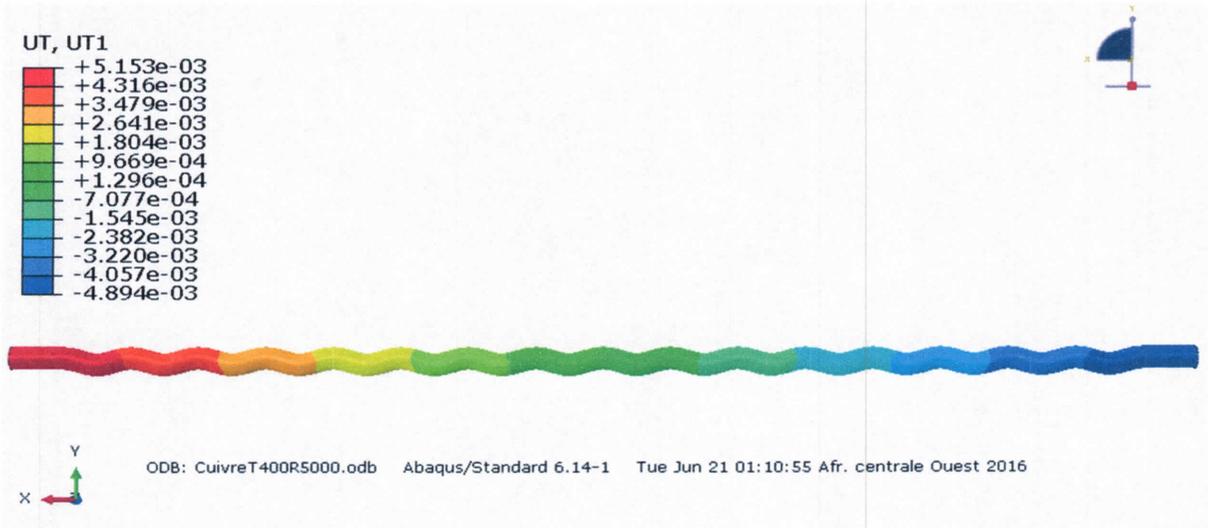


Figure V- 29: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

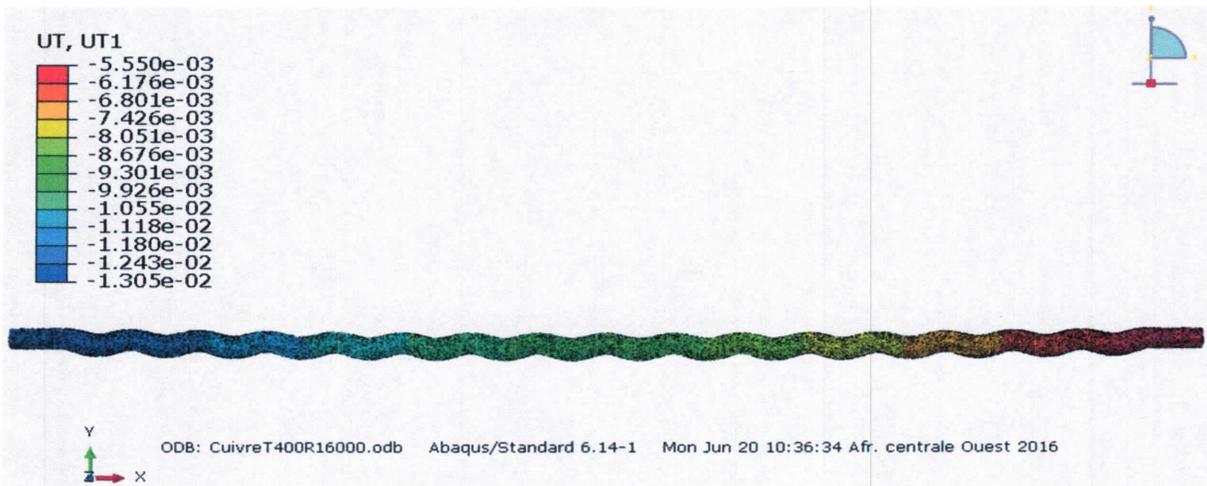


Figure V- 30: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}} =400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

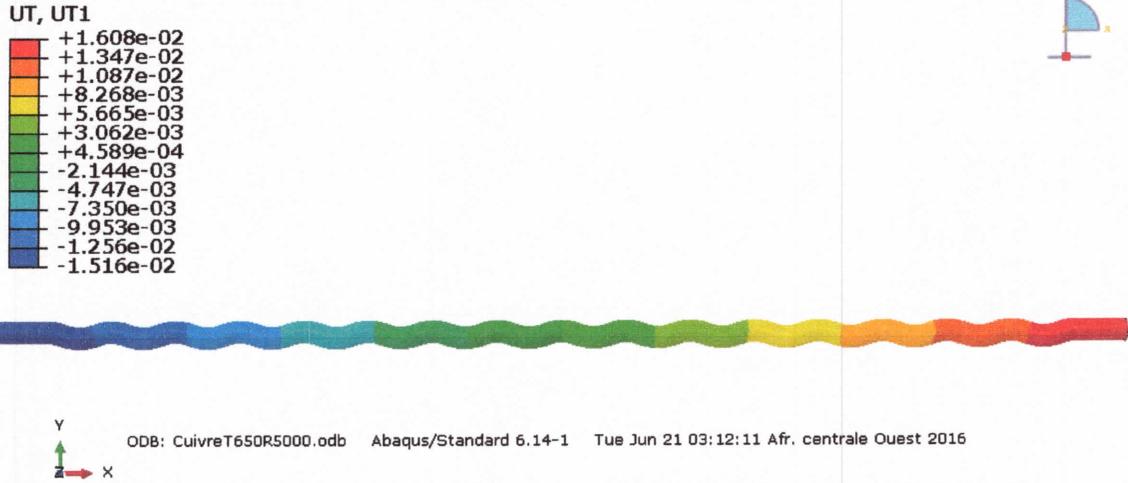


Figure V- 31: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

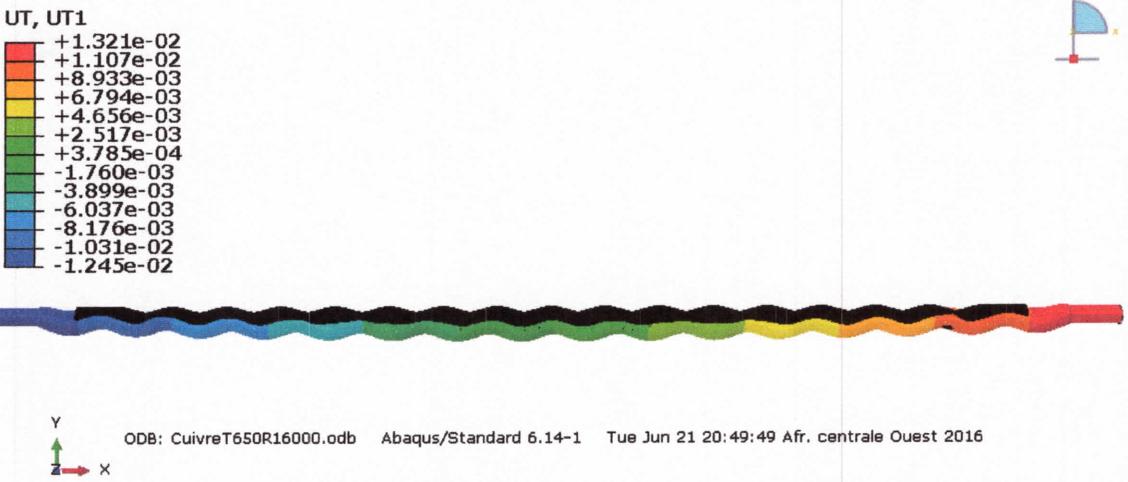


Figure V- 32: Déplacement U1 avec $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

b- Déplacement suivant U2 :

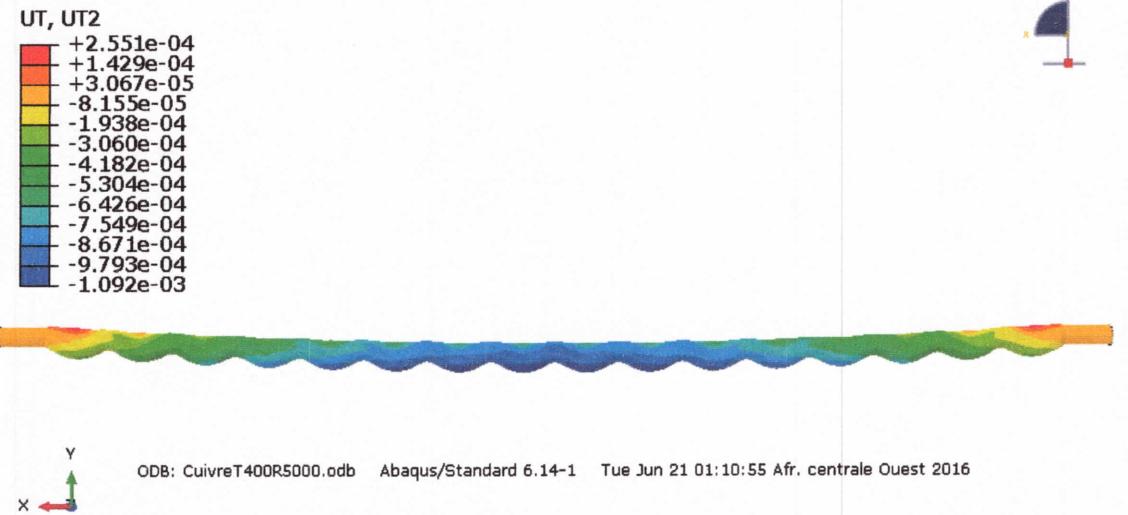


Figure V- 33: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

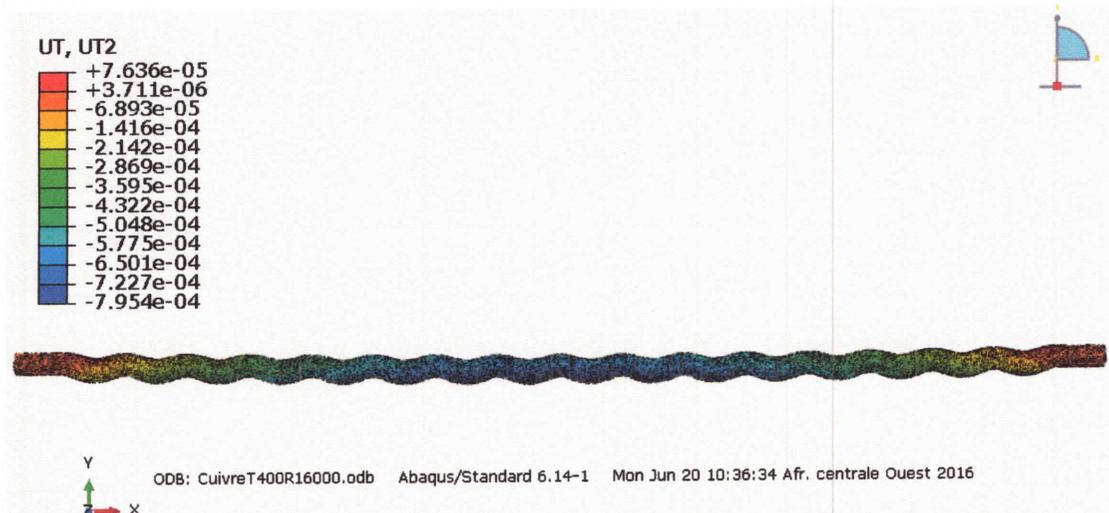


Figure V- 34: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}}=400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

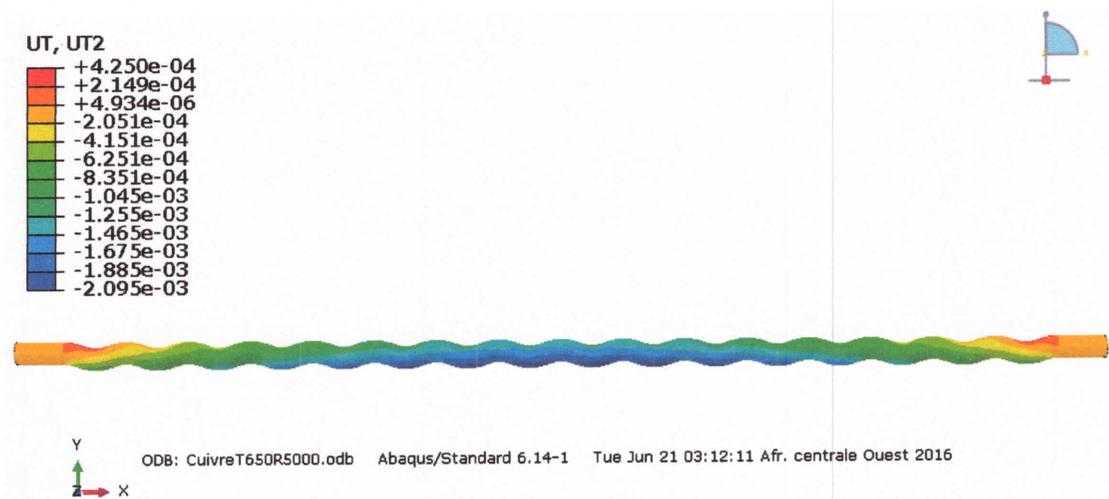


Figure V- 35: Déplacement U2 avec $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

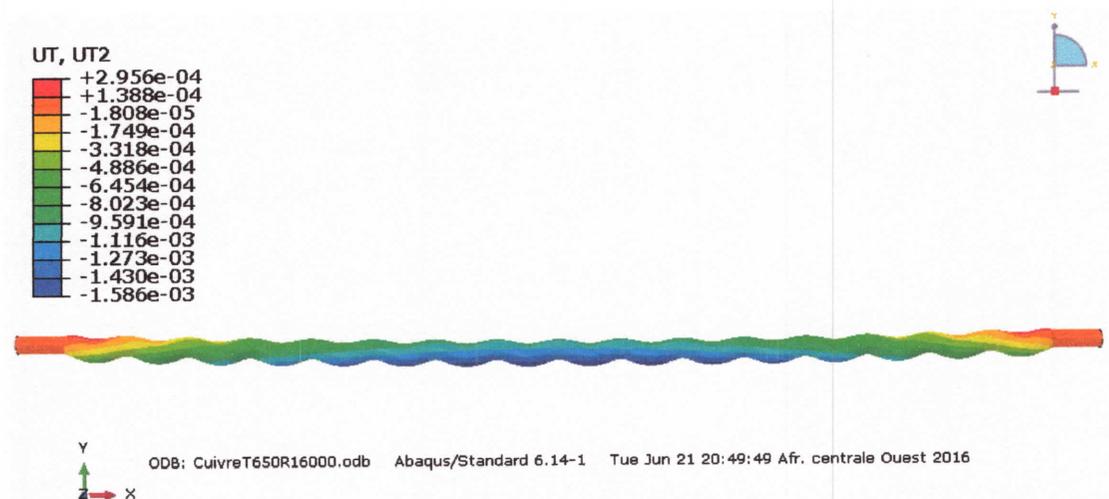


Figure V- 36: Déplacement U2 avec: $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

c- Déplacement suivant **U3** : (vue de dessus)

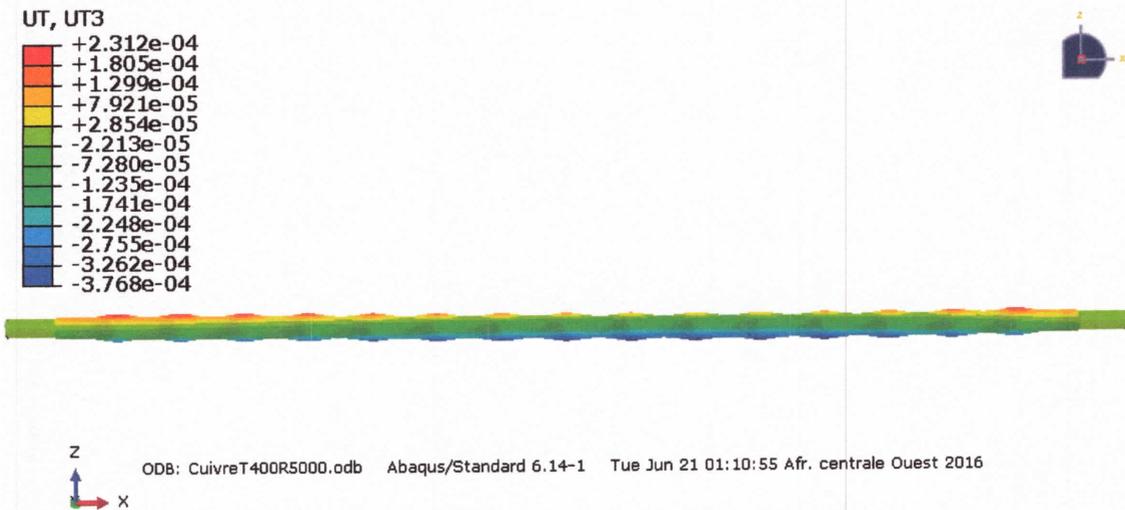


Figure V- 37: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

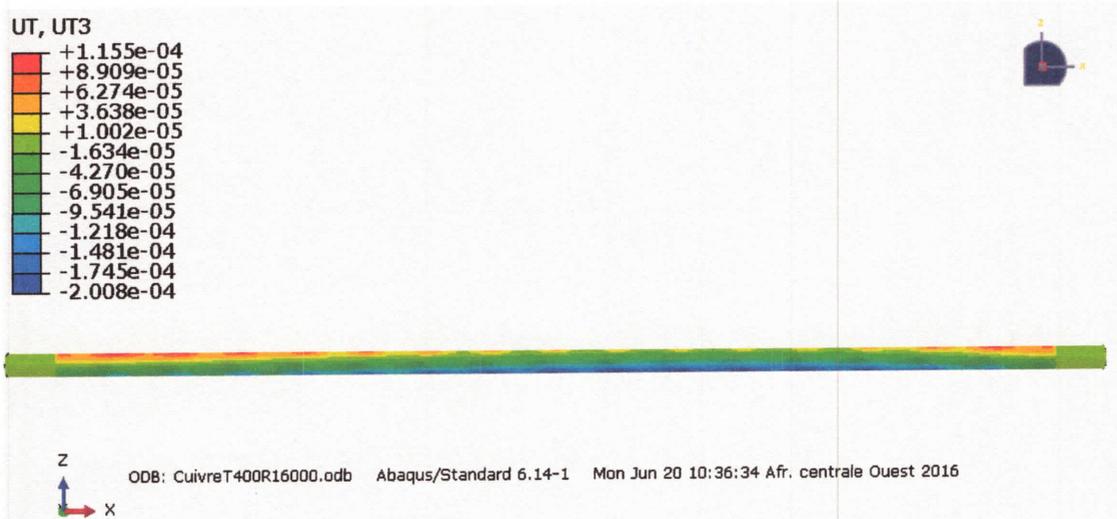


Figure V- 38: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 400\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

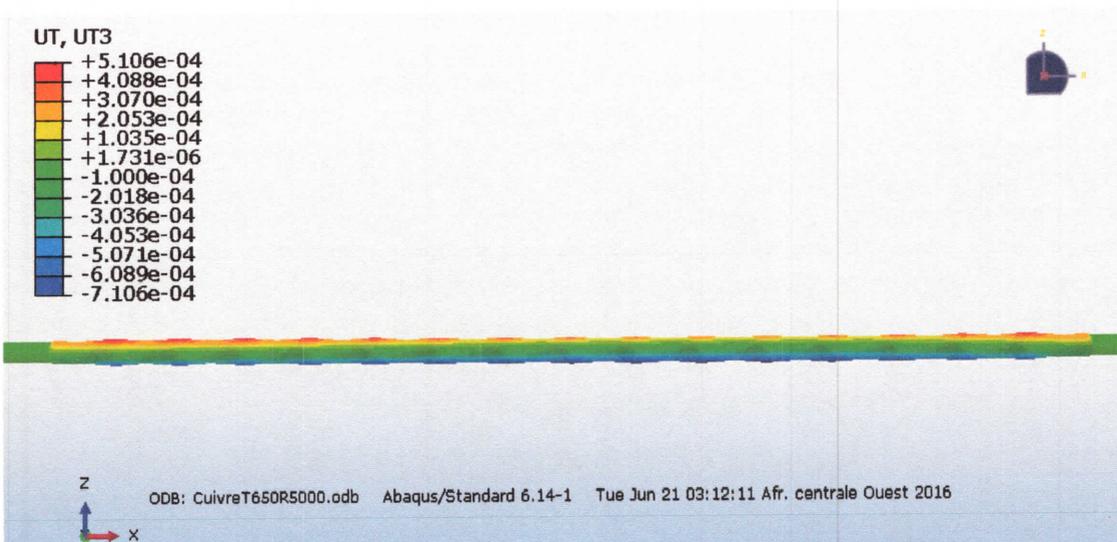


Figure V- 39: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}} = 650\text{K}$, $Re=5000$ (alliage de cuivre)

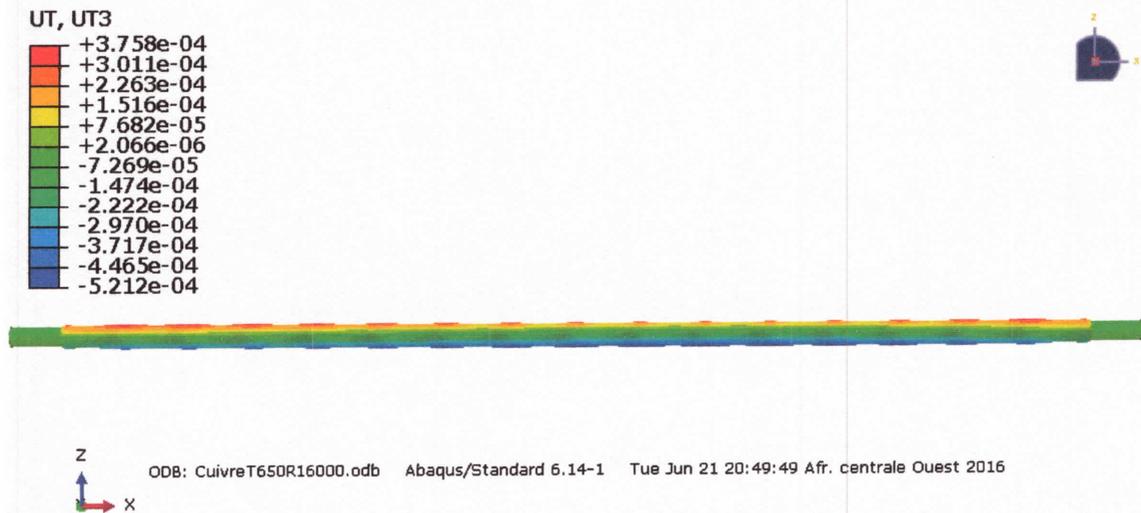


Figure V- 40: Déplacement U3 avec $T_{\text{fluide}}=650\text{K}$, $Re=16000$ (alliage de cuivre)

V.2. Discussion des résultats :

V.2.1. Température et déformation thermique :

La déformation thermique du tube sinusoïdale dépend seulement de la variation de la température de sa paroi latérale. La déformation thermique du tube sinusoïdale dépend de l'ordre de la différence entre la température maximale et minimale de la paroi du tube. D'après les résultats obtenues, on peut constater que, pour un nombre de Reynolds plus grand (16000 environ) et une température du fluide (400K environ), la différence de température de la paroi et la déformation thermique du tube sont petites en comparaison avec celles obtenues pour les autres cas. Les mêmes constatations peuvent être élargies aux résultats obtenus en utilisant l'alliage du cuivre (C17200) par rapport aux résultats obtenus en utilisant l'acier inoxydable (316L). Cela est due à la différence des conductivités thermiques des deux matériaux.

$$T_{\text{max}} - T_{\text{min}} = 87.6 \text{ K}, \text{THE}_{\text{max}} = 0.002794 \text{ et } \text{THE}_{\text{min}} = 0.001393 \quad (\text{alliage de cuivre})$$

$$T_{\text{max}} - T_{\text{min}} = 104.5 \text{ K}, \text{THE}_{\text{max}} = 0.003238 \text{ et } \text{THE}_{\text{min}} = 0.001304 \quad (\text{acier inoxydable})$$

V.2.2. Déplacement :

Le déplacement du tube suivant la direction U3 est petit par contre le déplacement suivant la direction U1 est considérable ($U1_{\text{max}} = 2.505 \text{ cm}$), mais pratiquement on peut gérer ce déplacement on utilisant des soufflets montés, auprès des appuies, entre l'enveloppe en verre et le tube absorbeur. Le but de ce montage est d'éviter le risque de la défaillance de l'enveloppe en verre du CCP. Donc, il reste le problème du déplacement U2 qu'il faut le minimiser pour atteindre les objectifs désirés à savoir le rendement efficace de

l'installation. Le déplacement suivant la direction **U2** dépend de la variation de la température de la paroi de l'absorbeur. D'après les résultats obtenus, on remarque que la valeur minimale de **U2** est égale à **0.7954mm** pour une température du fluide égale **400K** et un nombre de Reynolds égal **16000** avec l'alliage de cuivre.

V.2.3. Conclusion :

D'après les constatations suscitées, on peut conclure que la position de tube sinusoïdale dans le CCP impose que le matériau soit un alliage de cuivre et la température d'entrée du fluide égale à 400K avec un nombre de Reynolds égal à 16000. Les résultats de simulation de ce choix sont présentés dans ce qui suit :

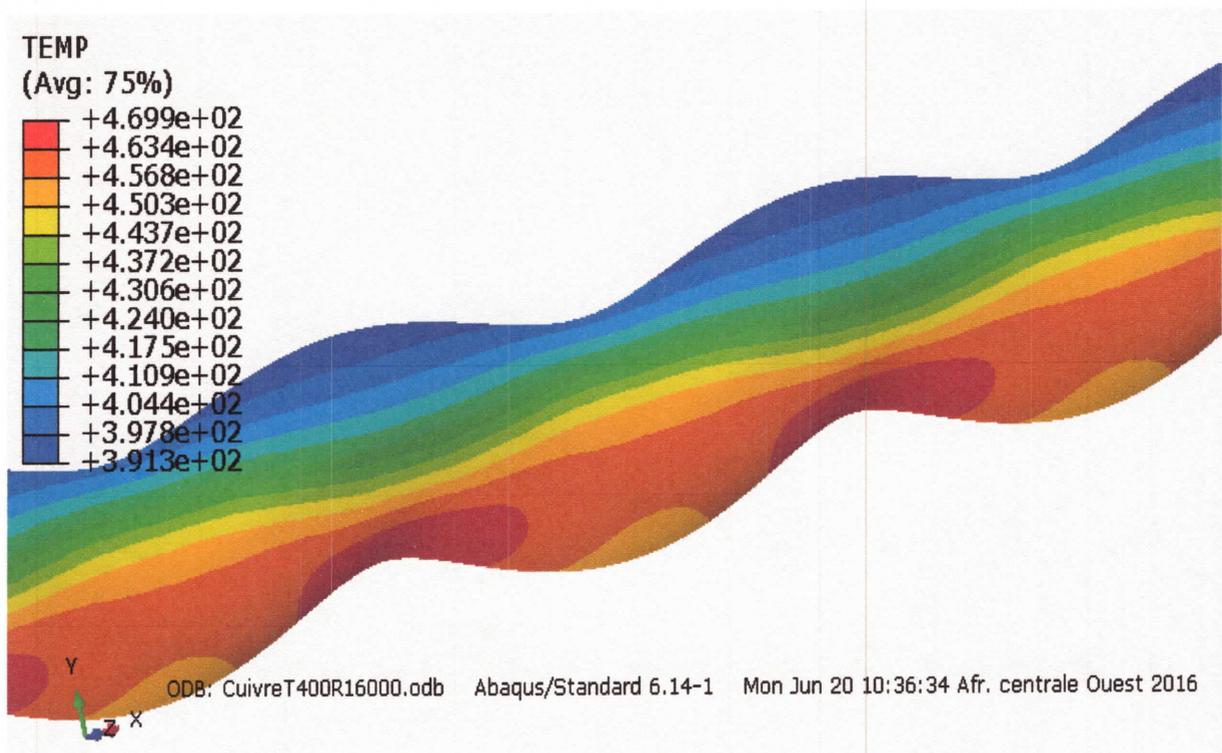


Figure V- 41: Distribution de la température en [K]

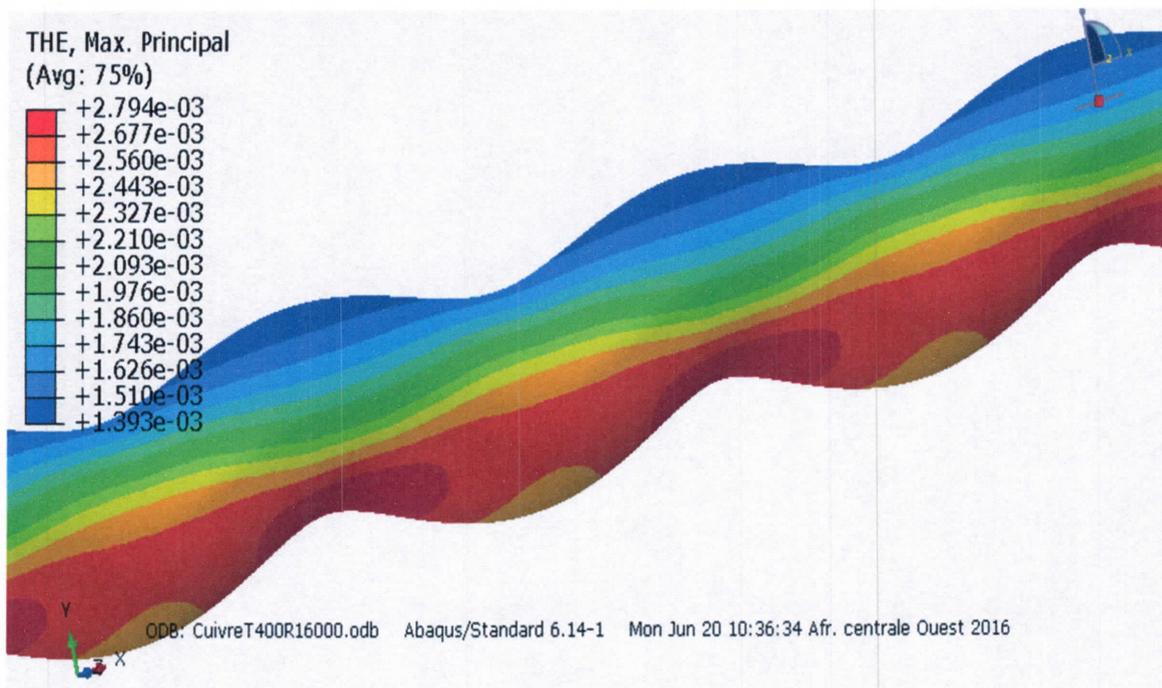


Figure V- 42: Distribution de la déformation thermique [sans unité]

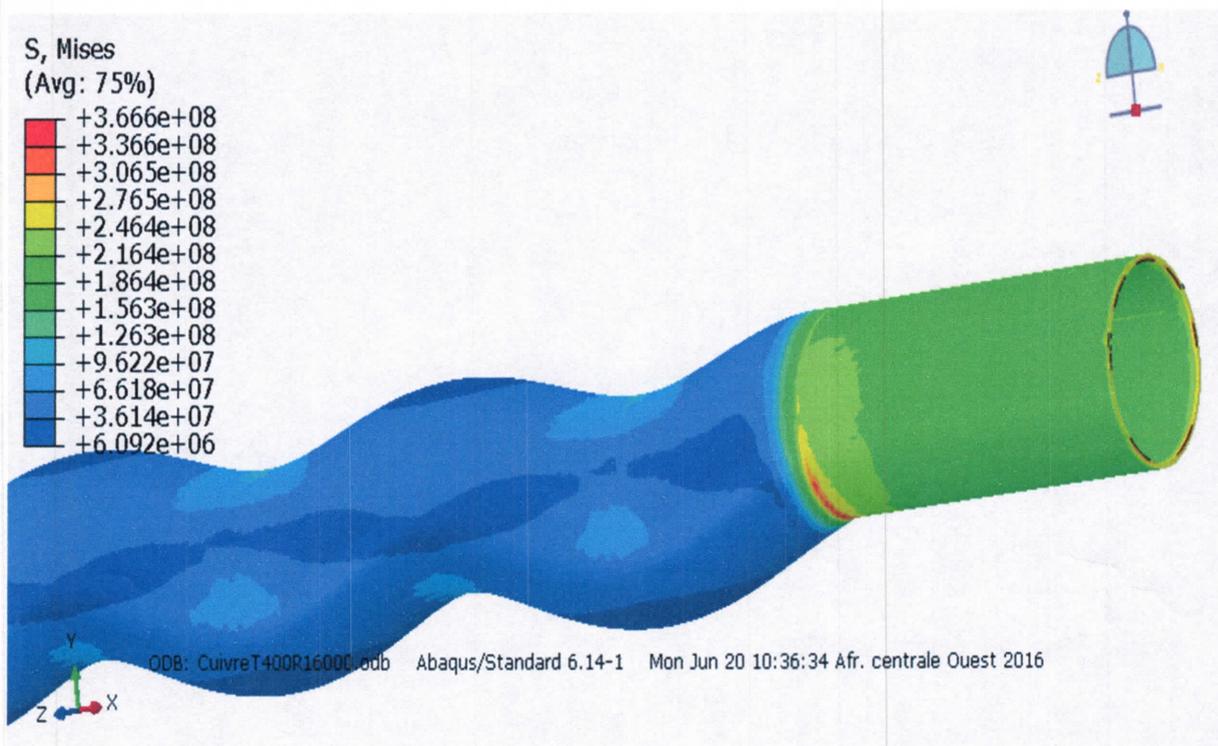


Figure V- 43: La contrainte en critère de Von Mises en [Pa]

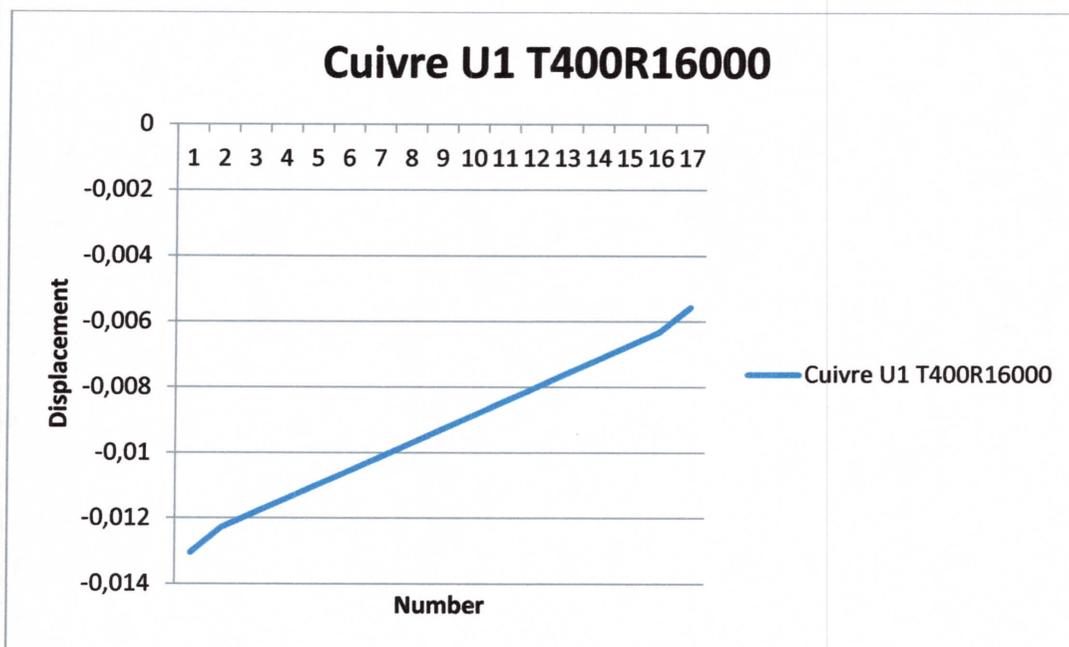


Figure V- 44: Déplacement suivant l'axe X en [m]

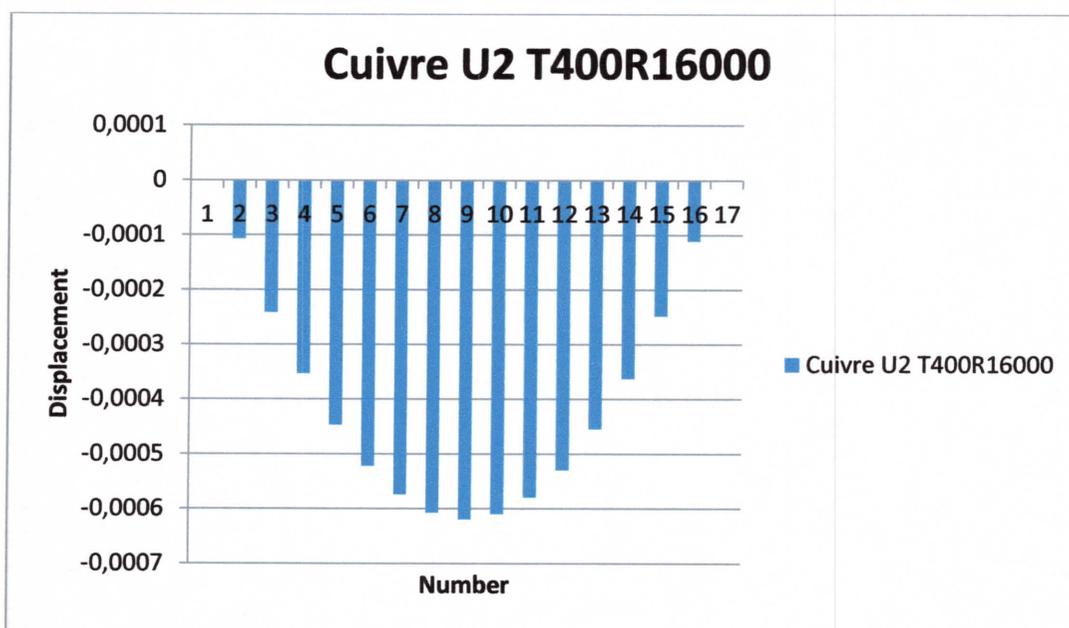


Figure V- 45: Déplacement suivant l'axe Y en [m]

Conclusion générale

L'une des sources naturelles à exploiter est l'énergie solaire qui doit être transformée en d'autres formes d'énergies. L'exploitation de cette énergie nous oblige de faire des recherches scientifiques numériques et expérimentales afin d'améliorer au maximum la conversion de l'énergie thermique produite par l'énergie solaire en énergie électrique à travers des techniques diverses. Parmi les techniques, de conversion d'énergie, utilisées dans ce domaine la technique des concentrateurs cylindro-paraboliques (CCP).

L'objectif de notre travail est la modélisation numérique sous ABAQUS de la déformation du nouveau absorbeur sinusoïdale du concentrateur cylindro-parabolique. Pendant la réalisation de ce travail, on a rencontré deux problèmes majeurs. Le premier est l'inexistence des résultats analytiques, expérimentaux et numériques sur ce thème. Tandis que le deuxième concerne l'introduction de l'influence du fluide sur le comportement du tube absorbeur sinusoïdale. La résolution approximative du deuxième problème est de remplacer l'effet du fluide par la considération d'un flux convectif sur la paroi interne du tube sinusoïdale. Donc ce travail est incomplet et malgré ça les résultats obtenus sont acceptables et on recommande pour de futurs travaux sur ce thème d'enrichir les connaissances sur l'utilisation du logiciel de modélisation ABAQUS.

D'après ces résultats on peut conclure que :

- La déformation de tube sinusoïdale dépend de la différence entre la température maximale et minimale de la paroi de tube.
- La différence de température de la paroi varie en fonction de la conductivité du matériau du tube et la convection du fluide.
- Le déplacement U_1 du tube, suivant l'axe X, est le plus dominant à cause de la forme courbée du tube.

Références bibliographique

- [1] Marif. Y . Contribution à l'amélioration du rendement d'un distillateur à film capillaire multi étage. Mémoire de magister en physique énergétique. U. K. M. Ouargla ,2008.
- [2] Fernandez-Garcia.A, Zarza.E, Valenzuela.L, Pérez.M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1695-1721 ,2010.
- [3] El Gharbi.N, Derbal.H, Bouaichaoui.S, Said.N. A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies. *Energy Procedia* 6, 565–572 ,2011.
- [4] Marif.Y, Benmoussa. H, Bouguettaia. H, Bechki. D, Belhadj. M. M, Boughali. S . Concentrateur cylindro-parabolique et ses applications dans le sud algérien.1er Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa ,2010.
- [5] J. ROBIEU,patent 75-14582 (INPI), international classification F03g 7/02 ; 02 KX/G02b5/10 ,1975.
- [6] Al-Rubaian, Ali I. And Al-fares, Harnad, Performance of single Axis tracking solar parabolic trough in Riyadh Saudi Arabia, World renewable energy congress VIII (WREC 2004).
- [7] J.R.Vaillant , Utilisation et promesse de l'énergie solaire, Edition Eyrolles, Paris, 1978.
- [8] R.Bernard, D.Mengury & M.Schuartz, Le rayonnement solaire : conversion et application, Edition Paris, 1979.
- [9] J.Howell, B.Bauverot & G.C.Veliet, Solar thermal energy system: analysis and desgn, Mc.Graw-Howell Book Company, USA, 1982.
- [10] Paul De Neyer· Energie solaire thermique, Guide des Energies Renouvelables,mai 2003.
- [11] Soteris A.Kalogirou,Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science* 30, 231-295 ,2004.
- [12] Quoilin. S, Les Centrales Solaires à Concentration. Université de Liège ,2007.
- [13] Zhiyong. Wu,Shidong. Li, Guofeng.Yuan, Dongqiang. Lei, Zhifeng. Wang, Threedimensional numerical study of heat transfer characteristics of parabolic trough receiver ,2014.
- [14] U.H.Kurzweg ,J.P.Benson ,'Iso-Intensity absorber Configurations For parabolic Concentrators , *Solar energy* .Vol.29,No.2,pp167-174,1982.
- [15] Duffie. J. A, Beckman W. A, 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd ed.Madison: JohnWiley & Sons. New York ,1991.
- [16] Marif.Y, Benmoussa. H, Bouguettaia. H, Belhadj. M. M, Zerrouki. M, Numerical simulation of solar parabolic trough collector performance in the Algeria Saharanregion. *Energy Conversion and Management* 85, 521–529 ,2014.

Références bibliographique

[17] Y. Demagh et al. / Solar Energy 122 (2015) 873–884

[18] Z. Wu et al. / Applied Energy 123 (2014) 232–241

[19] group 650 third avenue, New York, N.Y. 101508-0012 “The finite element method for engineers 624.17/38”.

[20] Projets de fin d'étude « numérique d'un nouvel absorbeur de forme sinusoidale application: les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques »2015.

[21] SYLTHERM 800 heat transfer fluid : product technical data ; 2012.

<http://www.dow.com/heattrans/products/synthetic/sytherm.htm>.

[22] Projets de fin d'études –Master 2 – Énergétique « Étude numérique comparative des performances thermiques des absorbeurs de forme courbées sinusoïdales et de formes courbées en C. application :les capteurs solaire cylindro-paraboliques 2016.