



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme de  
Master en Génie Mécanique  
Option Construction Mécanique

### **Thème**

**Simulation numérique du comportement d'un disque de frein  
sous l'effet de température de frottement**

**Proposé et encadré par :**

Pr. TEMMAR Mustapha

Dr. SALHI Merouane

**Réalisé par :**

Mokaddem Abderraouf

Mokaddem Youcef

Année universitaire 2019/2020

---

## **Remerciements**

*Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université de Blida 1.*

*Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.*

*Nous remercions Monsieur SALHI merouane et Monsieur TEMMAR Mustapha pour avoir accepté de diriger cette thèse, et dont l'aide précieuse nous été indispensable sur le plan scientifique et humain.*

*Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.*

*Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.*

---

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes parents qui m'ont beaucoup aidé pour terminer mes études, et qui m'onttellement encouragé.*

*A toute la famille sans exception.*

*A mes encadreurs Pr. **Temmar Mustapha**, Dr. **Salhi Merouane** et tous les enseignants.*

*A mes amis : **ZAKI, balkassem , billem, ghofrane, bahri et islam.***

*A toutes mes amis de la promotion génie mécanique sans citer les noms.*

*A tout ce qui m'à 'aider durant ma vie.*

---

# Sommaire

## CHAPITRE I : LE FREINAGE

I.1.Introduction .....	1
I.2.Structure Générale d'un système de freinage .....	1
I.2.1.Définition .....	1
I.2.2.Fonction Global .....	2
I.3. Les technologies les plus utilisées pour le freinage .....	2
I.3.1.Le frein à tambour .....	3
I.3.1.1.Fonctionnement .....	3
I.3.1.2.Avantages et Désavantages de frein à tambour .....	4
I.3.2.Le frein à disque .....	5
I.3.2.1. Historique .....	5
I.3.2.2.Fonctionnement .....	6
I.3.2.3. Avantages et désavantages du disque à frein .....	6
I.3.2.4. Les Composant d'un frein disque .....	7
I.3.2.4.1. Etrier .....	7
I.3.2.4.1.1. Fonctionnement .....	8
I.3.2.4.1.2.Types d'étriers de frein .....	8
a) Étriers de frein fixes .....	8
b) Étriers de frein flottants .....	9

---

I.3.2.4.2.Le disque .....	10
I.3.2.4.2.1. Les Types de disque frein .....	11
a) Le disque plein .....	11
b) disque ventilé .....	11
c) disque perforé .....	12
d) disque céramique et carbone .....	13
I.3.2.4.3. Les plaquettes .....	13

## **Chapitre II : TRANSFERT CHALEUR ET MATERIAUX**

### **DES DISQUE ET DES PLAQUETTES DE FREIN**

II.1. Transfert chaleur.....	15
II.1. Introduction.....	15
II.1.2. Définition .....	16
II.1.3. Champ de température .....	16
II.1.4. Gradient de température .....	17
II.1.5. Flux de chaleur .....	17
II.1.6. Les Modes de transfert de chaleur.....	18
II.1.6.1. Conduction.....	18
II.1.6.1.1. Les régimes permanents .....	19
II.1.6.1.2 Les régimes transitoires .....	19
II.1.6.2. Convection.....	20
II.1.6.3. Rayonnement.....	20
II.2. LES MATERIAUX DU DISQUE DE FREIN .....	21
II.2.1. Les Matériaux du disque frein.....	21
II.2.1.1. Fonte grise .....	21

---

II.2.1.2. Aciers inoxydables .....	24
II.2.1.3. Matériaux composites .....	25
II.2.1.3.1. Composites carbone- carbone.....	26
II.2.1.3.1.1. Propriétés des composites carbone-carbone (C-C) .....	26
II.2.1.3.2. Composites à matrice métallique(MMC) .....	28
II.2.1.3.3. Composites à matrice céramique (CMC) .....	29
II.2.2. Matériaux des garnitures.....	30
II.2.3. Matériaux des supports .....	30
II.2.4. CRITERES D'EVALUATION D'UN SYSTEME DE FREINAGE .....	30
II.2.4.1 Efficacité .....	31
II.2.4.2. Endurance .....	31
II.2.4.3. Confort .....	32

## **Chapitre III : MODELISATION ET ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS**

III.1. Introduction. ....	33
III.2. Principe de la méthode .....	34
III.3. Présentation du logiciel.....	34
III.4. les principales étapes pour simulation numérique d'un disque de frein .....	35

## **CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS**

IV.1. Introduction.....	47
IV.2. Modélisation du disque de frein .....	48

---

IV.3.Simulation du problème mécanique .....	48
IV.4. Création du modèle .....	49
IV.4.1. Assemblage des plaques avec le mécanisme .....	50
IV.4.2. Les outils de système de fixation et le système hydraulique .....	51
IV.4.3.assemblage complet du système de freinage .....	51
IV.4.4.la géométrie d'étude .....	52
IV.5.Choix du maillage .....	52
IV.5.1.le maillage de système freinage .....	53
IV.6. Conditions aux limites .....	53
IV.6.1. Conditions mécanique .....	53
IV.6.2. Condition thermique .....	54
IV.7.Les résultat de simulation .....	55
IV.7.1.déplacement total .....	55
IV.7.2.déformation élastique équivalente .....	57
IV.7.3.contrainte équivalente .....	59
IV.8.conclusion .....	60
Conclusion générale .....	61
Bibliographie.....	63

---

## Liste des figures

**Figure I.1:** Schéma d'implantation du système de freinage

**Figure I.2 :** Illustration d'un frein à tambour

**Figure I.3 :** Fonctionnement d'un frein à tambour, au repos (a) et lors du freinage (b)

**Figure I.4 :** Illustration d'un frein à disque

**Figure I.5 :** Fonctionnement d'un frein à disque

**Figure I.6 :** Le système de frein à disque

**Figure I.7 :** un étrier fixe

**Figure I.8 :** un étrier flottant

**Figure I.9 :** Le disque

**Figure I.10 :** Le disque plein

**Figure I.11:** Disque ventilé

**Figure I.12 :** disque perforé

**Figure I.13 :** disques céramique et carbone

**Figure I.14 :** Plaquette de frein.

**Figure II.1 :** Définition du gradient thermique

**Figure II.2: Figure II. 2 :** (a) Fonte ductile perlitiques montrant la structure en «œil de bœuf», qui consiste en des nodules de graphite entourés de ferrite libre (blanc). Eau-forte: Nital 2% (Milan et al. 2004). (b) Fonte vermiculaire. Eau-forte: Nital 2% (Milan et al. 2004). (c) Fonte grise à matrice perlitiques représentant plusieurs flocons de graphite. Eau-forte: Nital 2% (Milan et al. 2004)

**Figure II.3:** Constitution d'un matériau composite

**Figure II.4:** Montre un disque en composite de carbone et de carbone dans un disque de frein

---



**Figure II.5 :** Quelques applications des CMC : (a) la tuyère d'un moteur spatial (image [3]), (b) le disque à aubes d'une turbine (image GE Energy), (c) un disque de frein haut de gamme (image Porsche).

**Figure II.6 :** un disque de frein déformé

**Figure.III.1 :** méthode d'importation de la géométrie

**Figure.III.2:** la forme géométrique de disque à frein

**Figure.III.3 :** commencer le maillage

**Figure.III.4 :** lancer opération de maillage

**Figure.III.5 :** Méthode d'application de condition thermique

**Figure.III.6 :** sélection les plaques

**Figure.III.7 :** La méthode d'application de condition support fixe

**Figure.III.8 :** sélection les boulons

**Figure.III.9 :** vérification de la condition thermique

**Figure.III.10 :** vérification du support fixe

**Figure.III.11 :** déplacement totale

**Figure.III.12 :** déformation équivalente

**Figure.III.13 :** contrainte équivalente

**Figure.III.14 :** les sollicitations et les résultats nécessaires

**Figure.III.15 :** résoudre le problème

**Figure.III.16 :** Comment obtenir un résumé des résultats

**Figure.III.17 :** Le nombre des éléments et des nœuds

**Figure.III.18 :** résumé des résultats

---

**Figure.IV.1:** application du flux de chaleur

**Figure.IV.2 :** le modèle du disque ventilé avec la paquette

**Figure.IV.3 :** le choix de matériaux

**Figure.IV.4 :** vue gauche et droite de la conception du disque

**Figure.IV.5 :** conception des plaques de frein

**Figure.IV.6 :** conception du mécanisme de freinage

**Figure.IV.7 :** assemblage des plaques avec le mécanisme

**Figure.IV.8 :** système de fixation

**Figure.IV.9 :** système hydraulique (tuyaux et goupille)

**Figure.IV.10 :** assemblage complet du système de freinage

**Figure.IV.11 :** la géométrie d'étude

**Figure.IV.13 :** Maillage de géométrie

**Figure.IV.14 :** condition support fixe (encastrement sur les trous de fixation)

**Figure.IV.15 :** condition thermique sur les plaques de frein

**Figure.IV.16 :** déplacement total pour les températures 100, 150, 200, 250, 300, 400 et 600 C°

**Figure.IV.17 :** Déformation élastique équivalente pour les températures 100, 150, 200, 250, 300, 400 et 600 C°

**Figure.IV.18 :** contrainte équivalente pour les températures 100, 150, 200, 250, 300, 400, 600 C°

---

## Liste des tableaux

**Tableau II.1 :** Composition chimique (% en poids) de certaines fontes grises utilisées par GM Brésil (GME-05002, 1999).

**Tableau II.2 :** Plages de composition pour l'acier inoxydable de qualité 321

---

## Résumé

L'objectif de ce travail est de présenter une étude du comportement thermique mécanique des disques de frein automobile afin de prédire les performances. En raison de sa complexité d'ingénierie, le logiciel ANSYS v.19a été utilisé pour modéliser les parties de la maquette numérique et simuler son problème thermomécanique.

Une étude mécanique du contact sec entre le disque ventilé et plaquette est présentée. La bonne prédiction de ce type de mécanisme est devenue un enjeu majeur pour les industriels. Un calcul numérique représentatif de la réalité peut être d'un grand intérêt économique car il peut fournir des informations sur les résultats du comportement avec la précision nécessaire pour ce qui sera en réalité dans les mêmes conditions de chargement et d'installation.

Les contraintes résultant de l'effet de la pression de freinage sur la plaquette et sous l'influence de la chaleur émise ; La résistance à la traction Von Mises a été obtenue (nécessaire pour la vérification selon la norme de résistance) à l'aide du logiciel ANSYS.

Ainsi, les analyses faites sur le comportement thermique et mécanique de ces prototypes permettent de faire une sélection idéale et économique de solutions technologiques qui sont de réelles méthodes d'amélioration et qui satisferont les besoins de l'ingénieur en charge de la conception des disques. Freins.

Suivant l'importance du système de freinage, A partir de cette idée, on a pris l'incitatif d'étudier ce problème sur des bases scientifiques dans le cadre de notre projet de fin d'étude

### Mots clés :

Ansys 19.0- méthode élément finis (MEF)-déplacement total-déformation équivalente-contrainte équivalente-disque de frein plein-disque de frein ventilé-flux de chaleur-coefficient de transfert chaleur- maillage-conditions aux limites-fonte grise -acier inoxydable-plaquette-étier-température

---

## Abstract

The objective of this work is to present a study of the mechanical thermal behavior of automotive brake discs in order to predict performance. Due to its engineering complexity, ANSYS 19 software was used to model parts of the digital mockup and simulate its thermo-mechanical problem.

A mechanical study of the dry contact between the ventilated disc and the pad is presented. Correct prediction of this type of mechanism has become a major issue for manufacturers. A numerical calculation representative of reality can be of great economic interest because it can provide information on the results of the behavior with the necessary precision for what will actually be under the same loading and installation conditions.

The stresses resulting from the effect of the brake pressure on the pad and under the influence of the heat emitted Von Mises tensile strength was obtained (required for verification against strength standard) using ANSYS software.

Thus, the analyzes carried out on the thermal and mechanical behavior of these prototypes make it possible to make an ideal and economical selection of technological solutions which are real improvement methods and which will meet the needs of the engineer in charge of the disc design Brakes.

Depending on the importance of the braking system, from this idea, we took the incentive to study this problem on a scientific basis as part of our end of study project.

### **Keywords:**

Ansys 19.0- finite element method (FEM) - total displacement - equivalent strain - equivalent stress - solid brake disc - ventilated brake disc - heat flow - heat transfer coefficient - mesh - boundary conditions - gray cast iron - stainless steel - plate-caliper-temperature

---

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقديم دراسة للسلوك الحراري الميكانيكي لأفراس مكابح السيارات من أجل التنبؤ بالأداء. نظرًا لتعقيده الهندسي، تم استخدام برنامج أنسيس 19.0 لنمذجة أجزاء من النموذج الرقمي محاكاة مشكلته الحرارية الميكانيكي.

تم تقديم دراسة ميكانيكية للتلامس الجاف بين القرص المتهوى والوسادة. أصبح التنبؤ الصحيح لهذا النوع من الآليات قضية رئيسية للمصنعين. يمكن أن يكون ممثل الحساب العددي للواقع ذا فائدة اقتصادية كبيرة لأنه يمكن أن يوفر معلومات عن نتائج السلوك بالدقة اللازمة لما سيكون في الواقع في نفس ظروف التحميل والتركيب.

تم الحصول على الضغوط الناتجة عن تأثير ضغط الفرامل على الوسادة وتحت تأثير الحرارة المنبعثة من قوة شد فون ميز (مطلوب للتحقق من معيار القوة) باستخدام أنسيس برنامج. وبالتالي، فإن التحليلات التي تم إجراؤها على السلوك الحراري والميكانيكي لهذه النماذج الأولية تجعل من الممكن إجراء اختيار مثالي واقتصادي للحلول التكنولوجية التي تعتبر طرق تحسين حقيقية والتي ستلبي احتياجات المهندس المسؤول عن تصميم القرص الفرامل.

اعتمادًا على أهمية نظام الكبح، من هذه الفكرة، أخذنا الحافز لدراسة هذه المشكلة على أساس علمي كجزء من مشروع دراستنا النهائية.

## الكلمات الدالة

أنسيس 19.0 - طريقة العناصر المحدودة - الإزاحة الكلية - الإجهاد المكافئ - الإجهاد المكافئ - قرص الفرامل الصلب - قرص الفرامل المتهواة - التدفق الحراري - معامل نقل الحرارة - الشبكة - الظروف الحدودية - الحديد الزهر الرمادي - الفولاذ المقاوم للصدأ - لوحة - الفرجار - درجة الحرارة

# Introduction Général

Une voiture ou automobile est un véhicule à roues entraînées par un moteur destiné au transport terrestre de charges. Ce mot apparut en 1875. Au départ l'académie Française le met au masculin. C'est en 1901 que son genre change et devient féminin. Après la 2ème guerre mondiale, laproduction automobile mondiale s'envole.

L'industrie automobile prend une place importante dans l'industrie de plusieurs grands pays industrialisés. Elle prend parfois un aspect stratégique compte tenu à la fois de sa proximité historique avec les industries militaires, de l'importance qu'elle peut prendre dans le produit intérieur et l'emploi de certains pays (États-Unis, France, Grande-Bretagne, Allemagne) et de l'image que l'automobile peut donner d'un pays auprès de l'extérieur (le design italien, l'American, la mécanique allemande, le zéro défaut japonais, l'innovation française, etc.).

Suivant l'importance du système de freinage, son inaltération est indispensable. A partir de cette idée, on a pris l'incitatif d'étudier ce problème sur des bases scientifiques dans le cadre de notre projet de fin d'étude.

Dans cette étude, on s'intéressera à la modélisation numérique du comportement thermomécanique des disques de frein des véhicules en appliquant le code de calcul ANSYS 19.0. Ainsi, on établit le champ de température du disque et des plaquettes de frein en fonction des conditions aux limites thermiques et mécaniques.

L'objectif de ce travail étant de présenter une étude du comportement thermomécanique des disques de frein automobiles et ce afin de prédire tenue lors de l'exploitation.

Voici les démarches suivies dans notre travail :

- Etude du système de freinage
  - Une modélisation est faite par le logiciel ANSYS.
  - Une simulation thermique est faite par le logiciel ANSYS.
-

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Les différents types d'installation de systèmes de freinage des véhicules routiers qui constituent le premier chapitre. On présente l'historique de frein, et les différents types de frein

- consacré à la formulation analytique de l'équation de chaleur tout en décrivant les modes de transfert thermique y intervenant.

- consacré à la présentation et à l'interprétation des différents résultats thermomécaniques obtenus à l'aide du code de calcul.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale présentant une synthèse des résultats de simulation obtenus et par des perspectives dans le domaine du contact sec glissant.

---



# CHAPITRE I : LE FREINAGE

## **I.1.Introduction :**

Les freins sont l'un des éléments clés de tout véhicule, sans lequel il n'est pratiquement pas possible d'utiliser le véhicule pour voyager. Il est clair qu'un frein, qui sert à ralentir le véhicule, ne doit pas être trop faible. Mais il est intéressant de noter que lors de la conception d'un système de freinage, il faut également veiller à ce qu'il ne soit pas trop efficace. Un frein trop fort nous exposerait continuellement aux effets néfastes d'un freinage soudain dans un bus ou une voiture. Si un véhicule est arrêté brusquement ou fortement, le passager peut heurter le siège avant ou tout ce qui s'y trouve. Par conséquent, un système de freinage trop efficace n'est pas nécessaire !

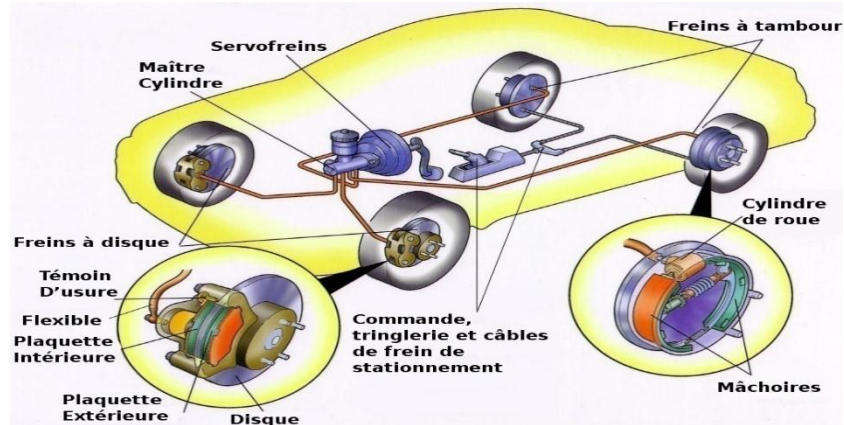
Le système de freinage est étroitement lié aux lois du mouvement de Newton. En effet, le phénomène ci-dessus est lié à la deuxième loi du mouvement de Newton, qui stipule: «Un corps continue à être dans son état de repos ou de mouvement à moins qu'une force extérieure n'agisse sur le même».

En revanche, si un système de freinage est trop faible, la distance d'arrêt augmenterait et donc pourrait conduire à des accidents. Ainsi, un système de freinage doit être suffisamment parfait pour arrêter le véhicule à une distance minimale de sécurité, sans affecter le confort du passager. Dans le but d'atteindre cet objectif, de nombreux développements ont été réalisés dans la technologie des systèmes de freinage, des freins mécaniques aux freins pneumatiques dans les automobiles. Dans cet article, nous aimerions fournir les informations pertinentes concernant le même.

## **I.2.Structure Générale d'un système de freinage :**

### **I.2.1.Définition :**

La plupart des voitures modernes ont des freins sur les quatre roues, actionnés par un système hydraulique. Les freins peuvent être du type à disque ou à tambour. Les freins avant jouent un plus grand rôle dans l'arrêt de la voiture que les freins arrière, car le freinage projette le poids de la voiture vers l'avant sur les roues avant. La structure ci-dessous explique cela [1].



**Figure I.1:** Schéma d'implantation du système de freinage [2]

### **I.2.2.Fonction Global :**

La fonction principale du système de freinage est de ralentir ou de diminuer la vitesse d'un véhicule. En appuyant sur la pédale de frein, les plaquettes de frein se compriment contre le rotor fixé à la roue, ce qui oblige alors le véhicule à ralentir en raison du frottement.

Un système de freinage absorbe l'énergie cinétique du véhicule mécaniquement ou électriquement afin de diminuer sa vitesse. Dans les freins mécaniques, le frottement convertit l'énergie cinétique en chaleur. Dans les freins électriques, un courant électrique force un aimant à appliquer les freins

Les véhicules sont équipés de servofreins pour augmenter ou augmenter la pression exercée sur la pédale de frein. Ils minimisent la pression nécessaire du conducteur pour décélérer ou arrêter le véhicule [3]

### **I.3. Les technologies les plus utilisées pour le freinage:**

Il existe deux types de technique les plus couramment utilisées dans le système de freinage à savoir :

- les freins à tambour
- les freins à disque

### **I.3.1.Le frein à tambour :**

De nombreuses voitures ont des freins à tambour sur les roues arrière. Les freins à tambour comportent de nombreuses pièces et sont plus difficiles à entretenir, mais ils sont moins coûteux à fabriquer et ils intègrent facilement un mécanisme de freinage d'urgence.

Un frein à tambour est un frein dans lequel le frottement est causé par un ensemble de patins ou de plaquettes qui pressent contre la surface intérieure d'un tambour rotatif. Le tambour est connecté à la roue rotative [4]

Une illustration de ce type de système est présentée à La figure I.2.



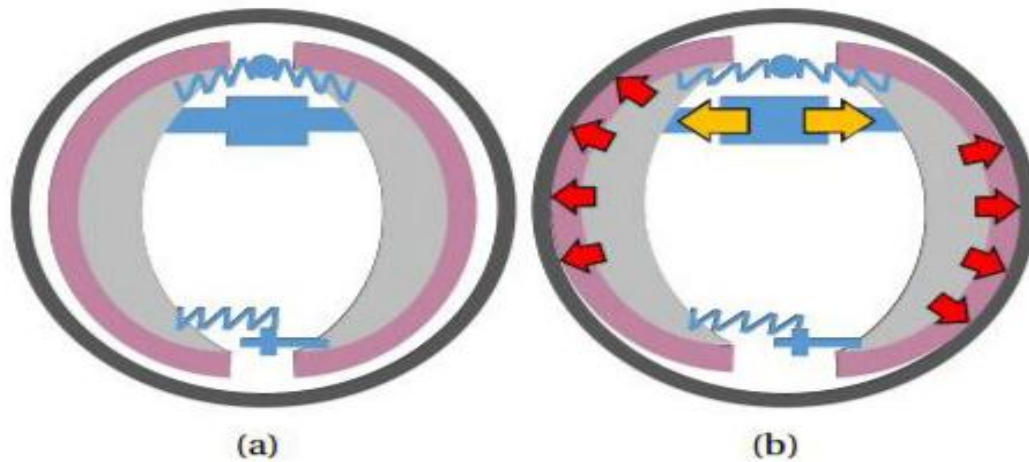
**Figure I.2:** Illustration d'un frein à tambour

#### **I.3.1.1.Fonctionnement :**

Dans le système mécanique comme dans un deux-roues et un pousse-pousse automatique, les patins de frein sont actionnés par une came, qui est fixée à la tringlerie de frein et à la pédale. Lorsque vous appuyez sur la pédale de frein, la came tourne. Ainsi, il provoque l'expansion des mâchoires de frein vers l'extérieur et le frottement contre le tambour.

Le frottement entre les garnitures de frein et le tambour provoque l'arrêt de la rotation du tambour; arrêtant ainsi la roue (figure I.3(a)).

Lorsque vous relâchez la pédale de frein, les ressorts de rappel ramènent les mâchoires de frein dans leur position d'origine. Il en résulte un espace entre eux et le tambour et de le faire tourner à nouveau librement (figure I.3(a)) [5]



**Figure I.3 :** Fonctionnement d'un frein à tambour, au repos (a) et lors du freinage (b)

### I.3.1.2. Avantages et Désavantages de frein à tambour :

#### a) Avantages

- Conception simple.
- Moins de pièces.
- Facile et moins cher à fabriquer.
- Faible coût de maintenance.
- Durée de vie comparativement plus longue

#### b) Désavantages

- Force de freinage faible par rapport aux disques
- Les freins «s'estompent» lorsque le conducteur les applique pendant une période prolongée
- La garniture de mâchoire de frein en amiante est nocive pour l'homme.
- Lorsqu'elle est mouillée, la poignée de freinage diminue considérablement
- Les revêtements sans amiante retiennent l'humidité; provoquant la prise soudaine des freins[5]

## **I.3.2. Le frein à disque :**

### **I.3.2.1. Historique :**

Bien que Frederick William Lanchester soit généralement reconnu comme étant le premier constructeur automobile britannique à breveter une version mécanique du frein à disque automobile en 1902, l'ingénieur automobile basé à Birmingham ne peut vraiment être crédité que pour l'amélioration d'une technologie existante. En effet, un système de freinage à disque et à étrier très basique avait été installé sur la roue avant d'un véhicule électrique construit aux États-Unis par Elmer Ambrose Cleveland en 1898. Les performances du système de freinage à disque monté sur les voitures de Lanchester étaient gravement limitées car le moyen de freinage agissant sur le disque était en cuivre. Non seulement ces « tampons » de cuivre étaient bruyants en fonctionnement, mais ils se sont également rapidement usés en raison des conditions poussiéreuses qui régnaient sur les routes à l'époque.

Bien que les versions ultérieures aient des patins doublés d'amiante plus efficaces, les systèmes de freinage à tambour se sont avérés plus simples et moins chers à fabriquer et sont devenus le choix préféré des constructeurs automobiles jusqu'au milieu des années cinquante [6]

En comparaison aux freins à tambours, les freins à disque freinent plus efficacement, refroidissent plus vite et présentent des propriétés autonettoyantes, du fait des forces centrifuges mises en jeu. Une illustration de ce type est présentée à la figure. I.4.



**Figure I.4 :** Illustration d'un frein à disque

### I.3.2.2.Fonctionnement :

Le principe de base du disque de frein se résume en la transformation de l'énergie cinétique d'un véhicule en chaleur.

Concrètement, un disque de frein est un système qui utilise un disque (3) et des plaquettes (1). Le premier est fixé sur le moyeu de la roue, les secondes, maintenues dans un étrier (2) ou une chape, ont pour mission de frotter de chaque côté du disque. Lorsqu'un freinage est nécessaire, un mécanisme pousse les plaquettes qui viennent frotter sur le disque, entraînant une force de frottement et la création d'un couple de freinage. Cette action engendre une production de chaleur, nécessitant elle-même la présence d'un mécanisme de refroidissement. On distingue dans ce domaine deux types de disque de frein[7]



**Figure I.5 :** Fonctionnement d'un frein à disque [10]

### I.3.2.3. Avantageset désavantages du disque à frein :

#### > Avantages

La présence de freins à disques sur les véhicules de tourisme offre de réels avantages :

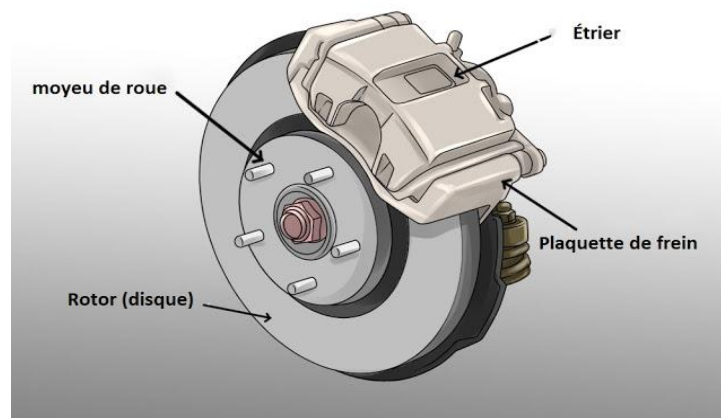
- la qualité de freinage est nettement supérieure à celle obtenue avec un frein à tambour
- le frein à disque a l'avantage d'être plus progressif même si, pour une meilleure efficacité, une pression plus importante est nécessaire et
- les disques de frein résistent mieux à la chaleur

## >Désavantages

Les inconvénients des freins à disque l'emportent sur les avantages ; ils sont chers, plus lourds que les freins à étrier, plus compliqués et posent des problèmes de compatibilité. Les roues à disque ne fonctionneront pas sur vos vélos actuels, et vice versa. Il existe également un risque de problèmes de dissipation thermique lors de longues descente [8]

### I.3.2.4. Les Composant d'un frein disque :

Le disque de frein est un organe de friction fortement sollicité, il doit résister à des températures de 600° C à 800° C dont les éléments sont illustrés sur la figure I.6



**Figure. I.6 :** Le système de frein à disque[9]

Les freins à disque comportent trois éléments de base est :

- 1-étrier
- 2-disque (rotor)
- 3-plaquette de frein

#### I.3.2.4.1. Etrier :

L'étrier de frein est un élément essentiel du système de freinage d'un véhicule. Cette pièce s'adapte sur le rotor et fonctionne comme une pince.

L'étrier de frein maintient les plaquettes de frein et est surtout vu dans les véhicules équipés de freins à disque. La plupart des voitures d'aujourd'hui ont des freins à disque dans les roues avant, mais certains autres camions et véhicules peuvent aussi en avoir dans les roues arrière.

#### **I.3.2.4.1.1. Fonctionnement :**

Un étrier de frein est un mécanisme de serrage qui applique une friction sur les rotors pour ralentir et empêcher les roues de tourner.

Le fait d'appuyer sur le frein crée une pression hydraulique dans le maître-cylindre à l'aide du liquide de frein. Ceci, à son tour, active les pistons dans l'étrier de frein, poussant les plaquettes de frein (plaques métalliques liées avec un matériau de friction) vers l'intérieur et l'extérieur des rotors. Puisque la roue est fixée au rotor, son mouvement ralentira ou s'arrêtera lorsque les freins seront appliqués

#### **I.3.2.4.1.2. Types d'étriers de frein :**

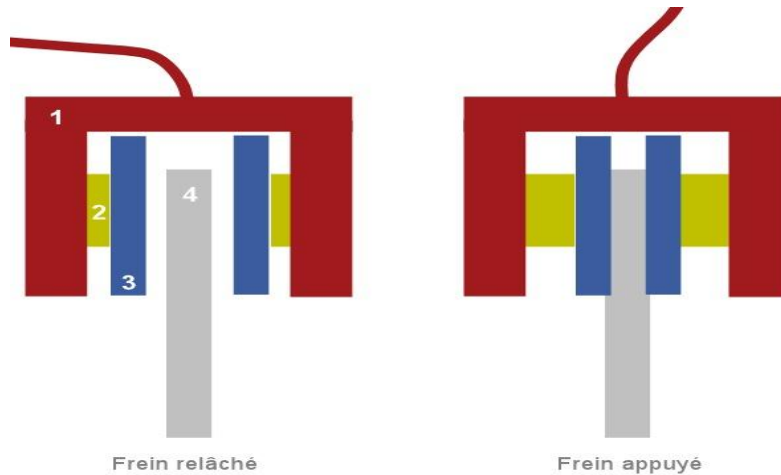
Il existe deux types courants d'étriers de frein : les étriers de frein fixes et flottants. Voici comment différencier les deux.

##### **a) Étriers de frein fixes :**

Ce type d'étrier de frein est boulonné au support et possède des pistons des deux côtés du rotor. Les étriers fixes auront entre deux et six pistons disposés sur les côtés opposés du rotor. Beaucoup préfèrent ce type de conception pour ses performances. Ceux-ci ne vous coûteront généralement plus cher que les étriers flottants.

Ce système est utilisé sur les véhicules premium car plus cher à mettre en œuvre (mais aussi plus efficace donc. Cela dépendra aussi du nombre de pistons que contient l'étrier). C'est le liquide de frein (sous pression dans le circuit) qui va actionner/pousser des pistons (2) dans l'étrier (1). En appuyant sur la pédale on augmente la pression du circuit, repoussant les pistons de l'étrier sur lesquels les plaquettes (3) sont posées. Les plaquettes vont alors buter contre le disque (4) qui tourne provoquant ainsi leur arrêt. Ici l'étrier ne bouge pas, seules les pistons et les plaquettes font un mouvement vers l'avant.



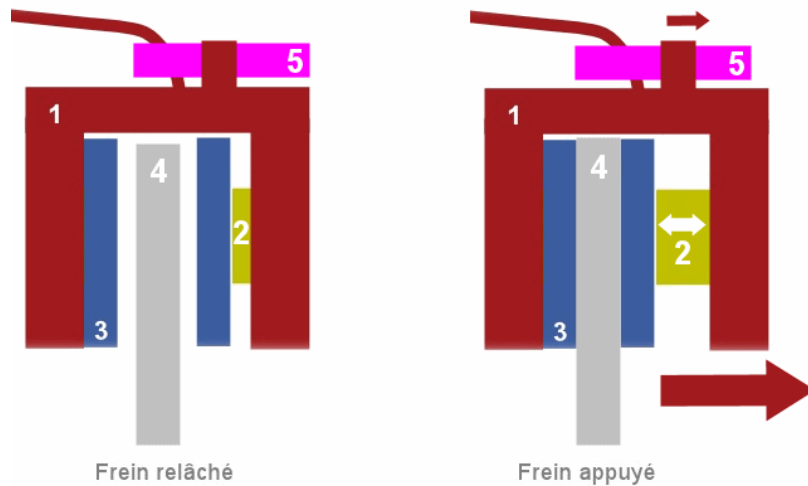


**Figure. I. 7** : un étrier fixe

### b) Étriers de frein flottants

Ce type d'étrier de frein est également appelé « étrier coulissant ». Cette conception comporte un ou plusieurs pistons qui ne sont situés que sur un côté du rotor. Lorsque les freins sont appliqués, le piston pousse l'étrier entier vers le côté intérieur du rotor soit la surface tournée vers l'intérieur du véhicule

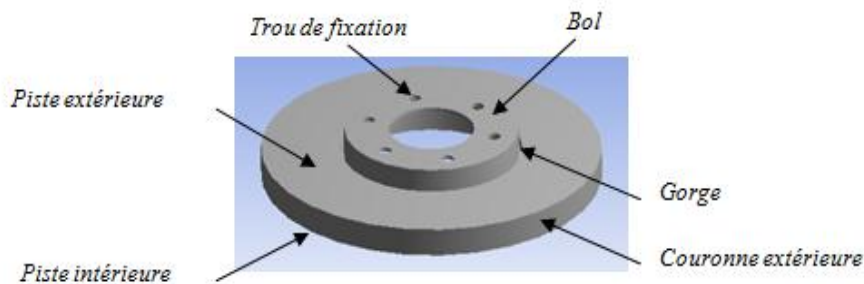
Ici il s'agit d'un étrier flottant, il peut bouger car il est fixé sur des axes appelés coulisseaux (5) (ou encore colonnettes). Grâce à cela, il n'y a besoin ici que d'un seul piston (2), ce qui réduit donc le coût mais aussi l'efficacité (présent sur les véhicules plus économiques, donc la majorité). Ici, l'action de freiner va à la fois pousser l'une des plaquettes (3) contre le disque (4) (grâce au piston (2) donc) mais aussi faire coulisser tout l'étrier (1) dans le sens opposé afin que la plaquette en face vienne aussi toucher le disque. Ici les disques et colonnettes sont immobiles même quand vous freinez, cela vous permettra peut-être de mieux comprendre le schéma ci-dessus (Figure I.10). Pour résumer, le fonctionnement du frein à disque utilisant un étrier flottant est d'utiliser la force d'un seul piston pour plaquer deux plaquettes contre le disque (la première est plaquée directement par le piston, et la deuxième se plaque grâce au mouvement de l'étrier entier). Quand une colonnette est grippée ou mal lubrifiée, il se peut alors que les plaquettes ne reviennent pas bien vers l'arrière quand on lâche le frein (semblable à un grippage des pistons sur un étrier fixe). De plus, si une seule colonnette sur deux est grippée, l'usure des plaquettes ne se fera pas de manière droite. Des plaquettes usées de manière anormale (face en "pente") est donc un indice éventuel que vos coulisseaux sont HS [10]



**Figure I.8:** un étrier flottant

#### I.3.2.4.2 Le disque :

Le disque est constitué d'un anneau plein avec deux pistes de frottement (Fig. I.11), d'un bol qui est fixé sur le moyeu et sur lequel est fixée la jante et d'un raccordement entre les pistes et le bol. Ce raccordement est nécessaire car l'anneau et la partie du bol qui est fixée au moyeu ne sont pas sur un même plan pour des questions d'encombrement et de logement des plaquettes et de l'étrier. La jonction entre le bol et les pistes est souvent usinée en forme de gorge pour limiter le flux de chaleur issu des pistes vers le bol afin d'éviter un échauffement excessif de la jante et du pneumatique. Les pistes de frottement sont dites extérieures quand elles se situent du côté intérieur quand elles se situent du côté de l'essieu[11]



**Figure I.9:** Le disque

#### **I.3.2.4.2.1. Les Types de disque frein :**

Le disque, solidaire de l'axe de roue, tourne à la même vitesse que celle-ci. Plus la quantité d'énergie cinétique convertie en chaleur sera élevée, plus le freinage sera efficace. Cependant, il ne faut pas que l'échauffement des pièces du système dû à cette dissipation d'énergie ne vienne influencer sur les performances du freinage. On trouve donc dans la conception des disques de nombreuses solutions pour dissiper cette chaleur.

Il existe tout un tas de types différents de freins à disques. Qu'ils soient ventilés, pleins, en fonte/acier, en carbone ou même en céramique

##### **a- Le disque plein. (Le plus courant)**

Les disques pleins font chauffer très vite



**Figure I.10 : Le disque plein**

##### **b- Le disque ventilé :**

Les disques ventilés dans l'espace au milieu permettent une meilleure dissipation de la chaleur

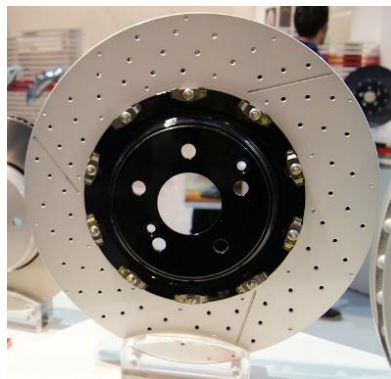


**Figure I.11** : Disque ventilé

La différence est assez simple, un disque plein est ce qu'il y a de plus simple à savoir un disque pur et simple sans aucune particularité un disque ventilé ressemble à deux disques pleins superposés avec un espace entre les deux pour améliorer le refroidissement (elle peut en effet se dissiper aussi par le centre du disque). Généralement, les freins avant sont ventilés et ceux de l'arrière sont pleins pour des raisons de coût (les freins arrière étant moins sollicités, il n'est pas indispensable d'y mettre des disques ventilés).

### **C- disque perforé :**

Les petits trous accélèrent le refroidissement en permettant à l'air de passer à travers. Il ne faut donc pas les confondre avec les disques ventilés, même si en définitive le but et le principe restent les mêmes : mieux refroidir en "aérant" les disques.



**Figure I.12** : disque perforé

## D- disques céramique et carbone :

Rares sont les disques composés de ces matériaux, un jeu de disques pouvant coûter de 5000 à 10 000 euros on aura vite compris pourquoi ... L'avantage de ces deux procédés est encore une fois lié à la chaleur. Ces deux technologies permettent de garder un freinage mordant même quand les disques sont chauds. La tolérance est donc bien plus élevée, ce qui fait que lorsque les disques en fonte seront brûlants et inutilisables (pause obligatoire pour laisser refroidir) les freins en carbone et céramique continueront de faire joujou sur le circuit. De plus, les versions en fonte pourront rapidement se voiler en cas de coup de chaleur, le métal devenant malléable. Un passage intensif sur circuit pourra facilement mettre vos disques aciers neufs en péril.

Notez que la céramique est une matière exceptionnelle qui sert dans de nombreux domaines dont l'aérospatial. Si on chauffait une plaque en céramique de quelques cm d'épaisseur à plusieurs centaines de degrés sur une des faces, vous pourriez encore poser la main de l'autre côté sans vous brûler. Ce n'est pas pour rien qu'elle sert de bouclier thermique pour les navettes spatiales.



**Figure I.13** : disques céramique et carbone [12]

### I.3.2.4.4. Les plaquettes :

Le processus de production des plaquettes de frein est basé sur certaines phases de base: mélange, moulage et durcissement. La manière et la technologie par lesquelles ces phases sont exécutées conduisent à des produits avec des niveaux de qualité et des taux de production différents

Les plaquettes de frein sont un mélange complexe de liant organique, de poudres inorganiques, de fibres synthétiques et de particules métalliques, dont chacun joue un rôle certain dans le produit fini. Les matières premières sont mélangées, pressées en formes et cuites à 150 ° C pour fabriquer les plaquettes de disque de frein

Les fibres d'aramide (Kevlar <sup>TM</sup> DUPONT Suisse) ont été adoptées pour remplacer l'amiante pour des raisons environnementales et sanitaires. Cependant, ces fibres sont coûteuses et leur décomposition et dissipation dans l'environnement lors de leur utilisation est encore à l'étude.

La préservation de l'environnement étant à l'ordre du jour des organisations internationales et des nations, le remplacement naturel et biodégradable est devenue à l'ordre du jour. Les fibres naturelles sont un remplacement potentiel des fibres synthétiques dans les plaquettes de frein. Cependant, on s'attend à ce que les fibres naturelles aient des performances, sinon également du moins proches de celles des fibres synthétiques. Ils doivent faciliter un mélange homogène des ingrédients et aider à produire un composite qui doit posséder une résistance mécanique, une résistance à l'usure et des caractéristiques thermiques suffisantes pour supporter des températures et des conditions de fonctionnement sévères pendant le freinage [13]

Les plaquettes de frein automobile comportent des rainures (Figure I.14) Outre leurs caractères d'évacuation des poussières et de l'eau, ces rainures influent elles sur le comportement Thermique de la plaquette. Cette dernière doit présenter :

- Une bonne résistance à l'usure, non agressivité des pistes de frottement.
- Absence de bruit.
- Haute résistance thermique. La température des garnitures peut atteindre 600°C à 700°C.



**Figure I.14 :** Plaquette de frein.

# Chapitre II : TRANSFERT CHALEUR ET MATERIAUX DES DISQUE ET DES PLAQUETTES DE FREIN

## II.1.TRANSFERT CHALEUR

### II.1.1 INTRODUCTION

L'énergie thermique peut être transférée d'un corps à l'autre ou d'un endroit d'un corps à l'autre. L'étude des techniques et méthodes adoptées pour transférer l'énergie thermique est connue sous le nom de « transfert de chaleur ». Pour faciliter le transfert de chaleur entre 2 corps, il doit y avoir une différence de température entre eux, ce qui signifie que ces corps doivent être à 2 températures différentes l'une plus élevée que l'autre pour permettre à la chaleur de circuler d'un corps à l'autre [14]

Les phénomènes de freinage montrent que la contrainte principale est due à variations de température induites par le frottement entre les plaquettes et le disque. Celles-ci variations brusques ne permettraient pas l'homogénéisation de la température, ces variations créer un gros problème dans le disque et les plaquettes, et aussi ce problème est appelé par le Phénomènes de fatigue thermique.

Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont :

- l'augmentation de l'énergie transmise ou absorbée par une surface,
- l'obtention du meilleur rendement d'une source de chaleur,
- la réduction ou l'augmentation du passage d'un débit de chaleur d'un milieu à un autre.

Il existe trois mode de transfert chaleur est :

- par conduction
- par convection
- par rayonnement

### **II.1.2.Définition :**

- **Chaleur** : La chaleur est une forme d'énergie. Il a ses origines au niveau moléculaire. Les molécules d'une substance vibrent dans leurs positions fixes ou fixes lorsque l'énergie leur est fournie. Lorsqu'ils vibrent, ils transfèrent leur énergie aux molécules environnantes, ce qui les fait également vibrer.

- **Température** : La température d'un corps est la mesure de la quantité de chaleur dont il dispose. Il est mesuré en degrés Celsius ( $^{\circ}$  C) ou Kelvin ( $^{\circ}$  K). La température d'une substance est une grandeur physique qui mesure le degré de chaleur ou de froid d'un corps [14]

### **II.1.3. Champ de température :**

Est ensemble des valeurs de température en tous points dans un espace donné à un instant donné. Mathématiquement, un champ de température tridimensionnel à l'état instable peut être décrit par une équation qui exprime la dépendance des températures sur les trois coordonnées spatiales et le temps  $T = f(x, y, z, t)$ . On distingue deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou instationnaire.

Pour des conditions de régime permanent, le champ de température est indépendant du temps. Dans de nombreux cas, la dépendance du champ de température sur deux coordonnées - et parfois sur une coordonnée - peut être considérée. Un champ de température est représenté graphiquement au moyen de surfaces isothermes, dont chacune relie tous les points du champ ayant la même température. Un champ bidimensionnel est représenté au moyen d'une famille d'isothermes. La distance entre les isothermes est inversement proportionnelle au gradient de température ; dans ce cas, le champ de température scalaire est associé au champ de vecteurs des gradients de température [15]

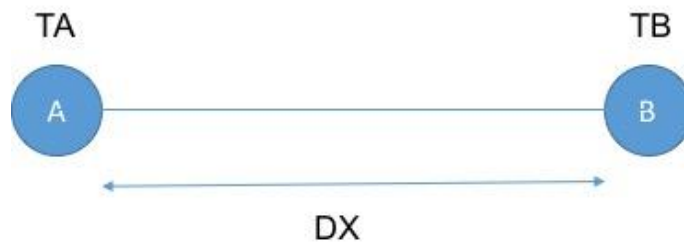


#### II.1.4. Gradient de température :

Un gradient thermique est défini par deux grandeurs physiques. Le premier est la température. La température est le degré de chaleur ou de froid d'un corps. Par exemple, quand on dit, il fait vraiment chaud aujourd'hui, il fait 100 degrés, on parle d'une température de 100 ° F.

La deuxième grandeur qui définit le gradient thermique est la longueur. Le gradient thermique est défini comme le rapport de la différence de température entre deux points et la distance entre les deux points. Voir la figure 1 pour l'illustration. La température au point A est TA, la température au point B est TB et la distance entre les deux points est DX. Si TB - TA est appelé DT

Alors le gradient thermique est défini comme  $(TB - TA) / DX$  ou  $DT / DX$  [16]



**Figure II. 1 :** Définition du gradient thermique

#### II.1.5. Flux de chaleur :

Le flux thermique, également appelé flux thermique, est appelé densité de flux thermique, la densité du flux thermique est un flux d'énergie par unité de surface par unité de temps. En SI, ses unités sont des watts par mètre carré ( $\frac{W}{m^2}$ ). Comme le flux de chaleur a à la fois une direction et une grandeur, il s'agit donc d'une quantité vectorielle [17]

Flux de chaleur : c'est la quantité de chaleur qui traverse une surface S par unité de temps

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \text{ (II.1)}$$

**Densité de flux  $\phi$**  : elle représente la puissance qui traverse l'unité de surface.

Pour une surface perpendiculaire au flux de chaleur :

$$\phi = \frac{d\Phi}{dS} \quad (\text{II.2})$$

Si le flux est homogène en tout point de la surface alors [18]

$$\phi = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{II.3})$$

### **II.1.6. Les Modes de transfert de chaleur :**

La chaleur est une énergie qui peut être transférée par trois différents du corps chaud au corps de motte de température plus élevée à plus basse. la transfert de chaleur total est égal à la somme de la chaleur transférée par les trois transferts de chaleur: conduction, convection et rayonnement.

Dans cette partie, nous discuterons des différents modes de conduction de transfert de chaleur, de convection et de rayonnement et comment les calculer

#### **II.1.6.1. Conduction:**

Est spécifique aux solides (bois, métaux, etc.), La conduction est la méthode de transfert de chaleur à l'intérieur d'un corps ou d'un corps à l'autre en raison du transfert de chaleur par des molécules vibrantes à leurs positions moyennes. Les corps à travers lesquels le transfert de chaleur doit être en contact les uns avec les autres. Il n'y a pas de mouvement réel de matière lors du transfert de chaleur d'un endroit à l'autre.

La conduction se produit généralement dans les solides où les molécules de la structure sont fortement maintenues ensemble par des forces d'attraction intermoléculaires entre elles et ainsi elles

ne vibrent de leurs positions moyennes lorsqu'elles reçoivent de l'énergie thermique et la transmettent ainsi aux molécules environnantes par des vibrations [14]

Les processus de transfert de chaleur peuvent être quantifiés en termes d'équations de taux appropriées. L'équation de vitesse dans ce mode de transfert de chaleur est basée sur la loi de Fourier de la conduction thermique. Cette loi stipule que le taux de transfert de chaleur à travers un matériau est proportionnel au gradient négatif de la température et à la zone, perpendiculairement à ce gradient, à travers lequel la chaleur circule. Sa forme différentielle est [19] :

$$\Phi = -k \Delta t \quad (\text{II.4})$$

$\Phi$  : flux de chaleur transmis de conduction

$K$  : la conductivité des matériaux

$\Delta t$  : est le gradient de température

#### II.1.6.1.1. Les régimes permanents :

La température en un point d'un système à un instant donné dépend de la position de ce point par rapport à un repère fixe de coordonnées

$$\theta = \theta(x, y, z) \quad \theta \text{ en } ^\circ\text{C}$$

$$T = T(x, y, z) \quad T \text{ en K}$$

Si la température de tous les points est indépendante du temps on dit que le régime est permanent

#### II.1.6.1.2 Les régimes transitoires :

Si la température dépend du temps on dit que le régime est transitoire. Dans ce cas on peut écrire : [22]

$$\theta = \theta(x, y, z, t) \text{ ou } T = T(x, y, z, t)$$

### II.1.6.2. Convection :

Est spécifique aux fluides (liquide, gaz, air). La convection est le mode de transfert de chaleur qui se produit principalement dans les liquides et les gaz. Dans cette méthode, le transfert de chaleur a lieu avec le mouvement réel de la matière d'un endroit à l'autre dans le corps. Souvent, lorsque nous faisons bouillir de l'eau, nous avons vu des bulles et des courants se développer dans l'eau après une observation attentive[14]

Dans un fluide les différences de température produisent des différences de densité pouvant amener des mouvements de la matière, dits mouvements de convection. On a transfert de matière, c'est pour cela que l'on ne rencontre pas ce moyen dans les solides.

On à la loi de Newton sa forme différentielle est[20]

$$Q = H.S(T_p - T_\infty) \quad (\text{II. 5})$$

**Φ** : Flux de chaleur transmis par convection (W)

**H** : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>)

**T<sub>p</sub>** : Température de surface du solide (°C)

**T<sub>∞</sub>** : Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

**S** : Aire de la surface de contact solide/fluide (m<sup>2</sup>)

### II.1.6.3. Rayonnement :

Le rayonnement est un mode de transfert de chaleur qui a lieu par le vide et, par conséquent, ne nécessite pas de milieu physique. Le rayonnement a lieu soit sous vide, soit à travers un milieu transparent. En mode radiatif, le transfert de chaleur se fait à travers les photons présents dans les ondes électromagnétiques. Le mouvement aléatoire des atomes et des molécules dans les substances chauffées entraîne l'émission d'ondes électromagnétiques qui transportent la chaleur à transférer.

Le transfert de chaleur radiative est régi par la loi de Stephen. Un corps rayonne de la chaleur à toutes les températures supérieures au zéro absolu, quelle que soit la température ambiante[21].sa forme différentielle est :

$$\Phi = \sigma \epsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

$\sigma$ : Constante de Stephan ( $5,67 * 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ )

$\epsilon_p$ : Facteur d'émission de la surface

$T_p$  : Température de la surface (°C)

$T_\infty$  : Température de milieu environnant la surface (°C)

$S$  : l'aire de la surface du contact solide fluide ( $\text{m}^2$ )

## II.2. LES MATERIAUX DU DISQUE DE FREIN :

Les matériaux des composants du système de freinage sont choisis selon les critères suivants : la fonction de la pièce, le coût de la matière première et sa facilité de fabrication, la masse.

Deux matériaux principaux ont été utilisés pour leur production ces dernières années. Fonte et acier inoxydable

### II.2.1. Les Matériaux du disque frein :

#### II.2.1.1. Fonte grise :

Le système de freinage de la plupart des voitures modernes est basé sur des disques de frein, qui utilisent des disques de frein en fonte grise comme surfaces de freinage. Les propriétés métallurgiques de la fonte grise déterminent la résistance, le bruit, l'usure et les caractéristiques de

freinage des disques de frein. Si un disque de frein est trop mou, il s'usera rapidement. Au contraire, si un disque de frein est trop dur, il est plus susceptible de se fissurer [23]

Historiquement, le premier matériau utilisé pour fabriquer les disques de frein était la fonte grise, qui est un matériau qui répond aux exigences auxquelles il est destiné, tels que : bonne conductivité thermique, bonne résistance à la corrosion, faible bruit, faible poids, longue durée de vie, stable friction, faible taux d'usure et bon rapport qualité / prix.

Comparativement, les fontes sont les matériaux préférés pour produire les composants du système de freinage et sont généralement classées de la manière suivante : gris, nodulaire, vermiculaire, malléable et blanc. De nos jours, les alliages de fonte grise présentent le meilleur rapport qualité / prix pour l'utilisation des disques de frein automobiles, en particulier ceux utilisés pour les automobiles les plus populaires. Pour la production des différents types de fonte, la charge métallique à fondre est généralement composée de fonte brute (minerai de fer réduit), de ferraille et d'éléments d'alliage tels que le fer silicium, la fonte au manganèse, le fer au chrome, le fer au nickel, etc. .

Tous les éléments d'alliage ont tendance à augmenter la résistance mécanique, et les plus efficaces sont le vanadium, le molybdène et le chrome. Par exemple, les alliages les plus utilisés pour produire des disques de frein par General Motors au Brésil sont les fontes grises, avec ou sans autres éléments chimiques, comme le montre le tableau 1[24].

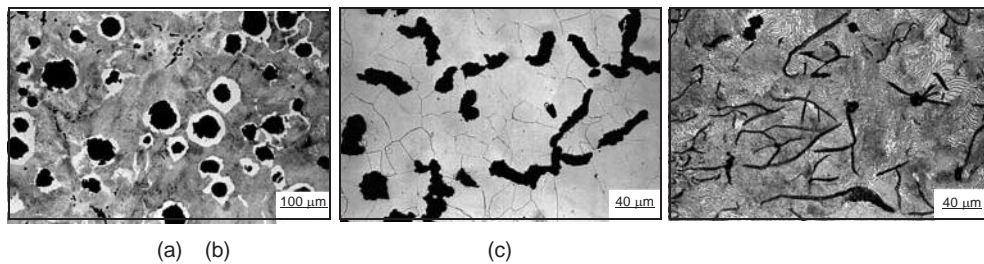
En conséquence, les alliages de fonte grise, en fonction de la composition chimique et de la vitesse de refroidissement, présentent des microstructures avec le carbone en forme de flocons de graphite sur des matrices qui peuvent être ferritiques, ferritiques -perlitiques et perlitiques.

**Tableau II.1 :** Composition chimique (% en poids) de certaines fontes grises utilisées par GM Brésil (GME-05002, 1999).

Element	Alliage métallique			
	A	B	C	D
%C	3,20	3,20	3,60	3,70
	3,60	3,60	3,80	3,90

%Si	1,90 2,40	1,90 2,40	1,80 2,20	1,75 1,95
%Mn	0,60 0,90	0,60 0,90	0,60 0,80	0,50 0,80
%P	Max 0,20	Max0,10	Max 0,10	Max0,10
%S	Max 0,12	Max0,10	Max 0,12	Max 0,13
%Cr	–	0,25 0,40	0,10 0,25	Max0,20
%Mo	–	0,40 0,50	0,30 0,60	Max0,10
%Cu	–	–	0,30 0,45	Max0,40

Les principaux facteurs qui influencent le transfert de chaleur dans les fontes sont la distribution, la taille et la morphologie de la phase graphite, car les paillettes de graphite ont une conductivité thermique beaucoup plus élevée que les matrices. La conductivité thermique de la fonte est proportionnelle au rapport entre sa surface et son volume respectif. Ainsi, les fontes à graphite nodulaire (figure 2(a)) sont de pires conducteurs que les vermiculaires (figure 2 (b)), qui à leur tour sont pires que celles à paillettes de graphite (figure 2 (c))[24].



**Figure II. 2 :**(a) Fonte ductile perlitiques montrant la structure en «œil de bœuf», qui consiste en des nodules de graphite entourés de ferrite libre (blanc). Eau-forte: Nital 2% (Milan et al. 2004). (b) Fonte vermiculaire. Eau-forte: Nital 2% (Milan et al. 2004). (c) Fonte grise à matrice perlitiques représentant plusieurs flocons de graphite. Eau-forte: Nital 2% (Milan et al. 2004)

### II.2.1.2. Aciers inoxydables :

L'acier inoxydable, bien qu'un peu plus cher, a beaucoup plus de points positifs. Il ne rouille pas, ou du moins pas dans une large mesure. Il est très robuste, il est tolérant à presque toutes les plaquettes de frein et en particulier aux plaquettes de frein frittées. Il est très résistant à l'usure, il ne se brise pas et il résiste très bien à la chaleur. Lors de sa première utilisation, les coefficients de frottement n'étaient pas aussi bons que la fonte et cela convainc certains que la fonte est toujours le bon matériau. Mais j'ai interrogé un cadre de Brembo à ce sujet il y a quelques années et il a dit que c'était vrai il y a 30 ans, mais les coefficients de frottement des disques en acier inoxydable et des patins frittés ont dépassé la fonte il y a environ 20 ans ! [25]

Il existe de nombreux types Aciers inoxydables, nous comparerons deux types d'entre eux à haut résistance en mentionnant les composants de base et leur rôle dans la résistance aux hautes températures et la corrosion.

Les grades 321 et 347 sont l'acier austénitique de base 18/8 (grade 304) stabilisé par des ajouts de titane (321) ou de niobium (347). Ces nuances sont utilisées car elles ne sont pas sensibles à la corrosion après chauffage dans la plage de précipitation du carbure de 425 à 850 ° C. La nuance 321 est la nuance de choix pour les applications dans la plage de températures allant jusqu'à environ 900 ° C, combinant haute résistance, résistance à l'entartrage et stabilité de phase avec résistance à la corrosion aqueuse ultérieure.

La nuance 321H est une modification de 321 avec une teneur en carbone plus élevée, pour fournir une résistance améliorée à haute température.

**Tableau II.2 :** Plages de composition pour l'acier inoxydable de qualité 321 [26]

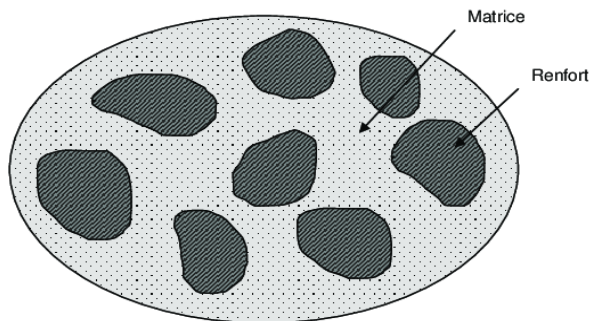
Grade		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Autre
321	min.	-	2.00	0.75	0.045	0.030	17.0	-	9.0	0.10	Ti=5(C+N)
	max	0.08					19.0		12.0		0.70
321H	min.	0.04	2.00	0.75	0.045	0.030	17.0	-	9.0	-	Ti=4(C+N)
	max	0.10					19.0		12.0	0.70	
347	min.	0.08	2.00	0.75	0.045	0.030	17.0	-	9.0	-	Nb=10(C+N)
	max						19.0		13.0		1.0



### II.2.1.3. Matériaux composites:

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc.) explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine des composites reste complexe du point de vue mécanique de par la non-homogénéité du matériau. Parmi les matériaux composites employés dans la construction des disques de freins, on a le carbone-carbone (C-C), les composites à matrice métallique (CMM) et les composites à matrice céramique (CMC)[27].

Un matériau composite se compose comme suit : matrice+ renfort+ optionnellement



**Figure II.3:** Constitution d'un matériau composite [28]

#### II.2.1.3.1 Composites carbone- carbone :

Les matériaux composites sont constitués d'une combinaison de deux ou plusieurs matériaux avec des propriétés mécaniques, chimiques ou physiques différentes. Comme tous les autres matériaux composites, les composites carbone-carbone (C-C) combinent deux éléments majeurs, des fibres de carbone et une matrice de carbone.

Les propriétés des composites carbone-carbone (C-C) sont considérablement améliorées et plus appropriées pour de nombreuses applications.

Les composites carbone-carbone (C-C) sont préférés aux autres matériaux car ils maintiennent la stabilité et fonctionnent structurellement à la température la plus élevée en raison de leur poids léger, de leur forte rigidité, de leur ténacité, de leurs coefficients thermiques supérieurs, de leur ablation et de leurs propriétés de friction à grande vitesse.

Les composants du carbone-carbone (C-C) ont été fabriqués aux États-Unis au cours des trois dernières décennies pour la plupart des applications aérospatiales et de défense. Les composites (CC) combinent des rapports propriétés mécaniques exceptionnels au poids et d'excellentes propriétés réfractaires, ce qui en fait les matériaux de choix pour les applications environnementales sévères et difficiles telles que la rentrée atmosphérique, les gaz d'échappement de moteurs à fusée solide et les freins à disque dans les secteurs militaire et commercial de haute performance les avions, trains à grande vitesse et voitures de course [29].



**Figure II.4:** Montre un disque en composite de carbone et de carbone dans un disque de frein d'avion [30].

#### **II.2.1.3.1.1 : Propriétés des composites carbone-carbone (C-C) :**

Les composites carbone-carbone (C-C) peuvent s'adapter ou être adaptés à de nombreuses fonctions ou activités différentes. Les composites carbone-carbone (C-C) ont des propriétés significatives par rapport aux matériaux conventionnels ou aux composites céramiques. Ces propriétés font des composites les matériaux de choix pour les applications environnementales

sévères. Les propriétés d'intérêt sont chimiques, physiques, mécaniques et de fabrication. Ces propriétés dépendent de la conception spécifique de l'application souhaitée.

Les propriétés suivantes sont quelques-uns des avantages des composites carbone-carbone par rapport à d'autres matériaux.

#### **A) Propriétés chimiques :**

1-carbone-carbone (C-C) sont des matériaux non inflammables résistants au feu qui peuvent être utilisés dans des applications nécessitant une résistance à la chaleur élevée telles que les réservoirs d'essence et certains appareils médicaux.

2- Le carbone-carbone (C-C) a une haute résistance à la corrosion et à l'oxydation, car ce sont des matériaux complètement inertes, même dans des conditions environnementales sévères.

Les propriétés ci-dessus sont des facteurs importants à prendre en compte dans la plupart des applications.

#### **B) Propriétés physiques :**

1- Les composites carbone-carbone (C-C) sont conçus dans une dilatation thermique et une conductivité thermique idéales pour être similaires aux structures environnantes afin de réduire la contrainte thermique à la valeur la plus basse.

2- Les composites carbone-carbone (C-C) sont structurés pour absorber ou transmettre l'énergie magnétique et électrique. Certains avions militaires sont fabriqués à partir de composites de carbone absorbant les signaux radar.

3- Le point de fusion et la chaleur spécifique des composites carbone-carbone sont nettement supérieurs à ceux d'autres matériaux dont les propriétés échouent ou fondent, c'est pourquoi les composites de carbone sont les meilleurs matériaux pour les applications à haute température telles que les embouts de nez de rentrée et les pièces aérospatiales.

### **C) Propriétés mécaniques :**

Les propriétés mécaniques des composites carbone-carbone (C-C) restent plus élevées, en particulier à des températures supérieures à 3000 ° C, là où d'autres matériaux présentent une faiblesse et une dégradation. En utilisant les fibres dans le sens de l'épaisseur, ce qui conduit à une augmentation du transport thermique, de la résistance et du module des composites carbone-carbone [31].

Les composites carbone-carbone ont des propriétés mécaniques élevées telles que :

- 1- Résistance plus élevée et matériaux plus légers cinq fois plus légers que l'acier et trois fois plus légers que l'aluminium. Les rapports résistance / poids (rigidité) sont importants dans les applications aérospatiales et automobiles.
- 2- Résistance à la dégradation dans les applications à forte fatigue bien meilleure que les matériaux conventionnels.
- 3- Capacité et capacité de ductilité, dureté, élasticité, éfraction et résistance à la rupture.

#### **II.2.1.3.2. Composites à matrice métallique(MMC) :**

Comme leur nom l'indique, ces composites sont constitués d'une matrice en alliage métallique et d'un renfort en particules. La matrice d'un CMM est généralement constituée d'un métal léger (aluminium, magnésium, titane, etc.). Le renfort se compose :

-soit de particules ou de fibres courtes céramiques qui améliorent légèrement les propriétés mécaniques de la matrice tout en permettant de conserver les procédés traditionnels de mise en forme des métaux - soit de fibres longues céramiques ou métalliques qui procurent des propriétés mécaniques bien supérieures à celle de la matrice mais nécessitent des procédés de mise en forme coûteux.

Les matrices métalliques ayant déjà intrinsèquement de bonnes caractéristiques mécaniques, le renforcement du composite ne peut se faire que sur certaines zones ou dans une seule direction. Cela n'est en général pas possible pour les matrices organiques (faible résistance) ou pour les

matrices céramiques (fragilité) [32]. En revanche, les matrices métalliques présentent l'inconvénient d'une grande réactivité chimique.

### II.2.1.3.3. Composites à matrice céramique (CMC) :

Beaucoup moins répandus que leurs homologues à matrice organique en raison d'un coût élevé, les CMC s'adressent aux applications à très haute température. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie spatiale et l'aéronautique militaire, ainsi que pour la conception d'organes haut de gamme comme des disques ou plaquettes de freins (figure 5)[33]



**Figure II.5:** Quelques applications des CMC : (a) la tuyère d'un moteur spatial (image [3]), (b) le disque à aubes d'une turbine (image GE Energy), (c) un disque de frein haut de gamme (image Porsche).

Les céramiques possèdent de nombreux atouts pour de telles applications : elles peuvent résister à des températures très élevées, sont plus légères que de nombreux métaux, et présentent une bonne stabilité chimique. Malheureusement, leur grande fragilité limite fortement leur domaine d'utilisation. Le principe des CMC est donc de rendre les céramiques moins cassantes en leur donnant une structure composite, c'est-à-dire en les façonnant sous forme de renforts et d'une matrice. Comme expliqué dans la ressource « Matériaux composites et structures composites », cela conduit à une meilleure résistance à la rupture, pour deux raisons :

- Les fibres ayant un diamètre microscopique, il est possible de les fabriquer avec très peu de défauts, ce qui conduit à des contraintes de rupture plus élevées ;

•Lorsque le composite se dégrade, les fissures ont tendance à suivre les interfaces situées entre les fibres et la matrice au lieu de se propager dans les fibres ; au lieu de rompre brutalement, le matériau se « désassemble » donc progressivement.

### **II.2.2. Matériaux des garnitures**

Pour les garnitures, on cherche un matériau qui génère un bon coefficient de frottement (le plus élevé possible et le plus constant possible, quelles que soient les variations de températures, de pression ou de vitesse).

Les matériaux qui composent les garnitures de frein doivent pouvoir résister à des conditions extrêmes comme des fortes chaleurs au moment de la friction. Il faut donc que les garnitures soient solides et résistent à la chaleur tout en n'étant pas trop dures pour ne pas abîmer les disques et les tambours.

Pour remplir ces conditions, les principaux matériaux utilisés sont : les particules céramiques, le graphite, les fibres, le cuivre et ses alliages et les abrasifs[34].

### **II.2.3. Matériaux des supports :**

Les supports sont fabriqués avec un acier doux. Leur rôle est de répartir l'effort exercé par le piston hydraulique sur la totalité de la surface des garnitures, dans le but d'obtenir une surface de contact disque/plaquette la plus large et la plus homogène possible. Cela constitue un des critères de bon fonctionnement du frein. Le support est la pièce intermédiaire entre les garnitures et le piston. Elle transmet donc la chaleur des garnitures (qui peut être élevée) vers le liquide dans le piston. Afin d'éviter ce phénomène, on utilise parfois des sous-couches qui servent d'isolant thermique. Ces sous-couches permettent aussi d'absorber une partie des bruits et des vibrations engendrés par le système de frein à disque [35].

### **II.2.4. CRITERES D'EVALUATION D'UN SYSTEME DE FREINAGE :**

Le frein à disque doit répondre à différents types d'exigence, dont les principaux sont : l'efficacité de freinage, l'endurance du système et le confort d'utilisation.

#### **II.2.4.1 Efficacité :**

L'efficacité de freinage est la capacité du frein à réduire la vitesse du véhicule jusqu'à un arrêt éventuel, à maintenir une certaine vitesse du véhicule descendant sur une pente, ou à maintenir le véhicule sur une pente.

L'efficacité de freinage est généralement inférieure à 100% en raison d'une adhérence à la route insuffisante, le véhicule est sur une pente descendante ou un système de freinage inefficace. L'efficacité du freinage est similaire au coefficient de frottement, qui est le rapport de la force de frottement à la charge normale entre les surfaces de frottement

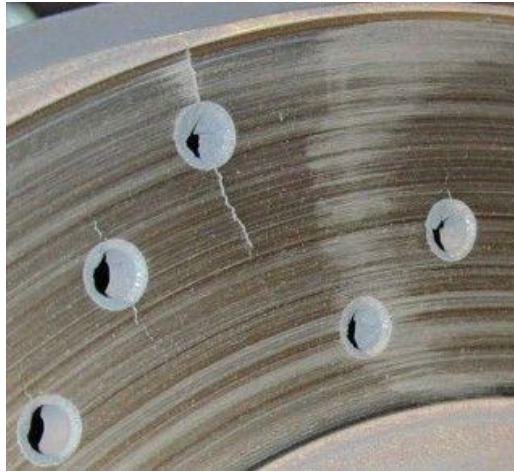
La force appliquée lors du freinage d'un véhicule s'oppose au mouvement des roues, ce qui réduit la vitesse du véhicule ou l'amène à l'arrêt. Par conséquent, la force de freinage est la force de résistance appliquée pour arrêter un véhicule ou réduire sa vitesse. L'efficacité de freinage d'un véhicule est définie comme la force de freinage produite en pourcentage du poids total du véhicule[36].

#### **II.2.4.2. Endurance :**

Le premier aspect de l'endurance concerne la montée en température de l'ensemble ainsi que l'impact sur les plaquettes et le liquide de frein). Cependant, suivant le dimensionnement du système de freinage et l'utilisation de l'auto, il arrive que des températures critiques soient atteintes. Dans ce cas le disque peut également être impacté car il a lui aussi une température de fonctionnement maximale. Au-delà de cette température, le disque pourra se déformer, occasionnant des vibrations. Dans le pire des cas, il pourra même se craqueler ou se fissurer pour finalement casser (Figure II.6).

Généralement un disque classique en fonte grise commence à souffrir aux alentours de 600°C. Bien évidemment, il existe des disques de freinage plus résistants (propose de nombreuses références). Ces derniers ont reçu un traitement thermique qui leur permet de tenir plus longtemps à ces températures qu'un disque normal. Au cours du processus de fabrication du disque, les molécules sont figées dans une certaine configuration lors du refroidissement rapide du métal, dans la phase de solidification. Or cette configuration n'est pas forcément la plus stable possible, générant des tensions entre molécules au sein du métal. Ces tensions s'amplifient avec la température, chaque particule étant plus agitée, ce qui amène les risques de craquelure. Le traitement thermique consiste à

porter chaque disque à haute température, très doucement, le laisser plusieurs heures puis le redescendre doucement à température ambiante[37].



**Figure II.6:** un disque de frein déformé[37].

#### **II.2.4.3. Confort :**

Les problèmes de confort rencontrés avec le frein à disque résident dans l'apparition de bruits et de vibrations dans certaines configurations de freinage. Vibrations et les bruits sont reliés puisque le bruit est toujours engendré par des vibrations. Dans le problème du frein, il s'agit principalement des vibrations de la pédale de frein et du volant.

Lorsque vous appuyez sur la pédale de frein, vous ressentez des vibrations inhabituelles et cette sensation perdure voire s'accroît progressivement, alors il y a de fortes chances que votre système de freinage présente une défaillance.

Si toujours lorsque vous effectuez un freinage, le volant vibre, peut-être même simultanément avec la pédale de frein, vous faites là aussi face à une défaillance nécessitant une réparation

Le bruit de freinage a souvent son origine dans la vibration d'une pièce de la roue du véhicule - entre le pneu et le raccord au châssis. Bien que le bruit soit souvent attribué à la plaquette de frein elle-même, il peut venir de n'importe quelle pièce, du roulement de roue à la rotule. Au sein du système de freinage, il est tout à fait normal que certaines vibrations se produisent, mais celles-ci ne sont généralement pas audibles[38].



# CHAPITRE III : MODELISATION ET ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS

## III.1.INTRODUCTION

La méthode des éléments finis (MÉF) [1] est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées.

La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème.

Les logiciels modernes utilisant la méthode des éléments finis(ANSYS) bénéficient d'une interface graphique rendant leur utilisation relativement simple. Par ailleurs, un certain nombre de tâches sont automatisables. On peut donc quasiment lancer un calcul sur ordinateur sans connaître la méthode.

Cependant, le modèle utilisé risque d'être inadapté au problème, on aura donc un résultat très éloigné de la réalité. L'utilisateur doit avoir des connaissances suffisantes pour être en mesure de/

-maîtriser le modèle, c'est-à-dire utiliser les options permettant de représenter le plus fidèlement possible la réalité ;

-contrôler la qualité du résultat, détecter les résultats manifestement erronés ;

-interpréter les résultats, et éventuellement les post-traiter, c'est-à-dire utiliser les résultats pour faire d'autres calculs.

Les principales étapes de la méthode des éléments finis sont :

1. La géométrie est décomposée en domaines de forme géométrique simple (les éléments) reliés entre eux en des points appelés nœuds. L'élément utilisé sera le (triangle à trois nœuds).
2. Le champ de déplacements dans chaque élément est défini en fonction des déplacements des nœuds de l'élément. On en déduit l'état de déformation et l'état de contrainte en tout point de l'élément ainsi que l'énergie de déformation de l'élément et sa matrice de rigidité
3. La matrice de rigidité globale est construite à partir des matrices de rigidité élémentaires.
4. Après mise en place des conditions aux limites et des charges, on calcule les déplacements inconnus puis, dans chaque élément, les déformations et les contraintes.

### **III.2.Principe de la méthode :**

La méthode des éléments-finis (MEF) permet d'obtenir une approximation des solutions d'équations d'équilibre de corps solides déformables soumis à des sollicitations d'origine diverses. Les quantités mécaniques (déplacements, déformations, contraintes) liées à l'équilibre des solides et satisfaisant aux lois de la physique sont ainsi calculées en certains points du solide modélisé. Le principe des travaux virtuels appliqué à un solide de volume  $V$  se traduit par l'égalité entre l'énergie virtuelle de déformation et le travail virtuel des actions extérieures

### **III.3. Présentation du logiciel :**

ANSYS est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. La fiabilité des résultats résulte de la variété des modèles de matériaux disponibles, de la qualité de la bibliothèque d'éléments, de la robustesse des algorithmes de résolution et de la possibilité de modéliser n'importe quel type de produit (des pièces individuelles aux ensembles complexes contenant des centaines de composants en interaction par contacts ou par mouvements relatifs). Le confort et la facilité d'utilisation du logiciel permet aux utilisateurs de se concentrer sur la partie la plus importante du

processus de simulation, c'est à dire l'interprétation des résultats et l'impact des variations des paramètres de conception sur la performance du modèle. Quelles que soient la taille ou la complexité des modèles, la solution de calcul de structures ANSYS intègre des algorithmes parallèles qui accélèrent le calcul pour ces modèles de grande taille. Les outils intégrés au logiciel permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts

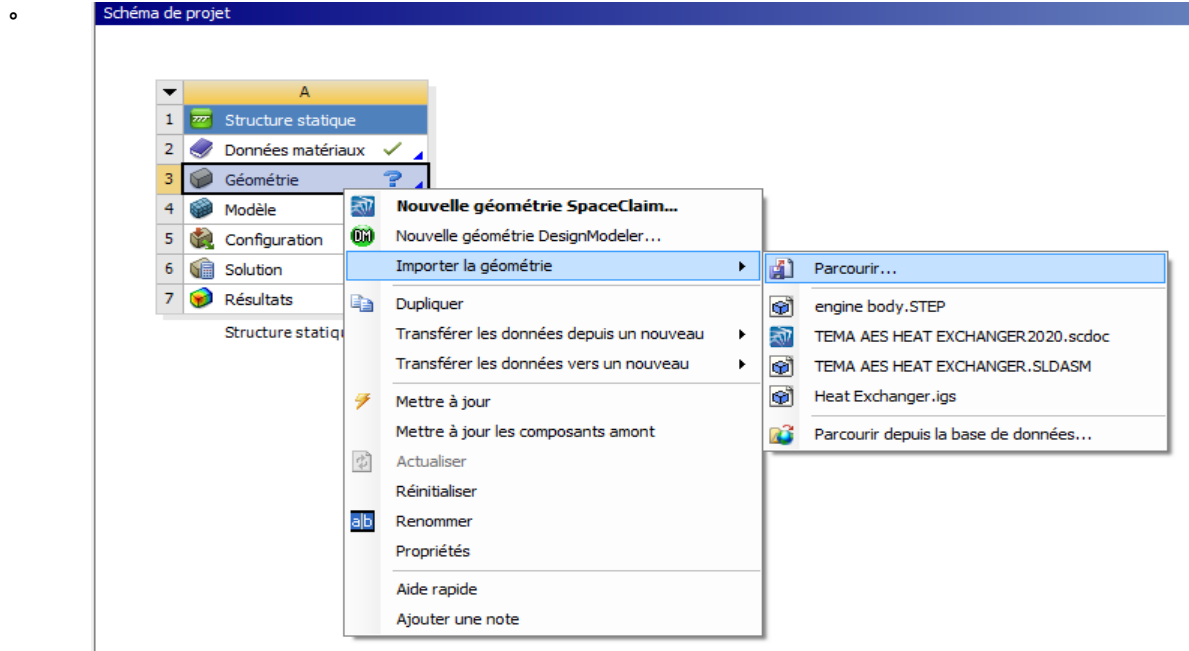
L'interface WORKBENCH qui encapsule les différents niveaux de l'outil de simulation et ses modules a été conçue pour être utilisée sans avoir une formation basée sur les éléments finis. L'interface est très intuitive, permettant une prise en main très rapide du logiciel. Les difficultés du calcul par éléments finis sont ici gommées, notamment par l'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage. Ainsi, ANSYS satisfera l'ensemble de la chaîne de conception : du concepteur du bureau d'étude qui pourra effectuer des calculs rapides de pré-dimensionnement à l'ingénieur de calcul qui réalisera des études plus précises (réponse spectrale, non linéarité...)

Il existe deux solutions pour effectuer les modélisations:

- réaliser un fichier. Texte que ANSYS est capable de lire, en faisant «file », «Read input»
- ou directement en utilisant les fonctions du préprocesseur afin de réaliser la structure, le maillage et les calculs

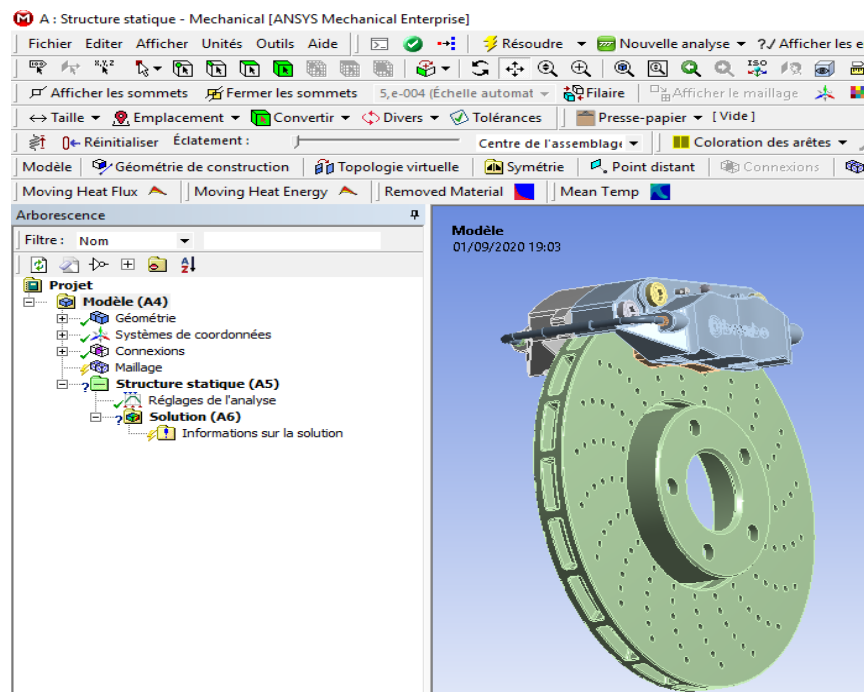
#### **III.4.les principales étapes pour simulation numérique d'un disque de frein :**

- **Etape 1 :** Après avoir ouvert le programme ANSYS WORKBENCH et sélectionné l'acier comme matériau, Cliquer sur géométrie avec le bouton droit de la souris pour importer la géométrie et sélectionner votre géométrie.



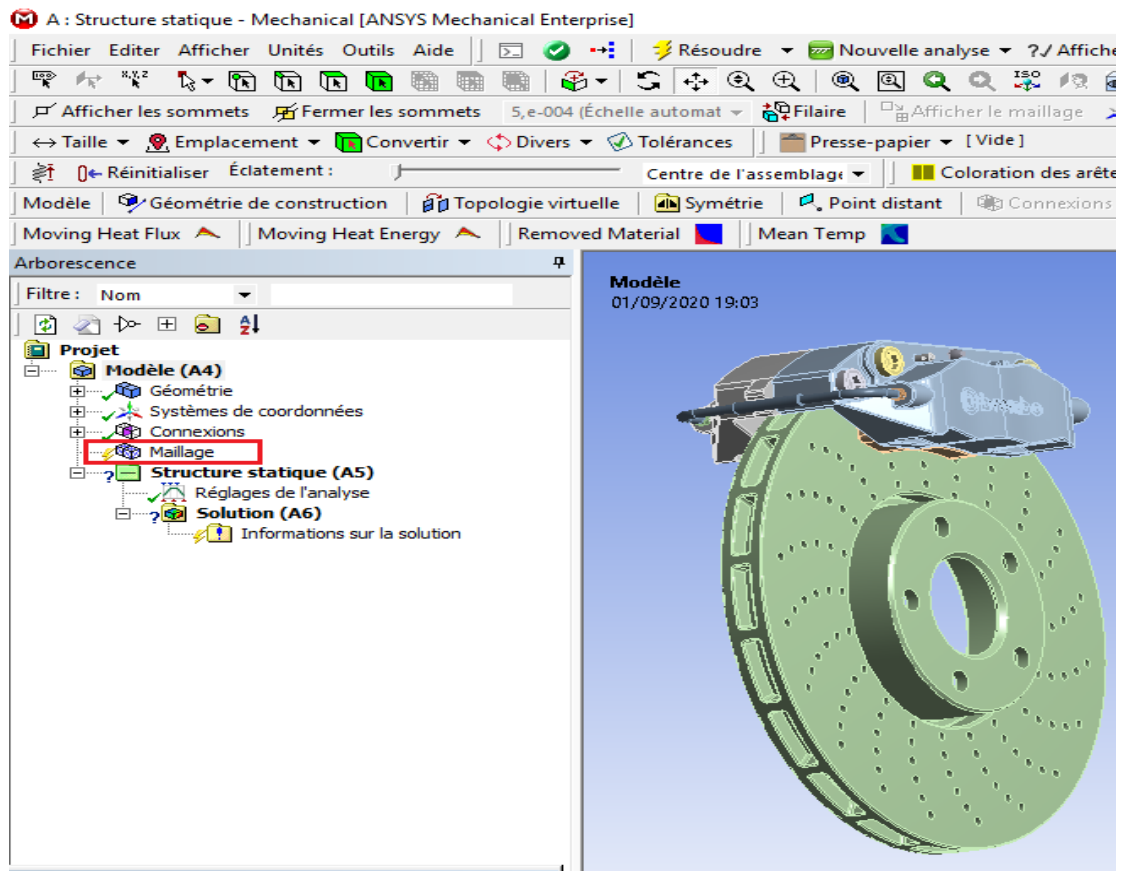
**Figure.III.1** :méthoded’importation de la géométrie

L’apparition de la figure géométrique dans ANSYS (ANSYS MECHANICAL) pour démarrer la simulation numérique



**Figure.III.2:** la forme géométrique de disque à frein

- **Etape 2** : après l'apparition de la figure géométrique, Cliquer à gauche sur Maillage pour commencer et faire le maillage.



**Figure.III.3** : commencer le maillage

- Après Changer les paramètres du maillage pour un maillage bien raffiné (centre de pertinence, centre d'angle de course, lissage), Lancer le maillage à partir de la barre d'outils, on clique sur Maillage>>>Générer un maillage

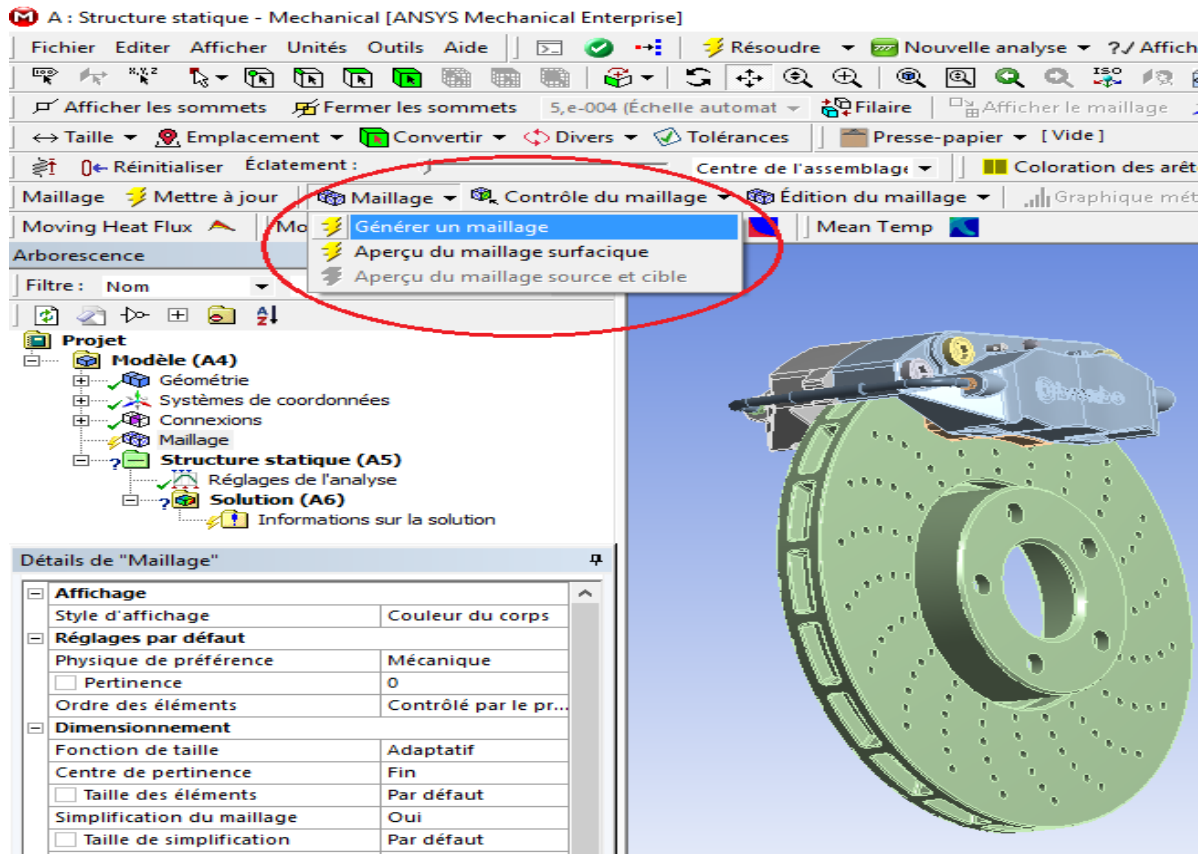


Figure.III.4 :lancer opération de maillage

- Résultat final du maillage

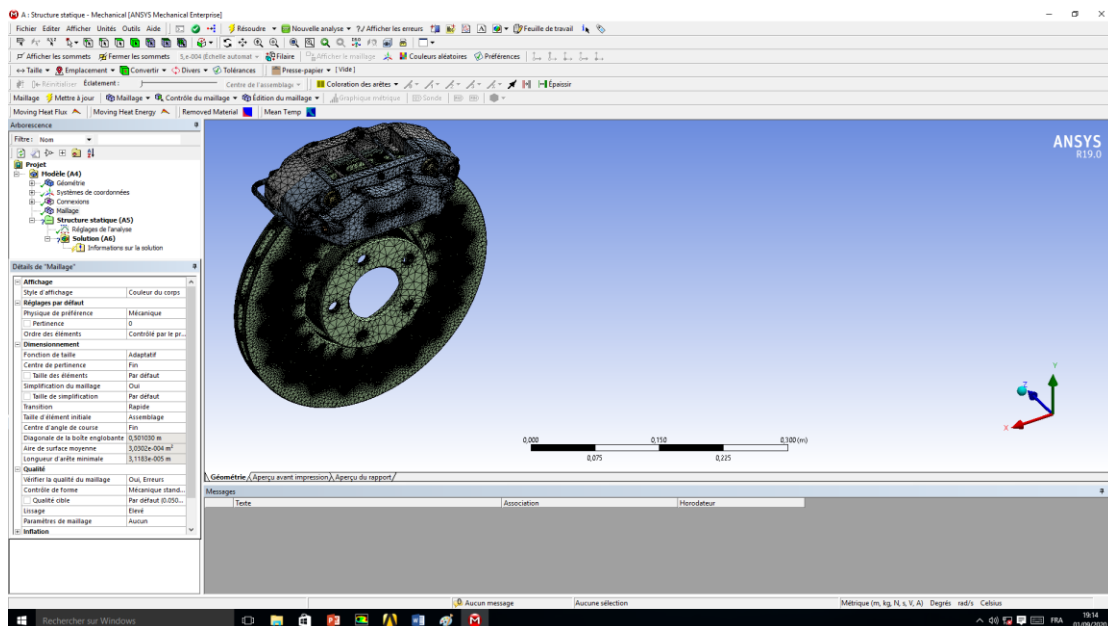
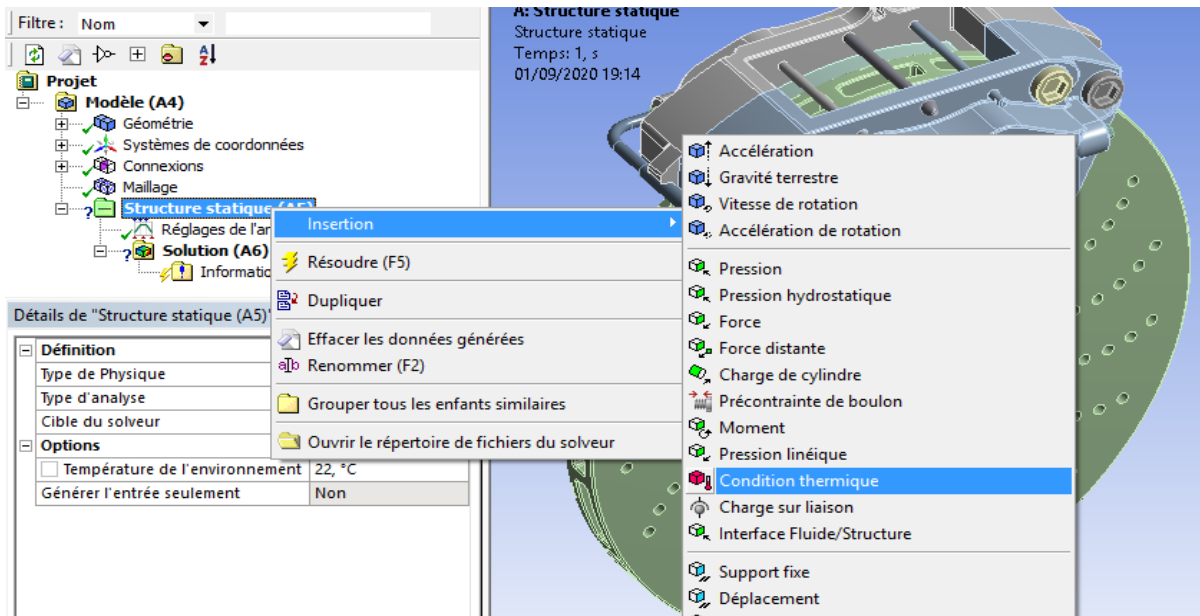


Figure.III.4 : le maillage final

**Etape 3 :** mise en place des conditions aux limites, qui sont représentées dans deux conditions :

1ere condition Pour notre problème on clique sur conditions thermique qui deviennent appliquée sur les plaques de frein



**Figure.III.5 :** Méthode d'application de condition thermique

- Après Cliquer sur sélection de géométrie pour sélectionner les deux plaques, Changer la température des plaques, dans notre cas on travaille sur une plage de température de 100 jusqu'à 600 °C

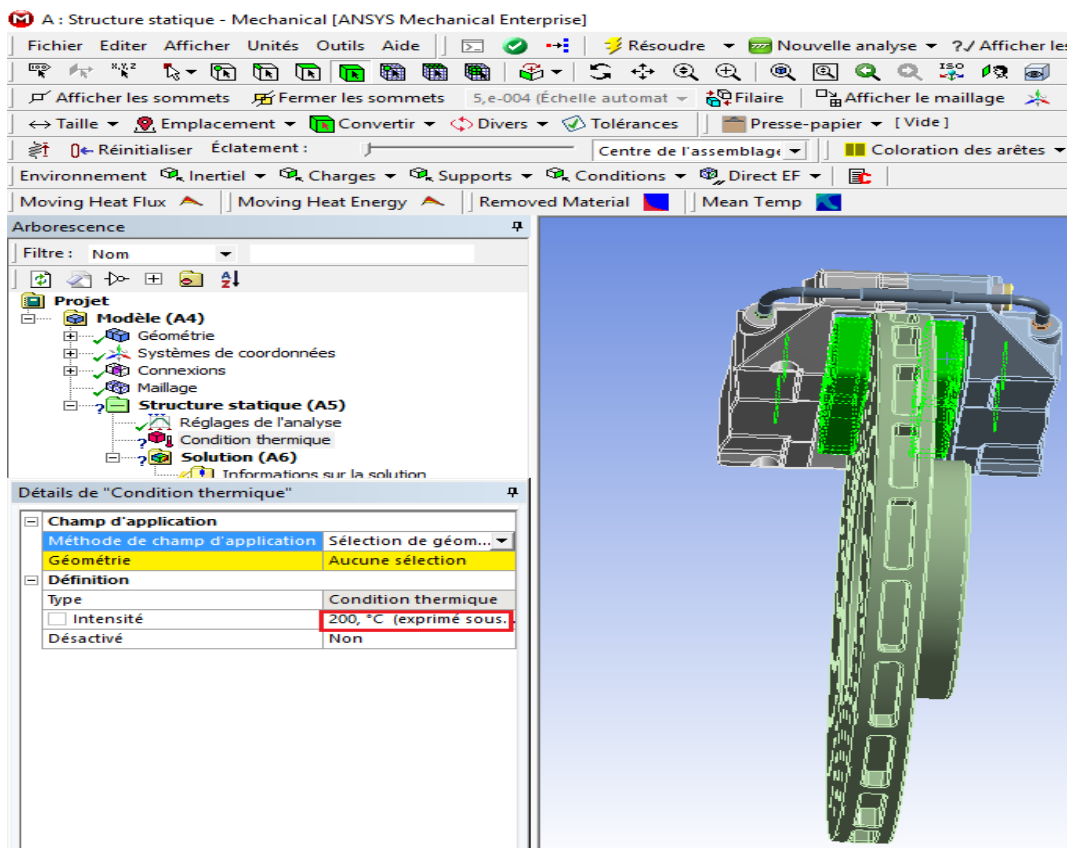


Figure.III.6 :sélection les plaques

- 2eme condition : support fixe, Cliquer en deuxième fois sur structure statique >>> insertion>>> support fixe pour insérer les appuis doubles sur les tous des boulons

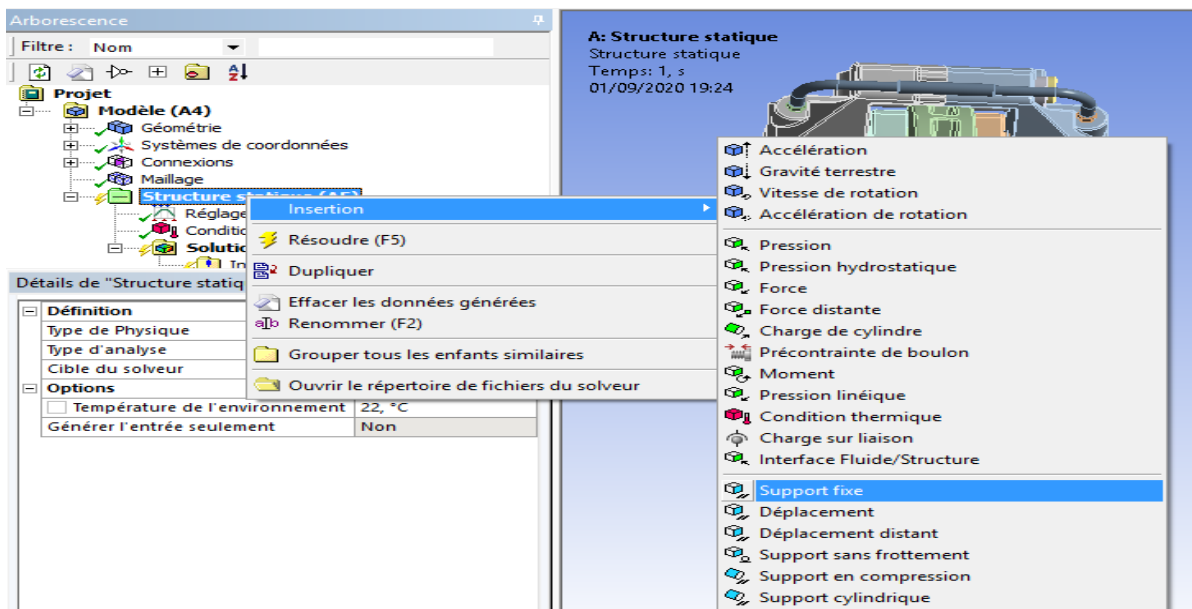


Figure.III.7 :La méthode d'application de condition support fixe



Cliquer sur sélection de géométrie puis sélectionner les cinq touts des boulons

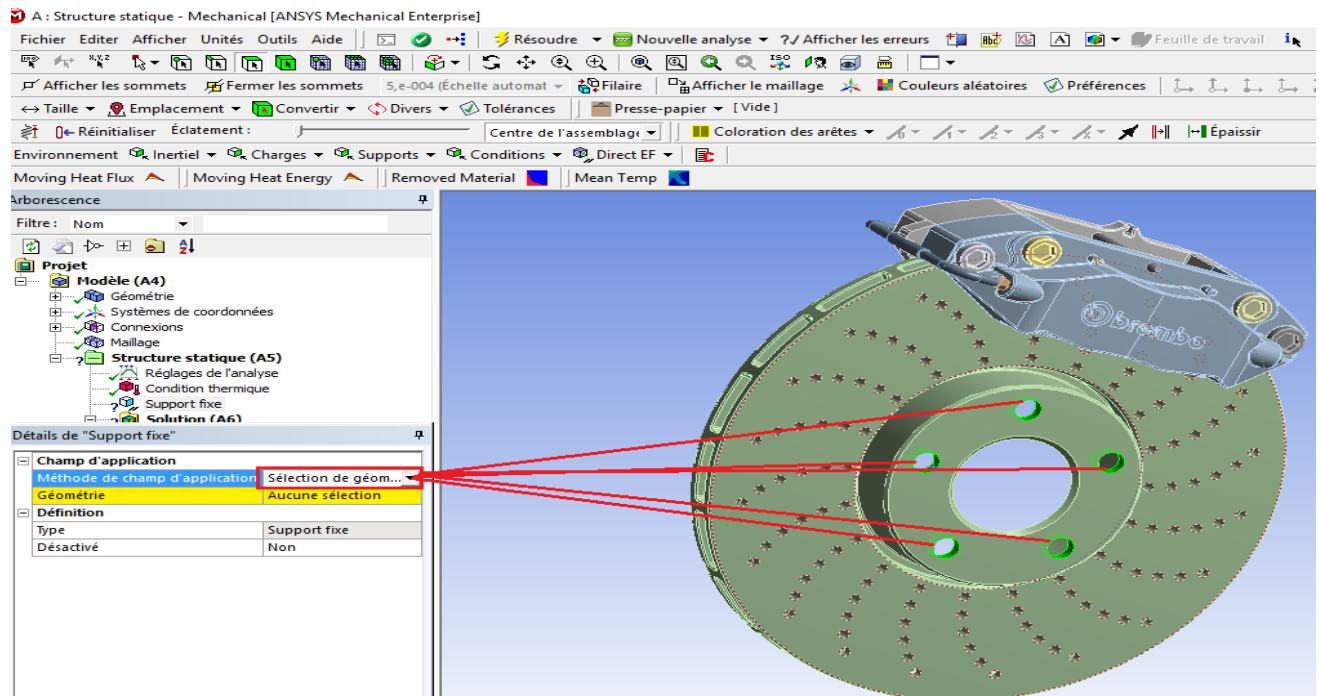


Figure.III.8 :sélection les boulons

#### Etape 4 : vérification les sollicitations

Pour vérifier les sollicitations, on clique en premier lieu à gauche sur condition thermique, et vérifier sur la figure l'emplacement de cette condition

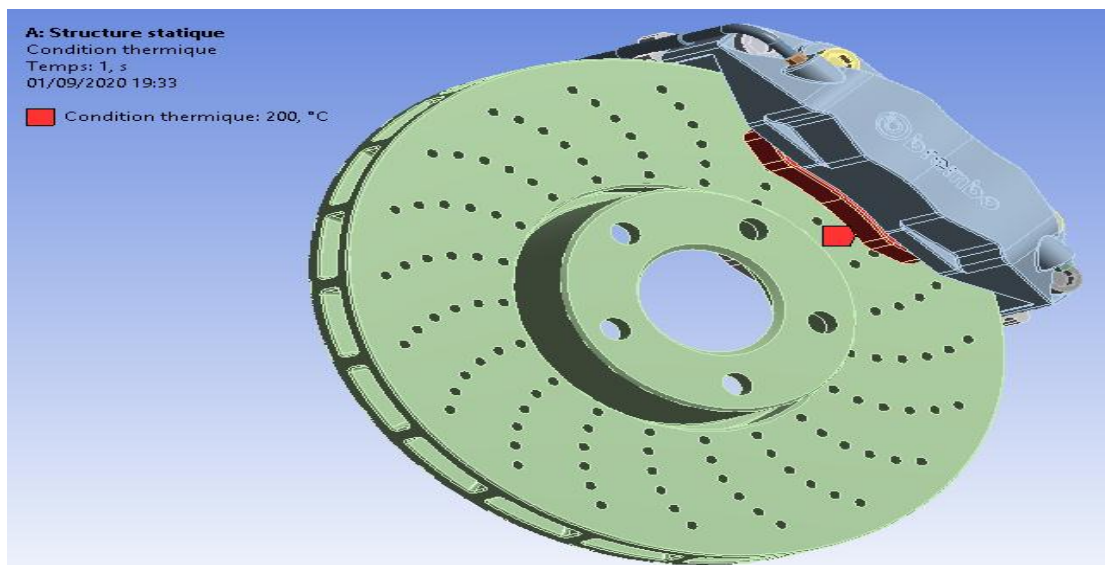


Figure.III.9 :vérification de la condition thermique

Même chose pour le support fixe

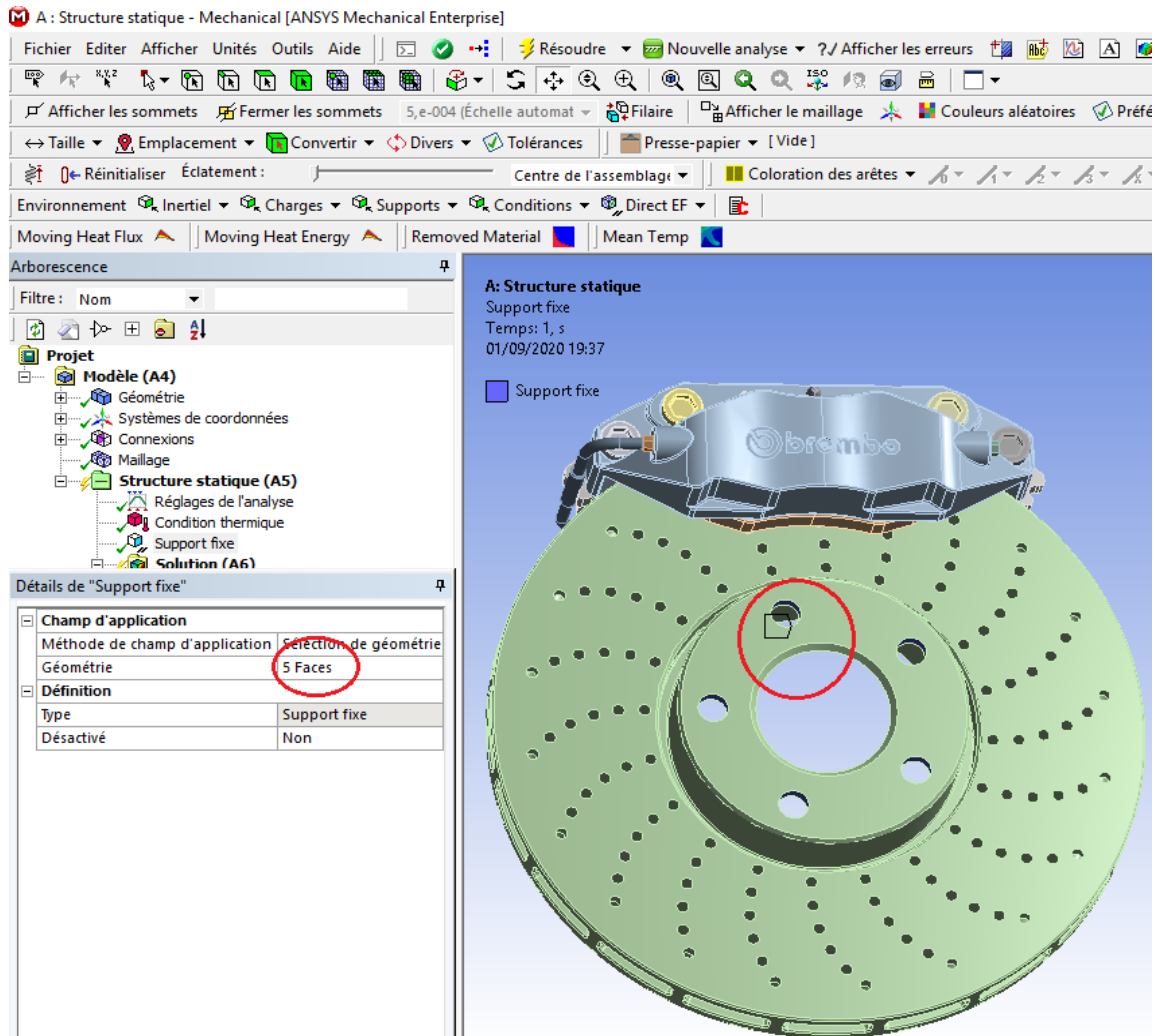
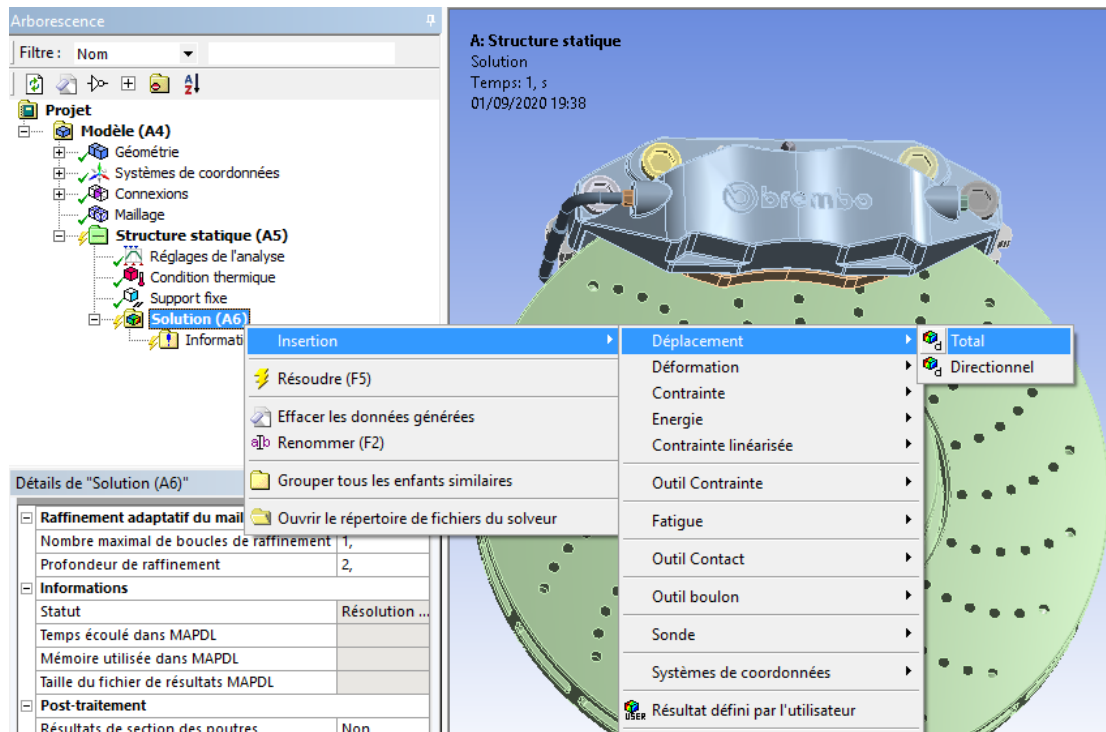


Figure.III.10 :vérification du support fixe

### Etape 5 :

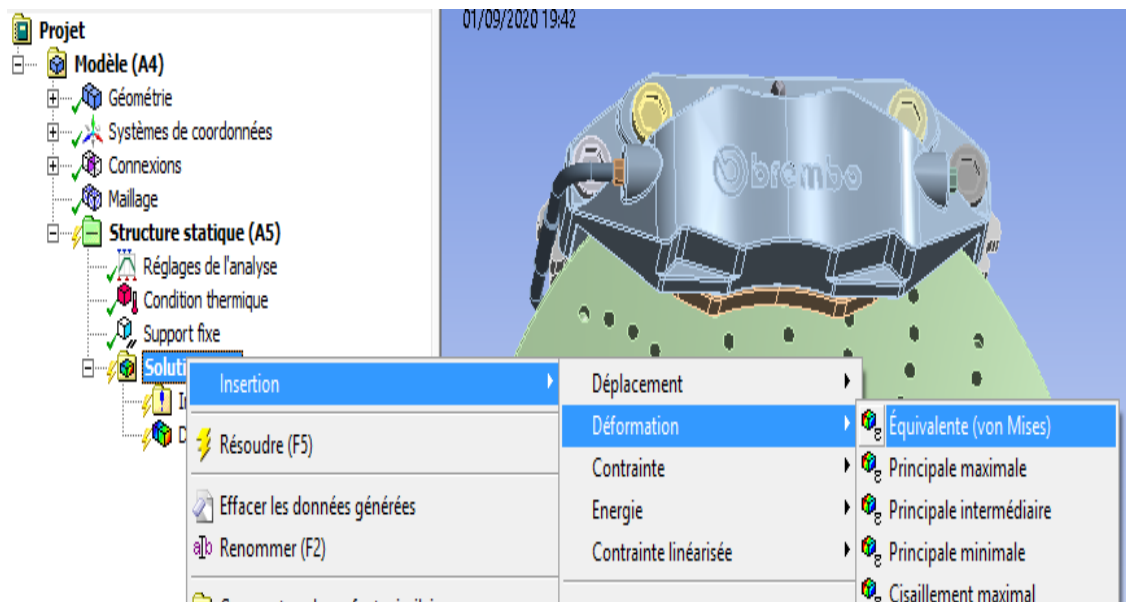
Avant de commencer les calculs, il d'abord choisir les résultats nécessaires selon notre besoin, dans ce cas on choisir les déplacements, les contraintes et les déformations.

Cliquer sur Solution>>>>Insertion>>>Déplacement>>>Total



**Figure.III.11** :déplacement totale

Cliquer sur Solution>>>>Insertion>>>Déformation>>>>Equivalente (Von Mises)



**Figure.III.12** :déformation équivalente

Cliquer sur Solution>>>>Insertion>>>Contrainte>>>Equivalente (Von Mises)

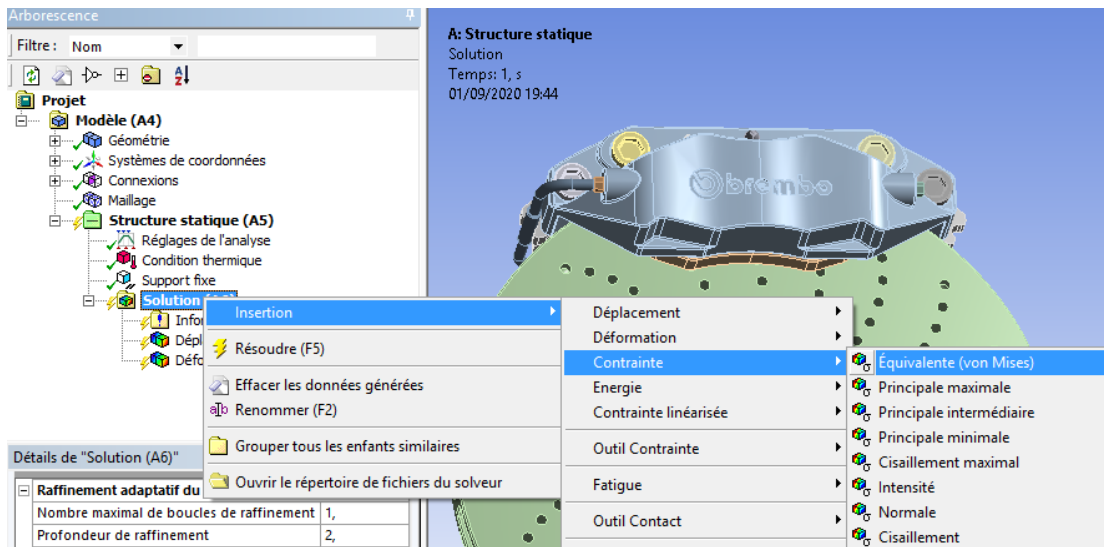


Figure.III.13 :contrainte équivalente

On peut clairement voir les sollicitations et les résultats nécessaires à gauche

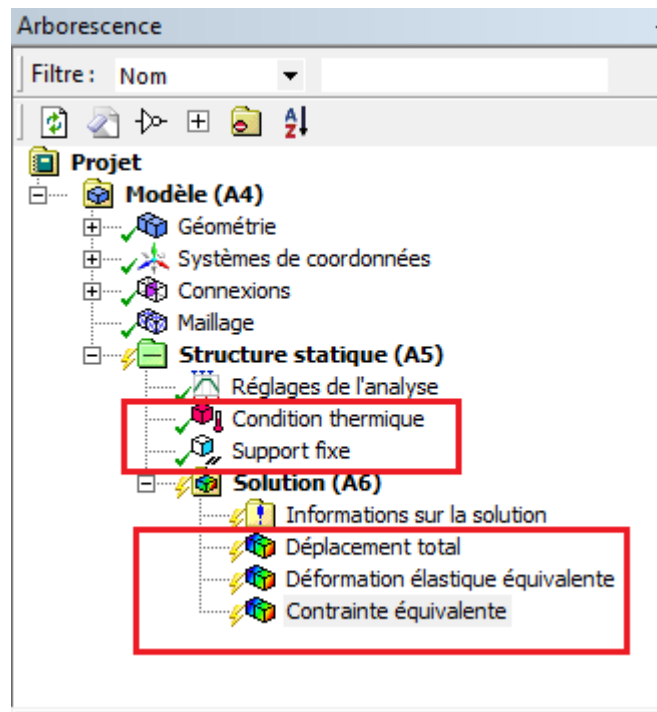


Figure.III.14 :les sollicitations et les résultats nécessaires

Pour lancer le calcul, on clique sur Résoudre dans la barre des outils

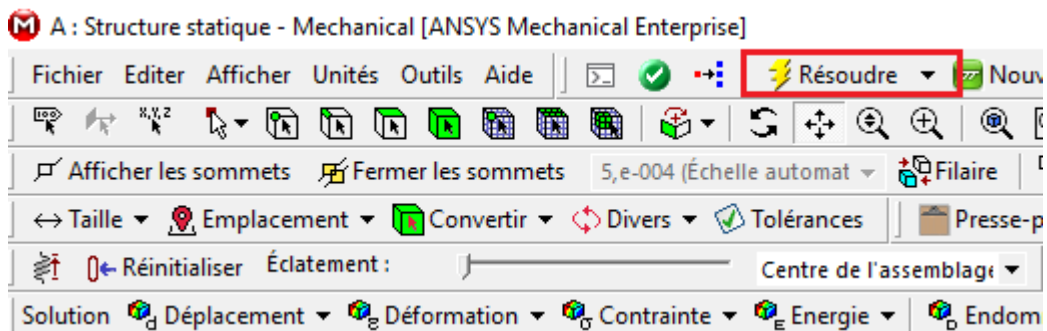


Figure.III.15 :résoudre le problème

- Pour consulter les résultats rapidement, on clique sur solution>>>Feuille de travail

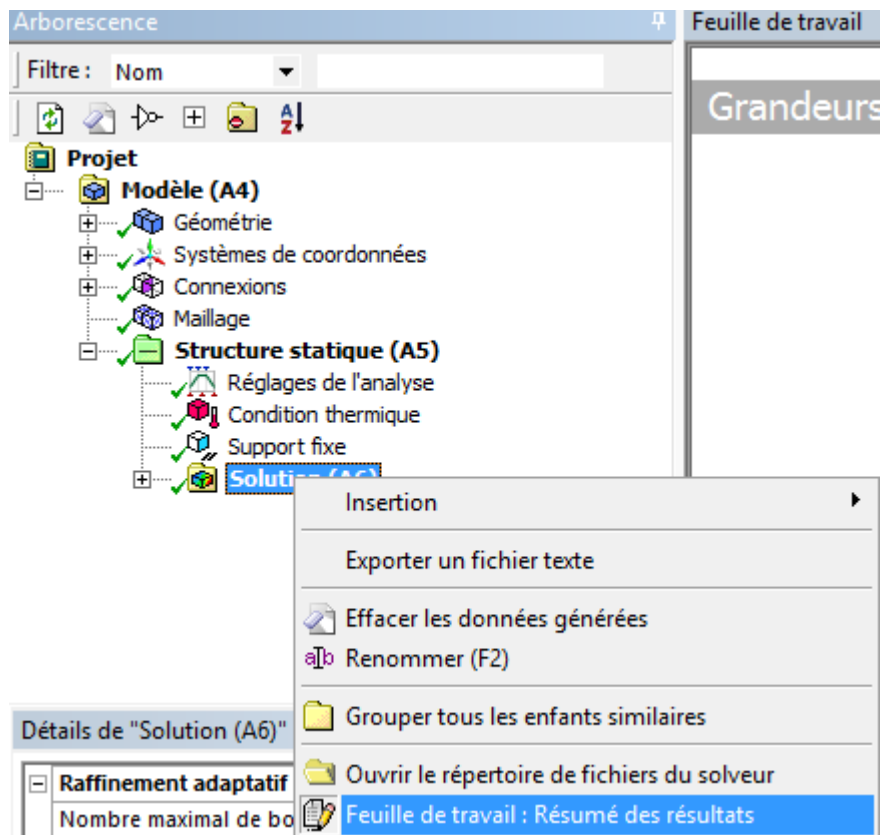


Figure.III.16 :Comment obtenir un résumé des résultats

- Voilà quelques figures pour prendre un idée sur cette renaitre

➤ Le nombre des éléments et des nœuds

- Lister les grandeurs de solution disponibles
- Informations matériau et types d'éléments
- Noms de composant de solveurs
- Résumé des résultats

Nom de composant	Type de composant	Nombre d'entités
_CM162	Elements	48434
_FIXEDSU	Nodes	3132

**Figure.III.17** :Le nombre des éléments et des nœuds

- Les résultats globaux de notre problème

- Lister les grandeurs de solution disponibles
- Informations matériau et types d'éléments
- Noms de composant de solveurs
- Résumé des résultats

Résultats	Minimum	Maximum	Unités	Temps (s)
Déplacement total	0,	4,0812e-004	m	1,
Déformation élastique équivalente	9,4355e-008	2,7543e-002	m/m	1,
Contrainte équivalente	18608	4,895e+009	Pa	1,

**Figure.III.18** :résumé des résultats

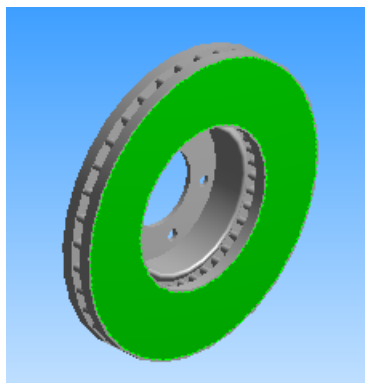
# CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

## IV.1. Introduction

Dans cette étude, on essaye de mettre en évidence un problème d'échauffement excessif du disque, et de visualiser les résultats pour pouvoir en tirer les modifications qui s'imposent sur la conception du disque de frein du point de vue des matériaux et du profile.

Notre travail consiste à étudier le comportement thermique d'un disque de frein en trois dimensions, lequel inclut le flux de chaleur généré à l'intérieur de celui-ci, les températures maximales et minimales etc. Le scénario analysé est un freinage d'arrêt. En pratique, le système de freinage baigne dans un flux d'air, plus ou moins forcée selon le système, qui participe au refroidissement du disque et des plaquettes. Ce flux d'air est régi par les lois de l'aérodynamique. A l'aide du code ANSYS, on calcule alors les valeurs du coefficient d'échange thermique  $h$  en fonction du temps. Ces valeurs seront utilisés pour déterminer le comportement thermique du disque en régime permanent.

Dans cette modélisation, seul le disque est pris en compte, les plaquettes sont remplacées par leur effet, représenté par un flux de chaleur généré à l'interface disque-plaquette qui est l'aire totale de contact (les deux côtés du disque) (Fig.IV.1).



**Figure.IV.1:** Application du flux de chaleur

## IV.2.Modélisation du disque de frein :

Les modélisations du disque de frein ventilé et la plaquette sont faites par le logiciel ANSYS. ANSYS va préparer les différentes surfaces pour les deux domaines afin de faciliter le maillage. Après avoir obtenu le modèle et avoir spécifié les conditions aux limites

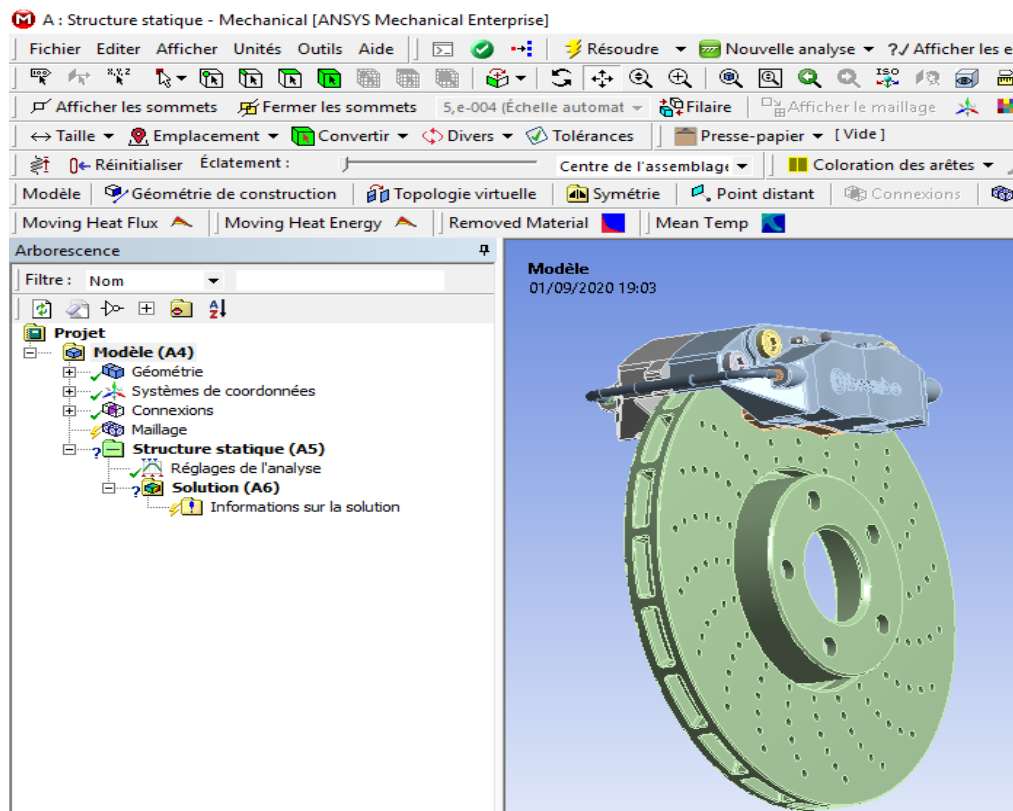


Figure.IV.2 : le modèle du disque ventilé avec la plaquette

## IV.3.Simulation du problème mécanique :

La simulation présentée dans notre étude considère le contact avec frottement d'une plaquette déformable sur un disque rigide. Le matériau choisi du disque dans les deux cas (ventilé dans l'étude mécanique et le plein dans l'étude thermique) est l'acier standard à haute teneur



encarbonate et la plaquette de frein à un comportement élastique isotrope dont les caractéristiques mécaniques dans le tableau

Arborescence de Schéma A2 : Données matériaux					
	A	B	C	D	E
1	Contenu de Données matériaux			Source	Description
2	Material				
3	Acier standard				Les données de fatigue à niveau de contrainte moyenne nul sont tirées du ASME BPV Code 1998, Section 8, Div. 2, Table 5-110.1
*	Cliquez ici pour ajouter un nouveau matériau.				

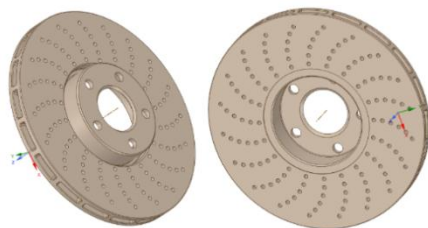
Propriétés de Ligne d'arborescence 3 : Acier standard					
	A	B	C	D	E
1	Propriété	Valeur	Unité		
2	Variables des champs matériaux	Tableau			
3	Masse volumique	7850	kg m <sup>-3</sup>		
4	Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique				
6	Elasticité isotrope				
12	Contrainte alternée - Contrainte moyenne	Tabulaire			
16	Paramètres de durée de vie				
24	Limite d'élasticité en traction	2,5E+08	Pa		
25	Limite d'élasticité en compression	2,5E+08	Pa		
26	Limite à la rupture en traction	4,6E+08	Pa		
27	Limite à la rupture en compression	0	Pa		

**Figure.IV.3** : le choix de matériaux

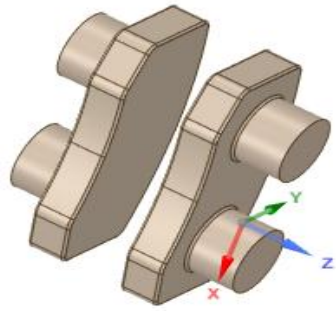
#### IV.4.Création du modèle :

Pour commencer l'étude, on a importé le model assemblées sur A qui représente le disque de frein ventilé avec la plaquette. Puis, on a fait le maillage et on a défini les conditions aux limites pour initialiser le calcul.

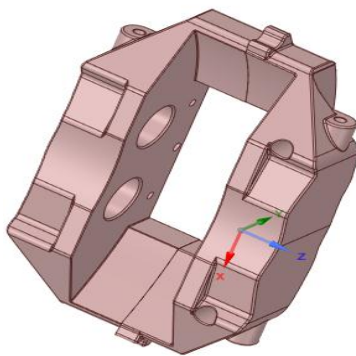
v



**Figure.IV.4** : vue gauche et droite de la conception du disque

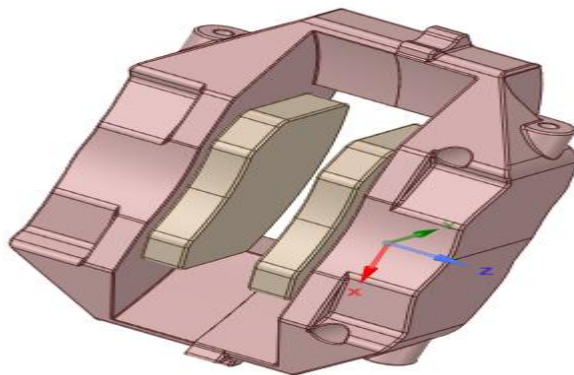


**Figure.IV.5** : conception les plaques de frein



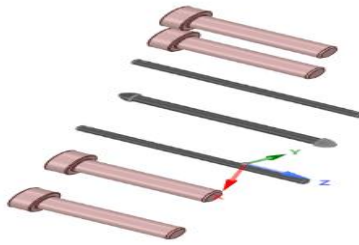
**Figure.IV.6** : conception du mécanisme de freinage

#### IV.4.1. Assemblage des plaques avec le mécanisme :

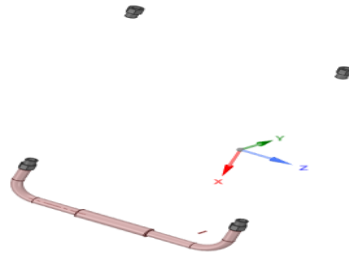


**Figure.IV.7** : assemblage des plaques avec le mécanisme

#### IV.4.2. Les outils de système de fixation et le système hydraulique :

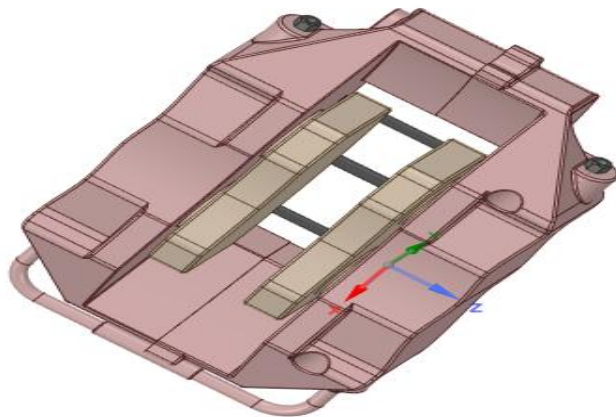


**Figure.IV.8** :système de fixation



**Figure.IV.9** : système hydraulique (tuyaux et goupille)

#### IV.4.3.assemblage complet du système de freinage :



**Figure.IV.10** :assemblage complet du système de freinage

#### IV.4.4.la géométrie d'étude :

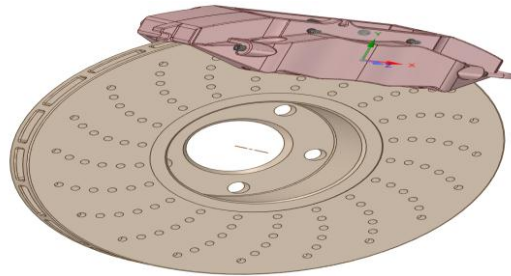


Figure.IV.11 : la géométrie d'étude

#### IV.5.Choix du maillage :

Un fois la structure est créée, on a fait le maillage. Il s'agit d'un maillage progressif. Le modèle disque-plaquette a été maillé par des éléments volumiques tétraédriques et quadratiques est ANSYS effectue un maillage automatique (par défaut).les figures donnent respectivement les détails de maillage et le maillage volumique de système freinage.

Détails de "Maillage"	
<input type="checkbox"/> Pertinence	0
Ordre des éléments	Contrôlé par le programme
[-] Dimensionnement	
Fonction de taille	Adaptatif
Centre de pertinence	Grossier
<input type="checkbox"/> Taille des éléments	Par défaut
Simplification du maill...	Oui
<input type="checkbox"/> Taille de simplificati...	Par défaut
Transition	Rapide
Taille d'élément initiale	Assemblage
Centre d'angle de cou...	Grossier
Diagonale de la boîte ...	0,501030 m
Aire de surface moyen...	3,0302e-004 m <sup>2</sup>
Longueur d'arête mini...	3,1183e-005 m
[-] Qualité	
Vérifier la qualité du ...	Oui, Erreurs
Contrôle de forme	Mécanique standard
<input type="checkbox"/> Qualité cible	Par défaut (0.050000)
Lissage	Moyen
Paramètres de maillage	Aucun
[+] Inflation	
[+] Avancés	
[-] Statistiques	
<input type="checkbox"/> Nœuds	394763
<input type="checkbox"/> Éléments	227619

Figure.IV.12 : Détail du maillage

### IV.5.1. Le maillage de système freinage :

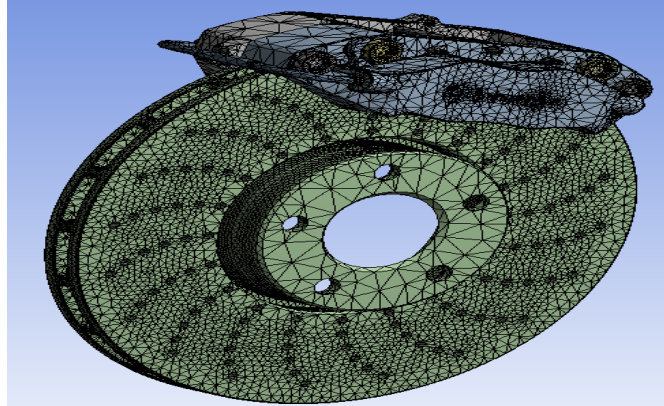


Figure.IV.13 : Maillage de géométrie

### IV.6. Conditions aux limites :

#### IV.6.1. Conditions mécanique :

##### Le disque :

- Le disque est bloqué suivant toute les directions.
- Le disque est encastré par leur surface inférieure suivant la direction axiale.

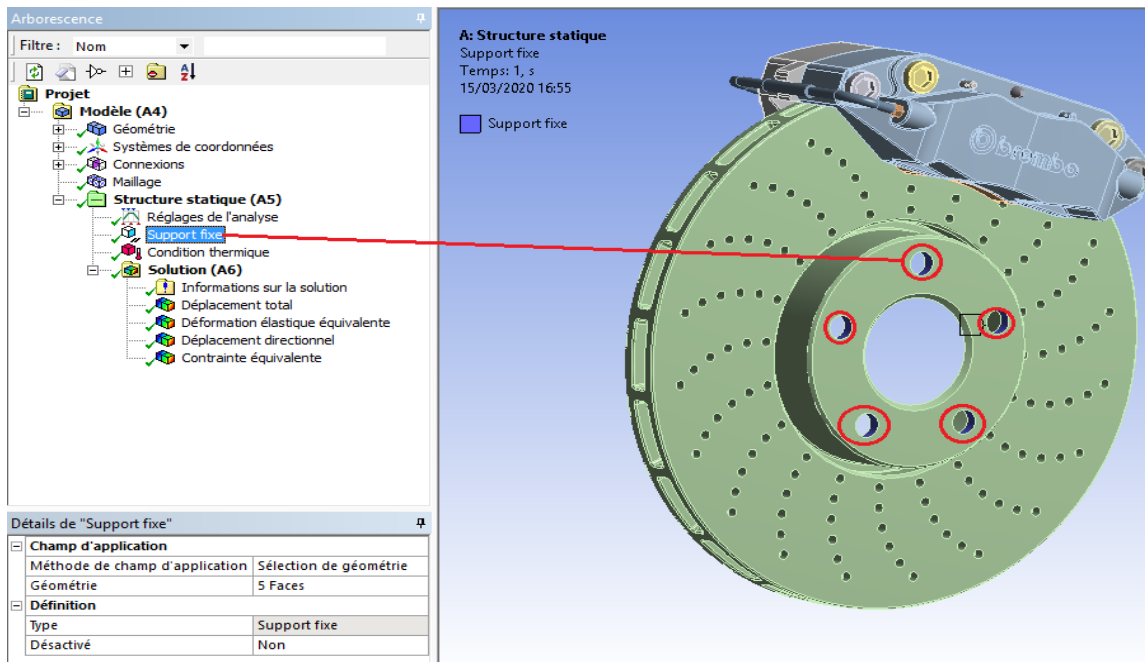
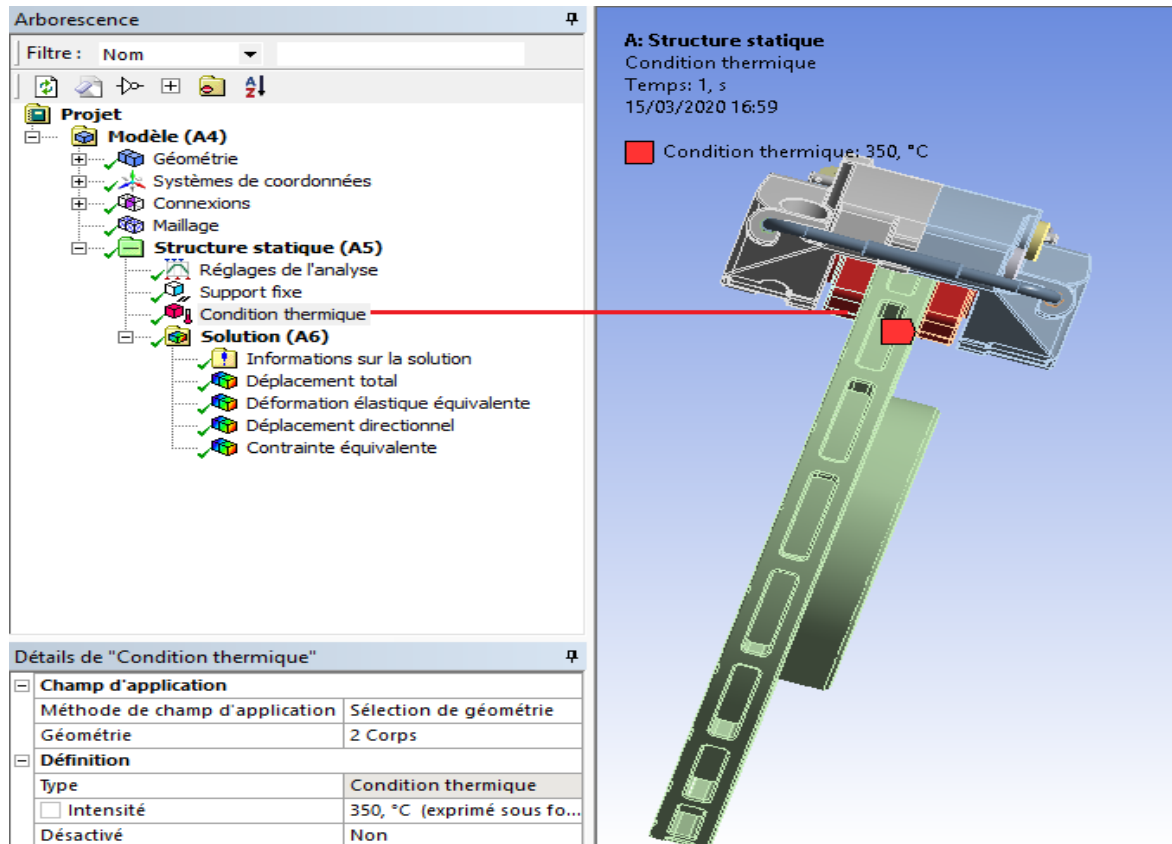


Figure.IV.14 : condition support fixe (encastrement sur les trous de fixation)

➤ **La plaquette :**

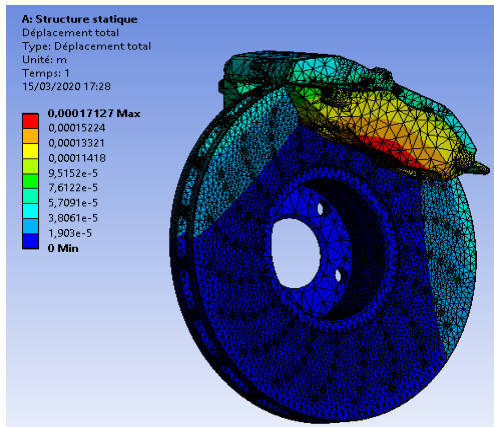
- La plaquette est encastrée sur ses bords dans le plan orthogonal à la surface de contact, autorisant ainsi un mouvement de corps rigide dans la direction normale au contact.

**IV.6.2. Condition thermique :**

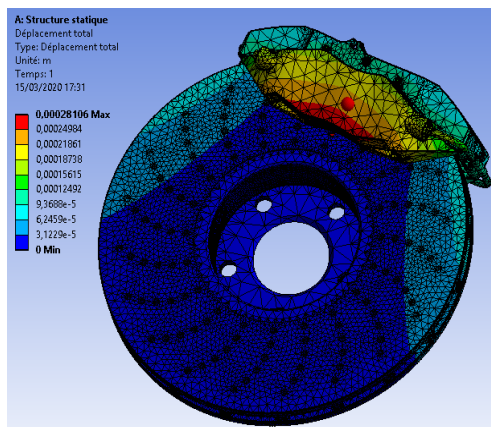


**Figure.IV.15 :** condition thermique sur les plaques de frein

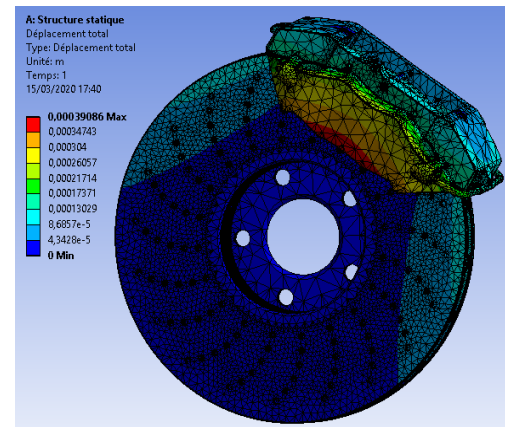
### IV.7. Les résultat de simulation :



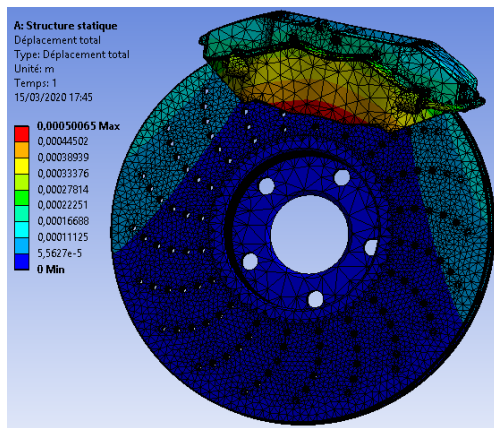
a=100 c°



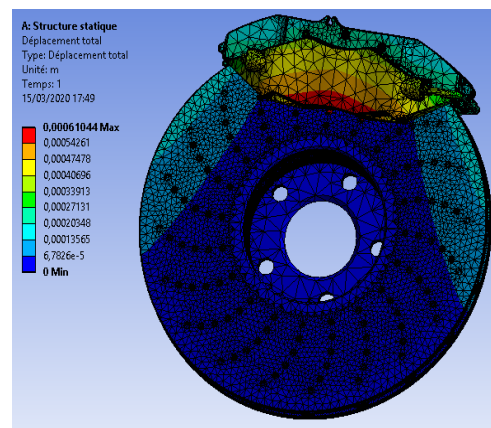
B=150 c°



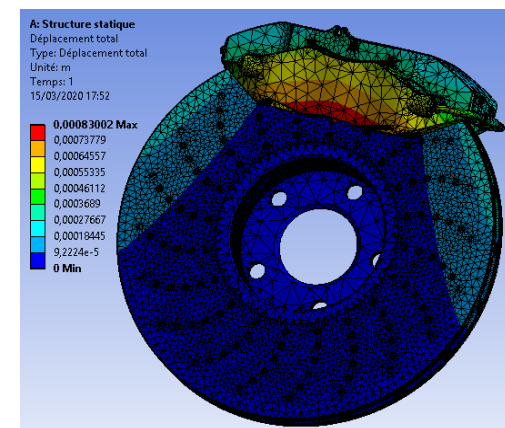
C=200 c°



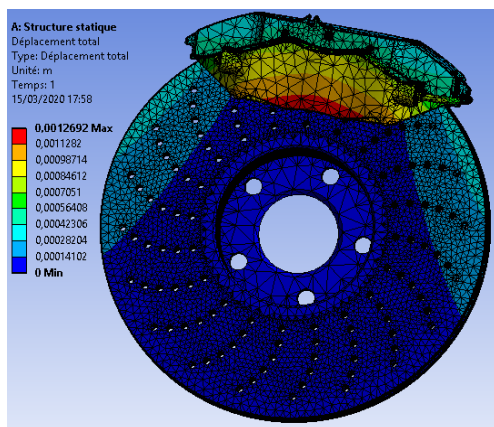
D=250 c°



E=300 c°



F=400 c°



G=600 C°

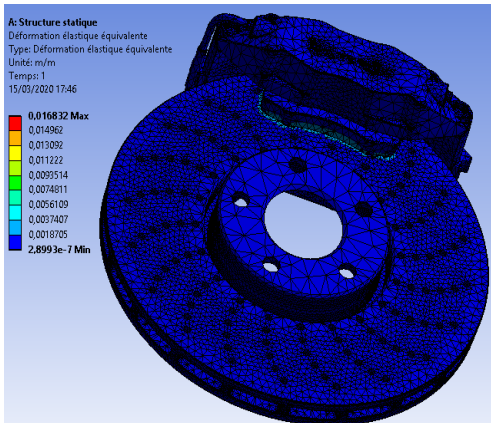
Figure.IV.16: déplacement total pour les températures 100, 150, 200,250, 300 ,400et 600 C°

**Commentaires :**

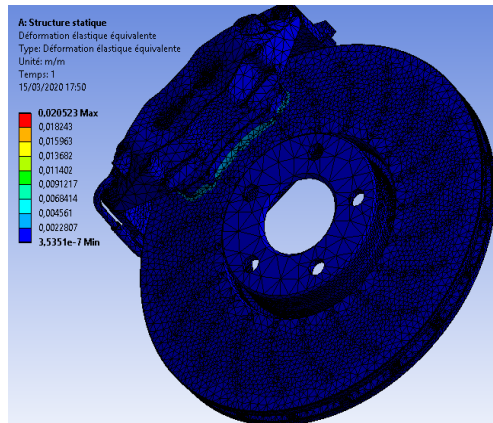
La figure IV.16 présente la répartition et l'augmentation de déplacement en fonction de la température de simulation sur le disque. Le déplacement total est atteint à la fin du freinage et elle varie entre 0 m à 0.0012 m Sur le modèle de la plaquette intérieure. Plus la température du disque est élevée le déplacement est important.



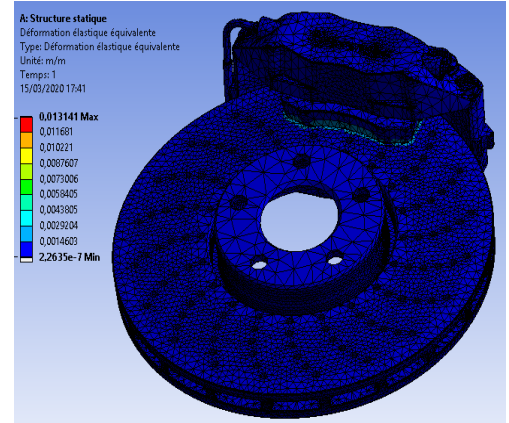
## IV.2. Déformation élastique équivalente



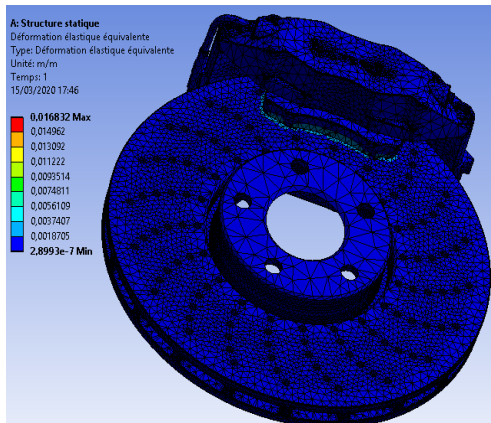
A=100 c°



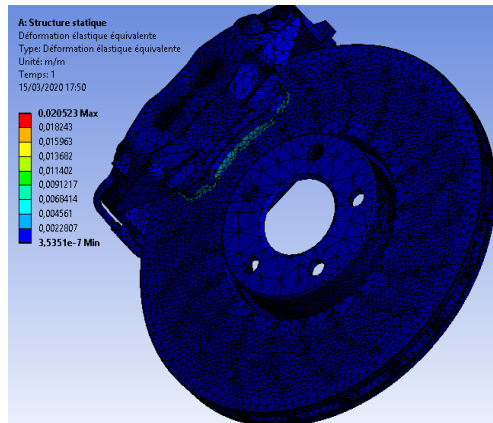
B=150 c°



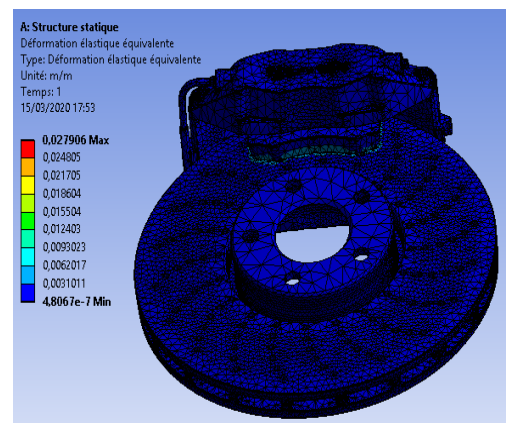
C=200 c°



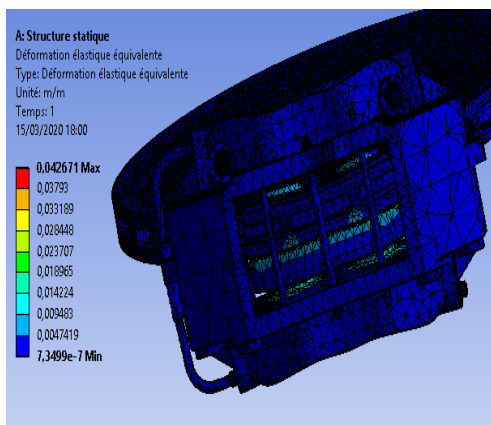
D= 250 c°



E=300 c°



F=400 c°



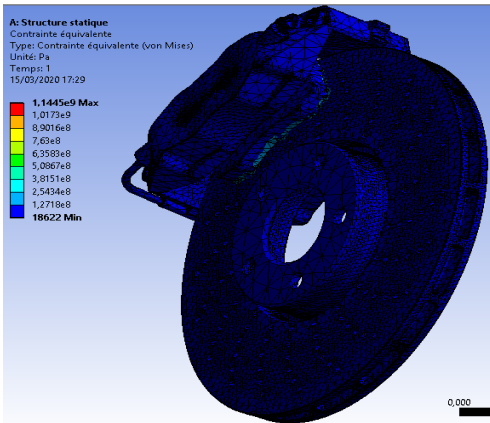
G=600 c°

**Figure.IV.17** : Déformation élastique équivalente pour les températures (100, 150, 200, 250, 300,400 et 600 C°)

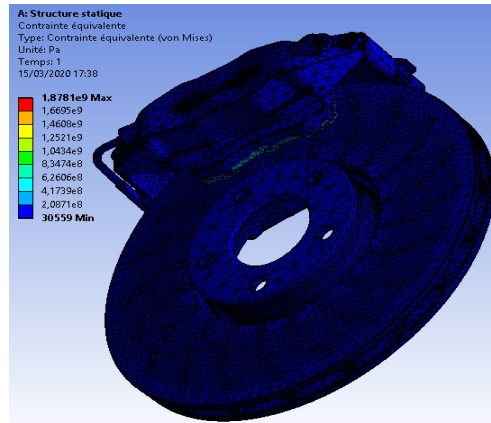
**Commentaires :**

La figure IV.17 montre différentes configurations des déplacements de l'ordre du modèle en fonction du temps, tout en gardant la forme symétrique par rapport au plan médian vertical. La déformée totale est atteinte à la fin du freinage et elle varie entre 0 mm à 0.042mm. Sur le modèle de la plaquette intérieure non-déformée on a une dégradation des couleurs allant du jaune et vert vers la rouge où la valeur critique se situe sur le bord radial supérieure de la plaquette déformée, représentée sur la figure par la couleur rouge. Ceci est au module d'élasticité de plaquette qui est inférieur à celui du disque.

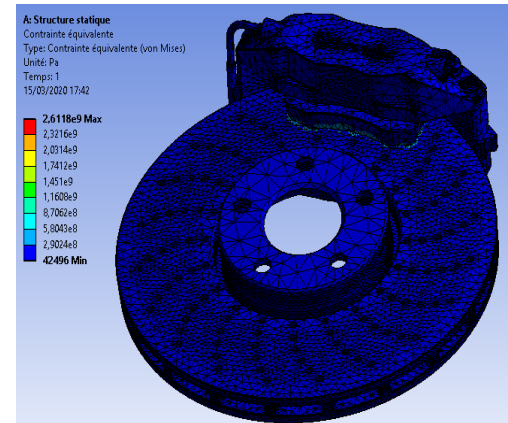
### IV.3. Contrainte équivalente (Von mise)



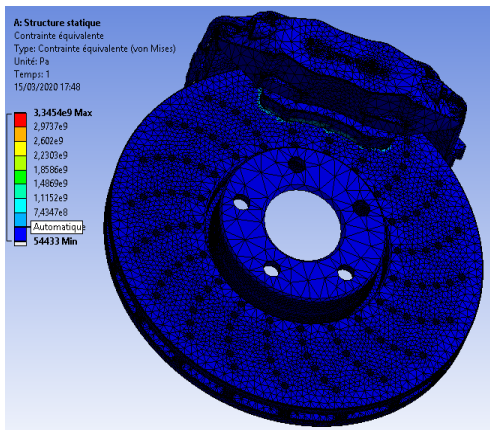
A=100 c°



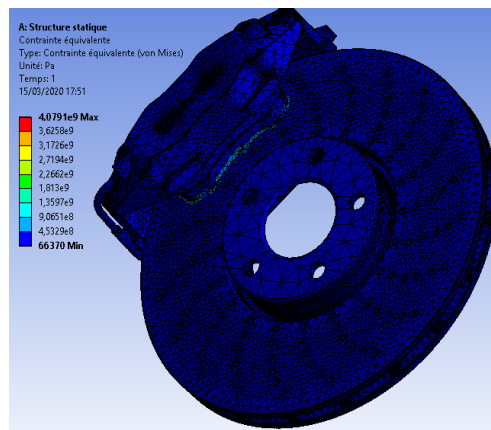
B=150 c°



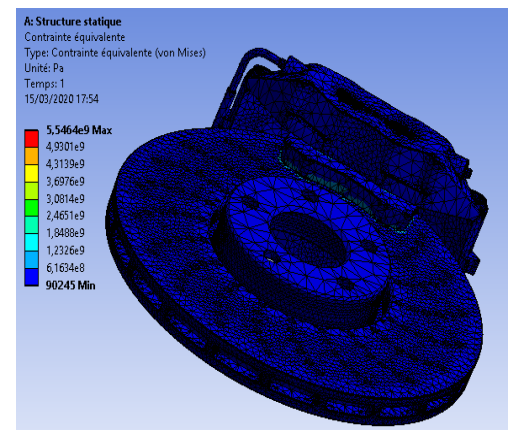
C=300c°



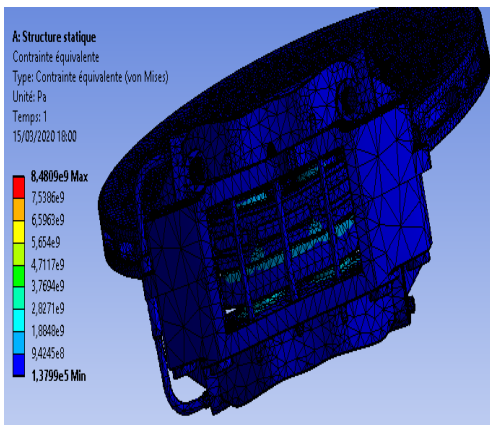
D= 250 c°



E=300 c°



F=400 c°



G=600 c°

Figure.IV.18 : contrainte équivalente pour les températures 100, 150, 200, 250, 300,400 ,600 c°

### **Commentaires :**

La figure IV.18 présente la répartition et l'augmentation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de température de simulation sur le disque. Les valeurs de la contrainte équivalente de Von Mises varient de 0 Pa à  $8,48.10^9$ Pa. La valeur maximale enregistrée lors de cette simulation se situe au niveau du pied des ailettes du côté interne du disque ou La concentration de contrainte les plus importante naissent dans la zone pied des ailettes du disque et elles se propagent vers la piste de frottement extérieure avec des niveaux faibles au cours du freinage .Ce comportement est dû à l'application de pression de contact disque /plaquette

### **IV.8.CONCLUSION :**

D'après les résultats De l'analyse des contraintes on peut remarquer que les parties à forte concentration de contraintes dans le disque se trouvent généralement dans le disque au niveau les pieds des ailettes qui peuvent être assimilées aux zones d'encastrement d'une poutre console Quant à la plaquette les concentrations de contraintes se trouvent sur les côtes de la plaquette inférieure

Pour la partie de simulation de la température l'analyse montre que la température est maximale sous la plaquette avec un gradient expressif radialement, ce qui peut être la cause des concentrations de contraintes, siège de l'amorçage des fissures.

Finalement, L'étude bibliographique de ces Phénomènes montre que leur prédiction comme par celle du comportement thermomécanique du disque. La première étape de l'étude consiste donc à mettre en œuvre une méthode numérique qui permet la simulation thermomécanique d'un freinage. L'analyse des résultats numériques permettra ensuite l'étude des endommagements et leur prédiction.

## CONCLUSION GENERALE :

Pour les raisons de la sécurité des passagers, la construction optimale des disques de freins est actuellement l'objet de nombreuses études. Le contact disque – plaquettes implique de nombreux phénomènes, tels que l'élévation de la température, l'usure des pièces et les vibrations.

Vu que les essais expérimentaux, bien qu'indispensables avant toute production en série d'un système de freinage, sont relativement coûteux et lents à mettre en place, lors de la phase de conception, les constructeurs font appel à la simulation numérique.

Dans ce projet de fin d'études, on a présenté une modélisation numérique du contact disque – plaquettes en utilisant le logiciel ANSYS pour modéliser, calculer et analyser le comportement sous l'aspect thermomécanique afin de prédire la tenue en service des pièces en contact glissant.

Dans la première partie de ce travail on a commencé par définir le modèle géométrique adéquat actuellement adopté dans la voiture. Cette première partie a été développée en utilisant le logiciel ANSYS.

Dans la deuxième partie de ce travail L'analyse du comportement thermomécanique des disques de frein est une étape incontournable dans la conception des systèmes de freinage, car la température et les contraintes conditionnent le comportement thermomécanique des matériaux du disque et des plaquettes qui peuvent subir dans des situations critiques de freinage des dommages sévères. Durant la phase de freinage, les températures et les gradients thermiques sont très élevées.

Les résultats de simulations pour le calcul par éléments finis a été faite à l'aide du logiciel de commerce ANSYS. De l'analyse des contraintes et de déformations, on peut remarquer que les parties à forte concentration de contraintes dans le disque se trouvent généralement dans le disque au niveau les pieds des ailettes qui peuvent être assimilées aux zones d'encastrement d'une poutre console. Quant à la plaquette, elle présente des concentrations de contraintes sur côtés de la plaquette inférieure. Ces effets (contraintes et déformations) à des niveaux critiques, associées au mouvement de la roue, peuvent être la cause des phénomènes nuisible au bon fonctionnement tels les déformations élevées, usure, fissures et ruptures mêmes,...etc.).

- Le bon choix du matériau des plaquettes dépend de son module de Young. Le matériau ayant le plus grand module d'élasticité diminue les contraintes maximales et donne des bons résultats.
- Le choix d'un matériau des plaquettes dépend d'un bon coefficient de frottement (le plus élevé possible).
- L'augmentation de la vitesse de rotation de disque entraîne la diminution des contraintes équivalentes de Von Mises, les contraintes de cisaillement du disque, et entraîne l'augmentation des contraintes normaux du disque et les pressions et contraintes de frottement ainsi la déformée totale des plaquettes
- L'emploi de la fonte grise pour les disques de frein influe positivement sur la contrainte en surface du disque. Elle se distingue par un meilleur comportement mécanique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] <https://www.howacarworks.com/basics/how-the-braking-system-works>
- [2] <https://www.aidetechniqueauto.fr/freins-4.html>
- [3] <https://itstillruns.com/functions-brake-system-6038830.html>
- [4] [http://www.angelfire.com/retro2/kalyz\\_elysyus/drumbrakesintro.html](http://www.angelfire.com/retro2/kalyz_elysyus/drumbrakesintro.html)
- [5] <https://carbiketech.com/drum-brake/>
- [7] <https://www.linternaute.fr/auto/guide-pratique-auto/1408996-disque-de-frein-comment-ca-marche/#:~:text=Le%20principe%20de%20base%20du,d%27un%20véhicule%20en%20chaleur.&text=Lorsqu%27un%20freinage%20est%20nécessaire,d%27un%20couple%20de%20freinage.>
- [6] <https://classicsworld.co.uk/guides/the-history-of-the-disc-brake/>
- [8] <https://www.ornikar.com/code/cours/mecanique-vehicule/freins/disque>
- [9] <https://point-s.ca/blogue-et-conseils/les-8-problemes-de-freins-a-surveiller/#>
- [10] <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1105-frein-a-disque-et-circuit-hydraulique.php>
- [11] [www.theses.fr/2016LYSEC006.pdf](http://www.theses.fr/2016LYSEC006.pdf)
- [12] <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1254-types-de-disques-de-frein.php>
- [13] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/brake-pad>
- [14] <https://www.toppr.com/guides/physics/thermal-properties-of-matter/heat-transfer/>
- [15] <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Temperature+Field#>
- [16] <https://study.com/academy/lesson/thermal-gradient-definition-calculation.html>
- [17] <https://www.toppr.com/guides/physics-formulas/heat-flux-formula/>

- [18] <http://www.legi.grenoble-inp.fr/people/Philippe.Marty/cours-thermique-L3.pdf>
- [19] <https://www.thermal-engineering.org/wp-content/uploads/2019/05/Fourier's-law-of-Thermal-Conduction-equation.png>
- [20] <http://www.lyc-diderot.ac-aix-marseille.fr/elevés/cours/bts-tp-bat/propachaleur.htm>
- [21] <https://www.forbesmarshall.com/Knowledge/SteamPedia/Basics/Modes-of-Heat Transfer>
- [22] [http://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/ctcd\\_yk.pdf](http://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/ctcd_yk.pdf)
- [23] Adam Polak, Janusz Grzybek, "The Mechanism of Changes in the Surface Layer of Grey Cast Iron Automotive Brake Disc", *Materials Research*, Vol. 8, No. 4, 475-479, 2005.
- [24] [http://www.fipai.org.br/Minerva% 2004\(02\) % 2004.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%202004(02)%202004.pdf)
- [25] <https://www.biketorqueracing.co.uk/pages/about/btr-tech-station/cast-iron-or-stainless-steel-discs.htm>
- [26] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=967>
- [27] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Matériau\\_composite#:~:text=Un%20matériau%20composite%20se%20compose fibre%20de%20verre%20%2B%20résine%20polyester.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Matériau_composite#:~:text=Un%20matériau%20composite%20se%20compose%20de%20verre%20%2B%20résine%20polyester.)
- [28] [https://www.researchgate.net/profile/Tariq\\_Ouahbi/publication/317351058/figure/fig1/AS:649291613892608@1531814592434/Les-deux-constituants-de-base-dun-matériau-composite.png](https://www.researchgate.net/profile/Tariq_Ouahbi/publication/317351058/figure/fig1/AS:649291613892608@1531814592434/Les-deux-constituants-de-base-dun-matériau-composite.png)
- [29] Fabrication of composites, in handbook of composites, 1986 vol.4 Eds A. Kelly, and S.T. Milieko North-Holland, pp. 111-75.
- [30] Morgan, P., 2005, Carbon Fibers and Their Composites, Taylor and Francis, FL, p.1010.
- [31] Rosen, B.W., 1965, "Mechanics of composite strengthening. In: Fibercomposite materials," Proceedings of the American Society for metals. USA, pp. 574-8
- [32] <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjgrMWgnuTsAhVypHEKHUKACIQFjABegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.futura-sciences.com%2Fsciences%2Fdefinitions%2Fphysique-composite-matrice-metallique-15250%2F&usq=AOvVaw1MerCOAjH1xnT6lSZfZowR>



[33] <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/6622/6622-les-grandes-familles-de-materiaux-composites-ensps.docx>

[34] <https://www.vroomly.com/blog/garniture-de-frein-fonctionnement-entretien-prix/>

[35] A. belhocinethermomécanique des disques de frein Application du Code de Calcul ANSYS v11.0. Mechanical engineering. Oran; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012. Algérie

[36] [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjW2I7d7ebsAhUEVRUIHTU8C2QQFjANegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fwhat-when-how.com%2Fautomobile%2Fbraking-system-automobile%2F&usg=AOvVaw1NbjF\\_6nSG\\_hzKiGiydPGk](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjW2I7d7ebsAhUEVRUIHTU8C2QQFjANegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fwhat-when-how.com%2Fautomobile%2Fbraking-system-automobile%2F&usg=AOvVaw1NbjF_6nSG_hzKiGiydPGk)

[37] <http://www.le-pilote-automobile.com/2014/10/02/dossier-freinage-lendurance-du-systeme-de-freinage/>