

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Ahmed Zabana de Relizane  
Faculté des Sciences et Technologie  
Département de génie mécanique



جامعة غليزان  
RELIZANE UNIVERSITY

**MEMOIRE**

En vue de l'obtention du diplôme de LICENCE  
Spécialité : Génie des matériaux  
Intitulé

**Comportement mécanique du disque de frein en  
contact glissant sec avec les plaquettes**

**Présenté par : ZERROUKI Oussama**

Mr : Zerrouki Oussama

**Devant les membres de jury :**

**Président :** Mme ZOUAMBI Leila

Maître de conférences (A) (U. Relizane)

**Encadrant :** Mlle KERROUZ Siham

Maître de conférences (B) (U. Relizane)

**Examineur :** FELLAH Ahmed

Maître assistant (B) (U. Relizane)

Année universitaire : 2024/2025

## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, nous adressons nos louanges à Dieu, qui nous a donné la force, la patience et la persévérance pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire et à notre formation tout au long de ce parcours académique.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à Mme encadrant Kerrouz Siham, pour ses critiques constructives, ses conseils avisés, sa bienveillance, sa disponibilité, et surtout pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce projet.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement les membres du jury, pour avoir accepté de prendre part à cette soutenance, d'évaluer ce travail et d'y apporter leurs remarques et suggestions enrichissantes.

Enfin, nous n'oublions pas d'adresser nos remerciements à tous les étudiants et professeurs du département de génie mécanique, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réussite de ce travail. À chacun, nous disons un grand merci.

## *Dédicaces*

*À mes parents, pour leur soutien indéfectible et leur amour inconditionnel,*

*À mes amis, pour leur encouragement et leur présence tout au long de ce  
parcours,*

*À mes enseignants, pour leur inspiration et leur guidance,*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à cette aventure.*

*Merci de croire en moi.*

## Résumé

Au cours d'un freinage et quand le disque est mis en contact avec les plaquettes, des sollicitations mécaniques sont imposés au niveau de la zone du contact par fatigue des deux corps. Tous les paramètres physiques (la température, la pression, et la vitesse), les caractéristiques mécaniques et tribologiques et les conditions du contact évoluent avec le temps. La chaleur issue de la friction produite sur l'interface du rotor et de garnitures peut causer un très grand échauffement de cette dernière, et la température peut dépasser la valeur critique qui mène des effets indésirables tels que des phénomènes de la détérioration, de craquage thermique et d'une instabilité thermique. Ce travail permet d'améliorer le système de freinage et la conception des disques de frein.

## Mots clés :

Disque, plaquettes de frein, ANSYS, contact, contrainte équivalente Von-Mises, déformation élastique équ/

## Abstract

During braking, when the disc is brought into contact with the pads, mechanical stresses are imposed on the contact zone by fatigue of the two bodies. All physical parameters (temperature, pressure, and speed), mechanical and tribological characteristics, and contact conditions change over time. The heat from friction produced at the rotor-pad interface can cause the latter to heat up significantly, and the temperature can exceed the critical value, leading to undesirable effects such as damage, thermal cracking, and thermal instability.

This work allows for improvements to the braking system and brake disc design.

**Keywords:** Disc, kidney pads, ANSYS, contact, Von-Mises equivalent stress, equivalent elastic deformation.

## ملخص

أثناء الكبح، وعند ملامسة القرص للوسادات، تُفرض إجهادات ميكانيكية على منطقة التلامس نتيجة إجهاد الجسمين. تتغير جميع المعايير الفيزيائية (درجة الحرارة، الضغط، السرعة)، والخصائص الميكانيكية والاحتكاكية، وظروف التلامس مع مرور الوقت. يمكن للحرارة الناتجة عن الاحتكاك عند نقطة تلامس الدوار والوسادة أن تتسبب في ارتفاع درجة حرارة الأخيرة بشكل كبير، وقد تتجاوز درجة الحرارة القيمة الحرجة، مما يؤدي إلى آثار غير مرغوب فيها مثل التلف والتشقق الحراري وعدم الاستقرار الحراري. يتيح هذا العمل تحسينات على نظام الكبح وتصميم أقرص المكابح

الكلمات المفتاحية: قرص الفرامل، وسادات الفرامل، ANSYS، الاتصال، الإجهاد المكافئ لفون-ميزس، التشوه المرن المكافئ.

# Sommaire

Remerciements .....	2
Dédicace .....	3
Résumé .....	4
Abstract .....	4
Sommaire .....	5
Liste des figures .....	9
Liste des tableaux .....	11
Nomenclature .....	12
Introduction générale .....	14

## Chapitre I : Etat de l'art sur le système de freinage

I.1 Introduction .....	17
I.2 Le système de freinage .....	18
I.2.1 Fonction .....	18
I.3 Les différents types de frein à friction .....	19
I.3.1 Frein à tambour .....	19
I.3.2 Frein à disque .....	20
I.4 Fonctionnement du disque de frein .....	21
I.5 Différents types de disques .....	22
a) Les Disques pleins .....	22
b) Les Disques ventilés .....	23
c) Les Disques percés .....	24
d) Les Disques rainurés .....	24
I.6 Les plaquettes .....	25
I.7 Les supports .....	26

I.8 Les garnitures de frein .....	27
I.8.1 Caractéristiques générales des garnitures .....	27
I.8.1.1 Frottement des garnitures .....	27
I.8.1.2 Usure des garnitures.....	28
I.8.1.3 Le chargement mécanique .....	29
I.8.1.4 Température et Comportement Thermique .....	30
I.9 Les matériaux des composants du système de freinage .....	30
I.9.1 Le disque .....	30
I.9.1.1 Fonte grise .....	31
I.9.1.2 Acier .....	31
I.9.1.3 Carbone-Céramique .....	32
I.9.1.4 Composite aluminium-matrice métallique (MMC) .....	32
I.9.2 Les garnitures .....	32
I.9.2.1 Matières de Base (Liants) .....	33
I.9.2.2 Fibres de renforcement .....	33
I.9.2.3 Les charges .....	33
I.9.2.4 Modificateurs de Frottement .....	33
I.9.2.5 Additifs .....	34
I.10 Conclusion .....	34

## **CHAPITRE II : Contact glissant sec dans le système de freinage**

II.1 Introduction .....	36
II.2 Mécanique des contacts .....	36

II.2.1 Les différents types de contacts .....	36
II.2.1.1 Contact ponctuel .....	37
II.2.1.2 Contact linéaire .....	37
II.2.1.3 Contact Cylindrique .....	37
II.2.1.4 Contact Conique .....	38
II.2.1.5 Contact à Surface Plane .....	38
II.2.1.6 Contact hertzien .....	39
II.2.1.7 Contact des Surfaces Solides .....	39
II.2.1.8 Contact Élastique .....	39
II.2.1.9 Contact Plastique .....	40
II.3 Les Phénomènes de la Tribologie .....	40
II.3.1 Phénomène mécanique .....	41
II.3.1.1 Contact entre Deux Solides en Présence de Frottement .....	41
II.3.1.1.1 Le frottement .....	42
II.3.1.1.1.1 Frottement Statique .....	42
II.3.1.1.1.2 Frottements Cinétiques .....	42
II.3.1.1.2 Lubrification .....	43
II.3.1.1.2.1 Lubrification hydrodynamique .....	43
II.3.1.1.2.2 Lubrification Limite ( $h < R_a$ ) .....	43
II.3.1.1.2.3 Lubrification Mixte ( $h \sim R_a$ ) .....	44
II.3.1.1.2.4 Lubrification Hydrostatique .....	44
II.3.1.1.3 Le phénomène d'usure .....	45
II.3.1.1.3.1 Usure abrasive .....	45
II.3.1.1.3.2 Usure adhésive .....	46
II.3.1.1.3.3 Usure par fatigue .....	46
II.4 Détermination de la force de freinage appliquée .....	47
a) La pression exercée sur le disque par les plaquettes .....	47
II.5 Conclusion .....	48

## **CHAPITRE III : Comportement mécanique du disque de frein en contact glissant sec avec les plaquettes**

III.1 Introduction .....	50
III.2 Modèles géométriques du couple de freinage (disque/plaquette) .....	50
III.3 Modèle géométrique du couple (disque/ plaquettes) Assemblé .....	53
III.4 Matériaux du disque et des plaquettes .....	54
III.5 Spécifications du véhicule .....	54
III.6 Création d'un maillage d'éléments finis .....	55
III.7 Chargements et conditions aux limites .....	57
III.8 Résultats et discussions .....	58
III.8.1 Répartition de la contrainte équivalente de Von Mises .....	60
III.8.2 Répartition du champ de déformation élastique équivalente .....	60
III.8.3 Influence de changement du matériau de disque sur la variation du champ de contrainte équivalente (Von-Mises) .....	61
III.9 Conclusion .....	63
Conclusion générale .....	65
Références bibliographiques .....	66

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : Etat de l'art sur le système de freinage

<b>Figure I.1 :</b> Emplacement des freins à tambour .....	19
<b>Figure I.2 :</b> Pièces d'un frein à tambour .....	19
<b>Figure I.3 :</b> Freins à Disque .....	21
<b>Figure I.4 :</b> Fonctionnement d'un frein à disque .....	22
<b>Figure I.5 :</b> Exemple de disque plein .....	23
<b>Figure I.6 :</b> Exemple de disque ventilés .....	23
<b>Figure I.7:</b> disques de frein perforés Ferodo .....	24
<b>Figure I.8:</b> disques de frein rainurés (CITROEN) .....	25
<b>Figure I.9:</b> Plaquette de frein .....	26
<b>Figure I.10:</b> Garniture de frein .....	27
<b>Figure I.11:</b> frottement entre les garnitures de frein et la surface du disque .....	28
<b>Figure I.12:</b> Composition des Garnitures de Frein .....	34
<b>Chapitre II : Contact glissant sec dans le système de freinage</b>	
<b>Figure II.1 :</b> Contact entre un solide plan et un sphérique .....	37
<b>Figure II.2 :</b> schéma 3D montrant Contact linéaire .....	37
<b>Figure II.3 :</b> Contact cylindre – plan .....	38
<b>Figure II.4 :</b> Roulements coniques .....	38
<b>Figure II.5 :</b> Contact Hertzien entre Corps Élastiques .....	39
<b>Figure II.6 :</b> Contact entre surfaces solides : engrenages .....	39
<b>Figure II.7 :</b> Indentation d'une sphère rigide sur une surface molle .....	40
<b>Figure II.8 :</b> Contact entre Deux Solides avec Frottement .....	42

<b>Figure II.9 :</b> Illustration du film fluide dans la lubrification hydrodynamique .....	43
<b>Figure II.10 :</b> Illustration de la lubrification limite avec contact des aspérités .....	44
<b>Figure II.11 :</b> Schéma de la lubrification mixte .....	44
<b>Figure II.12 :</b> Schéma du fonctionnement de la lubrification hydrostatique dans un palier.....	45
<b>Figure II.13 :</b> Mécanisme de l'usure abrasive .....	46
<b>Figure II.14 :</b> Mécanisme de l'usure adhésive .....	46
<b>Figure II.15 :</b> Usure de fatigue : Cas d'une dent d'un engrenage .....	47
<b>Chapitre III : Comportement mécanique du disque de frein en contact glissant sec avec les plaquettes</b>	
<b>Figure III.1 :</b> Modèle géométrique de Disque de frein en 3D .....	51
<b>Figure III.2 :</b> Modèle géométrique de Disque de frein en 2D .....	51
<b>Figure III.3 :</b> Modèle géométrique de plaquette en 3D .....	52
<b>Figure III.4 :</b> Modèle géométrique de plaquette en 2D .....	52
<b>Figure III.5 :</b> Assemblage du Disque de frein avec les plaquettes en 3D .....	53
<b>Figure III.6 :</b> Assemblage du Disque de frein avec les plaquettes en vue de face .....	53
<b>Figure III.7 :</b> Maillage du couple (disque percé / plaquettes) .....	56
<b>Figure III.8 :</b> Les conditions aux limites .....	57
<b>Figure III.9 :</b> la Réparation de la contrainte équivalente dans les couples en fonction du temps .....	59
<b>Figure III.10 :</b> Réparation de la déformation équivalente dans les couples .....	60
<b>Figure III.11</b> Comparaison entre les deux couples sous l'influence de changement du matériau en fonction du temps .....	6

## LISTE DES TABLEAU

<b>Tableau II.1</b> : Introduction à la Tribologie : Frottement, Usure et Lubrification .....	41
<b>Tableau III.1</b> : Matériaux du disque et des plaquettes .....	54
<b>Tableau III.2</b> : Les données de véhicule .....	55
<b>Tableau III.3</b> : Les propriétés mécaniques pour le couple (FG25, acier inoxydable/composite) .....	61

## NOMENCLATURE

$E_c$  : Energie Cinétique [J]

$M$  : Masse du véhicule [kg]

$V_0$  : la vitesse initiale [m/s]

$V_f$  : Vitesse du véhicule à l'instant  $t$

$\beta$  : Coefficient de répartition de poids

$E_{cf}$  : Énergie cinétique dissipée par freinage [J]

$F_p$  : Force de freinage appliquée sur chaque roue avant [N]

$x_f$  : Distance parcourue par le véhicule pendant le freinage [m]

$t$  : Temps écoulé depuis le début du freinage [s]

$t_{stop}$  : Temps total de freinage jusqu'à l'arrêt complet

$F_d$  : Force de freinage appliquée sur chaque disque de la roue avant [N]

$R_d$  : Rayon du disque [m]

$R_p$  : Rayon de la plaquette de frein

$\omega_d$  : La vitesse de rotation du disque [rad/s]

$P$  : Pression exercée sur le disque par les plaquettes [Pa]

$P_h$  : La pression hydraulique répartie sur les plaquettes

$A_{cp}$  : Surface de contact des plaquettes [m<sup>2</sup>]

$\mu$  : le Coefficient de frottement

$T$  : La température initiale du disque [C°]

$F_N$  : Force Normale [N]

$F_t$  : Force Tangentielle

$S_1$  : Corps solide 1

$S_2$  : Corps solide 2

$F_{Fmax}$  : Force maximale de frottement statique

$\mu_s$  : Coefficient de frottement statique

$F_{Fc}$  : Force de frottement cinétique

$\mu_c$  : Coefficient de frottement cinétique

---

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La tribologie est la science qui s'intéresse en frottement à l'usure à l lubrification et au contact. Lorsque deux solides en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre produisant une force qui s'oppose en mouvement. Un système tribologique se définit comme un système mécanique, forme de deux matériaux en contact comme le système de freinage qui nous utilisons dans cette étude.

Il existe plusieurs technologies de freinages, sont utilisé dans plusieurs véhicules de tous types légers ou lourd, ils sont utilisés dans toute l'industrie automobile, le ferroviaire et l'aéronautique. Les freins à disque, ces derniers sont les plus réponsus et les plus utilisés, ils sont considérés comme fiables et plus performants et ils existent sous différents types ; disques pleins, disques ventilés et autre comme les disques percés et les disques rainurés. Le disque de frein est un organe clé dans les systèmes de freinages, garant de sécurité, il demeure très étudié par les ingénieurs et fait partie des freins à friction, technologie omniprésente et largement employée, comme technologie de freinage de mouvement, dans le domaine automobile, aéronautique, ferroviaire et autres. Associé avec des plaquettes de frein, le disque de frein constitue un système tribologique (disque de frein/plaquettes de frein) ; un système tribologique, bien entendu, soumis au frottement et confronté à l'usure.

Dans la plupart, des systèmes mécaniques, il existe des situations dans lesquelles un corps déformable entre en contact avec d'autres corps. La problématique du contact est essentiellement de savoir comment les forces sont appliquées sur une structure et comment ces dernières réagissent notamment en présence de frottement. La compréhension de ces problèmes constitue en jeu de première importance. La simulation numérique par la méthode des éléments finis de ces phénomènes complexes est le plus souvent utilisée dans la résolution numérique de ces problèmes. Dans un système de freinage lors du contact d'un disque en rotation avec une plaquette, une force de pression est appliquée par l'intermédiaire de charges, au support à presser les plaquettes sur le disque, l'énergie mécanique se transforme en énergie thermique cette énergie génère un échauffement du couple (disque/plaquettes) et l'augmentation rapide de la température au niveau de la zone de contact dans les premières secondes.

Une modélisation de comportement du couple (disque/plaquettes) dans un système de freinage est adoptée pour la certification de ces deux corps. Cette méthode vise à connaître les surfaces endommagées lors du freinage et donc à quantifier l'effet des dommages sur les performances mécaniques de ces corps en contact, ceci va nous permettre de bien faire un choix optimal et économique des disques et des plaquettes plus résistantes aux dommages.

Cette étude concerne la simulation numérique à l'aide du logiciel ANSYS 16 (WORKBENCH) qui basé sur la méthode des éléments finis sous l'influence de certains paramètres essentiels sur le comportement mécanique du disque de frein en contact glissant sec avec les plaquettes en fonction des paramètres géométriques, des propriétés mécaniques, des conditions aux limites, de type de chargement appliqués, du type des matériaux choisis et du type d'analyse effectuée dans le couple de freinage (disque percé ventilé/plaquettes) lors du contact d'un disque en rotation avec une plaquette qui représentent le corps de friction sur le disque. Le comportement du couple lors du freinage a été analysé en termes de contraintes et de déformations.

La structure de ce mémoire est la suivante :

Au premier chapitre nous ferons une synthèse bibliographique sur le système de freinage.

Le deuxième chapitre traite le contact glissant sec dans le système de freinage.

Le troisième chapitre présente les résultats de la simulation numérique d'un comportement mécanique du disque de frein en contact glissant sec avec les plaquettes.

Enfin, nous présentons une conclusion générale des résultats de cette étude.

---

## **Chapitre I**

---

# **Etat de l'art sur le système de freinage**

---

## Chapitre I : Système de freinage

### I.1 Introduction

Le système de freinage est essentiel pour la sécurité des véhicules, permettant de ralentir ou d'arrêter efficacement. Ce système complexe transforme l'énergie cinétique en chaleur par friction, assurant un contrôle précis de la vitesse. Avec l'augmentation des performances des véhicules, il doit évoluer pour répondre à des normes de sécurité et de fiabilité de plus en plus strictes.

Depuis leur création, les systèmes de freinage ont connu des évolutions considérables, passant de freins mécaniques simples à des technologies avancées telles que les freins à disque, les systèmes antiblocage (ABS) et les dispositifs de freinage régénératif dans les voitures électriques. Ces avancées ont été rendues possibles grâce à des progrès significatifs dans les matériaux, les technologies de conception et les méthodes d'optimisation.

Dans ce premier chapitre, le système de freinage sera mis en évidence en termes de son importance et de sa fonction fondamentale pour assurer la sécurité du véhicule. Ce chapitre couvre les composants du système, y compris les différents types de freins (tels que les freins à tambour et à disque), leur fonctionnement et les types de disques et de plaquettes utilisés. Les propriétés des matériaux qui composent le système et l'effet des facteurs mécaniques et thermiques sur leurs performances et leur durée de vie seront également examinés. L'objectif de ce chapitre est de fournir une compréhension complète des composants de base du système de freinage et de leur fonctionnement pour garantir l'efficacité et la sécurité.

## I.2 Le système de freinage

Le système de freinage d'un véhicule est un ensemble de mécanismes. La plupart des voitures modernes disposent d'un système de freinage aux quatre roues, actionné par un système hydraulique. Les freins peuvent être de type à disque ou à tambour. Les freins avant jouent un rôle plus important dans l'arrêt de la voiture que les freins arrière, car le processus de freinage pousse le poids de la voiture vers l'avant sur les roues avant.

Aujourd'hui, tous les véhicules sont équipés d'un système de freinage performant, associant plusieurs pièces mécaniques :

- Disques de frein : Fixés au moyeu des roues, ils sont pincés par les plaquettes lors du freinage, ce qui ralentit la roue grâce au frottement.
- Plaquettes de frein : Pièces d'usure équipant tous les véhicules avec freins à disque. Elles sont constituées d'un socle en tôle d'acier et d'un matériau de friction. Leur frottement contre le disque permet le freinage [1].
- Les garnitures de frein : Élément clé pour générer la friction nécessaire.
- Les supports et mécanismes hydrauliques : Assurent une transmission efficace de la force de freinage.

### I.2.1 Fonction

La fonction principale du système de freinage est de ralentir, d'arrêter le véhicule ou de maintenir son immobilité en toute sécurité. Cette fonction repose sur la conversion de l'énergie cinétique du véhicule en énergie thermique par le biais de la friction.

Les fonctions spécifiques du système de freinage incluent :

- Réduction de la vitesse : Le système de freinage permet de diminuer progressivement la vitesse du véhicule à la demande du conducteur.
- Arrêt complet : Il permet l'immobilisation totale du véhicule, que ce soit en conduite normale ou dans des situations d'urgence.
- Maintien de la stabilité : En freinant uniformément, le système de freinage assure que le véhicule reste contrôlable, même dans des conditions difficiles comme la pluie, la glace ou les virages serrés.

Le système de freinage doit également répondre à des exigences spécifiques :

- Rapidité de réaction : Le freinage doit être immédiat et efficace.
- Fiabilité : Il doit fonctionner de manière constante, quelles que soient les conditions.
- Résistance à la chaleur : Les composants doivent supporter les températures élevées générées par la friction.

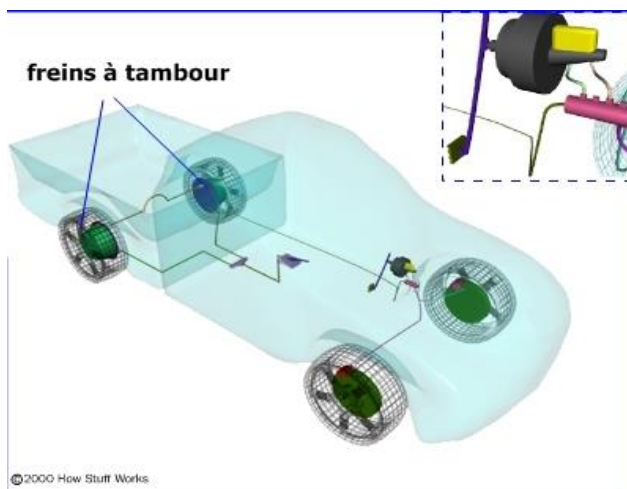
La fonction du système de freinage ne se limite pas à ralentir ou arrêter le véhicule, mais englobe également la sécurité, le confort et la maîtrise du véhicule dans toutes les situations de conduite.

### I.3 Les différents types de frein à friction

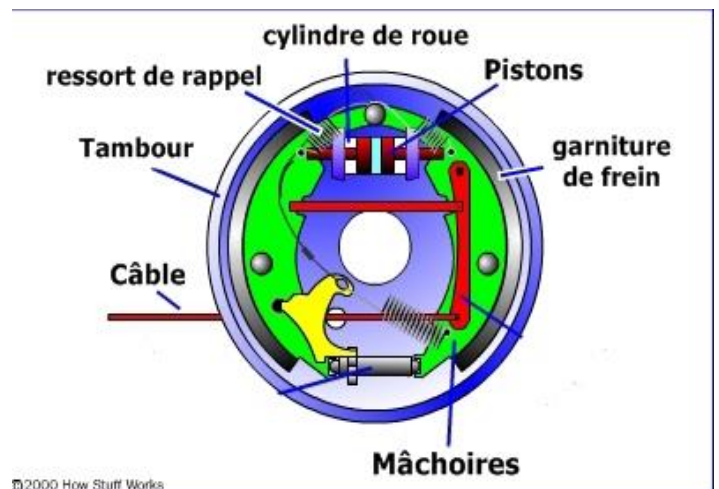
Les freins à friction, fonctionnent en générant une force de friction entre deux surfaces pour réduire la vitesse ou arrêter complètement un véhicule. Ils constituent la technologie de freinage la plus couramment utilisée dans les véhicules. Voici les deux principales catégories de freins à friction :

#### I.3.1 Frein à tambour

Le frein à tambour est composé de deux mâchoires et d'un piston. Mais le frein à tambour est également doté d'un mécanisme de réglage, d'un mécanisme de freinage d'urgence et de nombreux ressorts.



©2000 How Stuff Works



©2000 How Stuff Works

**Figure I.1 :** Emplacement des freins à tambour

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

Lorsque vous appuyez sur la pédale de frein, le piston pousse les mâchoires de frein contre le tambour. C'est assez simple, mais pourquoi avons-nous besoin de tous ces ressorts ?

De nombreux freins à tambour sont auto-actionnés. Les mâchoires de frein entrent en contact avec le tambour, il se produit une sorte d'action de coincement, qui a pour effet de presser les mâchoires dans le tambour avec plus de force.

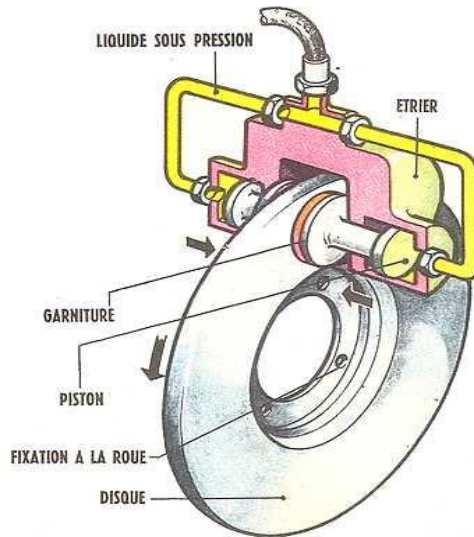
Les mâchoires doivent être éloignées du tambour lorsque les freins sont relâchés. C'est la raison d'être de certains ressorts. D'autres ressorts aident à maintenir les mâchoires de frein en place et à remettre le bras de réglage après son actionnement. [2]

### I.3.2 Frein à disque

Le frein à disque est un système de freinage performant pour les véhicules munis de roues en contact avec le sol : automobile, avion, train, etc. et pour diverses machines. Ce système transforme l'énergie cinétique du véhicule en chaleur.

Le frein à disque (Fig. I.4) est composé de :

- Un **Disque** Fixé au moyeu de la roue, il est la surface contre laquelle les plaquettes de frein frottent pour ralentir la rotation de la roue. Les disques peuvent être en acier ou en matériaux composites pour réduire le poids et améliorer la performance [3].
- **Deux plaquettes** de part et d'autre du disque Composées d'un socle en tôle d'acier et d'un matériau de friction, elles sont pressées contre le disque pour créer le frottement nécessaire au freinage. Les plaquettes sont des pièces d'usure et doivent être remplacées régulièrement.
- Un **Étrier** maintient les plaquettes de frein et contient les pistons qui poussent les plaquettes contre le disque. Il peut être fixe ou flottant, selon le design du système de freinage.
- Un **piston hydraulique** dans le cas d'un étrier flottant ou coulissant ou deux pistons dans le cas d'un étrier fixe posés contre les supports des plaquettes.
- Le **support** de frein est la structure qui maintient l'étrier de frein en place. Il est généralement fixé au châssis du véhicule et assure que l'étrier est correctement aligné avec le disque.



*Figure I.3* : Freins à Disque

#### **I.4 Fonctionnement du disque de frein**

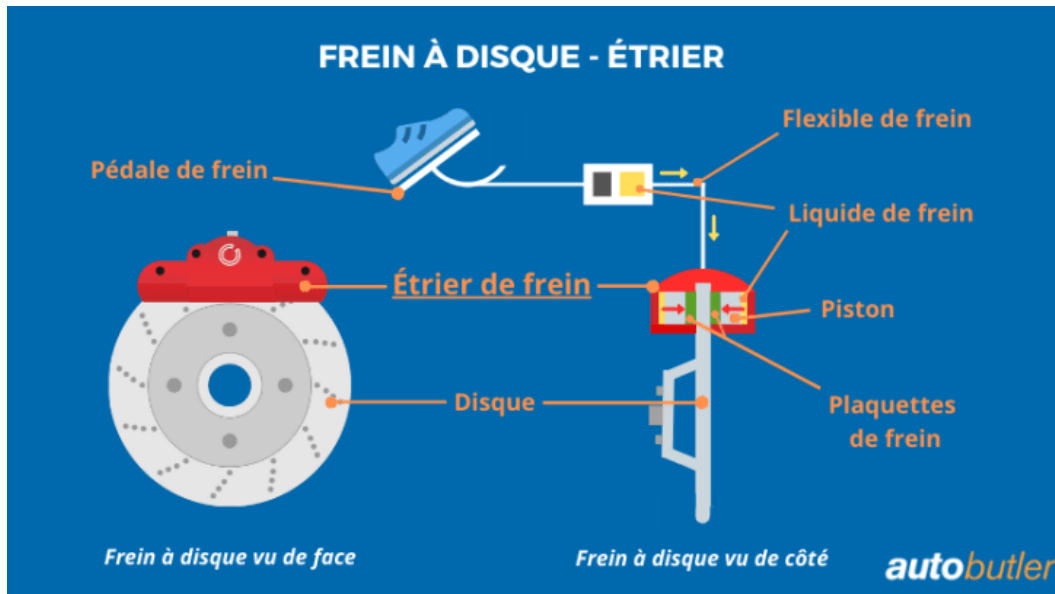
Le disque de frein est un composant essentiel du système de freinage à disque. Il fonctionne en convertissant l'énergie cinétique du véhicule en énergie thermique grâce à la friction générée entre le disque et les plaquettes de frein. Ce processus permet de ralentir ou d'arrêter le véhicule. Voici une explication détaillée du fonctionnement du disque de frein.

Un disque de frein est un système qui utilise un disque et des plaquettes. Le premier est monté sur le moyeu de la roue, et le second, monté dans l'étrier.

Principe de base :

Le fonctionnement du disque de frein repose sur l'application de la force de friction. Lorsqu'un conducteur appuie sur la pédale de frein :

- La pression exercée par le conducteur est transmise aux étriers via un système hydraulique (ou électrique dans certains véhicules modernes).
- Les étriers de frein poussent les plaquettes de frein contre les deux faces du disque.
- La friction créée entre les plaquettes et le disque génère une force qui ralentit la rotation du disque et de la roue. Cette réduction de vitesse est transmise à l'ensemble du véhicule, permettant de le ralentir ou de l'arrêter complètement.



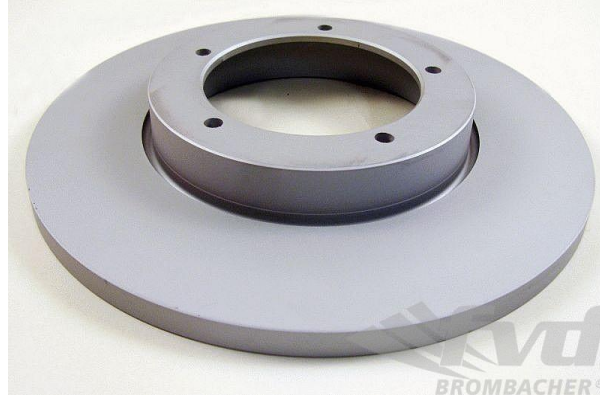
**Figure I.4 :** Fonctionnement d'un frein à disque [4]

### I.5 Différents types de disques

Les freins à disque sont largement utilisés dans les véhicules modernes en raison de leur efficacité, leur durabilité et leur capacité à dissiper rapidement la chaleur. Les disques de frein, composant essentiel de ce système, existent en plusieurs types, chacun adapté à des usages spécifiques et offrant des performances variées. Voici une présentation détaillée des principaux types de disques.

#### a. Les Disques pleins

Les disques pleins sont les plus simples et les moins coûteux, consistant en une seule pièce solide de métal, souvent de la fonte ou de l'acier. Leur surface lisse offre une friction uniforme lorsque les plaquettes de frein sont appliquées, et ils sont généralement utilisés sur les roues arrière des véhicules légers ou des modèles économiques. Leur coût bas les rend idéaux pour les véhicules à petit budget, et leur structure simple réduit les risques de problèmes mécaniques. Cependant, leur dissipation thermique limitée les rend sujets à un échauffement rapide et un refroidissement lent, ce qui peut entraîner une perte d'efficacité pendant un freinage intensif, un phénomène connu sous le nom de "fading" [5].



*Figure I.5* : Exemple de disque plein.

### **b. Les Disques ventilés**

Les disques ventilés (Fig. I.6) sont les plus couramment utilisés pour les roues avant, où la charge de freinage est plus importante. Ils sont constitués de deux surfaces de friction séparées par un espace creux ou des canaux permettant la circulation de l'air, ce qui améliore la dissipation de la chaleur et réduit le risque de surchauffe.

Ces disques maintiennent leur efficacité même à des températures très élevées, entre 600 et 800°C [6], et offrent une meilleure durabilité grâce à une moindre déformation due à la chaleur. Cependant, leur coût de fabrication et d'entretien est plus élevé que celui des disques pleins, et leur complexité accrue les rend plus susceptibles de s'user en présence de débris ou de poussière dans les canaux [7].



*Figure I.6* : Exemple de disque ventilés.

### c. Les Disques percés

Les disques percés, également appelés "perforés", sont dotés de trous sur leur surface (Fig. I.7), qui servent à évacuer la chaleur, les gaz et l'humidité accumulés pendant le freinage.

Ces trous augmentent la surface d'échange thermique, ce qui améliore la dissipation de la chaleur [8], et permettent d'évacuer les gaz produits par la friction lors d'un freinage intense, augmentant ainsi la performance.

De plus, grâce à leur surface perforée, l'eau ne peut former un coussin séparant les disques des plaquettes de frein, garantissant un arrêt direct même sur une chaussée glissante [9]. Cependant, ces trous peuvent affaiblir la structure du disque, ce qui entraîne une usure plus rapide [10].



*Figure I.7:* disques de frein perforés Ferodo

### d. Les Disques rainurés

Les disques rainurés, qui présentent des rainures ou des canaux sur leur surface (Fig. I.8), ne sont pas conçus pour améliorer le refroidissement, contrairement à une croyance répandue.

Leur rôle principal est de nettoyer la surface des plaquettes et de briser la couche gazeuse qui peut se former entre la plaquette et le disque à haute température [10]. Les rainures sont également conçues pour améliorer l'évacuation des débris, de l'eau et des gaz produits lors du freinage, ce qui en fait un choix privilégié pour les véhicules de compétition où des performances élevées sont exigées. Elles offrent une excellente adhérence en maintenant les plaquettes propres, améliorant ainsi la friction, et garantissent une haute performance en conditions extrêmes, idéales pour la conduite sportive ou dans des environnements difficiles.

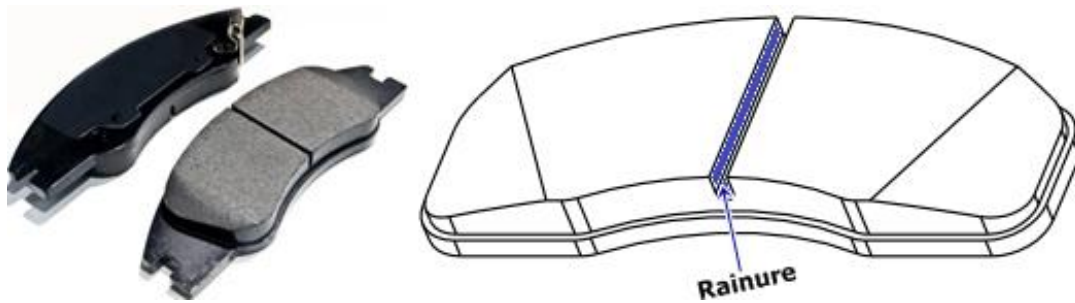
Cependant, ces rainures accélèrent l'usure des plaquettes de frein, ce qui constitue leur principal inconvénient [11].



*Figure I.8:* disques de frein rainurés (CITROEN)

### I.6 Les plaquettes

- Les plaquettes de frein sont les composants du système de freinage à disque qui entrent en contact direct avec le disque pour générer la friction nécessaire au ralentissement ou à l'arrêt du véhicule.
- Les plaquettes sont constituées d'une plaque métallique rigide (support) et d'une garniture de friction fixée à cette plaque [12].
- Les plaquettes sont les pièces les plus essentielles de l'étrier, elles assurent le pincement du disque et de ce fait l'arrêt du véhicule. Elles doivent supporter des températures importantes liées aux frottements contre le disque (ces températures peuvent atteindre les 800°C) [13].
- Les plaquettes de frein automobile comportent des rainures (Fig. I.9). Outre leurs caractères d'évacuation des poussières et des gaz générés lors du freinage.
- Les plaquettes de frein (particulièrement celles des freins à disque) doivent avoir un certain niveau de porosité pour minimiser l'effet de l'eau sur le coefficient de friction [14].



*Figure 1.9:* Plaquette de frein

- Les plaquettes de frein sont fabriquées à partir de différents matériaux en fonction de leurs performances et de leur usage :

- Organiques : Fabriquées à partir de fibres non métalliques, elles sont silencieuses mais s'usent rapidement.
- Semi-métalliques : Mélange de métal et de matériaux organiques, elles offrent une bonne dissipation thermique et une durabilité accrue.
- Céramiques : Très résistantes à la chaleur et à l'usure, elles sont couramment utilisées pour les véhicules haut de gamme ou les applications sportives.

### **I.7 Les supports**

Les supports de frein sont les structures fixes du système de freinage qui maintiennent les étriers et les plaquettes en place. Ils garantissent que les plaquettes restent alignées avec le disque pendant le freinage.

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 [15].

Fabriqués en métal robuste (souvent en acier ou en alliage d'aluminium) pour résister à la pression et aux vibrations.

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.

## I.8 Les garnitures de frein

Les garnitures de frein sont des éléments essentiels des systèmes de freinage. Elles assurent la friction nécessaire pour ralentir ou arrêter un véhicule. Voici une présentation détaillée des aspects fondamentaux des garnitures de frein, compris leurs caractéristiques générales, leur comportement en frottement, leur usure, leur résistance au chargement mécanique et leur comportement thermique.



*Figure I.10:* Garniture de frein

### I.8.1 Caractéristiques générales des garnitures

Les garnitures de frein sont des matériaux composites, le plus souvent à matrice organique, qui peuvent contenir plus d'une vingtaine de constituants. Chacun de ces constituants agit sur les propriétés du matériau, sur son comportement mécanique.

#### Principales caractéristiques :

- Résistance thermique : Les garnitures doivent supporter des températures pouvant dépasser 300 °C lors de freinages intensifs.
- Coefficient de friction stable : Les garnitures sont conçues pour maintenir un coefficient de friction constant, quelles que soient les conditions de conduite.
- Durabilité : Les garnitures doivent résister à l'usure tout en offrant des performances constantes sur une longue période.

#### I.8.1.1 Frottement des garnitures

Le frottement est l'une des propriétés principales des garnitures, car il détermine leur efficacité. Plusieurs facteurs influencent le frottement, notamment le matériau de friction, où les matériaux organiques offrent un frottement modéré mais stable, tandis que les matériaux

métalliques et céramiques présentent un coefficient de friction plus élevé, améliorant ainsi les performances.

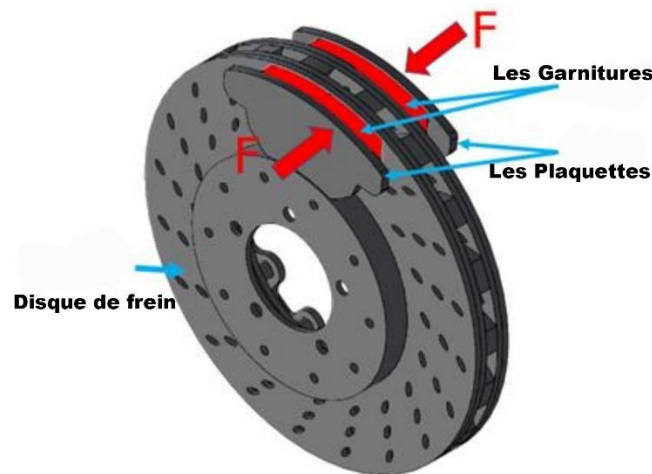
La température joue également un rôle crucial, car à des températures élevées, certaines garnitures peuvent perdre leur efficacité en raison du phénomène de "fading", qui entraîne une diminution du coefficient de friction [16].

De plus, les conditions environnementales, telles que l'humidité et la saleté, peuvent temporairement réduire le coefficient de friction des garnitures.

La valeur habituelle recherchée pour le frottement est comprise entre 0,35 et 0,45, valeur servant normalement de base au calcul de la plupart des freins existants [17].

Le coefficient de frottement a une valeur plus basse sur les garnitures à composants graphités (garnitures dites « grasses »). Une entrée d'eau fait également baisser momentanément ce coefficient.

La formation d'oxyde de fer sur les rotors provoque un coefficient de frottement élevé, et donc un freinage brutal aux premiers coups de frein le matin.



*Figure I.11:* frottement entre les garnitures de frein et la surface du disque

### I.8.1.2 Usure des garnitures

Le mécanisme d'usure des garnitures de frein repose sur quatre processus principaux qui agissent simultanément.

Premièrement, la friction mécanique provoque une abrasion directe entre la garniture et le disque ou tambour lors de chaque freinage, arrachant progressivement des particules du matériau de friction [18].

Deuxièmement, l'usure thermique accélère la dégradation des matériaux composites de la garniture, les températures pouvant atteindre jusqu'à 700°C lors de freinages intenses, ce qui fragilise la structure moléculaire du matériau [19].

Troisièmement, un phénomène de transfert de matière se produit, formant une fine couche intermédiaire appelée "troisième corps" sur la surface du disque, modifiant les caractéristiques de friction [20].

Enfin, l'oxydation due à la réaction chimique avec l'oxygène atmosphérique à haute température altère la composition chimique des garnitures, contribuant à leur dégradation progressive et irréversible [21].

L'usure des garnitures est un processus inévitable qui dépend de plusieurs facteurs à savoir :

➤ Type de matériau

Les garnitures organiques s'usent plus rapidement que les céramiques ou les semi-métalliques.

➤ Qualité du disque

Un disque usé ou endommagé peut accélérer l'usure des garnitures.

➤ Conditions de conduite

Une conduite agressive (freinages fréquents ou intenses) entraîne une usure plus rapide.

➤ Durée de vie moyenne

Les garnitures de frein doivent être remplacées lorsque leur épaisseur atteint environ 2 à 3 mm, ou selon les recommandations du fabricant.

### **1.8.1.3 Le chargement mécanique**

Les garnitures sont soumises à des forces mécaniques importantes pendant le freinage.

Le chargement mécanique des garnitures de frein fait référence à la force appliquée sur ces garnitures pour les presser contre le disque de frein.

Effets du chargement mécanique :

- Pression exercée : Lors du freinage, une pression importante est appliquée sur les garnitures par les étriers. Cette pression doit être uniformément répartie pour éviter une usure inégale.
- Résistance aux vibrations : Les garnitures doivent absorber les vibrations générées par le freinage pour éviter les bruits et les oscillations.
- Déformation : Les garnitures de mauvaise qualité peuvent se déformer sous une pression excessive, ce qui réduit leur efficacité.

#### **I.8.1.4 Température et Comportement Thermique**

La température joue un rôle crucial dans les performances des garnitures de frein.

Effets de la température :

- Chaleur générée : Lors d'un freinage, l'énergie cinétique du véhicule est convertie en chaleur. La température des garnitures peut rapidement atteindre 300 à 800 °C, selon l'intensité du freinage.
- Risque de fading : À des températures très élevées, certaines garnitures perdent leur efficacité en raison d'une diminution du coefficient de friction.
- Dissipation thermique : Les garnitures doivent être couplées à des disques capables de dissiper efficacement la chaleur pour éviter une surchauffe.

Les garnitures céramiques sont particulièrement adaptées aux températures élevées, car elles offrent une meilleure résistance au "fading" et une durabilité accrue [22].

### **I.9 Les matériaux des composants du système de freinage**

Le système de freinage d'un véhicule repose sur des composants fabriqués à partir de divers matériaux soigneusement sélectionnés pour offrir une combinaison optimale de résistance, durabilité, dissipation thermique et performance de friction. Voici une analyse des matériaux utilisés pour deux composants essentiels : le disque de frein et les garnitures.

#### **I.9.1 Le disque**

Le disque de frein étant un composant essentiel pour la sécurité, les matériaux utilisés pour les systèmes de freinage doivent présenter des propriétés de frottement et d'usure stables et fiables

dans des conditions variables de charge, de vitesse, de température et d'environnement, ainsi qu'une durabilité élevée. Le critère le plus important est la capacité du matériau du disque de frein à supporter un frottement élevé et une usure moins abrasive. Il est également essentiel qu'il résiste aux températures élevées générées par le frottement.

Voici quelques-uns des matériaux les plus couramment utilisés pour la fabrication de disques de frein :

### **I.9.1.1 Fonte grise**

La fonte métallique contenant plus de 2 % de carbone dissous dans sa matrice, mais moins de 4,5 %, est appelée fonte grise en raison de sa couleur caractéristique. Compte tenu de son coût, de sa relative facilité de fabrication et de sa stabilité thermique, cette fonte grise est en réalité un matériau plus spécialisé pour les applications de freinage, notamment le matériau de choix pour la quasi-totalité des disques de frein automobiles.

Propriétés :

- Offre de bonnes propriétés d'usure, d'amortissement des vibrations et de résistance aux fissures lors d'une utilisation ultérieure [23].
- Coefficient de dilatation thermique faible, limitant les déformations lors des freinages intenses.

### **I.9.1.2 Acier**

Les disques de frein en acier sont un autre matériau couramment utilisé pour fabriquer des disques de frein personnalisés, notamment dans les applications nécessitant une grande résistance mécanique (par exemple, les véhicules lourds).

Propriétés :

- Plus léger que la fonte, mais moins performant en termes de dissipation thermique.
- Plus sensible aux déformations thermiques sous des charges élevées [24].

Bien que les disques de frein en acier constituent un choix pratique pour de nombreux conducteurs, ils n'offrent peut-être pas le même niveau de performances et de réduction de poids que les disques en carbone-céramique.

### I.9.1.3 Carbone-Céramique

Les disques de frein en carbone-céramique sont une option haut de gamme connue pour leurs performances et leur longévité supérieures. Fabriqués à partir d'une combinaison de fibre de carbone et de matériaux céramiques.

Propriétés :

- Très léger et extrêmement résistant à la chaleur [25].
- Résistance exceptionnelle à l'usure, même à des températures dépassant 1000 °C.

### I.9.1.4 Composite aluminium-matrice métallique (MMC)

Les composites à matrice métallique à base d'alliage d'aluminium renforcés de particules céramiques se sont révélés très prometteurs pour les applications de disques de frein. Ces matériaux, présentant une densité plus faible et une conductivité thermique supérieure à celle des fontes grises conventionnelles, devraient permettre une réduction de poids allant jusqu'à 50 à 60 % dans les systèmes de freinage. Cependant, des freinages répétés n'ont pas permis de réduire le coefficient de frottement [26].

## I.9.2 Les garnitures

Les garnitures de friction, essentielles au système de freinage, sont fabriquées à partir d'une combinaison complexe de matériaux qui peuvent être classés en cinq groupes distincts :

- les liants, dont le rôle est d'assurer la cohésion de l'ensemble des constituants.
- les fibres de renforcement, jusqu'alors en amiante (Elles ont été remplacées par des fibres organiques, minérales ou métalliques.)
- Les charges
- Modificateurs de Frottement
- Les additifs

Ces matériaux sont soigneusement sélectionnés pour offrir un équilibre optimal entre performance de freinage, durabilité, et résistance aux conditions mécaniques et thermiques extrêmes.

Les garnitures se présentent sous forme tissée, moulée ou frittée.

**I.9.2.1 Matières de Base (Liants) (20–35 %)**

Les liants sont des produits minéraux ou organiques du type résine thermodurcissable (phénoplaste) et des caoutchoucs. Ils ont la particularité de fluer et de se liquéfier partiellement sous pression vers 150°C, ce qui permet la mise en forme des garnitures [27].

Il résiste aux températures élevées et assure une bonne adhérence du liner sous de fortes contraintes mécaniques.

**I.9.2.2 Fibres de renforcement (10–25 %)**

Donnent à la garniture sa résistance mécanique, sa stabilité structurelle et une meilleure dissipation de la chaleur.

Types courants :

- Fibres métalliques (ex. : acier, cuivre, laiton) pour la conductivité thermique et la résistance mécanique.
- Fibres organiques (ex. : aramide, comme le Kevlar) pour la légèreté et la stabilité thermique.
- Fibres minérales (ex. : fibre de verre, céramiques) pour la résistance à la chaleur.
- Fibres de carbone pour une excellente performance thermique et une légèreté accrue [28].

**I.9.2.3 Les charges (20–40 %)**

Les charges sont ajoutées pour ajuster les propriétés mécaniques, thermiques et tribologiques de la garniture, elles influencent également la densité et la résistance globale.

Parmi les types courants :

- Charges inertes (ex. : baryte, kaolin) pour améliorer les résistances thermiques.
- Lubrifiants solides (ex. : graphite, disulfure de molybdène) pour réduire l'usure et améliorer la performance au frottement [29].
- Abrasifs : alumine ( $Al_2O_3$ ), carbure de silicium (SiC), pour maintenir l'efficacité du freinage.

**I.9.2.4 Modificateurs de Frottement (10–20 %)**

Ces stabilisent le coefficient de friction et permettent une performance optimale dans différentes conditions (température, pression).

Parmi les types courants :

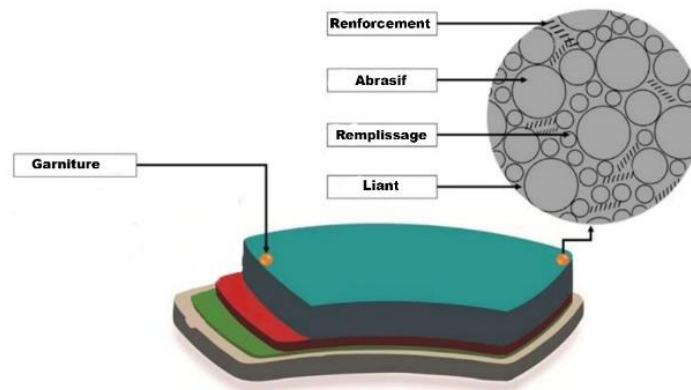
- Produits métalliques (ex. : cuivre, zinc) pour modifier la conductivité thermique et stabiliser le frottement à haute température.
- Matériaux organiques (ex. : caoutchoucs ou polymères) pour améliorer la résistance aux variations thermiques et climatique [30].

### I.9.2.5 Additifs (5–15 %)

Les additifs sont incorporés pour améliorer des propriétés spécifiques (la résistance à la chaleur, la réduction du bruit ou l'anticorrosion).

Comme :

- Antioxydants pour protéger contre les effets de l'oxydation.
- Additifs anti-bruit pour réduire les vibrations (ex. : caoutchoucs modifiés) [31].



*Figure I.12:* Composition des Garnitures de Frein [32]

## I.10 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art sur le système de freinage, soulignant son importance pour la sécurité des véhicules. Il examine les différents types de freins à friction, leurs composants, et analyse le fonctionnement des disques de frein en fonction de leur conception. Les matériaux utilisés, comme la fonte grise et les composites, sont discutés en lien avec la durabilité et l'efficacité. Ce chapitre établit une base théorique pour aborder les défis liés au comportement mécanique du disque de frein dans les chapitres suivants.

---

## **Chapitre II**

---

# **Contact glissant sec dans le système de freinage**

---

## Chapitre II : Contact glissant sec dans le système de freinage

### II.1 Introduction

La mécanique des contacts et des phénomènes tribologiques, deux domaines fondamentaux pour comprendre les interactions et les comportements des surfaces en contact.

Dans un premier temps, nous aborderons la mécanique des contacts en explorant les différents types de contacts qui peuvent exister entre deux solides, tels que les contacts ponctuels, linéaires, cylindriques, coniques, plans, hertziens, élastiques et plastiques, en analysant leurs caractéristiques et leur influence sur les contraintes et déformations.

Ensuite, nous aborderons les phénomènes tribologiques, en étudiant le frottement, la lubrification (hydrodynamique, limite, mixte et hydrostatique) et l'usure (abrasive, adhésive et par fatigue).

L'objectif est de fournir une compréhension concise des mécanismes influençant les performances et la durabilité des surfaces en interaction.

### II.2 Mécanique des contacts

La mécanique des contacts est une branche de la mécanique qui étudie les interactions entre surfaces en contact sous différentes conditions. Elle joue un rôle crucial dans de nombreux domaines, tels que la conception de machines, l'ingénierie des matériaux et la tribologie. Voici quelques points clés concernant la mécanique des contacts:

- Déformation : Analyse des déformations élastiques et plastiques sous charge.
- Pression de contact : Évaluation de la pression exercée à l'interface des surfaces.
- Frottement : Étude des forces résistantes au mouvement entre surfaces.
- Usure : Compréhension des mécanismes d'usure résultant des contacts.
- Lubrification : Utilisation de lubrifiants pour réduire le frottement et l'usure.

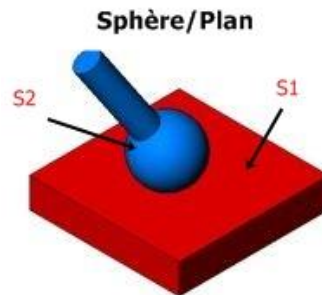
#### II.2.1 Les différents types de contacts

Dans cette section, nous affichons les diverses manières dont deux surfaces peuvent entrer en contact, ce qui a un impact sur le comportement mécanique et tribologique.

### II.2.1.1 Contact ponctuel

Se produit lorsque deux corps se touchent en un seul point (par exemple, une bille et une surface plane).

Ex : Roulements à billes

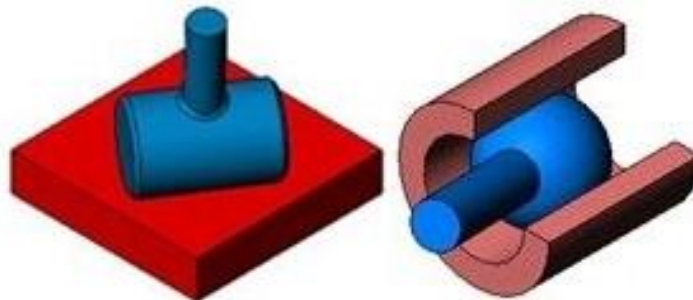


*Figure II.1* : Contact entre un solide plan et un sphérique.

### II.2.1.2 Contact linéaire

Se produit entre une surface cylindrique et une surface plane ou entre deux cylindres.

La zone de contact est une ligne (en théorie), (Ex : Roulements à rouleaux cylindriques).



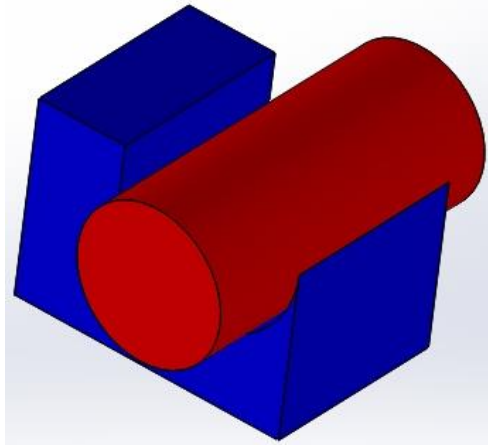
*Figure II.2* : schéma 3D montrant Contact linéaire.

### II.2.1.3 Contact Cylindrique

Implique deux surfaces cylindriques en contact.

Ex : Engrenages, arbres de transmission

Son avantage Répartition uniforme des charges sur une plus grande surface.



*Figure II.3* : Contact cylindre - cylindre.

#### **II.2.1.4 Contact Conique**

Un contact conique se produit lorsqu'une surface conique entre en contact avec une autre surface conique.

Ce type de contact est caractérisé par une zone de contact qui varie en fonction de la profondeur de l'engagement des surfaces.



*Figure II.4* : Roulements coniques.

#### **II.2.1.5 Contact à Surface Plane**

Se produit entre deux surfaces planes.

L'aire de contact est large, Il est Répartit les charges uniformément, mais peut être sujet à des problèmes de frottement élevé.

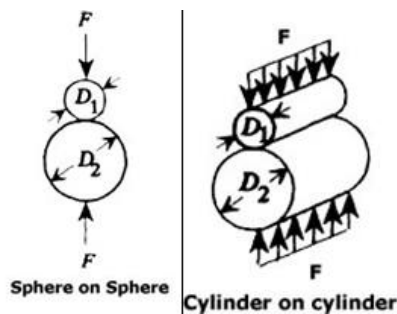
Exemple : Plaquettes de frein contre le disque.

### II.2.1.6 Contact hertzien

Le contact hertzien se produit lorsque deux corps rigides et élastiques entrent en contact sous l'influence d'une charge. (Par exemple, une bille et une surface plane, ou deux cylindres).

Tout contact qui répond aux exigences ci-dessous est appelé un contact Hertz.

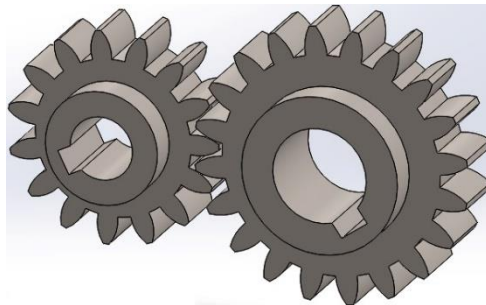
- Une faible déformation se produit dans la zone de contact.
- La surface de contact est elliptique.
- L'objet en contact peut être considéré comme un semi-espace élastique, et seule la pression normale distribuée agit sur la surface de contact [33]



*Figure II.5* : Contact Hertzien entre Corps Élastiques.

### II.2.1.7 Contact des Surfaces Solides

Le contact des surfaces solides étudie les interactions entre deux matériaux solides lorsqu'ils entrent en contact, avec ou sans présence de revêtements intermédiaires.



*Figure II.6* : Contact entre surfaces solides : engrenages.

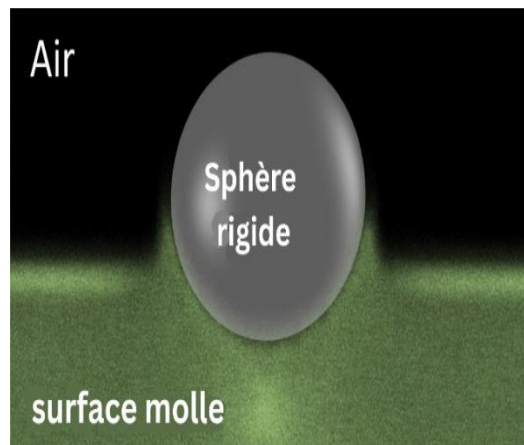
### II.2.1.8 Contact Élastique

Le contact élastique se produit lorsque les surfaces en contact subissent des déformations réversibles (élastiques) sous l'effet des charges appliquées. Ces déformations disparaissent lorsque la contrainte est retirée. Hertz [34] a développé une théorie fondamentale pour modéliser ces contacts, qui permet de déterminer les zones de contact et les contraintes en fonction des

propriétés élastiques des matériaux (module de Young et coefficient de Poisson). Johnson [35] note que ce type de contact est souvent observé dans les roulements à billes et les pneus de voiture, où les matériaux restent dans leur limite élastique sans déformations permanentes.

### II.2.1.9 Contact Plastique

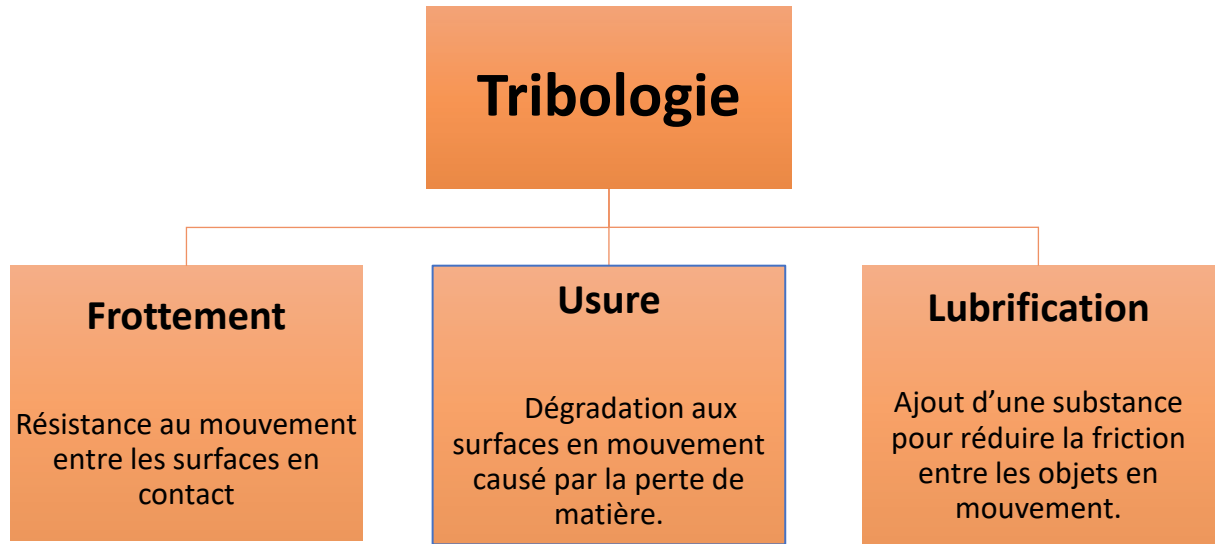
Le contact plastique se produit lorsque les contraintes appliquées sur les matériaux dépassent leur limite élastique, entraînant des déformations permanentes. Green [36] explique que, dans ce cas, les déformations sont irréversibles et que les contraintes atteignent la plage plastique, ce qui peut entraîner des dommages permanents sur les surfaces. Stachowiak et Batchelor [37] ajoutent que ce type de contact est particulièrement pertinent dans les études d'indentation, où un objet dur laisse une empreinte permanente sur une surface plus molle.



*Figure II.7* : Indentation d'une sphère rigide sur une surface molle.

## II.3 Les Phénomènes de la Tribologie

La tribologie est l'étude des phénomènes liés aux interactions entre surfaces en contact, immobiles ou en mouvements relatifs notamment le frottement, l'usure et la lubrification. Ces phénomènes sont fondamentaux dans de nombreuses applications industrielles et mécaniques (Par exemple : Frottement du disque de frein avec la garniture), car ils influencent la performance, la durabilité et l'efficacité des systèmes mécaniques.

**Tableau II.1** : Introduction à la Tribologie : Frottement, Usure et Lubrification

### II.3.1 Phénomène mécanique

Les phénomènes mécaniques en tribologie concernent principalement les interactions physiques entre deux solides en contact. Ces interactions incluent le frottement, l'usure, et les mécanismes de lubrification qui réduisent les pertes d'énergie et protègent les surfaces.

#### II.3.1.1 Contact entre Deux Solides en Présence de Frottement

Lorsque deux solides sont en contact et qu'un mouvement relatif se produit, des forces de frottement se développent. Ces forces dépendent de plusieurs facteurs, notamment les propriétés des matériaux, la rugosité des surfaces, et la présence ou l'absence de lubrifiants [38]. Le frottement peut être bénéfique (par exemple, pour transmettre un couple dans les embrayages) ou nuisible (par exemple, en générant de la chaleur et en provoquant l'usure).

Considérons deux solides  $S_1$  et  $S_2$  en contact. En présence de frottement, les forces qui s'exercent à l'interface peuvent être décomposées en deux composantes :

- Une force normale  $F_N$ , perpendiculaire à la surface de contact
- Une force tangentielle  $F_t$ , parallèle à la surface de contact

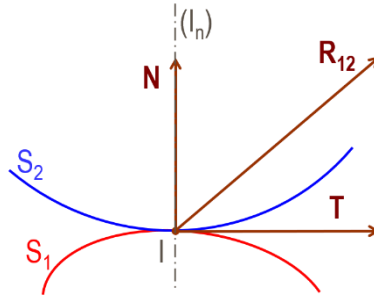


Figure II.8 : Contact entre Deux Solides avec Frottement.

### II.3.1.1.1 Le frottement

Le frottement est une résistance au mouvement relatif entre deux surfaces en contact. Il peut être classé en deux types principaux :

#### a. Frottement Statique

Le frottement statique empêche le mouvement initial, essentiel pour avancer ou tourner. Il ne consomme pas d'énergie sauf en cas de dérapage. La force maximale de frottement statique est calculée par :

$$F_{FSmax} = \mu_s \times F_N$$

##### ➤ Coefficient de Frottement Statique ( $\mu_s$ )

Varie selon les matériaux ; par exemple, il est plus élevé sur une route sèche que mouillée. Indépendant de la taille de la surface de contact.

##### ➤ Force Normale (FN)

Force perpendiculaire à la surface, égale au poids sur une surface horizontale. Dans un virage, une FN plus élevée (par exemple, avec un cycliste plus lourd) augmente l'adhérence [39].

#### b. Frottements Cinétiques

Le frottement cinétique freine un corps glissant, égal et opposé à la force motrice nécessaire pour maintenir son mouvement. Sa formule est  $F_{FC} = \mu_c \times F_N$ , où  $\mu_c$  est le coefficient de frottement cinétique. Ce frottement est généralement inférieur au frottement statique. En glissant, le frottement cinétique consomme de l'énergie, la transformant en chaleur, et peut entraîner un échauffement des pièces en contact.

Les frottements solide-solide, fréquents sur les vélos, sont des résistances passives. Pour les réduire, on utilise de l'huile ou de la graisse pour séparer les surfaces [40].

##### ➤ La résistance au frottement a deux origines principales [Cortell 1978] :

La présence des aspérités sur les surface et l'adhérence entre les surfaces [41].

### II.3.1.1.2 Lubrification

La lubrification est le processus consistant à introduire une substance (un fluide ou un solide ou plastique) entre deux surfaces pour réduire le frottement et l'usure.

De nombreuses substances peuvent être utilisées pour lubrifier une surface. L'huile et la graisse sont les plus courantes. La graisse est composée d'huile et d'un épaississant pour obtenir sa Consistance, tandis que l'huile assure la lubrification. Les huiles peuvent être synthétiques, végétales ou minérales, ou une combinaison de ces dernières.

Il existe différents systèmes de lubrification que nous allons mentionner.

#### II.3.1.1.2.1 Lubrification hydrodynamique

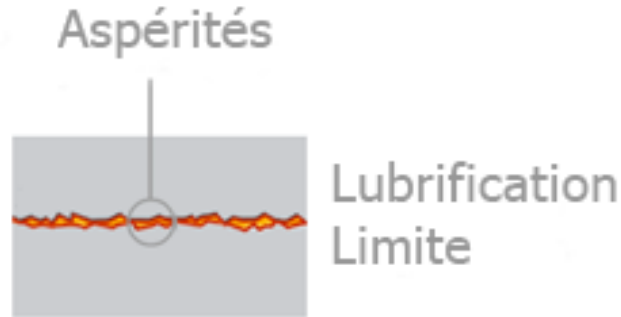
La lubrification hydrodynamique se produit lorsque deux surfaces en mouvement de glissement (l'une par rapport à l'autre) sont entièrement séparées par un film de fluide [42]. Ce film se trouve dans un mince espace entre deux surfaces en mouvement relatif. L'effet hydrodynamique génère une onde de pression hydrodynamique dans le film fluide, ce qui entraîne une capacité de charge, dans le sens où le film fluide a une pression suffisante pour supporter la charge externe [43].



*Figure II.9* : Illustration du film fluide dans la lubrification hydrodynamique.

#### II.3.1.1.2.2 Lubrification Limite ( $h < R_a$ )

Ici, l'épaisseur du film lubrifiant est comparable à la rugosité des surfaces. Des contacts intermittents se produisent entre les aspérités, ce qui peut provoquer une usure accrue (7). La lubrification limite correspond au cas où le frottement entre les deux surfaces du contact n'est pas déterminé par la viscosité du lubrifiant mais dépend des propriétés physico-chimiques des surfaces et du lubrifiant.



*Figure II.10* : Illustration de la lubrification limite avec contact des aspérités.

#### II.3.1.1.2.3 Lubrification Mixte ( $h \sim Ra$ )

Dans ce régime, le film lubrifiant réduit les contacts directs entre les surfaces, mais ne les élimine pas complètement. C'est une situation intermédiaire entre la lubrification limite et la lubrification hydrodynamique.

Bien que la majeure partie des surfaces soit séparée par une couche lubrifiante, les aspérités restent en contact les unes avec les autres [44].

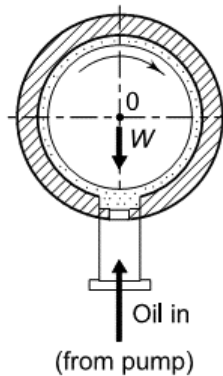


*Figure II.11* : Schéma de la lubrification mixte.

#### II.3.1.1.2.4 Lubrification Hydrostatique

La lubrification hydrostatique est définie comme un système de lubrification dans lequel la charge supportant le film de fluide, séparant les deux surfaces, est créée par une source externe, comme une pompe, fournissant suffisamment de fluide sous pression. (Ex : paliers). Les systèmes hydrostatiques particulièrement ceux qui fonctionnent avec des liquides dont la viscosité est importante possèdent de nombreux avantages :

- Les deux surfaces sont toujours séparées par un film fluide, même lorsqu'elles sont immobiles, ce qui théoriquement rend l'usure nulle et assure aussi une très grande durée de vie.
- La pression est distribuée sur une grande surface, il n'y a pas de concentration de pression.



*Figure II.12* : Schéma du fonctionnement de la lubrification hydrostatique dans un palier.

### II.3.1.1.3 Le phénomène d'usure

L'usure est la perte progressive de matériau au niveau des surfaces en contact en raison de forces mécaniques, de frottement ou de réactions chimiques, Ce phénomène peut entraîner des modifications dimensionnelles, géométriques et structurelles.

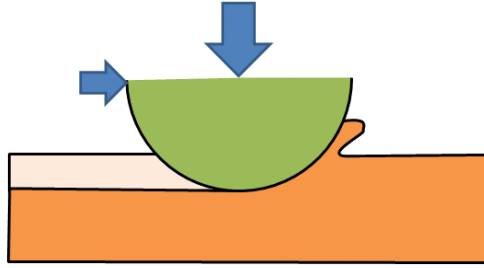
Selon Blau [45], les principaux types d'usure incluent :

#### II.3.1.1.3.1 Usure abrasive

Provoquée par des particules dures ou des aspérités.

Le mécanisme de l'usure abrasive est décrit sur la figure 3.20. Un solide rigide vient indenter et labourer un matériau qui se déforme plastiquement. Le solide rigide peut être une particule dure qui s'est introduit dans le contact [46].

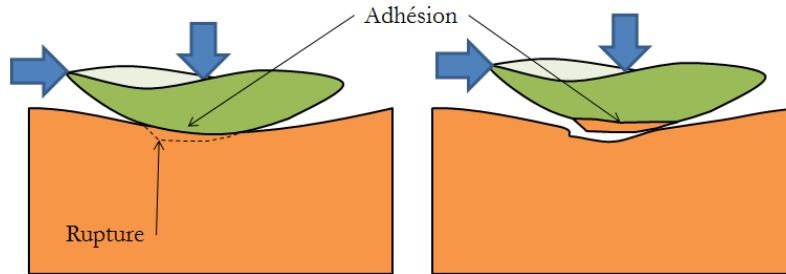
Dans ce modèle, le coefficient d'usure dépend surtout de l'angle d'attaque de l'abrasif.



*Figure II.13* : Mécanisme de l'usure abrasive [47]

#### II.3.1.1.3.2 Usure adhésive

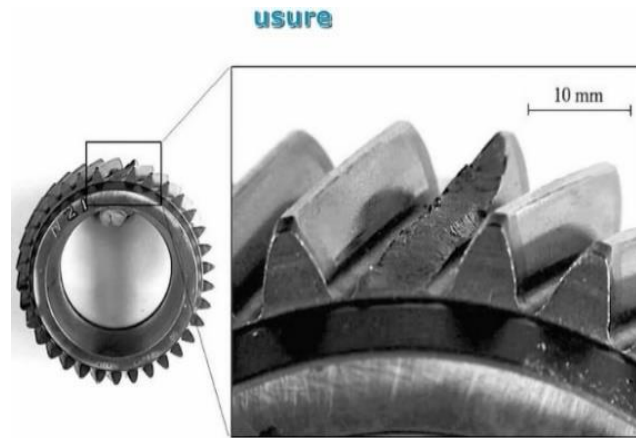
L'usure adhésive résulte d'un transfert de matière entre deux corps en contact (figure), favorisé par la réactivité chimique des surfaces, amplifiée par la chaleur et la pression au niveau des aspérités [48].



*Figure II.14* : Mécanisme de l'usure adhésive [49]

#### II.3.1.1.3.3 Usure par fatigue

Provoquée par des cycles de charge répétés, Le frottement entre deux surfaces, soumis à des contraintes cycliques comme le roulement, les vibrations ou le meulage, entraîne la propagation de fissures dans les sous-couches. Ces contraintes favorisent la formation de piqûres et de fissures microscopiques, qui peuvent s'aggraver sous des charges continues [50].



*Figure II.15* : Usure de fatigue : Cas d'une dent d'un engrenage.

## II.9 Détermination de la force de freinage appliquée

### a) La pression exercée sur le disque par les plaquettes

Dans le cas d'un freinage d'arrêt, l'énergie cinétique du véhicule convertie en énergie thermique est égale :

$$E_c = \frac{1}{2} M \cdot V_0^2$$

Où  $M$  est la masse totale du véhicule,  $V_0$  la vitesse initiale.

Pour obtenir la quantité de chaleur dissipée par chacun des disques de frein, on doit connaître la répartition du poids du véhicule, exprimé par le coefficient  $\beta$ . Ainsi, la quantité de la chaleur dissipée par chacun des disques des freins avant sera :

$$E_{cf} = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot M \cdot V_0^2$$

On prendra  $\beta$  égale à 30% de la masse du véhicule.

La force de freinage appliquée sur chaque roue avant est égale à :

$$F_p = \frac{E_{cf}}{2 \cdot x_f}$$

$$x_f = V_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{V_0}{t_{stop}} \right) t_{stop}^2$$

La force de freinage appliquée sur chaque disque de la roue avant est égale à :

$$F_d = \frac{E_{cf}}{2 \cdot \frac{R_d}{R_p} \cdot \left( V_0 t_{stop} - \frac{1}{2} \left[ \frac{v_0}{t_{stop}} \right] t_{stop}^2 \right)}$$

La vitesse de freinage est égale à :

$$V_f = V_0 \left( 1 - \frac{t}{t_{stop}} \right)$$

Pour le cas du freinage d'arrêt, on a  $V_f = 0$ .

La relation suivante donne la vitesse de rotation initiale du disque :

$$\omega_d = \frac{V_0}{R_d}$$

La pression exercée sur le disque par les plaquettes est calculée selon [51] :

$$p = \frac{F_d}{A_{cp} \cdot \mu}$$

Pour le véhicule choisi, on a :  $F_d = 541.7 [N]$ ,  $\omega_d = 160 \text{rd/s}$ ,  $P = 1 \text{MPa}$

## II.5 Conclusion :

Ce chapitre a exploré les bases théoriques du contact glissant sec dans le système de freinage. Nous avons étudié les différents types de contacts et leurs caractéristiques, ainsi que les phénomènes tribologiques tels que le frottement, la lubrification et l'usure. Ces éléments sont essentiels pour comprendre les interactions entre le disque et les plaquettes, notamment dans le transfert des forces de freinage. Enfin, l'analyse des forces appliquées a montré l'importance de la pression des plaquettes sur le disque, un paramètre clé pour les performances de freinage. Ces notions théoriques préparent le terrain pour l'étude détaillée du comportement mécanique dans le chapitre suivant.

---

## **Chapitre III**

---

# **Comportement mécanique du disque de frein en contact glissant sec avec les plaquettes**

---

---

**CHAPITRE III : Comportement mécanique du disque de frein en contact  
glissant sec avec les plaquettes****III.1 Introduction**

Notre choix a été axé sur une simulation numérique réalisée à l'aide d'un WORKBENCH ANSYS 16 est de faire une investigation sur le comportement mécanique dans un système de freinage lors d'un freinage d'arrêt et après le contact entre le disque et les plaquettes sous conditions du freinage. Dans ce travail on distingue un disque disque percé ventilé avec une plaquette simple. Nous nous intéressons au contact mécanique d'une plaquette flexible en matériau composite à matrice organique avec un disque rigide en fonte grise. La pression de contact appliquer sur la plaquette de frein à une force de 1 MPa vient mettre celle-ci en contact frottant avec le disque dont la vitesse angulaire  $\omega=160$  tr/min est maintenue constante durant toute la simulation Le coefficient de frottement  $\mu=0.2$  reste constant pendant le freinage. Le comportement du couple de freinage disque /plaquettes lors d'un freinage a été analysé en termes de contraintes et de déformations, L'influence du changement des matériaux composants le disque et les plaquettes sur la réponse du couple a également été discutée.

**Les types de disques de freins choisis dans notre étude**

On distingue un disque ventilé percé qui ressemble à deux disques pleins superposés avec un espace entre les deux pour améliorer le refroidissement, le perçage des disques permet en plus du refroidissement, et du nettoyage des disques [52], et une plaquette simple.

**III.2 Modèles géométriques du couple de freinage (disque/plaquette)**

Les figures (III.1, III.2, III.3, III.4) montrent le modèle géométrique en 2D et en 3D du disque et de la plaquette de frein en 3D.

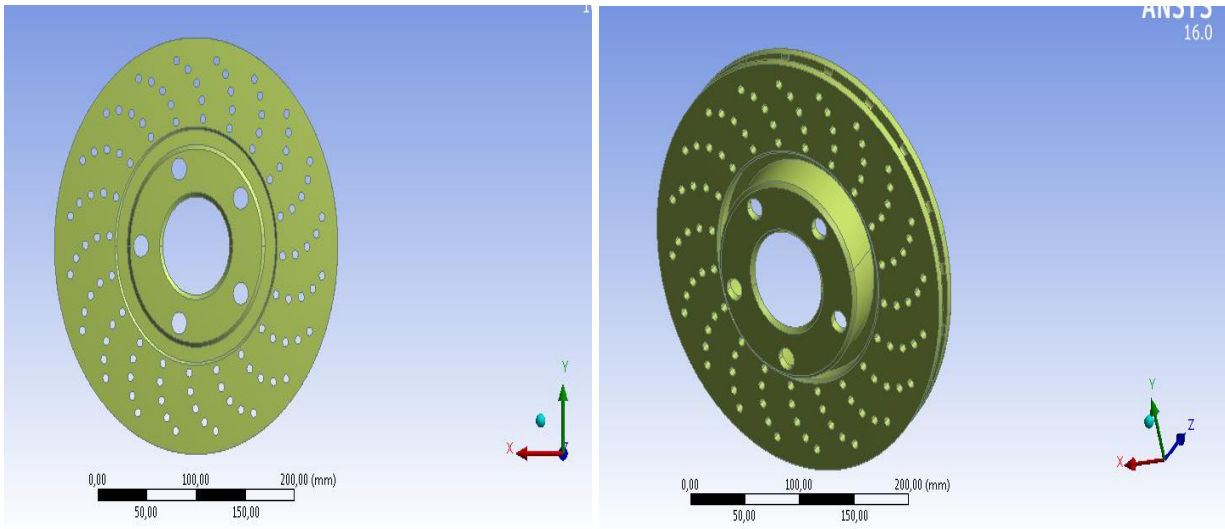


Figure III.1 : Modèle géométrique de Disque de frein en 3D

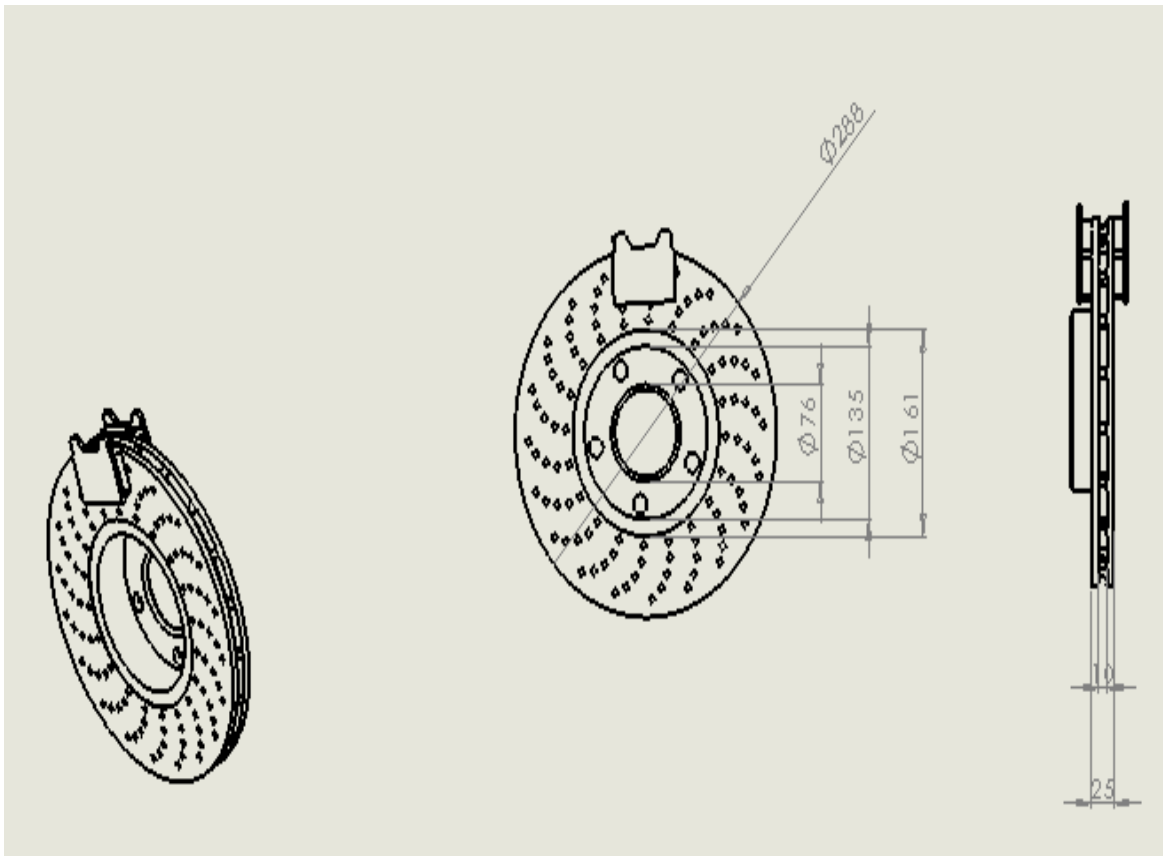


Figure III.2 : Modèle géométrique de Disque de frein en 2D

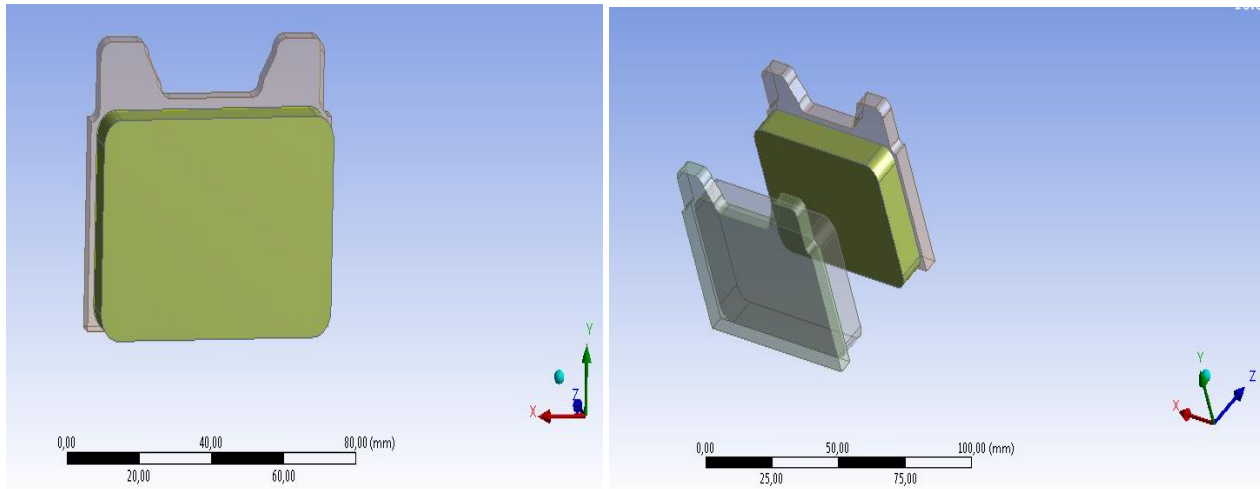


Figure III.3 : Modèle géométrique de plaquette en 3D

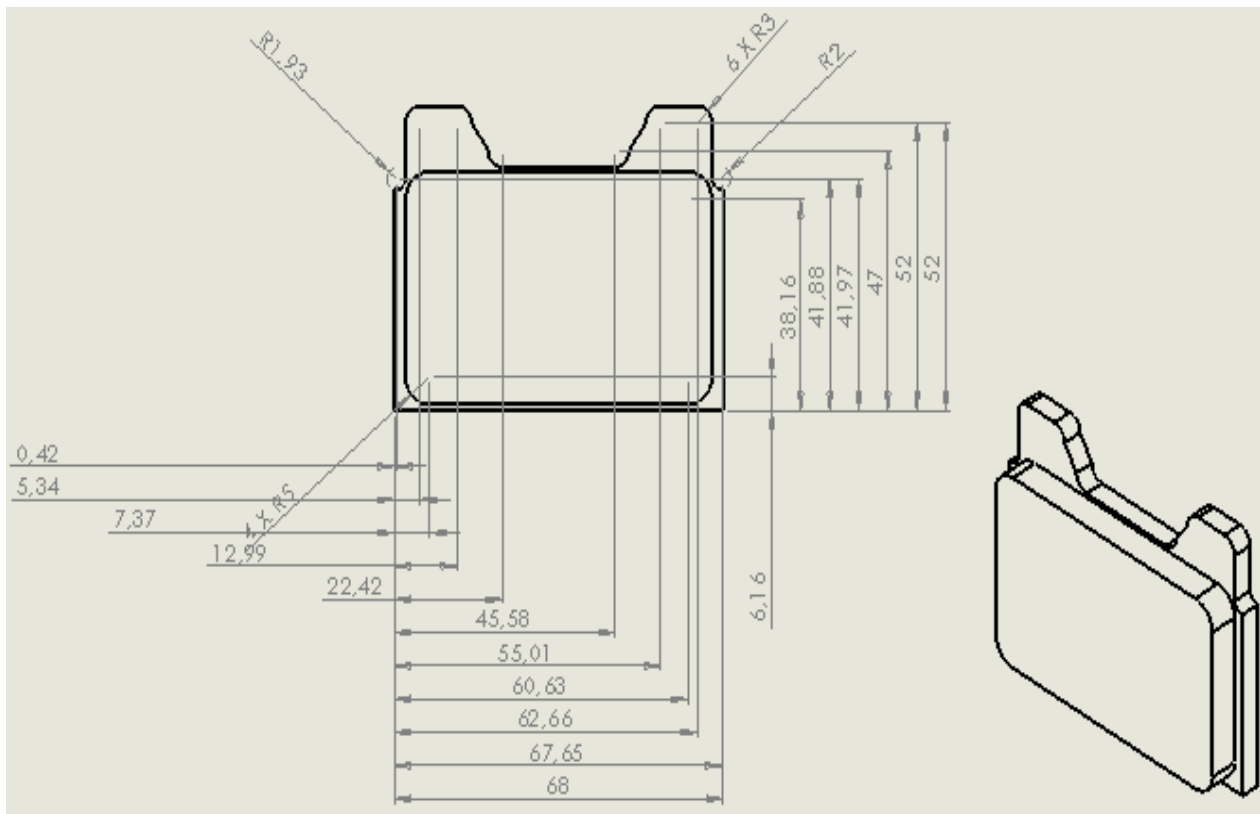
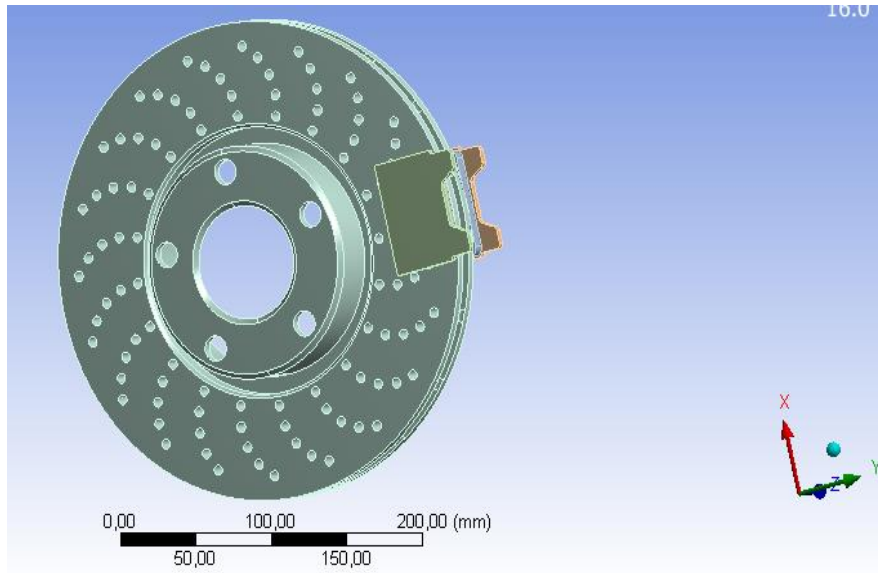
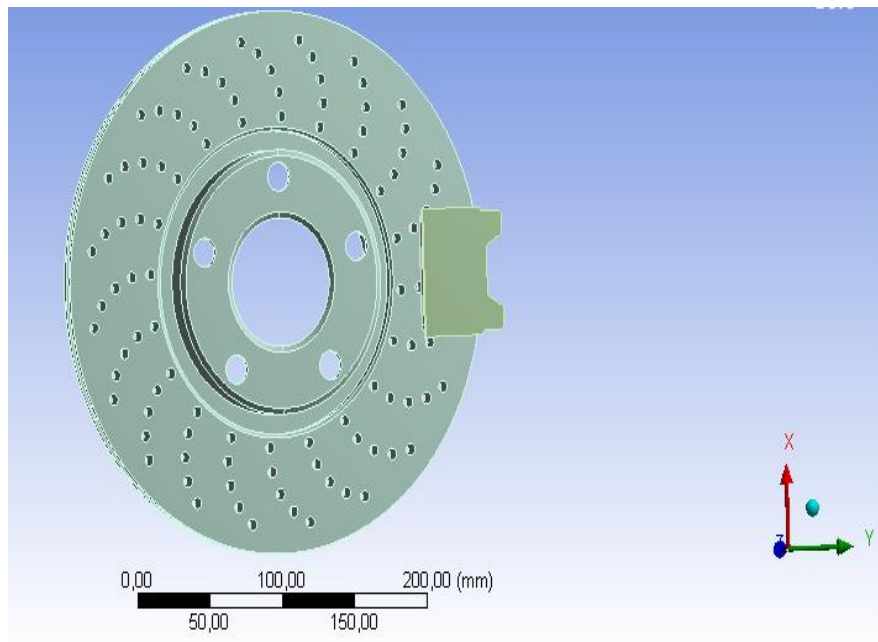


Figure III.4 : Modèle géométrique de plaquette en 2D

## III.3 Modèle géométrique du couple (disque/ plaquettes) Assemblé



**Figure III.5 :** *Assemblage du Disque de frein avec les plaquettes en 3D*



**Figure III.6 :** *Assemblage du Disque de frein avec les plaquettes en vue de face*

**III.4 Matériaux du disque et des plaquettes**

Les matériaux couramment utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication des disques sont les fontes graphiques. Dans cette étude, on a choisi la fonte grise FG 25 à haute teneur en carbone qui présente une bonne conductivité, une assez bonne résistance mécanique et une faible usure [53], [54].

Pour les garnitures, on utilise un matériau de friction à matrice organique caractérisé par un bon coefficient de frottement (le plus élevé possible et le plus constant possible) quel que soit la variation des conditions de freinage [55].

Les supports de plaquettes sont en acier doux ; ils servent de répartir l'effort exercé par le piston hydraulique sur la totalité de la surface des garnitures afin de garantir une surface de contact disque-plaquette la plus grande et la plus homogène possible

Le tableau (III.1) résume les propriétés du matériau composite à matrice organique pour les plaquettes de frein et du matériau en fonte grise pour le disque de frein [56].

**Tableau III.1 :** Matériaux du disque et des plaquettes

Couples (disque percé/ plaquette)	disque	Garniture [56].
Masse volumique (kg /m <sup>3</sup> )	7200	2500
Module de Young (Pa)	1.1E+11	3E+09
Coefficient de poisson	0.3	0.25
Module de compressibilité (Pa)	8.3333E+10	2E+09
Module de cisaillement (Pa)	4.2969E+10	1.2E+09

**III.5 Spécifications du véhicule**

Le tableau (III.2) donne les caractéristiques du véhicule choisi. Les données du véhicule permettent de déterminer la force de freinage exercée sur les pneus et le temps de freinage d'arrêt en fonction de la vitesse initiale, de la charge du véhicule et du profil de la route (palier ou pente).

Tableau III.2 : Les données de véhicule [56]

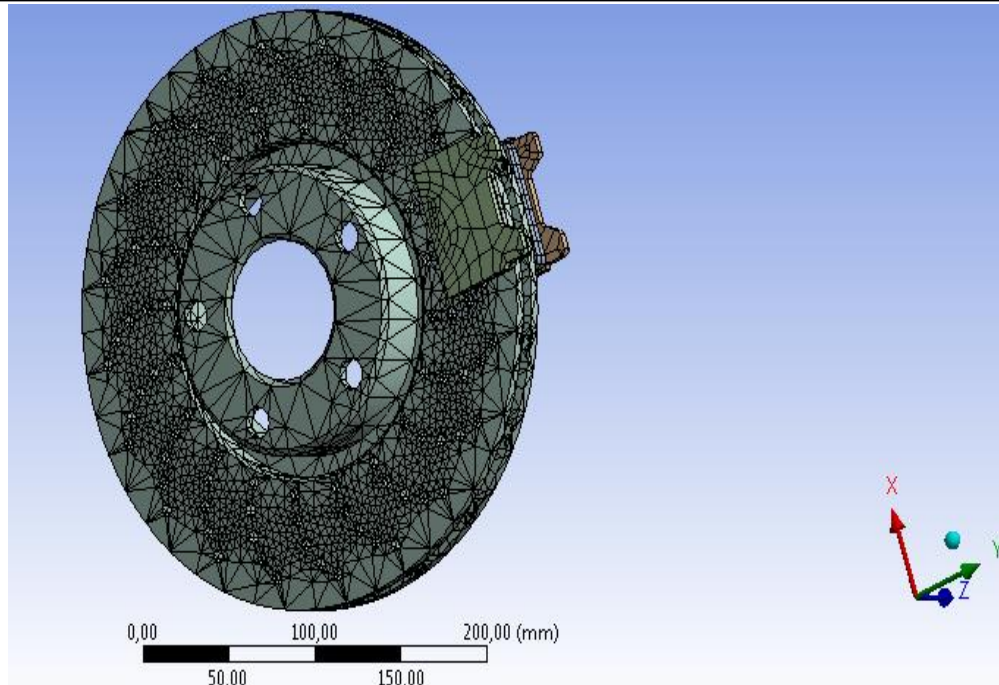
Masse du véhicule- M [kg]	1700
Le rayon de la roue [mm]	295.5
Le rayon du disque percé [mm]	144
La vitesse initiale $v_0$ [m/s]	45
Vitesse angulaire [rd/s]	160
Aire de plaquette [mm <sup>2</sup> ]	7471.2
La pression qui vient presser le disque [MPa]	1

### III.6 Création d'un maillage d'éléments finis

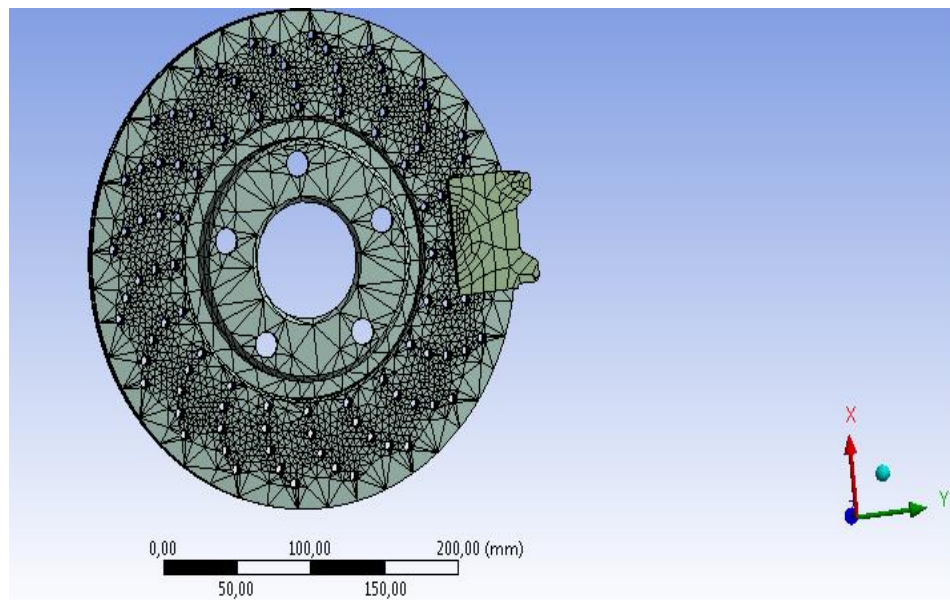
La figure (III.7) présente le maillage volumique tétraédrique du couple de freinage (disque/plaquettes de frein).

Les modèles sont écrasés et analysés pour obtenir des résultats détaillés dans la zone du contact entre le disque et les plaquettes. Ce maillage utilise 68209 nœuds et 37699 éléments pour un couple de freinage.

Par conséquent, le modèle est maillé puis analysé pour donner les résultats de la simulation numérique en termes de contraintes équivalentes de Von Mises et des déformations élastiques équivalentes.



(a)



(b)

Figure III.7 : Maillage du couple (disque percé / plaquettes)

**III.7 Chargements et conditions aux limites**

Pour effectuer cette simulation numérique au cours d'un freinage, on considère les conditions suivantes :

- Nous supposant que le disque est rigide alors que les plaquettes sont flexibles.
- La vitesse de rotation du disque  $\omega = 160$  rad/s.
- La pression hydraulique répartie sur les plaquettes est de  $P_h = 1$  MPa.

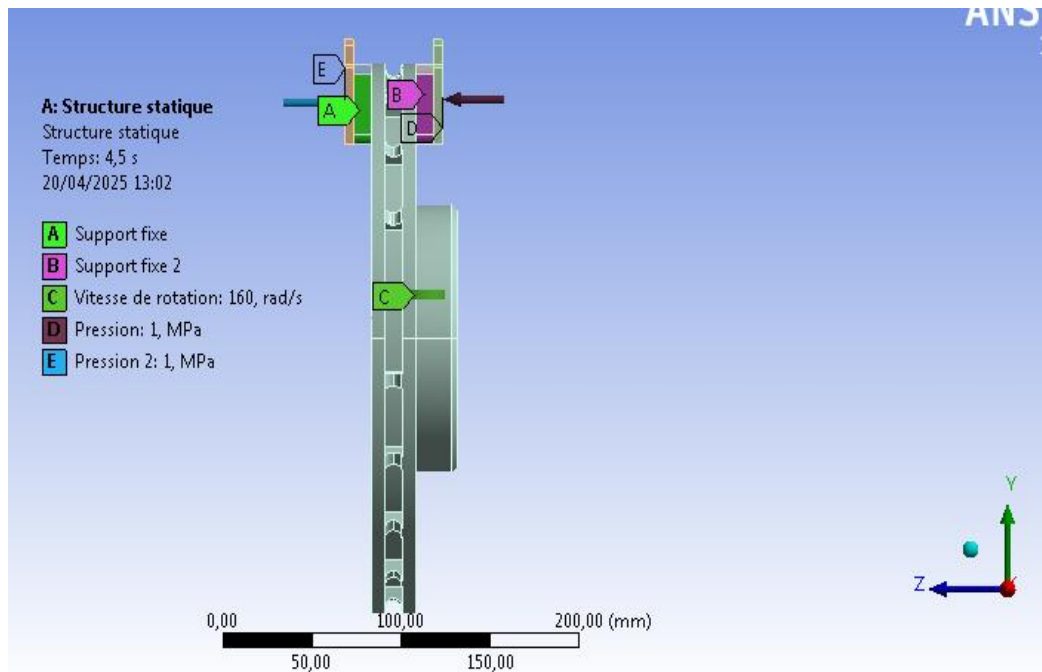
Les conditions temporelles sont :

- Temps de freinage : 4,5 s.
- Pas de temps initial : 0,25 s.
- Pas de temps minimal : 0,125 s.
- Pas de temps maximal : 0,5 s.

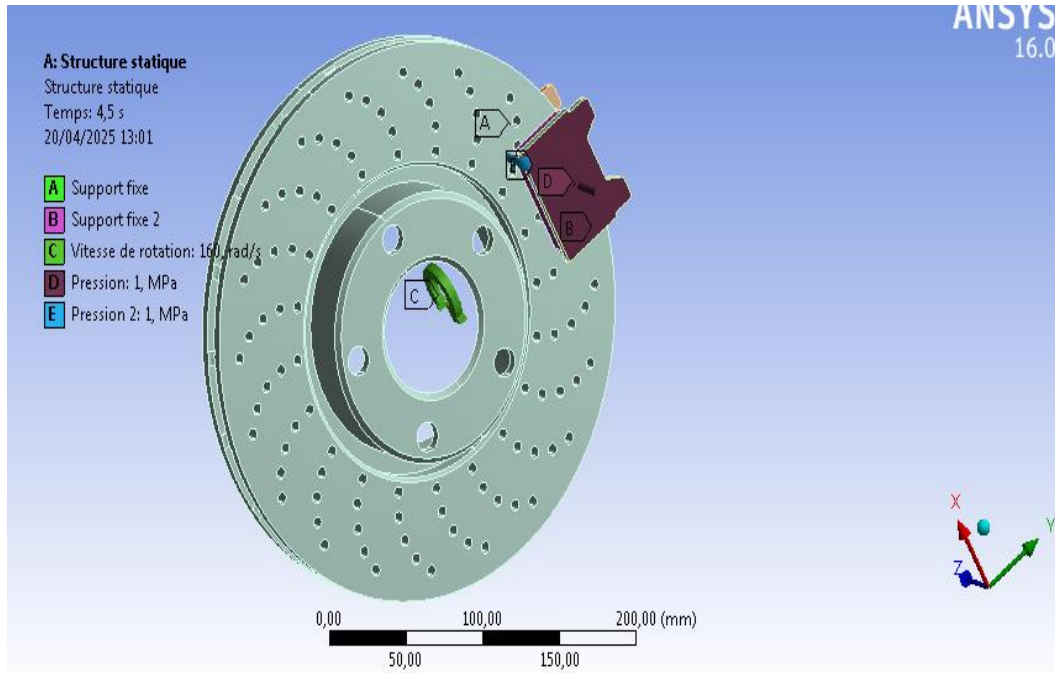
Les conditions thermiques :

- La température initiale du disque  $T = 60$  °C à  $t = 0$ s.
- Un flux de chaleur dans les deux zones de contact entre le disque et les plaquettes.
- Un échange de chaleur par convection sur toute la surface du disque.

- 2 supports fixes sur les deux côtés des garnitures, comme le montre la figure (III.10).



(a)



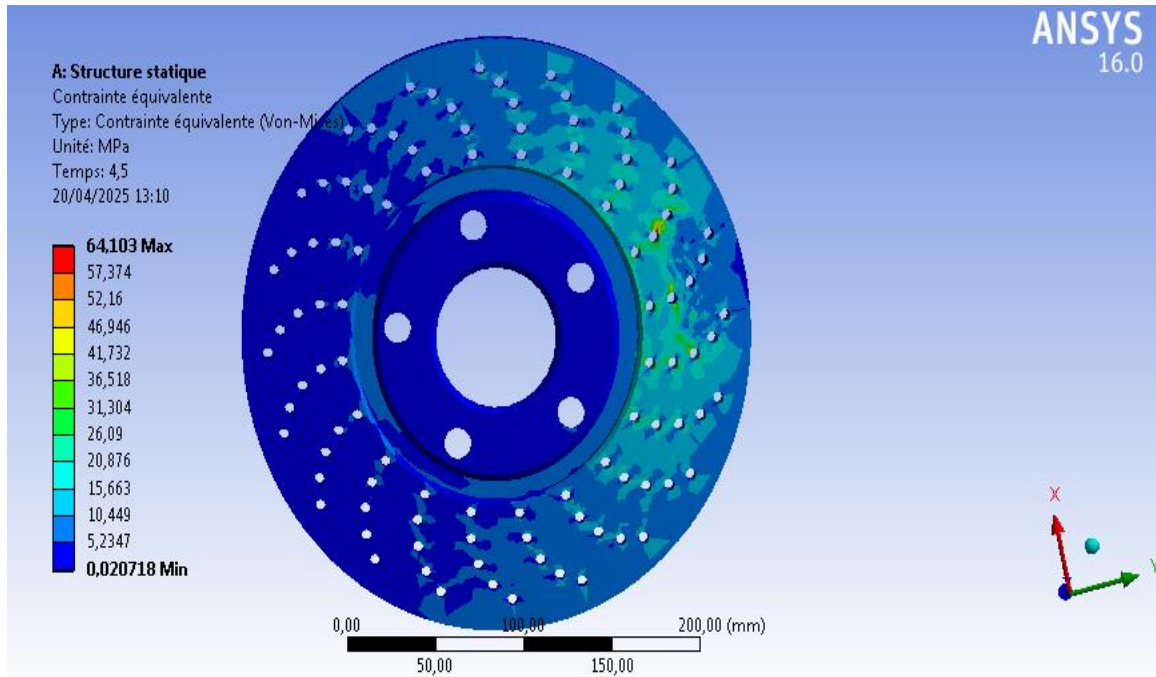
(b)

**Figure III.8 : Les conditions aux limites**

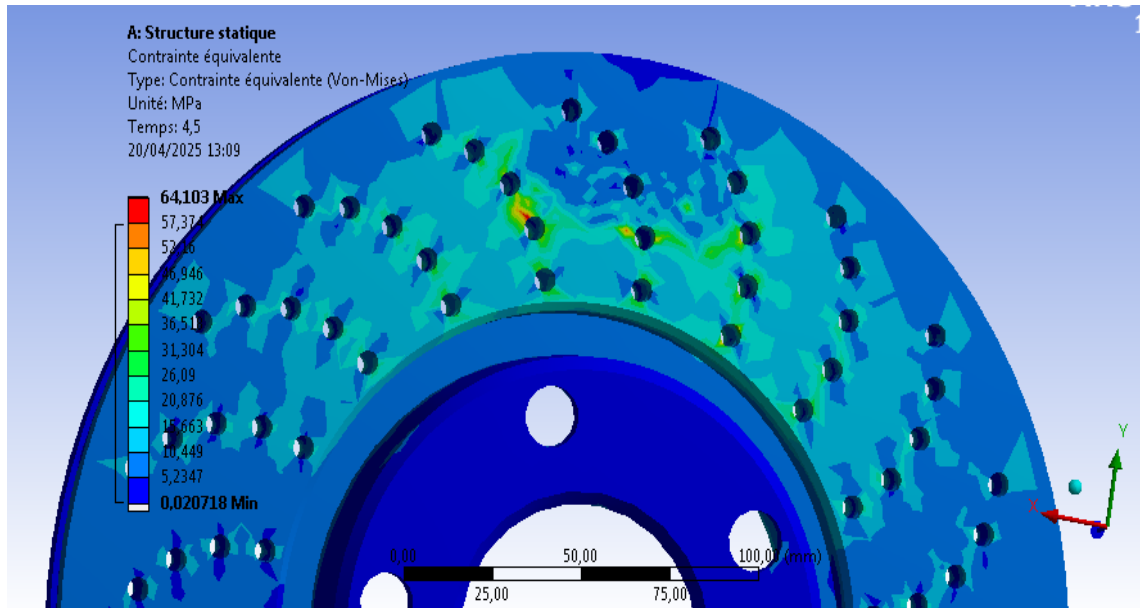
### III.8 Résultats et discussions :

#### III.8.1 Répartition de la contrainte équivalente de Von Mises

La figure III.9 montre qu'une forte concentration de la contrainte équivalente se localise dans la zone du contact avec une valeur maximale de 64,10 3Mpa, et au niveau des perforations, elle se propage vers la zone de raccordement piste-bol et vers les ailettes de ventilation avec des valeurs faibles. On peut alors déduire que le disque percé supporte mieux le chargement et la chaleur ce à cause des perforations qui permettent de refroidir le disque plus vite et garantie une meilleure capacité de dissipation de la chaleur.



(a)



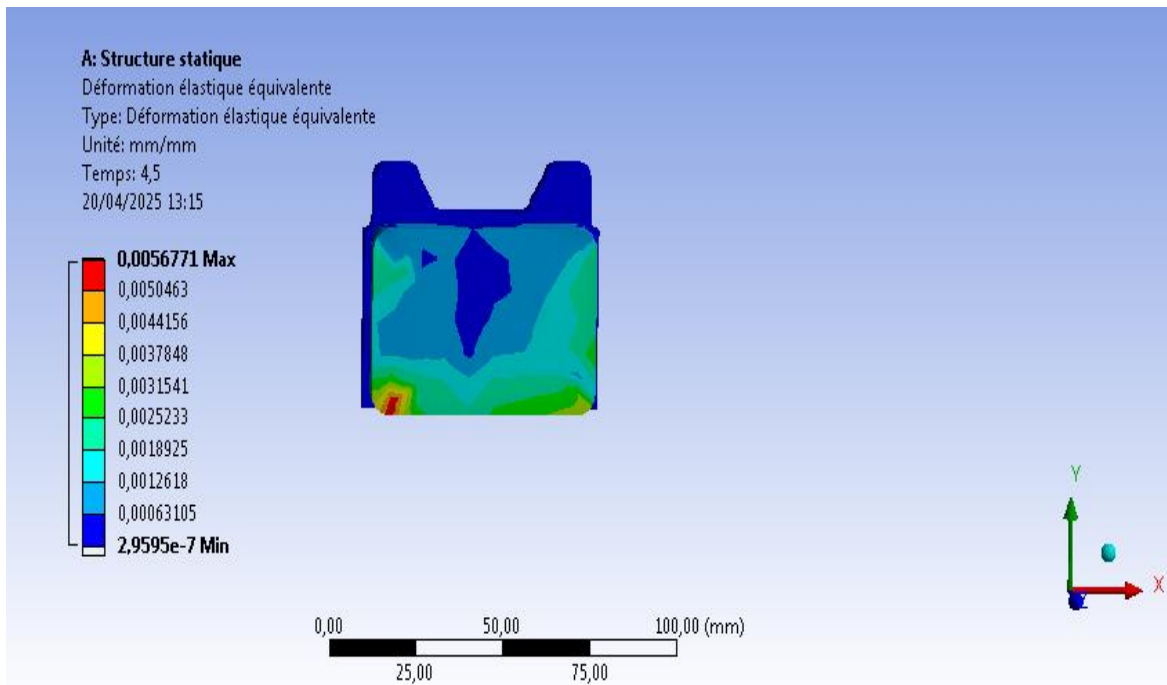
(b)

Figure III.9 : la Répartition de la contrainte équivalente dans les couples en fonction du temps

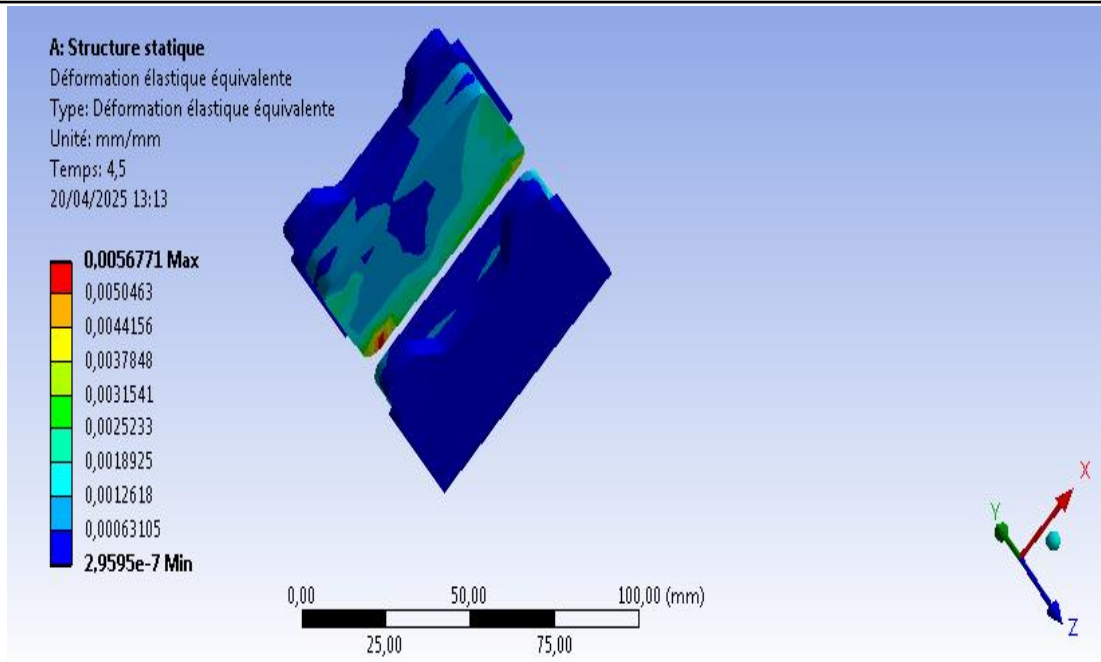
III.8.2 Répartition du champ de déformation élastique équivalente

La figure (III.10) présente la répartition du champ de déformation élastique équivalente au niveau des plaquettes :

On constate que la déformation se propage sur la totalité des pistes de frottement des garnitures avec des valeurs plus importantes se situant sur les bords du deux plaquettes et avec une valeur maximale de 0.00567MPa, et elle diminue graduellement vers la zone du contact à cause des perforations du disque, qui permettent de refroidir ce disque.



(a)



(b)

Figure III.10 : Répartition de la déformation élastique équivalente dans les couples

### III.8.3 Influence de changement du matériau de disque sur la variation du champ de contrainte équivalente (Von-Mises)

Pour un but comparatif, on a choisi deux matériaux du disque qui sont respectivement la fonte grise FG25, acier inoxydable, et en gardant le même matériau de la plaquette dans les deux couples de freinage et les mêmes conditions aux limites, dont les propriétés mécaniques sont données dans le tableau III.3.

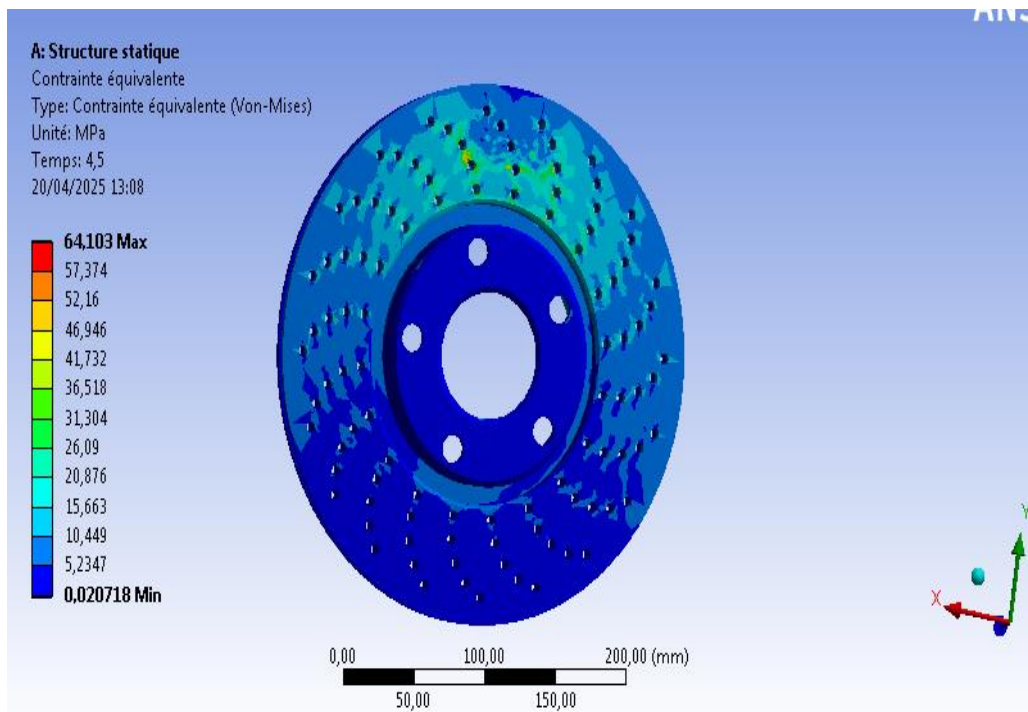
Tableau III.3 : Les propriétés mécaniques pour le couple (FG25, acier inoxydable/composite)

[56]

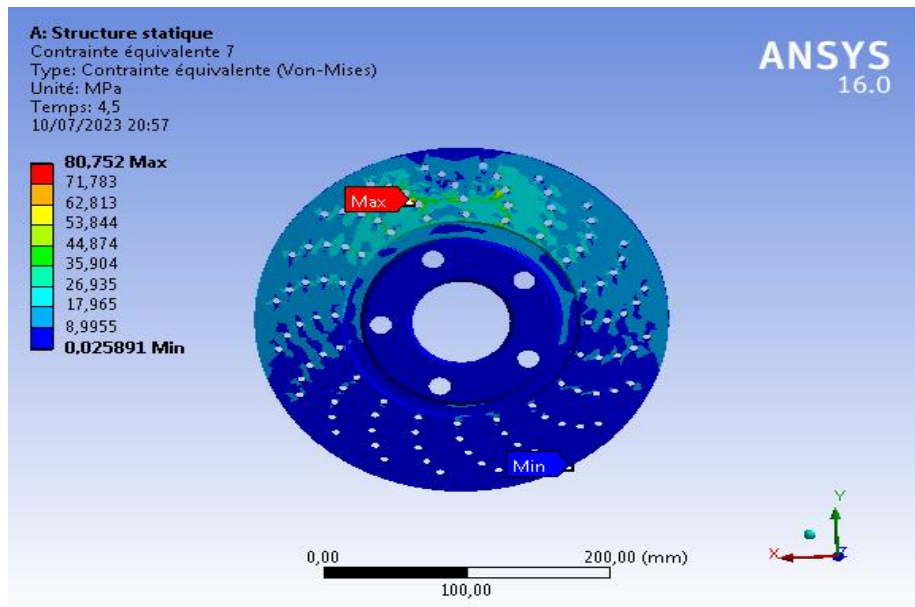
Propriétés mécaniques	FG25	Acier inoxydable
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	7200	7750
Module de Young (Pa)	1.1E+11	1.93E+11
Coefficient de poisson	0.28	0.31
Module de compressibilité (Pa)	8.3333E+10	1.693E+11
Module de cisaillement (Pa)	4.2969E+10	7.3664E+10

La figure III.11 montre que la plus grande valeur de la contrainte équivalente apparaît dans le disque en acier inoxydable avec une valeur maximale de [80.752MPa], tandis que la valeur minimale de la contrainte équivalente [64.103MPa] apparaît dans le disque en FG25.

Les résultats obtenus montrent également que le choix du matériau a une grande influence sur le comportement tribologique du contact entre disque et les plaquettes. La fonte grise est la plus couramment utilisée dans l'industrie automobile qui ont une forte teneur en carbone, assure un bon comportement thermique et une bonne résistance mécanique, démunie la résistance à la rupture et le module d'élasticité, une faible usure, peut mieux résister à la fissuration malgré la température élevée [57][58].



(a) Disque en FG 25



(b) Disque en acier inoxydable

**Figure III.11** Comparaison entre les deux couples sous l'influence de changement du matériau en fonction du temps

### **Validation :**

Je valide les résultats de cette étude en comparative aux résultats de référence [KERROUZ Siham]

### **III.9 Conclusion :**

Ce chapitre a analysé le Comportement mécanique du disque de frein en contact glissant sec avec les plaquettes sous des conditions réalistes de freinage à l'aide d'une simulation numérique. Les disques perforés ventilés se sont avérés plus performants grâce à leur meilleure dissipation thermique et leur résistance aux contraintes thermomécaniques.

La fonte grise FG25, grâce à sa bonne conductivité thermique et sa résistance à l'usure, a montré de meilleures performances comparées à l'acier inoxydable, confirmant son utilisation dans l'industrie automobile.

Cette étude souligne l'importance de la conception géométrique et du choix des matériaux pour optimiser les performances et la durabilité des systèmes de freinage.

---

# **CONCLUSION GENERALE**

---

## CONCLUSION GENERALE

Cette recherche s'inscrit dans le cadre de l'analyse numérique du comportement élastique des contacts glissants secs dans le système de freinage entre le disque et les plaquettes de frein par l'utilisation des résultats numériques obtenue à l'aide d'un code de calcul ANSYS 16 qui est basé sur la méthode des éléments finis sous l'influence des principaux paramètres de freinage (le coefficient de frottement, le matériau de construction du disque ,la vitesse de rotation du disque , la maillage, ..) et sous l'influence des caractéristiques géométrique et des paramètres mécanique du couple (disque/plaquettes).Les résultats obtenue sont exprimés en fonction du temps en terme du champs de contraintes et des déformations à la présence de coefficient de frottement  $\mu=0.2$ .

Les constatations observées et conclusion tirée de ce travail peuvent être résumées comme suit :

La concentration de la contrainte équivalente est bien plus élevée dans la surface de contact du disque (zone de contact entre la plaquette et le disque) et elle se propage vers le bol du disque qui comporte des trous de fixation et vers les ailettes de ventilation avec des valeurs faibles.

L'analyse numérique du comportement élastique des contacts glissants secs montrés l'importance du disque perforé, il support mieux le chargement et la chaleur ce à cause des perforations qui permettent de refroidir le disque plus vite et garantie une meilleure capacité de dissipation de la chaleur.

Pour obtenir une idée plus claire sur le comportement du couple (disque /plaquettes) en utilisant deux matériaux de construction du disque (acier inoxydable et la fonte grise). On constate tout d'abord que la valeur maximale de la contrainte équivalente qui peut supporter un disque en acier inoxydable est plus élevée que celle de la fonte grise. Où la fonte grise dispose d'un avantage technologique dans l'industrie automobile à cause de ça facilité d'usinage et elle est très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud mais elle est relativement fragile comparé aux aciers.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Sipa Automobiles - Voitures D'occasion Et Neuves
2. [https://Www.Angelfire.Com/Retro2/Kalyz\\_Elysyus/Drumbrakesdrum.Html](https://Www.Angelfire.Com/Retro2/Kalyz_Elysyus/Drumbrakesdrum.Html)
3. Frein À Disque - Wikipédia
4. <https://www.autobutler.fr/services/repairation-et-remplacement-freins/etrier-frein>
5. Green, L., *Brake Fading Phenomena*, International Journal of Automotive Research, 2019
6. <https://Www.Seat.Fr/Glossaire/F/Freins-Disque-Ventiles>
7. Brown, R., *Introduction To Vehicle Dynamics*, Springer, 2020
8. Taylor, M., *High-Performance Brake Technologies*, SAE Technical Papers, 2019
9. <https://Www.Ferodo.Com/Fr-Fr/Products/Light-Vehicles/Brake-Discs/Perforated-Discs.Html>
10. M. Benramdane<sup>1</sup>, Y. Khadraoui<sup>1</sup> Et N. Bibi-Triki<sup>2</sup> " Analyse De La Contribution Du Transfert Thermique Des Disques Tournants (Disque De Frein) Uniformément Chauffés " Département De Génie Mécanique, Faculté Des Sciences De l'Ingénieur Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie
11. Miller, C., *Material Wear in Automotive Braking Systems*, Industrial Engineering Journal, 2019
12. Johnson, P., *Principles of Automotive Braking Systems*, Mechanics Today, 2015
13. FAUQUERT Gaétan.LE PICHOURON Erwan "Modélisation Et Calculs Sur Un Etrier De Frein Automobile" Projet CAO - Calculs 2003 Maîtrise IUP GMP Option MPC
14. Rudolf Limpert, *Brake Design and Safety*, Second Edition
15. Ali Belhocine. THERMOMECHANIQUE DES DISQUES DE FREIN Application Du Code De Calcul ANSYS V11.0. Génie Mécanique [Physics.Class-Ph]. Oran ; Université Des Sciences Et De La Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012. Français
16. Taylor, M., *Brake Components and High-Temperature Performance*, SAE Technical Papers, 2021
17. Jean-Jacques CARRÉ, *Technologie Du Freinage - Organes De Friction*, 10 Mai 1990, Site TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

18. Bowden, F. P., & Tabor, D. (2001). *Friction: An Introduction to Tribology*. Dover Publications
19. K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, 1985
20. D. Dowson and A. B. Williams, *Lubrication and Maintenance of Industrial Machinery: Best Practices and Reliability*, CRC Press, 1996
21. J. A. W. van Dijk et al. (2017). "Wear and Surface Damage of Brake Linings: A Review." *Wear*, 376-377, 108-116
22. Smith, J., *Brake Systems Overview*, Automotive Engineering Journal, 2018
23. G. Cueva, A. Sinatora, W.L. Guesser and A.P. Tschiptschin, Wear resistance of cast irons used in brake disc, *Wear* 255 (2003), 1256-1260
24. Taylor, M., *Materials for Brake Discs in Heavy-Duty Applications*, SAE Technical Papers, 2020
25. Site Frontech. (2024). Choisir le bon matériau pour des disques de frein sur mesure
26. Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol III WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K
27. Site Techniques de l'Ingénieur, Technologie du freinage - Organes de friction
28. Blau, P. J. (2001). \*Friction Science and Technology: From Concepts to Applications\*. CRC Press
29. Jacko, M. G., & Fritz, T. (1977). "Brake lining materials: Frictional performance and wear characteristics". SAE Technical Paper Series
30. Chan, D., & Stachowiak, G. W. (2004). "Review of automotive brake friction materials". \*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering\*, 218(9), 953–966
31. Blau, P. J. (2001). \*Friction and Wear Transitions of Materials\*. Elsevier
32. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/6/1180>
33. <https://welsim.com/2018/08/01/hertz-contact-analysis-in-welsim.html>
34. Hertz, H., On the Contact of Elastic Solids, *Journal of Mechanics*, 1882
35. Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, 1985
36. Green, I., Elastic and Plastic Contacts in Tribology, *Tribology International*, 2020
37. Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W., *Engineering Tribology*, Elsevier, 2013

38. Popov, V. L., Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications, Springer, 2010
39. Alphonse de Lamartine, Les Frottements, Chapitre 12, p 157
40. Alphonse de Lamartine, Les Frottements, Chapitre 12, p 158
41. Majcherczak, Didier. Étude thermique d'un contact glissant : Approche numérique et expérimentale. Thèse, Université des Sciences et Technologies de Lille, École Polytechnique Universitaire de Lille, 25 septembre 2003
42. <https://www.machinerylubrication.com/Read/28766/what-is-lubrication>
43. Avraham Harnoy, Bearing Design in Machinery Engineering Tribology and Lubrication, New Jersey Institute of Technology, p 67
44. <https://www.machinerylubrication.com/Read/28766/what-is-lubrication>
45. Blau, P. J., Wear of Materials, Elsevier, 2001
46. Brunetière, N. (2016), Introduction à la Tribologie, Institut Pprime – Futuroscope p55.
47. Maiza Walid, Usure et correction des côtes et du profil de l'essieu d'un wagon, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA ,2019, p15
48. Mérésse, D. (2011). \*Approche thermomécanique de la tribologie à grande vitesse - Application au freinage\* (Thèse de doctorat). Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France. CH I - p13
49. Maiza Walid, Usure et correction des côtes et du profil de l'essieu d'un wagon, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA ,2019, p14
50. <https://www.steeltechservices.be/file/si646614/Les%20types%20d'usures%20dominants%20dans%20l'industrie%20lourde-fi32918099.pdf>
51. KERROUZ Siham, "Comportement thermoélastique des contacts glissants secs \_approche numérique", thèse de doctorat, université USTO, oran.
52. M. Benramdane1 , Y. Khadraoui1 et N. Bibi-Triki2 " Analyse de la contribution du transfert thermique des disques tournants (disque de frein) uniformément chauffés " Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie
53. Oder, G. (2009). Thermal and stress analysis of brake discs in railway vehicles.

54. Jang, H., Ko, K. H., Kim, S. J., Basch, R. H., & Fash, J. W. (2004). The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*, 256(3-4), 406-414
55. DJAFRI, M. (2015). *Etude numérique et expérimentale du comportement tribologique des contacts glissant-application aux freins à disques* (these de doctorat, université des sciences et de la technologie, Usto, oran)
56. Kerrouz, S., Bourdim, M., Tamine, T., Bouchetara, M. (2021), Study of the Mechanical Behavior of an Automobile Brake Disc, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* .65(3): 197-204. doi: 10.3311/PPme.15589
57. Jang, H., Ko, K. H., Kim, S. J., Basch, R. H., & Fash, J. W. (2004). The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*, 256(3-4), 406-414.
58. Magnain, B. (2006). Développement d'algorithmes et d'un code de calcul pour l'étude des problèmes de l'impact et du choc (Doctoral dissertation, Université d'Evry-Val d'Essonne).