

## Étude comparative du comportement thermomécanique de disques de la turbine d'une centrale thermique en fonction de la nature du matériau

Gorgui Samb<sup>1\*</sup>, Ibrahima Ly<sup>1</sup>, Salif Gaye<sup>2</sup> et Mamadou Sarr<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ecole Polytechnique de Thiès, Sénégal

<sup>2</sup> Université de Thiès, IUT (Institut Universitaire de Technologie),  
LME (Laboratoire Matériaux et Equipements), Sénégal

<sup>3</sup> Université de Thiès Sénégal, UFRSET (Unité de Formation et Recherche Science et Technique), Sénégal

\* Correspondance, courriel : [gorguisamb@yahoo.fr](mailto:gorguisamb@yahoo.fr)

### Résumé

Ce travail porte sur l'étude du comportement de plusieurs types de disques utilisés dans les turbines de centrales thermiques, plus précisément du disque en acier et de celui d'alliage d'aluminium. Nous avons utilisé ces types de métaux afin de caractériser leurs déformations élastiques. Ce qui nous a permis de comparer la répartition de la température, la variation des contraintes et la déformation à travers le profil du disque. Par ailleurs, le comportement dynamique de ces disques en fonction de la forme géométrique et des déformations élastiques externes a été étudié par l'application du logiciel de programmation Matlab. Cette simulation nous a permis d'illustrer :

- la diffusion thermique au niveau du disque depuis certains points sollicités en grandeur thermique ;
- la déformation élastique subie par le disque avec la propagation du champ de thermique ;
- la diffusion de la contrainte de Von Mises au niveau du disque.

Les résultats obtenus avec une déformation élastique, du disque en aluminium le double de celui de l'acier, nous ont permis de constater que le disque en acier résiste mieux aux sollicitations thermomécaniques que celui en alliage d'aluminium. Ce qui aura une conséquence directe sur les vibrations mécaniques et les possibilités d'équilibrage en conformité aux normes internationales de vibrations et acoustiques. En comparaisons avec les mesures vibratoires et acoustiques établies en vigueur.

**Mots-clés :** *disque, centrale thermique, comportement dynamique, contrainte de Von Mises.*

### Abstract

**Comparative study of the thermomechanical behavior of disks of the turbine of a thermal power plant according to the nature of the material**

This work deals with the behavior of several types of discs used in thermal power plant turbines, more precisely, steel discs and aluminum alloy. We used these types of metals in order to characterize their elastic deformations, which allowed us to compare distribution, constraints variations and deformations across the profile of the disc. Besides, the dynamic behavior of such discs according to geometrical shapes

and external elastic deformations has been studied by means of the MATLAB software application. The simulation has permitted to illustrate :

- thermal diffusion at disk level, from solicited sources, based on thermal parameters;
- elastic disc deformation due to thermal field propagation;
- Von Mises diffusion at disc level.

The results obtained with an elastic aluminum disc deformation that is twice as great as that of the steel disc shows that the steel disc resists against thermomechanical solicitations better than the aluminum alloy one. This will have a direct impact on mechanical vibrations and balancing possibilities in compliance with international vibrations and noise standards in comparison with current vibration and noise measurements.

**Keywords :** *disc, thermal power plan, dynamic behavior, Von Mises constraint.*

### **Nomenclature**

<i>Lettres latines (symbole)</i>	<i>Grandeur physique (Unité SI)</i>
$C_p$	<i>capacité calorifique massique (J / Kg.K)</i>
$D$	<i>déplacements nodaux (m)</i>
$e$	<i>épaisseur (m)</i>
$E$	<i>module de Young (GPa)</i>
$F$	<i>force (N)</i>
$K$	<i>rigidité (N / m)</i>
$K_I$	<i>facteur de contrainte (N/m<sup>-3/2</sup>)</i>
$L$	<i>longueur (m)</i>
$q$	<i>Quantité de chaleur (J)</i>
$r$	<i>rayon (m)</i>
$T$	<i>température (K)</i>
$t$	<i>temps (S)</i>
$U$	<i>énergie interne (J)</i>
$W$	<i>travail fourni (J)</i>
$x, y, z$	<i>déplacement (m)</i>
$\dot{x}$	<i>Vitesse (ms<sup>-1</sup>)</i>
$\ddot{x}$	<i>Accélération (ms<sup>-2</sup>)</i>

<i>Lettres grecques (Symbole)</i>	<i>Grandeur physique (Unité SI)</i>
$\alpha$	<i>diffusivité thermique (m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)</i>
$\varepsilon$	<i>déformation élastique (m)</i>
$\varphi$	<i>flux de chaleur (Wm<sup>-2</sup>)</i>
$\lambda$	<i>conductivité thermique (W/m .K)</i>
$\nu$	<i>constante de poisson (-)</i>
$\theta$	<i>angle (rd)</i>
$\rho$	<i>masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</i>
$\sigma$	<i>Contrainte (N/m<sup>2</sup>)</i>
$\Omega$	<i>Domaine considéré (rd)</i>

Liste des abréviations utilisées :

- MEF : Méthode des éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis sont les suivantes :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
  - Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
  - Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
  - Assemblage des matrices élémentaires, prise en compte des conditions aux limites ;
  - Résolution du système d'équations ;
  - Utilisation d'un logiciel de programmation bien défini dont ici, nous utilisons Matlab.
- 
- X(THER) : Déplacement thermique suivant la direction  $ox$ , depuis la programmation de notre logiciel Matlab ;
  - F(THER) : Force thermique suivant la direction  $ox$ , depuis la programmation de notre logiciel Matlab ;
  - Alliage d'aluminium : la marque 6061 : la désignation européenne (Al Mg1SiCu), pour la composition chimique et caractéristique mécanique [1, 2] ;
  - Acier : la marque 56T5 : la désignation européenne (X19CrMoNbVN11-1), pour la composition chimique et caractéristique mécanique [3].

## 1. Introduction

Nous étudions le comportement thermomécanique du disque d'un rotor en acier selon la température en comparaison avec l'alliage d'aluminium en tenant compte des caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques comme la constante de poisson, le module de Young, etc. [1, 3]. Le comportement thermomécanique est étudié à l'aide d'un logiciel de programmation à savoir Matlab, très performant, en considérant la forme géométrique circulaire plate du disque extérieur de rayons interne et externe [4], comme grandeur caractéristique d'entrée, le champs de température sollicité en certains points du disque. Nous aurons comme résultats à partir de notre simulation par mef avec Matlab : Trois figures illustratives, la diffusion de la température dans le disque, la déformation élastique du disque, la diffusion des contraintes de Von Mises au profil du disque et les grandeurs caractéristiques de sorties, les paramètres déplacement thermique suivant la direction  $ox$ , la force thermique suivant la direction  $ox$ , mesurés et comparés. Ce qui permettra de faire le choix selon les sollicitations thermiques, le type de matériaux de la constitution du disque du rotor, le mieux adapté en turbine de centrale thermique entre l'alliage d'aluminium et l'acier. Nous aurons une diminution des vibrations mécaniques engendrées par le disque durant son fonctionnement, pour que nous puissions être conformes aux normes internationales de vibrations et acoustiques en milieu industriel, en vigueur du point de vue environnement et sécurité.

## 2. Méthodologie

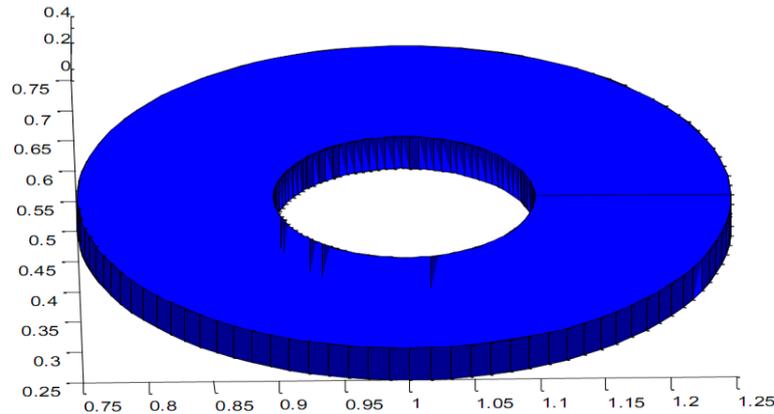
### 2-1. Description théorique du modèle du disque

Le disque est un cylindre creux de rayon intérieur ( $R1$ ), rayon extérieur ( $R2$ ) et d'épaisseur ( $e$ ) ou de longueur ( $L$ ). Comme illustration nous avons la **Figure 1**, simulation simple du disque par Matlab, **Figure 2**, simulation du disque par la méthode des éléments finis.

## 2-2. Schéma du disque

### 2-2-1. Schéma avec Matlab

Le model de programmation de la de simulation du disque, avec les caractéristiques géométrique ci-dessous [4].

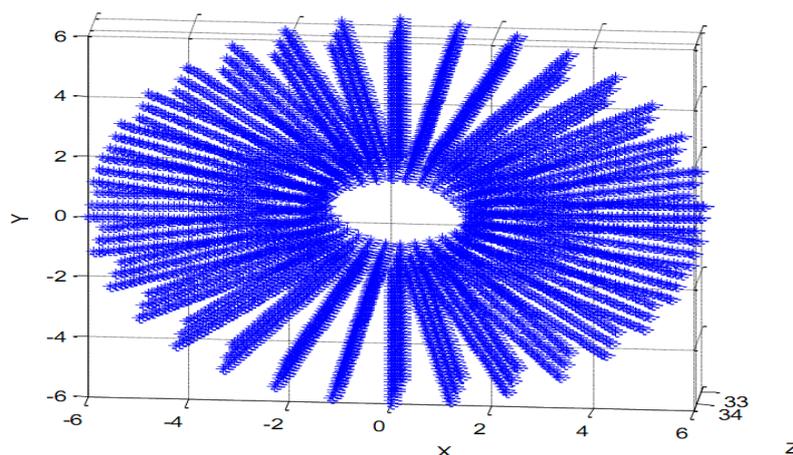


**Figure 1 : Schéma de disque par patch de Matlab**

$R_{int} = 0.1$  mm, rayon intérieur du disque ;  $R_{ext} = 0.25$  mm, rayon extérieur du disque ; Centre = [1, 0.5]; centre du disque ;  $X_{int} = R_{int} \cdot \cos(t)$ ; coordonnées suivant ox ;  $X_{ext} = R_{ext} \cdot \cos(t)$ ; coordonnées suivant ox ;  $Y_{int} = R_{int} \cdot \sin(t)$ ; coordonnées suivant oy ;  $Y_{ext} = R_{ext} \cdot \sin(t)$ ; coordonnées suivant oy ;  $Z_1 = 0$ ; origine en oz ;  $Z_2 = 0.24$ ; hauteur en oz

### 2-2-2. Schéma du disque par MEF

Une description de la MEF pourrait être définie sous la forme suivante : la structure à analyser est divisée en plusieurs éléments (petites pièces). Ces éléments sont ensuite reconnectés par l'intermédiaire des nœuds. Ces nœuds sont « des points de colle » qui maintiennent les éléments dans un ensemble unitaire [5].



**Figure 2 : Schéma de disque par mef avec Matlab**

$R_{int} = 1.5$  mm, rayon intérieur du disque ;  $R_{ext} = 6$  mm, rayon extérieur du disque ; Centre = [0, 0]; centre du disque ;  $X_{int} = R_{int} \cdot \cos(t)$ ; coordonnées suivant ox ;  $X_{ext} = R_{ext} \cdot \cos(t)$ ; coordonnées suivant ox ;  $Y_{int} = R_{int} \cdot \sin(t)$ ; coordonnées suivant oy ;  $Y_{ext} = R_{ext} \cdot \sin(t)$ ; coordonnées suivant oy ;  $Z_1 = 33$ ; origine en oz ;  $Z_2 = 34$ ; fin hauteur en oz

## 2-3. Transfert de chaleur par conduction

### 2-3-1. Introduction

Nous cherchons simplement à pouvoir décrire l'état thermique interne d'une structure (répartition de la température et des flux de chaleur) soumise à différentes conditions aux limites thermiques stables une fois que tous les processus dépendants du temps se sont stabilisés.

### 2-3-2. Loi de Fourier

Le flux de chaleur (dimension  $W/m^2$ ) transféré par conduction dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction. Cette loi, dite de Fourier [6], est donc telle que la composante sur l'axe Ox du flux est égale à :

$$\varphi_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

$\varphi_x$  est la composante du flux sur l'axe Ox et T la température au point considéré. Dans cette loi, postulée dès 1822 par Fourier, le coefficient de proportionnalité  $\lambda$  est une caractéristique physico-chimique du point matériel désignée sous le nom de conductivité ou conductibilité thermique. Dans le système international, elle s'exprime en (W / m.K) par unité.

### 2-3-3. Équation générale du bilan de transfert de chaleur par conduction par MEF

Pour la transmission de la chaleur [6 - 8]. Soit un élément matériel de volume élémentaire ( $dx dy dz$ ), dans le repère (O, X, Y, Z) considéré. Le milieu du solide étant soumis à des gradients de température, l'énergie interne du point matériel va varier. Le système étant immobile, son énergie cinétique est nulle, et les variations d'énergie potentielle sont négligeables. En fait, on se limite aux variations d'énergie interne et ceci restera valable même dans le cas où le système considéré est ouvert. Dans ces conditions, le bilan énergie s'écrit :

$$\frac{\partial(\rho \cdot U \cdot dx dy dz)}{\partial t} = \delta q + \delta W_s \quad (2)$$

U étant l'énergie interne par unité de masse et  $\delta q$  et  $\delta W_s$  les débits élémentaires respectifs de chaleur et de travail fournis par le milieu extérieur au système. Le débit élémentaire de travail d'origine mécanique est généralement nul. Le débit de chaleur  $\delta q$  se compose d'une part de la chaleur fournie par le milieu extérieur au système par conduction, soit  $\delta q_c$ , et d'autre part de la chaleur engendrée à l'intérieur du volume élémentaire (effet joule, champ électromagnétique, bombardement électronique, etc.) Soit  $\delta q_e$ .

$$\delta q_c = - \text{div} \varphi dx dy dz \quad (3)$$

et

$$\delta q_e = q_e dx dy dz \quad (4)$$

Le flux de chaleur par conduction s'écrit, de manière générale,  $-\lambda \text{ grad } T$ , et  $q_e$  est le débit de chaleur engendré par unité de volume.

$$\text{Or : } \text{div} \varphi = \text{div} (-\lambda \text{ grad } T) = -\lambda \text{ div} (\text{grad } T) = -\lambda \nabla^2 T \quad (5)$$

avec,

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{coordonnées cylindriques}) \quad (6)$$

L'Équation (2) devient.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot U \cdot dx dy dz) = \lambda \cdot \nabla^2 T \cdot dx dy dz + q_e \cdot dx dy dz$$

Soit

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \nabla^2 T = q_e$$

Ou encore

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{q_e}{\lambda} \quad (7)$$

avec,  $c_p$  capacité calorifique massique,  $q_e$  débit de chaleur engendré par unité de volume et  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  diffusivité thermique ( $m^2/s$ ) (8)

Les grandeurs physico-chimiques  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$  et donc  $\alpha$  sont supposées être, d'une part indépendantes de la température, et d'autre part, identiques dans tout le volume du solide (milieu à la fois homogène et isotrope).

### 2-3-4. Problème élastique

- Pas de déplacements en direction de ( $\theta$ ), mais déformations unitaires et contraintes. Les relations entre déformations unitaires et contraintes [9, 10] :

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1}{r} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = S u \quad (9)$$

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1}{r} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (10)$$

- En introduisant les fonctions d'interpolation pour les déplacements.

$$\varepsilon = S u = S N(r, z) x = B(r, z) x \quad (11)$$

- La matrice B qui met en relation en un point donné, la contrainte et le déplacement nodal est :

$$B = SN = \begin{vmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial r} & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial z} \\ r & 0 & r & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_1}{\partial r} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial r} \end{vmatrix} \quad (12)$$

$(N_1, N_2)$  Sont les fonctions de formes.

**2-3-5. La relation de déformation unitaire et contrainte, incluant la possibilité de contrainte thermique est donnée comme suite**

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \sigma_{rz} \end{pmatrix} = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (13)$$

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{vmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d_1 & d_2 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_1 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_2 & d_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$\varepsilon_0 = \alpha \Delta \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (15)$$

avec,  $\sigma$  : La contrainte ;  $\varepsilon$  : la déformation ;  $D$  : les déplacements nodaux ;  $\nu$  : constante de poisson,  $\alpha$  : diffusivité thermique.

➤ En appliquant le principe de minimum énergie potentielle, nous aurons.

$$Kx = f_{ex} + f_T \quad (16)$$

avec,  $K$  : la rigidité du disque ;  $f_{ex}$  et  $f_T$  : force d'origine mécanique et thermique ;  $x$  le déplacement suivant l'axe (OX).

$$K = 2\pi \int_{\Omega} B^t D B \tau dr dz \quad (17)$$

$$f_T = 2\pi \int_{\Omega} B^t D \varepsilon_0 \tau dr dz \quad (18)$$

$$f_{ex} = 2\pi \int_{\Omega} B^t f \tau dr dz \quad (19)$$

avec,  $(\Omega)$  le domaine considéré,  $f$  la force appliquée à l'élément  $(e)$ .

$\forall \delta u, \delta A$  travail virtuel des quantités d'accélération,  $(D)$  domaine considéré [11] :

$$\delta A = \int_D \vec{\gamma}(p) \delta \vec{u} dm(p) = \int_D \vec{u} \rho \ddot{\vec{u}} dv \quad (20)$$

Reportons ces **Équations** dans la forme variationnelle, nous obtenons :

$$\{\delta q\}^T \int_D ([N]^T \rho [N] \{\ddot{q}\} + [B]^T D [B] \{q\} + [N]^T \{f\}) dv = \{\delta q\}^T \int [N]^T \{T_d\} ds \quad (21)$$

avec,  $(q(t))$ : vecteur des paramètres de l'approximation.

$$\delta q = \langle 1, 0, 0 \dots 0 \rangle \text{ pour } N_1 \quad (22)$$

L'Équation (21) pouvant être écrite quelque soit  $(\delta q)$ , nous obtenons l'Équation matricielle :

$$[M] \{\ddot{q}\} + [K] \{q\} = \{F\} \quad (23)$$

avec,

$$[M] = \int_D [N]^T \rho [N] dv \quad (24)$$

$$[K] = \int_D [B]^T D [B] dv \quad (25)$$

$$f = \int_D [N]^T \{f\} dv + \int [N]^T \{T_d\} ds \quad (26)$$

Ce qui sera simulé par Matlab pour caractériser nos deux paramètres de comparaison : la force thermique ( $F_{term}$ ) et le déplacement ( $x_{term}$ ) provoqué par la montée du champ de température dans le disque.

### 3. Modèle de simulation développé

Le modèle de simulation est développé à l'aide du logiciel Matlab pour les données d'entrée et de sortie. Pour les données d'entrée : Obtenir la configuration géométrique du disque creux et le choix des caractéristiques mécaniques [6, 8, 12, 13].

- Diamètre du disque (interne et externe) ;
- Longueur du disque ;
- Densité du matériel ;
- Module d'élasticité E (module de Young) ;
- ( $\nu$ ): Rapport de Poisson ;
- ( $e$ ): l'épaisseur ;
- k: facteur de contrainte ;
- $\alpha$  : coefficient de dilatation thermique ;
- T : température [0 : 100 : 200] °C : variation de température entre ces trois valeurs à des points sélectionnés.

Toutes ces données seront réparties en trois fichiers :

- elast2dIPfunc : qui contient :
  - La programmation des différentes configurations des éléments (nombre de cotés et nœuds) pour avoir l'élément fini ;
  - la matrice de masse de l'élément fini ;

- la matrice des forces extérieures F(TERM) du système (masse) ;
- la matrice des déplacements X(TERM) de chaque élément ;
- la matrice de rigidité (K).

- MEftensionesTermicas : qui contient :
  - Le dessin de la répartition de la température dans le milieu continu du corps étudié [14] ;
  - le dessin de la déformation élastique du corps étudié ;
  - le dessin de la diffusion de la contrainte de Von Mises dans le milieu continu du corps étudiés.
- TEcilindro ou main : la parti d'exécution du programme de simulation qui contient :
  - Les données numériques d'entrées connues ;
  - la géométrie particulière de l'élément étudié ;
  - la temporisation (150 secondes).

Ceux qui correspondent aux trois figures géométriques et nous évaluons nos deux paramètres de comparaison (F(TERM) et X(TERM), pour le choix des matériaux.

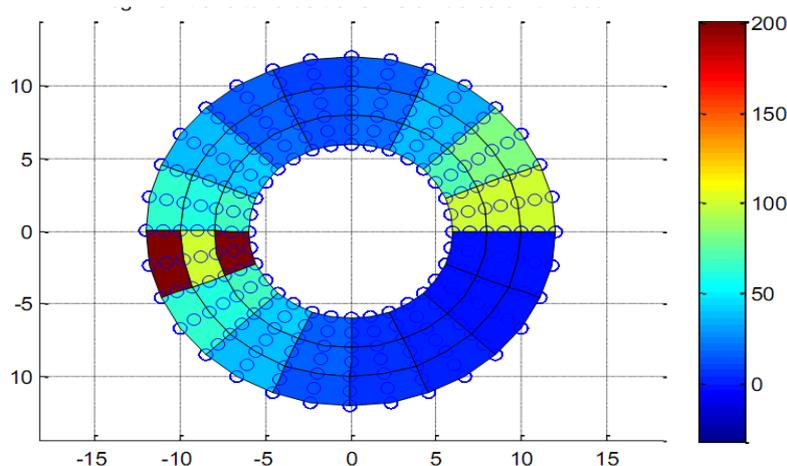
#### 4 Simulation et comparaison entre l'acier et l'alliage d'aluminium avec Matlab

Dans la simulation nous aurons trois graphiques (*Figure 3, Figure 4, Figure 5*) suivant les caractéristiques physiques considères surtout la température, la première, la géométrie du disque, le second, la déformation élastique et le troisième la déformation avec la diffusion de la contrainte de Von Mises, avec la monté de la température dans le temps [15]. Faire des comparaisons entre l'acier et l'alliage d'aluminium avec leurs caractéristiques physiques dans le *Tableau* suivants (*Tableau 1*).

**Tableau 1 : Caractéristiques physiques des deux matériaux [16 - 19]**

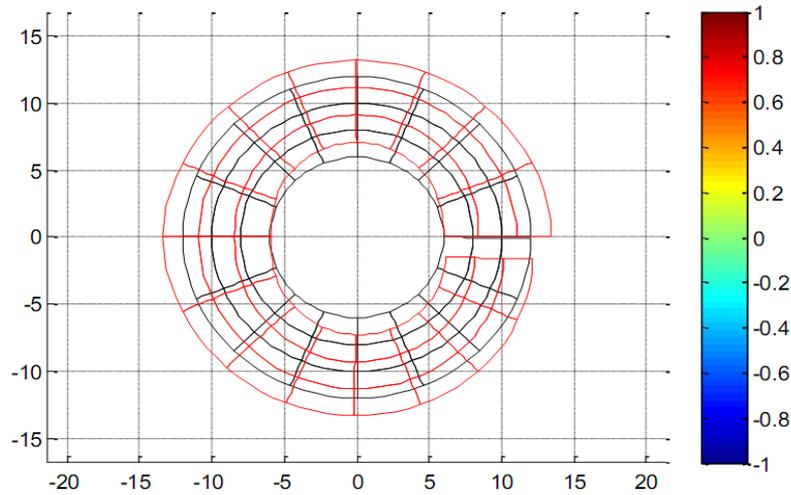
Caractéristiques physiques	E(GPa)	$\nu$	$K_I(Nm^{-3/2})$	Densité ( $\rho$ )	$\alpha(1 / k \text{ ou } 1 / ^\circ C)$	e(m)
Acier	195	0.3	63	7.85	$11. 10^{-6}$	0.01
Alliage d'aluminium	70	0.34	30	2.8	$23. 10^{-6}$	0.01

##### 4-1. Pour l'acier nous avons la simulation suivante



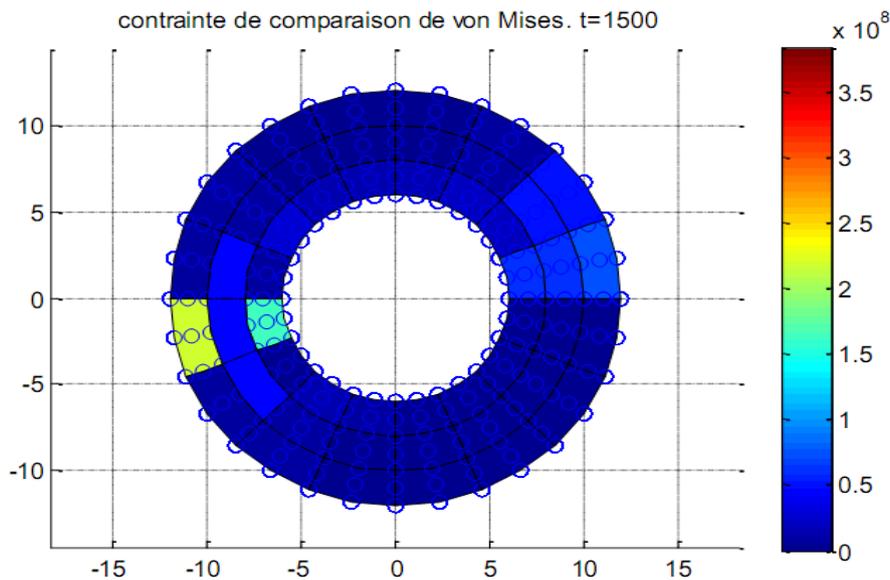
**Figure 3 : Phase de transition de transfert de chaleur durant les 150 premières secondes**

Comme dans la légende nous avons l'état de diffusion de la température depuis les points sollicités vers le reste du disque.



**Figure 4 :** Déformation thermo-élastique durant les 150 premières secondes

Comme dans la légende, la couleur noire symbolise le corps sans déformation et la couleur du bleu au rouge symbolisent la déformation thermo-élastique du disque selon la sollicitation thermo-mécanique.



**Figure 5 :** Contrainte de déformation de Von Mises durant les 150 premières secondes

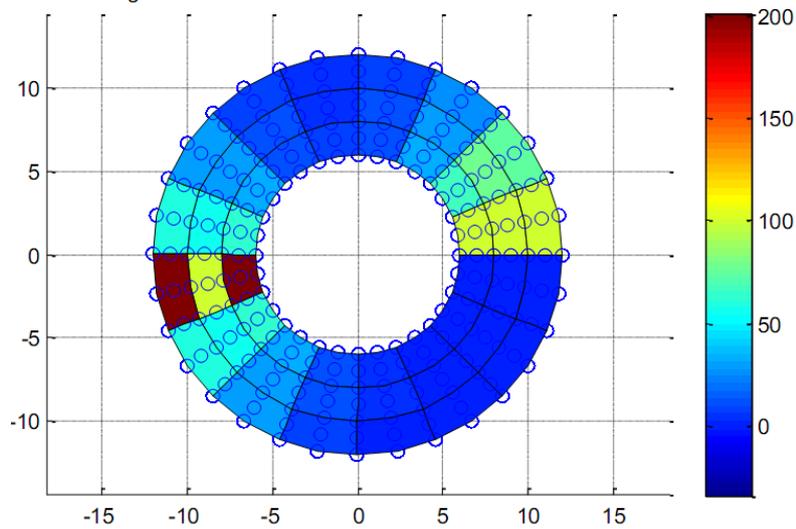
Ici nous avons, comme visible dans la légende la contrainte de Von Mises dans le disque considéré. Nous extrayons depuis la simulation avec Matlab, la valeur maximum de la contrainte de Von Mises. ( $\gg \text{Mean}(\max(\text{TC}))$ ) : Le maximum de la contrainte de Von Mises mise en jeu ( $\sigma$ ).

Soit :

$$\sigma = 2.3378 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

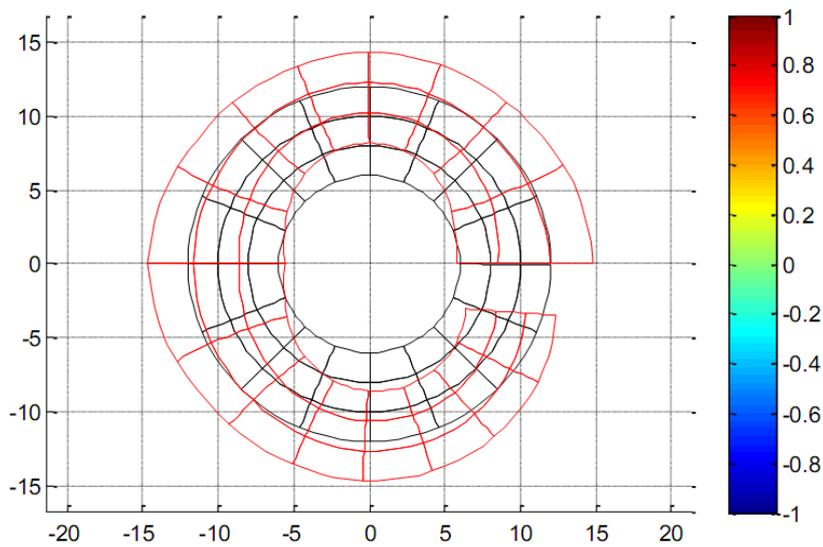
(27)

**4-2. Pour l'alliage d'aluminium nous avons la simulation suivante**



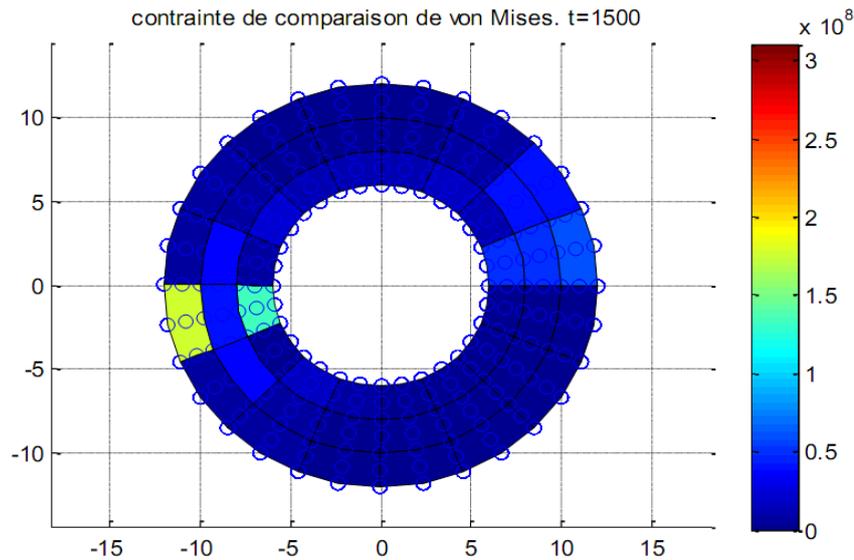
**Figure 6 :** *Phase de transition de transfert de chaleur durant les 150 premières secondes*

Comme dans la légende nous avons l'état de diffusion de la température depuis les points sollicités vers le reste du disque.



**Figure 7 :** *Déformation thermo-élastique durant les 150 premières secondes*

Comme dans la légende ,la couleur noir symbolise le corps sans deformation et la couleur du bleu au rouge symbolisent la deformation thermo-élastique du disque selon la sollicitation thermo-mécanique.



**Figure 8 :** *Contrainte de déformation de Von Mises durant les 150 premières secondes ou 1500 tierces*

Ici nous avons, comme visible dans la légende la diffusion de la contrainte de Von Mises dans le disque considéré. Nous extrayons depuis la simulation avec Matlab, la valeur maximum de la contrainte de Van Mises. (`>> Mean (max(TC))`) : Le maximum de la contrainte de Von Mises mise en jeux ( $\sigma$ ).

Soit :

$$\sigma = 1.9282e + 008 \text{ N} / \text{m}^2 \quad (28)$$

#### 4-3. Quantités physiques caractéristiques de sortie

Le déplacement thermique moyen, la force thermique :

- (XTERM) : Le déplacement thermique dans la direction x ;
- (FTERM) : La force thermique dans la direction x.

Nous recherchons la (norme (FTERM)) et la (moyenne (max (XTERM))).

- Alliage d'aluminium :

`>> norm (FTERM)`

$$\text{ans} = 2.1850e+008 \text{ N} \quad (29)$$

`>> mean (max (XTERM))`

$$\text{ans} = 0.0095 \text{ mm} \quad (30)$$

- Acier

`norm (FTERM)`

$$\text{ans} = 2.7878e + 008 \text{ N} \quad (31)$$

>> mean (max (XTERM))

ans = 0.0053 mm (32)

Tous ces résultats sont regroupés au niveau du **Tableau** suivant (**Tableau 2**).

## 5. Résultats et discussion

### 5-1. Résultats

**Tableau 2 : Résultats des données de sortie (FTERM et XTERM)**

Matériel	max (FTERM) (N)	max (XTERM) (mm)
Acier	$2.878 \cdot 10^8$ N	0.0053 mm
alliage d'aluminium	$2.1850 \cdot 10^8$ N	0.0095 mm

Nous considérons le maximum pour chaque paramètre étudiés, dans les deux cas de matériaux.

- *(max (FTERM) (N)) : le maximum de la force thermique ;*
- *(max (XTERM) (mm)) : le maximum du déplacement thermique.*

### 5-2. Discussion

Par comparaison aux deux grandeurs, la force et le déplacement, nous voyons que la force plus importante pour l'acier car plus tenace, le déplacement plus grand pour l'alliage d'aluminium que l'acier pour cette même raison. Tout ceci nous permet de faire le choix du matériel pour le disque selon les sollicitations en grandeurs physique comme la température, la contrainte déformation, pour jouer les premiers rôles dans l'utilisation du matériel. C'est-à-dire que les vibrations mécaniques seront plus importantes au niveau du disque de l'alliage d'aluminium que celui de l'acier, d'où la facilité d'équilibrage du disque en acier. Car l'équilibrage nous permet de diminuer ces vibrations mécaniques du disque. En conformité aux normes internationales de vibration et acoustique. L'inconvénient de l'acier [20] est que sa masse volumique est presque trois fois plus grande que l'alliage d'aluminium [21].

## 6. Conclusion

Cette étude nous a permis de comprendre le comportement thermique des métaux en général avec leurs caractérisations physiques, en particulier sur le disque qui est souvent monté sur le rotor, jouant plusieurs rôles dans diverses applications de l'ingénierie industrielle, comme les centrale à vapeur, diesel, et en fin jusqu'au plus petites machines tournantes. Tout cela à partir de la simulation en 2D, 3D avec notre logiciel de programmation hautes performances comme Matlab, permettant la visualisation en 2D, 3D, d'une couche de disque thermique, pour optimiser le comportement thermomécanique du disque, en variant les caractéristiques physiques caractéristiques vues ci-dessus, facilitant la sélection et les dimensions du matériau en fonction de la zone d'application. Par comparaison de nos grandeurs de sorties (F(THER) et X(TER)), pour l'acier et le l'alliage d'aluminium. Cette étude comparative dans le choix de ces métaux en terme thermomécanique pourra être étendue à d'autres métaux, dans diverses applications. Dont ici, nous

retiendrons, le choix de l'utilisation de l'acier pour le disque en centrale thermique, que sur l'alliage d'aluminium qui est plus souvent utilisé en structure d'avion, jusqu'à 75 % en masse. Les alliages d'aluminium sont aussi plus légers, d'où leur nom d'alliages légers et leur choix pour l'aviation. Donc les vibrations mécaniques seront plus minimales pour l'acier, facilitant ainsi l'équilibrage du disque. Ce qui nous permettra d'être conforme aux normes internationales des bruits et vibrations de machines industrielles en vigueur, du point de vue environnement et sécurité.

### Références

- [1] - [http://www.aubertduval.fr/uploads/tx\\_obladygestionproduit/6061\\_FR.pdf](http://www.aubertduval.fr/uploads/tx_obladygestionproduit/6061_FR.pdf), pp.1 - 2
- [2] - <http://www.aubertduval.fr/produits/tableau-des-nuances/alliages-daluminium/produit/2024.html>
- [3] - [http://www.aubertduval.fr/uploads/tx\\_obladygestionproduit/56T5\\_FR.pdf](http://www.aubertduval.fr/uploads/tx_obladygestionproduit/56T5_FR.pdf), p.1 - 2
- [4] - <https://stackoverflow.com/questions/27668343/3d-ring-in-matlab-using-patch>
- [5] - DANIEL CHOI, 'Méthode des éléments finis par l'exemple'. Archive ©Daniel Choi 2010, (2010) 63 - 69 p.
- [6] - [http://www.utc.fr/~houde/TF06/Cours\\_Transfert\\_de\\_chaleur.pdf](http://www.utc.fr/~houde/TF06/Cours_Transfert_de_chaleur.pdf), pp.1 - 4
- [7] - J BRAU, 'Transfert de chaleur par conduction'. Archive © [J. Brau], [2006], pp. 57,62-63,66-69.
- [8] - BENKHEDDA MOHAMED, 'transferts thermiques dans un conduit cylindrique annulaire muni d'ailettes'. Mémoire de master 2, (2010) 25 - 30, 31 - 66 p.
- [9] - ALI BELHOCINE, 'Thermomécanique des disques de frein, application du code de calcul ANSYS v11.0'. Thèse, (2015) 50 - 53 p.
- [10] - MECHALIKH MUSTAPHA, 'Simulation thermomécanique d'un piston de moteur diesel à injection directe par le logiciel abaqus : Influence du matériau'. Mémoire de master 2, (2010) 39 - 57 p.
- [11] - HERVE OUDIN, 'Méthode des éléments finis'. Archive ouverte, (2008) 48 - 52 p.
- [12] - DANIEL GAY, JACQUES GAMBELIN, 'Dimensionnement des structures'. Edition Hermès (1999), et S Laroze, J.J. Barreau, "Mécanique des structures», édition Masson, (1988)
- [13] - BOURAS ABDELKRIM, 'Contribution à l'étude des transferts de chaleur et de masse au sein d'un espace annulaire elliptique d'axe horizontal'. Thèse, (2015) 25 - 44 p.
- [14] - YVE JEANNOT, 'Transfert thermique'. Edilivre, (2008) 1 - 16 p.
- [15] - MME BADACHE SOUAD, 'Contribution à la modélisation thermique d'une machine à reluctance variable à double saillance (MRV6 / 4) par éléments finis en 2D et 3D'. Thèse, (2016) 60 - 98 p.
- [16] - [http://www.fast.u-psud.fr/~doumenc/la200/CoursThermique\\_L2.pdf](http://www.fast.u-psud.fr/~doumenc/la200/CoursThermique_L2.pdf), pp.16-17-19
- [17] - [http://www.construiracier.fr/fileadmin/3\\_publications/pour\\_aller\\_plus\\_loin/articles-experts/Proprietes\\_physiques\\_de\\_l\\_acier.pdf](http://www.construiracier.fr/fileadmin/3_publications/pour_aller_plus_loin/articles-experts/Proprietes_physiques_de_l_acier.pdf)
- [18] - LUC TREMBLEY, 'La dilatation thermique'. Archive, Version 2016b, (2016) 1 - 2 p.  
<http://physique.merici.ca/materiaux/chap11.pdf>
- [19] - <http://www.metaux-detail.com/pdf/caracteristique/PROPRIETESPHYSIQUESDESALUMINIUM.pdf>
- [20] - THIERRY IUNG, JEAN-HUBERT SCHMITT, 'Durcissement des aciers- Aciers ferritiques, perlitiques, bainitiques et martensitiques'. Technique de l'ingénieur, M4341, (2017) 69 - 72 p.
- [21] - CHRISTIAN VARGEL, 'Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages'. Technique de l'ingénieur, M430, (2005) 27 - 30 p.