

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

PAR :

MILLA MOURAD

Thème

**Modélisation par éléments finis du comportement au fluage de
filaments de tungstène simplement spiralés**

Le jury composé de :

Dr. S. BOUZIDI

Présidente

Dr. O. Slimi

Examinatrice

Dr. N. BENGHANEM

Encadreur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2020-2021

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. N. BENGHANEM, je la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Mon remerciement s'adresse à Me BECHEUR pour son aide pratique et son soutien moral et son encouragement.

Mon remerciement également à tous mes professeurs pour leurs soutiens et leurs patiences.

J'associe à ces remerciements l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté de faire partie de mon jury de mémoire.

Enfin, je dédie ce travail à mes parents, mon frère, mes sœurs et toute ma famille ainsi que mes amis spécialement CHAIB SOFIANE et amies qui m'ont donné l'envie et la motivation pour mener ce travail.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I	
I.1- Introduction	2
I.2- Propriétés physiques du tungstène	3
I.3- Propriétés mécaniques du tungstène	4
I.4- Le Filament de Tungstène	5
I.5- La microstructure des filaments	7
I.6- Conclusion	8
Chapitre II	
II.1- Quelques rappels de la résistance des matériaux	9
II.2- La méthode des éléments finis : Une brève présentation	12
II.3 Le fluage	15
II.4 Mécanismes de fluage.....	16
Chapitre III	
III.1- Introduction	17
III.2- Etude analytique	17
III.3- Conclusion	18
Chapitre IV	
IV.1- Introduction	20
IV.2- Etude numérique en comportement élastique linéaire	20
IV.3- Etude numérique du comportement des filaments SS au fluage	31
IV.4. Evolution des champs de déformations équivalentes en fonction du temps de fluage.....	31
IV.5. Evolution des champs de contraintes Equ de V.M en fonction du temps de fluage.....	35
IV.6. Etude de l'influence de la position du filament sur le comportement au fluage.....	39
Conclusion générale	41

INTRODUCTION GENERALE

Il est bien connu que tous les matériaux se différencient selon leurs propriétés. Ce qui implique la bonne ou la mauvaise qualité du produit. La compétitivité de ce dernier est souvent liée à la maîtrise de sa qualité.

Par ailleurs, le choix du matériau dépend directement de son domaine d'application. En effet, pour le domaine de l'industrie de l'éclairage, le filament de tungstène est utilisé car ses caractéristiques vérifient à la fois les conditions de résistance, de stabilité et de bonne tenue en fonctionnement y compris les états de températures les plus élevées.

L'objectif de ce travail est de modéliser par éléments finis le comportement au fluage de filaments de tungstène simplement spiralés. Il est organisé en quatre chapitres.

Dans le premier, nous nous intéresserons à présenter les propriétés physiques et mécaniques du tungstène ainsi que celles du filament utilisé au sein des lampes, et ce, de sa fabrication à sa mise en œuvre.

Le second sera consacré aux rappels des aspects théoriques liés au thème de ce mémoire. A cet effet, quelques rappels de la résistance des matériaux seront d'abord présentés où l'accent sera mis davantage sur l'analyse du comportement mécanique des ressorts hélicoïdaux ainsi que leurs modes de sollicitation les plus prépondérants. Ceci sera suivi d'une brève présentation de la méthode des éléments finis ainsi que des propriétés des éléments qui seront utilisés dans nos simulations numériques. Il s'agira en l'occurrence des éléments poutres de Timoshenko ainsi que des éléments de volume. Par ailleurs, vue l'importance du fluage à haute température dans le comportement mécanique des filaments de tungstène, des notions théoriques liées à ce phénomène ainsi qu'à ses mécanismes, seront présentés en fin de ce chapitre.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude analytique des systèmes simplement spiralés. Cette étude sera basée sur la théorie de la résistance des matériaux. Elle se limitera uniquement au domaine du comportement élastique en petites déformations.

Quant au quatrième chapitre, celui-ci fera l'objet d'une étude en simulation numérique des comportements mécaniques de ce type de filament. Il sera composé de deux parties. La première concernera le comportement élastique linéaire soumis à la fois aux actions gravitaires (le poids propre seul) et à celles de la variation de la température. Pour la seconde partie, celle-ci traitera la modélisation numérique du comportement au fluage du filament soumis aux mêmes actions que celles citées précédemment. Ces différentes simulations numériques seront réalisées grâce à l'utilisation du logiciel COMSOL.

Enfin, une conclusion générale résumant l'ensemble des principaux résultats obtenus sera présentée.

Chapitre -I-

Le filament du tungstène **Du matériau à la mise en forme**

Chapitre I

I.1- Introduction

Le tungstène est un composé naturel rare et peu abondant dans l'écorce terrestre, mais on peut cependant trouver des gisements où la concentration en tungstène varie de 0,1 à 0,2 % en moyenne et dont la formation s'explique par un modèle magmatique hydrothermique. Il se trouve sous forme particulière dans l'air et sous forme ionique dans le sol et l'eau. Il porte le symbole W et le numéro atomique est 74 du tableau périodique de Mendeleïev ([5]).

Le tungstène est utilisé partout où des températures élevées sont nécessaires. En effet, il possède la température de fusion la plus élevée de tous les métaux. Située aux environs de 3683K, sa température d'utilisation fait également partie de celles qui sont les plus élevées. Etant également un bon conducteur de chaleur et d'électricité et d'une densité assez élevée, il est également assez dur et se déforme très peu sous effort mécanique (à froid comme à chaud). Son coefficient de dilatation thermique étant le plus faible parmi les métaux, est très proche que celui du verre. C'est pour cette raison qu'il est utilisé pour des liaisons avec ce matériau (passages de fils d'ampoules) dans une lampe électrique.

A cela s'ajoute trois autres avantages d'importance majeure :

- Un taux d'évaporation faible par rapport aux autres matériaux
- Un spectre d'émission important dans le domaine du visible
- Et une rigidité thermomécanique à haute température (caractère non fléchissant)

Par ailleurs, le tungstène est utilisé comme élément d'ajout pour ses qualités afin d'augmenter la dureté, l'élasticité et la résistance à la traction de l'acier. Toutefois, le domaine d'application majeur du tungstène est celui réservé aux pièces de petites dimensions à savoir : les filaments de lampes à incandescence). Dans ce cadre, Coolidge (1910) a développé un procédé de fabrication du fil de tungstène non seulement ductile mais capable d'être enroulé sans risque de rupture ([4]).

Cela étant dit, ce matériau peut être utilisé à la fois comme source de chaleur, et également comme source d'émission du rayonnement lumineux, sous la forme de filament de lampe à incandescence lorsqu'il est parcouru par un courant électrique et chauffé par effet Joule

Dans ce qui suit, les propriétés du tungstène (physiques et mécaniques), du filament utilisé au sein des lampes, ainsi que de sa microstructure, feront l'objet d'une brève présentation. A la fin, on termine ce chapitre avec une conclusion.

I.2- Propriétés physiques du tungstène

On peut citer parmi les propriétés les plus importantes du tungstène : les propriétés cristallographiques, thermiques et électriques.

I.2.1- Propriétés cristallographiques

Trois modifications (α -W, β -W et γ -W) sont connues pour le tungstène amorphe. Les caractéristiques cristallographiques sont données dans le tableau (I-2).

Le tungstène cristallise essentiellement sous forme α dans le système cubique centré, la forme α -W est la seule modification stable. β -W est une phase métastable, qui cristallise dans un cubique à faces centrées, se transformant en α -W par chauffage au-dessus de 600 à 700 °C, qui a été caractérisée au début comme étant le sous oxyde W₃O. Le γ -W n'a été décelé que dans les films minces obtenus par pulvérisation cathodique ou dans le tungstène amorphe, il se transforme en α -W au-dessus de 700 °C ([5]).

Les caractéristiques principales de l'atome sont regroupées dans les tableaux (I-1) et (I-2).

Numéro atomique	Rayon atomique (nm)	Masse atomique (g)
74	0.136475	183.854

Tableau I-1 : Caractéristiques atomiques ([4]).

Modification	α -W	β -W	γ -W
Type	A2	A15 (Cr ₃ Si)	A1
Groupe d'espace	O _h ⁹ - I m 3 m	O _h ³ - P m 3 n	
Distance interatomique la plus courte..... (nm)	0,2 741	2,5 2 ₅ et 0,282 ₆	
Paramètre de réseau à 25 °C (nm)	0,316524 ± 0,000004	0,505 (0,5037 à 0,509) selon la méthode de préparation	0,413
Masse volumique calculée (g.cm ³)	19,246	18,9	15,8
Masse volumique par pycnométrie (g.cm ³)	19,250	19,1	
Volume molaire (cm ³)	9,53		

Tableau I-2 : Propriétés cristallographiques (Ingénieur, [5])

I.2.2- Propriétés thermiques

Le tungstène pur possède le point de fusion le plus élevé de tous les métaux, il fond vers 3683 ± 20 K. Le coefficient de dilatation α varie de 4 à $7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ entre 300 et 2300 K. Ce coefficient est l'un des plus faibles parmi les métaux ([4]).

I.2.3- Propriétés électriques

Selon plusieurs auteurs, la résistivité électrique peut être calculée à partir de plusieurs équations. Elle est évidemment influencée par toutes sortes de défauts de réseaux (lacunes, dislocations, joints de grains...) et par les impuretés. Il est important de noter que la résistivité électrique croît avec la température (figure I-1).

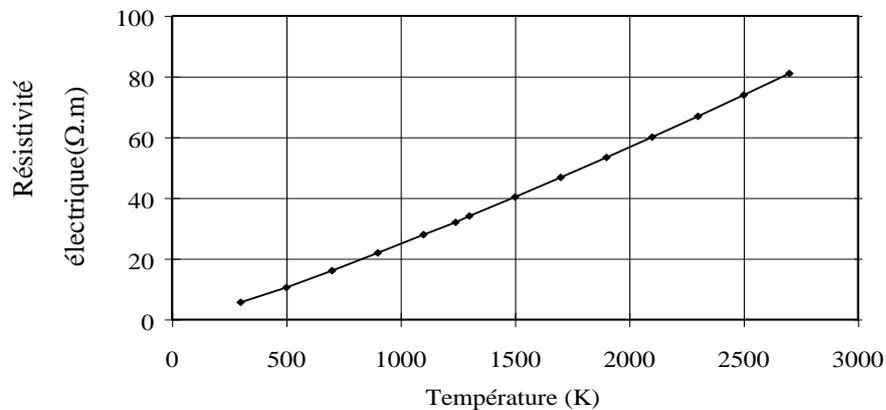


Figure I-1 : Résistivité électrique en fonction de la température ([4])

I.3- Propriétés mécaniques du tungstène

Le tungstène est l'un des métaux présentant le plus fort module d'Young. Il diminue quand la température augmente (figure I-2). Son expression en fonction de la température est :

$$E = 4,1027 * 10^5 - 3,489 * 10 T - 7,55 * 10^{-3} T^2$$

La courbe de la figure (I-3) représente l'évolution de la limite d'élasticité du tungstène en fonction de la température. Elle diminue rapidement avec la température jusqu'à 600K . Ensuite, elle varie peu jusqu'à 1400K puis décroît à nouveau rapidement.

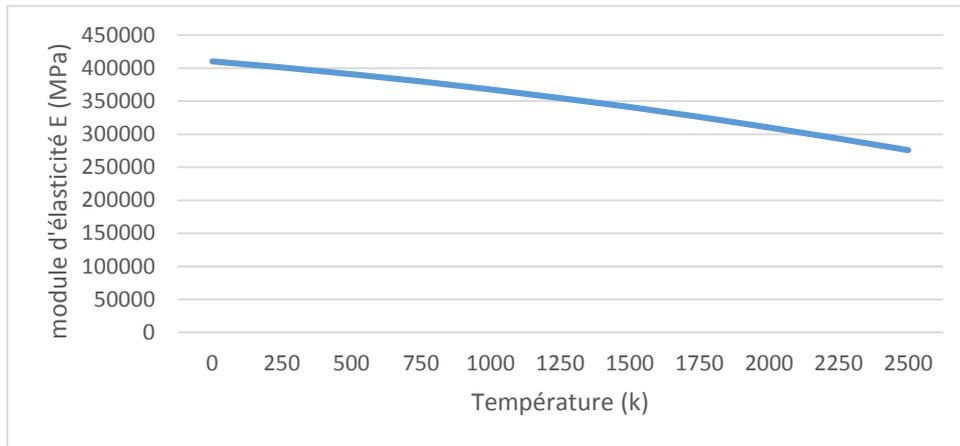


Figure I-2 : Module de Young en fonction de la température

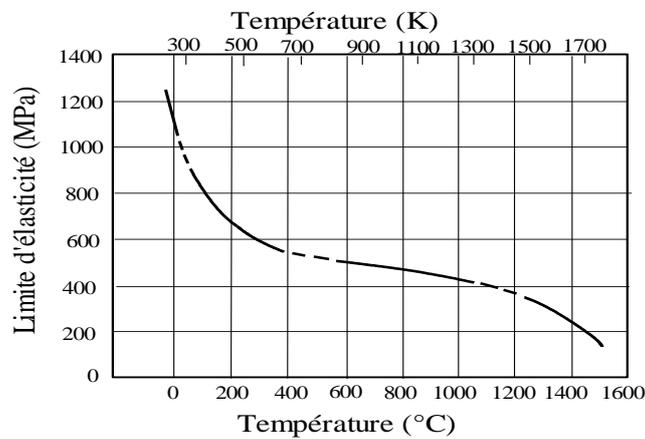


Figure I-3 : Limite d'élasticité conventionnelle à 0.2% en fonction de la température.

Sous forme cristallisée, le tungstène est fragile à température ambiante. Il existe une température de transition fragile/ductile comme pour les métaux de structure cubique centrée : celle-ci varie de 200 à 400°C (soit de 473 à 673 K) ([4]) ([5])

I.4- Le Filament de Tungstène

I.4.1- Procédé de fabrication

Le tungstène, de symbole chimique W, est un métal rare. Les sels minéraux exploitables sont la scheelite CaWO_4 et la wolframite $(\text{Fe}, \text{Mn}) \text{WO}_4$ [2] [3].

Les filaments des lampes à incandescence sont fabriqués en tungstène. Celui-ci est obtenu après plusieurs traitements.

I.4.1.1- Fabrication de la poudre de Tungstène

La poudre de tungstène est extraite principalement à partir de la Wolframite par trois étapes du traitement chimique standardisées depuis plusieurs années :

- L'hydrométallurgie ou la poudre de tungstène est cristallisée en APT (Ammonium Para Tungstène).
- Réduction par calcination, l'APT est transformé en oxyde de tungstène bleu (TBO) dont la pureté est de 99,9%.
- réduction du TBO en poudre de tungstène fine ($< 5\mu\text{m}$ de diamètre).

En réalité, afin de d'optimiser les propriétés mécaniques du tungstène lors du fonctionnement de la lampe, la poudre est souvent dopée à base de potassium, aluminium et la silice (Al-Si-K), Pacz (1922) ([4]).

I.4.1.2- Fabrication du filament

Le fil de tungstène est créé à partir de la poudre de tungstène par frittage. Compressé en un barreau puis chauffée, celui-ci est soumis à un martelage mécanique qui permet de l'arrondir et de l'allonger progressivement. La tige ainsi fabriquée est ensuite tréfilée jusqu'au diamètre souhaité pour le filament ([4]).

I.4.2- Procédé de mise en forme du filament

Selon le type de lampe dans lequel le filament sera inséré, le spiralage de ce dernier (le filament) est de trois types différents : simple, double ou triple. Il est indispensable d'éliminer les tensions introduites lors de cette étape. Sous atmosphère réduite, les filaments sont soumis à un traitement de 1873 K pendant 10 minutes ([4]).

Le filament est horizontal au moment d'être placé à l'intérieur de la lampe, son poids est compensé par la force de LORENTZ résultante du champ magnétique si bien qu'aucune déformation plastique ne se produit pendant la recristallisation par allumage de la lampe.

I.4.2.1- Filament Simplement spiralé SS

Après les travaux de Coolidge (1910) sur la fabrication d'un fil de tungstène ductile, Langmuir (1911) fut le premier qui confectionna le filament simplement spiralé. Un fil rectiligne de diamètre d est enroulé autour du mandrin de diamètre M_1 . Le filament simplement

spirale ainsi obtenu, aura un diamètre extérieur D_1 et un pas S_1 (figure I.4). Il est également caractérisé par deux paramètres principaux :

- Le rapport des pas : $P_1 = (S_1 / d)$
- Le rapport des mandrins : $Y_1 = (M_1/d)$

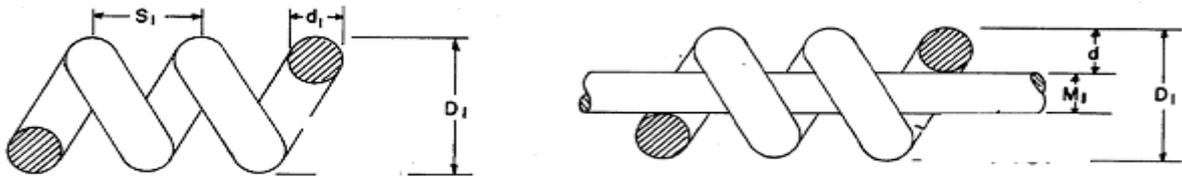


Figure I-4 : : Enroulement du filament simplement spiralé ([4])

I.5- La microstructure des filaments

Après recristallisation, le tungstène pur présente une forme dite bambou (figure I-5 a). En effet, celle-ci est formée de grains occupant toute la section du filament. Ces grains sont séparés par des joints plans perpendiculaires à l'axe. Cette structure est peu résistante au fluage car à haute température, les grains glissent au niveau des joints de grains et provoquent l'affaissement du filament. C'est ce qu'on cherche à éviter.

La figure (I-5 b) représente la structure préférée, ces joints sont fortement inclinés sur l'axe et présentent une surface rugueuse, résistante au glissement relatif des grains, elle est obtenue grâce au dopage au potassium

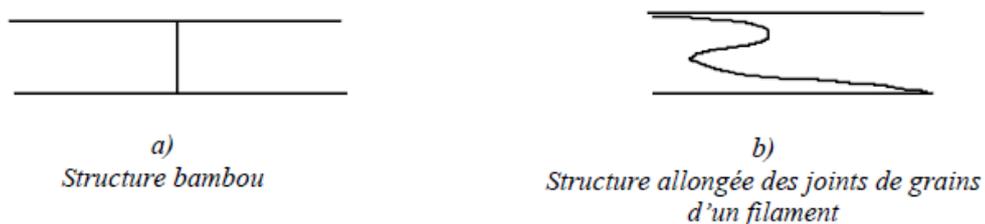


Figure I-5 : Structures possibles d'un filament de faible diamètre ([4])

I.6- Conclusion

Le tungstène présente des propriétés physiques et mécanique remarquables, et ayant un très haut point de fusion (3683K).

La rupture par fluage, dépend principalement de la qualité du filament. A haute température, une structure dite bambou est constituée de grains occupant toute la section du fil et dont les joints sont perpendiculaires à son axe. Le filament présente une faible résistante au fluage. Par ailleurs, une structure à joints inclinés et ondulés et occupant plusieurs spires présente une meilleure résistante au phénomène d'affaissement. Cette amélioration est obtenue grâce au dopage au potassium.

Ainsi il en ressort que le comportement du filament du tungstène dépend en premier lieu, de sa technique d'élaboration, et en second du traitement de recristallisation utilisé.

Chapitre -II-

Aspects théoriques

Chapitre II

II.1- Quelques rappels de la résistance des matériaux

II.1.1- Cas de la torsion d'un arbre circulaire

Soit un arbre circulaire soumis à un couple de torsion appliqué à son extrémité inférieure et encastré à son extrémité supérieure (fig. II-1). Pour un angle de torsion petit, d'après les mesures effectuées sur la surface, on suppose que les sections circulaires de l'arbre restent circulaires pendant la torsion, et que leurs diamètres ne varient pas ainsi les distances qui les séparent.

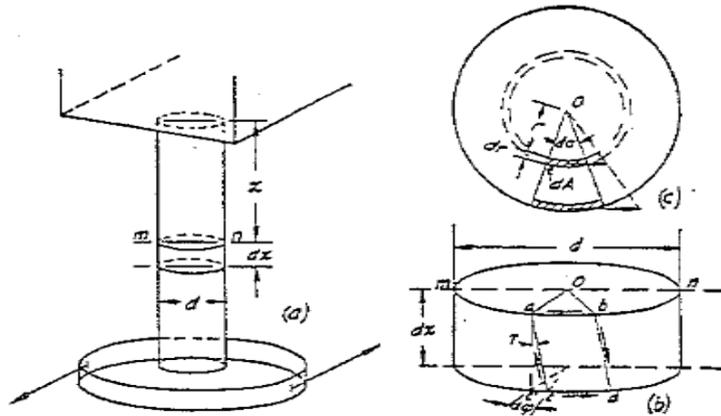


Figure II-1 : Arbre soumis à un couple de torsion (Timoshenko)

Considérant le disque isolé de la figure (II-1(b)) en état de cisaillement pur (un élément rectangulaire abcd de la surface latérale du disque se déforme comme l'indique la figure (II-1(b)) et l'on détermine la valeur de la déviation γ par le petit triangle cac' :

$$\gamma = \frac{c'c}{ac'} \quad (1)$$

Avec (c'c) est l'arc de rayon $d/2$ correspondant à la différence $d\phi$ des angles de rotation de deux section voisines, $c'c=(d/2)d\phi$ et l'on obtient

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dx} d. \quad (2)$$

Nous désignerons le rapport $\frac{d\phi}{dx}$ par θ , l'angle de torsion par unité de longueur de l'arbre.

L'équation (b) s'écrit donc
$$\gamma = \frac{1}{2} \theta d \quad (3)$$

La valeur de chacune des contraintes de cisaillement s'exerçant sur les côtés de l'élément est :

$$\tau = G.\gamma = \frac{1}{2}G\theta d \quad (4)$$

Pour chaque élément de la surface de l'arbre, nous avons déterminé complètement leur état de contrainte.

Pendant la rotation, on suppose que les contours circulaires des sections ne se déforment pas ainsi que les sections elles-mêmes qui restent planes pour un élément pris dans la masse de l'arbre. Dans ces conditions, l'étude relative à l'élément abcd sur la surface de l'arbre reste également valable pour un élément analogue appartenant à la surface d'un cylindre intérieur dont le rayon r remplace $d/2$. L'épaisseur dr de l'élément, dans la direction radiale est considérée comme très faible. De tels éléments sont aussi à l'état de cisaillement pur et la contrainte de cisaillement sur leurs côtés est :

$$\tau = Gr\theta \quad (5)$$

D'après les conditions d'équilibre de la partie de l'arbre compris entre l'extrémité inférieure et la section mn , les contraintes de cisaillement réparties sur la section sont statiquement équivalentes à un couple égale et opposé au couple de torsion M_t , c'est-à-dire

$$M_t = \int_A \tau.r.dA = \int_A G\theta r^2 dA = G\theta \int_A r^2 dA = G\theta I_p \quad (6)$$

Où I_p est le moment d'inertie polaire de la section circulaire.

Pour un cercle plein de diamètre d nous avons $I_p = \pi d^4/32$ et donc :

$$M_t = G\theta \frac{\pi d^4}{32} \quad (7)$$

$$\text{et } \theta = \frac{M_t}{G} \frac{32}{\pi d^4} = \frac{M_t}{GI_p} \quad (8)$$

Pour un arbre de longueur l , l'angle totale de torsion est :

$$\varphi = \theta l = \frac{M_t \cdot l}{G I_p} \quad (9)$$

Portons la valeur de θ , tirée de (8) dans l'équation (4), nous obtenons une équation permettant de calculer la contrainte de cisaillement maximum en torsion d'un arbre circulaire :

$$\tau_{max} = \frac{M_t d}{2 I_p} = \frac{16 M_t}{\pi d^3} \quad (10)$$

II.1.2- Cas du ressort hélicoïdal

Soit un ressort hélicoïdal de section circulaire soumis à l'action d'effort axiaux P (figure II-2). Considérons l'équilibre de la partie supérieure du ressort limitée par une section axiale mn (figure II-2 b). D'après les équations de la statique, on conclut que les contraintes sur une section mn de la spire se réduisent à un couple s'exerçant, en sens inverse des aiguilles d'une montre dans le plan de la section. Le produit $(P.R)$ est la valeur du couple avec R représentant le rayon de la spire.

D'après (10), le couple $(P.R)$ tord la spire et provoque une contrainte de cisaillement max égale à :

$$\tau_1 = \frac{16 PR}{\pi d^3} \quad (11)$$

Où d est le diamètre de la section mn de la spire. A cette contrainte, due à la torsion, se superpose la contrainte due à l'effort tranchant P . On suppose que cet effort tranchant est réparti uniformément sur la section. La contrainte de cisaillement correspondante est :

$$\tau_2 = \frac{P}{A} = \frac{4 P}{\pi d^2} \quad (12)$$

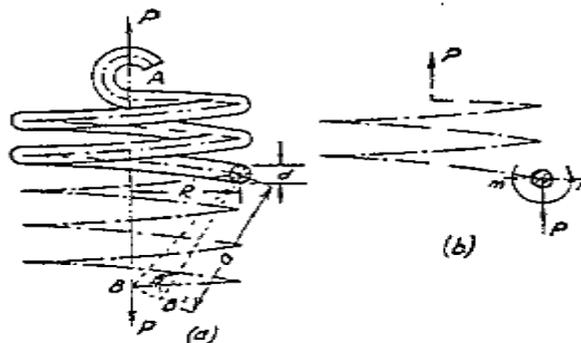


Figure II-2 : ressort hélicoïdal (Timoshenko)

Au point m (figure II-2 b) les directions de τ_1 et τ_2 coïncident, si bien que la contrainte de cisaillement maximum s'y développe et a pour valeur :

$$\tau_{max} = \tau_1 + \tau_2 = \frac{16PR}{\pi d^3} \left(1 + \frac{d}{4R}\right) \quad (13)$$

Les points tels que m , situés sur les génératrices intérieures de la spire sont plus sollicités que les points tels que n situés sur la génératrice extérieure. Ce qui permet de prévoir que les fissures prennent naissance sur les génératrices intérieures des spires.

II.2- La méthode des éléments finis : Une brève présentation

II.2.1- Introduction

Le développement d'un modèle mathématique aussi fiable que possible permet d'analyser des phénomènes naturels en général ou des problèmes d'ingénierie en particulier. Il s'appuie généralement sur plusieurs hypothèses simplificatrices pour arriver à des équations gouvernantes qui sont souvent des équations aux dérivées partielles EDP auxquelles sont ajoutées des conditions aux limites.

L'avancement enregistré dans le domaine informatique a permis de résoudre des systèmes très complexes. Plusieurs techniques de résolution numérique ont été développées. Parmi elles, la méthode des éléments finis.

Tout en se rapprochant du comportement réel, cette méthode offre la possibilité de résoudre un grand nombre de problèmes d'ingénierie et de conception avec un minimum d'hypothèses simplificatrices. Son principe consiste à subdiviser le domaine physique à traiter en plusieurs sous domaines appelés éléments finis à dimensions non infinitésimales. L'ensemble total de ces éléments finis constitue le maillage du domaine à étudier. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément du maillage par des valeurs calculées et portée par les sommets de ces éléments appelés nœuds. Le calcul de la solution à l'intérieur de ces éléments se fait grâce à des fonctions polynomiales simples dites d'interpolation. Il s'agit d'une opération appelée discrétisation où le domaine continu est remplacé par un maillage d'éléments finis connectés entre eux par des nœuds et où les EDP du modèle mathématique continu sont remplacées par un système d'équations algébriques écrites au niveau des nœuds du maillage. ([2]) ([3]).

Dans le cas des problèmes mécaniques, la solution recherchée consiste à trouver dans l'ordre les valeurs des composantes des champs de déplacements, des composantes des champs de déformations et enfin des composantes des champs de contraintes.

II.2.2- Elément poutre

II.2.2.1- Généralités

L'élément poutre en RDM est la structure dont les dimensions transversales sont petites par rapport à sa longueur. Elle est souvent utilisée en construction mécanique. Elle est susceptible de reprendre les efforts et les moments dans toutes les directions. Ce qui la différencie de la barre qui ne travaille qu'en traction-compression selon son axe longitudinal ([3]).

II.2.2.2- Élément fini de poutre de Timoshenko

La théorie de Timoshenko traduit bien le comportement d'une poutre. La déformation des sections droites dues à l'effort tranchant est prise en compte contrairement à la théorie de Euler Bernoulli. Toutes les translations et les rotations des sections extrêmes sont prises en compte dans l'expression de l'énergie de déformation, l'effort tranchant appliqué aux nœuds intervient explicitement par le cisaillement γ qui en résulte [3].

$$U = \frac{1}{2} \left[\int_L EA \varepsilon_{xx}^2 dx + \int_L EI \chi^2 dx + \int_L GA^* \gamma^2 dx \right] \quad (14)$$

avec χ : l'angle de rotation de la section due à l'application d'un moment de flexion

γ : l'angle de distorsion dû à l'effort tranchant et au moment de torsion

Et ε_{xx} la déformation le long de l'axe longitudinal due à l'effort normal

Par ailleurs, il y a lieu de noter que chaque élément poutre possède au minimum deux nœuds dont les degrés de libertés dans le cas tridimensionnel 3D sont au nombre de six (trois translations et trois rotations). Ces trois rotations et ces trois translations représentent les composantes du champ de déplacements à calculer.

II.2.3- Élément fini volumique

II.2.3.1- Généralités

Un élément fini de volume est un élément à définition volumique, dont la géométrie tridimensionnelle est explicitement décrite. On l'utilise pour la modélisation des pièces massives où les résultats souhaités ne permettent pas l'utilisation d'autres éléments. C'est le cas de l'élasticité tridimensionnelle.

II.2.3.2- l'élément fini volumique

Il en existe de plusieurs formes : hexaèdres, prismes et tétraèdres (Figure II-3).

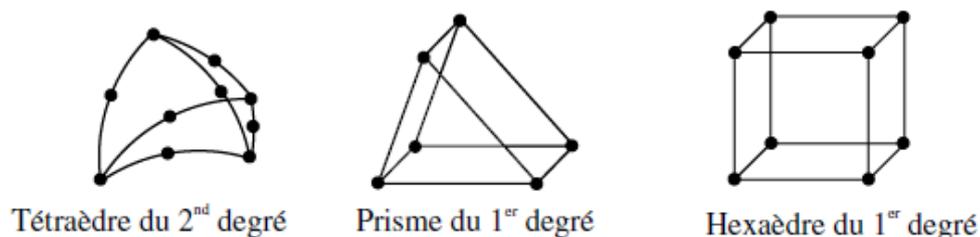


Figure II-3 : Les formes d'élément de volume (*Jean-Charles Craveur, août 2008*)

Chaque nœud d'un élément volumique possède trois degrés de liberté de translation dans les trois directions de l'espace sans aucuns degrés de liberté de rotation définis. Quand la génération de ces éléments peut se faire par extrusion globale ou locale à partir d'une géométrie surfacique, les éléments sont des prismes, issus de triangles ou des hexaèdres issus des quadrangles. Dans le cas de pièces pour lesquelles l'extrusion n'est pas possible, il existe deux techniques de maillage automatique : le maillage réglé 3D ou le maillage libre 3D ([3]).

Pour un problème d'élasticité linéaire, il faut obligatoirement introduire les données caractérisant le matériau utilisé telle que : le module d'Young et le coefficient de Poisson. Le volume de l'élément étant explicitement décrit, il n'y a aucune caractéristique physique à lui affecter (section, inertie, épaisseur...). Concernant le traitement et l'analyse des résultats obtenus suite aux calculs effectués, outre les déplacements et les réactions exprimés dans le repère structural, les tenseurs des contraintes sont généralement fournis aux points de Gauss de chaque élément finis. Ces points de Gauss sont également appelés points d'intégration. ([3]).

II.3 Le fluage

II.3.1- Introduction

Un matériau soumis à une charge constante présente une déformation plastique évoluant avec le temps, pouvant conduire à sa rupture, bien que cette charge soit inférieure à la charge limite élastique. Ce phénomène est appelé fluage.

Les essais de fluage ont pour but de caractériser le comportement mécanique des métaux aux températures élevées ($1/4 T_f$) où les métaux commencent à fluer. Ils consistent à mesurer la déformation des pièces en fonction du temps et analysent schématiquement l'instabilité statique des dimensions à chaud sous l'effet des efforts appliqués.

La réponse expérimentale de la plupart des métaux comporte trois domaines de fluage selon la rupture, représentés sur la figure (II-4) :

1. Domaine de fluage primaire.
2. Domaine de fluage secondaire.
3. Domaine de fluage tertiaire.

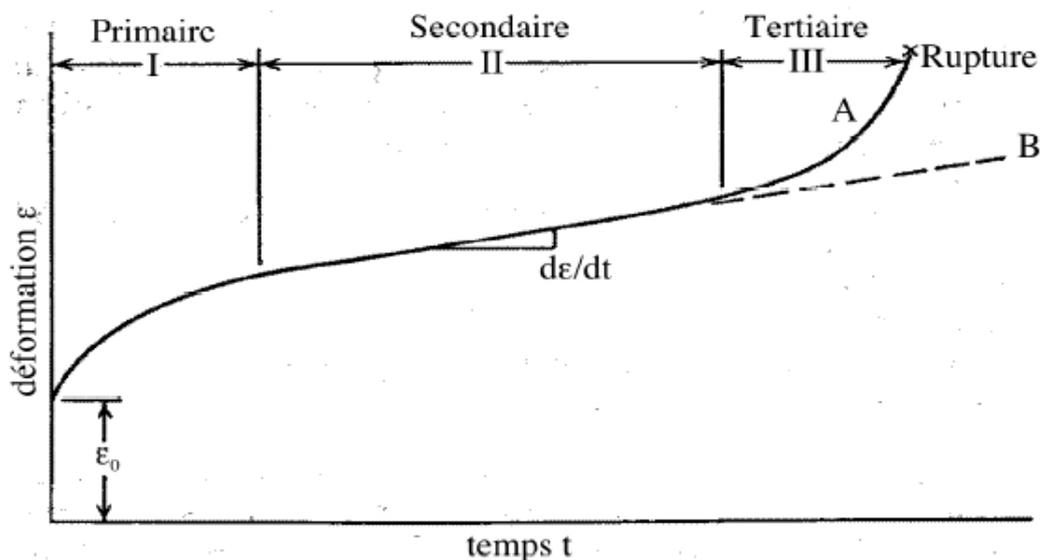


Figure (II-4) courbe de comportement au fluage

II.3.1- Le fluage primaire

La première partie de la courbe correspond à une décroissance de la vitesse de déformation avec le temps. Ce premier stade du fluage est appelé fluage primaire, ou fluage

transitoire. A basse température et basse contrainte, comme dans le fluage du plomb à température ambiante, le fluage primaire est le régime de fluage prédominant.

II.3.2- Le fluage secondaire

Le deuxième stade du fluage est nommé fluage secondaire ou fluage stationnaire (en fait « en régime stationnaire »). Il se caractérise par une vitesse de déformation constante. Cette vitesse de déformation est appelée vitesse de déformation minimale et correspond au paramètre de dimensionnement le plus important que l'on puisse tirer de la courbe de fluage.

II.3.3- Le fluage tertiaire

Le troisième stade du fluage est nommé fluage tertiaire. Il apparaît essentiellement dans les essais menés sous charge constante, à haute température et forte contrainte lorsque la réduction de la section de l'éprouvette devient effective, soit lors de l'apparition d'une striction, soit à cause de la formation de vides internes à l'éprouvette. Ce troisième stade du fluage est souvent associé à des modifications métallurgiques comme le grossissement des précipités, la recristallisation.

II.4 Mécanismes de fluage

À haute température, il y a deux mécanismes de fluage, le premier est le fluage par dislocations donnant un comportement en loi puissance, et le second est le fluage par diffusion contrôlé par le déplacement de matière. Il est assuré par la diffusion intra-inter granulaire.

Ces mécanismes peuvent être regroupés sur une carte appelée carte de déformation.

Ashby [1972] a rassemblé les comportements mécaniques de nombreux matériaux sur une carte où il a porté en abscisse la température réduite (température divisée par la température de fusion T_m , exprimées en K) et en ordonnées une contrainte réduite (soit la contrainte de traction divisée par le module d'Young E , soit la contrainte de cisaillement par le module de Coulomb). La carte est divisée en domaines, et chacun domaine correspondant à un mécanisme de déformation le plus prépondérant.

Pour tracer la carte de déformation du matériau, Ashby a utilisé les lois descriptives des différents mécanismes. Il s'agit des lois générales, plus ou moins approchées, qu'il a appliquées à chaque matériau en donnant aux paramètres les valeurs correspondantes. Il a aussi utilisé les résultats expérimentaux de la littérature.

La figure II-5 représente une carte de déformation dans le cas général.

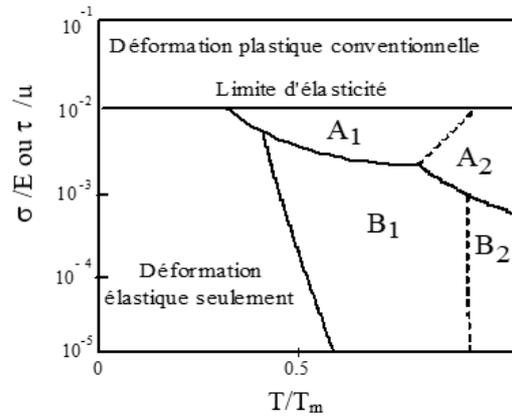


Figure II-5 : Carte générale de déformation ressort

Les zones A correspondent à du fluage par mouvement des dislocations :

- par diffusion le long des dislocations (A_1)
- par diffusion en volume (A_2)

Les zones B correspondent à du fluage par diffusion atomique :

- par diffusion aux joints de grains (B_1)
- par diffusion en volume (B_2).

Une fois la carte tracée, connaissant la contrainte et la température appliquées, on peut lire le mécanisme de déformation dominant et estimer l'existence des mécanismes secondaires.

Chapitre -III-

Etude analytique des systèmes simplement spiralés

Chapitre III

III.1- Introduction

L'étude théorique de ce système (simplement spiralé) peut être menée soit de façon analytique, soit de façon numérique.

La méthode analytique est basée sur la théorie de la résistance des matériaux (Timoshenko.1955), elle se limite uniquement au domaine du comportement élastique en petites déformations ce qui facilite les calculs. Par ailleurs, le comportement réel étant non linéaire, son étude s'avère complexe et difficile.

Nous choisissons pour les études (analytique et numérique) un filament de 5 spires de diamètre $D = 200 \mu\text{m}$, un pas de $100 \mu\text{m}$, avec un fil de diamètre $d = 80\mu\text{m}$ et une longueur total $L = 3181.13 \mu\text{m}$.

Les propriétés mécaniques utilisées dans les calculs sont celles du filament de tungstène utilisé au sein des lampes à incandescence. Un module de Young $E = 276000 \text{ MPa}$, une limite d'élasticité $f_y = 235 \text{ MPa}$, un poids spécifique $\gamma = 1.949 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^3$, un coefficient de poisson $\nu = 0.3281$ et un coefficient de dilatation thermique $\alpha = 8 \cdot 10^{-6}$ par $^\circ\text{C}$. Le chargement dû au gradient thermique correspond à une variation de température de $2300 \text{ }^\circ\text{C}$ pour une température initiale de référence de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Cette variation correspond à la température de fonctionnement d'une lampe à incandescence.

III.2- Etude analytique

On suppose que le filament se trouve au position verticale. En effet, le calcul analytique sera limité uniquement à cette position en raison de complexité des calculs relatifs à la position horizontale.

L'objectif de cette étude est de montrer la distribution des efforts internes dans les différentes sections transversales du filament. Avec les résultats obtenus, on va analyser et interpréter celles de l'étude numérique.

Le filament est soumis à une simple traction uni-axiale T appliquée à son extrémité inférieure. Cette force T remplace le poids propre du filament.

Considérons une section axiale mn (Figure II-2) de la spire. Les points tels que m et n sont situés respectivement sur la génératrice interne et externe.

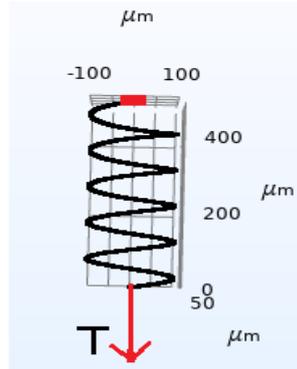


Figure III-1 : Filament SS soumis à une force axiale T.

➤ Calcul de T

$T = \gamma * A * L$; avec S est la surface de section du fil, $A = \frac{d^2 \pi}{4}$

$$T = 1.949 \cdot 10^{-3} * 5.03 \cdot 10^{-3} * 3181.13 \cdot 10^{-3}$$

$$T = 3.12 \cdot 10^{-5} \text{ N.}$$

De l'équation (13) :

- Au point m, la contrainte de cisaillement maximum a pour valeur :

$$\tau_{max}(m) = \tau_1 + \tau_2 = \frac{16TR}{\pi d^3} \left(1 + \frac{d}{4R}\right) = 2.49 \text{ N/m}^2 \quad (15)$$

- Au point n, la contrainte de cisaillement minimum a pour valeur :

$$\tau_{max}(n) = \tau_1 - \tau_2 = \frac{16TR}{\pi d^3} \left(1 - \frac{d}{4R}\right) = 1.98 \text{ N/m}^2 \quad (16)$$

$$\text{De (15) et (16)} \quad \rightarrow \quad \tau_{max}(m) \gg \tau_{max}(n)$$

III.3- Conclusion

D'après cette étude analytique, les résultats essentiels obtenus sont comme suite :

- La zone la plus sollicitée au niveau de la section droite du filament est le point extrême (m) porté par la génératrice intérieure du fil. En ce point, les contraintes de cisaillement dues au moment de torsion et à l'effort tranchant s'ajoutent tandis qu'elles se retranchent au niveau du point opposé (n) porté par la génératrice extérieure.

Le mode de sollicitation le plus dominant est le mode de torsion couplé au cisaillement dû à l'effort tranchant ([1]).

Chapitre -IV-

Etude numérique en comportements élastique et au fluage des filaments simplement spiralés

IV.1- Introduction

La modélisation numérique étant basée sur la méthode des éléments finis, ceci doit permettre de surpasser les difficultés liées à la modélisation géométrique et d'effectuer divers couplages physiques au niveau des calculs tels que : la thermo-élasticité, la thermo-plasticité, etc. Les différentes simulations numériques sont réalisées grâce à l'utilisation du logiciel COMSOL.

Dans le cadre de cette étude, on considère des filaments de même caractéristiques mécaniques que celles de l'étude analytique précédente. Ils seront étudiés sous trois cas de chargement différents. Le premier cas de chargement considère l'action du poids propre seul. Le second cas de chargement considère l'action de la variation de la température seule. Quant au troisième cas, il représente la combinaison des deux actions précédentes lorsqu'elles agissent simultanément.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'étude de ces filaments en comportement élastique linéaire. Dans un second temps, nous intéresserons à l'étude en comportement au fluage.

Par ailleurs, en vue de confirmer les résultats analytiques trouvés par Tomoshenko [1] et présentés dans le chapitre III précédent, l'analyse de la distribution des champs de contraintes en comportement élastique doit permettre de comparer les contraintes agissant sur les deux génératrices intérieure et extérieure du fil. Cela étant dit, nous intéresserons également à l'évolution de ces champs le long de ces génératrices en fonction du temps de fluage.

Par ailleurs, on doit rappeler que, lors de son utilisation, le filament de lampe peut se trouver en différents positions : soit verticale, soit horizontale ou inclinée. Pour la présente étude numérique, nous ne considérons que les deux principales à savoir : les positions verticale et horizontale.

IV.2- Etude numérique en comportement élastique linéaire

Pour l'étude de ce cas de comportement, les éléments finis utilisés seront de type poutres tridimensionnelles à deux nœuds et à six degrés de liberté par nœud. Ce modèle permettra d'obtenir et d'analyser directement les distributions (ou diagrammes) des efforts internes qui agissent dans chaque section transversale du filament. Ces efforts internes étant au nombre de six, ce sont les deux moments fléchissants par rapport aux deux axes principaux de la section transversale, le moment de torsion appliqué par rapport à l'axe longitudinal, l'effort normal longitudinal et enfin

les deux efforts tranchants. Par ailleurs il est important de rappeler que non seulement les éléments poutres de Timoshenko sont basés sur la théorie de la RDM et que pour une meilleure précision, le maillage utilisé doit être suffisamment fin. A cet effet, le maillage adopté pour les calculs est constitué de 4499 segments où chaque segment représente l'élément poutre en question

IV.2.1 Cas de la position verticale

Nous observons dans la figure (IV-1) fournie par le logiciel COMSOL que la déformée du filament encastré à ses deux extrémités sous les trois cas de chargement cités plus haut. La figure (IV-1 a) représente la déformée sous l'effet de l'action isolée du propre poids. Elle se fait naturellement selon l'axe vertical OZ. La déformée de la figure (IV-2 b) due à l'effet de température seule, consiste une dilatation dans le plan perpendiculaire à l'axe longitudinal. Quant à la déformée illustrée en figure (IV-2 c) et issue de simulation de l'action simultanée du poids propre et de la variation de température, celle-ci est quasiment identique à celle obtenue dans le cas de la température seule de la figure (IV-2 b). Ceci permet de constater que les effets de l'action du poids propre seul sont négligeables devant ceux de la variation de température.

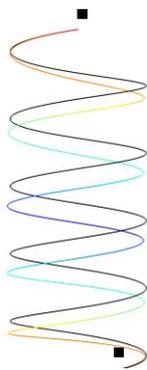


Fig IV-1a : action du poids propre seul



Fig IV-1b : action de la variation de température seule



Fig IV-1c : action simultanée du poids propre et de la variation de température

Figure (IV-1) : déformées du filament en position verticale et sous les différents cas de charges.

Afin de pouvoir comparer avec les résultats de l'étude analytique du chapitre III, considérons le cas le plus proche d'un filament soumis à son poids propre seul et encastré à son extrémité supérieure et libre à l'autre extrémité. Les résultats obtenus et illustrés par les courbes de la figure (IV-2) ci-dessous montrent que les intensités des moments de torsion sont sept fois plus importantes que les moments de flexion. Il y a donc une dominance de la torsion vis-à-vis de la flexion. Ce qui confirme le résultat analytique. On constate également que l'écart entre la torsion et la flexion augmente au fur et à mesure que l'on s'approche de l'extrémité encastrée.

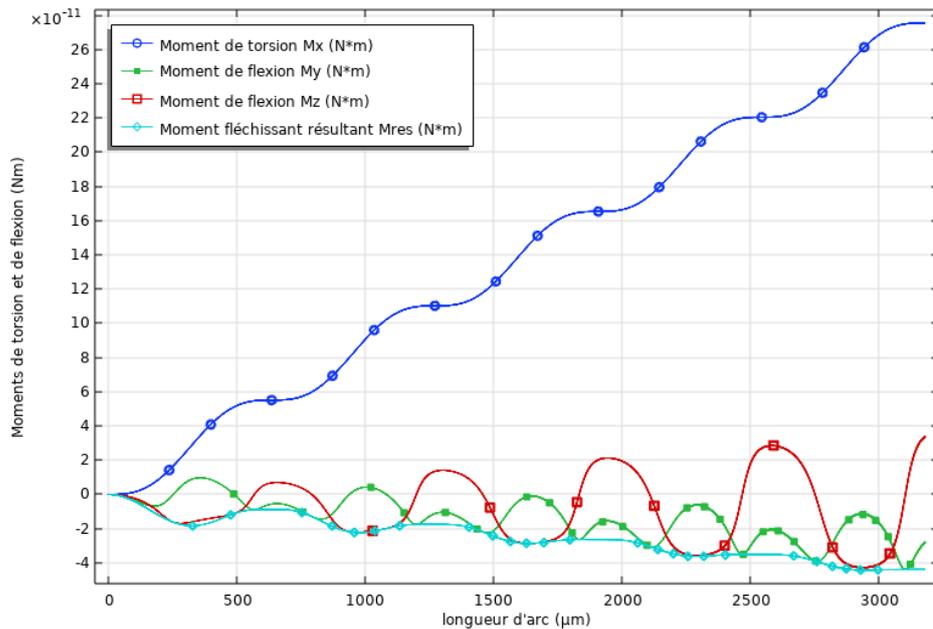


Figure (IV-2) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à l'extrémité supérieure et libre à l'autre extrémité en position verticale.

Pour le cas réel d'un filament monté dans une ampoule et encastré à ses deux extrémités, la distribution des moments de torsion et de flexion est illustrée en figure (IV-3). Sur cette figure on constate également la dominance de la torsion par rapport à la flexion notamment au voisinage des sections d'encastrement. Toutefois, on constate que tous les moments s'annulent au milieu filament.

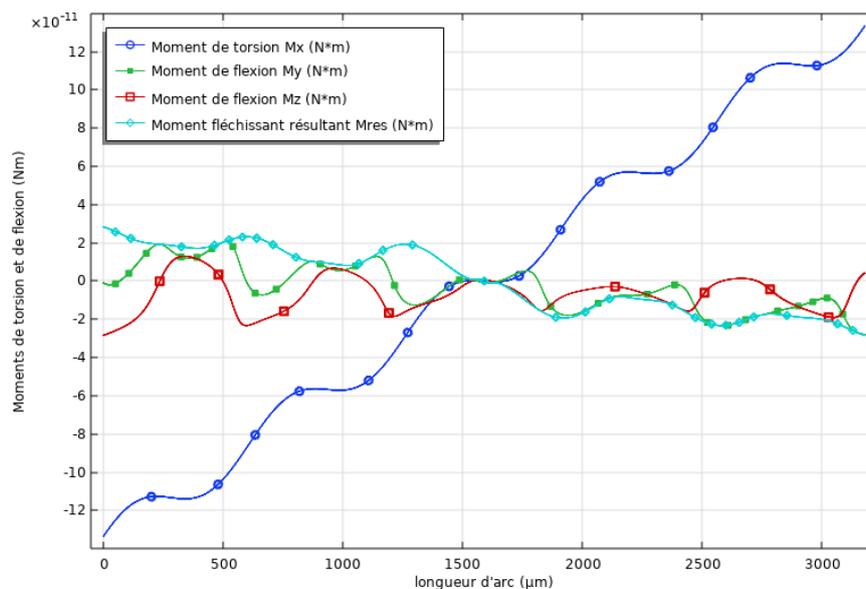


Figure (IV-3) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position verticale

Dans le cas de l'action de la variation de température seule, les courbes de moments de torsion et de flexion sont illustrées sur la figure (IV-4) ci-dessous où l'on peut relever que les intensités des moments de torsion sont environ quatre plus importants que les moments de flexion. On peut également remarquer que les ordres de grandeurs de ces moments sont compris entre 40.10^{-7} Nm et -98.10^{-7} Nm. Par contre, les ordres de grandeurs des moments sous l'effet du poids propre seul sont de l'ordre de 14.10^{-11} Nm. Ainsi, on voit bien que les effets dus à l'action du poids propre seul sont négligeables devant ceux de la variation de la température. Ce qui explique les résultats de la figure (IV-1) où l'on a constaté une nette domination de la déformée dues à la température devant celle du poids propre.

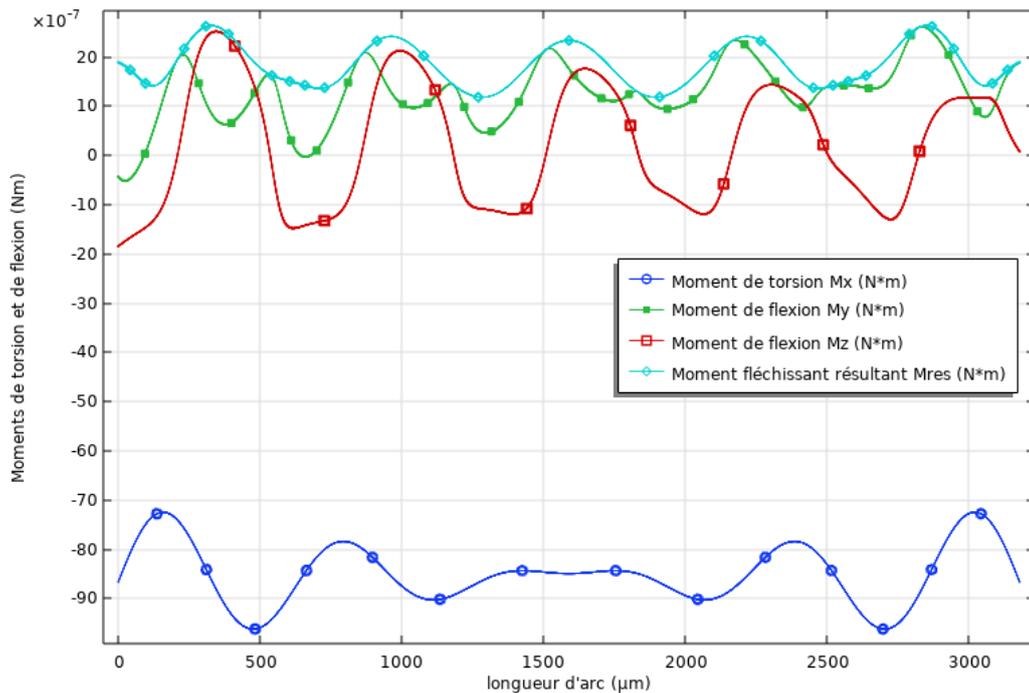


Figure (IV-4) : Distribution sous l'effet de la température seule des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position verticale

Par ailleurs, en ce qui concerne les distributions des efforts tranchants et normaux, elles sont représentées respectivement pour les cas des actions du poids propre seul et de la température seule sur les figures (IV-5) et (IV-6 ci-dessous. Sur la figure (IV-5) on voit bien que sous l'effet du poids propre seul, les intensités des efforts tranchants sont environ sept fois plus importantes que celles des efforts normaux. Cet écart augmente davantage au fur et à mesure que l'on s'approche des zones d'encastres. Toutefois, on doit signaler que sur la même figure (IV-5), que tous les efforts s'annulent au milieu du filament.

Par ailleurs, sous l'effet de la variation de la température, les intensités des efforts tranchants ont pour valeurs maximales avoisinant 9.10^{-2} N et sont quatre fois plus importants que les efforts normaux. Ce qui montre la domination des contraintes de cisaillement par rapport aux contraintes normales.

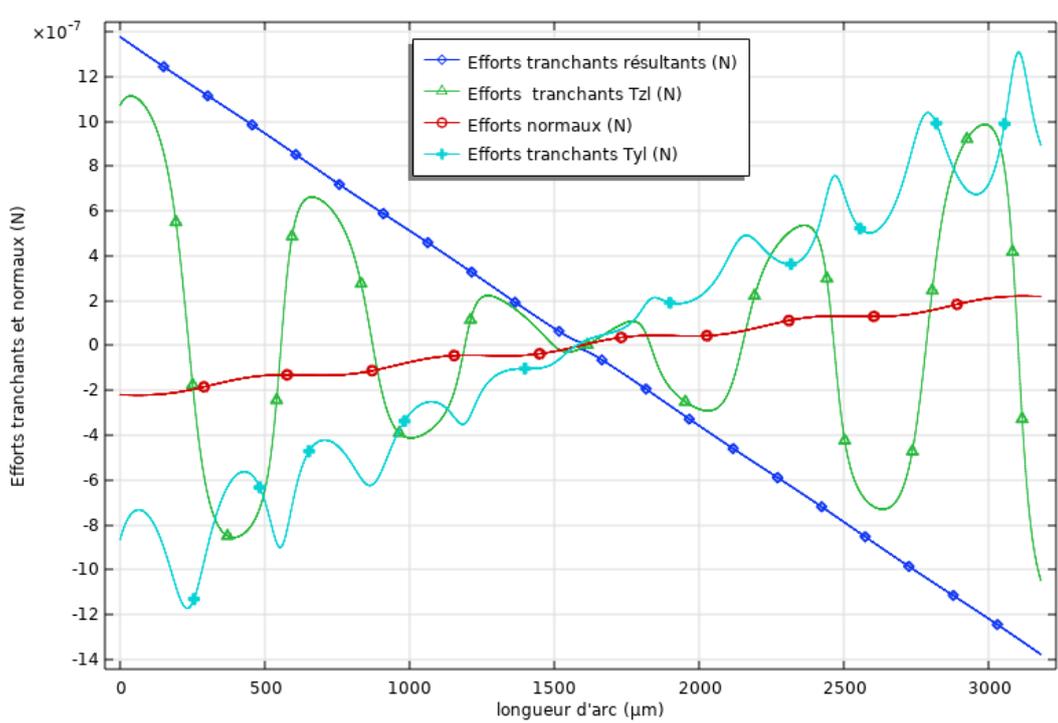


Figure (IV-5) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des efforts tranchants et normaux le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position verticale.

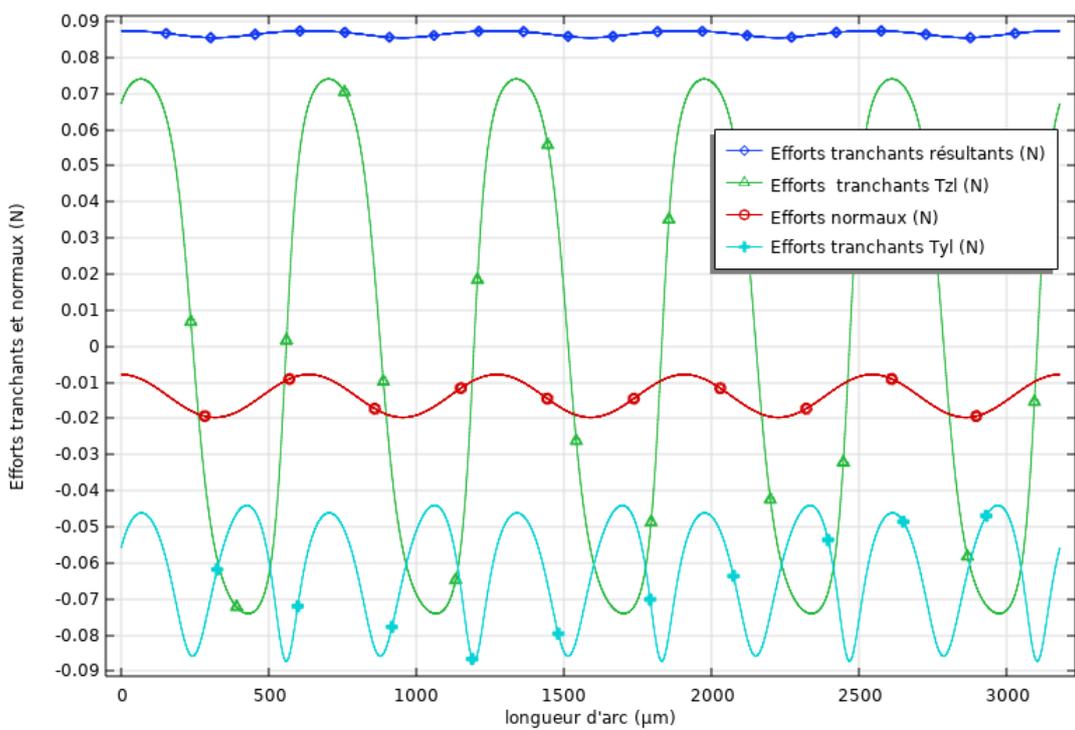


Figure (IV-6) : Distribution sous l'effet de la variation de la température seule des efforts tranchants et normaux le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position verticale.

Par ailleurs, l'analyse de la distribution du champ de contraintes de VON MISES dans le filament obtenu en figure (IV-7) à partir de ce modèle d'éléments poutre basé sur la théorie de la RDM, confirme encore une fois la nette domination des effets de la variation de la température par rapport aux effets du poids propre. En effet, en figure (IV-7a), les intensités de ces contraintes dues au poids propre varient entre 2.10^{-3} et 4.10^{-3} MPa. D'autre part, les distributions dues aux effets de la variation de température seule ainsi que celles de la combinaison poids-température sont identiques. En effet, pour les deux cas, on peut constater sur les figures (IV-7b) et (IV-7c) que les intensités de contraintes sont les mêmes.

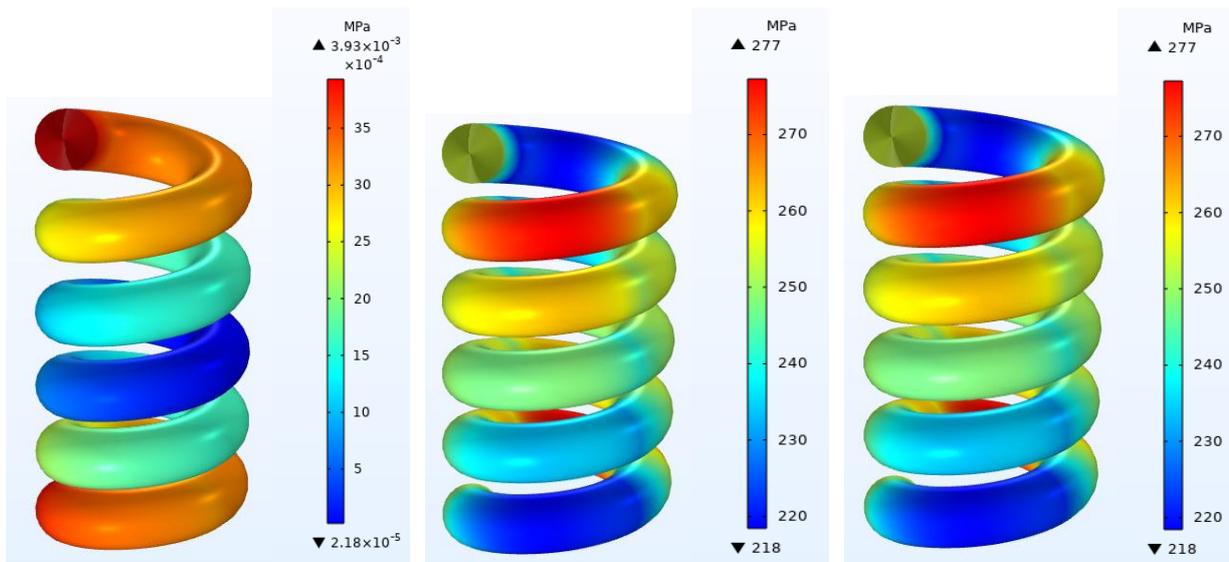


Fig IV-7a : action du poids propre seul

Fig IV-7b : action de la variation de température seule

Fig IV-7c : action simultanée du poids propre et de la variation de température

Figure (IV-7) : distribution des contraintes de VONMISES dans le filament sous les différents cas de charges en position verticale.

IV.2.2 Cas de la position horizontale

Sur la figure (IV-8), la déformée sous l'effet de la variation de la température seule, elle est indépendante de la position du filament. En effet, la figure montre un gonflement des spires du fil identique à celui de la position verticale.

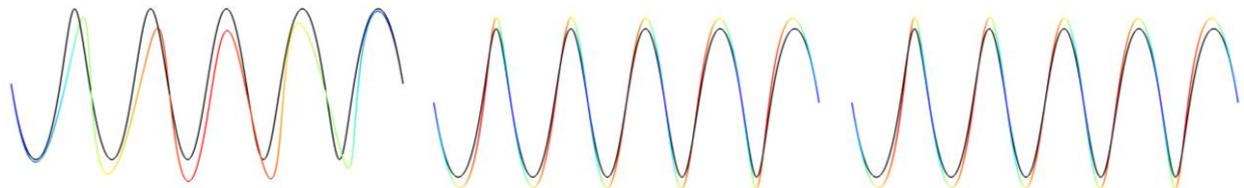


Fig IV-8a : action du poids propre seul

Fig IV-8b : action de la variation de température seule

Fig IV-8c : action simultanée du poids propre et de la variation de température

Figure (IV-8) : déformées du filament en position horizontale et sous les différents cas de charges

En adoptant la même démarche que pour le cas précédent de la position verticale, on peut déduire à partir de l'analyse des distributions des moments de flexion et de torsion en figure (IV-9) et (IV-10), des efforts tranchants et normaux en figure (IV-11) et (IV-12), des champs de contraintes de VONMISES en figure (IV-13), une nette domination des effets de la variation de température par rapport au poids propre et ce, quel que soit la position du filament.

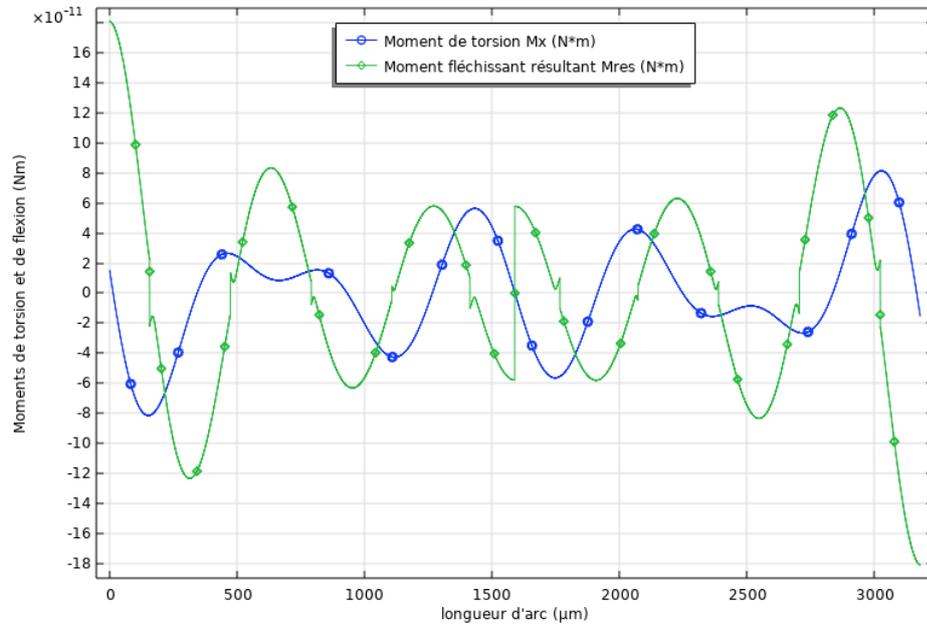


Figure (IV-9) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position horizontale

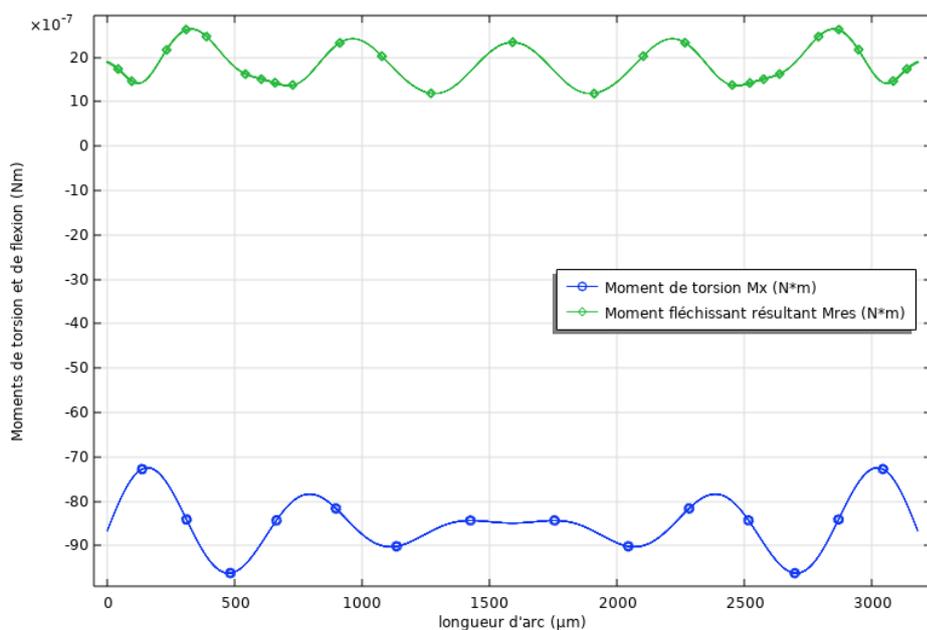


Figure (IV-10) : Distribution sous les effets conjugués de la température et du poids propre des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position horizontale

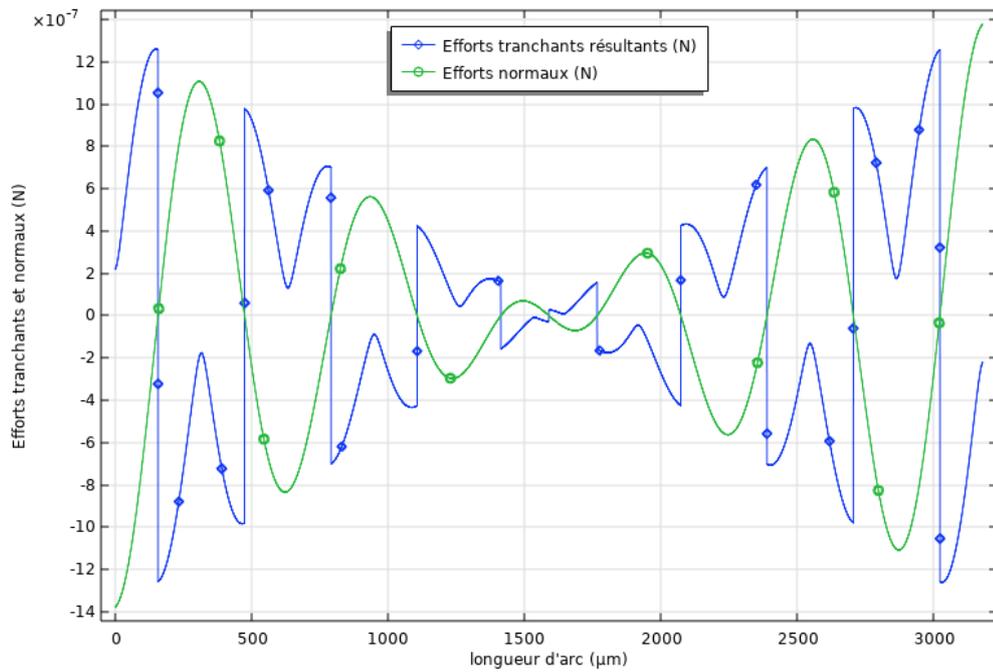


Figure (IV-11) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des efforts tranchants et normaux le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position horizontale.

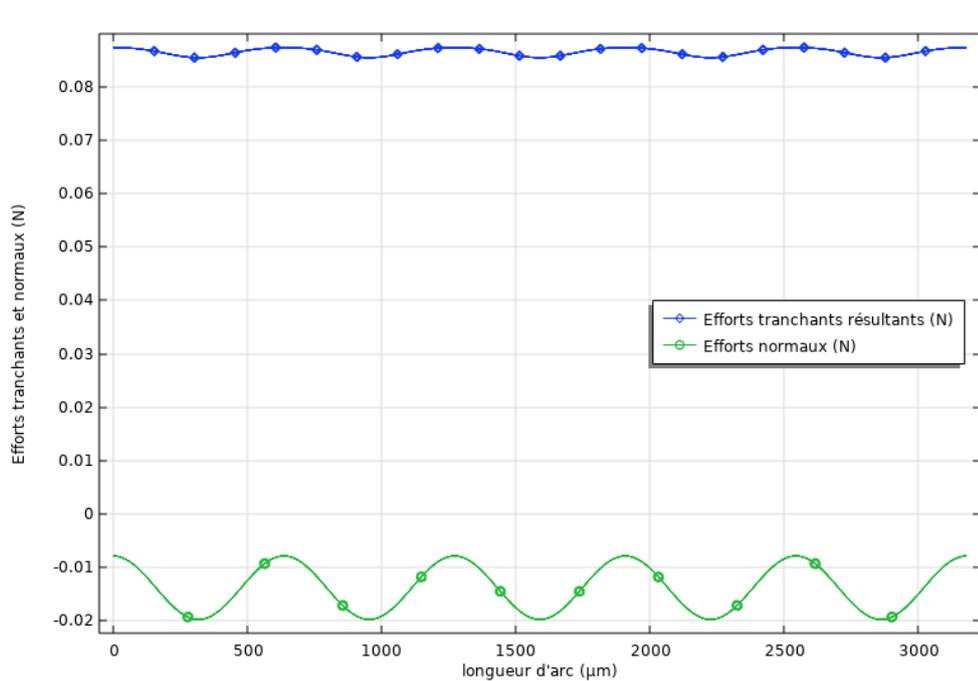


Figure (IV-12) : Distribution sous les effets conjugués de la température et du poids propre des efforts tranchants et normaux le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position horizontale

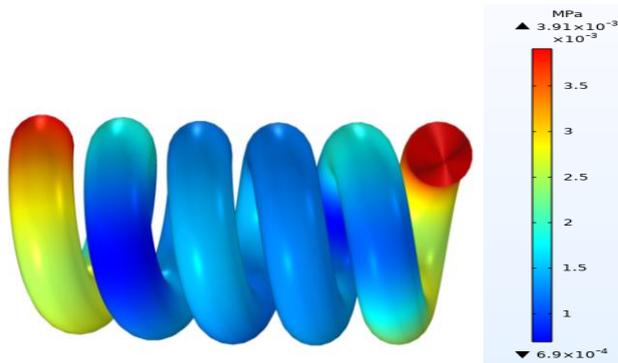


Fig IV-13a : action du poids propre seul

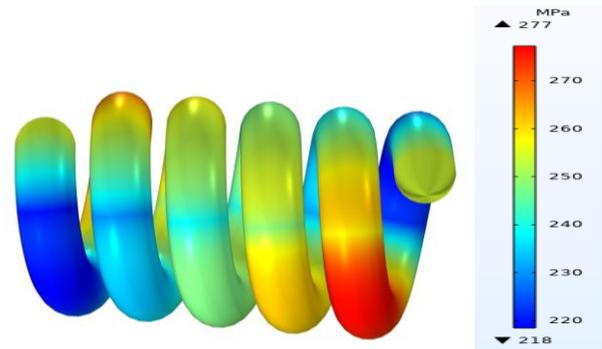


Fig IV-13b : action simultanée du poids propre et de la variation de température

Figure (IV-13) : distribution des contraintes de VONMISES dans le filament sous les différents cas de charges en position horizontale.

Par ailleurs, en utilisant un modèle volumique, on peut respectivement retrouver en figure (IV-14) les déformées, sous l'action isolée du poids propre, l'action isolée de la variation de température ainsi que les actions simultanées du poids et de la température. Par ces modèles volumiques, on confirme davantage la nette domination de la variation de température par rapport au poids propre.

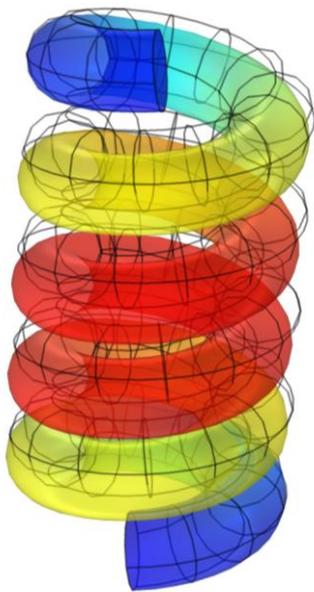


Fig IV-14a : action du poids propre seul

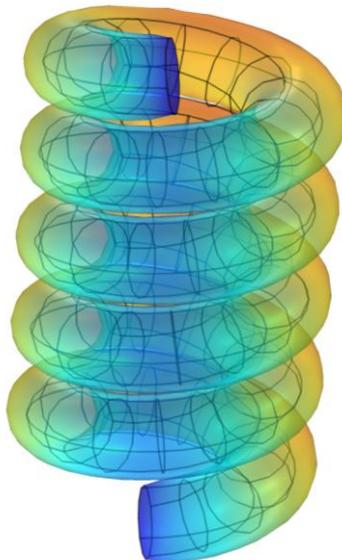


Fig IV-14b : action de la variation de température seule

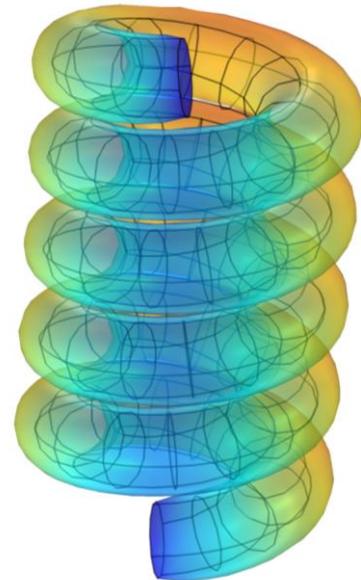


Fig IV-14c : action simultanée du poids propre et de la variation de température

Figure (IV-14) : déformées obtenues par le modèle volumique du filament en position verticale et sous les différents cas de charges.

En ce qui concerne les distributions des contraintes sur les génératrices intérieures et extérieures représentées en figure (IV-15) , Les courbes de la figure (IV-16) représentant les évolutions des contraintes de VONMISES le long des génératrices confirment le résultat obtenu en théorie de la RDM par Timoshenko [1] et montrent clairement que la génératrice intérieure est plus sollicitée que la génératrice extérieure (figure IV-15)

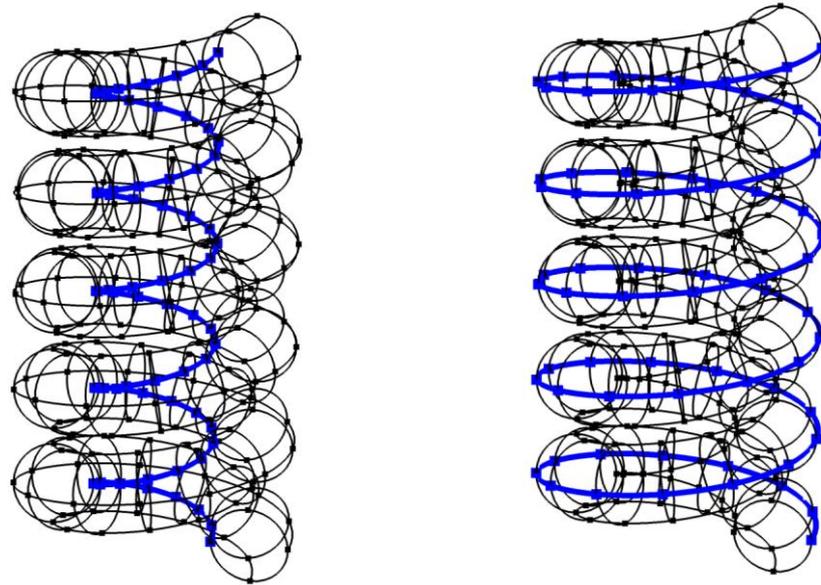


Figure (IV-15) : représentation des génératrices intérieures (à gauche) et extérieures (à droite) le long du filament

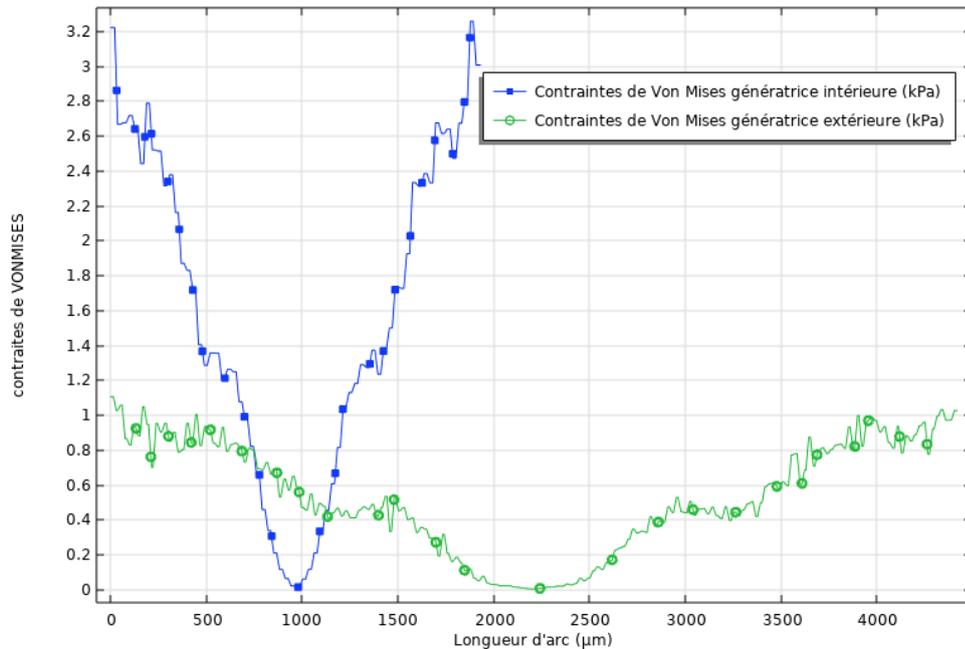


Figure (IV-16) : évolutions des contraintes de VONMISES le long des génératrices intérieures et extérieures

IV.3- Etude numérique du comportement des filaments SS au fluage

Pour ce cas d'étude, les éléments finis utilisés seront de type volumique à trois degrés de liberté (de translation) par nœud. Basés sur les équations de la théorie de l'élasticité, ce modèle permettra d'obtenir et d'analyser les distributions en fonction du temps de fluage, des différentes composantes des champs de contraintes et de déformations dans le filament.

La loi de fluage adoptée sera celle de Norton déjà présentée dans le chapitre II paragraphe II-4 dont nous rappelons ci-dessous la formule du taux de déformation en fluage qui s'écrit comme suit :

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{ref}} \right)^n e^{\frac{Q}{RT}}$$

Les valeurs adoptées pour les paramètres de cette loi de comportement sont comme suit :

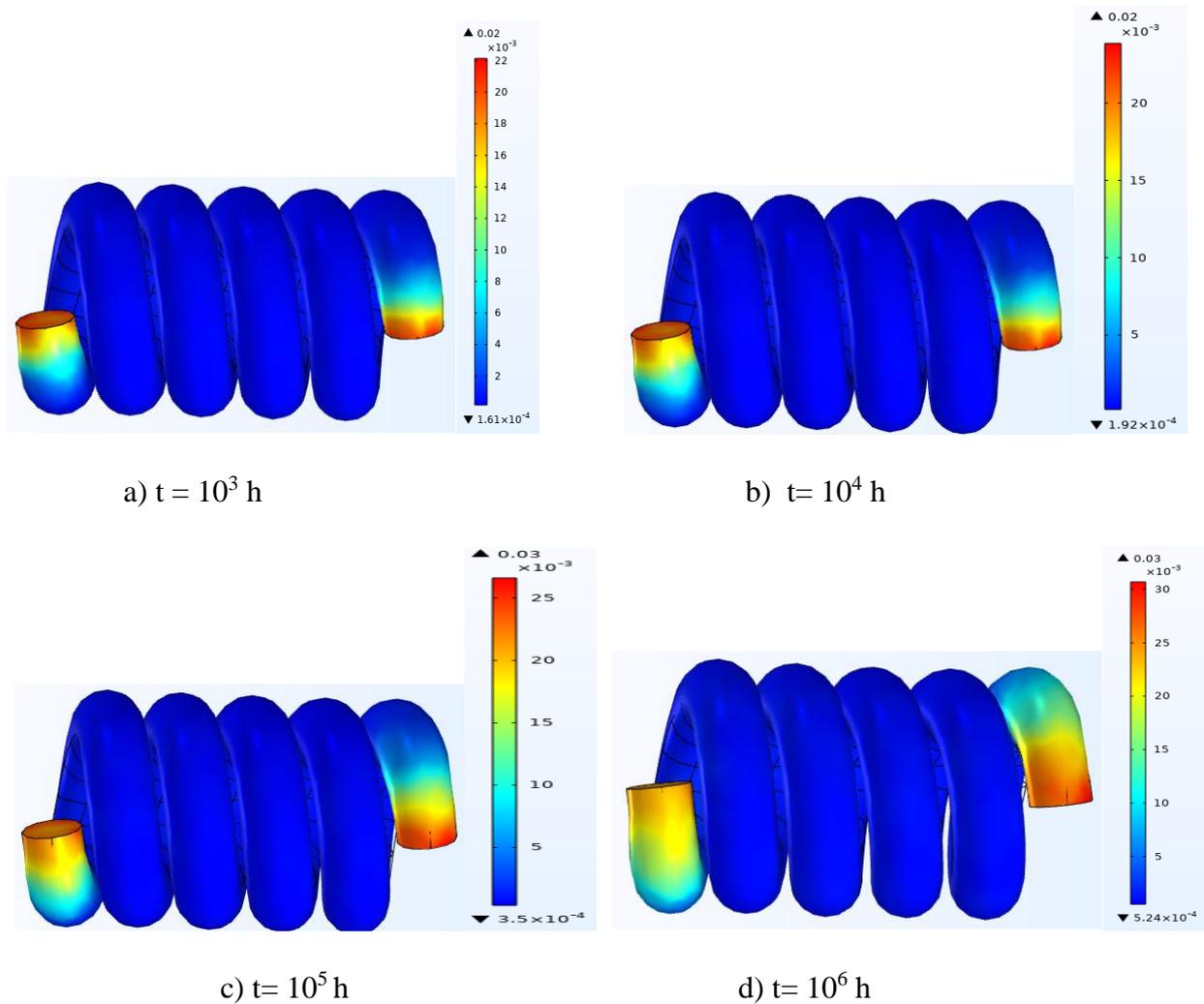
Le coefficient du taux de fluage $A = 9.4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

La contrainte de référence est $\sigma_{ref} = 1 \text{ MPa}$

L'exposant des contraintes est $n = 1$

IV.3.1 Evolution des champs de déformations équivalentes en fonction du temps de fluage

Afin de mieux comprendre comment se comporte notre filament au fluage en fonction du temps, les résultats des calculs effectués à l'aide du logiciel COMSOL sont illustrés sur les figures (IV-17) et (IV-22) lesquelles montrent les évolutions des champs de déformations équivalentes de fluage ainsi que les évolutions des champs de contraintes de VONMISES.



Figure(IV-17) : Evolution du champ de déformations équivalentes de fluage en fonction du temps

On voit bien sur cette figure (IV-17) que les déformations de fluage sont amorcées à partir des sections d'encastements et se propagent en direction du milieu du filament en cours du temps. Le modèle de fluage utilisé étant celui Norton, pour ce filament en tungstène, les déformations maximales obtenues sont de l'ordre de 2% à 10^4 h et atteignent la valeur de 3% à 10^5 h et varient faiblement jusqu'à 10^6 h .

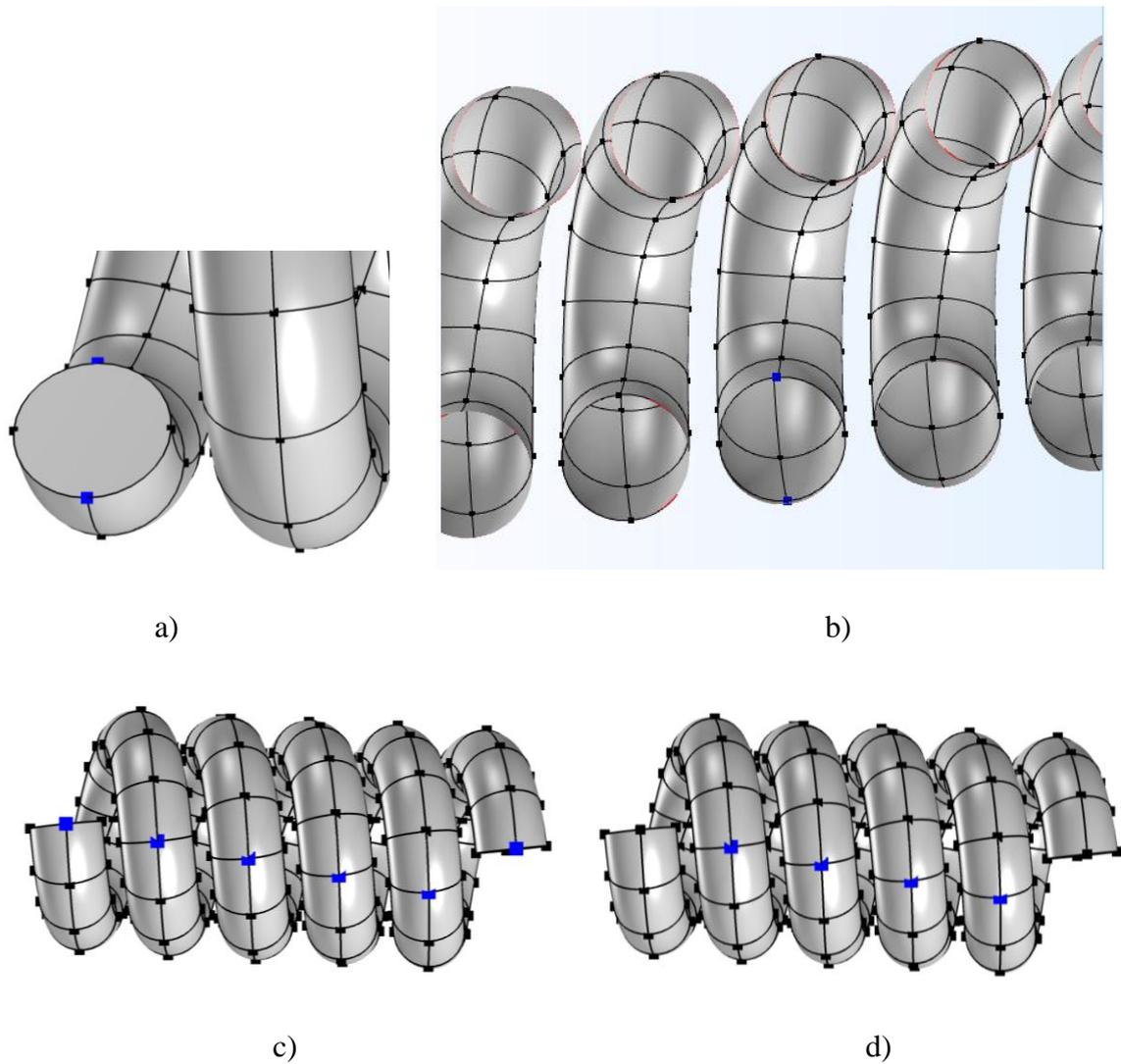


Figure (IV-18) : points sélectionnés en vue de la représentation des évolutions en cours du temps des déformations équivalentes de fluage et des contraintes de Von Mises.

Les courbes de la figure (IV-19) montrent les évolutions en fonction du temps des déformations équivalentes de fluage au niveau des points des deux génératrices intérieure et extérieure de la section d'encastrement (voir la sélection de la figure IV-18a). On voit bien que les déformations de fluage évoluent en section d'encastrement entre 1.65% et 2.25% sur le point de la génératrice extérieure. Elles évoluent également entre 1.93% et 2.73% sur le point de la génératrice intérieure. Quant aux points situés au milieu du filament, les courbes de la figure (IV-20) montrent les évolutions au niveau des points des deux génératrices intérieure et extérieure de la section située au milieu du filament (sélection de la figure IV-18b). On voit bien que les déformations de fluage évoluent entre 0.03% et 0.075% sur le point de la génératrice extérieure. Elles évoluent également entre 0.07% et 0.15% sur le point de la génératrice intérieure. On voit bien que ces dernières valeurs tirées de la figure (IV-20), sont très faibles Ce qui permet de déduire que le fluage se déroule uniquement en zone voisine des sections d'encastrement.

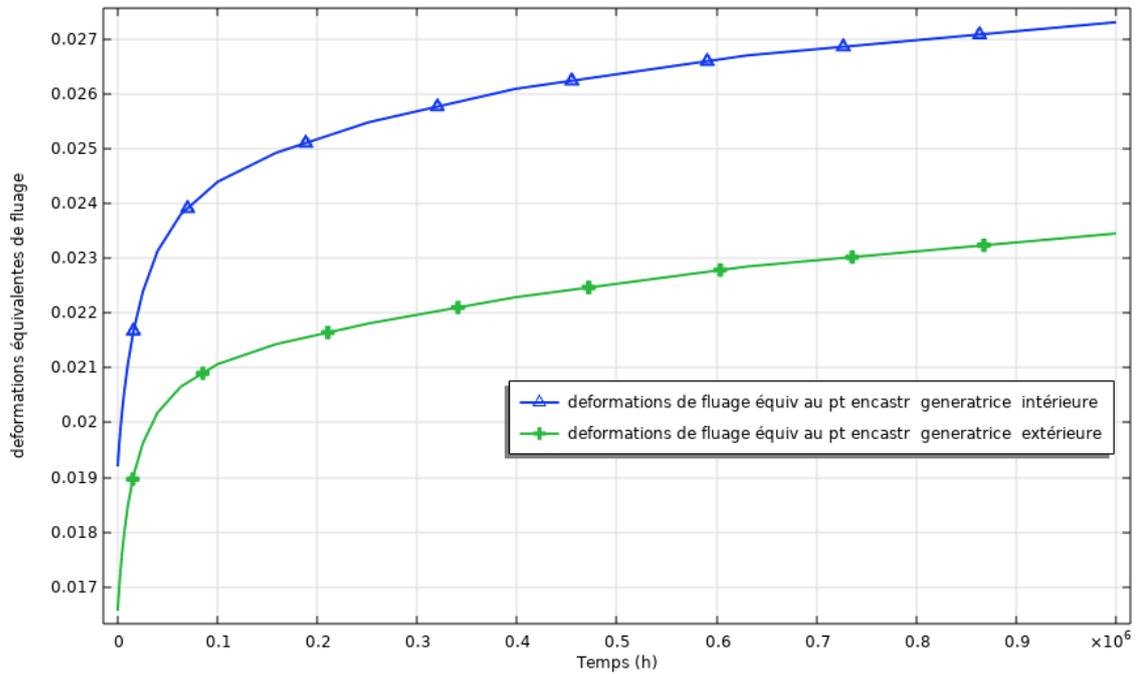


Figure (IV-19) : Evolution en fonction du temps des déformations équivalentes de fluage au niveau des points des deux génératrices intérieure et extérieure de la section d'encastrement (sélection de la figure IV-18a)

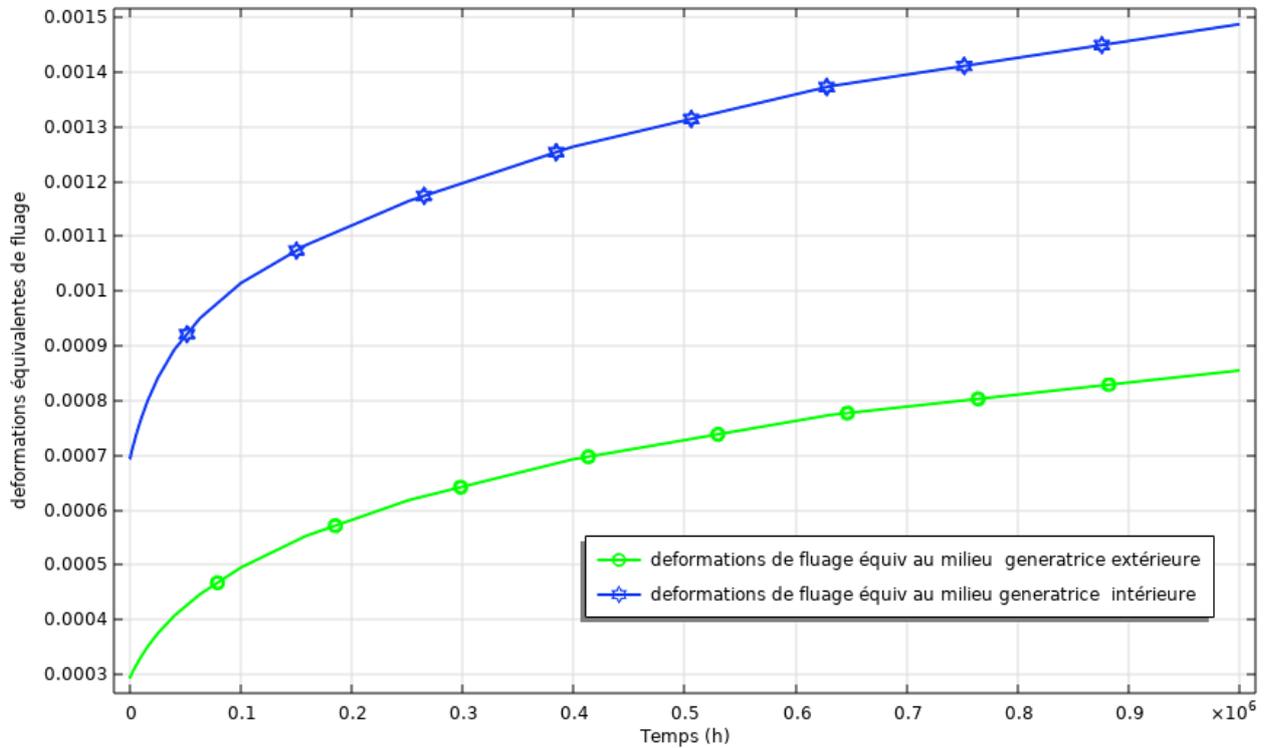


Figure (IV-20) : Evolution en fonction du temps des déformations équivalentes de fluage au niveau des points des deux génératrices intérieure et extérieure de la section située au milieu du filament (sélection de la figure IV-18b)

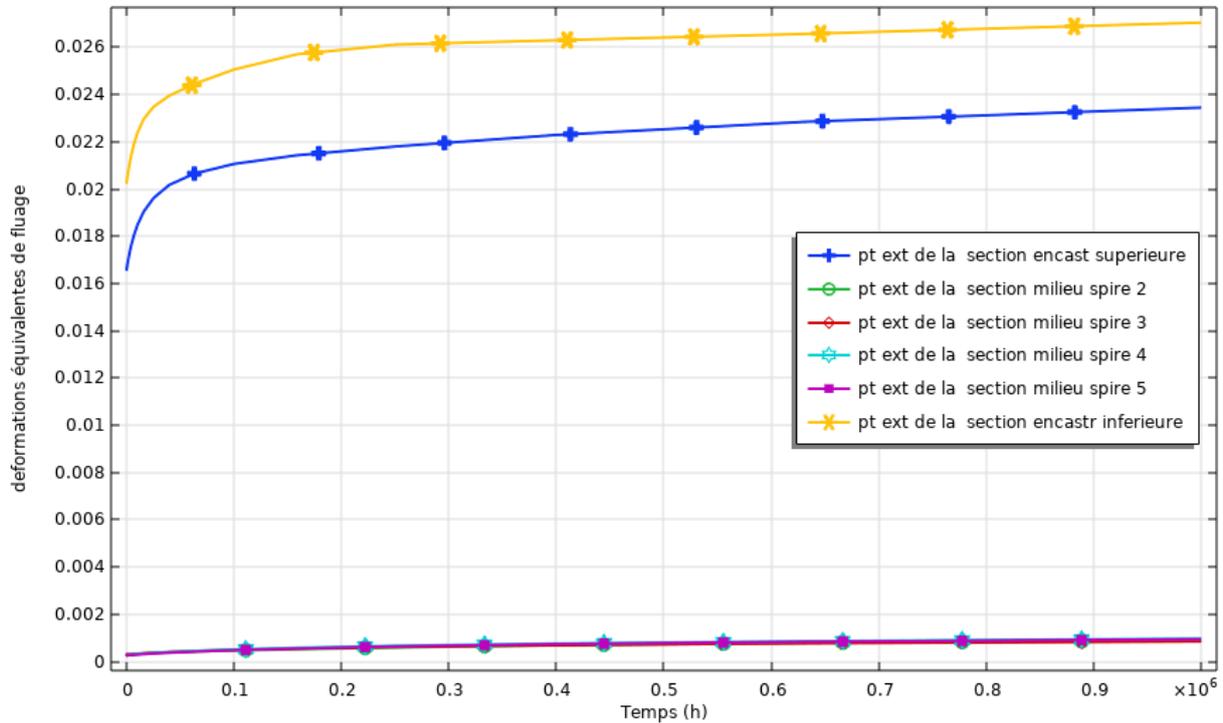


Figure (IV-21) : Evolution en fonction du temps des déformations équivalentes de fluage au niveau des points portés par la même verticale et situés sur la génératrice extérieure du filament (sélection de la figure IV-18c)

A cause des faibles valeurs des déformations équivalentes en dehors des zones d'encastrement, la figure (IV-21) ci-dessus met en évidence le phénomène de localisation du fluage au voisinage des zones d'encastrement.

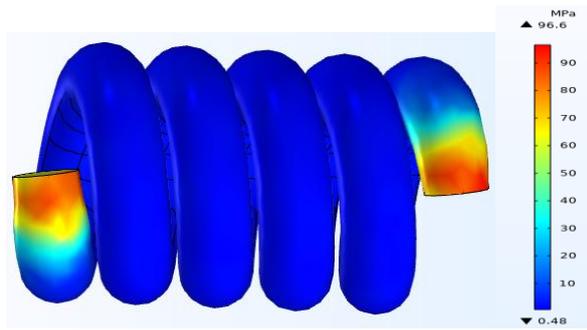
IV.3.2 Evolution des champs de contraintes équivalentes de VON MISES en fonction du temps de fluage

Afin de savoir si les phénomènes de relaxation et de redistribution des champs de contraintes vont se produire ou non dans le filament au cours de fluage, il est nécessaire de calculer les évolutions des champs de contraintes de VON MISES en cours du temps. Ce qui est illustré sur la figure (IV-22). En effet, on peut facilement constater que les contraintes maximales dans le filament ont diminué considérablement de l'instant $t=1\text{h}$ où $\sigma_{\max}=96.6\text{ MPa}$ à l'instant $t=10^5\text{ h}$ dont la contrainte maximale est $\sigma_{\max}=1.45\text{ MPa}$. Toutes ces valeurs maximales sont illustrées dans le tableau IV-1 ci-dessous. Ce qui met en évidence le phénomène de relaxation au cours du fluage du filament. Par ailleurs, on peut également constater sur la même figure (IV-22) qu'il y a eu une redistribution des champs de contraintes avec le temps. En effet, on peut facilement remarquer que

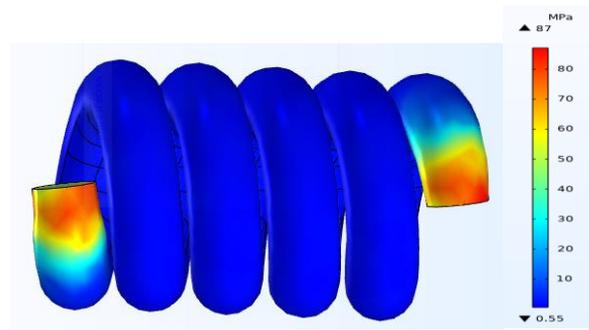
les zones de contraintes maximales initialement situées dans les zones d'encastrement, se sont déplacées progressivement en direction de l'intérieur du filament.

Temps de fluage t (h)	1	10^3	10^4	10^5	10^6
Contraintes de Von Mises σ_{\max} (MPa)	96.60	07	40	11.10	1.45

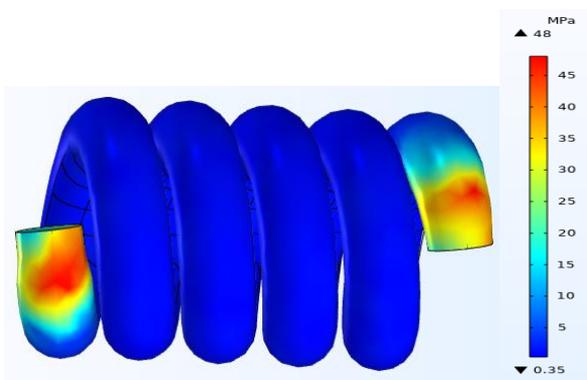
Tableau IV-1 : Evolutions des champs de contraintes de VON MISES en cours du temps de fluage



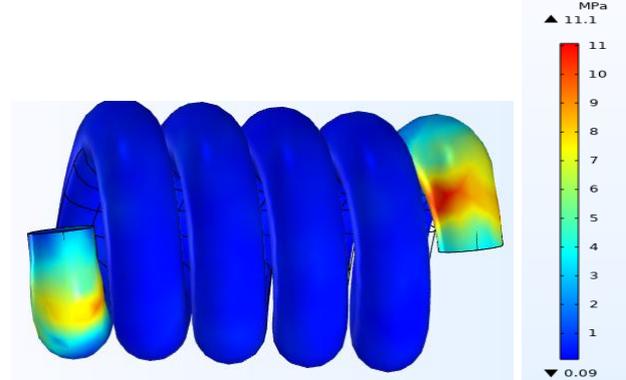
a) $t = 1 \text{ h}$



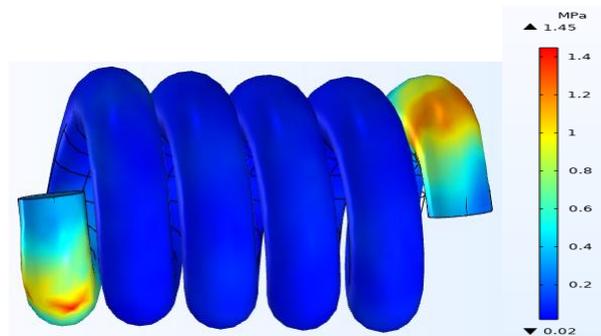
b) $t = 1000 \text{ h}$



c) $t = 10^4 \text{ h}$



d) $t = 10^5 \text{ h}$



e) $t = 10^6 \text{ h}$

Figure (IV-22) : Evolution du champ de contraintes de Von Mises en fonction du temps de fluage

La figure (IV-23) met en évidence le phénomène de relaxation où l'on peut constater que les contraintes de Von Mises diminuent considérablement.

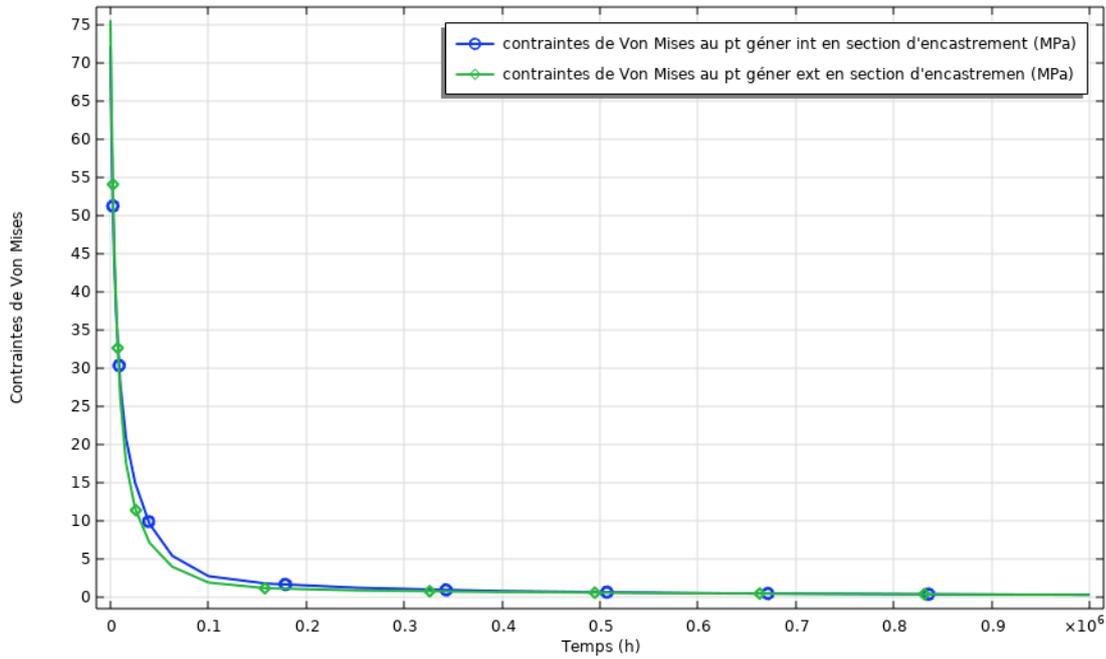


Figure (IV-23) : Evolution du champ de contraintes de Von Mises au cours du temps de fluage au niveau des points situés sur la section d'encastrement et portés par les génératrices intérieures et extérieures (sélection figure IV-18a)

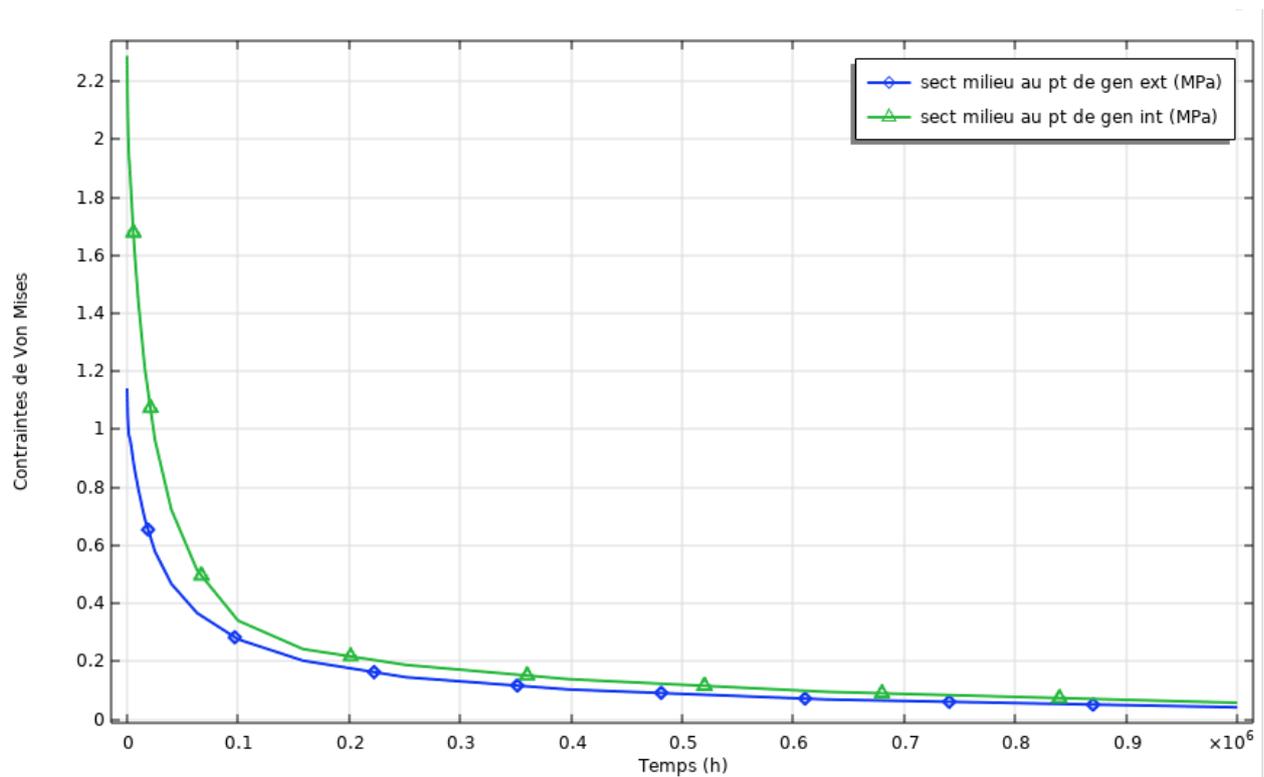


Figure (IV-24) : Evolution du champ de contraintes de Von Mises au cours du temps de fluage au niveau des points situés sur la section du milieu et portés par les génératrices intérieures et extérieures (sélection figure IV-18b)

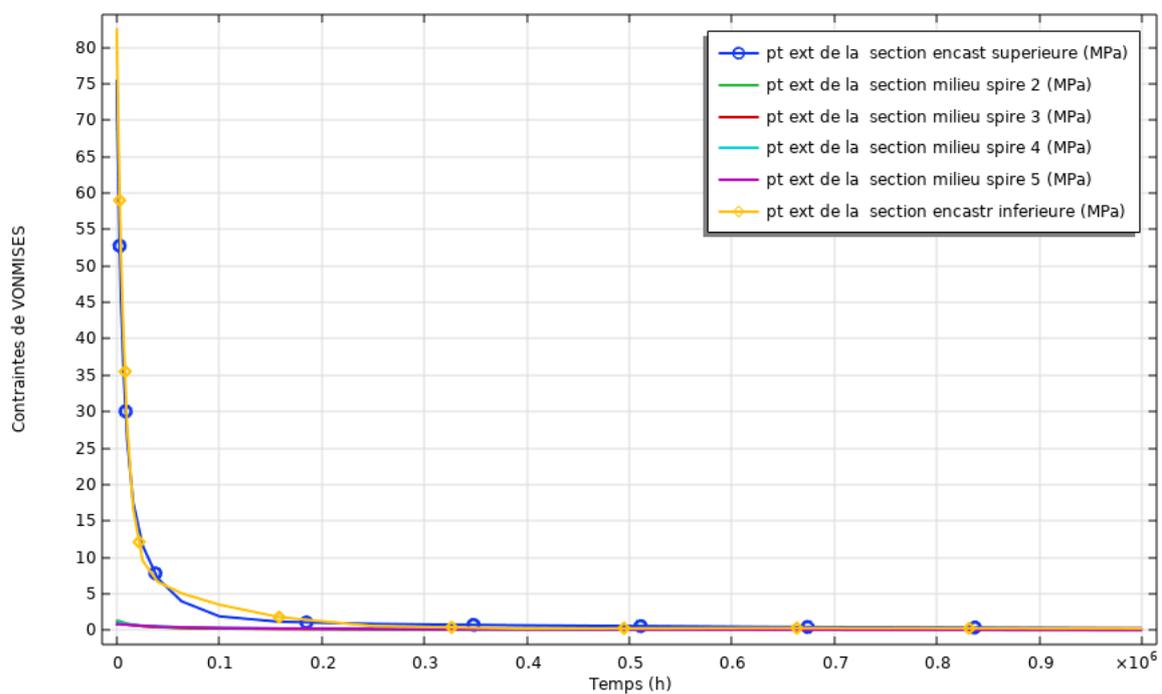


Figure (IV-25) : Evolution en fonction du temps des contraintes de Von Mises au niveau des points portés par la même verticale et situés sur la génératrice extérieure du filament (sélection de la figure IV-18c)

IV-3-3 Etude de l'influence de la position du filament sur le comportement au fluage

L'étude du comportement au fluage relative à la position horizontale ayant été effectuée dans les paragraphes précédents, pour l'étude de l'influence de la position (ou de l'orientation) du filament vis à vis de la direction gravitaire, nous ne nous intéresserons, dans le présent paragraphe, qu'au cas de la position verticale dont les résultats seront comparés à ceux obtenus précédemment en position horizontale.

Par ailleurs, on voit bien sur la figure IV-26 et IV-27 ci-dessous que les champs de déformations équivalentes de fluage ainsi que les champs de contraintes de Von Mises correspondant aux deux positions sont absolument identiques. L'interprétation de ce résultat peut être établie grâce à la nette dominance des effets de la variation de la température par rapport aux charges gravitaires. Ce résultat ayant déjà été démontré dans le domaine élastique linéaire lors de nos calculs précédents. Eu égard aux figures précédentes, il semble qu'il est également valable lors du comportement au fluage.

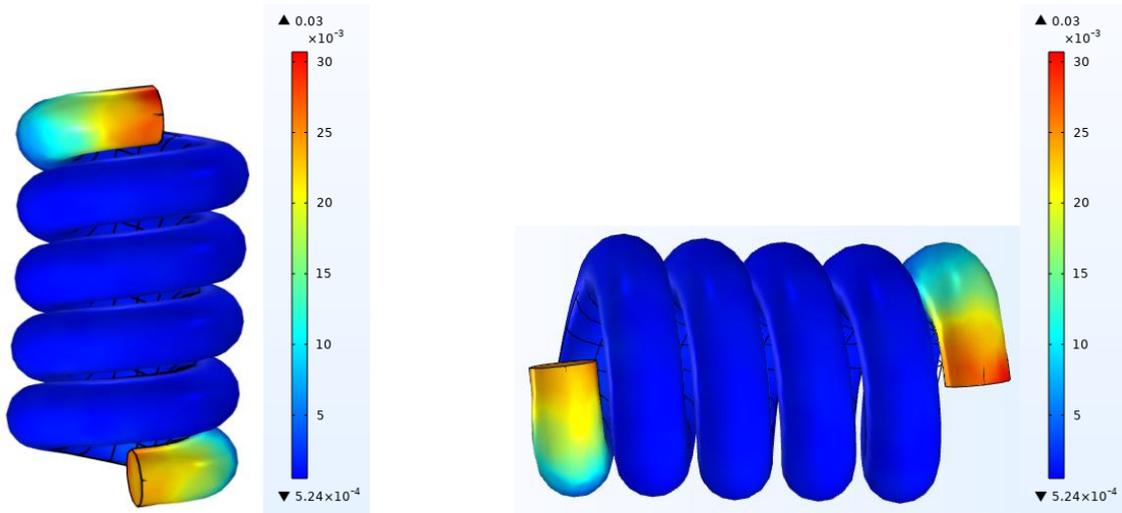


Figure IV-26 : champs de déformations équivalentes de fluage correspondant aux deux positions verticales et horizontales obtenus au temps $t = 10^6$ h

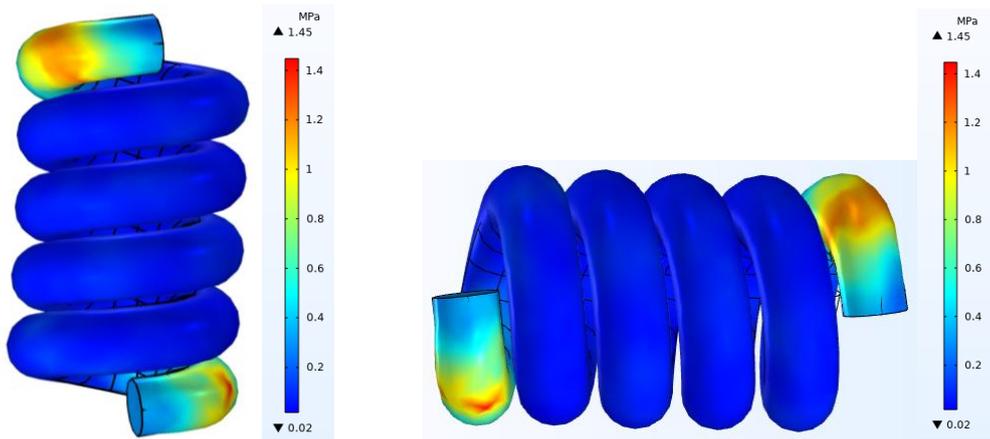


Figure IV-27 : champs de contraintes de Von Mises correspondant aux deux positions verticales et horizontales obtenus au temps $t = 10^6$ h

CONCLUSION GENERALE

A l'issue de cette étude numérique, il y a lieu de conclure par quelques résultats qui nous semblent importants.

En effet, en ce qui concerne l'étude numérique en comportement élastique, tous les résultats analytiques trouvés en théorie de la résistance des matériaux ont été confirmés. Il s'agit en l'occurrence :

- de la nette dominance des sollicitations de torsion par rapport à celles de la flexion qui s'avèrent non négligeables.
- Une plus forte sollicitation en cisaillement des génératrices intérieures par rapport aux génératrices extérieures.

Par ailleurs, l'étude numérique des actions simultanées du poids propre de la variation de la température, a montré une nette domination des effets des gradients thermiques par rapport à ceux de la gravité. Ce qui a eu pour conséquence directe une indépendance du comportement du filament vis-à-vis de sa position (ou de son orientation) par rapport à la direction gravitaire (ou la verticale).

En ce qui concerne, l'étude de la simulation numérique au fluage, une seule loi de comportement (loi de Norton) a été utilisée. Les résultats obtenus sont comme suit:

- Les déformations de fluage sont amorcées au niveau des zones d'encastrement et se propagent progressivement en direction de l'intérieur du filament
- le phénomène de relaxation a été mis en évidence où il a été observé une forte diminution des intensités de contraintes.
- Il a été également relevé une redistribution des champs de contraintes. Toutefois, cette redistribution est limitée uniquement à la zone située au voisinage des encastremets.
- Enfin il a été remarqué une totale indépendance du comportement au fluage vis-à-vis de l'orientation du filament par rapport à la direction verticale. Ceci trouve son explication dans le fait que les effets du poids propre soit négligeables devant ceux de la variation de la température

Etant une première tentative de simulation du comportement au fluage, et en raison de nombreuses difficultés rencontrées, nous sommes limités uniquement à l'utilisation d'une seule loi de comportement qui est celle de Norton. En perspective, d'autres investigations

numériques utilisant davantage de lois de comportement pourront être effectuées à l'avenir.

Table des illustrations

Tableau (I-1) : Caractéristiques atomiques ([4]).....	3
Tableau (I-2) : Propriétés cristallographiques (Ingénieur, [5])	3
Figure (I-1) : Résistivité électrique en fonction de la température ([4])	4
Figure (I-3) : Limite d'élasticité conventionnelle à 0.2% en fonction de la température.....	5
Figure (I-2) : Module de Young en fonction de la température	5
Figure (I-4) : Enroulement du filament simplement spiralé ([4]).....	7
Figure (I-5) : Structures possibles d'un filament de faible diamètre ([4])	8
Figure (II-1) : Arbre soumis à un couple de torsion (Timoshenko)	9
Figure (II-2) : ressort hélicoïdal (Timoshenko).....	11
Figure (II-3) : Les formes d'élément de volume (Jean-Charles Craveur, août 2008).....	14
Figure (II-5) : Carte générale de déformation ressort	17
Figure (III-1) : Filament SS soumis à une force axiale T.	18
Figure (IV-1) : déformées du filament en position verticale et sous les différents cas de charges.....	21
Figure (IV-2) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à l'extrémité supérieure et libre à l'autre extrémité en position verticale.....	22
Figure (IV-3) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position verticale.....	22
Figure (IV- 4) : Distribution sous l'effet de la température seule des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position verticale.....	22
Figure (IV-5) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des efforts tranchants et normaux le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position verticale.....	23
Figure (IV-6) : Distribution sous l'effet de la variation de la température seule des efforts tranchants et normaux le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position verticale.....	23
Figure (IV-7) : distribution des contraintes de VONMISES dans le filament sous les différents cas de charges en position verticale.	24
Figure (IV-8) : déformées du filament en position horizontale et sous les différents cas de charges.....	24
Figure (IV-9) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position horizontale.....	25
Figure (IV-10) : Distribution sous les effets conjugués de la température et du poids propre des moments de torsion et de flexion le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position horizontale	25

Figure (IV-11) : Distribution sous l'effet du poids propre seul des efforts tranchants et normaux le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position horizontale.....	26
Figure (IV-12) : Distribution sous les effets conjugués de la température et du poids propre des efforts tranchants et normaux le long d'un filament encastré à ses deux extrémités en position horizontale	26
Figure (IV-13) : distribution des contraintes de VONMISES dans le filament sous les différents cas de charges en position horizontale.....	27
Figure (IV-14) : déformées obtenues par le modèle volumique du filament en position verticale et sous les différents cas de charges.	27
Figure (IV-15) : représentation des génératrices intérieures (à gauche) et extérieures (à droite) le long du filament.....	28
Figure (IV-16) : évolutions des contraintes de VONMISES le long des génératrices intérieures et extérieures.....	28
Figure(IV-17) : Evolution du champ de déformations équivalentes de fluage en fonction du temps.....	30
Figure (IV-18) : points sélectionnés en vue de la représentation des évolutions en cours du temps des déformations équivalentes de fluage et des contraintes de Von Mises.....	31
Figure (IV-19) : Evolution en fonction du temps des déformations équivalentes de fluage au niveau des points des deux génératrices intérieure et extérieure de la section d'encastrement (sélection de la figure IV-18a).....	32
Figure (IV-20) : Evolution en fonction du temps des déformations équivalentes de fluage au niveau des points des deux génératrices intérieure et extérieure de la section située au milieu du filament (sélection de la figure IV-18b).....	32
Figure (IV-21) : Evolution en fonction du temps des déformations équivalentes de fluage au niveau des points portés par la même verticale et situés sur la génératrice extérieure du filament (sélection de la figure IV-19c).....	33
Figure (IV-22) : Evolution du champ de déformations équivalentes de fluage en fonction du temps.	35
Tableau IV-1 : Evolutions des champs de contraintes de VON MISES en cours du temps de fluage	34
Figure (IV-23) : Evolution du champ de contraintes de Von Mise au cours du temps de fluage au niveau des points situés sur la section d'encastrement et portés par les génératrices intérieures et extérieurs (sélection figure IV-19a).....	36

Figure (IV-24) : Evolution du champ de contraintes de Von Mises au cours du temps de fluage au niveau des points situés sur la section du milieu et portés par les génératrices intérieures et extérieures (sélection figure IV-19b).....	36
Figure (IV-25) : Evolution en fonction du temps des contraintes de Von Mises au niveau des points portés par la même verticale et situés sur la génératrice extérieure du filament (sélection de la figure IV-19c).....	37
Figure (IV-26) : champs de déformations équivalentes de fluage correspondant aux deux positions verticales et horizontales obtenus au temps $t = 10^6$ h.....	38
Figure IV-27 : champs de contraintes de Von Mises correspondant aux deux positions verticales et horizontales obtenus au temps $t = 10^6$ h.....	38

Références bibliographiques

- [1] TIMONSHENKO, S. R. (s.d.). DUNDO,PARIS-
- [2] SEGHIR, A, C. d. (2005/2014) bejaia.
- [3] Jean-Charles Craveur, M. d. (août 2008)..
- [4] BENGHANEM,N. *Caracterisation de la microstructure de filament du tungstene par e.b.s.p approche theorique du comportement mecanique en fluage d'un filament a double spiralage.*
- [5] Ingénieur, T. d. *Élaboration et recyclage des métaux de transition.*
- [6] ASHBY, M.F., A first report on deformation - mechanism maps metall., 20,887-897.
- [7] Zienkiewicz, O.C. et Taylor, R.L. *The Finite Element Method For Solid and Structural Mechanics – 6th Edition.* s.l. : Elsevier Butterworth – Heinemann, 2005.
- [8] Crisfield, M.A. *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures – Essentials – Vol.1.* s.l. : John Wiley & Sons, 1991
- [9] Schade, P.; Ortner, H. M.; Smid, I. (2015). Refractory metals revolutionizing the lighting technology: A historical review, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 50, 23–30 .
- [10] MacIsaac, D.; Kanner, G.; Anderson, G. (1999). Basic physics of the incandescent lamp (lightbulb), *The Physics Teacher*, Vol. 37, No. 9, 520–525. doi:<https://doi.org/10.1119/1.880392>
- [11] Frost, H. J.; Ashby, M. F. (n.d.). Deformation-Mechanism Maps.
- [12] Coble, R. L. (1963). A Model for Boundary Diffusion Controlled Creep in Polycrystalline Materials, *Journal of Applied Physics*, Vol. 34, No. 6, 1679–1682. doi:10.1063/1.1702656