

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت
Université d'Ain Témouchent
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : ENERGETIQUE

Thème

**Modélisation thermomécanique par ansys du contact
dans un système disque freins d'automobile**

Présenté le 18 Septembre 2024 Par :

1) **BELASRI Yassine**

2) **BOUKHILI Kamel**

Devant le jury composé de :

Président : Dr Hassan Assem (MCB)

Examinatrice : Dr Hakima Belghoul (MAB)

Encadreur : Dr Amine BELOUFA (MCA)

Année universitaire 2023/2024

Table des matière

I.	Introduction générale.....	12
II.	Chapitre 1 : les différents types de moteurs	13
II.1	Introduction	13
II.2	STRUCTURE GENERALE D’UN SYSTEME DE FREINAGE.....	13
II.3	FREINS TRAVAILLANT PAR FROTTEMENT	14
II.3.1	Frein à tambour.....	14
II.3.2	Frein à disque	16
II.4	TYPES DES ETRIERS	19
II.5	LES TYPES DE DISQUE FREIN	21
II.6	AUTRES TYPES DE DISQUES ET LEURS CARACTERISTIQUES.....	23
II.6.1	Les disques rainurés	23
II.6.2	Les disques percés.....	23
II.7	COMPARAISON ENTRE TAMBOUR ET DISQUE.....	24
II.7.1	Avantages.....	24
II.7.2	Inconvénients	24
II.7.3	Les Plaquettes.....	24
II.8	PROBLEME DU DISQUE DE FREIN	26
II.9	LES MATERIAUX DU DISQUE DE FREIN.....	26
II.9.1	Le disque.....	26
II.9.2	Les garnitures	27
II.9.3	Les supports.....	28
II.10	CRITERES D’EVALUATION D’UN SYSTEME DE FREINAGE.....	28
II.10.1	Efficacité	28
II.10.2	Confort.....	29
II.10.3	Endurance.....	29
II.11	Autres critères.....	31
II.11.1	Carbone	32
II.11.2	Conditions d’utilisation.....	32
III.	Chapitre 02 : présentation du cylindre.....	34
III.1	Introduction	34
III.1.1	Freinage et transfert de chaleur.....	35
III.1.2	Chambre de température.....	35

III.1.3	Gradient de température:	36
III.1.4	Flux de chaleur	36
III.1.5	Modes de transfert de chaleur.....	36
III.1.6	La conduction	37
III.1.7	Résistance thermique.....	38
III.2	LA Convection	39
III.2.1	Le nombre de Reynolds	39
III.2.2	Le nombre de Prandtl.....	39
III.2.3	Rayonnement	40
III.3	L'étude mécanique d'un frein à disque d'automobile.....	41
III.3.1	Conception du système de freinage :.....	41
III.3.2	Matériaux et propriétés :	41
III.3.3	Performance :	41
III.3.4	Dissipation de la chaleur:	41
III.3.5	Durabilité et résistance à l'usure :.....	41
III.3.6	Analyse des contraintes :.....	42
III.3.7	Modélisation et simulation :	42
III.4	Propriétés physiques et mécaniques des matériaux des disques de frein	42
III.4.1	Contraintes mécanique	42
III.4.2	Chargement mécanique	42
III.4.3	Phénomène d'usure	44
III.5	Le frottement : Aspect tribologiques.....	44
III.5.1	La mécanique en tribologie	45
III.6	REFROIDISSEMENT	45
III.7	Équation de chaleur :.....	45
III.8	Dilatation thermique :.....	46
IV.	Chapitre 3 : modélisation et simulation de culasse.....	48
IV.1	INTRODUCTION :.....	48
IV.2	.GEOMETRIE et dimension :	48
IV.2.1	géométrie :	48
IV.2.2	Démontions :	49
IV.2.3	matériaux et propriétés du disque –plaquette :	51
Cas	.....	52
Les pièces	.....	52
Cas 1	.....	52
Cas 2	.....	52

Cas 3	52
Cas 4	52
Plaquette A	52
ferodo	52
Plaquette B	52
Disque frein	52
acier standard.....	52
Fonte grise	52
IV.2.4 .Maillage :	53
IV.2.5 Simulation de disque /plaquette dans ANSYS 16.0 WORKBENCH :	54
IV.2.6 Conditions limites thermiques :	56
IV.2.7 Conditions limites mécanique :	60
V. Chapitre 4 :résultat de l'analyse.....	67
V.1 CONTRAINT EQUIVALENT Sigma (δ).....	70
V.1.1 SIGMA cas 1	70
V.1.2 SIGMA cas 2	70
V.1.3 SIGMA cas 3	70
V.1.4 SIGMA cas 4.....	70
V.2 DEFORMATION THERMIQUE ebsilente thermique (ϵ)	71
V.2.1 ebslnt ther cas 1	71
V.2.2 ebslnt ther cas 2	71
V.2.3 ebslnt ther cas 3	71
V.2.4 ebslnt ther cas 4	71
V.3 DEFORMATION TOTAL EQUIVALENTE ebsilente thermomecanique (ϵ).....	72
V.3.1 ebslnt THER MEC cas 1	72
V.3.2 ebslnt ther MEC cas 2	72
V.3.3 ebslnt ther MEC cas 3	72
V.3.4 ebslnt ther MEC cas 4.....	72
VI. Conclusion.....	73

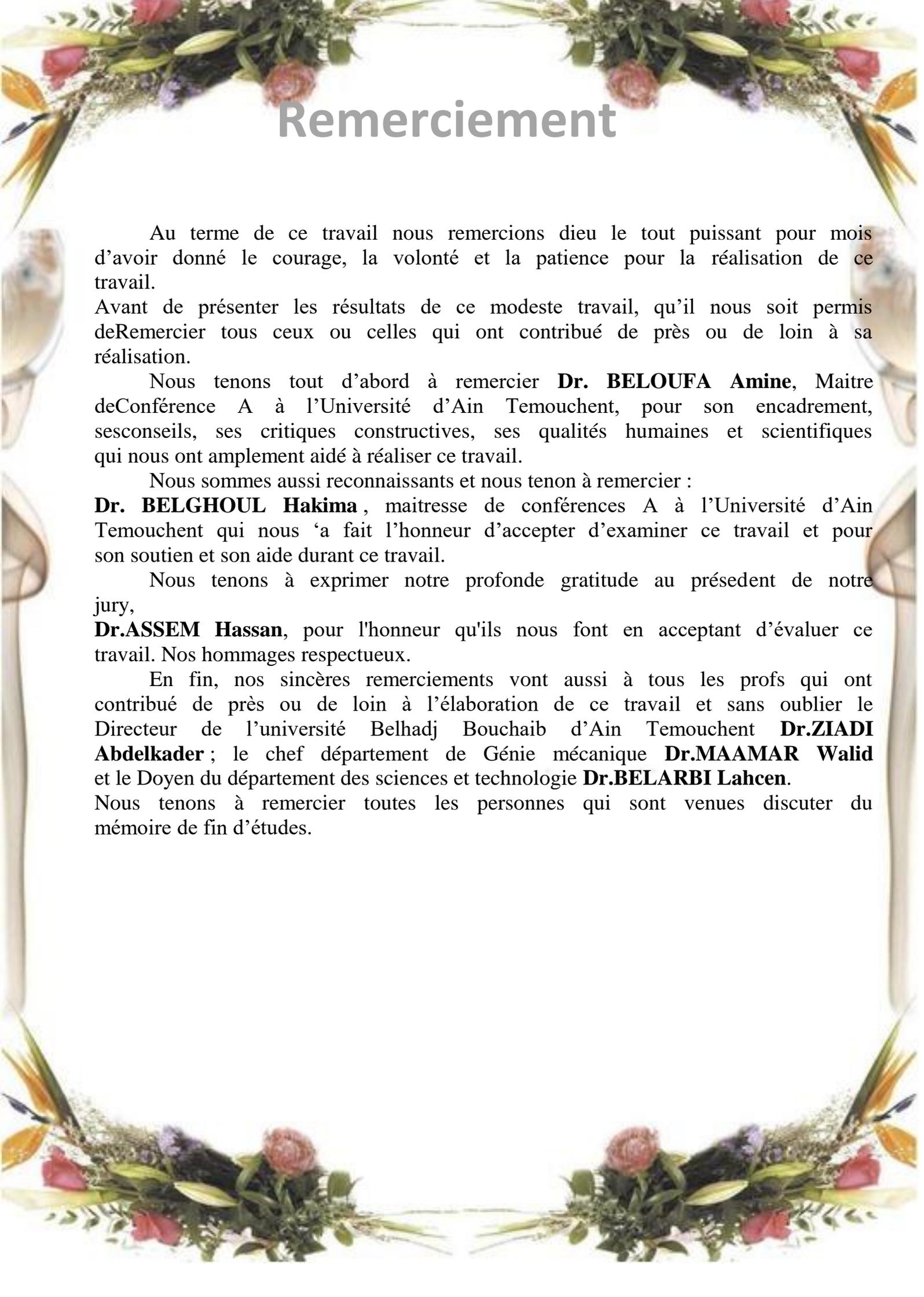
Liste des figures

FIGURE 1 : SCHEMA D'IMPLANTATION DU SYSTEME DE FREINAGE	13
FIGURE 2: FREIN A TAMBOUR.....	14
FIGURE 3: VUE 3D D'UN FREIN A TAMBOUR.....	15
FIGURE 4: DIFFERENTES TECHNOLOGIES.....	15
FIGURE 5: DESIGNATION DES PRINCIPAUX ELEMENTS.....	17
FIGURE 6: EXEMPLES DE FREINS A DISQUE	17
FIGURE 7: LE DISQUE PLEIN.....	18
FIGURE 8 : GORGE CALORIFIQUE.....	19
FIGURE 9: DES COMPOSITION D'UN FREIN AVANT.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 10: TYPES D'ETRIERS.....	19
FIGURE 11: LE SYSTEME A ETRIER FLOTTANT.....	20
FIGURE 12: LE SYSTEME A ETRIER FIXE.....	20
FIGURE 13: EXEMPLE DE DISQUE PLEIN.....	21
FIGURE 14: EXEMPLE DE DISQUE VENTILE	21
FIGURE 15: DIFFERENTES GEOMETRIES D'AILETTES.....	22
FIGURE 16: DISQUES VENTILES : DIFFERENTES CONCEPTIONS.....	22
FIGURE 17: CIRCULATION DE L'AIR DANS LES CANAUX D'UN DISQUE VENTILE	22
FIGURE 18: DISQUE RAINURE.....	23
FIGURE 19: DISQUE PERCE	23
FIGURE 20: PLAQUETTE DE FREIN.....	25
FIGURE 21: DISQUE CARBONE-CERAMIQUE.....	27
FIGURE 22: OBSERVATION D'UNE FISSURE RADIALE DE LA BORDURE EXTERIEURE DU DISQUE.....	30
FIGURE 23 FAÏENÇAGE SUR LES PISTES	30
FIGURE 24 : FISSURE RADIALE SUR LES PISTES DE FROTTEMENT.....	30
FIGURE 25: FISSURE EN PIED D'AILETT.....	30
FIGURE 26: RUPTURE DANS LA GORGE DU BOLE	30
FIGURE 27: SECTION DE DISQUE FISSURE.....	31
FIGURE 28: FISSURE DANS LA GORGE	31
FIGURE 29: USURE DES PISTES.....	31
FIGURE 30: USURE NON-UNIFORME	31
FIGURE 31: DEPOTS DE MATIERE SUR LES PISTES DE DISQUE.....	31
FIGURE 32: USURE EXCESSIVE DES PLAQUETTE	31
FIGURE 34 ETUDE THERMOMECHANIQUE DES FREINS DISC	34
FIGURE 35 GRADIENT DE TEMPERATURE.....	36
FIGURE 36 LOIS DE FOURIER	37
FIGURE 37 RESISTANCE THERMIQUE.....	38
FIGURE 38 DEFINITION D'UN ELEMENT DE SURFACE D'ECHANGE.....	39
FIGURE 39 ELEMENT EN RAYONNEMENT.....	40
FIGURE 40 FREIN A DISQUE	41
FIGURE 41 MISE EN CONE D'UN DISQUE DE FREIN.....	43
FIGURE 42: GORGE CALORIFIQUE.....	43
FIGURE 43 TRIBOLOGIE	44
FIGURE 44 REFROIDISSEMENT.....	45
FIGURE 45 GEOMETRIE DE DISQUE ET PLAQUETTE.....	48
FIGURE 46 DIMENSION DU DISQUE.....	49
FIGURE 47 DIMENSION DE LA PLAQUETTE	50
FIGURE 48 MAILLAGE FINE DE DISQUE / PLAQUETTE DANS ANSYS 16.0 WORKBENCH	53
FIGURE 49 DE SOLID 186	54
FIGURE 50 DE SOLID 187	54
FIGURE 51 SIMULATION DE DISQUE /PLAQUETTE DANS ANSYS 16.0 WORKBENCH	55
FIGURE 52 CONDITION LIMITE THERMIQUE DE CAS 1	56

FIGURE 53 CONDITION LIMITE THERMIQUE DE CAS 2	57
FIGURE 54 : CONDITION LIMITE THERMIQUE DE CAS 3	58
FIGURE 55 CONDITION LIMITE THERMIQUE DE CAS 4	59
FIGURE 56 : SUPPORT FIXE APPLIQUE A LES CAS 1-CAS 2-CAS 3-CAS 4	61
FIGURE 57 : CONDITION LIMITE MECANIQUE DE CAS 1	62
FIGURE 58 CONDITION LIMITE MECANIQUE DE CAS 2	63
FIGURE 59 CONDITION LIMITE MECANIQUE DE CAS 3	64
FIGURE 60 :CONDITION LIMITE MECANIQUE DE CAS 4.....	65

Liste des tableaux

TABLE 1 COMPOSITION ET RESISTANCE DES 03 SORTES DE FONTESPOUR LA CONCEPTION DES DISQUES [14]	32
TABLE 2 : TABLEAU DES PROPRIETES MECANIQUES DE CE ACIER	51
TABLE 3:TABLEAU DES PROPRIETES MECANIQUES DE FONTE GRISE.....	51
TABLE 4 : TABLEAU DES PROPRIETES MECANIQUES DE FERODO	52
TABLE 5 : TABLEAU DES MATERIAUX DANS CHAQUE CAS.....	52
TABLE 6 : TABLEAU DE ELEMENTS ET NŒUD	53
TABLE 7 :TABLEAU DE DEMENTIONS ET PROPRIETES DE MODELE DISQUE FREIN ET PLAQUETTE.....	55
TABLE 8 :TABLEAU DES CONDITIONS LIMITE THERMIQUE.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLE 9 :TABLEAU DES CONDITION LIMITE THERMOMECANIQUE.....	60
TABLE 10:TABLEAU DES RESULTAT DE L'ANALYSE	70



Remerciement

Au terme de ce travail nous remercions dieu le tout puissant pour mois d'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour la réalisation de ce travail.

Avant de présenter les résultats de ce modeste travail, qu'il nous soit permis de Remercier tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

Nous tenons tout d'abord à remercier **Dr. BELOUFA Amine**, Maitre de Conférence A à l'Université d'Ain Temouchent, pour son encadrement, ses conseils, ses critiques constructives, ses qualités humaines et scientifiques qui nous ont amplement aidé à réaliser ce travail.

Nous sommes aussi reconnaissants et nous tenon à remercier :

Dr. BELGHOUL Hakima, maitresse de conférences A à l'Université d'Ain Temouchent qui nous 'a fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail et pour son soutien et son aide durant ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au présedent de notre jury,

Dr. ASSEM Hassan, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail. Nos hommages respectueux.

En fin, nos sincères remerciements vont aussi à tous les profs qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail et sans oublier le Directeur de l'université Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent **Dr. ZIADI Abdelkader**; le chef département de Génie mécanique **Dr. MAAMAR Walid** et le Doyen du département des sciences et technologie **Dr. BELARBI Lahcen**.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui sont venues discuter du mémoire de fin d'études.



Dédicace

Avec une profonde gratitude, je dédie ma remise de diplôme, ce travail et ma joie à ceux qui ont été mes guides et mes soutiens. Leur amour et leur encouragement ont été des piliers essentiels dans mon parcours. Je leur suis infiniment reconnaissant pour leur présence et leur soutien indéfectibles.

À ma chère mère, **Madame BELASRI** ; Merci pour votre patience et vos efforts pour notre éducation. Aucune dédicace ne saurait exprimer tout notre respect et notre amour pour vous.

À mon cher père, **BELASRI Djelloul** ; Malgré vos grandes responsabilités, vous avez toujours été là pour nous écouter et nous encourager. Puisse ce travail alléger vos souffrances et vous apporter bonheur et satisfaction.

À mon frère **BELASRI Tedj** ; Votre soutien et vos encouragements ont été essentiels pour notre réussite. Nous vous remercions pour votre aide précieuse et vos sacrifices. Au centre de cette dédicace, je voudrais exprimer mes plus sincères remerciements à mon ami et frère, **BOUKHILLI Kamel**. Son soutien constant a été essentiel pour la réalisation de ce rêve universitaire. Votre présence et vos encouragements sont inestimables. Merci du fond du coeur

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes chers amis, **MAAMAR Aymen** , **BENZINA Amine** , **BELHADEF Mohamed** et tous les camarade de mon parcours

À mon encadreur **Dr. BELOUFA Amine** et au Président de la jurer **Dr. ASSEM Hassan** et l'Examinatrice **Dr. BELGHOUL Hakima** ; pour leur soutien inestimable dans les moments difficiles. Leur présence et leurs encouragements constants m'ont motivé et donné la force d'avancer. Merci infiniment pour votre amitié et votre soutien précieux.

Merci infiniment pour votre guidance et vos précieux enseignements. Votre soutien et vos conseils ont été essentiels dans la réussite de ce travail. Je vous suis profondément reconnaissant pour votre dévouement et votre expertise.

Resume:

Étude de conception d'un système de freinage hydraulique automatique. 22% des accidents de la route sont causés par une défaillance des freins. Par conséquent, le système de freinage est l'une des outils de sécurité et de protection les plus importantes dans la voiture, tant pour les passagers que pour les piétons, lors de la conduite sur route, et aussi dans les machines et systèmes mécaniques alors l'attention devrait être accordée à cette partie.

Les freins sont l'un des composants obligatoires d'une machine en mouvement. Toute machine ou véhicule en mouvement a besoin d'un frein pour ralentir et s'arrêter. Parmi les principaux types de freins utilisés dans les voitures modernes, on compte les freins hydrauliques, Fred Dosenberg a développé des freins hydrauliques dans ses voitures de course en 1914 et Donsberg devint la première marque de voiture à utiliser cette technologie dans les voitures de tourisme en 1921; le frein hydraulique est un système de freinage basé sur un fluide de frein qui transfère la pression du mécanisme de commande au mécanisme de freinage.

Le but de cette étude est de comparer la force du ressort avec la force de la transmission de freinage, ainsi que de comparer le couple de la force de freinage avec le couple de transmission pignon. Il vise également à dessiner le frein hydraulique à l'aide du programme Microsoft Visio, puis à utiliser SolidWorks pour calculer les différentes contraintes pouvant être appliquées sur la dent de freins à disque pour certains matériaux..

Mots clés :

Ansysworkbench 16.0 - Contact sec-Méthode des éléments finis (MEF)-disque de frein ventilé -Disque de frein plein- Fonte Grise- acier - Plaquettes -Etrier- Analyse transitoire- Coefficient de transfert thermique-CFX-Etude paramétrique-Contraintes thermiques-Flux de chaleur—Température- Maillage-Frottement-Chargement mécanique-Conditions aux limites- Déformée totale- Contraintes équivalentes de Von Mises-Contraintes de cisaillement - Déformations-Distribution de pression de contact-Fissure-Usure.

Summary:

Design study of automatic hydraulic braking system. 22% of road accidents are caused by brake failure. Therefore, the braking system is one of the most important safety and protection tools in the car, both for passengers and pedestrians, when driving on the road, and also in machines and mechanical systems so attention should be paid to this part.

Brakes are one of the mandatory components of a moving machine. Any moving machine or vehicle needs a brake to slow down and stop. Among the main types of brakes used in modern cars are hydraulic brakes, Fred Dorenberg developed hydraulic brakes in his racing cars in 1914 and Dorenberg became the first car brand to use this technology in passenger cars in 1921; hydraulic brake is a braking system based on a brake fluid that transfers pressure from the control mechanism to the braking mechanism.

The purpose of this study is to compare the spring force with the brake transmission force, as well as to compare the brake force torque with the pinion transmission torque. It also aims to draw the hydraulic brake using Microsoft Visio program, and then use SolidWorks to calculate the different stresses that can be applied to the disc brake tooth for certain materials.

Keywords:

Ansys workbench 16.0 - Dry contact-Finite element method (FEM)-ventilated brake disc -Solid brake disc-Grey cast iron-steel -Pads -Caliper- Transient analysis-Heat transfer coefficient-CFX-Parametric study-Thermal stresses-Heat flow—Temperature- Meshing-Friction-Mechanical loading-Boundary conditions-Total deformation-Von Mises equivalent stresses-Shear stresses -Deformations-Contact pressure distribution-Crack-Wear.

ملخص:

دراسة تصميم نظام الكبح الهيدروليكي الآلي.

إن ما نسبته 22% من حوادث الطرق سببها عطل في الفرامل (المكابح). و من هنا تعتبر منظومة الفرامل من أهم وسائل الأمان والحماية في السيارة للركاب والمشاة على حد سواء، أثناء القيادة على الطريق، وأيضا في الآلات والأنظمة الميكانيكية، لذلك يجب الاهتمام بذلك الجزء.

الفرامل هي واحدة من المكونات الإلزامية في آلة متحركة، تحتاج أي آلة أو مركبة متحركة إلى الفرامل لتخفيف السرعة والتوقف.

و من بين أهم أنواع الفرامل المستعملة في السيارات الحديثة هي المكابح الهيدروليكية، استحدثت فريد دوسنبرغ المكابح الهيدروليكية في سيارات السباق الخاصة به عام 1914 وأصبحت دو نسبرغ هي أول ماركة سيارات تستخدم هذه التكنولوجيا في سيارات الركاب عام 1921 ؛ المكبح الهيدروليكي هو منظومة كبح أو فرملة تعتمد على مائع كبح ينقل للضغط من آلية التحكم إلى آلية الكبح.

و تهدف هذه الدراسة إلى مقارنة قوة النابض بقوة انتقال الكبح وكذلك مقارنة عزم انتقال الكبح بعزم انتقال الترس.

كما تهدف إلى رسم المكبح الهيدروليكي باستخدام برنامج مايكروسوفت فيزيو ثم باستعمالسوليد ووركس لحساب مختلف الإجهادات التي يمكن أن تطبق على سن قرص الفرامل لبعض المواد.

الكلمات الرئيسية:

طاولة عمل - Ansys 16.0الاتصال الجاف - طريقة العناصر المحدودة - (FEM) قرص الفرامل المهواة - قرص الفرامل الصلب - الحديد الزهر الرمادي - الفولاذ - الوسادات - الفرجار - التحليل العابر - معامل نقل الحرارة - CFX - دراسة بارامترية - الضغوط الحرارية - التدفق الحراري - درجة الحرارة - احتكاك الشبكة - التحميل الميكانيكي - ظروف الحدود - التشوه الكلي - الإجهادات معادلات فون ميزس- إجهادات القص -السلالات-

توزيع ضغط الاتصال-الكراك-التآكل.

I. Introduction générale

Grâce aux continuel progrès technologiques dans l'industrie du transport, les Véhicules sont devenus aussi puissants et de plus rapides. De ce fait, les systèmes de freinage doivent aussi suivre ce mouvement pour assurer un fonctionnement adéquat avec les Dernières améliorations. Le frein, organe de sécurité, reste ainsi un sujet d'étude très actuel Pour les ingénieurs. L'apparition de nouveaux matériaux (alliages jumpers, céramique, etc.) et De nouveaux procédés de création ou de traitement de surface (grenailage, trempe standard Acceptance, etc.) génère de nouveaux sorts de frein et donc la nécessité de nouvelles études. De plus, avec la concurrence industrielle toujours croissante, les problématiques changent en Aussi du souci d'efficacité, de fiabilité et de confort, s'ajoute ceux du moindre coût et du délai De manufacture.

L'objectif pour l'ingénieur est de trouver le meilleur compromis entre ces exigences. Il s'agit alors remplacer, du moins, compléter les essais expérimentaux standard des investigations numériques afin de Analyser aussi de possibilités pour mieux s'approcher du meilleur compromis, réduire les coûts en fabriquant moins de model et minimiser les durées d'étude en limitant le nombre d'essais.

Le premier chapitre décrit le principe de fonctionnement des freins, leurs différents types, le principe, problème du disque de frein de fonctionnement ainsi que les avantages et inconvénients et la consommation de chaque type et entre tambour et disque

Le deuxième chapitre donne une identification et présentation de disque frein, chambre des températures on a bien présente les types de freinage, aussi mécanique étude du frein disque automobile, on a décrit refroidissement du disque

Le troisième chapitre dans le chapitre troisième on a bien dans les premiers titres on a dimensionné les disque frein et plaquette de frein avec plusieurs chapitre description, on ajoute des Condition limite thermique dans différente cas dans plusieurs figures

Dans Le Dernier Chapitre On A Analysé DEFORMATION THERMIQUE Et DEFORMATION TOTAL EQUIVALENTE On Ajoute CONTRAINT EQUIVALENT Sigma Dans Quatre Cas Puis, déformation Thermique et Déformation Total Equivalente ou Thermomécanique Bien Décrit Dans Plusieurs Figure

II. Chapitre 1 : les différents types de moteurs

II.1 Introduction

Grâce aux continuel progrès technologiques dans l'industrie du transport, les Véhicules sont devenus plus puissants et aussi rapides. De ce fait, les systèmes de freinage doivent aussi suivre ce mouvement pour assurer un fonctionnement adéquat avec les dernières améliorations. Le frein, organe de sécurité, reste ainsi un sujet d'étude très actuel pour les ingénieurs. L'apparition de nouveaux matériaux (alliages jumpers, céramique, etc.) et de nouveaux procédés de création ou de traitement de surface (grenailage, trempe standard acceptance, etc.) génère de nouveaux sorts de frein et donc la nécessité de nouvelles études. De plus, avec la concurrence industrielle toujours croissante, les problématiques changent en plus du souci d'efficacité, de fiabilité et de confort, s'ajoute ceux du moindre coût et du délai de manufacture.

L'objectif pour l'ingénieur est de trouver le meilleur compromis entre ces exigences. Il s'agit alors remplacer, du moins, compléter les essais expérimentaux standard des investigations numériques afin d'analyser plus de possibilités pour mieux s'approcher du meilleur compromis, réduire les coûts en fabriquant moins de model et minimiser les durées d'étude en limitant le nombre d'essais.

II.2 STRUCTURE GENERALE D'UN SYSTEME DE FREINAGE

La structure ci-dessous (Fig1) représente une structure de base que l'on retrouve Dans tous les véhicules de tourisme dit bas de gamme. On pourra cependant trouver des variantes telles que la mien de freins à disque sur l'essieu arrière, ou bien la mise en put de système tels que l'ABS ou bien ESP [1].

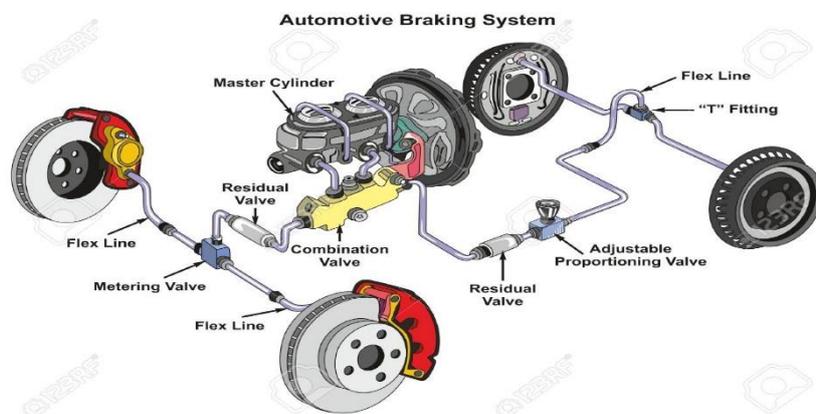


Figure 1 : Schéma d'implantation du système de freinage .(1-1)

Dans un système de freinage, on distingue deux parties :

- Partie commande
- Partie opérative.

II.3 FREINS TRAVAILLANT PAR FROTTEMENT

II.3.1 Frein à tambour

Il se compose d'un tambour en fonte solidaire de la roue, de mâchoires solidaires du châssis, garnies d'un matériau à haute résistance au frottement et à l'échauffement et d'un cylindre qui presse les mâchoires contre le tambour (Figure 2). Les mâchoires sont en acier recouvert d'une garniture d'un matériau composite ayant un bon coefficient de frottement (0,35 à 0,40) avec le matériau du tambour et s'usant additionnelle vite. L'usure peut être rattrapée standard un mécanisme de réglage open de l'extérieur (non automatique) [2].

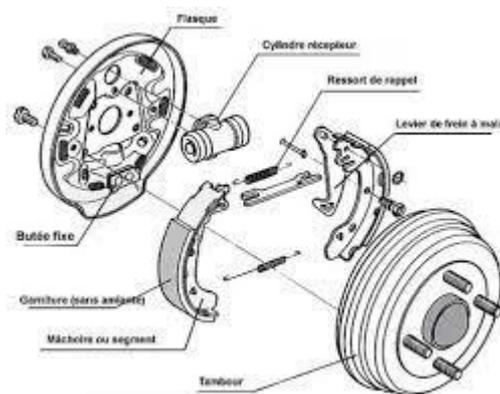


Figure 2: Frein à tambour.(1-2)

II.3.1.1 Principe de fonctionnement

Le tambour est solidaire du moyeu de roue et tourne avec lui. Les portions et les Composants qui génèrent le drive de freinage sont généralement montés sur un niveau circulaire en tôle emboutie nommé flasque qui ferme le tambour et est fixé rigidement au porte-moyeu. Des ressorts hélicoïdaux travaillant en footing connectent les deux sections et les empêchent de frotter contre la couronne du tambour lorsque les freins ne sont pas actionnés (Figure 3).

MÂCHOIRE DE FREIN

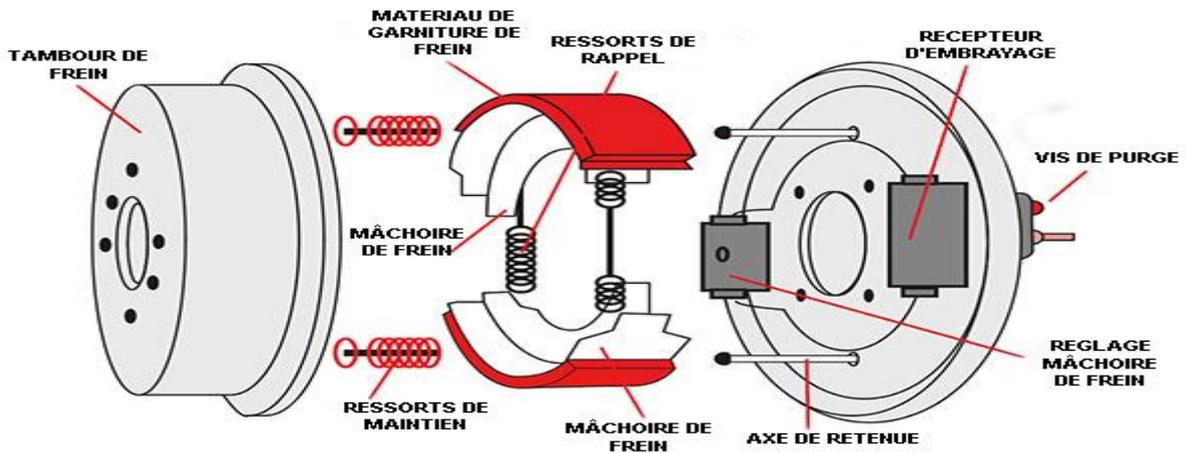


Figure 3: Vue 3D d'un frein à tambour.(1-3)

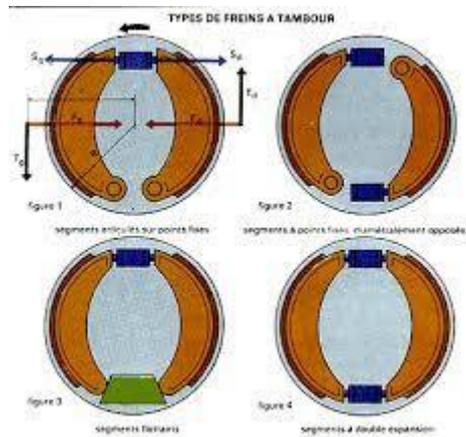


Figure 4: Différentes technologies.(1-4)

Différentes façons d'articuler et de commander les deux sections sont possibles. Suivant la setup adoptée, l'effet d'auto-serrage est par ailleurs ou moins fortification, obtenu dans un seul sens de tour ou dans les deux, sur une seule des mâchoires ou sur les deux (Figure 4).

Les deux sections sont actionnés standard un cylindrée qui génère un drive de serrage. Une drive tangentielle due à la révolution du tambour qui agit sur le portion amont (primaire) engendre une minute sur hachette pour enfant de pivotement qui est dans le même sens que la constraint de serrage :

C'est l'auto-serrage. Sur la section aval (ou secondaire), la constraint tangentielle s'oppose à l'action du drive de serrage c'est l'auto-desserrage.

Le serrage de la mâchoire secondaire est donc additionnelle faible que le serrage de la mâchoire primaire ce qui entraîne une usure inégale puisque les freins sont généralement utilisés en marche avant. Ainsi il existe d'autres

arrangements permettant de rendre l'usure égale et une puissance de freinage rassemble.

Si les tomahawks des fragments sont intervertis, l'auto-serrage agit sur les deux mâchoires, mais n'est effectif que dans un seul sens de tour du tambour. On peut également remplacer les rotation des deux sections standard un palier flottant.

Au freinage, l'extrémité aval du fragment primaire s'appuie sur le palier et pousse l'extrémité amont du fragment secondaire, qui devient auto-serrant lui aussi. Ce montage est valable pour les deux sens de révolution et est la procédure l'additionnelle répandue aujourd'hui.

Un autre setup consiste également à serrer les deux mâchoires à l'aide de deux cylindres hydrauliques à leur extrémité, mais ce sort de frein est très peu employé en raison, compatibility efficacité/prix peu favorable.

Les tambours actuels montés sur l'essieu arrière sont généralement en fonte. Quant aux mâchoires, elles sont en tôle d'acier soudée ou en aluminium, et revêtues d'une garniture de frottement à base de laine d'acier, de cuivre et de coke en poudre ou reprise d'oxyde de fer.

La principale caractéristique requise est un coefficient de frottement relativement varier avec la température et assez élevé, de l'ordre de 0,5.

Les freins à tambour sont repris bien répandus aujourd'hui sur l'essieu arrière des véhicules légers, aux exhibitions modestes.

II.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 : (véhicule, avion, etc.) et pour diverses machines. Ce système transforme l'énergie cinétique du véhicule en chaleur.

Le frein à disque (Figure 5) est composé de :

un disque généralement en fonte lié à la roue standard l'intermédiaire du moyeu et qui lui est intérieur ;

Deux plaquettes de portion et d'autre du disque, composées chacune d'une garniture en matériau composite collée ou rivetée sur un back métallique ;

un étrier en acier, solidaire de l'essieu (standard l'intermédiaire du tour standard exemple), qui supporte les plaquettes ; en forme de chape, il recouvre un secteur du disque ; un cylindrée hydraulique dans le cas d'un étrier flottant ou coulissant ou deux cylindres dans le cas d'un étrier fixe posés contre les bolsters des plaquettes.

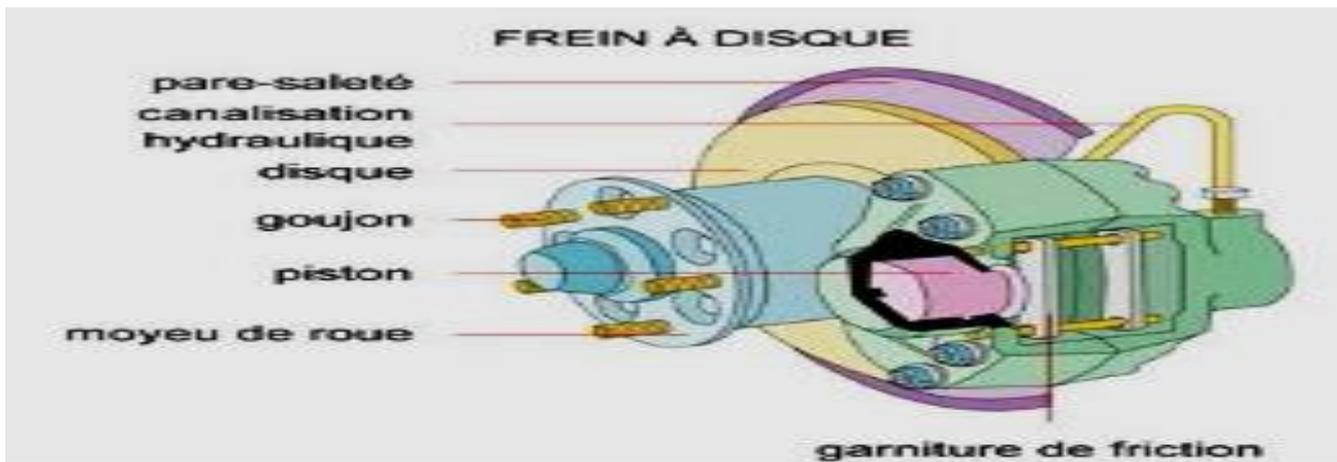


Figure 5: Désignation des principaux éléments.(1-5)

Les disques sont des composants soumis à de fortes températures. De manière générale, on trouve sur les véhicules de série des disques pleins. Afin d'augmenter l'échange thermique entre le disque et l'air environnant, on peut utiliser des disques ventilés. En diminuant ainsi la température, on garantit un meilleur frottement des garnitures sur les disques [1].

Si les systèmes de frein à disque sont utilisés dans tous les domaines du transport (car, ferroviaire et aéronautique), les caractéristiques Methods dépend des exigences de freinage ce qui donne des innovations différentes (Figure 6).

-a- : Frein à disque automobile.
aéronautique

-b- : Frein à disque



Figure 6: Exemples de freins à disque(1-6)

II.3.2.1 *Description d'un disque*

Le disque est constitué d'un anneau plein avec deux pistes de frottement (Figure 7), 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 arrange 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 pigeage 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 de la jante et intérieures quand elles se situent du côté de l'essieu.

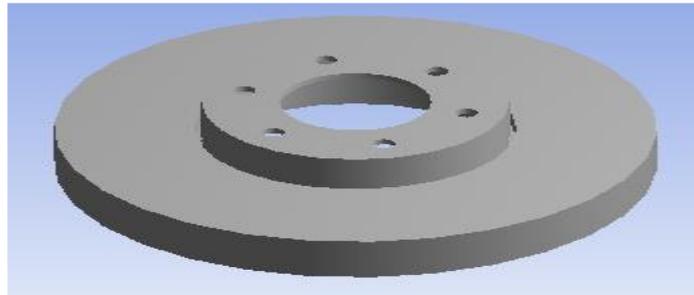


Figure 7: Le disque

plein.(1-7)

La région de la piégeage du bol est aussi très sévèrement sollicitée. En effet, le disque tend à se mettre en cône à cause des dilatations des pistes chaudes, mais ce déplacement est retenu standard la présence du bol qui est moins chaud et standard celle de l'étrier. De ce fait, de grandes concentrations de contraintes naissent dans cette zone.

Lors d'essais très sévères sur banc dynamométrique, on peut parfois voir apparaître un gap circonférentiel (du côté externe et/ou du côté interne du disque) qui se propage et provoque la crack brutale du bol.

Les pentes dans la piégeage out du bol s'expliquent de la même manière. En début de freinage, la température du bol est à 20° C tandis que celle des pistes est de quelques centaines de degrés. De aussi, dans le but d'éviter que la température du moyeu ne soit trop élevée (ce qui engendrerait des élévations de température du pneu, très évaluât pour child comportement), le rassasiement est usiné de manière à ne pas transmettre trop de chaleur au bol (Figure 8).

Avec cet usinage, la température du bol baisse effectivement, mais les angles thermiques augmentent conséquemment dans cette zone. Ceux-ci engendrent

des contraintes thermiques qui expliquent les breaks de bol observé lors d'essais expérimentaux sévères.

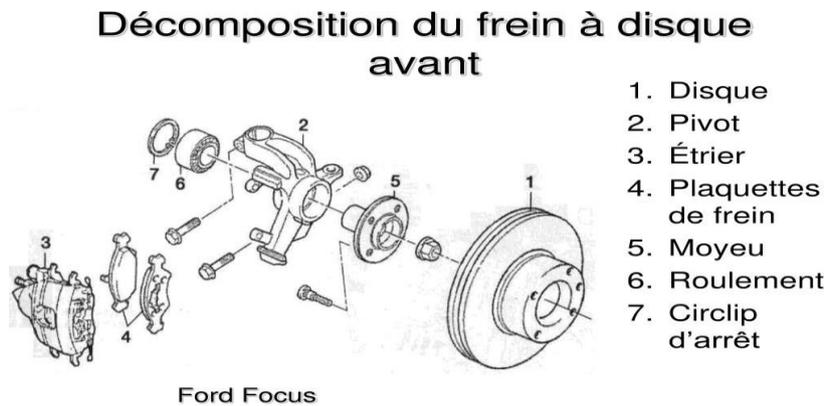


Figure 8 : Gorge calorifique(1-8)

II.4 TYPES DES ETRIERS

On peut distinguer principalement, dans le secteur véhicule, deux sorts de réalisations. Les freins à étriers coulissants ou à étriers fixes (figure 10). les premiers sont répandus. Les étriers fixes sont surtout utilisés dans le domaine des motocycles [1].

naturellement, les étriers, comme tous les composants non suspendus, doivent être le plus léger concevable. ils sont habituellement coulés en alliage d'aluminium, parfois en alliage de magnésium ou en fonte. Le porte-étrier peut être en fonte et l'étrier en alliage léger.

Le diamètre des cylindres récepteurs hydrauliques dans les étriers est aussi incroyable que celui des cylindres actionnant les portions des freins a tambour et la pression dans le circuit hydraulique peut de passer 100 bars alors que 15 bars suffisent avec des freins a tambour.

-a- : Etrier flottant

-b- : Etrier fixe.

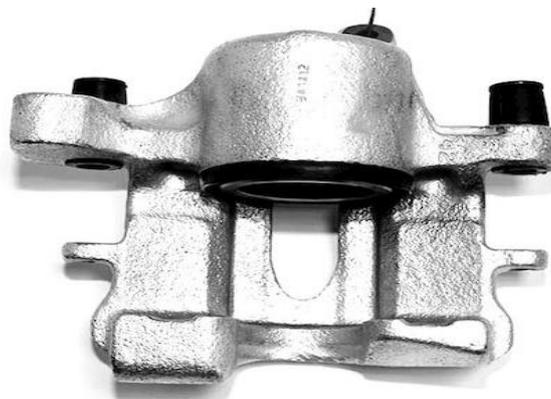


Figure 9: Types d'étriers(1-9)

Lorsque le véhicule est en mouvement, le disque est en tourne. Dans le cas d'un système a étrier coulissant (figure 11), pendant la stage de freinage, un circuit hydraulique commande standard la pédale de frein actionne le cylindre qui presse la première plaquette (plaquette interne) contre le disque. lorsque celle-ci est en contact avec le disque, l'étrier se déplace standard réaction grâce à un système de coulissage et entraîne la seconde plaquette contre le disque.

on pourra également trouver des freins a chape coulissante au fonctionnement semi identique que les freins a étriers coulissants [1] (fig. i.12).

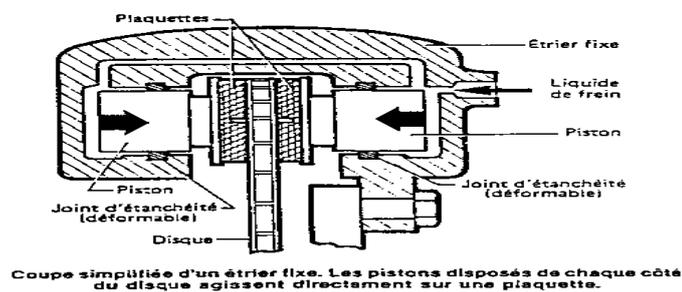


Figure 10: Le système à étrier flottant.(1-10)

Dans le cas de l'étrier fixe, qui est rigidement attache a l'essieu et qui comporte deux cylindres opposes alimentes standard un même circuit hydraulique, les deux cylindres viennent presser les deux plaquettes sur le disque lors de la mise en pression (figure 12).

l'avantage de ce dispositif standard compatibility a l'étrier coulissant est la moindre quantité de liquide mise en jeu (puisque chaque cylindre ne parcourt qu'une demi-distance).

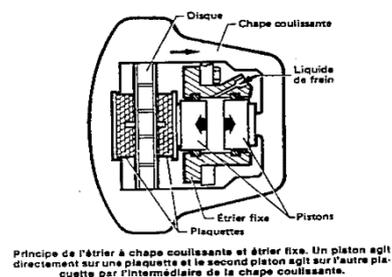


Figure 11: Le système à étrier fixe.(1-11)

II.5 LES TYPES DE DISQUE FREIN

Il existe deux sortes de disque :

Les disques pleins et les disques ventilés. Les disques

Pleins, de géométrie directement et donc de création basic, sont généralement placés sur l'essieu arrière de la voiture. Ils se composent tout simplement d'une couronne pleine reliée à un "bol" qui est fixé sur le moyeu de la voiture (Figure 13). Les disques ventilés, de géométrie plus complexe, sont apparus aussi tardivement. Ils se trouvent la plupart du temps sur l'avant. Toutefois, ils sont de plus en plus en additionnelle à l'arrière et à l'avant des voitures de haut de gamme. Composés de deux couronnes - appelées flasques - séparées standard des ailettes (Figure 14), ils refroidissent mieux que les disques pleins grâce à la ventilation entre les ailettes qui, en additionnelle, favorisent le transfert thermique standard convection en augmentant les surfaces d'échange. Le disque ventilé comporte aussi de matière que le disque plein ; sa capacité d'absorption calorifique est donc meilleure. Le nombre, la taille et la forme (ailettes radiales, incurvées, pions circulaires...) des ailettes sont factors (Figure 15)

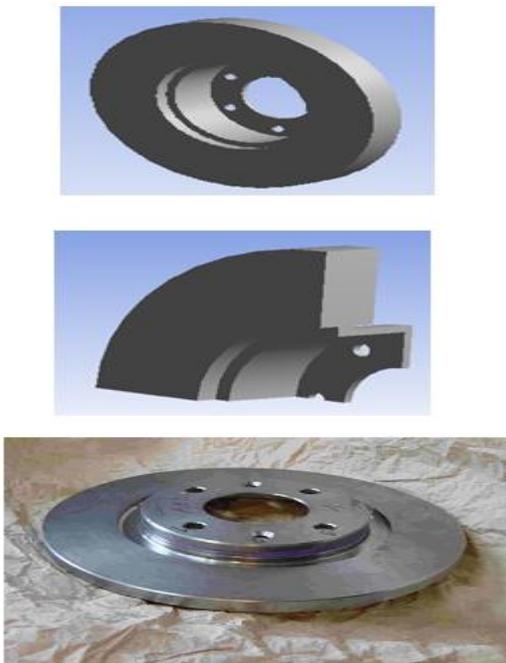


Figure 12: Exemple de disque plein. (1-12)

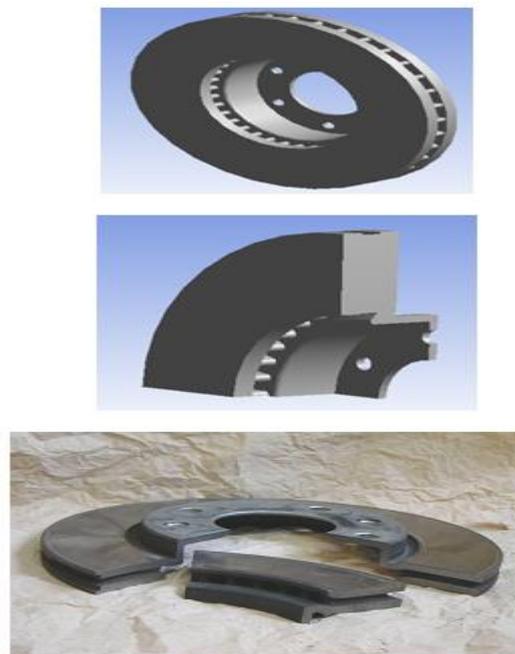


Figure 13: Exemple de disque ventilé(1-13)



Figure 14: Différentes géométries d'ailettes.(1-14)

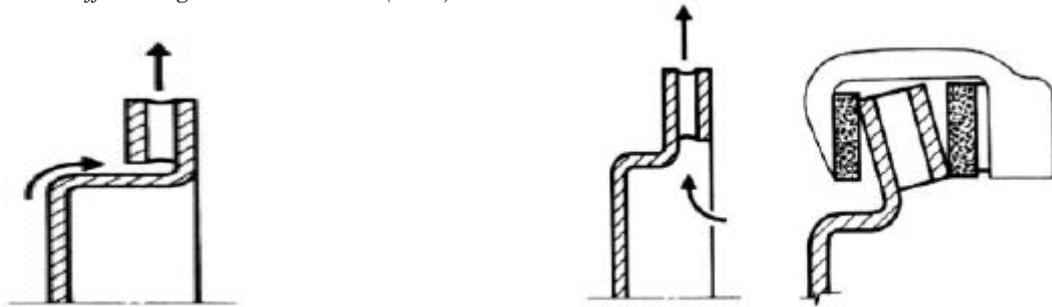


Figure 15: Disques ventilés : différentes conceptions(1-15)

(Figure 16). représente deux sorts de disque ventilé. Le modèle « a » présente une moins bonne ventilation que le « b », mais possède une meilleure rigidité. La (Figure 17). montre également la déformation du deuxième sort de disque soumis à un post pente de température. La révolution du disque entraîne une circulation d'air dans les canaux [3], d'où une amélioration du refroidissement (Figure 18).

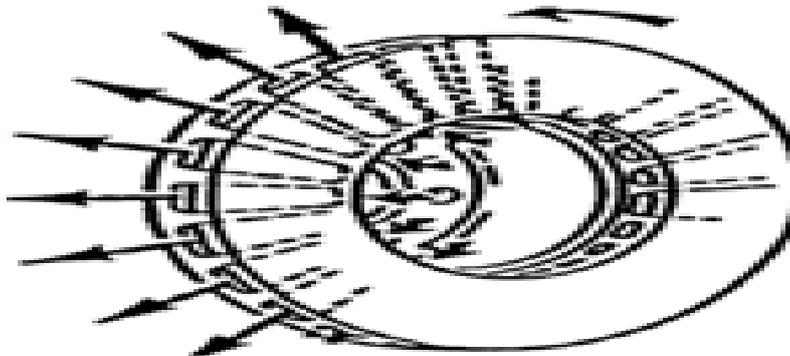


Figure 16: Circulation de l'air dans les canaux d'un disque ventilé(1-16)

-b-

II.6 AUTRES TYPES DE DISQUES ET LEURS CARACTERISTIQUES

II.6.1 Les disques rainurés

La raison pour laquelle on rainure les disques est trop souvent mal contenir. Les gens croient généralement que les rainures sont là pour améliorer le refroidissement. Il n'en est rien. Elles sont là pour nettoyer la surface de la plaquette et briser la couche gazeuse qui peut se former entre la plaquette et le disque quand les hautes températures sont atteintes [4] . En pratique, la chaleur crée des poussières et des gaz entre le disque et la surface de la plaquette, réduisant ainsi l'efficacité, ((Figure 19)). .



Figure 17: Disque rainuré.(1-17)

II.6.2 Les disques percés

Le perçage des disques permet en plus du refroidissement, le nettoyage des disques, (Fig. I.20). Les trous sont plus efficaces avec le temps car ils sont plus ou moins auto nettoyants. Mais l'augmentation du nombre de trous réduit la surface de grincement, un disque avec une masse insuffisante (diamètre trop petit ou trop lame) a tendance à craqueler et casser [4].



Figure 18: Disque percé(1-18)

II.7 COMPARAISON ENTRE TAMBOUR ET DISQUE

II.7.1 Avantages

Par rapport aux freins à tambour, les freins à disque se distinguent par les avantages suivants [5] :

- Meilleur refroidissement.
- La dilatation n'affecte pas la qualité de freinage.
- Jeu de fonctionnement faible, action rapide.
- Bonne progressivité.
- Répartition uniforme de la pression.
- Absence de déformation.
- Puissance de freinage identique en marche avant et en marche arrière.
- Pas de réglage (rattrapage de jeu automatique).
- Remplacement des garnitures plus rapide.

II.7.2 Inconvénients

Les inconvénients des freins à tambour se résument comme suit [5] :

- Mauvaise répartition de l'effort.
- Moins bonne tenue à chaud.
- Dilatation et déformation du tambour.
- Usure plus prononcée sur le segment primaire (comprimé).

II.7.3 Les Plaquettes

Les plaquettes de frein sont composées d'une plaque en métal relativement rigide sur laquelle est collée une garniture, semblable à celle que l'on peut trouver dans les freins à tambour. Elle est toutefois soumise à des pressions additionnelles élevées, la surface de contact étant aussi réduite. La garniture est l'élément d'usure d'un système de frein et sa périodicité de changement est aussi courte que celle du disque. La surface d'une garniture est très réduite comparativement à la puissance de freinage qu'elle doit fournir. Elle doit avoir de bonnes propriétés thermomécaniques et également fournir un coefficient de frottement relativement

constant avec la température afin d'assurer un freinage le plus consistant concevable. Si la rigidité de la garniture est relativement faible, de l'ordre de quelques GPa, la plaque métallique au dos de la garniture se doit d'être relativement rigide d'une portion pour transmettre l'effort provenant du cylindre hydraulique et d'autre portion pour répartir la pression l'additionnelle uniformément concevable sur l'ensemble de la surface de la garniture. Cela

permet une usure uniforme de la garniture, rendant le freinage constant au cours du temps et une répartition optimale du flux de chaleur.

Les plaquettes sont les pièces les aussi 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) [6]. Les plaquettes de frein véhicule comportent des rainures (Fig.I.21). 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.

Non-apparition de bruit. Haute résistance thermique. La température des garnitures peut atteindre 600°C.



Figure 19: Plaquette de

frein.(1-19)

Une température trop élevée peut entraîner une perte d'efficacité presque totale du freinage appelée :

Évanouissement ou flou. La manufacture de la plaquette nécessite l'application de plusieurs stratégies [7]:

Back métallique : obtenu standard découpage (découpage pale pour la première monte), il subit des opérations de nettoyage et de grenailage.

Matériau de contact : pesage mélange (et remélange).

L'ensemble : cuisson, cautérisation (pour la première monte), amendement et peinture.

Personnalisation : plaque antibruit, marquage

II.8 PROBLEME DU DISQUE DE FREIN

L'analyse bibliographique des phénomènes de freinage montre que la principale sollicitation vient des fortes variations de température induites par le frottement des plaquettes contre le disque. En effet, la température peut varier de 20° C à additionnelle de 700° C en quelques secondes seulement. Ces brusques variations ne permettent pas à la température de s'homogénéiser. De ce fait, le disque est le lieu de très fortes pentes thermiques dans l'épaisseur des pistes de frottement, mais aussi dans la tête circonférentielle. Ces dernières pentes sont dues au fait que le flux de chaleur qui entre dans le disque est localisé sous les plaquettes de frein et que le disque tourne. Parfois, il apparaît ce qu'on appelle des

Concentres chauds ; ce sont des zones circulaires régulièrement espacées sur les pistes où la température est localement aussi élevée. Soumis à de tels cycles thermiques, le disque subit des déformations anélastiques (plastiques voire même viscoplastiques) qui sont elles aussi homogènes dans la pièce. La prédiction numérique des champs thermomécaniques qui s'établissent dans le disque, a été mise en œuvre par la méthode de calcul fondamental qui prend en compte les couplages essentiels entre les différents phénomènes, le caractère transitoire de l'histoire thermique du disque, le comportement anélastique du matériau, les angles

thermomécaniques ortho radiaux et la révolution du disque. Dans cette étude, on se rend vite compte que la réalisation d'un freinage standard par une méthode classique standard éléments finis engendrerait des temps de calcul exorbitants.

II.9 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.

II.9.1 Le disque

Afin d'assurer un bon comportement thermique et mécanique, le matériau idéal pour le disque de frein doit pouvoir emmagasiner beaucoup de chaleur et supporter une sollicitation mécanique vitale, sur une haute gamme de température de fonctionnement (dans l'automobile, les températures d'utilisation varient entre 20° C et 800 °C ; dans l'aviation les températures peuvent atteindre les 3000°C). De plus, il doit être bon marché et être de manufacture relativement sans effort.

Ainsi, s'il existe des matériaux à meilleur comportement thermomécanique, la fonte grise à graphite lamellaire est l'additionnelle communément utilisée dans l'industrie car. En effet, la fonte est peu chère, se fabrique aisément et peut être coulée facilement. Elle présente également une bonne conductivité, une assez bonne résistance mécanique, et une faible usure.

Les étendues de carbone et les ajouts de différents sorts d'éléments d'addition (phosphore, potassium, silicium, manganèse, cuivre, soufre, nickel, chrome, molybdène, aluminium, autres éléments d'alliages et des impuretés diverses) permettent de faire varier légèrement les propriétés thermomécaniques de la fonte qui reste ainsi en perpétuelle évolution [8][9][10].

On rappelle que aussi la teneur en carbone est élevée, additionnelle la résistance mécanique de la fonte est mauvaise. Standard contre, la conductivité augmente, ce qui diminue les contraintes thermiques.

Il existe néanmoins dans le cas de véhicules à hautes exhibitions des disques bi matière avec un moyeu (ou bol) en aluminium ou acier et une piste de freinage (couronne) encarbonate-céramique vissée ou rivetée (Fig.I.22). Ces disques sont particulièrement coûteux mais additionnelle légers et additionnelle résistants à l'usure, à la érosion et aux hautes températures



Figure 20: Disque carbone-céramique(1-20)

II.9.2 Les garnitures

Pour les garnitures, on cherche un matériau qui génère un bon coefficient de Frottement (le plus élevé concevable et le aussi constant concevable, quelles que soient les variétés de températures, de pression ou de vitesse). Il faut cependant souligner que le comportement de grincement dépend aussi du matériau qui compose l'autre structure frottant, à savoir le disque, des conditions d'appui de la plaquette, etc. On veut aussi limiter les problèmes d'usure, d'érosion et de bruit (qui est un problème classique de pièces flottantes sur des solides en mouvement). Bien sûr, il y a aussi des contraintes de coût.

Les garnitures sont faites de matériaux dits de contact. Ceux-ci sont composés

D'abrasifs et de lubrifiants, d'élastomères, de poudre de métaux et autrefois, d'amiante. Leur composition est souvent mal connue, restant confidentielle chez les équipementiers.

II.9.3 Les supports

Les bolsters sont fabriqués avec un acier doux. Leur rôle est de répartir l'effort exercé standard le cylindré hydraulique sur la totalité de la surface des garnitures, dans le but d'obtenir une surface de contact disque/plaquette la de plus énorme et la aussi homogène concevable. Cela constitue un des critères de bon fonctionnement du frein. Le back est la pièce intermédiaire entre les garnitures et le cylindré. Elle transmet donc la chaleur des garnitures (qui peut être élevée) vers le liquide dans le cylindré. Afin d'éviter ce phénomène, on use parfois des sous-couches qui servent d'isolant thermique.

Ces sous-couches permettent aussi d'absorber une partie des bruits et des vibrations engendrés standard le système de frein à disque.

II.10 CRITERES D'EVALUATION D'UN SYSTEME DE FREINAGE

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

II.10.1 Efficacité

L'efficacité du frein se mesure standard, inclination à arrêter un véhicule en mouvement, sur une retire minimale, quelles que soient les conditions extérieures. L'effort qui sert à ralentir la révolution du disque doit donc être le plus élevé concevable. En d'autres termes, il faut optimiser l'effort tangentiel issu du frottement des plaquettes sur le disque. Ainsi, plusieurs

Paramètres interviennent :

la pression de contact, la surface de frottement et le coefficient de frottement. plus ces valeurs sont élevées, additionnelle la distante d'arrêt du véhicule est faible.

La pression de contact disque/garnitures dépend essentiellement de la pression Hydraulique dans le cylindré. Celle-ci varie entre bar et 80 bars pour une voiture particulière.

La pression de contact dépend aussi de l'état de surface des deux pièces flottantes, de l'usure,

des rigidités des matériaux, des dilatations thermiques, etc.

Le coefficient de frottement, noté, doit aussi rester constant concevable, afin d'assurer un freinage consistant, quelles que soient les conditions de freinage. Or, une fois les matériaux choisis, va dépendre de la pression de contact, de la vitesse de tourne mais aussi de l'hygrométrie et de la température de fonctionnement. En effet, la valeur de baisse standard temps de pluie. De même, quand la température atteint 400° C environ, chute brutalement.

C'est ce qu'on appelle le flou.

Kennedy et Ling [11] pour l'aéronautique puis Day [12] pour l'automobile ont mis en évidence que la surface réelle de contact peut être très différente de la surface potentielle de contact (surface totale des garnitures) avec des variétés permanentes contribution au couplage entre les dilatations thermiques, les pressions de contact et l'usure. Ces examinations ont été menées pour des géométries simples de sort annulaire avec l'hypothèse de matériaux à comportement élastique linéaire.

II.10.2 Confort

Les problèmes de confort rencontrés avec le frein à disque résident dans l'apparition de bruits et de vibrations dans certains setups de freinage. Théoriquement, les vibrations et les bruits sont reliés puisque le bruit est toujours engendré standard des vibrations.

Cependant, on appelle communément vibrations les vibrations qui sont ressenties autrement que standard les bruits. Dans le problème du frein, il s'agit principalement des vibrations de la pédale de frein et du volant. Elles sont essentiellement Levy aux chocs entre le disque et les plaquettes et sont donc liées à la vitesse de tour de la roue. Les fréquences de ces vibrations varient de quelques hertz à quelques centaines de hertz.

Les bruits sont générés standard les instabilités du frottement des plaquettes contre le disque. Le frottement est donc ce qu'on appelle l'excitation du bruit. Le résonnateur (la pièce vibrante) est l'additionnelle souvent le disque, mais il peut arriver que ce soit la plaquette ou l'étrier ou reprise une autre pièce de l'assemblage

II.10.3 Endurance

Un autre critère d'évaluation d'un frein à disque , de plus précisément, il s'agit de garantir dans la durée l'ensemble des fonctions du système, éviter toute avarie dangereuse et définir un seuil d'usure à partir duquel les pièces doivent être changées. Pour dimensionner un disque de frein, il faut alors connaître les avaries susceptibles d'apparaître.

Les perceptions expérimentales permettent d'établir la liste des endommagements suivants(certains peuvent se manifester sur un véhicule en clientèle, d'autres ne surviennent que lors d'essais sur banc) :

du faïençage sur les pistes de frottement (Fig.I.24) ;

des gaps radiales sur les pistes de frottement (Fig.I.25) ;

descrevices au pied des ailettes (Fig.I.26) ;

Un gap circulaire (Fig.I.28), (Fig.I.29) au niveau de la pigeage qui peut aboutir à la freinage du disque (Fig.I.27) ;

De l'usure (Fig.I.30), (Fig.I.31).

Le disque s'use standard frottement contre les plaquettes. En réalité, celles-ci sont fabriquées dans l'optique de s'user davantage que le disque (Fig.I.33). Le frottement des deux pièces engendre des problèmes de dépôt (Fig.I.32) et d'arrachement de matière qui modifie la nature du contact.

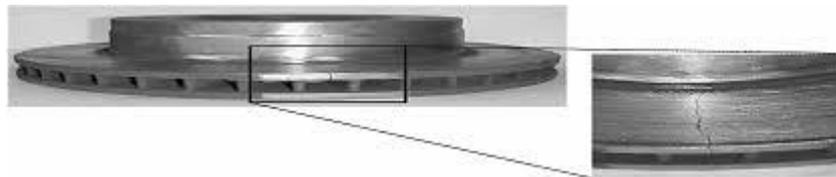


Figure 21: Observation d'une fissure radiale de la bordure extérieure du disque jusqu'au bol(1-21)



Figure 22 Faïençage sur les pistes(1-22)

FigureError! Reference source not found.: Fissure radiale sur les pistes de frottement(1-23)

Figure 23: Fissure en pied d'ailett(1-24)Figure 24: Rupture dans la gorge du bole(1-25)



Figure 25: Section de disque fissuré(1-26)



Figure 26: Fissure dans la gorge(1-27)



Figure 27: Usure des pistes(1-28)



Figure 28: Usure non-uniforme(1-29)

II.11 Autres critères

D'autres critères entrent en ligne de compte lors de la conception d'un frein : coût (matière première, facilité de manufacture, etc.), encombrement (on veut le réduire au moins), poids (additionnelle un véhicule est léger, aussi la vitesse maximale est élevée, et de plus énorme la consommation de carburant standard kilomètre est faible).

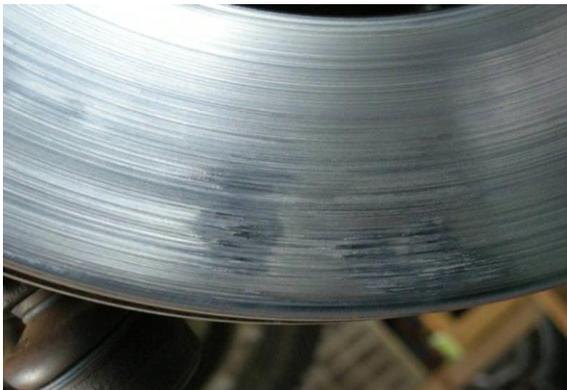


Figure 29: Dépôts de matière sur les pistes de disque (1-30)



Figure 30: Usure excessive des plaquette(1-31)

Eléments de l'alliage	FG 25 alliée	FG 20 HC	FG 20 HC
C%	3.0 à 3.5	3.62 à 3.68	3.7 à 3.9
Si%	1.9 à 2.4	max 2.1	1.8 à 2.2
Mn%	0.6 à 0.9	0.65 à 0.80	0.5 à 0.8
P%	max 0.12	max 0.085	max 0.12
S%	max 0.10	max 0.095	max 0.10
Cr%	0.2 à 0.4	0.18 à 0.3	...0.1
Mo%	0.3 à 0.5	0.3 à 0.45	-
Cu%	0.2 à 0.3	0.3 à 0.45	...0.25
Ni%	0.1 à 0.3	-	-
Ti%	-	0.03 à 0.05	-
Se%	0.82 à 1.01	1.0 à 1.03	1.01 à 1.10
Dureté HB 30,750/5	-	180 à 225	160 à 200
R _m N/mm	250 à 300	.....200	.....150

Table 1 Composition et résistance des 03 sortes de fontes pour la conception des disques [14]

II.11.1 Carbone

Le matériau composite qu'est le carbone a été découvert en 1958, à la suite de la Pyrolyse d'une fibre composite avec une matrice organique. Ce matériau, composé d'un renforcement de carbone et d'une matrice carbone, ont été développés dans un principal temps pour une application dans le domaine aéronautique [13].

Les disques en carbone sont dotés des propriétés suivantes :

Un coefficient de frottement exceptionnel quelle que soit la température.

Ils possèdent une grande stabilité physico-chimique, même à des températures Supérieures à 1000°C.

Ils ne sont pas sensibles aux chocs thermiques (dilatation négligeable) ou à la faiblesse mécanique.

Ils sont invulnérables à l'oxydation jusqu'à 500°C. Une couche anti oxydation permet une sécurité à aussi haute température.

Ils ont une capacité d'absorption thermique double de l'acier

Ils ont des caractéristiques mécaniques spécifiques (comparable, quelle que soit la température, à l'aluminium quand il est froid) qui augmentent avec la température jusqu'à 2000° C.

II.11.2 Conditions d'utilisation

De façon à fonctionner avec le meilleur rendement et durer l'additionnelle longtemps concevable, les températures des disques doivent être correctes et équilibrées. En général, les disques d'un véhicule devraient tous fonctionner à des températures identiques [13]. La température maximale du disque doit être accordée avec la qualité des plaquettes utilisées. Les faces du disque ne doivent pas dépasser les températures maximales recommandées pour chaque sort de plaquette. Avec une qualité CM 83 la température du disque doit être entre 400° C et 600°C.

Chapitre 2
présentation du disque frein

II.Chapitre 02 : présentation du disque frein

II.12Introduction

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques. 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 milieu à un
- autre.
- Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons :
- Par conduction,
- Par rayonnement,
- Par convection

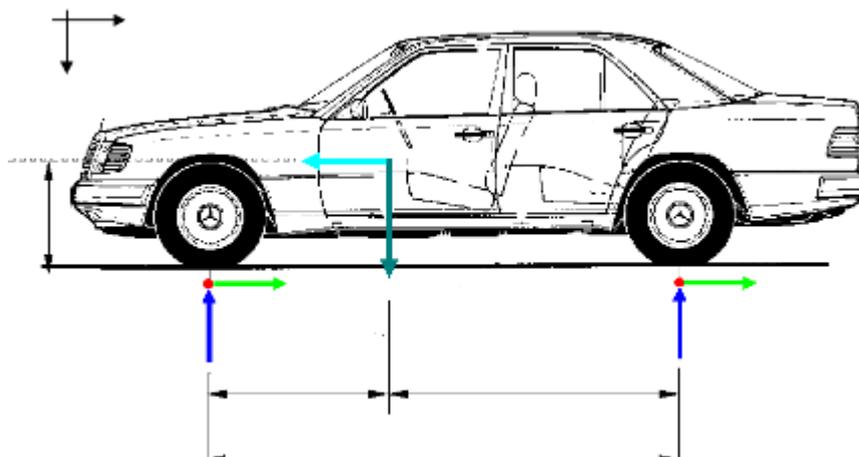


Figure 31 étude thermomécanique des freins disc(2-1)

Le rôle principal d'un système de freinage est de convertir une énergie mécanique en énergie calorifique. Un échauffement global du disque et des plaquettes lors d'une phase de freinage est caractéristique de cette énergie. Ce phénomène est d'autant plus fascinant qu'il peut être simulé à plusieurs titres. Afin d'illustrer ce problème de manière précise, nous nous concentrons dans

cette section sur le calcul du flux initial de chaleur entrant dans le disque au niveau de la zone de contention.

II.12.1 Freinage et transfert de chaleur

Les phénomènes de freinage révèlent que la principale contrainte résulte des fluctuations de température causées par le frottement entre les plaquettes et le disque. Ces changements soudains Les variations de température ne permettraient pas une homogénéisation, ce qui entraîne un problème majeur dans le disque et les plaquettes, et ce problème est également connu sous le nom de Phénomènes de fatigue thermique.

II.12.1.1 Définition:

– **Lachaleur** :est un type d'énergie qui correspond à l'agitation des particules à l'échelle microscopique (énergie cinétique des électrons et des atomes).

– **Lamesuredelatempérature**: permet de mesurer cette agitation. Une corrélation existe entre la quantité de chaleur et la température .La thermodynamique définit les concepts de quantité de chaleur et de température dans ses principes fondamentaux :

Le premier principe :

est que l'énergie ne peut ni être produite, ni détruite, elle ne peut que se métamorphoser d'une forme à une autre.

Le second principe :

est que la chaleur se propage naturellement du système le plus chaud vers le système le plus froid (tendance à l'uniformisation des températures).

II.12.2 Chambre de température

Le champ de température d'un disque de frein d'automobile varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment la conduite, les conditions de la route, le type de véhicule et le système de freinage utilisé. Cependant, en général, les disques de frein peuvent atteindre des températures assez élevées pendant un freinage intense.

Pendant un freinage normal, la température des disques de frein peut varier entre 200 et 400 degrés Celsius (392 à 752 degrés Fahrenheit). Lors de freinages plus agressifs ou prolongés, cette température peut dépasser les 600 degrés Celsius (1112 degrés Fahrenheit) voire plus dans certains cas extrêmes.

Les fabricants de disques de frein conçoivent leurs produits pour résister à ces températures élevées sans perdre leurs propriétés mécaniques essentielles. Des matériaux comme la fonte grise, la fonte ductile, ou même des composites renforcés de fibres peuvent être utilisés pour fabriquer des disques de frein

capables de supporter ces températures tout en maintenant leur efficacité de freinage.

II.12.3 Gradient de température:

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température

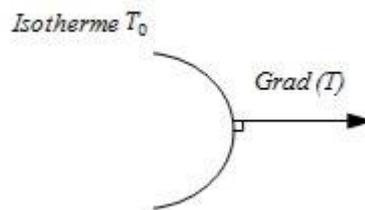


Figure 32 Gradient de température(2-2)

$$\overrightarrow{\text{grad}(T)} = (\vec{n}) \frac{\partial T}{\partial n}$$

Avec \vec{n} vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial T}{\partial n}$ dérivée de la température le long de la normale

II.12.4 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur, elle est exprimée en [16]: Où S est l'aire de la surface (m²). On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps, elle est exprimée en Wm⁻² :

$$\Phi = S \frac{dQ}{dt}$$

Avec S est l'aire de la surface (m²).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps, elle est exprimée en W : $\phi = \frac{dQ}{dt}$

II.12.5 Modes de transfert de chaleur

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, électronique, etc...) ou domestique (chauffage de l'habitat) [17].

Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid. Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection.

II.12.6 La conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence de différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier (Wm^{-2})

$$: \vec{\varphi} = - \overline{k \text{ grad } T}$$

Qui relie la densité de puissance (unité $W m^{-2}$) et le gradient local de température. k est la conductivité thermique du matériau considéré (unité $W m^{-1} K^{-1}$).

Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) propose en **1822** la loi de la conduction connue maintenant sous le nom de loi de Fourier. Cette relation indique que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de la température et se fait dans la direction des températures décroissantes. Dans le cas d'une conduction unidirectionnelle suivant l'axe des x , la loi de Fourier s'écrit:

$$Q'' = - K \frac{dT}{dx} \text{ (II.3)}$$

Q'' : densité de flux de chaleur dans la direction x W/m^2

K : conductivités thermique du milieu $W / (m \cdot ^\circ C)$ ou $W / (m \cdot ^\circ K)$

T : température (K) ou ($^\circ C$)

x : position axiale (m)

Le signe moins indique que le transfert de chaleur se fait dans la direction des températures décroissantes.

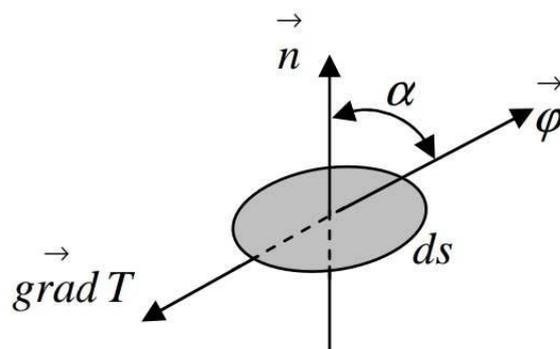


Figure 33 lois de fourier(2-3)

II.12.7 Résistance thermique

On considère deux surfaces isothermes S1 et S2 de températures et ces deux surfaces sont correspondantes c'est à dire que toute ligne de flux quittant la surface S1 atteint la surface S2. Pour un milieu conducteur en régime permanent sans source interne, le bilan thermique s'écrit : $d(JQ)=0$

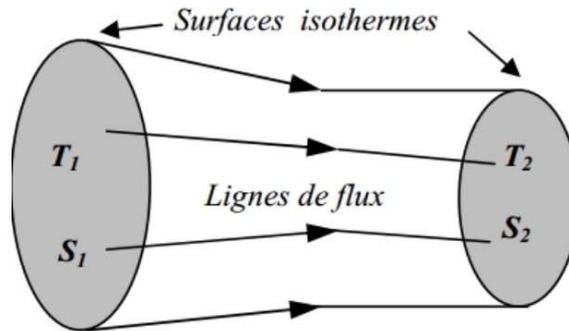


Figure 34 Résistance thermique(2-4)

Résistance thermique :

Appliquons, sur le volume fermé délimité par les deux surfaces isothermes S1 et S2 et la surface latérale constituée de toutes les lignes de flux s'appuyant sur le contour fermé délimitant les deux surfaces isothermes, le théorème d'Ostrogradsky [18]

$$\iiint \text{div} v (JQ) = 0 = \iint \text{div}(J_1 Q) ds_1 + \iint \text{div}_s (J_2 Q) ds_2 = -\Phi_1 + \Phi_2 \quad (\mathbf{Eq N^{\circ}01})$$

Entre surfaces isothermes correspondantes le flux de chaleur est conservé. Pour une surface isotherme quelconque S du tube de courant

$$\gamma \iint -s (\overline{\text{grad} T}) \cdot \mathbf{n} ds = \Phi = \text{Cst} \quad (\mathbf{Eq N^{\circ}02})$$

Le calcul de la circulation de $\overline{\text{grad} T}$ suivant une ligne de flux quelconque joignant les surfaces isothermes S1 et S2 conduit à :

$$\int_{\text{flux}} -i \overline{\text{grad} T} \cdot d\mathbf{l} = T_1 - T_2 \quad (\mathbf{Eq N^{\circ}03})$$

La multiplication de par un coefficient quelconque entraîne la multiplication par le même coefficient de $T_1 + T_2$.

On obtient donc la relation :

$$T_1 - T_2 = R\Phi \quad (\mathbf{Eq N^{\circ}04})$$

R est appelée résistance thermique, c'est l'analogie thermique de la résistance électrique. Elle est inversement proportionnelle à la conductivité du milieu et augmente avec la longueur des lignes de flux. Résistance thermique relative à un coefficient d'échange h se calcule comme suit :

$$\varphi = \Phi S = h (T_p - T_{\text{car}}) \Rightarrow R = 1/hS \quad (\mathbf{Eq N^{\circ}05})$$

II.13LA Convection

La convection est un transfert de chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert ne concerne donc que les fluides ou les échanges entre un solide et un fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\varphi = hS (T_p - T_\infty) \text{ (Eq N°06)}$$

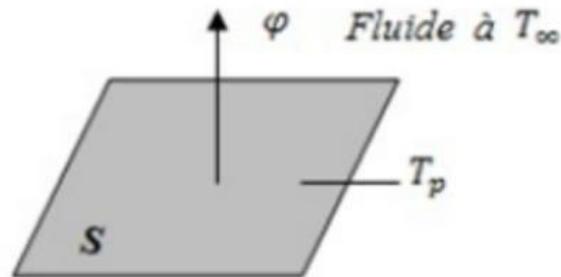


Figure 35 Définition d'un élément de surface d'échange(2-5)

Avec : φ Flux de chaleur transmis par convection (W)

h Coefficient de transfert de chaleur par convection ($Wm^{-2}C^{-1}$)

T_p Température de la surface ($^{\circ}C$)

T_∞ Température de milieu environnant la surface ($^{\circ}C$)

S l'aire de la surface du contact solide fluide (m^2)

I.1. Nombre de Nusselt

Ce nombre caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi, il est défini comme Suit :

$$Nu = \frac{h d}{k}$$

II.13.1 Le nombre de Reynolds

Ce nombre joue un rôle fondamental dans la caractérisation de l'écoulement, il est défini par l'expression suivante :

$$Re = \frac{u m d}{\nu}$$

Avec ν : la viscosité cinématique de fluide .

II.13.2 Le nombre de Prandtl

Ce nombre est entièrement caractéristique du fluide considéré(CarriónSolla& Vela Villares, 2008). L'inverse du

nombre de Prandtl est appelé par les « thermiciens » français : le nombre de Stanton (S).

Dans le cas des gaz, Pr est sensiblement constant avec la pression et la température et ne varie qu'avec les changements thermiques de $C_p(T)$.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

II.13.3 Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas, nous avons la relation:

$$\varphi = \sigma(T_p^4 - T_\infty^4)$$

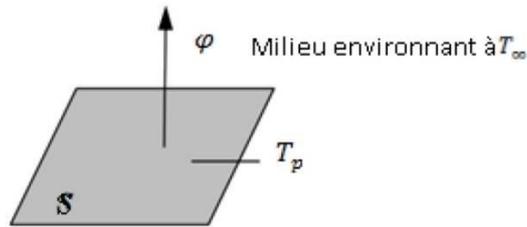


Figure 36 Elément en rayonnement.(2-6)

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

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

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface (K).

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)

S : Aire de la surface (m^2).

Un rayonnement incident φ_i , qui arrive sur un corps opaque est en partie réfléchi (φ_r) et le reste est absorbé sous forme de chaleur au voisinage du lieu de l'impact. Comme en optique, la réflexion peut être diffuse, spéculaire ou quelconque. Lorsqu'on étudie l'équilibre thermique d'un système, tout corps doit être considéré de deux points de vue :

- Comme émetteur, car il envoie toujours un rayonnement lié à sa température (sauf s'il est parfaitement transparent).

- Comme récepteur, car il reçoit des rayonnements émis ou réfléchis et diffusés par les corps qui l'entourent.

Un corps absorbe une partie du rayonnement et en réfléchit le reste, donc le flux de rayonnement provenant d'un corps est très souvent la somme du flux émis et du flux réfléchi. Montre les rayonnements électromagnétiques ordonnés selon leurs longueurs d'onde et selon leurs fréquences [21].

II.14 L'étude mécanique d'un frein à disque d'automobile

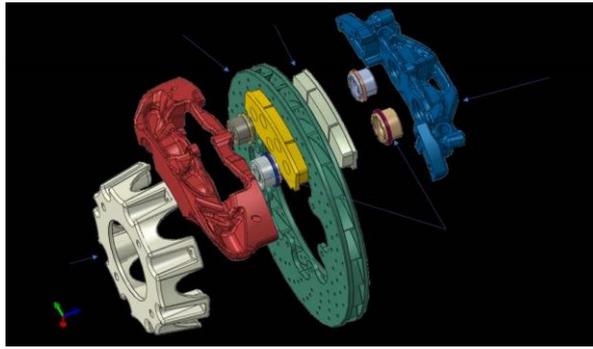


Figure 37 frein à disque(2-7)

Implique l'analyse de plusieurs aspects, notamment la conception du système de freinage, les matériaux utilisés, la performance, la dissipation de la chaleur, et la durabilité. Voici quelques points clés à considérer dans une telle étude :

II.14.1 Conception du système de freinage :

Il faut examiner la disposition et la configuration des composants du système de freinage, y compris les étriers de frein, les plaquettes, les disques, les conduites hydrauliques, et le système de commande.

II.14.2 Matériaux et propriétés :

Les matériaux utilisés pour les disques de frein doivent être capables de résister à de fortes contraintes thermiques et mécaniques. Les disques de frein sont souvent fabriqués en fonte ou en composite céramique-carbone pour offrir une performance optimale.

II.14.3 Performance :

L'efficacité du freinage est un aspect crucial. Les ingénieurs doivent évaluer la capacité du système de freinage à ralentir efficacement le véhicule dans différentes conditions, telles que les arrêts d'urgence ou les descentes prolongées.

II.14.4 Dissipation de la chaleur:

Les disques de frein absorbent une quantité importante de chaleur lors du freinage. Il est essentiel de concevoir des disques capables de dissiper efficacement cette chaleur pour éviter la surchauffe, la déformation ou la perte de performance.

II.14.5 Durabilité et résistance à l'usure :

Les freins à disque doivent être conçus pour résister à l'usure causée par le frottement répété des plaquettes sur les disques. Des tests de durabilité sont souvent effectués pour évaluer la longévité du système de freinage dans des conditions d'utilisation réalistes.

II.14.6 Analyse des contraintes :

Les ingénieurs effectuent des analyses de contraintes pour évaluer les contraintes mécaniques subies par les composants du système de freinage sous différentes charges de freinage.

II.14.7 Modélisation et simulation :

Les outils de modélisation et de simulation sont largement utilisés pour prédire le comportement du système de freinage dans différentes situations et pour optimiser sa conception avant la fabrication.

En combinant ces différentes considérations, les ingénieurs peuvent concevoir des systèmes de freinage à disque automobiles qui offrent à la fois des performances élevées, une durabilité et une sécurité optimales.

II.15 Propriétés physiques et mécaniques des matériaux des disques de frein

II.15.1 Contraintes mécanique

Le comportement mécanique peut être classé suivant :

- Les sollicitations (pression et couple), les conditions aux limites (serrage du disque sur le moyeu, contact avec la jante, présence de l'étrier) et la géométrie du disque.
- Le contact entre le disque et les plaquettes.
- L'usure.

II.15.2 Chargement mécanique

Le chargement mécanique est exprimé par la pression des plaquettes sur le disque et le couple issu du freinage. Les efforts d'inertie sont négligeables. Ce chargement engendre des contraintes mécaniques beaucoup plus petites que les contraintes thermiques. En effet, la pression hydraulique est de quelques dizaines de bars; les contraintes de compression sur les pistes de frottement sont de l'ordre de quelques méga pascals. Sur un disque ventilé, ces efforts de pression peuvent cependant engendrer des concentrations de contraintes en pied d'ailettes (quelques dizaines de méga pascals) qui en s'ajoutant aux contraintes thermiques deviennent dommageables. Quand la température est élevée, les limites de fatigue sont faibles et quelques dizaines de méga pascals peuvent faire la différence. Le chargement mécanique joue aussi un rôle dans les déformations globales du disque, en même temps que les conditions aux limites et la géométrie du disque. En effet, étant donné la dissymétrie du disque due au raccordement des pistes au bol et l'écart de températures entre les pistes et le bol, le disque va naturellement prendre la forme d'un cône (mise en cône du disque ou voile du moyeu).

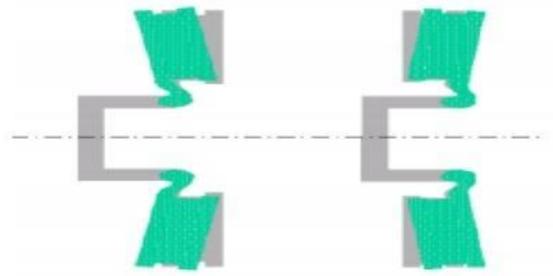


Figure 38 Mise en cône d'un disque de frein.(2-8)

De plus, la piste qui est raccordée au bol refroidit plus vite que l'autre piste car la chaleur peut se diffuser dans le bol. La dissymétrie de dilatations favorise davantage la mise en cône. Cette dernière est aussi facilitée par la flexibilité de la gorge se trouvant dans la zone de raccordement piste-bol. Cette gorge, appelée, gorge calorifique, a pour but de freiner le flux de chaleur vers le portemoyeu

Ce mouvement "naturel" du disque est cependant retenu par la présence de l'étrier qui tend à garder les pistes du disque parallèles à leur position de départ, du moins, quand elles passent sous les plaquettes. L'étrier et les plaquettes peuvent toutefois pivoter légèrement et permettre une petite mise en cône du disque. La zone de la gorge du bol est donc très sollicitée mécaniquement et thermiquement. Il s'agit donc d'une zone extrêmement sensible : plus l'épaisseur de cette zone est petite, plus le disque est flexible et plus la température du moyeu est faible. Par contre, elle perd en rigidité et les gradients thermiques sont plus importants.

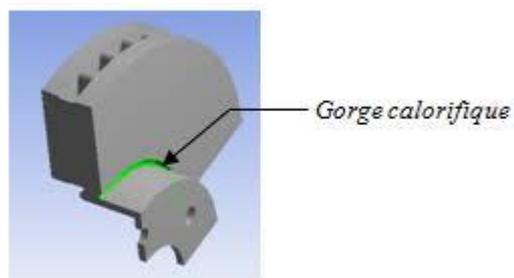


Figure 39: Gorge calorifique(2-9)

Zone de frottement

La zone de frottement est à l'origine des avaries du disque. En effet, les instabilités du coefficient de frottement et de la pression de contact engendrent des gondolements du disque qui donnent leur tour naissance à des gradients thermiques élevés et aux problèmes qui en découlent. Notons que les instabilités du contact proviennent :

- Des rugosités des surfaces en contact.
- Des variations initiales d'épaisseur du disque dues à un mauvais rodage.

- Des pivotements de la plaquette.
- Des dilatations non uniformes du disque et de la plaquette (elles-mêmes dues aux non uniformités de contact).
- Des variations du coefficient de frottement avec la vitesse de glissement, la température et la pression de contact.
- Des irrégularités d'usure dues à toutes les instabilités citées précédemment et aux éventuelles irrégularités de dureté du matériau lorsqu'il subit des transformations locales de phase (martensite).
- Des déformations du disque dues au flambement thermique... Les variations dans la zone contact sont difficiles à prédire quantitativement vu la multitude des phénomènes qui en découlent. On ne doit pas sous-estimer le rôle que joue l'étrier dans la nature du contact disque/garniture

II.15.3 Phénomène d'usure

Concernant l'usure du système de freinage, ce sont surtout les plaquettes qui s'usent le plus. Aux pressions élevées de contact, elles peuvent laisser des dépôts sur le disque, donnant lieu à un "troisième corps", qui modifie les conditions de contact et augmente le bruit du frein (broutement). Il est pratiquement impossible d'avoir en même temps une bonne résistance à l'usure, une insensibilité au fading thermique et le confort de freinage. L'usure est un phénomène complexe à part entière qui sera traité d'une manière plus approfondie dans ce travail.

II.16 Le frottement : Aspect tribologiques

La tribologie regroupe la lubrification, le frottement et l'usure. C'est une science pluridisciplinaire qui fait appel à la Mécanique et à la Physique des volumes et des surfaces .

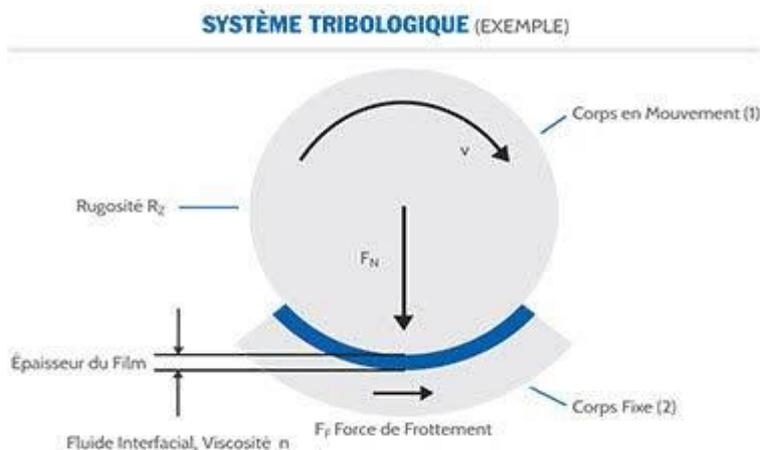


Figure 40 tribologie(2-10)

II.16.1 La mécanique en tribologie

Le rôle de la mécanique en tribologie varie selon le domaine étudié. On peut isoler :

- la lubrification hydrodynamique,
- la mécanique du frottement ou frottement sec et de l'usure.

La lubrification hydrodynamique, ou lubrification en film continu, est un domaine privilégié de la mécanique des fluides où une dimension de l'espace, l'épaisseur du film, est petite devant les deux autres.

Contrairement à la lubrification hydrodynamique, la mécanique du frottement et de l'usure ne dispose pas d'un formalisme complet. Elle s'appuie sur la mécanique des contacts ou théorie des contraintes dans les massifs en contact.

II.17 REFROIDISSEMENT

Après avoir exposé les problèmes soulevés par le système de freinage, puis une description du principe de fonctionnement, le présent travail propose la conception d'un disque de freins, suivie de quelques essais comparatifs, pour enfin conclure sur la validation et l'intérêt d'un tel dispositif.

Un disque de frein est intimement lié à l'augmentation de la température au cours de freinage.

Lorsqu'on examine les possibilités de transférer de la chaleur d'un milieu (chaud) à un autre (froid), on constate qu'il existe trois grandes parties de transfert.

Chacune de ces parties se rattache à un mode de transfert de chaleur et chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé



Figure 41 Refroidissement(2-11)

II.18 Équation de chaleur :

$$\Phi = \lambda * \Delta T \quad (1)$$

l'équation de la chaleur s'écrit

$$\rho C_p \Delta T \Delta t = di(\lambda . grad T) + q \quad (2)$$

Avec : Φ : flux thermique (W/m).

C_p : est la capacité thermique massique à pression constante (J/kg.K).

ρ : est la densité du matériau considéré (kg/m³).

λ : est la conductivité thermique du matériau (W/mK).

q : est le rapport thermique interne W/m³

II.19 Dilatation thermique :

La dilatation thermique est utilisée pour calculer la déformation thermique d'une éprouvette de longueur L selon la formule suivante :

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (3)$$

Cela implique que $(\Delta L_{\text{ther}} / L) = \epsilon_{\text{thermique}} = \alpha \cdot \Delta T = \alpha \cdot (T_f - T_i)$ (4)

ΔL (mm) : Expansion due à un changement de température.

α (1/K) : Coefficient de dilatation thermique.

L (mm) : Longueur caractéristique.

ΔT (K ou °C) : Différence de température

I.2. La déformation totale est donnée par

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{élastique}} + \epsilon_{\text{thermique}} \quad (5)$$

$$\Delta L_{\text{total}} = \Delta L_{\text{mec}} + \Delta L_{\text{ther}} \quad (6)$$

I.3. Formulation par éléments finis de l'équation de la chaleur :

$$[K_{\text{ther}}] \{T\} = \{Q\} \quad (7)$$

$[K_{\text{ther}}]$: La matrice de rigidité dépend de la géométrie et des propriétés thermiques du matériau.

$\{T\}$: Le vecteur de la température.

$\{Q\}$: Le vecteur du flux de chaleur

Chapitre 3
modélisation et simulation de disque
frein

III. Chapitre 3 : modélisation et simulation de disque frein

III.1 INTRODUCTION :

La fonction principale du système de freinage est de convertir l'énergie mécanique en énergie thermique.

Cette énergie se caractérise par l'échauffement des disques et plaquettes de frein pendant la phase de freinage.

En modélisant le comportement thermique du revêtement du disque, il est possible d'analyser l'évolution et la répartition de la température dans la zone de contact. Les résultats du modèle développé ont permis d'optimiser le système. La modélisation des écoulements et des échanges thermiques permet de comprendre et de quantifier les phénomènes physiques sans utiliser des essais expérimentaux.

III.2.GEOMETREI et dimension :

III.2.1 géométrie :

III.2.1.1 géométrie de disque :

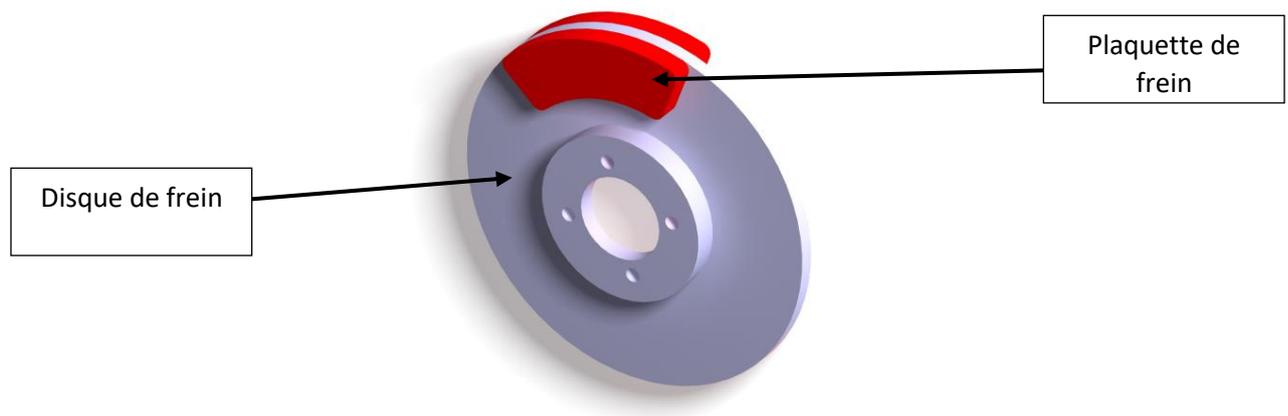
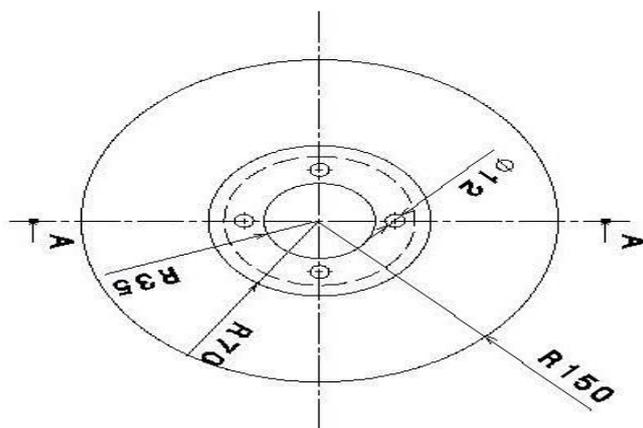
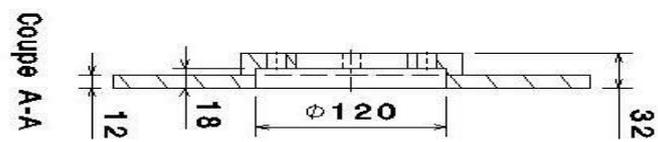
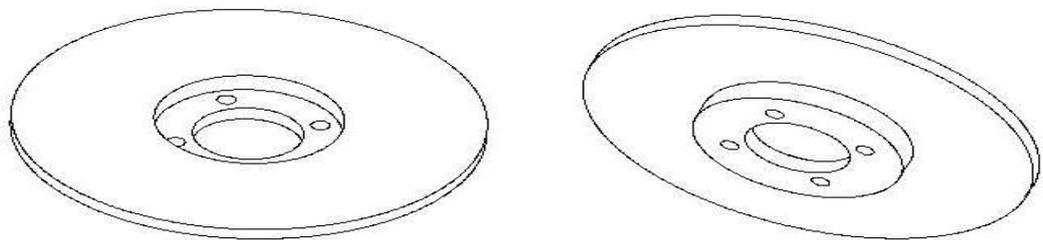


Figure 42 géométrie de disque et plaquette



III.2.2 Démontions :

III.2.2.1 III.2.2.1.démontions du disque :

Figure 43 dimension du disque

III.2.2.2 dimension du plaquette :

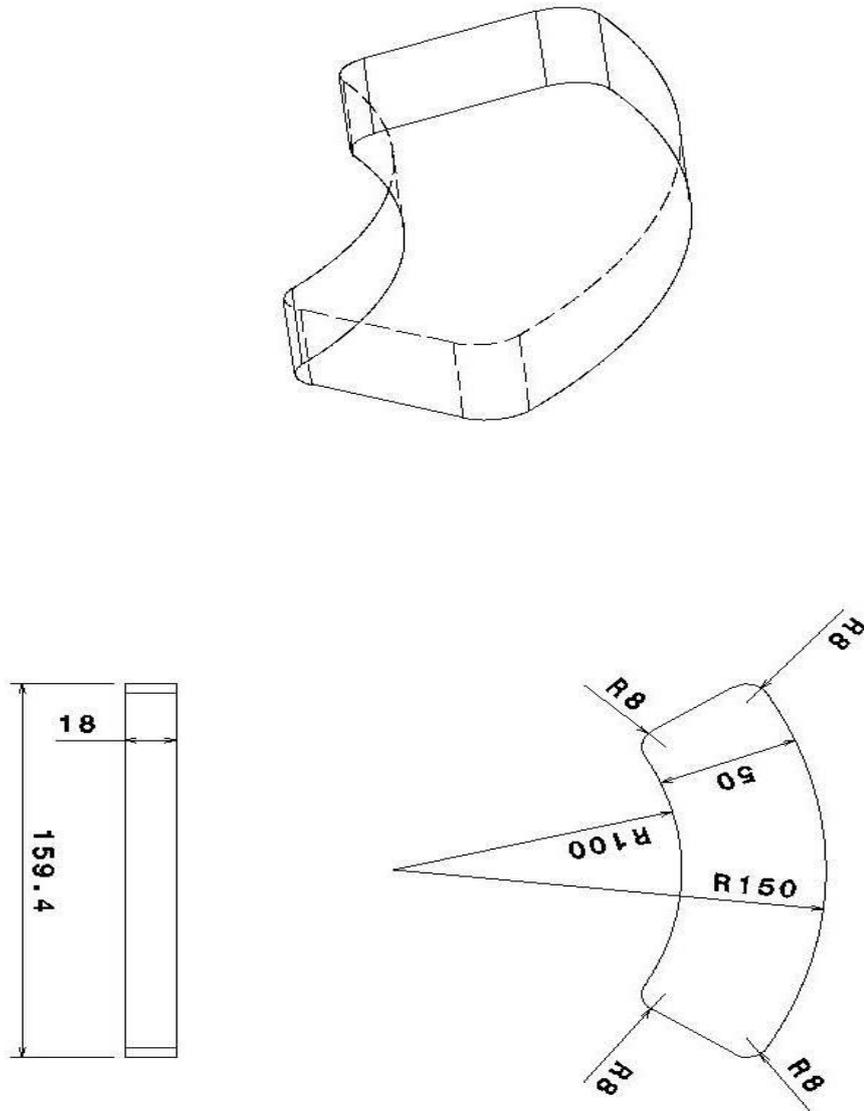


Figure 44 dimension de la plaquette

III.2.3 matériaux et propriétés du disque –plaquette :

III.2.3.1 *Disque de frein* :

III.2.3.1.1 *Acier* :

Les aciers sont des aciers inoxydables austénitiques tels qu'un X2 Cr Ni Mo 17-12 (ancienne désignation : Z2 CND 17-12 soit 0,02% de carbone 17% de chrome Et 12% de nickel ainsi que des traces de molybdène).

Les propriétés mécaniques de ces aciers Sont une grande ductilité ainsi qu'une grande résilience, en particulier à haute température.

pièce	Module de Young (MPA)	Coefficient Du poisson	Limite d'élasticité (MPA)	Densité (kg/m3)	Conductivité thermique (W/MK)	Coefficient de dilatation thermique
Disque (acier)	206000	0,29	966	7850	42,6	$1,2 \times 10^{-5}$

Table 2 : Tableau des propriétés mécaniques de ce acier

III.2.3.1.2 *Fonte grise* :

La fonte grise fait partie des types de fontes les plus anciens et les plus répandus, qu'il faut différencier de la fonte blanche ou de la fonte ductile, par exemple. On l'utilise très souvent parce qu'elle se présente comme un matériau facile à utiliser, sans oublier qu'il s'agit aussi d'une matière première moins onéreuse que les autres alliages de fonte

pièce	Module de Young (MPA)	Coefficient du poisson	Limite d'élasticité (MPA)	Densité (kg/m3)	Conductivité thermique (W/MK)	Coefficient de dilatation thermique
Disque (fonte grise)	135000	0,26	260	7250	45 à 300°C	13,0

Table 3:Tableau des propriétés mécaniques de Fonte grise

III.2.3.2 Plaquette de frein :

III.2.3.2.1 Ferodo :

L'équipement de transmission FERODO est original pour tous les constructeurs automobiles précédents.

Les plaquettes brésiliennes Ferodo assurent un freinage fiable et sûr à tout moment et assurent l'évacuation de l'eau.

Je vous ai pensé Plaquettes de frein Ferodo Un contrôle maximal avec une distance d'arrêt plus courte que celle des principaux concurrents. Ils ont des niveaux sonores assez faibles et d'excellentes performances grâce au soulèvement facile de la gomme sur le côté du piston.

Doté de coussinets utilisant Ferodo Eco-Friction®. Sans compromettre la sécurité ou les performances, En plus de l'Eco-Friction® dans la protection de l'environnement, il influence les tendances technologiques marxistes et répond aux dernières exigences de la construction automobile.

pièce	Module de Young (MPA)	Coefficient du poisson	Limite d'élasticité (MPA)	Densité (kg/m3)	Conductivité thermique (W/MK)	Coefficient de dilatation thermique
Plaquette (Ferodo)	35	0,2	2,5	2320	0,57	2*10 ⁻⁵

Table 4 : Tableau des propriétés mécaniques de Ferodo

III.2.3.3 .Les matériaux dans chaque cas (plaquette/disque) :

Cas	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Plaquette A	ferodo	ferodo	ferodo	ferodo
Plaquette B	ferodo	ferodo	ferodo	ferodo
Disque frein	acier standard	acier standard	acier standard	Fonte grise

Table 5 : Tableau des matériaux dans chaque cas

III.2.4 .Maillage :

La création de la géométrie ainsi que le maillage se font sous le logiciel "ANSYS". Ce dernier propose des solutions étendues pour la plupart des géométries compliqué. La qualité du maillage joue un rôle important dans la précision et la stabilité des données numériques calcul.

Ainsi, des attributs tels que la distribution des nœuds, la douceur de la nature et l'obliquité du les éléments sont très importants. Pour cette étude, l'élément tétra hydrique quadratique convenait avec une qualité de maille "Fine".

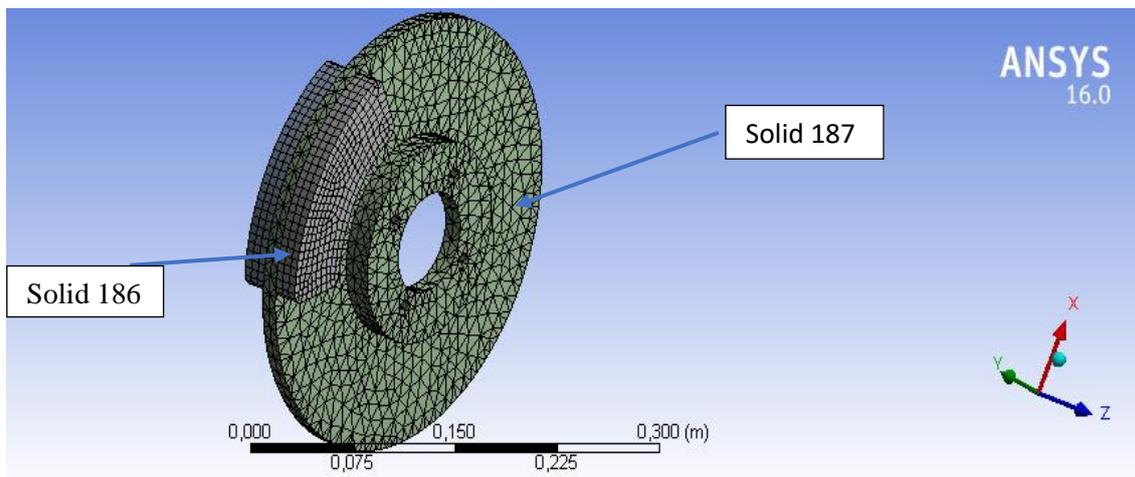


Figure 45 maillage FINE de disque / plaque dans ANSYS 16.0 WORKBENCH (3-1)

Nœud	8303
Elément	20938

Table 6 : Tableau de éléments et Nœud

III.2.4.1 SOLID186 :

SOLID186 est un élément solide 3D à 20 nœuds d'ordre supérieur qui présente un comportement de déplacement quadratique. L'élément est défini par 20 nœuds ayant trois degrés de liberté par nœud : traductions dans les directions nodales x, y et z. L'élément prend en charge la plasticité, l'hyperélasticité, le fluage, le raidissement sous contrainte, une grande déflexion et de grandes capacités de déformation. Il possède également une capacité de formulation

mixte pour simuler les déformations de matériaux élastoplastiques presque incompressibles et de matériaux hyperélastiques totalement incompressibles. Les températures peuvent être entrées sous forme de charges corporelles d'élément au niveau des nœuds. La température du nœud I T(I) est par défaut TUNIF. Si toutes les autres températures ne sont pas spécifiées, elles sont par défaut T(I). Si toutes les températures des nœuds de coin sont spécifiées, la température de chaque nœud central est par défaut la température moyenne de ses nœuds de coin adjacents. Pour tout autre modèle de température d'entrée, les températures non spécifiées sont par défaut TUNIF.

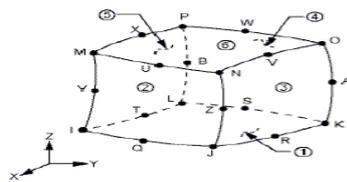


Figure 46 de Solid 186 (4-1)

III.2.4.2 **SOLID187 :**

L'élément SOLID187 est un élément 3D d'ordre supérieur à 10 nœuds. SOLID187 a un comportement de déplacement quadratique et est bien adapté à la modélisation de maillages irréguliers (tels que ceux produits à partir de divers systèmes CAD/CAM).

L'élément est défini par 10 nœuds ayant trois degrés de liberté à chaque nœud : traductions dans les directions nodales x, y et z. L'élément présente des capacités de plasticité, d'hyperélasticité, de fluage, de raidissement sous contrainte, de déflexion importante et de déformation importante. Il possède également une capacité de formulation mixte pour simuler les déformations de matériaux élastoplastiques presque incompressibles et de matériaux hyperélastiques totalement incompressibles. Voir SOLID187 dans la référence théorique APDL mécanique pour plus de détails sur cet élément.

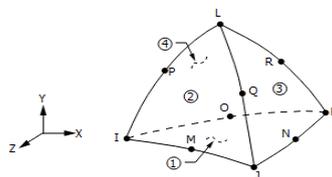


Figure 47 de Solid 187 (4-2)

III.2.5 **Simulation de disque /plaquette dans ANSYS 16.0 WORKBENCH :**

Dans cette partie, un code éléments finis ANSYS 16.0 (3D) est utilisé pour simuler le comportement d'un mécanisme de contact à friction à deux corps

(plaquette et disque) lors d'un arrêt de frein. Le coefficient de frottement est égal à 0.5, au niveau de la zone de contact.

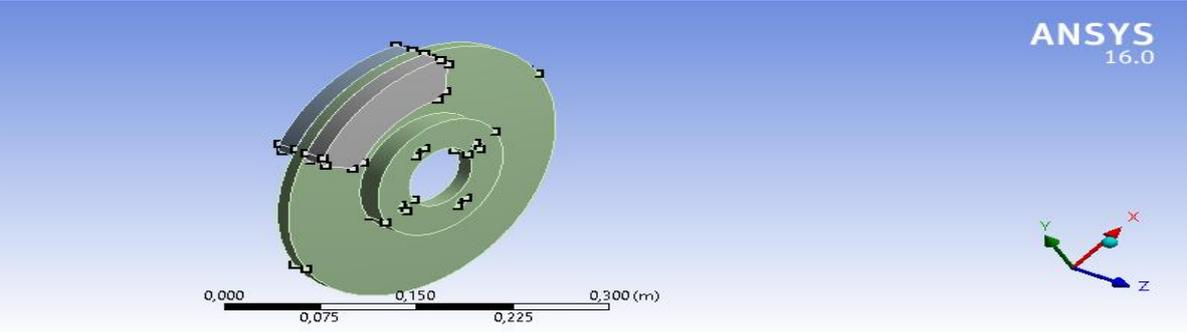


Figure 48 Simulation de disque /plaquette dans ANSYS 16.0 WORKBENCH(3-2)

Matériel	Modèle Disque frein et plaquette	
Démentions	Longueur X	300 mm
	Longueur Y	300 mm
	Longueur Z	50 mm
Propriétés	Volume	1,1539e ⁻⁰⁰³
	Mass	7,6064 kg

Table 7 :Tableau de démentions et Propriétés de modelé disque frein et plaquette

T (° C) \ cas	CAS 1	CAS 2	CAS 3	CAS 4
Température plaquette A	600	400	200	600
Température plaquette B	600	400	200	600
Température face C	22	22	22	22

Table 8 :Tableau des conditions limite thermique

III.2.6 Conditions limites thermiques :

III.2.6.1 Cas1 :

Dans le cas (1) la matière de les plaques ferodo et la matière de disque de frein acier standard et la température qui est appliqué sur les plaques est de 600°C.

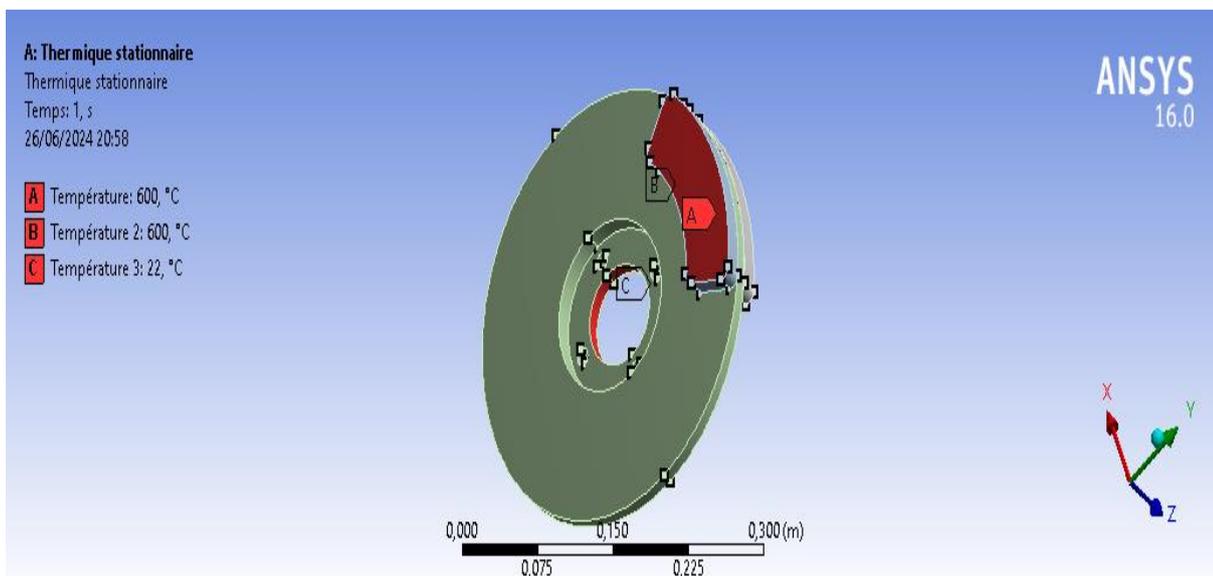


Figure 49 Condition limite thermique de cas 1(3-3)

III.2.6.2 Cas 2 :

Dans le cas (2) la matière de les plaques ferodo et la matière de disque de frein acier standard et la température qui est appliqué sur les plaques est de 400°C.

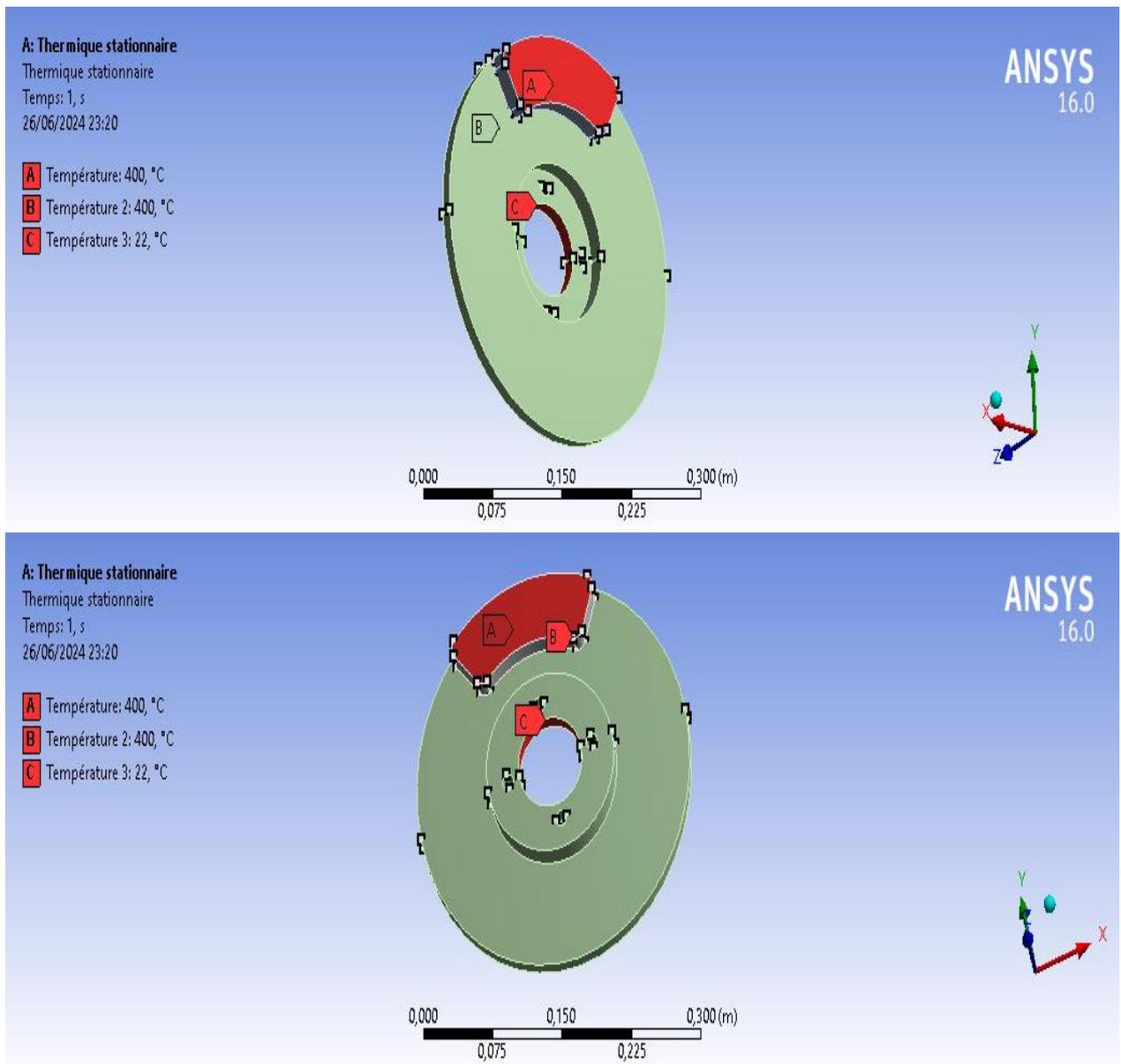


Figure 50 Condition limite thermique de cas 2(3-4)

III.2.6.3 Cas 3 :

Dans le cas (3) la matière de les plaques ferodo et la matière de disque de frein acier standard et la température qui est appliqué sur les plaques est de 200°C.

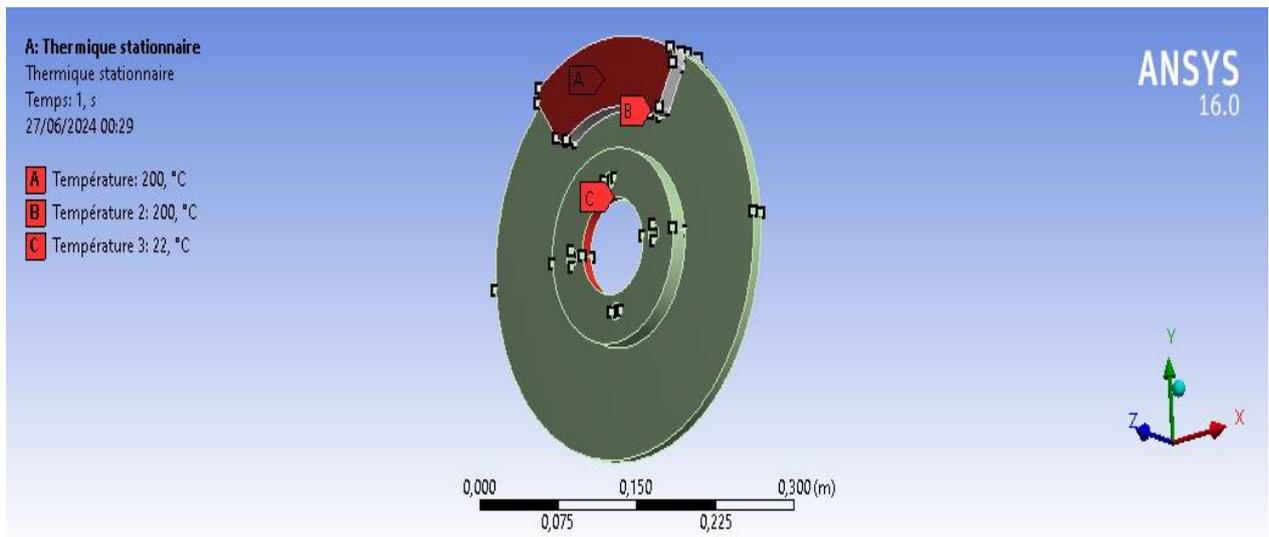
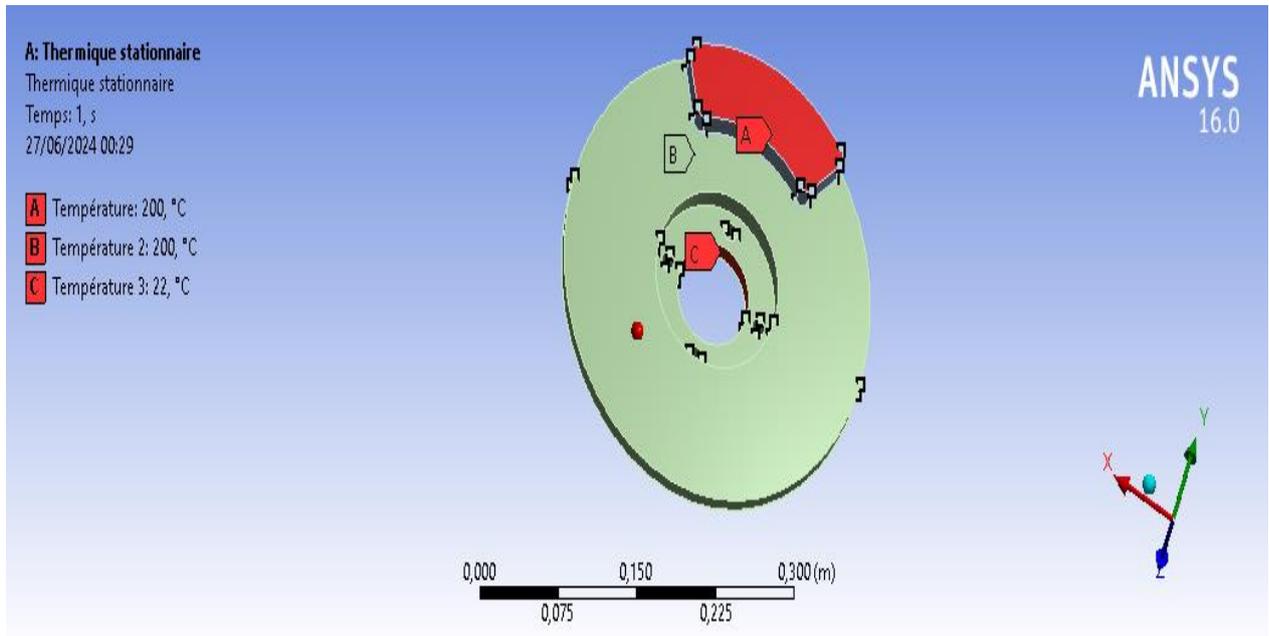


Figure 51 : Condition limite thermique de cas 3(3-5)

III.2.6.4 Cas 4 :

Dans le cas (4) la matière de les plaques ferodo et la matière de disque de frein fonte gris et la température qui est appliqué sur les plaques est de 600°C.

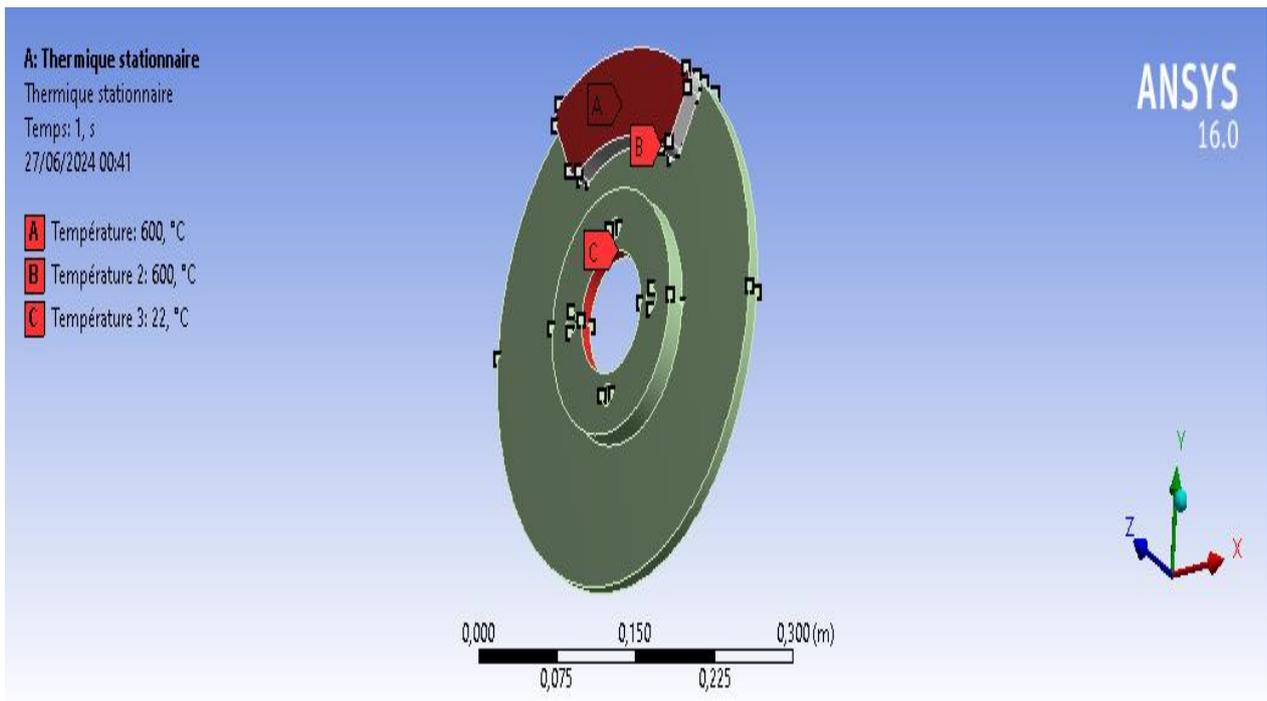
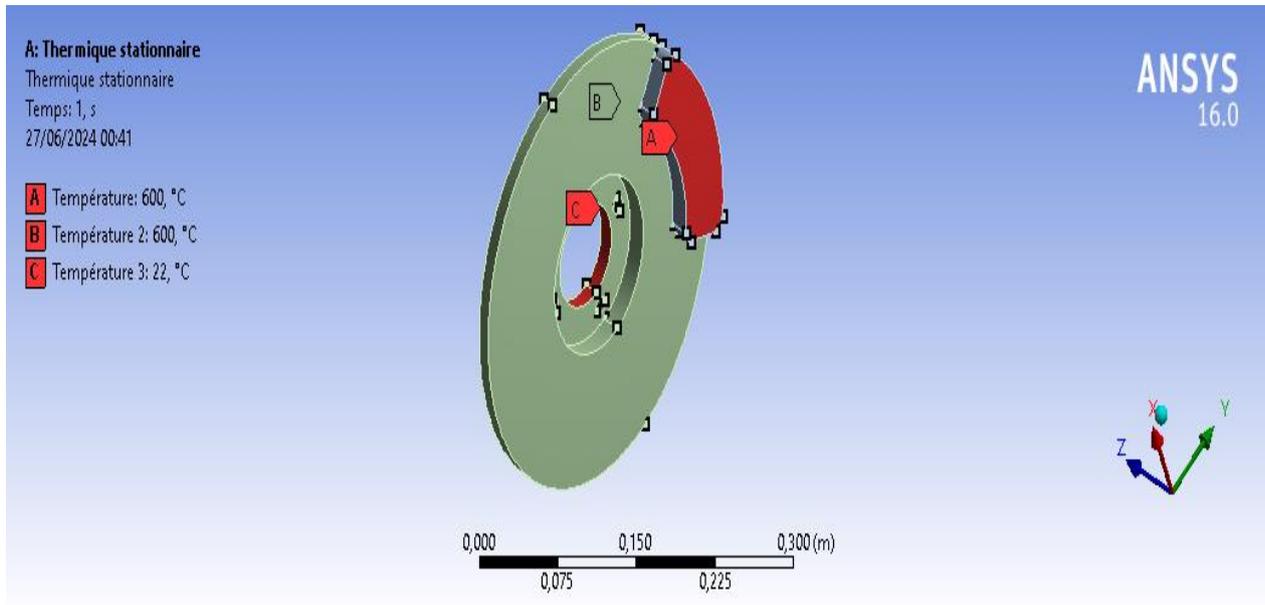


Figure 52 Condition limite thermique de cas 4(3-6)

III.2.7 Conditions limites mécanique :

cas Pression (bar)	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Pression plaquette A	80 bar	40 bar	20 bar	80 bar

Table 9 :Tableau des condition limite thermomécanique

III.2.7.1 Support fixe :

En Cas 1 – cas 2 – cas 3 – cas 4 le support est fixé dans le trou de l'arbre

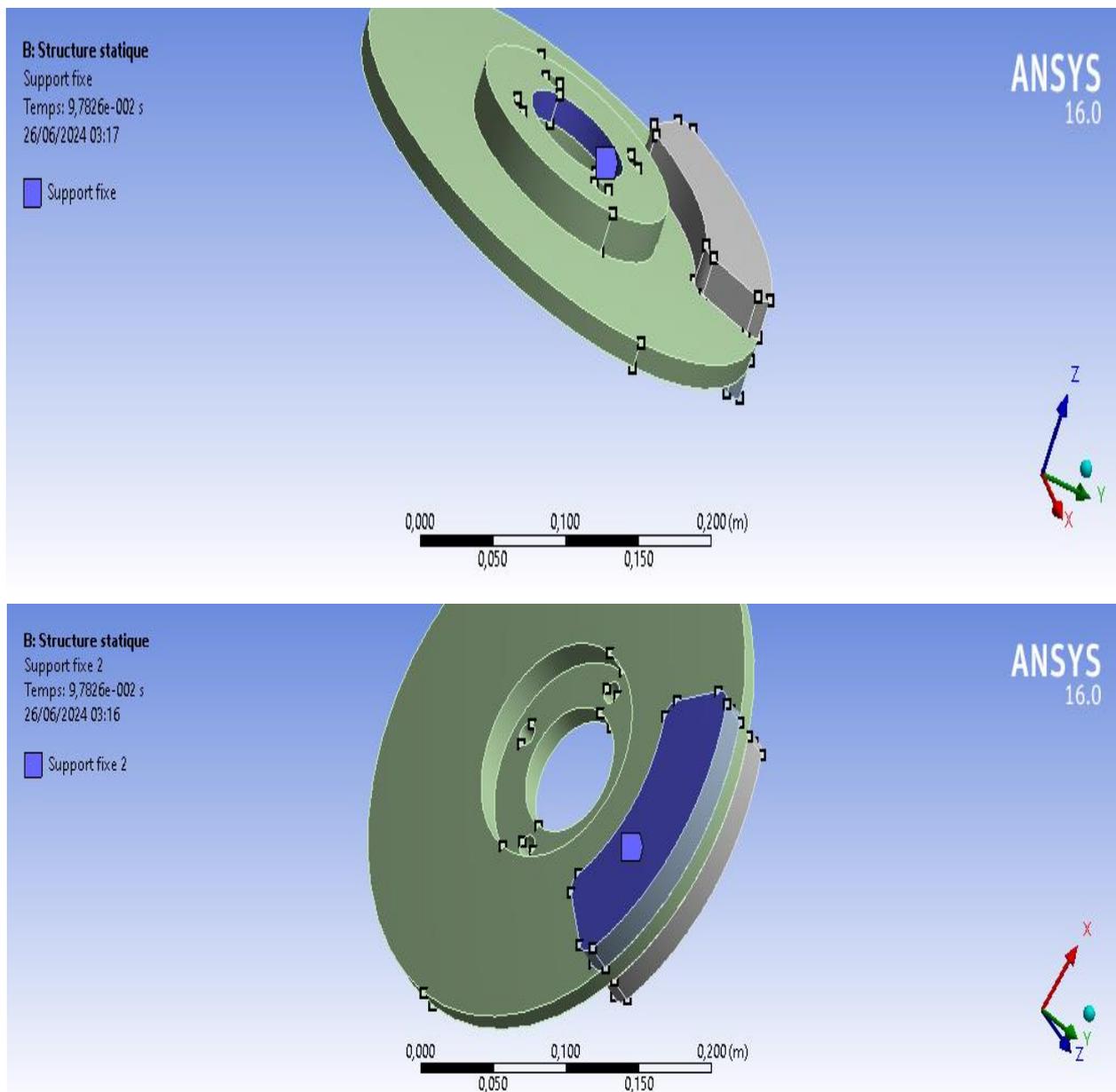


Figure 53 : support fixe applique à les cas 1-cas 2-cas 3-cas 4(3-7)

III.2.7.2 Pression dans les 4 cas :

Cas 1 :

Dans le cas (1) la matière de les plaques ferodo et la matière de disque de frein acier standard et la pression qui est appliqué sur les plaques est de 80 bar

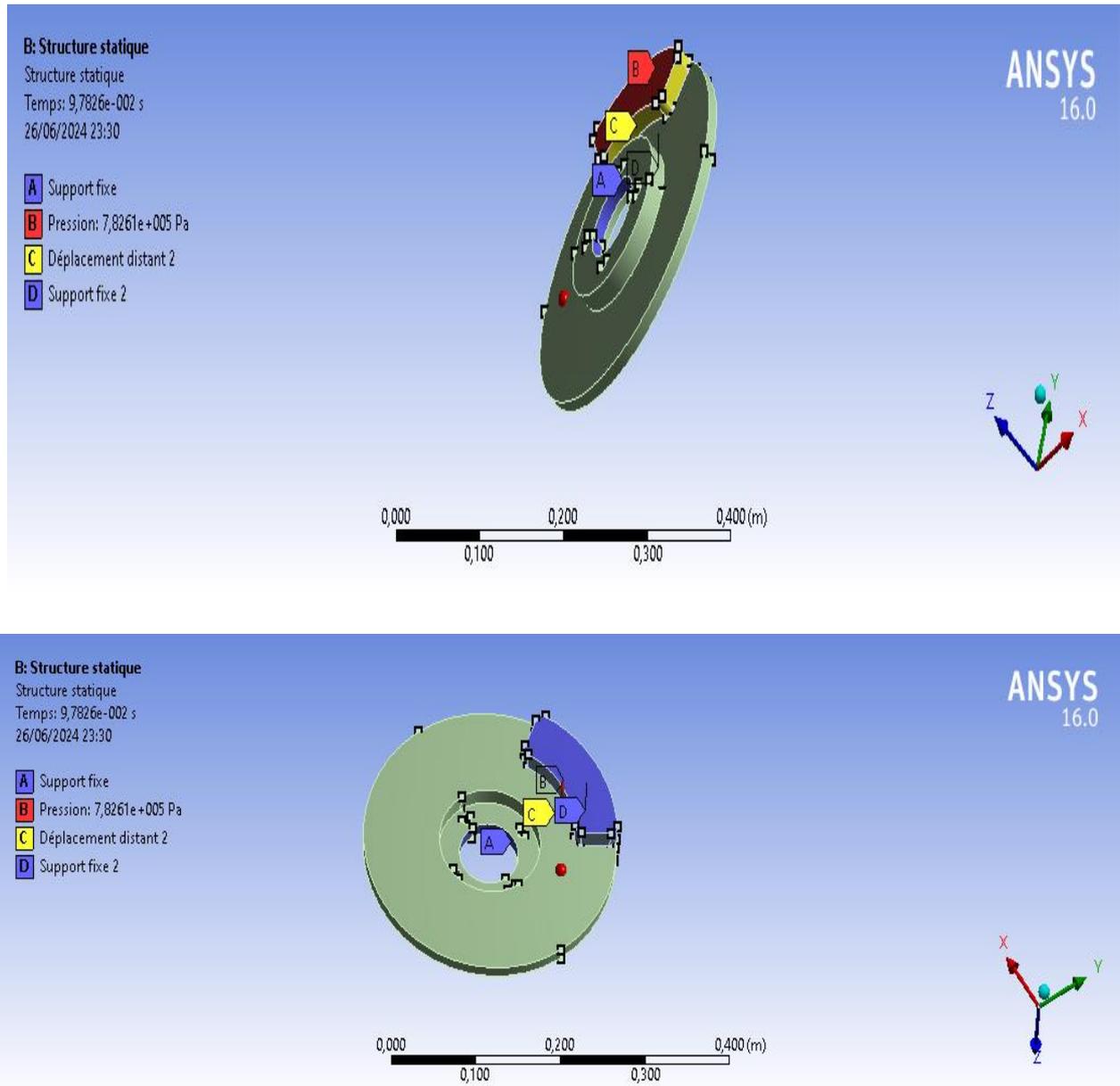


Figure 54 : Condition limite mécanique de cas 1(3-8)

Cas 2 :

Dans le cas (2) la matière de les plaques ferodo et la matière de disque de frein acier standard et la pression qui est appliqué sur les plaques est de 40 bar

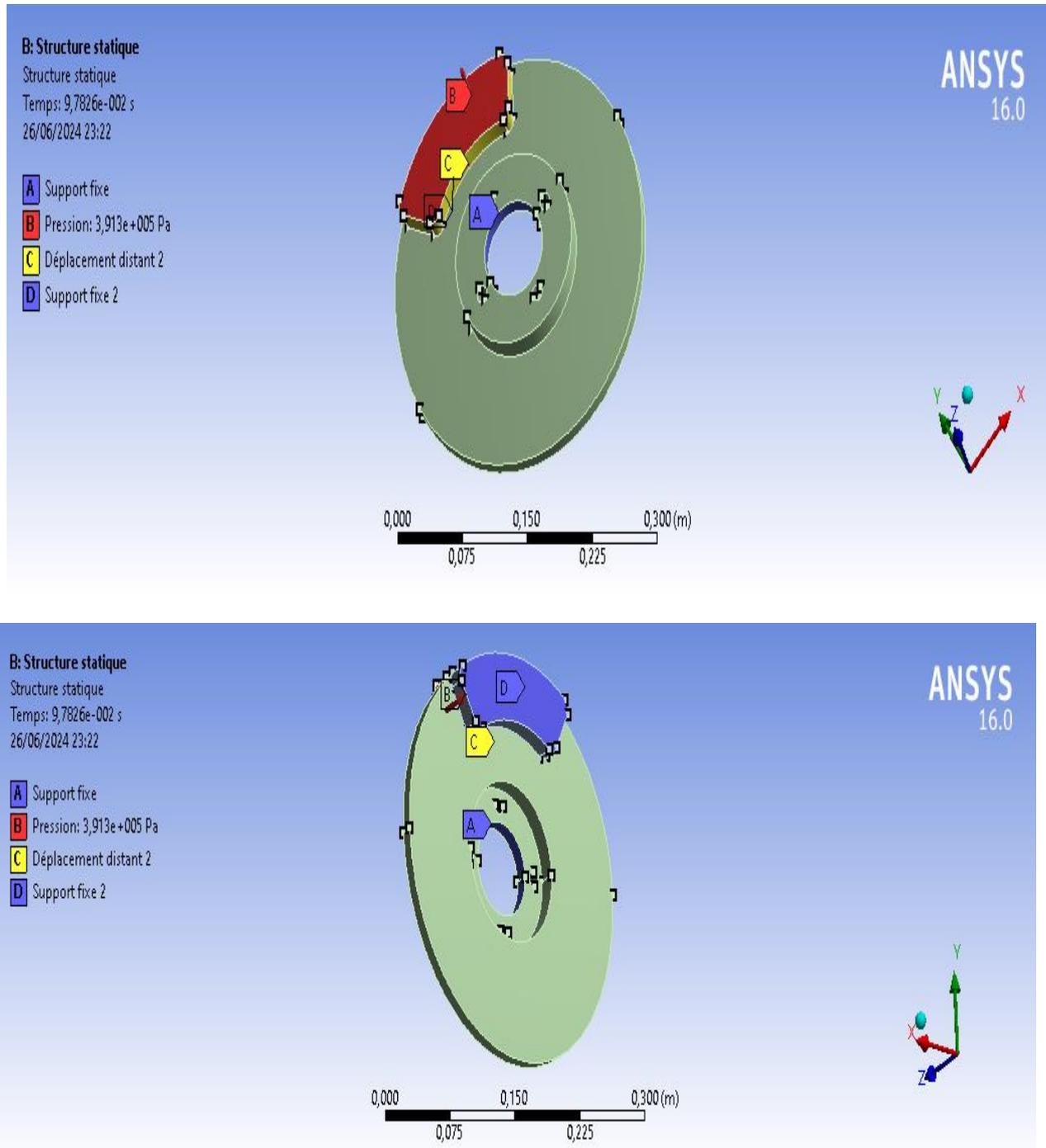


Figure 55 Condition limite mécanique de cas 2(3-9)

Cas 3 :

Dans le cas (3) la matière de les plaques ferodo et la matière de disque de frein acier standard et la pression qui est appliqué sur les plaques est de 20 bar

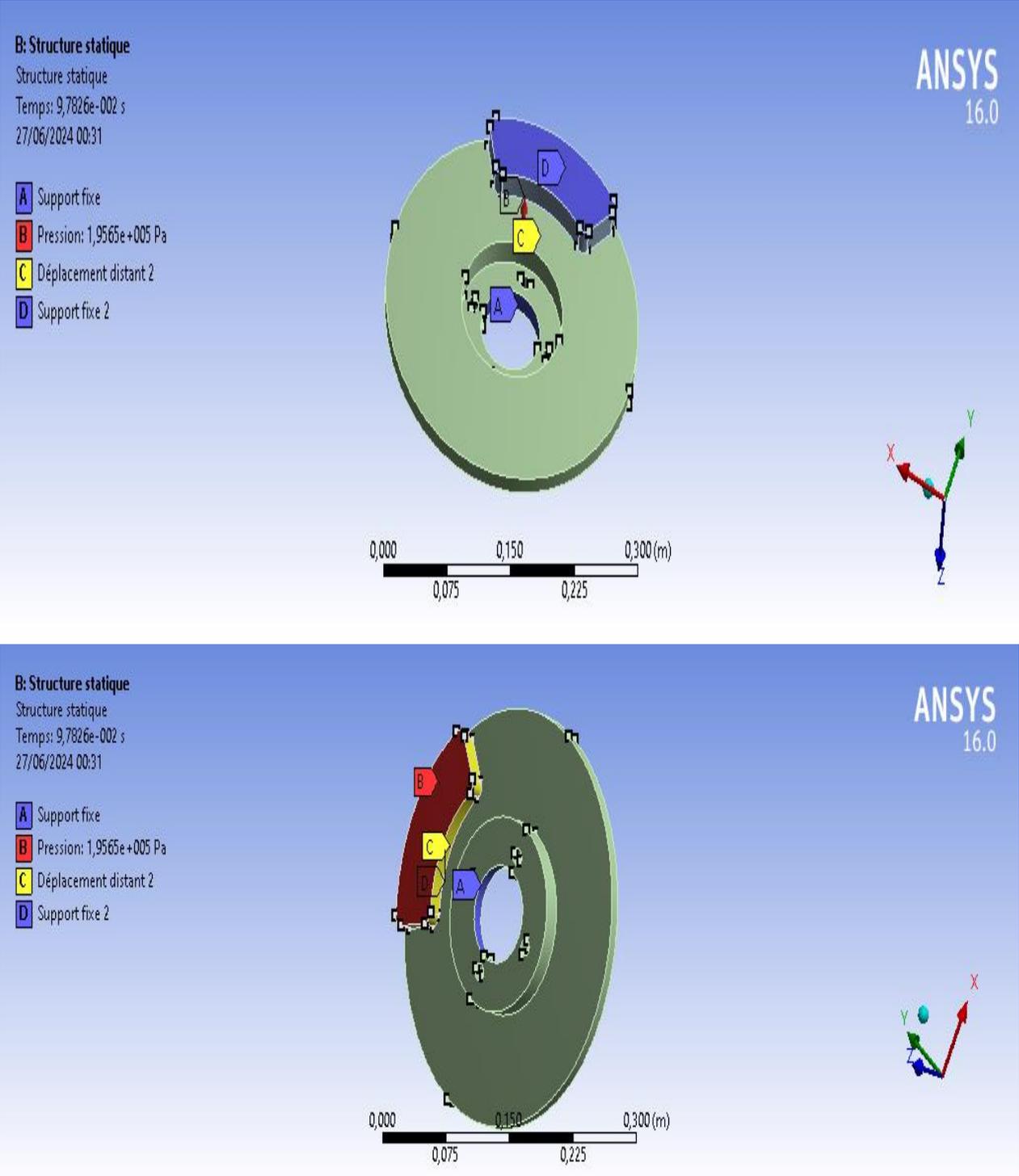


Figure 56 Condition limite mécanique de cas 3(3-10)

Cas 4 :

Dans le cas (1) la matière de les plaques ferodo et la matière de disque de frein fonte gris et la pression qui est appliqué sur les plaques est de 80 bar.

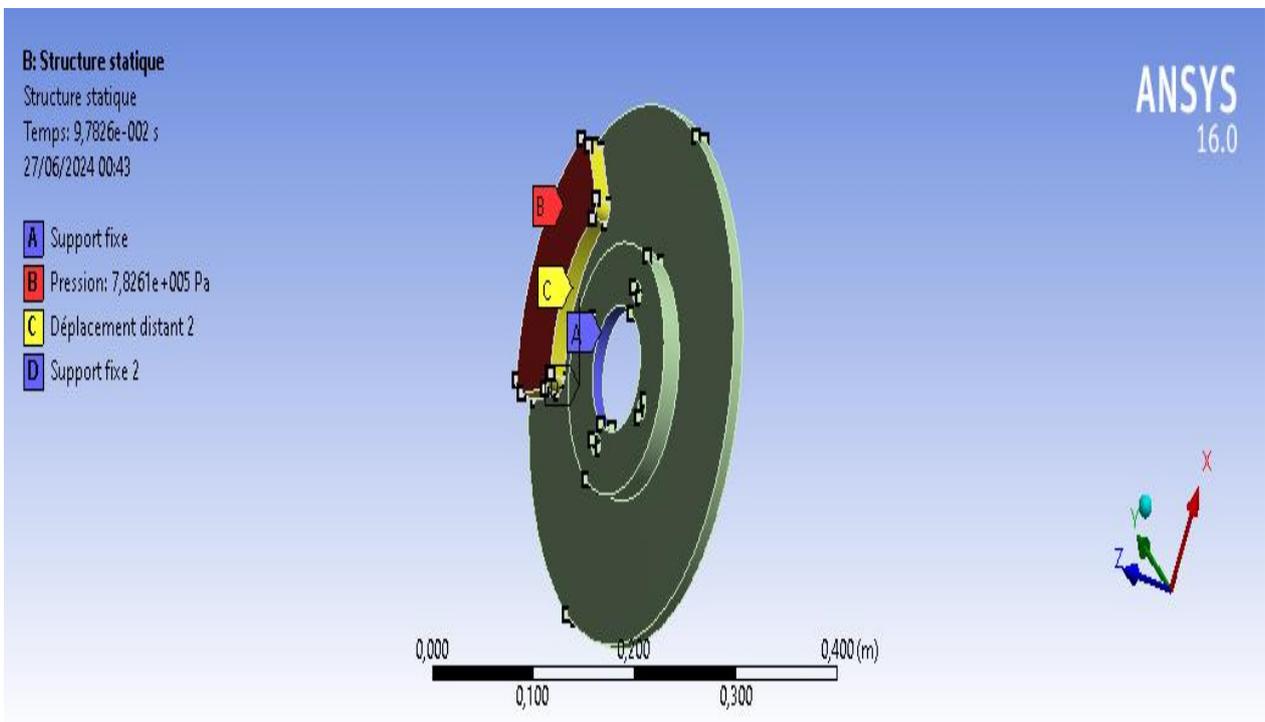
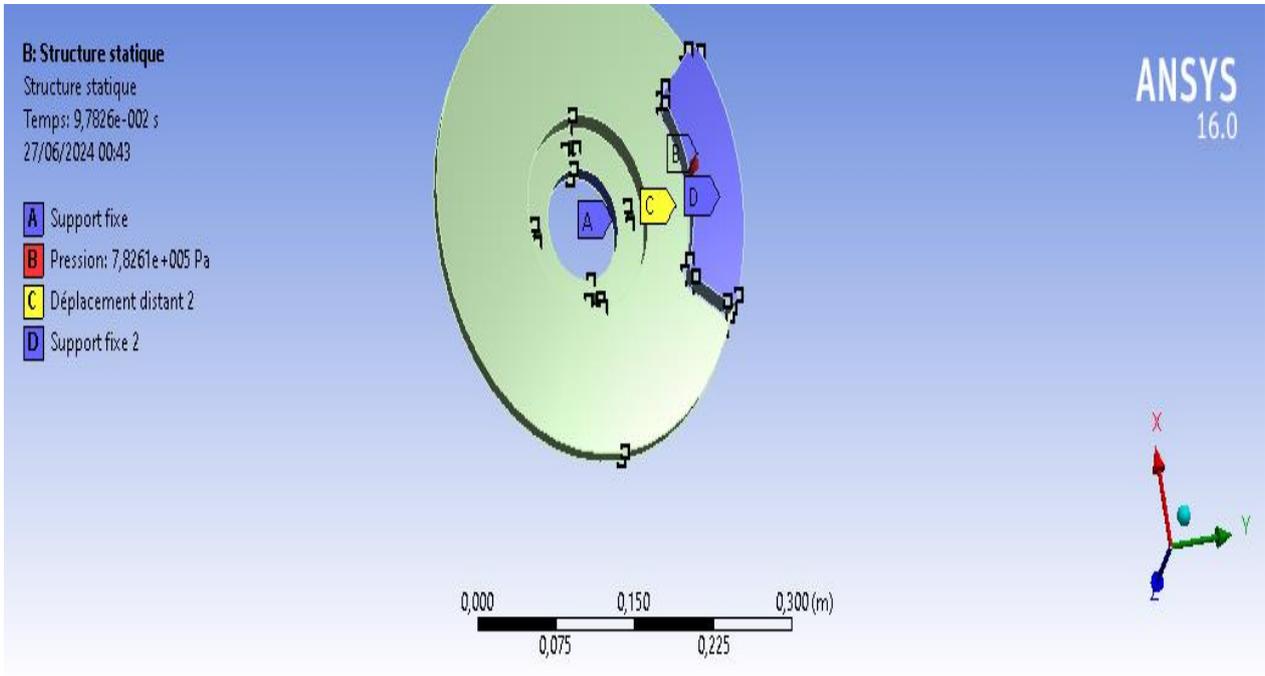


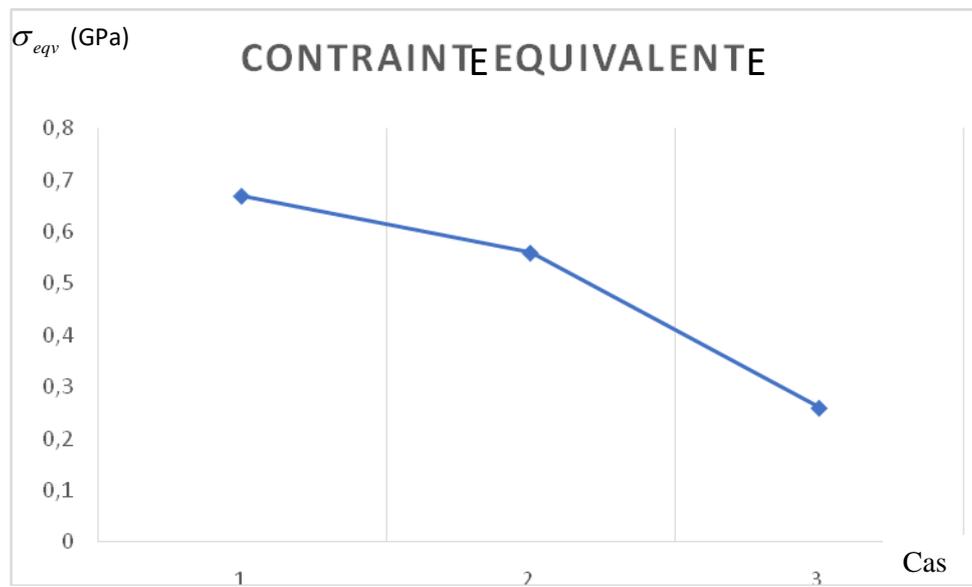
Figure 57 :Condition limite mécanique de cas 4(3-11)

Chapitre 4
résultat de l'analyse

IV. Chapitre 4 : résultat de l'analyse

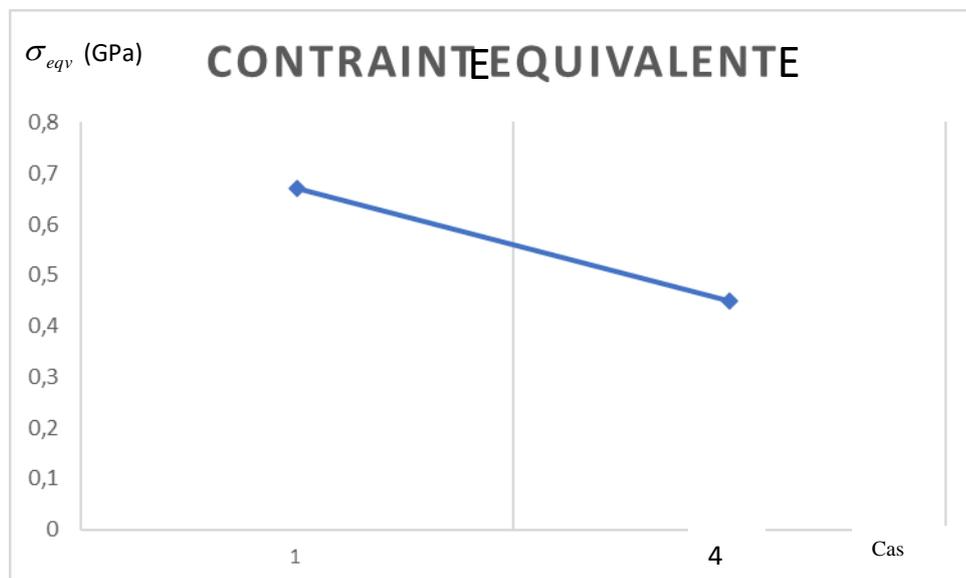
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Contrainte équivalente σ_{eqv} (GPa)	0,67	0,56	0,26	0,45
Déformation thermique ε_{th}	0,011	0,007	0,003	0,011
Déformation thermomécanique ε_{thmec}	0,14	0,06	0,031	0,152

Table10 Résultat de l'analyse



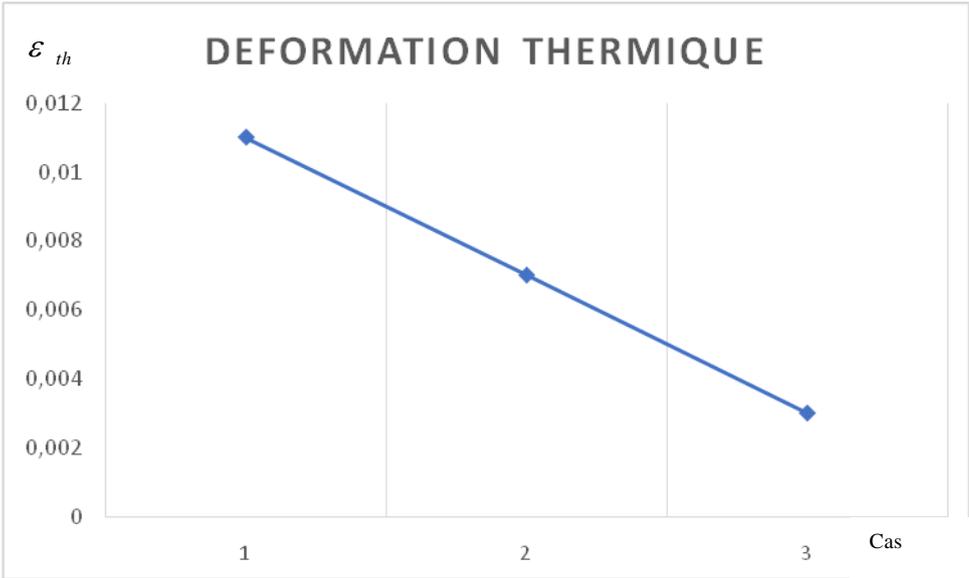
Commentaire :

On remarque sur la figure ci-dessus que quand la pression et la température diminuent du Cas 1 au Cas 3 alors la contrainte équivalente diminue.



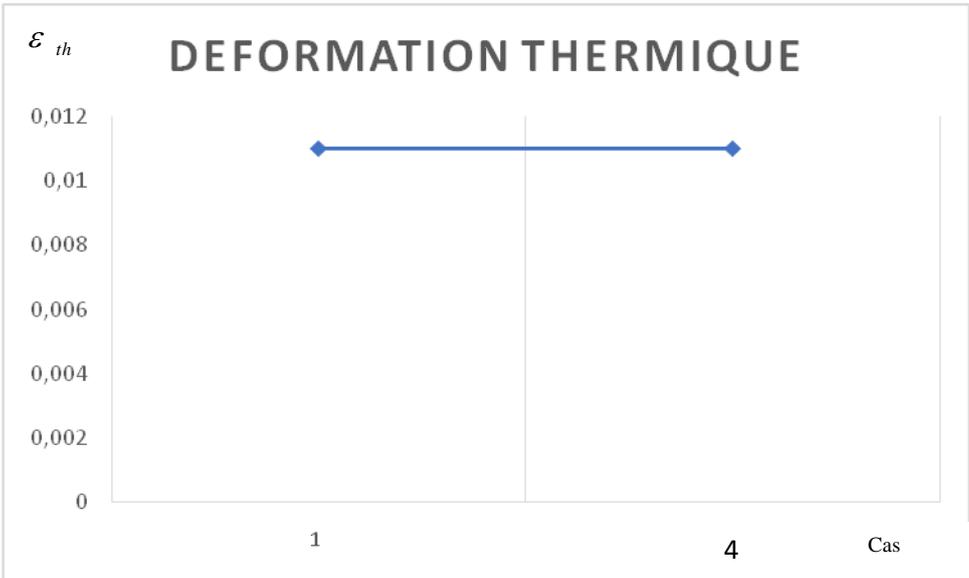
Commentaire :

On remarque sur la figure ci-dessus que le disque fabriqué avec la fonte grise (Cas 4) présente une contrainte équivalente plus faible que celle calculée pour un disque fabriqué avec l'acier standard (Cas 1).



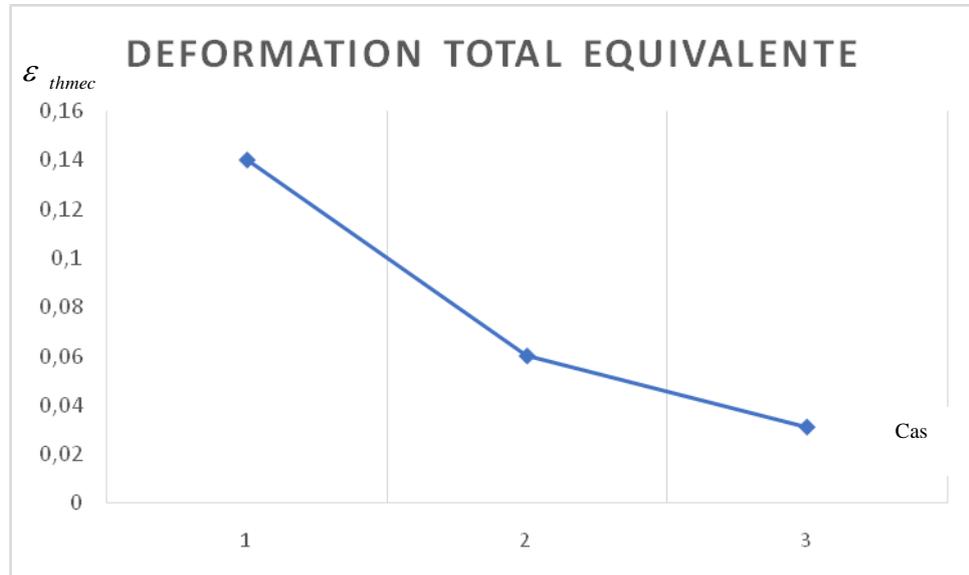
Commentaire :

On remarque sur la figure ci-dessus que quand la pression et la température diminuent du Cas 1 au Cas 3 alors la déformation thermique diminue.



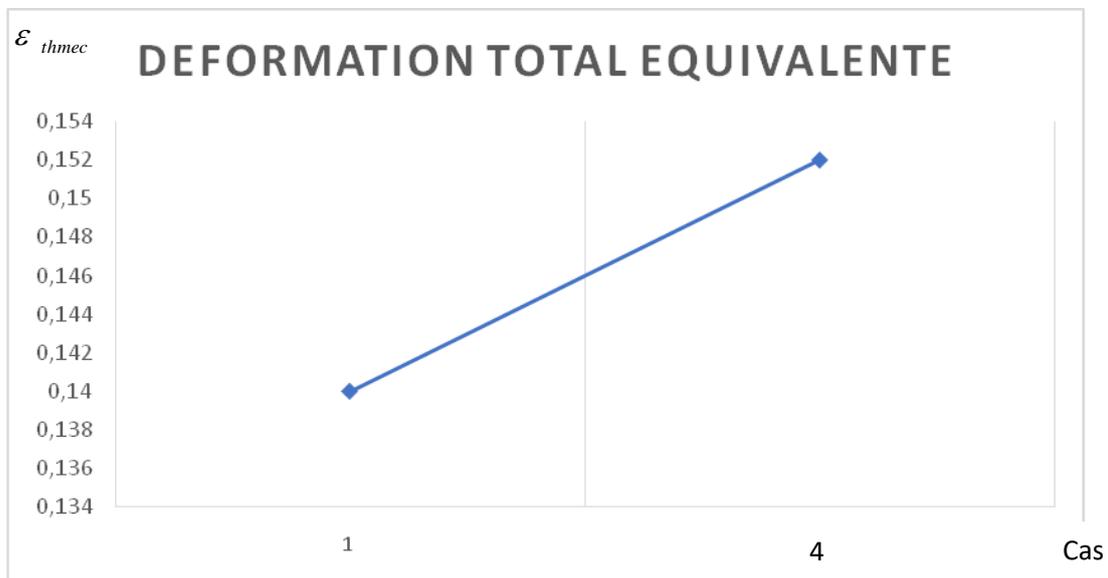
Commentaire :

On remarque sur la figure ci-dessus que la déformation thermique pour les deux cas (Cas 1 et Cas 4) reste identique.



Commentaire :

On remarque sur la figure ci-dessus que quand la pression et la température diminuent du Cas 1 au Cas 3 alors la déformation thermomécanique diminue.

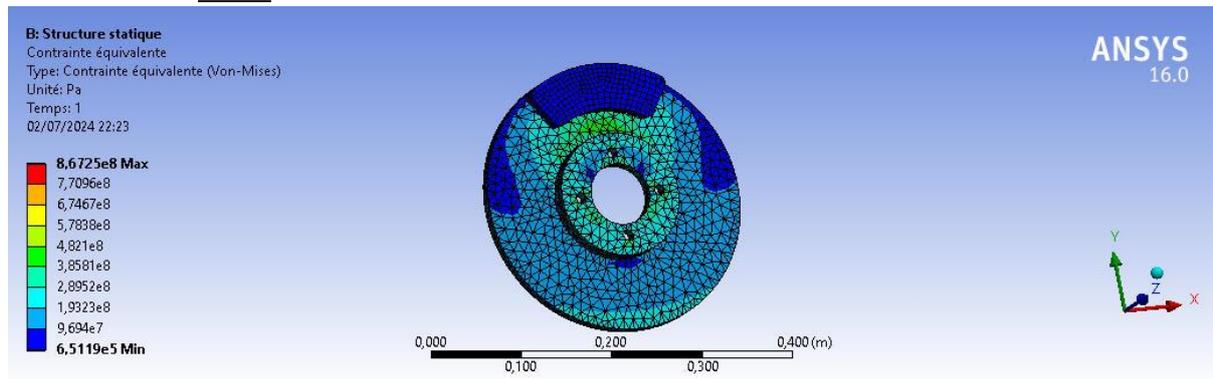


Commentaire :

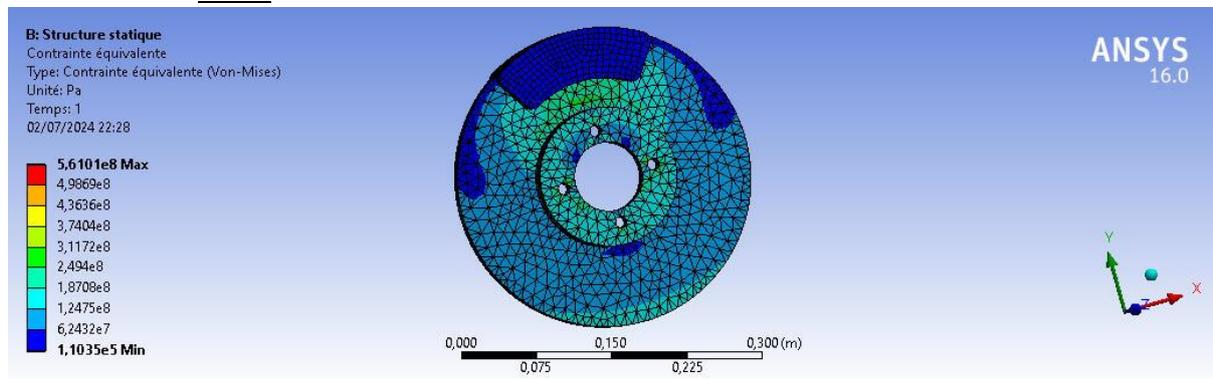
On remarque sur la figure ci-dessus que la déformation thermomécanique du Cas 4 est plus élevée à celle du Cas 1. Ceci s'explique que dans les mêmes conditions, le disque en fonte se déforme mécaniquement plus que le disque en acier standard.

CONTRAINTE EQUIVALENTE (σ_{eqv})

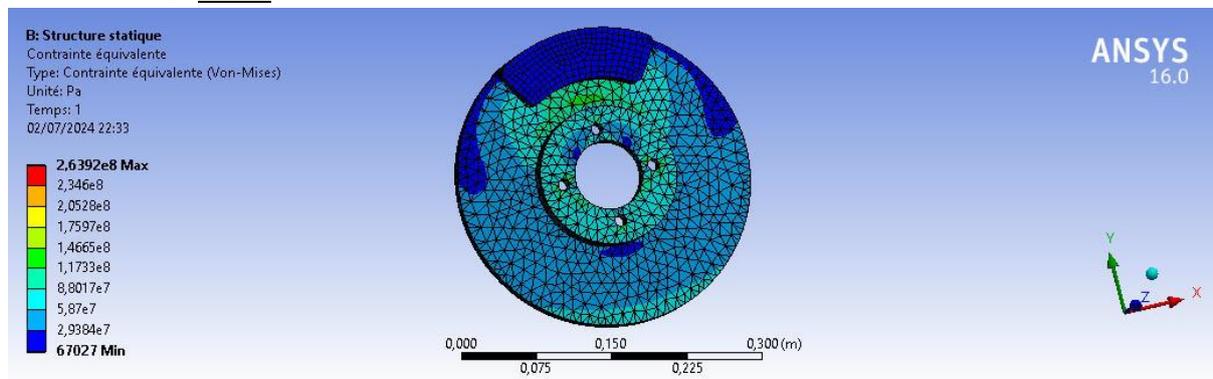
IV.1.1 Cas 1



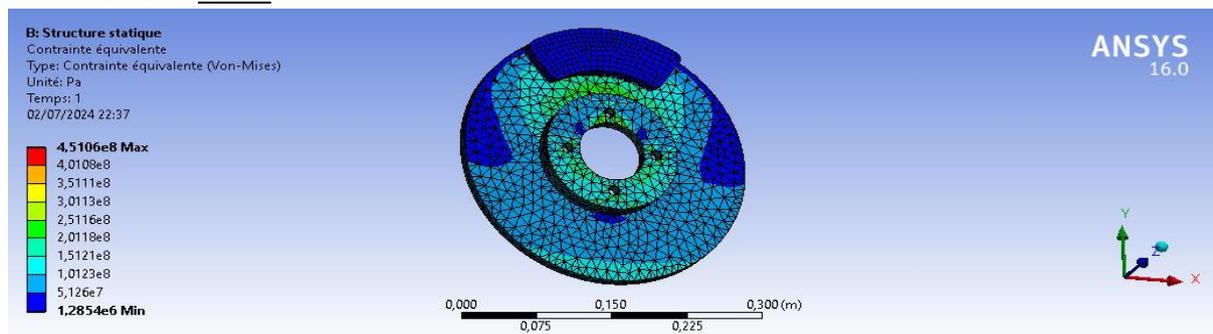
IV.1.2 Cas 2



IV.1.3 Cas 3

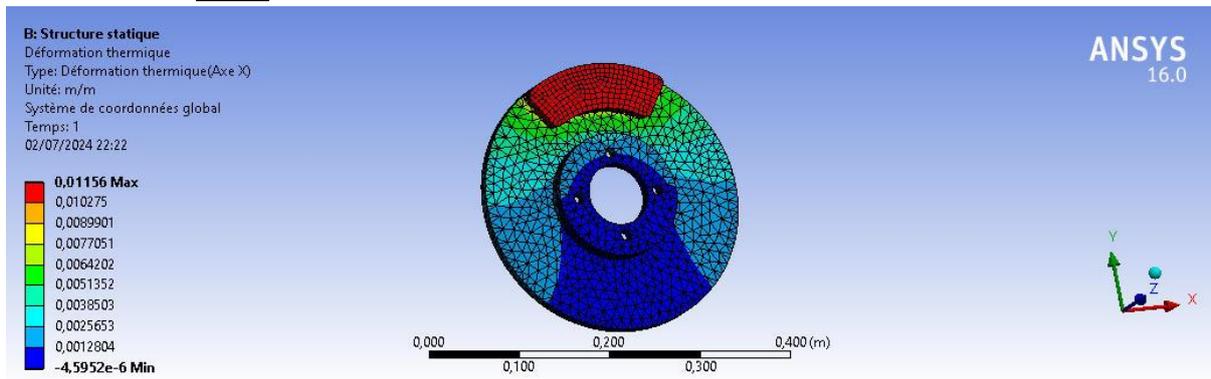


IV.1.4 Cas 4

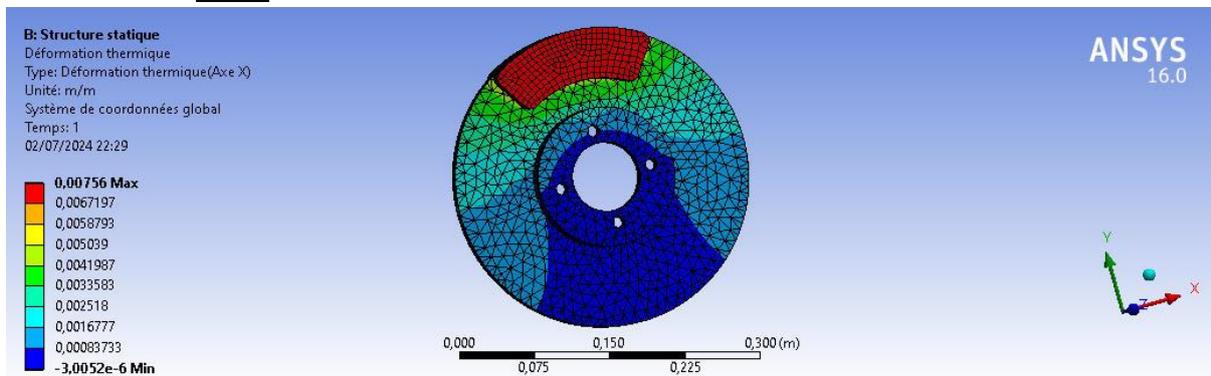


IV.2 Déformation Thermique (ϵ_{th})

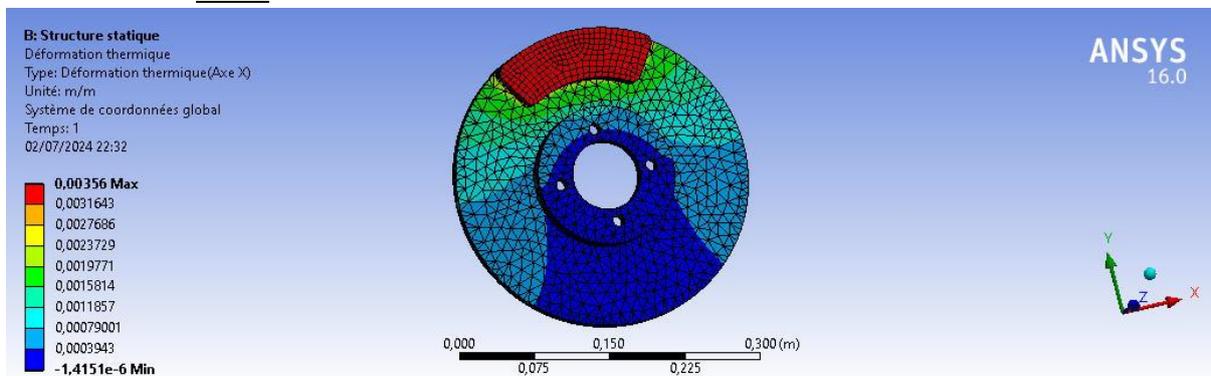
IV.2.1 Cas 1



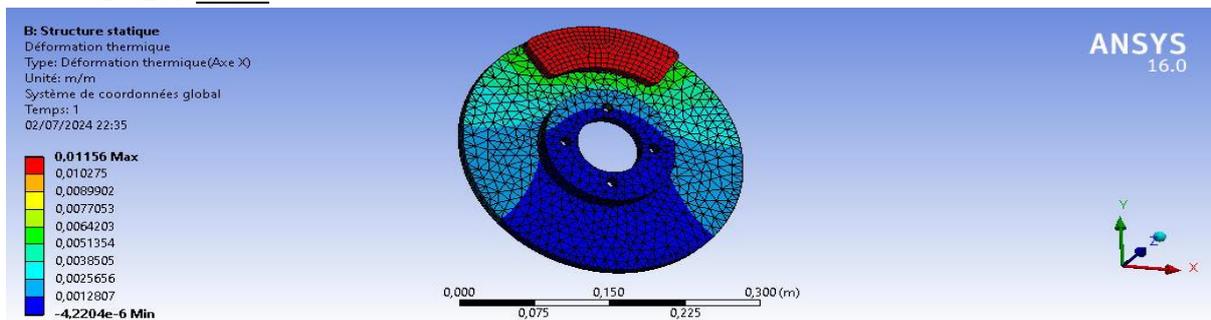
IV.2.2 Cas 2



IV.2.3 Cas 3

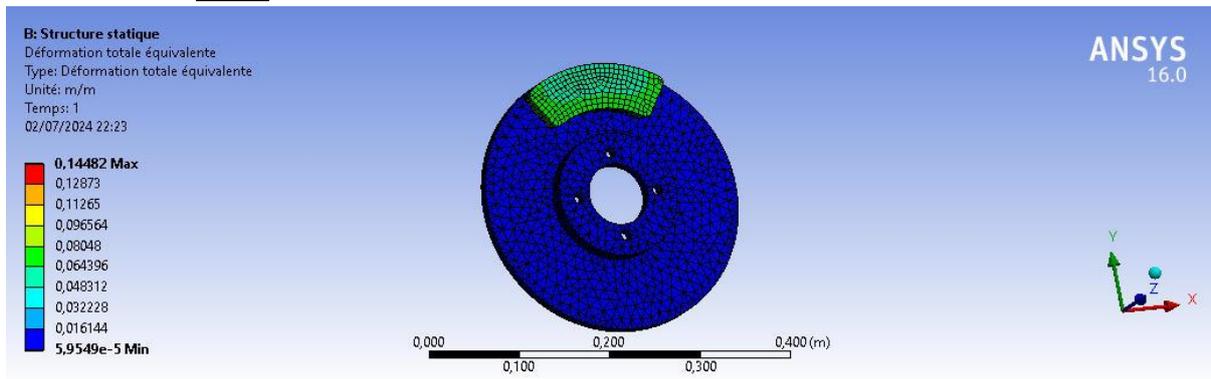


IV.2.4 Cas 4

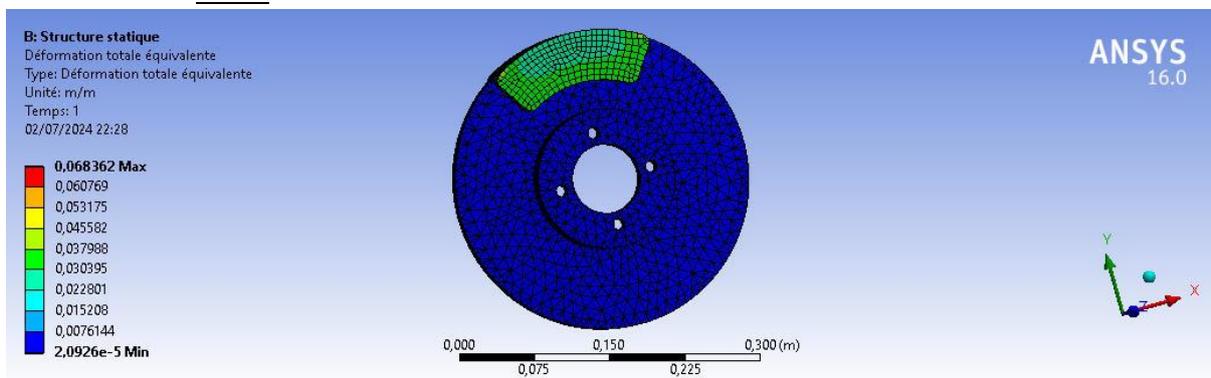


IV.3 Déformation Total Equivalente ou Déf Thermomécanique (ϵ_{thmec})

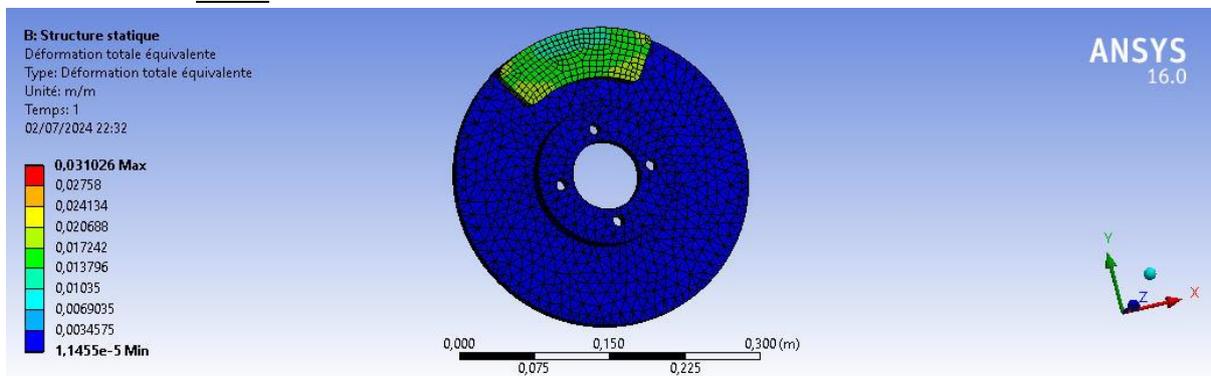
IV.3.1 Cas 1



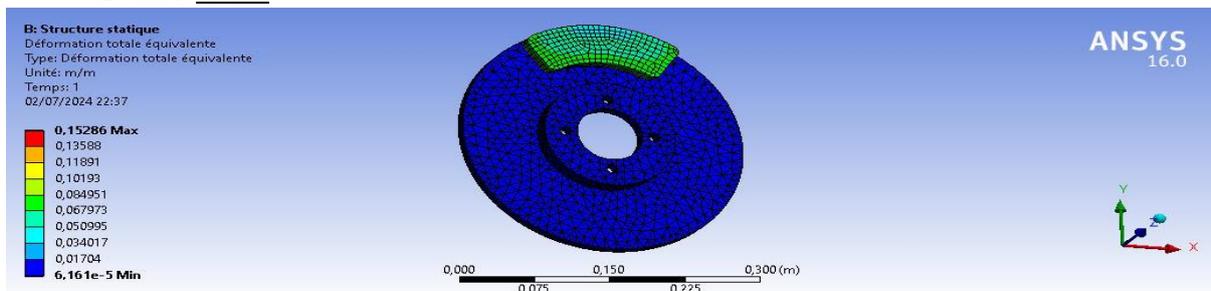
IV.3.2 Cas 2



IV.3.3 Cas 3



IV.3.4 Cas 4



V. Conclusion

L'objectif principal est de comprendre comment ces phénomènes thermomécaniques influencent le comportement du système de freinage, notamment en ce qui concerne l'usure des matériaux, la distribution des températures, et les déformations thermiques. Ces éléments sont essentiels pour garantir la sécurité, la durabilité, et l'efficacité des freins.

Le logiciel ANSYS, grâce à ses capacités avancées de simulation par éléments finis (FEA), est particulièrement bien adapté pour cette tâche. Il permet de créer des modèles détaillés du système de freinage, incluant les matériaux, les conditions de contact, et les charges thermomécaniques. En utilisant ANSYS, on peut simuler les conditions de fonctionnement réelles d'un frein pour évaluer les contraintes mécaniques, les gradients de température, et les déformations qui surviennent pendant le processus de freinage.

La modélisation thermomécanique dans ANSYS implique généralement plusieurs étapes clés, notamment la définition des propriétés des matériaux, la mise en place des conditions aux limites et de chargement, et la résolution des équations couplées de la chaleur et de la mécanique. Les résultats obtenus permettent de prévoir les performances du système de freinage, d'identifier les points critiques de défaillance potentielle, et d'explorer différentes options de conception pour améliorer la fiabilité du système.

Finalement, la modélisation thermomécanique du contact disque/frein dans un système automobile à l'aide d'ANSYS est une méthode puissante pour analyser et optimiser les performances des freins, en prenant en compte les interactions complexes entre la mécanique et la thermique qui déterminent le comportement du système sous des conditions de freinage extrêmes.

Bibliographie

Chapitre 1 :

[1] Louis Augustins, Dimensionnement à la fatigue thermomécanique de disques de frein automobiles en fonte à graphite lamellaire, Université Pierre et Marie Curie, France, 2014.

[2] Tahar Selma, Mémoire PFE: Etude du comportement thermomécanique du contact disque-plaquette de frein, University d'Annaba, Algérie, 2018.

Chapitre2:

[3] Site : wordpress

[4] YVES JANNOT. « Transferts Thermiques » Ecole des mines Nancy 2009

[5] PHILIPPE MARTY .« cours de transferts thermiques conduction et rayonnement » Université Joseph Fourier Grenoble septembre 2001

[6] Claude SAINT-BLANQUET. Bernard FOURCHER « Conduction de la chaleur » Université de Nantes 2001.

[7] F. KREITH « Transmission de la chaleur et Thermodynamique » Université du Colorado, 1967

[8] T. M-L. Nguyen-Tajan, Modélisation thermomécanique des disques de frein par une approche Eulérienne, thèse doctorat.. Ecole Polytechnique X, 2002, France

[9] Belhocine, thermomécanique des disques de frein Application du Code de

[10] Calcul ANSYS V11.0. Mechanical Engineering. Oran ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

[11] Y. Berthier ; Mécanismes et tribologie ; Thèse d'état ; N° 88 ISAL 0050 ; INSA de Lyon ; 1988.

[12] M. Godet ; Aspects mécaniques de la tribologie ; 6^{ème} , congrès français de mécanique ; Lyon ; 5-9 septembre 1983.

[13] M. Benramdane^{1*}, Y. Khadraoui¹ et N. Bibi-Triki², Analyse de la contribution du transfert thermique des disques tournants (disque de frein) uniformément chauffés, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009), pp29 – 43.

Chapitre 3 :

Site : Drimex .

wikipedia.org/

Site : vonroll-casting

Site : simutechgroup

Site : roady