

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé de Mémoire

Etude du comportement thermomécanique
des disques du frein simple et percée

Présenté par :

BOUKHIRA Walid

Soutenu publiquement le : 23 juin 2019, devant le jury :

Mr .BENDAHOU Djelloul	MCB	Ctr Univ Naama	Président
Mr.KHATIR Tawfiq	MCA	Ctr Univ Naama	Encadreur
Mr. CHABANE Mostapha	MCB	Ctr Univ Naama	Examineur

Année universitaire 2018-2019

Remerciements

Nous voudrais d'abord remercier le Dieu le plus puissant de nous avoir donné la force pour réaliser ce modeste travail de master

Nous remercie sincèrement mon promoteur monsieur Dr. KHATIR Tawfiq responsable du projet, qui m'a donné des conseils et des suggestions pour la conception du logiciel que j'ai développé.

Nous tiens aussi à remercier Mr Kaid Noureddine qui m'a donné le programme ANSYS.

J'adresse mes plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant la charge de juger ce travail.

Nous tiens surtout à apporter mes vifs remerciements à mes parents qui m'ont soutenu durant ce travail.

Enfin, je ne voudrais pas non plus oublier tous mes amis pour leurs aides et leur orientations

Dedicaces

Je dédie ce mémoire :

*A mes très chers parents qui m'ont toujours
soutenu et encouragé Que DIEU les protège*

A mon cher frère Marwane, a mes chères sœurs.

A mes amis proches : Brahim, Mohe, Abdelmadjid.

A mes fleurs : Hanane, Fatima.

A toute ma famille.

Et toute la promotion 2019.

BOUKHIRA Walid

Dédicace	
Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale.....	04
CHAPITRE I : Généralités sur le système du freinage	
I.1 Généralité	07
I.2.Le système de freinage classique	07
I.3. Structure générale d'un système de freinage.....	08
I.4.Classification des freins	08
I.5.Les fonctions d'un système de freinage.....	08
I.6.Les composants de système de freinage.....	09
I.7.Les freins complémentaires ou ralentisseurs.....	10
I.7.1.Les ralentisseurs pneumatiques	10
I.7.2.Les ralentisseurs électriques	10
I.7.3. Les ralentisseurs hydrauliques	11
I.8.Freins à tambour.....	12
I.8.1 Définition	12
I.8.2.Principe d'opération.....	12
I.8.3. Différents types des freins à tambour.....	14
I.8.3.1.Frein à tambour Simplex.....	14
I.8.3.2.Frein à tambour Duplex et Duo-Duplex	14
I.9.Le frein ABS.....	15
I.9.1.Définition.....	15
I.9.2.Le principe de fonctionnement du frein ABS.....	15
I.10.Frein à disque.....	16
I.10.1.Définition	16
I.10.2.Les freins à disque.....	17
I.10.2.1.Le montage rigide.....	17
I.10.2.2.Les montages flottants.....	18
I.10.3.Eléments d'un frein à disque.....	18
I.10.3.1.Étrier.....	19
I.10.3.1.a. Les Étrier (fixe vs flottant).....	19
I.10.3.1.b. Frein à étrier fixe.....	20
I.10.3.1.c. Frein à étrier flottant.....	20
I.10.4.Disque ventilé.....	21
I.10.5.Les disques rainurés.....	22
I.10.6.Les disques percés.....	22
I.11.Les plaquettes.....	23
I.11.1.Les shims	24
I.12.Frein à disque pour poids lourds.....	25
I.12.1.Freins à disque à commande hydraulique.....	25
I.12.2.Frein à disque à commande pneumatique.....	25

CHAPITRE II : Etude thermique

II.1.Introduction.....	27
II.2. Définition.....	27
II.2.1. Champ de température.....	27
II.2.2.Gradient de température.....	28
II.2.3.Flux de chaleur.....	28
II.3.Modes de transfert de chaleur.....	29
II.3.1. La conduction.....	29
II.3.1.1 Résistance thermique.....	30
II.3.1.2 Les régimes permanents.....	31
II.3.1.3 Les régimes transitoires.....	31
II.3.2.La convection.....	33
II.3.2.1.Le nombre de Nusselt.....	36
II.3.2.2.Le nombre de Reynolds.....	36
II.3.3.Le Rayonnement.....	37
II.4.Stockage d'énergie.....	38
II.5. Le frottement : aspect tribologiques.....	38
II.5.1. La mécanique en tribologie.....	38
II.6.Refroidissement.....	38

CHAPITRE III Résultats et Discussions

III.1.Présentation des logiciels.....	41
III.1.1.SOLIDWORKS.....	41
III.1.2.ANSYS.....	41
III.2.Influence du matériau sur le disque de frein simple.....	42
III.2.1.Acier standard.....	43
III.2.1.1.Les propriétés mécaniques de l'acier standard.....	43
III.2.1.2.Résultats numériques.....	44
III.2.1.2.a. Température.....	44
III.2.1.2.b. Flux de chaleurs.....	47
III.2.2.Alliage d'aluminium.....	49
III.2.2.1. Les propriétés mécaniques d'Alliage d'aluminium.....	49
III.2.2.2.Résultats numériques.....	49
III.2.2.2.a. Température.....	49
III.2.2.2.b. Flux de chaleurs.....	52
III.2.3.Fonte grise.....	54
III.2.3.1. Les propriétés mécaniques de Fonte grise.....	54
III.2.3.2.Résultats numériques.....	54
III.2.3.2.a. Température.....	54
III.2.3.2.b. Flux de chaleurs.....	57
III.3.Influence du nombre des trous sur le matériau en fonte grise.....	59
III.3.1.Disque de frein simple.....	59
III.3.2.Disque de frein a huit trous.....	60
III.3.2.1.Résultats numériques.....	61
III.3.2.1.a. Température.....	61
III.3.2.2.b. Flux de chaleurs.....	63
Conclusion générale.....	67
Références bibliographiques	68

Liste des figures

Chapitre I Généralités sur le système du freinage

Fig. I .1. Système de freinage classique.....	7
Fig. I. 2. Les composants de système de freinage.....	9
Fig. I.3. Ralentisseurs électriques.....	11
Fig. I.4. Ralentisseurs hydrauliques.....	11
Fig. I .5. Freins à tambour.....	12
Fig. I .6. Eléments d'un frein tambour.....	13
Fig. I .7. Frein à tambour Simplex.....	14
Fig. I .8. Frein Duplex.....	15
Fig. I .9. Le Système de freinage ABS.....	15
Fig. I .10. Le system ABS.....	16
Fig. I .11. Les composants de frein à disque.....	17
Fig. I .12. Frein à disque (montage rigide)	18
Fig. I .13. Frein à disque (montages flottants)	18
Fig. I .14. Eléments d'un frein á disque.....	19
Fig. I .15. Comparaison des technologies d'étrier fixe (a) et flottant (b)	21
Fig. I .16. Disque ventile.....	22
Fig. I .17. Disques rainuré.....	22
Fig. I 18. Disques percés.....	23
Fig. I .19. Les plaquettes.....	24
Fig. I .20. Illustration d'un shims assemblé de manière mécanique au dos d'une plaquette....	24

Chapitre II Etude thermique

Fig. II.1. Gradient de température.....	28
Fig. II.2. Lois de Fourier.....	29
Fig. II. 3. Résistance thermique.....	30
Fig. II. 4. Définition d un élément de surface.....	34
Fig. II. 5. Profils des vitesses pour les couches limites laminaire et turbulente dans un écoulement sur une plaque plane.....	36
Fig. II. 6. Elément en Rayonnement.....	37

Chapitre III Résultats et Discussions

Fig. III .1. Géométrie de Disque simple Etudié dans le logiciel SolidWorks.....	41
Fig. III. 2. Géométrie de Disque a huit trous Etudié dans le logiciel SolidWorks.....	41
Fig. III. 3. Disque simple géométrie ANSYS.....	42
Fig. III. 4. Maillage de disque simple.....	43
Fig. III. 5. Distribution de la température dans le disque simple en Acier standard à différents instants.....	45
Fig. III. 6. Évolution de la température en fonction du temps (Acier standard).....	46
Fig. III. 7. Distribution de flux de chaleur dans le disque simple en Acier standard à différents instants.....	48
Fig. III. 8. Évolution de flux de chaleur en fonction du temps (acier standard).....	48
Fig. III. 9. Distribution de la température dans le disque simple en Alliage d'aluminium à différents instants.....	51
Fig. III. 10. Évolution de la température en fonction du temps (Alliage d'aluminium).....	51
Fig. III. 11. Distribution de flux dans le disque simple en Alliage d'aluminium à différents	53

instants.....	53
Fig. III.12. Évolution de flux de chaleur en fonction du temps (Alliage d'aluminium).....	
Fig. III.13. Distribution de la température dans le disque simple en Fonte grise à différents instants.....	56
Fig. III.14.Évolution de la température en fonction du temps (Fonte grise).....	58
Fig. III.15. Distribution de flux de chaleur dans le disque simple en Fonte grise à différents instants.....	58
Fig. III. 16. Évolution de flux de chaleur en fonction du temps (Fonte grise).....	59
Fig. III.17. Les températures maximales selon le type du matériau.....	60
Fig. III. 18. Disque huit trous géométrie ANSYS.....	61
Fig. III. 19. Maillage de disque huit trous.....	61
Fig. III. 20. Distribution de la température dans le disque huit trous en Fonte grise à différents instants.....	62
Fig. III. 21. Évolution de la température en fonction du temps (Fonte grise).....	63
Fig. III. 22. Distribution de flux de chaleur dans le disque huit trous en Fonte grise à différents instants.....	64
Fig. III. 23. Évolution de flux de chaleur en fonction du temps (Fonte grise).....	64
Fig. III.24. Les températures maximales selon le type du disque.....	65

Liste des tableaux

Chapitre I

Tab. 1.1. les composants de système de freinage.....	10
Tab. 1.2. Les éléments d'un frein tambour.....	13
Tab. 1.3. Eléments d'un frein á disque.....	19

Chapitre II

Tab. II .1 Conductivité thermique de certains matériaux.....	30
--	----

Chapitre III

Tab. III.1 Caractéristiques de maillage.....	43
Tab. III.2 Les caractéristiques d'acier standard.....	43
Tab. III.3 Les caractéristiques d'alliage aluminium.....	49
Tab. III.4 Les caractéristiques de fonte grise.....	54
Tab. III 5 Caractéristiques de maillage.....	60

Résumé :

L'objectif de cette d'études et de présenter une étude comportementale thermomécanique des disques de frein des machines avec une grande vitesse pour voir le meilleur matériau et la meilleure géométrie. La stratégie de calcul numérique est repose sur le code calcul ANSYS 17.1.

La base de ce dernier est sur la méthode des éléments précis et finis, qui possède des algorithmes de gestion du contact avec frottement, en utilisant pour simuler dans l'application du freinage un comportement de mécanisme malgré qu'il est tellement complexe.

Cette modélisation est effectuée en ayant compte l'influence d'un certain nombre de paramètre comme le type de freinage.

Nous avons travaillé sur l'étude du système de freinage et leurs matériaux et en faisant rappel sur la tribologie l'usure, frottement et puis une analyse des phénomènes thermiques, opérant dans le disque de frein en service. Ainsi on a utilisé le même code de calcul pour voir et observer la distribution de température sur différents paramètres.

Mots clés : Thermomécanique, Disque de frein, Freinage, Frottement, Usure.

Abstract :

The purpose of this study is to present a thermomechanical behavioral study of the brake discs of machines with high speed to see the best material and the best geometry. The numerical calculation strategy is based on the calculation code ANSYS 17.1.

The base of the latter is on the method of precise and finite elements, which has algorithms of management of the contact with friction, using to simulate in the application of the braking a behavior of mechanism although it is so complex.

This modeling is done by taking into account the influence of a certain number of parameters such as the type of braking.

We worked on the study of the braking system and their materials and doing recall on the tribology the wear, friction and then an analysis of the thermal phenomena, operating in the brake disc in service. So we used the same calculation code to see and observe the temperature distribution on different parameters.

Keywords: Thermomechanical, Brake Disc, Braking, Friction, Wear.

ملخص :

الغرض من هذه الدراسة هو تقديم دراسة سلوكية ميكانيكية حرارية لأقراص المكابح الخاصة بالآلات ذات السرعة العالية لرؤية أفضل المواد وأفضل الهندسة. تعتمد إستراتيجية الحساب العددي على رمز الحساب ANSYS 17.1. أساس هذا الأخير هو على طريقة العناصر الدقيقة والمحدودة ، والتي لديها خوارزميات لإدارة الاتصال مع الاحتكاك ، وذلك باستخدام محاكاة في تطبيق سلوك الكبح على الرغم من أنها معقدة للغاية.

يتم هذا النموذج من خلال مراعاة تأثير عدد معين من المعلمات مثل نوع الكبح . لقد عملنا على دراسة نظام الكبح ومواده ونذكر على التثليث التآكل والاحتكاك ومن ثم تحليل الظواهر الحرارية، التي تعمل في قرص الفرامل في الخدمة. لذلك استخدمنا رمز الحساب نفسه لرؤية توزيع درجة الحرارة على معايير مختلفة.

الكلمات المفتاحية: الحرارية ، قرص الفرامل ، الكبح ، الاحتكاك ، ارتداء

INTRODUCTION

GENERALE

Un véhicule est relié à la chaussée par les forces normales et de traction produit par les pneus. Les forces de freinage, de direction ou d'accélération doivent être générées par la petite surface de roulement du pneu en contact avec le sol.

Seules les forces égales inférieure ou égale au produit de la force normale du pneu et du coefficient route-pneu du frottement peut être transmis entre le véhicule et le sol. Même le freinage idéal et le système de contrôle de la stabilité ne peut pas utiliser plus de traction que celle fournie par les pneus et route [1].

Bien que le constructeur britannique Lancaster ait breveté le frein à disque en 1902, ce fut un long temps jusqu'à ce que ce type de frein a été introduit.

Ce n'est que cinquante ans plus tard, à compter de 1955, la légendaire Citroën DS-19 est-elle devenue la première voiture de série à équiper avec des freins à disque. Le frein à disque a été dérivé du frein multi-disques et a été initialement développé pour l'industrie aéronautique.

Dans le frein à disque, une presse de garniture de frein le disque de frein de l'intérieur et l'extérieur.

Le disque de frein (normalement constitué de en fonte ou, plus rarement, en acier) est connecté à la roue. Son avantage est sa simplicité et structure facile à assembler.

Ça aussi contrebalance la réduction de l'effet de freinage causée par une surchauffe et évite le désalignement des roues d'un essieu.

La première voiture allemande avec freins à disque sur les roues avant était la BMW 502 en 1959.

Les premières voitures allemandes à avoir des freins à disque sur toutes quatre roues étaient la Mercedes 300 SE, la Lancia Flavia et la Fiat 2300 en 1961.

Aujourd'hui, pratiquement toutes les voitures ont un freinage de disque système, au moins sur les roues avant. En 1974, les premières voitures de course de Formule 1 avec carbone des disques de frein en fibres composites ont été introduites.

Ces disques sont considérés comme particulièrement légers et résistants à la chaleur et ont donc gagné utilisation répandue dans le sport automobile et l'aviation [2].

L'utilisation sûre d'un véhicule automobile nécessite un réglage continu de sa la vitesse à l'évolution des conditions de circulation.

Les freins et les pneus avec le système de direction sont les composants les plus critiques de prévention des accidents de la sécurité un véhicule automobile.

Les freins doivent fonctionner en toute sécurité dans tous les cas raisonnablement prévisibles les conditions d'exploitation, y compris les routes glissantes, mouillées et sèches; avec un léger ou véhicule complètement chargé; en freinage droit ou en virage; avec neuf ou usé les freins, lorsqu'il est appliqué par le conducteur novice ou expérimenté, sur lisse ou rugueux routes, ou en tirant une remorque.

Les fonctions de base d'un système de freinage doivent être assurées dans des conditions prévisibles.

Circonstances, à un coût raisonnable et à l'usure des freins, tout en offrant stabilité directionnelle et utilisation acceptable du frottement sur la chaussée.

Le système de freinage doit être conforme à toutes les normes de sécurité applicables. Sous la plupart des conditions, les normes de sécurité sont considérées comme des performances minimales exigences.

Cette étude comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre est une étude bibliographique sur le système de freinage, leurs matériaux.
- Le deuxième chapitre présente les modes de transfert thermique et donne méthode d'évaluation de la quantité du flux thermique de friction entrant dans le disque et rappel sur la tribologie.
- Le dernier chapitre expose les résultats obtenus après les simulations numériques on utilise le code du calcul ANSYS 17.1 ainsi que leurs interprétations.

Chapitre I

Généralités sur le système du freinage

I.1 Généralité

Un frein est un transformateur d'énergie destiné à ralentir (frein de ralentissement) ou à arrêter complètement le mouvement d'un engin (frein d'arrêt).

Les propriétés d'un frein sont caractérisées par les grandeurs suivantes :

- L'effort de la commande est la force maximale constante exercée par l'opérateur sur l'organe de la commande de frein à la cour du freinage.
- La course de commande est le déplacement de l'organe de commande de frein, de la position de repos à la position de freinage.
- L'indice de commande d'une installation de freinage est le produit de l'effort par la course de commande. Cet indice, homogène à une énergie, caractérise la valeur de l'installation de freinage comprenant le frein proprement dit et la transmission.
- L'efficacité d'un frein (souvent appelée puissance d'un frein) est le rapport du couple de freinage à l'indice de commande.
- La régularité d'un frein est caractérisée par son indice de régularité, rapport de la variation relative du couple de freinage à la variation du coefficient de frottement. Par définition, l'indice de régularité de deux surfaces planes est égal à l'unité. La régularité du couple ou de l'effort de freinage du au frottement est d'autant plus grande que l'indice de régularité est plus petit [3].

I.2.Le système de freinage classique

Quand le conducteur appuie sur la pédale de frein il actionne le maitre-cylindre qui est un système piston cylindre rempli d'huile provenant d'un réservoir d'huile spécial frein, alors il y crée une pression a la sortie du maitre-cylindre [4].

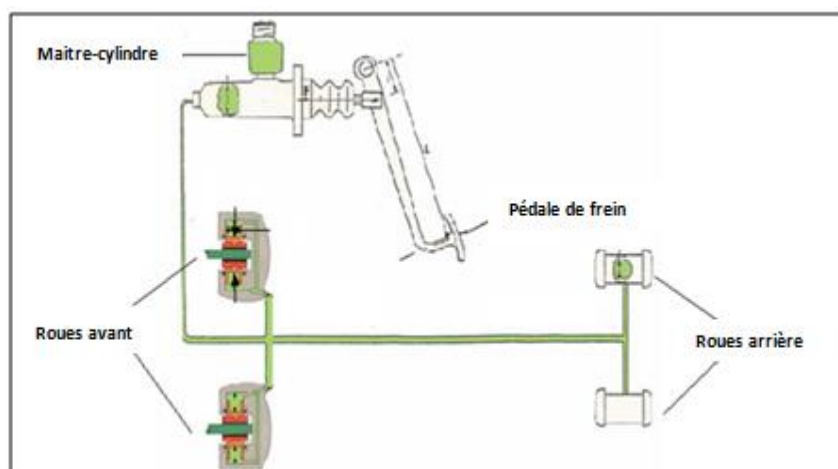


Fig. I.1. Système de freinage classique

I.3. Structure générale d'un système de freinage

Le système de freinage de véhicule consiste en une série de dispositifs spécialisés dans la voiture qui exercent une certaine force de freinage en imposant une certaine force à certaines parties du monde extérieur.

Le système de freinage a pour rôle de faire ralentir ou même de s'arrêter de manière obligatoire conformément aux exigences du conducteur, de faire rouler le véhicule suspendu de manière stable dans toutes les conditions de la route et d'assurer la stabilité de la descente.

L'effet de freinage sur la voiture ne peut être que les forces externes qui doivent être dans la voiture et dans le sens opposé à celui du véhicule, et la pression des forces externes est aléatoire et incontrôlable, de sorte que la voiture doit être équipée d'une série de dispositifs pour réaliser ces fonctions [5].

I.4. Classification des freins

Les freins peuvent être classés en suivant :

D'après la forme de l'organe de friction utilisé :

- Frein à sabots (rotor cylindriques ou rotor à gorge),
- Freins coniques (rotor conique ou rotor à gorge),
- Frein à enroulement (ou à bandes) (rotor cylindriques),
- Frein à mâchoires (rotor-tambour cylindrique),
- Frein à disques (cas particulier des freins coniques d'angle au sommet égale à 180°).

I.5. Les fonctions d'un système de freinage

Un véhicule est relié à la chaussée par les forces normales et de traction produit par les pneus. Les forces de freinage, de direction ou d'accélération doivent être générées par la petite surface de roulement du pneu en contact avec le sol. Seules les forces égales inférieure ou égale au produit de la force normale du pneu et du coefficient de chaussée-pneu du frottement peuvent être transmises entre le véhicule et le sol.

Même le freinage idéal et le système de contrôle de la stabilité ne peut pas utiliser plus de traction que celle fournie par les pneus et route.

L'utilisation sûre d'un véhicule automobile nécessite un réglage continu de son la vitesse à l'évolution des conditions de circulation. Les freins et les pneus avec le système de

direction sont les composants les plus critiques de prévention des accidents de la sécurité un véhicule à moteur.

Les freins doivent fonctionner en toute sécurité dans tous les cas raisonnablement prévisibles les conditions d'exploitation, y compris les routes glissantes, mouillées et sèches; avec un léger ou véhicule complètement chargé; en freinage droit ou en virage; avec neuf ou usé les freins; lorsqu'il est appliqué par le conducteur novice ou expérimenté; sur lisse ou rugueux routes; ou en tirant une remorque.

Les fonctions de base d'un système de freinage doivent être assurées dans des conditions prévisibles.

Circonstances, à un coût raisonnable et à l'usure des freins tout en offrant stabilité directionnelle et utilisation acceptable du frottement sur la chaussée.

Le système de freinage doit être conforme à toutes les normes de sécurité applicables.

Sous la plupart des conditions, les normes de sécurité sont considérées comme des performances minimales exigences [1].

I.6. Les composants de système de freinage

La figure ci-dessous présente les composants de système de freinage.

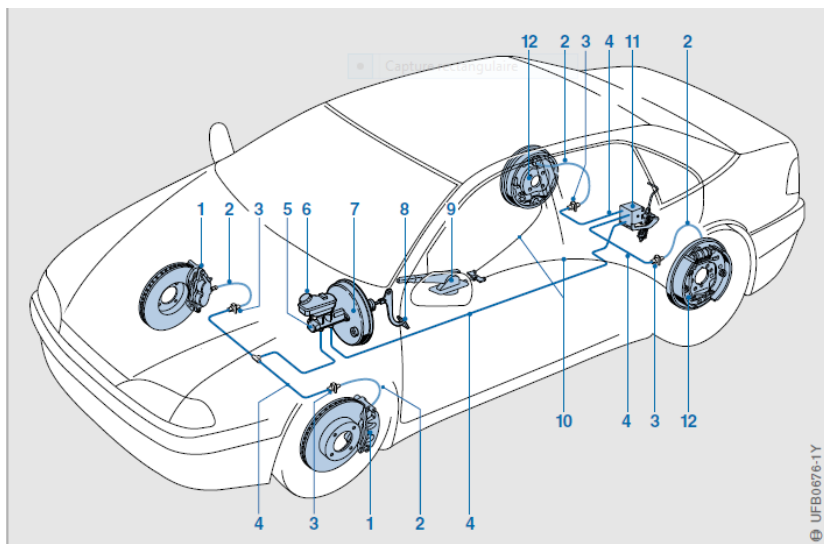


Fig. I.2. Les composants de système de freinage

Tab. I.1. Les composants de système de freinage

1 : Frein avant (frein à disque)	7 : Unité d'asservissement de frein
2 : Flexible de frein	8 : Pédale de frein
3 : Raccordement du tuyau de frein et du flexible de frein	9 : Levier de frein à main
4 : Tuyau de frein	10 : Câble de frein (Frein à main)
5 : Maître-cylindre	11 : Réducteur de force de freinage
6 : Réservoir de liquide à frein	12 : Frein arrière (tambour frein dans ce cas) [2].

I.7. Les freins complémentaires ou ralentisseurs

I.7.1. Les ralentisseurs pneumatiques

Le premier ralentisseur pneumatique obligatoire sur tout véhicule est le ralentisseur sur échappement à pied. Différents dispositifs de freins complémentaires basés sur les décalages de soupape ou agissant sur les échappements des chambres moteur apparaissent chez les différents constructeurs de camions.

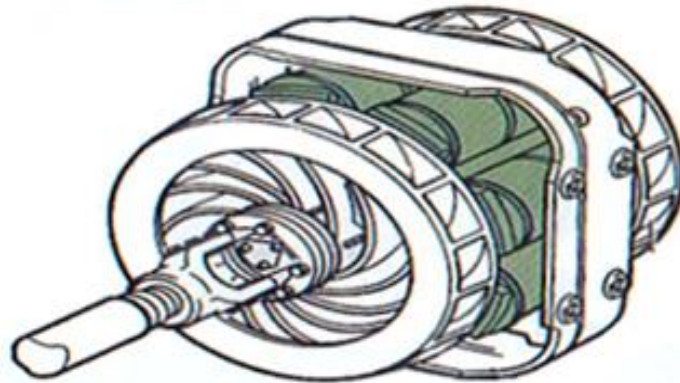
L'efficacité des ralentisseurs complémentaires pneumatiques dépend beaucoup du régime moteur (ceci est d'autant plus difficile que les plages de régime moteur varient d'un constructeur à l'autre) ; le conducteur se trouve en permanence confronté à deux stratégies contradictoires à savoir :

- Avoir des tours moteurs pour améliorer l'efficacité de ralentissement,
- Diminuer les tours moteurs pour diminuer la consommation de gas-oil.

I.7.2. Les ralentisseurs électriques

Ce type de ralentisseur se rajoute sur le véhicule et agit sur l'arbre de transmission. Il se commande par « plots ». Le plus connu d'entre eux est le TELMA. La commande s'effectue à l'aide d'une poignée au niveau du volant. L'utilisation de cet équipement doit se faire dans un régime moteur où le risque de calage moteur est limité.

En freinage d'urgence, un violent passage au dernier plot et notamment sur route mouillée peut provoquer un glissement du véhicule. Le principal inconvénient est sa perte d'efficacité due à la montée en température lors d'utilisation fréquente [6].



. Fig. I.3. Ralentisseurs électriques

I.7.3. Les ralentisseurs hydrauliques

Deux types de ralentisseurs hydrauliques sont couramment utilisés et ont comme avantage principal leurs capacités à dissiper l'énergie de freinage.

Un premier ralentisseur hydraulique sur boîte de vitesse ZF se nomme in tarder. Son principe est le freinage d'une hélice de boîte de vitesse par pression hydraulique. Nous reconnaissons le dispositif par la présence d'un important refroidisseur de boîte.

Et le deuxième ralentisseur pour les autres boîtes de vitesse, le ralentisseur utilisé est de type VOIGT connecté sur la transmission (en sortie de boîte). Il est constitué d'une hélice frappée par un fluide sous pression en sens opposé à la rotation. Ce sont de loin les dispositifs de freins complémentaires les plus efficaces [7].

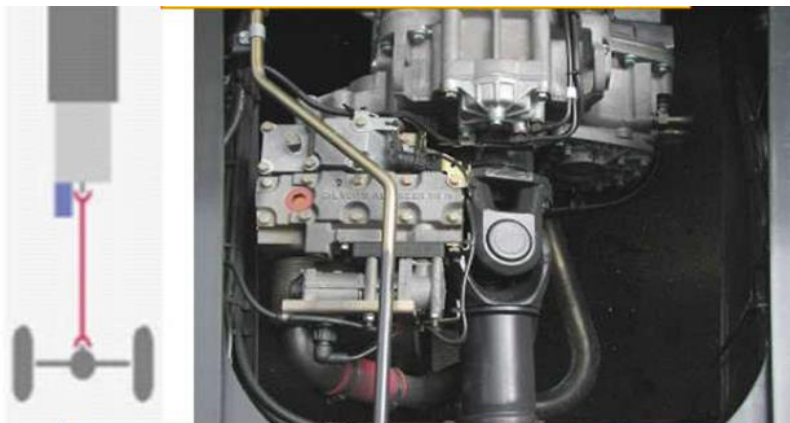


Fig. I.4. Ralentisseurs hydrauliques

I.8.Freins à tambour

I.8.1 Définition

Un frein à tambour est un système de freinage constitué d'une cloche (le tambour), à l'intérieur de laquelle se trouvent au moins deux mâchoires munies de garnitures. Leur fonction est de s'écarter grâce à des cames ou des pistons qui provoquent le frottement de la garniture dans le tambour.

Ces cames sont actionnées par une commande mécanique (câble, tirant) et les pistons sont actionnés par une commande hydraulique, par rapport au frein à disque caractérisé par sa progressivité. Le frein à tambour a tendance à freiner en tout ou rien, car lorsque les mâchoires sont écartées, elles se trouvent "aspirées" par le tambour. Lorsque le frein à tambour est puissant, il provoque facilement des blocages de roues dangereux pour la stabilité du véhicule.



Fig. I.5.Freins à tambour

I.8.2.Principe d'opération

Les freins à tambour pour voitures génèrent leur freinage force sur la surface intérieure d'un tambour de frein.

Ce principe est expliqué ci-dessous à partir de l'exemple d'un frein à tambour simple à partie intégrante mécanisme de frein de stationnement.

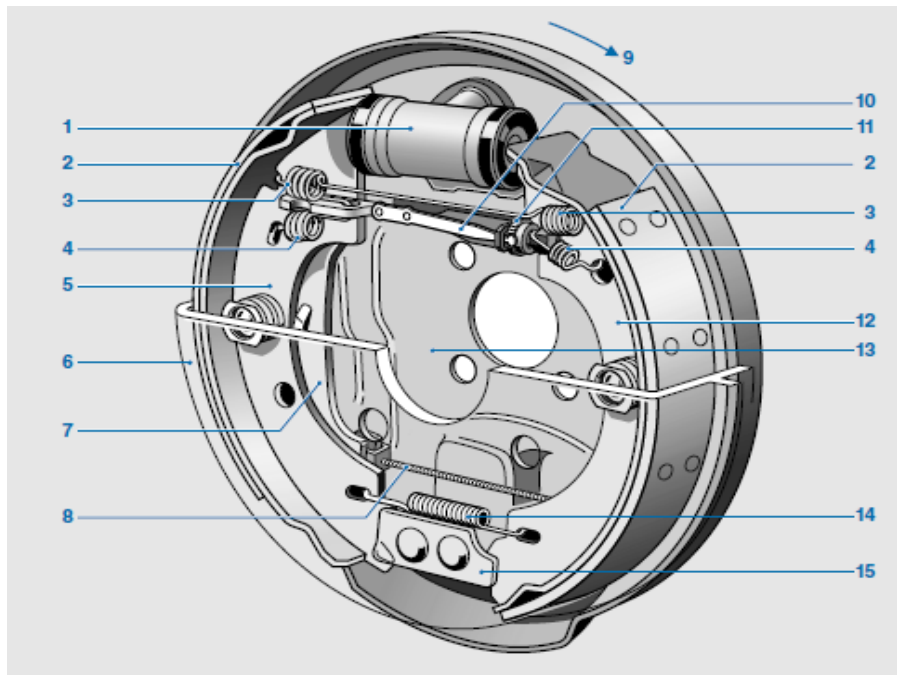


Fig. I.6. Eléments d'un frein tambour

Un cylindre de roue à double effet (1) fonctionne les sabots de frein à tambour.

Cela force la garniture de friction (2) du sabot de frein principal (12) et le patin de frein arrière (5) contre l'intérieur du tambour de frein (6).

L'autre extrémité des sabots de frein du côté opposé au cylindre de roue sont maintenus par un support roulement (15) fixé à l'ancre de frein plaque (13).

Le frein à tambour peut également être utilisé comme frein de stationnement au moyen du frein à main levier (7) et câble de frein à main (8).

Tab .I.2. Les éléments d'un frein tambour

1 cylindre de roue	6 : Tambour de frein	11 : Roue de réglage (avec levier coudé)
2 : Doublure de friction	7 : Levier de frein à main	12 : Chaussures de premier plan
3 : Ressort de rappel (patin de frein)	8 : Câble de frein à main	13 : Plaques d'ancrage
4 : Ressort de rappel (mécanisme à réglage automatique)	9 : Sens de rotation du tambour	14 : Ressort de rappel (patin de frein)
5 : Chaussure de fuite	10 : Bimétal (mécanisme à réglage automatique)	15 : Palier d'appui [2].

I.8.3. Différents types des freins à tambour

I.8.3.1. Frein à tambour Simplex

Dans le frein Simplex, la mâchoire primaire (segment dit comprimé) est pressée contre le tambour dans le sens de rotation de celui-ci (Fig. I.7.).

La mâchoire de frein secondaire (segment dit tendu) est pressée contre le tambour dans le sens de rotation contraire de celui-ci.

L'effet de freinage est presque identique dans les deux sens de rotation. Le frein Simplex est commandé par un cylindre de roue à double effet. L'appui des mâchoires s'effectue soit sur un point fixe, soit sur deux points.

Le réglage de la position des garnitures antifriction a lieu soit sur le cylindre de roue, soit par excentrique [8].

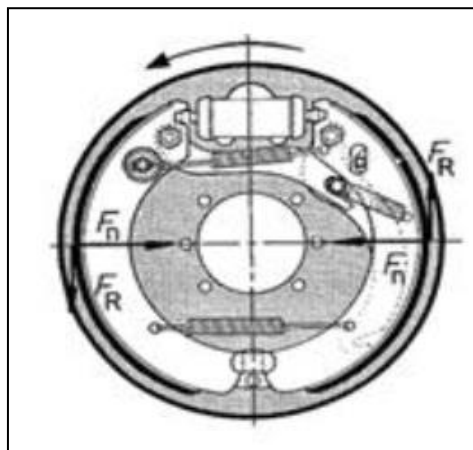


Fig. I.7. Frein à tambour Simplex

I.8.3.2. Frein à tambour Duplex et Duo-Duplex

Dans le frein Duplex, les deux mâchoires de frein sont pressées contre le tambour dans le sens de rotation. Ils agissent tous les deux comme des segments comprimés.

En marche arrière, l'effet du freinage diminue car les segments agissent comme deux segments tendus. Pour obtenir le même effet de freinage en marche avant ou en marche arrière (Fig. I.8.), on utilise le frein Duo-Duplex. Dans ce frein, les deux segments de frein sont comprimés dans les deux sens de marche [8].

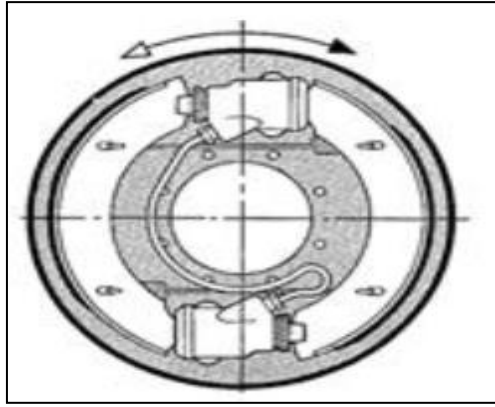


Fig. I.8. Frein Duplex

I.9. Le frein ABS

I.9.1. Définition

L'AntiBlockier System (abrégié en ABS), l'antiblocage de sécurité (terme recommandé en France), le système de freinage Anti-blocage ou les freins Anti-blocage, est un système d'assistance au freinage utilisé sur les véhicules roulants, empêchant les roues de se bloquer pendant les périodes de freinage.

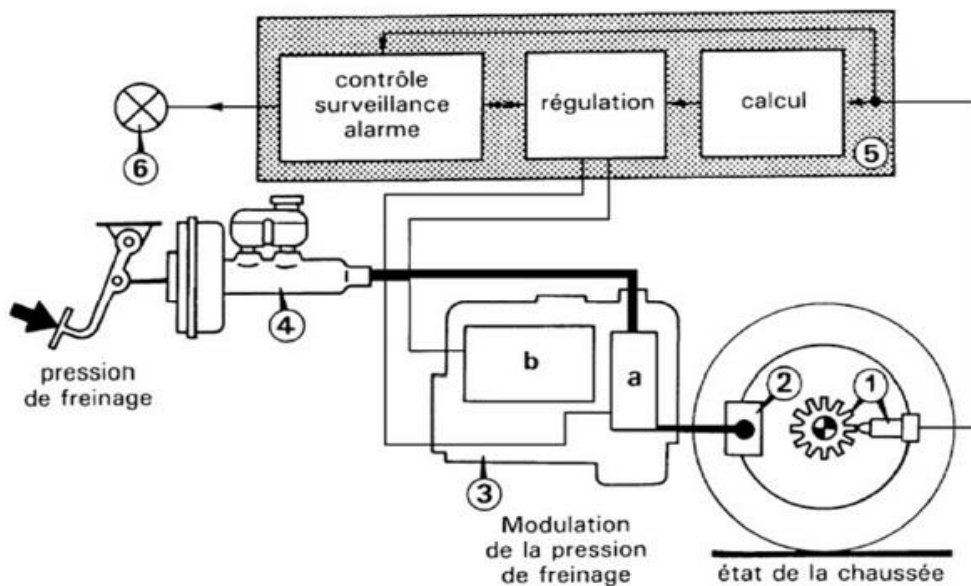


Fig. I.9. Le Système de freinage ABS

I.9.2. Le principe de fonctionnement du frein ABS

Le principe de fonctionnement est simple : un calculateur électronique gère un bloc d'électrovannes sur le circuit de freinage et surveille individuellement la rotation de chacune des roues à l'aide d'un capteur implanté sur chacune d'elles.

Si le calculateur détecte le blocage (ralentissement significatif par rapport aux autres roues) d'une roue, le frein de celle-ci est relâché immédiatement (sans que le conducteur n'ait à modifier son action sur la pédale de frein).

Le calculateur va permettre la pression de freinage la plus forte possible tout en évitant un blocage des roues.

Le but principal de l'ABS est de permettre de garder le véhicule manœuvrable lors d'un freinage d'urgence et de réduire la distance de freinage [9].

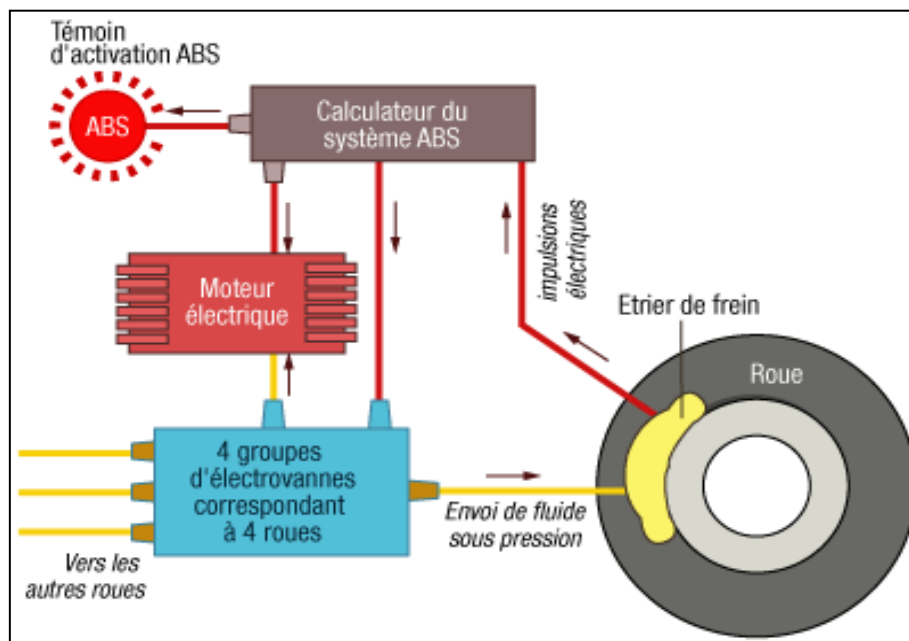


Fig. I.10. Le system ABS

I.10.Frein à disque

I.10.1.Définition

Un frein à disque est un transformateur d'énergie mécanique en énergie calorifique. Il est constitué de trois parties principales :

Un disque (rotor), partie tournante ; son rôle est d'absorber et de dissiper l'énergie mécanique transformée en chaleur au cours du freinage.

Un ensemble étrier (stator), partie non tournante ; il peut être fixe ou avoir un mouvement de translation ou de rotation.

Des surfaces des frottements, appelées également patins ou organes de friction, garnitures ou plaquettes ; elles sont planes et perpendiculaires à l'axe de rotation.

Est composé de :

- un **disque** généralement en fonte lié à la roue par l'intermédiaire du moyeu et qui lui est intérieur;
- **deux plaquettes** de part et d'autre du disque, composées chacune d'une garniture en matériau composite collée ou rivetée sur un support métallique;
- un **étrier** en acier, solidaire de l'essieu (par l'intermédiaire du pivot par exemple), qui supporte les plaquettes ; en forme de chape, il recouvre un secteur du disque;
- un **piston hydraulique** dans le cas d'un étrier flottant ou coulissant ou deux pistons dans le cas d'un étrier fixe posés contre les supports des plaquettes.

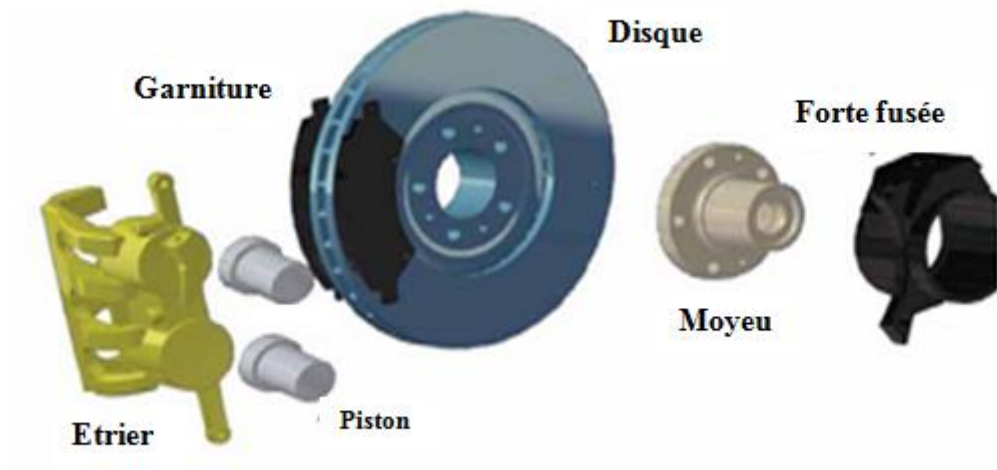


Fig. I.11. Les composants de frein à disque

I.10.2. Les freins à disque

Il existe deux types de montage :

- Le montage rigide
- Le montage flottant

I.10.2.1. Le montage rigide

Deux pistons opposés appliquent chacun une plaquette sur le disque.

Dans tous les cas, le rappel des plaquettes est effectué par le voile du disque et celui des pistons par le joint d'étanchéité, les joints carrés donnent un "rappel" de 0,3 à 0.5 mm.

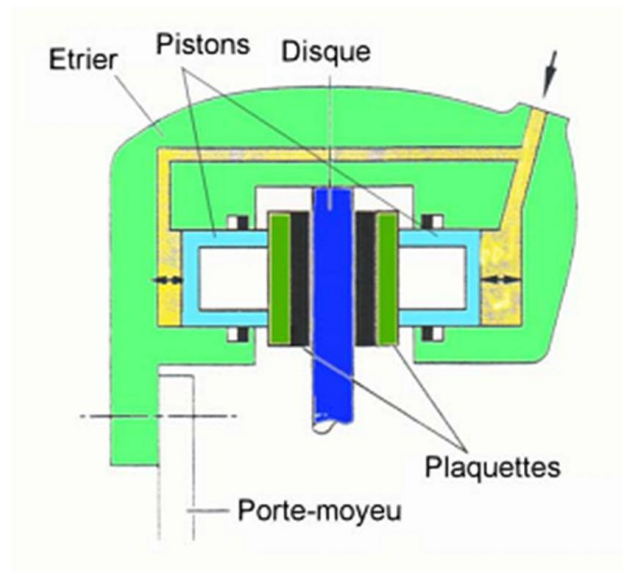


Fig. I.12. Frein à disque (montage rigide)

I.10.2.2. Les montages flottants

Dans un premier temps la plaquette est poussée par le piston contre le disque.

Dans un deuxième temps, le piston ne pouvant plus avancer, c'est l'étrier qui se déplace par rapport à la chape et qui vient appliquer la 2ème plaquette contre le disque [10].

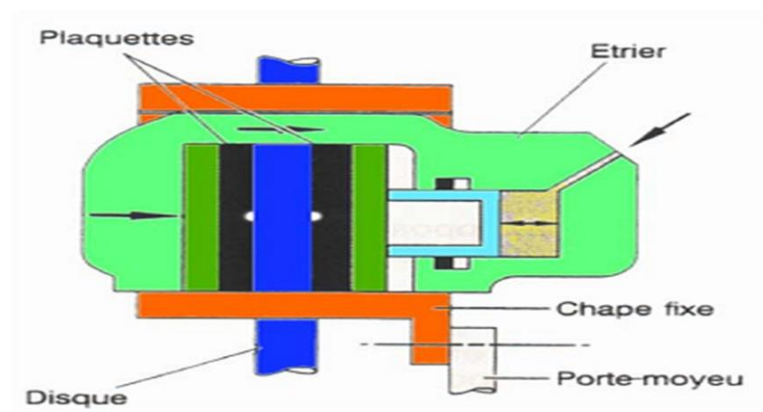


Fig. I.13. Frein à disque (montages flottants)

I.10.3. Eléments d'un frein à disque

Le disque de frein est un organe de friction fortement sollicité, il doit résister à des températures de 600° C à 800° C dont les éléments sont illustrés :

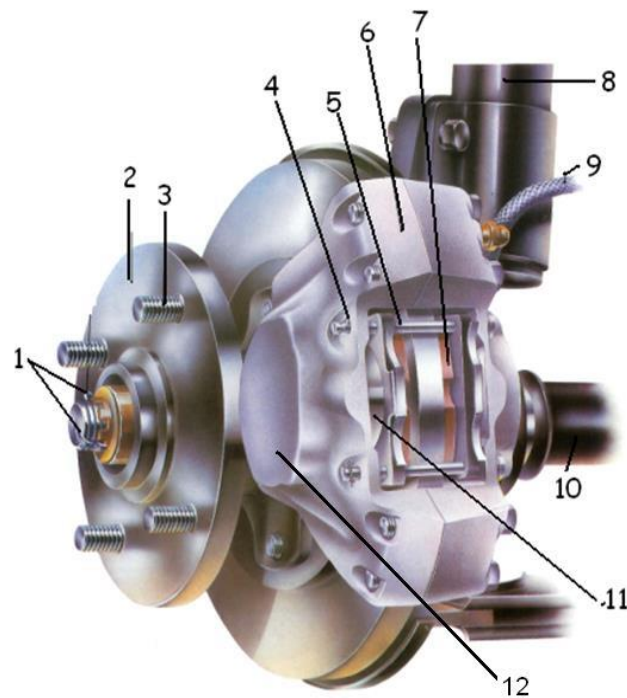


Fig. I.14. Eléments d'un frein á disque

Tab. I.3. Eléments d'un frein á disque

1 : Goupille	5 : Axe de maintien des plaquettes	9 : flexible de frein
2 : Moyeu de roue	6 : Étrier de frein	10 : Demi-arbre de roue
3 : Goujon	7 : Plaquettes de frein	11 : le piston
4 : Goupille	8 : La suspension	12 : Étrier de frein [3].

I.10.3.1.Etrier

Un étrier en acier, solidaire de l'essieu (par l'intermédiaire du pivot par exemple), qui supporte les plaquettes; en forme de chape, il recouvre un secteur du disque.

I.10.3.1.a. Les Étrier (fixe vs flottant)

L'étrier est la pièce du système de freinage qui contient les plaquettes et vient les mettre en mouvement à l'aide d'un ou plusieurs pistons. Deux technologies sont aujourd'hui

utilisées pour cette pièce en fonction de la performance de freinage recherchée : l'étrier fixe et l'étrier flottant.

I.10.3.1.b. Frein à étrier fixe

Un étrier fixe se compose au minimum de deux pistons alors qu'il n'en faut qu'un pour un étrier flottant. Pour un étrier fixe, un piston est placé de chaque côté du disque, au dos de chacune des plaquettes, intérieure comme extérieure.

Lorsque le conducteur freine, chaque piston pousse alors la plaquette qui lui est associée contre la surface du disque en rotation.

L'étrier est lui fixe et ne sert que de guide à la translation du piston et des plaquettes.

I.10.3.1.c. Frein à étrier flottant

Dans le cas de l'étrier flottant, un seul piston est nécessaire du côté intérieur du système.

La plaquette extérieure est alors plaquée contre le disque par le coulissement de l'étrier dans un porte étrier.

Quand la pression est appliquée, le piston avance et vient pousser la plaquette intérieure contre le disque.

Quand la plaquette intérieure est en contact avec le disque, l'effort de réaction appliqué à l'étrier le fait coulisser dans la direction opposée au mouvement de la plaquette, de sorte qu'il vient également déplacer la plaquette extérieure contre le disque.

Cette conception a l'avantage d'être plus légère et moins coûteuse, ce qui en fait la solution la plus répandue dans l'industrie automobile.

Cela dit, les véhicules nécessitant de hautes performances de freinage, notamment en sport automobile, sont eux équipés de systèmes à étrier fixe possédant plusieurs pistons par plaquettes [11].

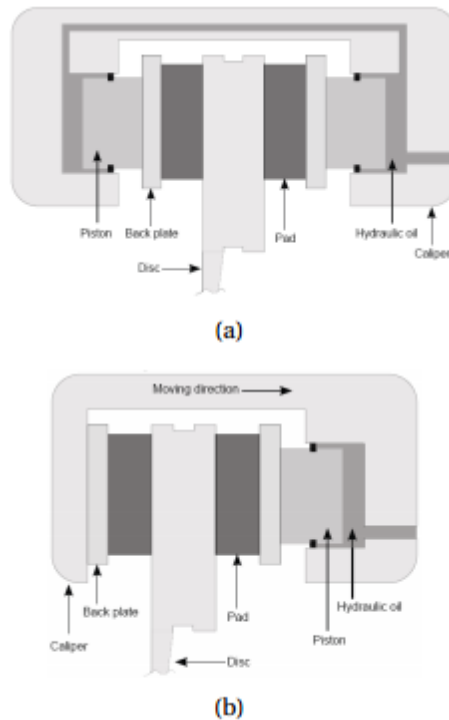


Fig. I.15. Comparaison des technologies d'étrier fixe (a) et flottant (b)

I.10.4. Disque ventilé

Un disque ventilé est plus léger qu'un disque solide et entraîne un transfert de chaleur par convection supplémentaire à la surface du hall de ventilation. Ainsi, le disque ventilé peut contrôler son élévation de température et minimiser les effets de problèmes thermiques tels que la variation du coefficient de frottement des plaquettes, l'évanouissement des freins et le blocage de la vapeur.

Cependant, le disque ventilé peut aggraver les problèmes de bruit en induisant un champ de température irrégulier autour du disque.

De plus, la capacité thermique du disque ventilé est inférieure à celle du disque solide et la température du disque ventilé peut augmenter relativement plus rapidement que celle du disque solide lors d'un freinage répétitif.

Par conséquent, la capacité thermique et la déformation thermique doivent être soigneusement prises en compte lors de la modification de la forme du disque ventilé [12].

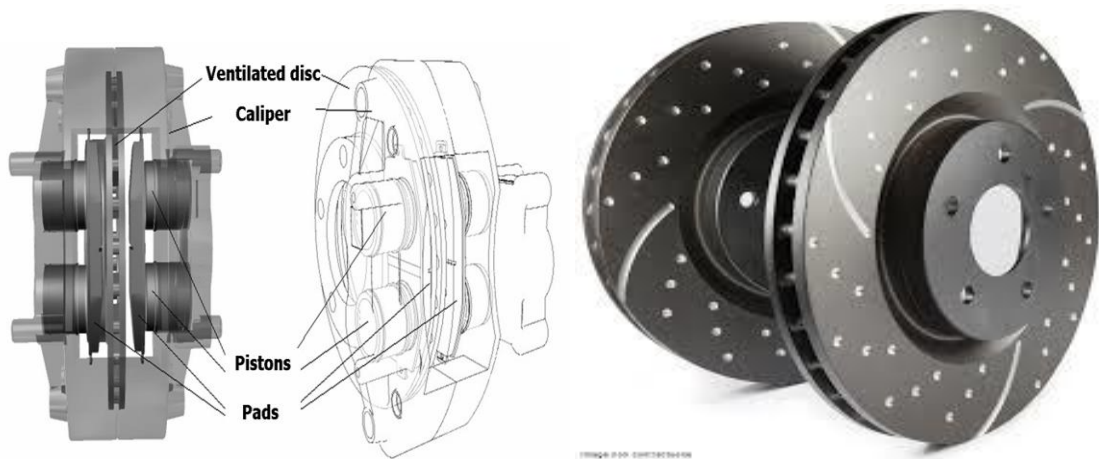


Fig. I.16.Disque ventile

I.10.5.Les disques rainurés

La raison pour laquelle on rainure les disques est trop souvent mal comprise.

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.

En pratique, la chaleur crée des poussières et des gaz entre le disque et la surface de la plaquette, réduisant ainsi l'efficacité [13].



Fig. I.17. Disques rainuré

I.10.6.Les disques percés

Le perçage des disques permet en plus du refroidissement, le nettoyage des disques.

Les trous sont plus efficaces avec le temps car ils sont plus ou moins autonettoyants.

Mais l'augmentation du nombre de trous réduit la surface de friction, un disque avec une masse insuffisante (diamètre trop petit ou trop fin) a tendance à craqueler et casser [14].



Fig. I.18. Disques percés

I.11. Les plaquettes

Les plaquettes de freins sont composées d'une plaque un métal relativement rigide sur laquelle est collée une garniture, semblable à celle que l'on peut trouver dans les freins à tambour.

Elles sont toutefois soumises à des pressions plus élevées, la surface des contacts étant plus réduite. La garniture est très réduite comparativement à la puissance de freinage qu'elle doit fournir. Elle doit avoir de bonnes propriétés thermomécanique et également fournir un coefficient de frottement relativement stable avec la température afin d'assurer un freinage le plus constant possible.

Si la rigidité de la garniture est relativement faible, de l'ordre de quelques Gpa, la plaque au dos de la garniture se doit être relativement rigide d'une part pour transmettre l'effort provenant du piston hydraulique et d'autre part pour répartir la pression le plus uniformément possible 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 de flux de chaleur.

Les plaquettes sont les pièces les plus essentielles de l'étrier, elles assurent le pincement du disque et de ce fait l'arrêt du véhicule.

Elles doivent supporter des températures importantes liées aux frottements contre le disque (ces températures peuvent atteindre les 800°C) [13].

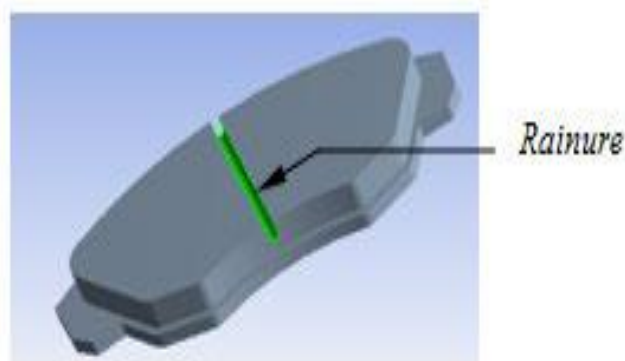


Fig. I.19.Les plaquettes

I.11.1. Les shims

Le shim se compose d'un assemblage de couches métalliques et viscoélastiques. De faible épaisseur, le shim est une cale placée au dos des plaquettes entre la backplate et le piston ou le boîtier (dans le cas d'un système à étrier flottant).

L'assemblage du shim à la plaquette est généralement réalisé par collage mais peut également se faire de manière mécanique (Fig. I.20.).

L'action principale des ces shims est d'amortir les vibrations du système de freinage [BG08] qui sont à l'origine du phénomène de crissement.



Fig. I.20.Illustration d'un shims assemblé de manière mécanique au dos d'une plaquette

I.12.Frein à disque pour poids lourds :**I.12.1.Freins à disque à commande hydraulique :**

La technologie des freins à disque à commande hydraulique pour poids lourds est similaire à celle des freins pour véhicules de tourisme. Ces freins sont fixes ou à étrier coulissant sur une ou deux colonnettes parfaitement protégées contre la corrosion.

Les freins à disque à commande hydraulique pour poids lourds sont associés à un convertisseur hydropneumatique, mais cette disposition qui satisfait au freinage principale n'autorise pas directement la fonction de freinage de stationnement (ou de secours).

I.12.2.Frein à disque à commande pneumatique

Prenons, comme application, un véhicule d'une charge de 85 KN à l'essieu nécessitant des couples de freinage d'environ 15000m. daN (couple moyen). Sur les bases d'encombrement d'une roue de 17,15 cm et pour un coefficient de friction de 0,30, l'effort obtenu avec un cylindrique pneumatique de 193,5cm² sous 7,5 bar.

La démultiplication peut être obtenue par différents système : vis-écrou, came avec bielles, rouleaux sur rampe hélicoïdale, ces trois types étant commandés par l'intermédiaire :

Soit d'un levier

Soit d'un actionneur à coin et à rouleaux directement par un vérin pneumatique intégré

Comportant, dans les deux cas, un dispositif de rattrapage automatique de jeu pour compenser l'usure.

Chapitre II

Etude thermique

II.1. Introduction

Comme on le sait, le système de freinage est utilisé pour amener le véhicule à s'arrêter ou à ralentir.

L'énergie cinétique du véhicule est transformée en énergie thermique.

Les disques et les plaquettes de frein absorbent la plus grande partie de cette énergie et, après cela, cette énergie est dissipée dans l'environnement.

Actuellement, plus de 2000 matériaux et leurs variantes sont utilisés dans la fabrication de composants de freins.

Un disque de frein est généralement en fonte ou en céramique composites, tandis qu'une plaquette de frein est fabriquée à partir d'un matériau de friction.

Au cours du processus de freinage, la température, en raison du frottement entre un disque de frein et des plaquettes de disque, peut avoir des valeurs dans la plage de 200 à 800 °C.

La production de chaleur est fonction de la masse du véhicule, coefficient de frottement, propriétés thermo-physiques du matériau, vitesse et taux de décélération.

La chaleur la dissipation se produira via:

- Par conduction.
- Par rayonnement.
- Par convection [15].

Un système de freinage a pour fonction principale de transformer une énergie mécanique en une énergie calorifique. Cette énergie se caractérise par un échauffement global du disque et des plaquettes lors d'une phase de freinage. Il est d'autant plus intéressant de simuler ce phénomène à plusieurs titres. Pour cela et afin de modéliser ce problème précisément, nous nous intéressons dans cette partie au calcul du flux de la chaleur initial entrant dans le disque au niveau de la zone de contact.

II.2. Définition

II.2.1. Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé **champ de température**. On distingue deux cas [16] :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit **permanent** ou stationnaire.

- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit **variable** ou instationnaire.

II.2.2. 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 [16]:

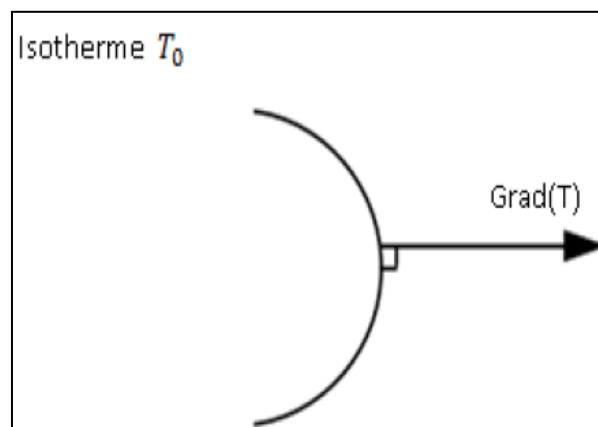


Fig. II.1. Gradient de température

$$\overrightarrow{grad(T)} = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{II.1})$$

Avec : \vec{n} vecteur unitaire de la normale.

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

II.2.3. 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 Wm^{-2} [12]:

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Où S est l'aire de la surface (m^2).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps, elle est exprimée en $W.s$

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.3})$$

II.3. 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.3.1. 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}) [16]:

$$\vec{\varphi} = -k \overrightarrow{grad T} \quad (\text{II.4})$$

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 $W m^{-1}K^{-1}$).

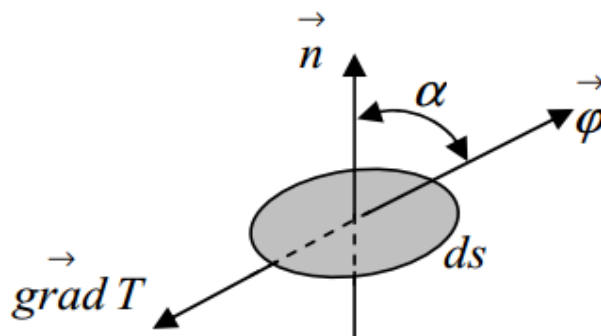


Fig. II.2. Lois de Fourier.

On trouvera dans le tableau II.1 les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux parmi les plus courants.

Tab. II.1. Conductivité thermique de certains matériaux

Matériau	λ (W.m-1. °C-1)
Argent	419
Cuivre	386
Aluminium	204
Acier doux	45
Acier inox	15

II.3.1.1. Résistance thermique

On considère deux surfaces isothermes S_1 et S_2 de températures et ces deux surfaces sont correspondantes c'est à dire que toute ligne de flux quittant la surface S_1 atteint la surface S_2 . Pour un milieu conducteur en régime permanent sans source interne, le bilan thermique s'écrit :

$$\text{div}(\vec{J}Q)=0 \quad (\text{II.5})$$

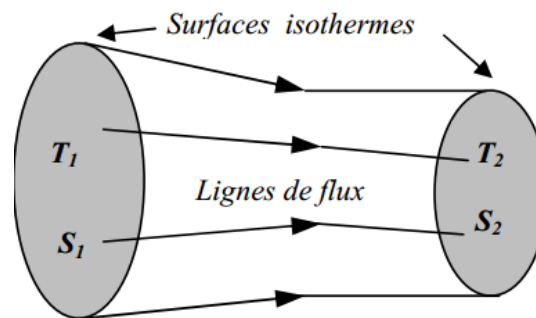


Fig.II.3 : Résistance thermique [18]

Appliquons, sur le volume fermé délimité par les deux surfaces isothermes S_1 et S_2 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]

$$\iiint_V \text{div}(\vec{J}Q)dV = 0 = \iint_{S_1} \text{div}(\vec{J}_1Q)ds_1 + \iint_{S_2} \text{div}(\vec{J}_2Q)ds_2 = -\Phi_1 + \Phi_2 \quad (\text{II.6})$$

Entre surfaces isothermes correspondantes le flux de chaleur est conservé.

Pour une surface isotherme quelconque S du tube de courant

$$\gamma \iint_S -(\overrightarrow{\text{grad}T})_s d\vec{s} = \Phi = \text{Cst} \quad (\text{II.7})$$

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

$$\int_{i \text{ flux}} \overrightarrow{\text{grad} T} \cdot d\vec{l} = T_1 - T_2 \quad (\text{II.8})$$

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

On obtient donc la relation :

$$T_1 - T_2 = R\Phi \quad (\text{II.9})$$

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 :

$$\phi = \frac{\Phi}{S} = h(T_p - T_{\text{car}}) \Rightarrow R = \frac{1}{hS} \quad (\text{II.10})$$

II.3.1.2. Les régimes permanents

Ce sont les régimes pour lesquels la température en tout point du milieu est indépendante du temps, le déséquilibre est entretenu par les sources de chaleur [18].

$$\Delta T(M) = -\frac{P(M)}{\gamma} \quad (\text{II.11})$$

Il s'agit de résoudre le système d'équations linéaires

$$\left(\gamma \frac{\partial T}{\partial n_i} + h_i T\right)_{S_i} = f_i(M_i) \quad (\text{II.12})$$

S_i : Représente la surface de la frontière extérieure i , l'indice i est au maximum égal à 6.

II.3.1.3. Les régimes transitoires

Les régimes transitoires correspondent à l'évolution d'un système d'un état initial (permanent ou en équilibre) vers un état final (permanent ou en équilibre) provoquée par un changement à l'instant initial des sources; le champ de température $T(M, t)$ dépend du champ de température initial $T(M, 0)$ mais l'influence de celui-ci s'estompe avec le temps.

A l'instant initial, au moins une source change, par contre elles demeurent constantes ensuite. Les régimes transitoires ne doivent pas être confondus avec les régimes variables pour lesquels les sources évoluent au cours du temps [18]

$$\Delta T(M) - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{P(M)}{\gamma} \quad (\text{II.13})$$

Le champ de températures est régi par le système d'équations

$$\left(\gamma \frac{\partial T}{\partial n_i} + h_i T\right)_{Si} = f_i(M_i) \quad ; T(M, 0) = F(M) \quad (\text{II.14})$$

La méthode générale de résolution par les fonctions de Green ne peut être envisagée sans posséder une bonne maîtrise préalable de la technique de séparation de variables avec développement en série de fonctions orthogonales.

Les équations gouvernantes du transfert de chaleur transitoire par conduction :

Considérons un matériau isotrope dans le système tridimensionnel dans un domaine. Si l'écoulement de la chaleur dans les directions x , y et z par unité de surface et par unité de temps q_x, q_y, q_z et respectivement, la différence entre le flux sortant et le flux entrant pour un élément de volume $dx dy dz$ est donnée comme suit [18],

$$dydz \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} - q_x\right) + dx dz \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} - q_y\right) + dx dy \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} - q_z\right) \quad (\text{II.15})$$

Pour la conservation de la chaleur, cette quantité doit être égale à la somme de la chaleur produite dans l'élément dans le temps d'unité $Q dx dy dz$ et la chaleur gagnée dans un temps d'unité dû au changement de température, à savoir,

$$-\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (\text{II.16})$$

Où c est la capacité de la chaleur spécifique, ρ est la densité, et $T(x, y, z, t)$ est la distribution de la température.

La condition de l'égalité mène au rapport différentiel :

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz = 0 \quad (\text{II.17})$$

Les flux de la chaleur dans les directions x , y et z sont :

$$\begin{cases} q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

La substitution de ces flux de la chaleur dans l'équation différentiel mène à une équation d'ordre plus supérieur dans une variable indépendante simple T ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz = 0 \quad (\text{II.19})$$

D'une manière semblable, l'équation tridimensionnelle de la conduction de la chaleur peut être obtenue. On peut également la écrire dans la notation vectorielle comme :

$$\nabla \cdot k \nabla T + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (\text{II.20})$$

II.3.2. La convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu.

La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes.

D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne des molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie.

Dans ce cas, l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus uniquement aux différences de température, on dit que la convection est naturelle ou libre.

Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. On peut exprimer la quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide et un fluide à l'aide de l'équation suivante.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton. [16]

$$\varphi = hS(T_p - T_\infty) \quad (\text{II.21})$$

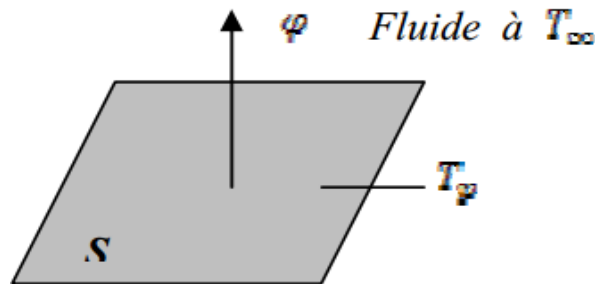


Fig.II.4.Définition d'un élément de surface d'échange

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

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

T_p : Température de la surface (C°)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (C°)

S : Aire de la surface de contact solide / fluide (m^2)

Sous cette forme, l'équation de la convection semble être tout à fait simple. En réalité, il n'en est rien, car l'Éq ($q = hS(T_1 - T_2)$) est une définition de l'unité de conductance thermique moyenne par convection plutôt qu'une loi de transmission de la chaleur par convection.

Le coefficient d'échange de chaleur par convection est, en effet, une fonction l'écoulement du fluide, des propriétés thermiques du milieu fluide et de la géométrie du système. Sa valeur numérique n'est généralement pas uniforme sur une surface et elle dépend également du lieu où on mesure la température.

Comme le transfert d'énergie par convection est intimement lié au mouvement du fluide, il est nécessaire de connaître le mécanisme de l'écoulement du fluide avant d'examiner celui de l'écoulement de la chaleur.

Un des plus importants aspects de l'étude hydrodynamique est d'établir si le mouvement du fluide est laminaire ou turbulent. Lorsqu'un fluide s'écoule en mouvement laminaire le long d'une surface dont la température est différente de celle du fluide, la chaleur est transmise seulement par conduction aussi bien à l'intérieur du fluide qu'à l'interface entre le fluide et la surface. Par contre dans un écoulement turbulent, le mécanisme de conduction est modifié et favorisé par d'innombrables tourbillons. Les petits volumes de fluide en se mélangeant avec d'autres jouent le rôle de porteur d'énergie.

Par conséquent un accroissement de turbulence amène une augmentation de la quantité de chaleur s'écoulant par convection.

Lorsqu'un fluide s'écoule le long d'une surface, indépendamment de la nature de l'écoulement 'laminaire ou turbulent' les molécules à proximité de la surface sont ralenties à cause des forces visqueuses. Les molécules du fluide adjacentes à la surface y adhèrent et ont une vitesse nulle par rapport à la paroi.

Les autres molécules du fluide s'efforçant de glisser sur les premières sont ralenties, phénomène qui donne naissance aux forces de cisaillement. Dans un écoulement laminaire l'interaction, appelée cisaillement visqueux, s'effectue entre les molécules à une échelle microscopique. Dans l'écoulement turbulent une interaction entre les masses du fluide à une échelle macroscopique, appelée cisaillement turbulent, se superpose au cisaillement visqueux. Les effets des forces visqueuses qui prennent naissance à la paroi s'étendent dans la masse du fluide, mais à une faible distance de la paroi la vitesse des particules fluides atteint celle de l'écoulement libre non perturbé.

La région dans laquelle sont localisées les variations notables de la vitesse est appelée couche limite hydrodynamique. L'épaisseur de cette couche est définie comme étant la distance comptée à partir de la paroi où la vitesse locale atteint 99 % de la vitesse u_{∞} du fluide loin de la paroi. Le profil des vitesses à l'intérieur de la couche limite dépend de la nature de l'écoulement. Comme le fluide poursuit son écoulement le long de la plaque, les forces de cisaillement ralentissent de plus en plus son mouvement et l'épaisseur de la couche limite augmente. La Figure II.5 montre l'accroissement de la couche limite et les profils des vitesses en différents points de la plaque [20].

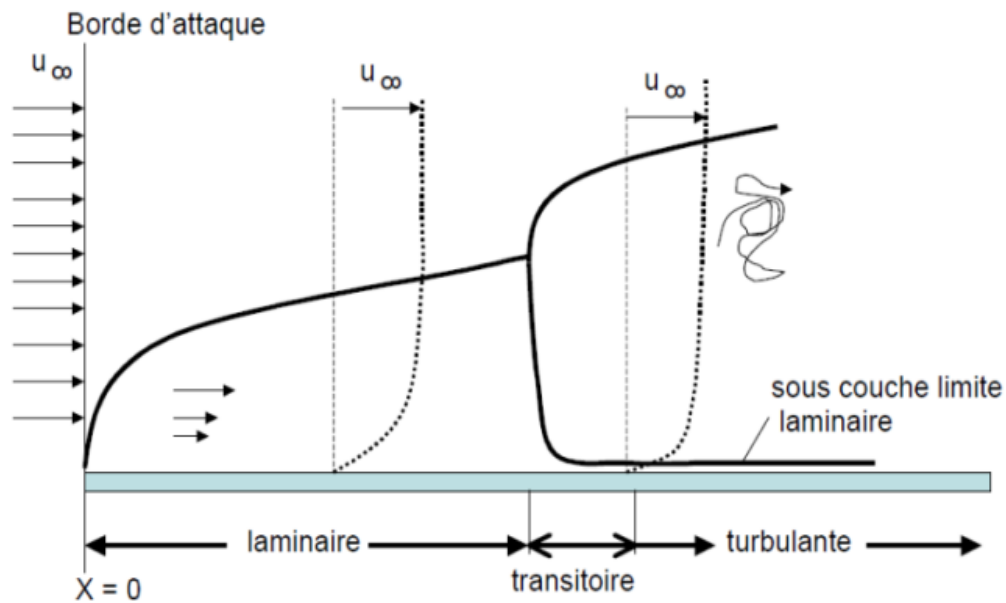


Fig. II.5 : Profils des vitesses pour les couches limites laminaire et turbulente dans un écoulement sur une plaque plane.

Les profils des vitesses près du bord d'attaque sont représentatifs des couches limites laminaires. Cependant l'écoulement à l'intérieur de la couche limite reste laminaire seulement sur une certaine distance à partir du bord d'attaque et devient ensuite turbulent. A l'intérieur de la couche limite turbulente, il subsiste, tout contre la paroi, une très mince couche en écoulement presque laminaire appelée sous couche limite laminaire ou film laminaire.

La distance entre le bord d'attaque et le point de transition où la couche limite devient turbulente est appelée longueur critique.

II.3.2.1. Le nombre de Nusselt

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

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (\text{II.22})$$

II.3.2.2. Le nombre de Reynolds

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

$$Re = \frac{umd}{\nu} \quad (\text{II.23})$$

Avec ν : la viscosité cinématique de fluide [13].

II.3.3. Le 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 [16]:

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.24})$$

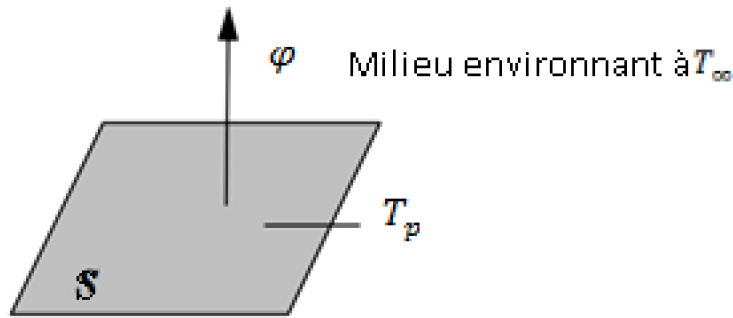


Fig. II.6. Élément en rayonnement.

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.4. Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante) [16] :

$$\varphi_{st} = \rho V c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

φ_{st} : Flux de chaleur stocké (W)

ρ : Masse volumique (kg m^{-3})

V: Volume (m^3)

c : Chaleur massique ($\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$)

T : Température (°C)

t : Temps (s)

ρ, V, c sont supposés constants, le produit $\rho V c$ est appelé **la capacitance thermique** du corps.

II.5. 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 [22].

II.5.1. 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 [23].

II.6. 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 [24].

Chapitre III

Résultats Numériques

III.1.Présentation des logiciels

III.1.1.SolidWorks

Le logiciel de CAO SolidWorks est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises.

Il la génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation.

Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

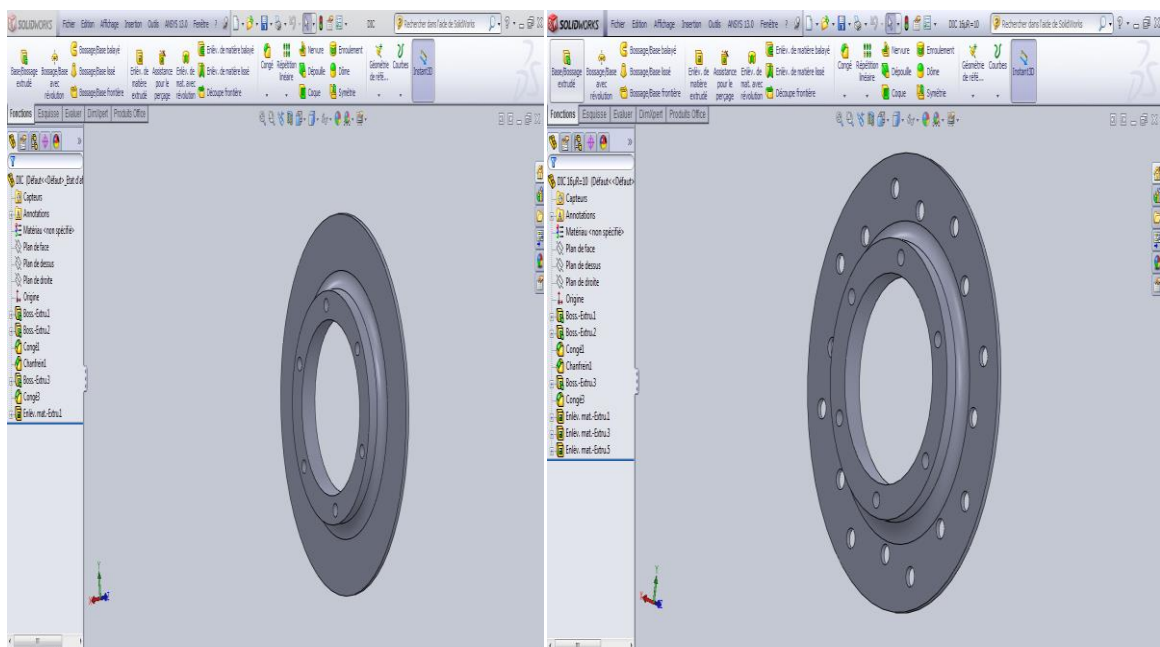


Fig. III.1. Géométrie de Disque simple
Etudié dans le logiciel SolidWork

Fig.III.2. Géométrie de Disque a huit trous
Etudié dans le logiciel SolidWorks

III.1.2.ANSYS

ANSYS est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception (gain de temps). Les industriels conçoivent des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

Généralement, les logiciels de calcul par éléments finis sont très peu abordables et nécessitent d'importantes connaissances en calcul.

L'interface Workbench d'ANSYS qui englobe les différents niveaux de l'outil de simulation et les différents modules a été conçue pour être utilisée sans avoir nécessairement une formation basée sur les éléments finis :

- L'interface est très intuitive offrant une prise en main très rapide du logiciel.
- L'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage facilitent la préparation du modèle.

III.2. Influence du matériau sur le disque de frein simple

Nous faisons l'étude suivante sur des matériaux différents (acier, alliage d'aluminium et fonte grise) sur un disque simple pour que nous puissions savoir le matériel secondaire qu'il n'a pas l'importance par rapport aux autres matériaux.

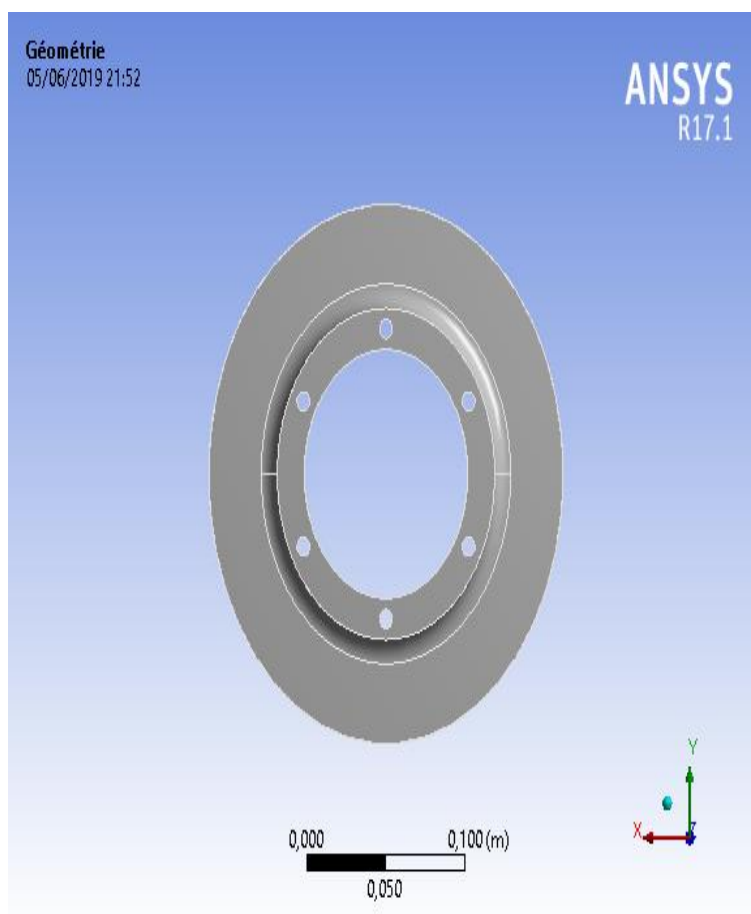


Fig. III.3. Disque simple géométrie ANSYS

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques de maillage et les données pour le disque simple

Tab.III.1.Caractéristiques de maillage

Pièce	Convection	Flux de chaleur	
Disque simple	17.407	4197000	
	Type des éléments	Nombre de nœuds	Nombre d'éléments
	Tétraédrique à 10 nœuds	97487	489336

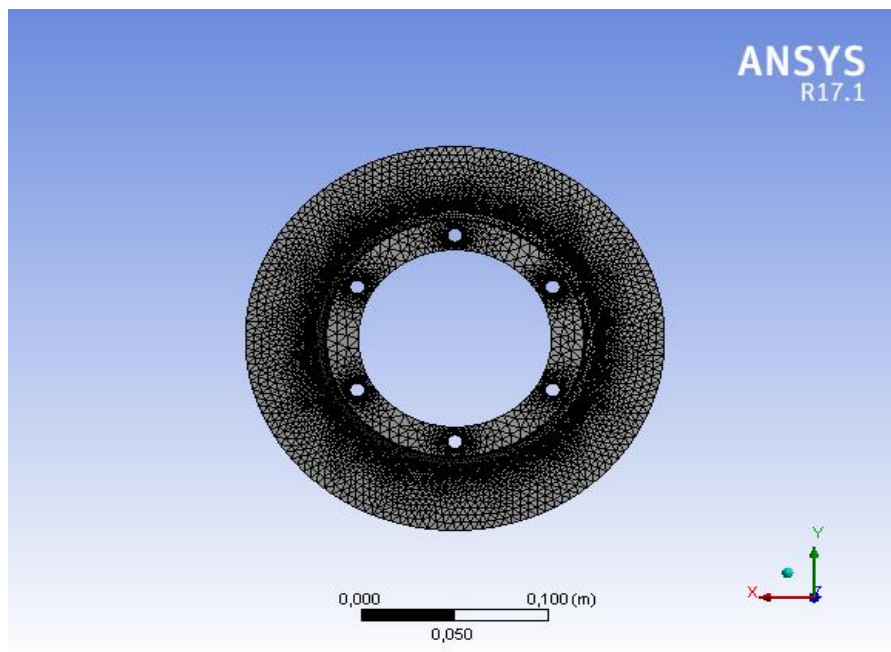


Fig.III.4.Maillage de disque simple

III.2.1.Acier standard

III.2.1.1.Les propriétés mécaniques de l'acier standard

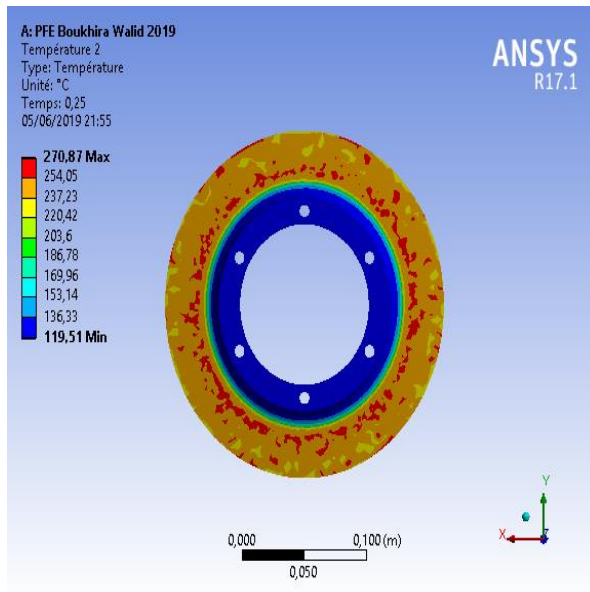
Le tableau III.2 est données les propriétés mécaniques de l'acier standard

Tab.III.2.Les caractéristiques d'acier standard

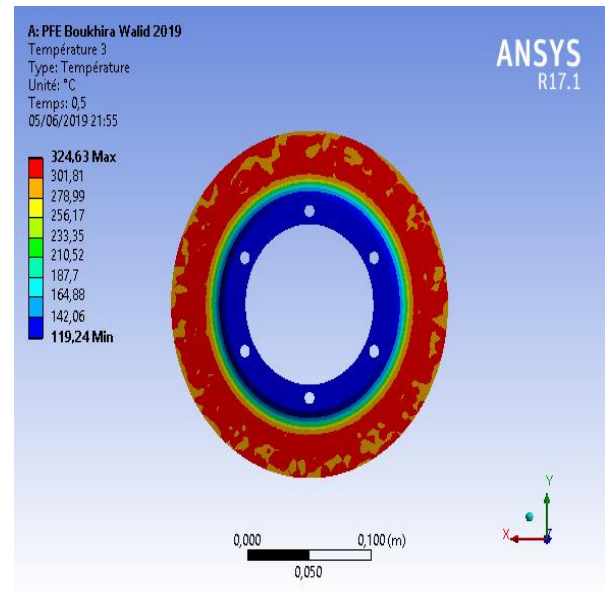
Masse volumique	7850	kg/m ³
Conductivité thermique	60,5	W/m c°
Chaleur spécifique	350	J/kg c°

III.2.1.2.Résultats numériques : Apres les calculs on a trouvé.

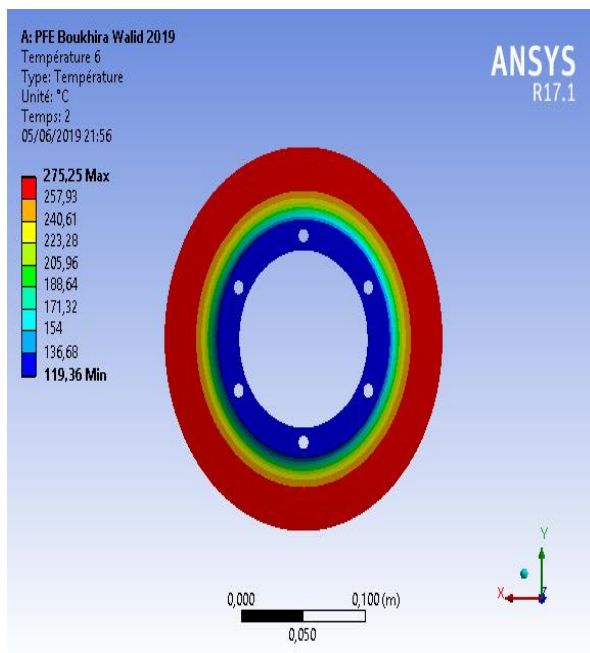
III.2.1.2.a. Température : Distribution de la température.



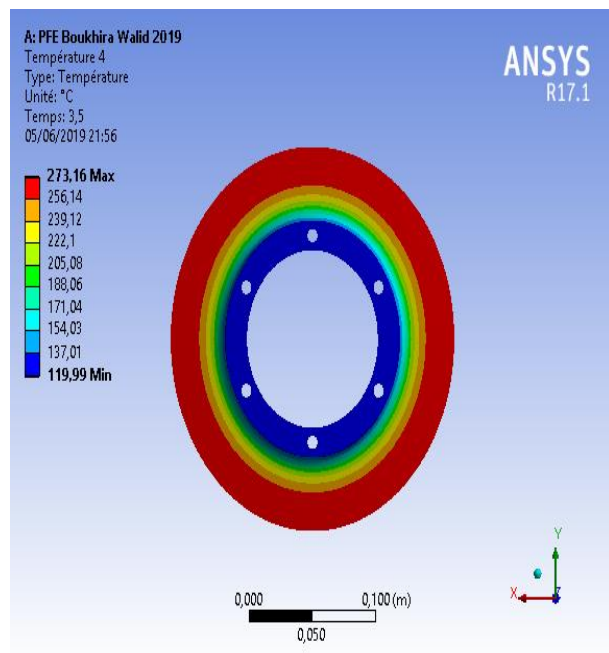
t=0,25s



t=0,5s



t=2s



t=3.5s

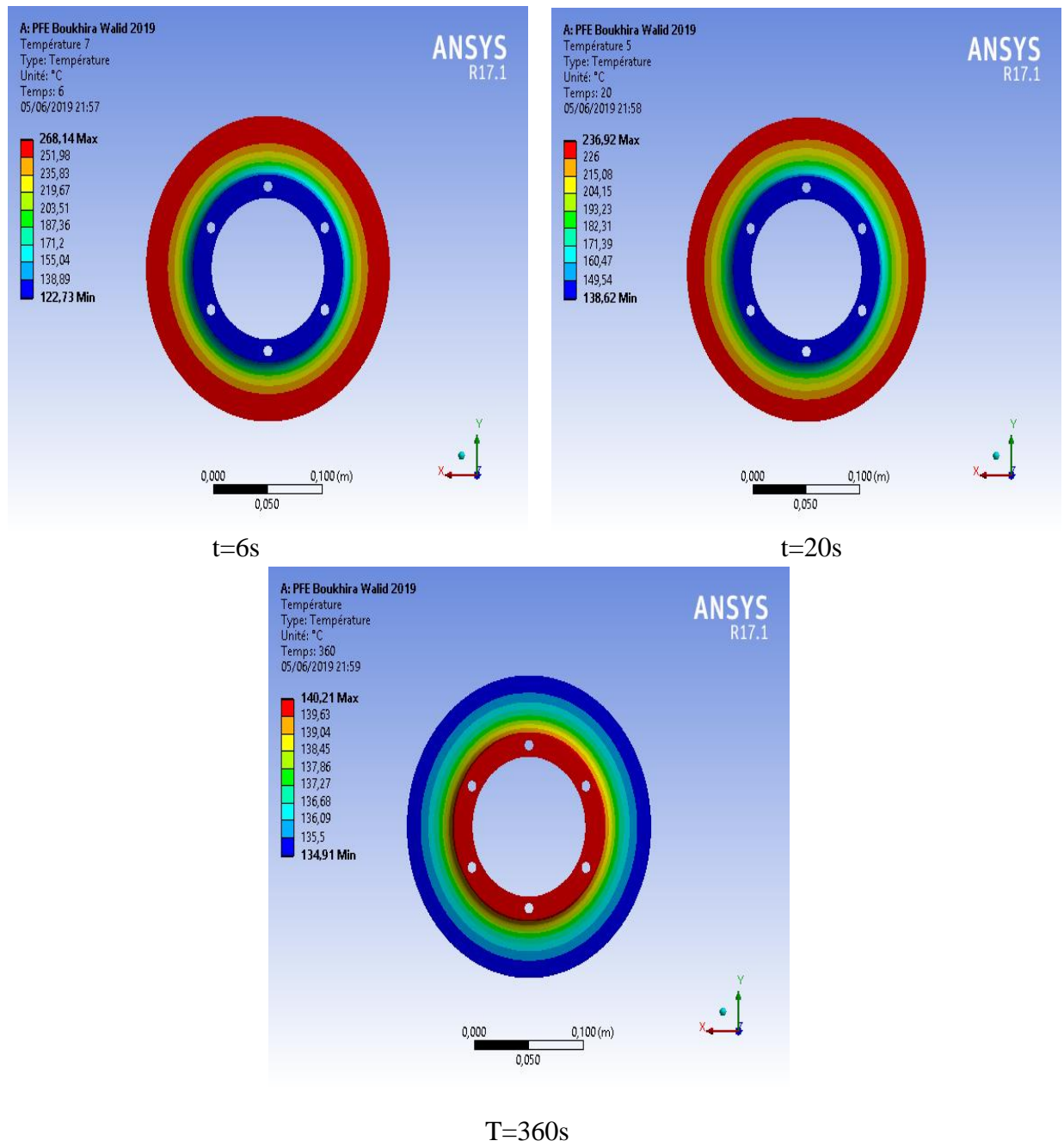


Fig. III.5. Distribution de la température dans le disque simple en Acier standard à différents instants

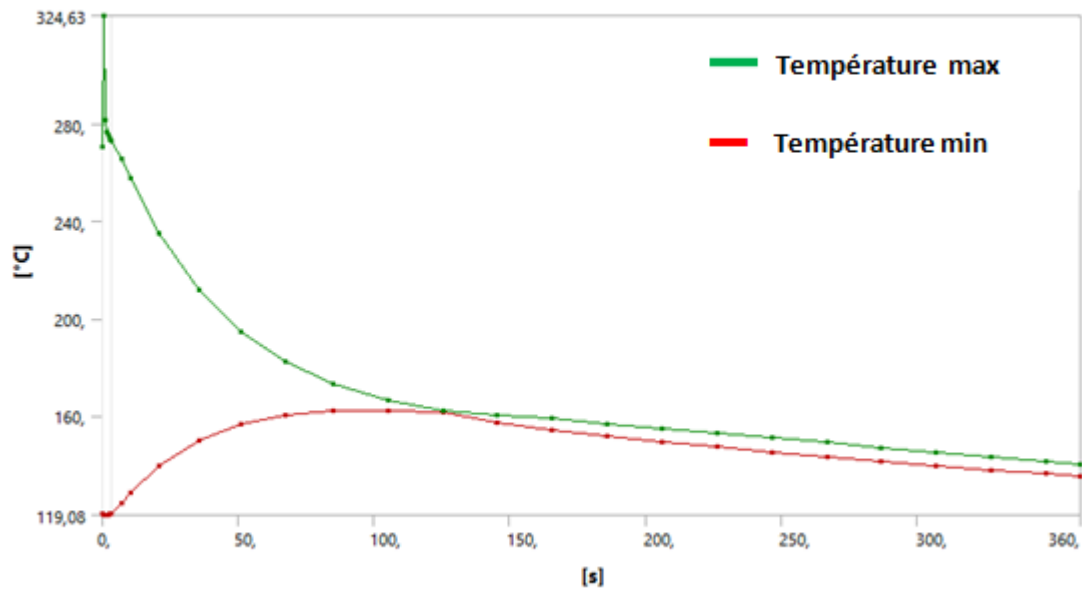


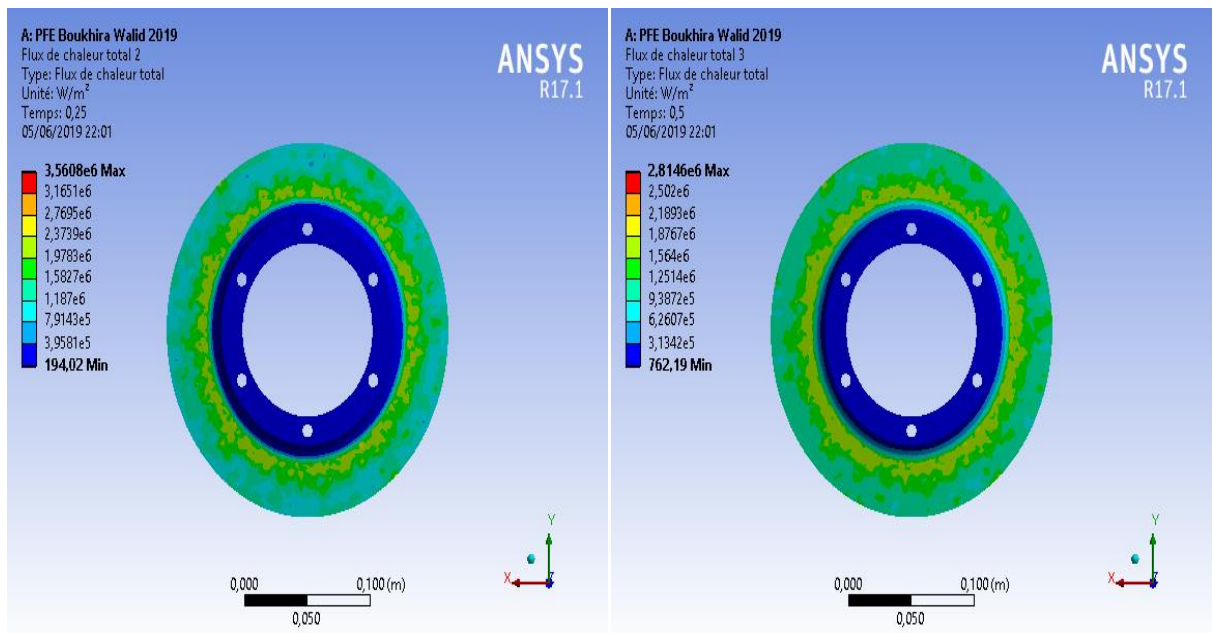
Fig. III.6.Évolution de la température en fonction du temps (Acier standard)

Les figures III.5 et III.6 montre l'évolution de la température en fonction du temps de disque simple en Acier standard.

On remarque qu'à l'instant $t=0,5$ s, la température atteint son maximum de 324.63 C°.

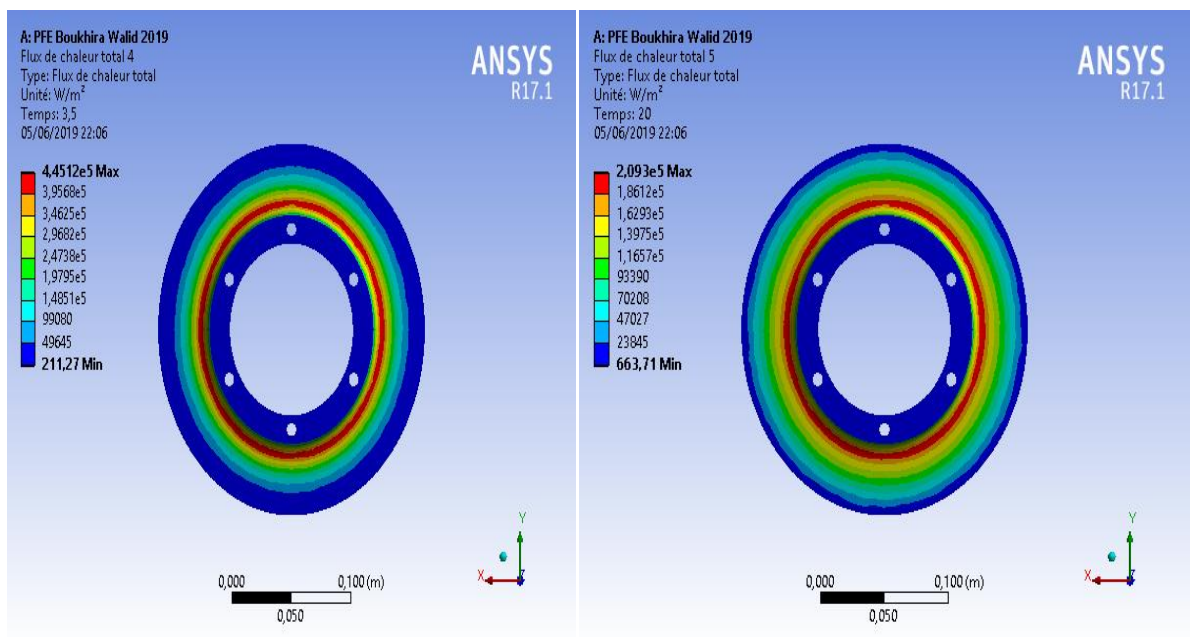
De l'instant $t= 0.5$ s à $t= 360$ s, la variation de la température en fonction du temps devient moins importante.

III.2.1.2.b. Flux de chaleurs : Distribution de Flux de chaleurs.



t=0,25s

t=0,5s



t=3,5s

t=20s

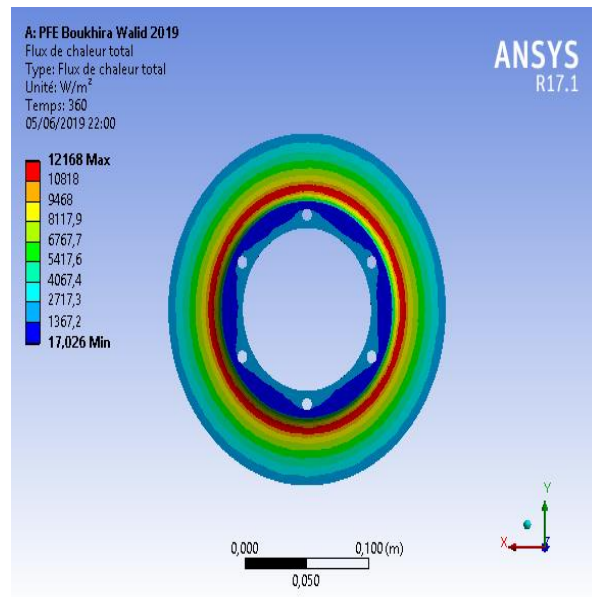


Fig. III.7. Distribution de flux de chaleurs dans le disque simple en Acier standard à différents instants

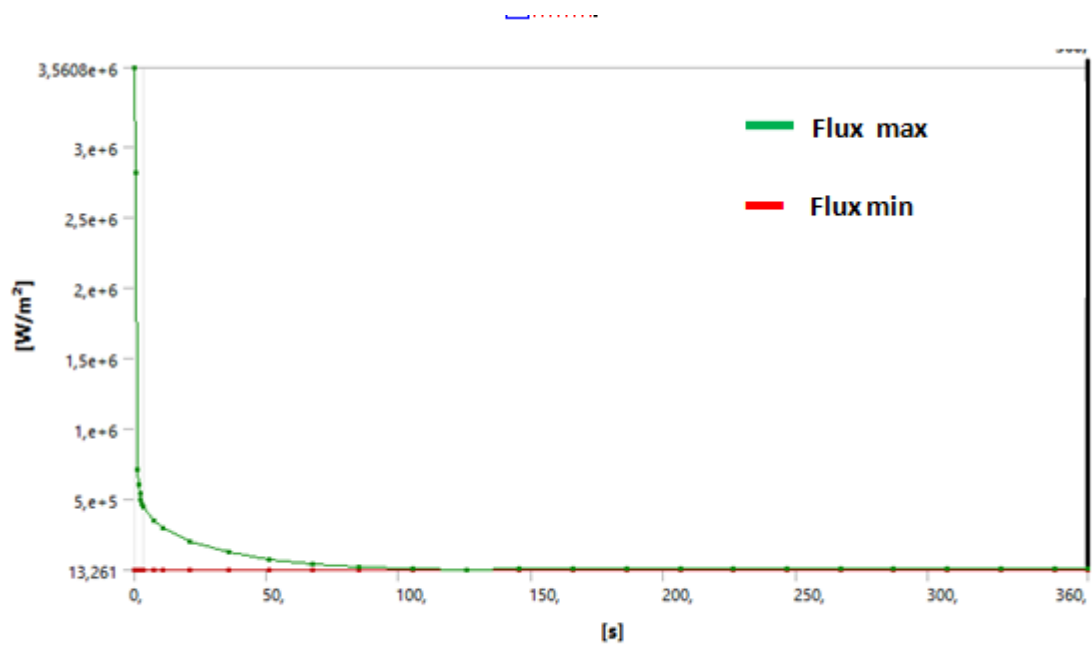


Fig. III.8. Évolution de flux de chaleurs en fonction du temps (acier standard)

Les figures III.7 et III.8 montre l'évolution de flux de chaleur en fonction du temps de disque simple en acier standard.

On remarque qu'à l'instant $t=0,25$ s, le flux de chaleur atteint son maximum de 3.5608×10^6 w/m³.

De l'instant $t = 0.25s$ à $t = 360s$, la variation de flux de chaleur en fonction du temps devient moins important.

III.2.2. Alliage d'aluminium

III.2.2.1. Les propriétés mécaniques d'Alliage d'aluminium

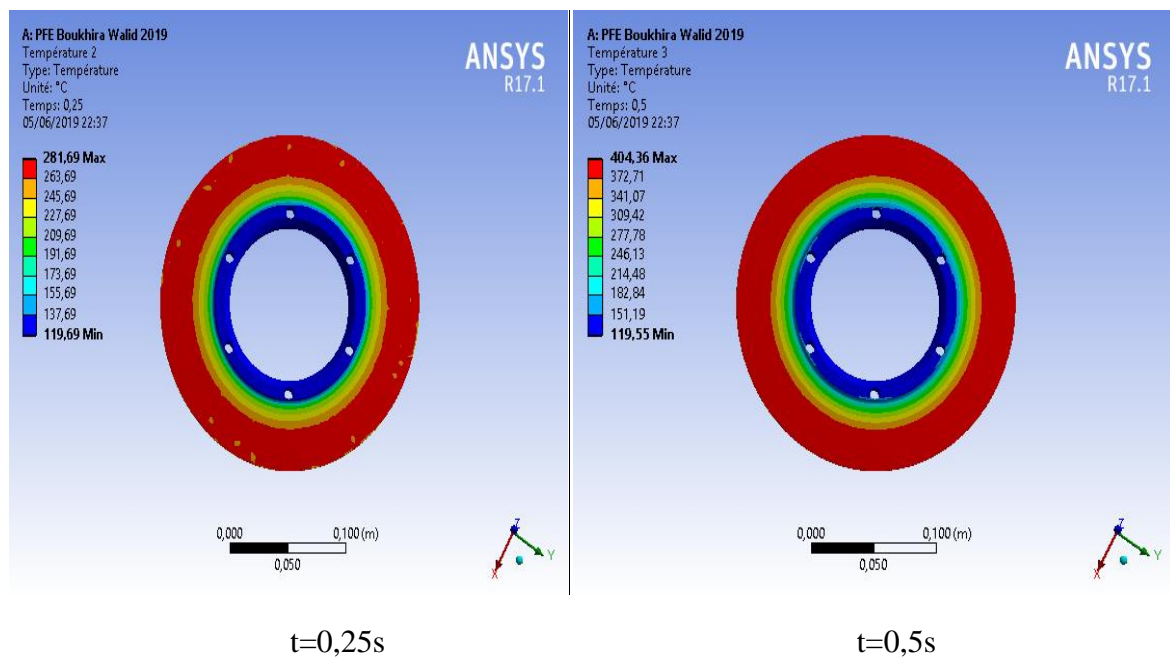
Le tableau III.3 est donné les propriétés mécaniques de l'alliage aluminium :

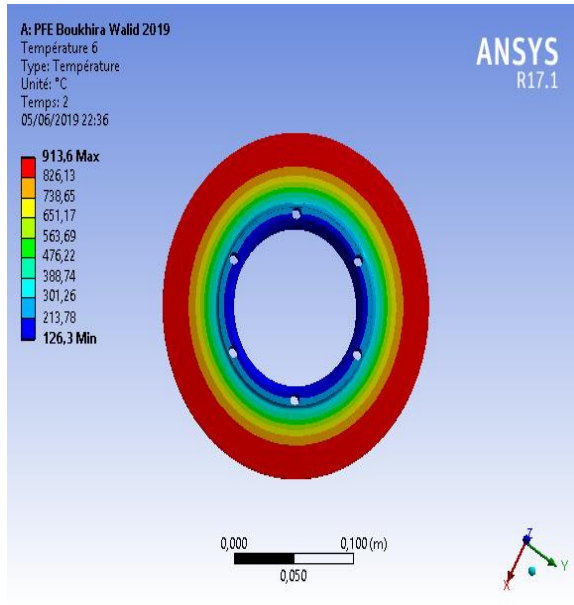
Tab.III.3. Les caractéristiques d'alliage aluminium

Masse volumique	2770	kg/m^3
Conductivité thermique	49	$W/m\ c^\circ$
Chaleur spécifique	875	$J/kg\ c^\circ$

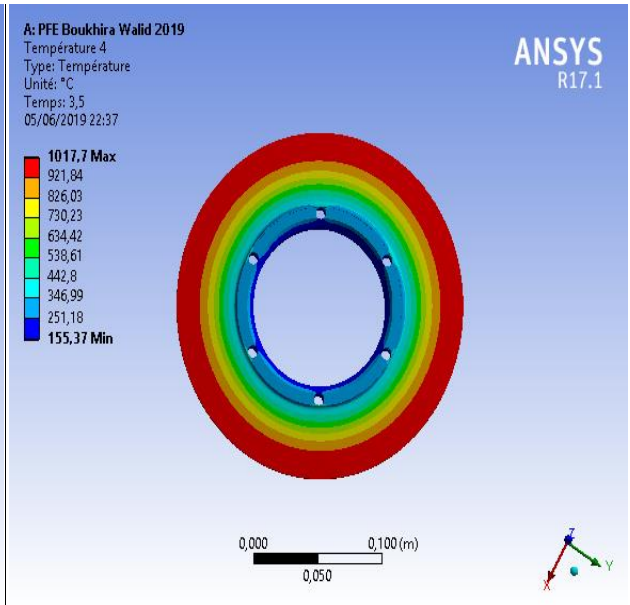
III.2.2.2. Résultats numériques : Apres les calculs on a trouvé.

III.2.2.2.a. Température : Distribution de la température.

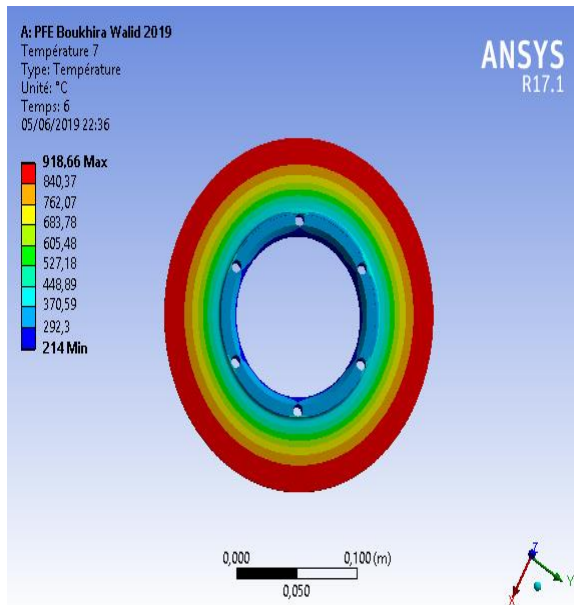




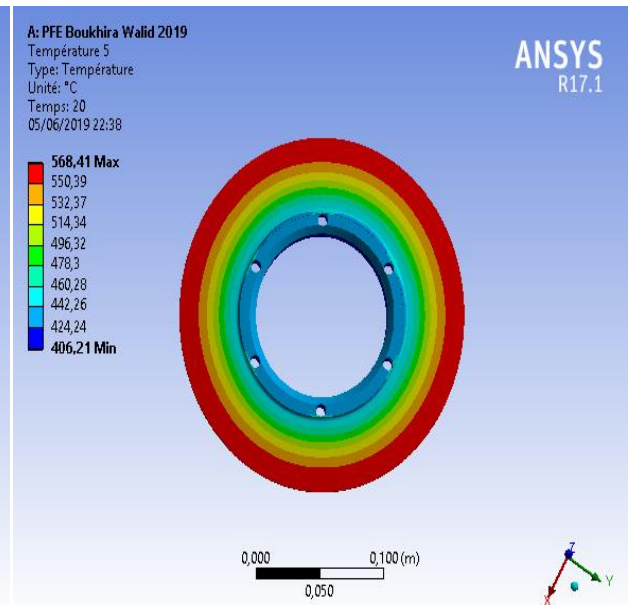
t=2s



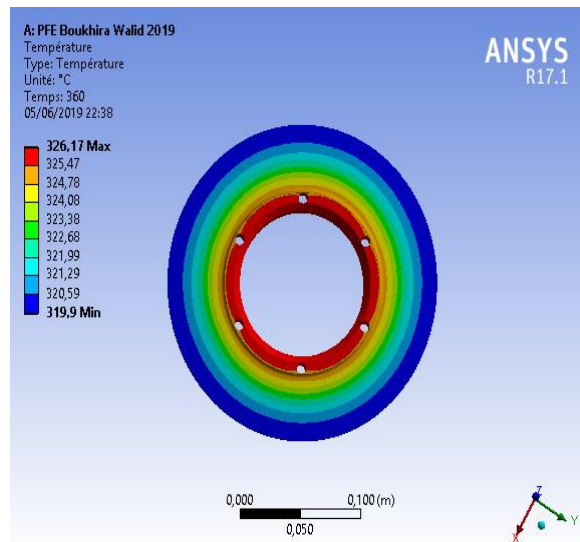
t=3,5s



t=6s



t=20s



t=360s

Fig. III.9.Distribution de la température dans le disque simple en Alliage d'aluminium à différents instants

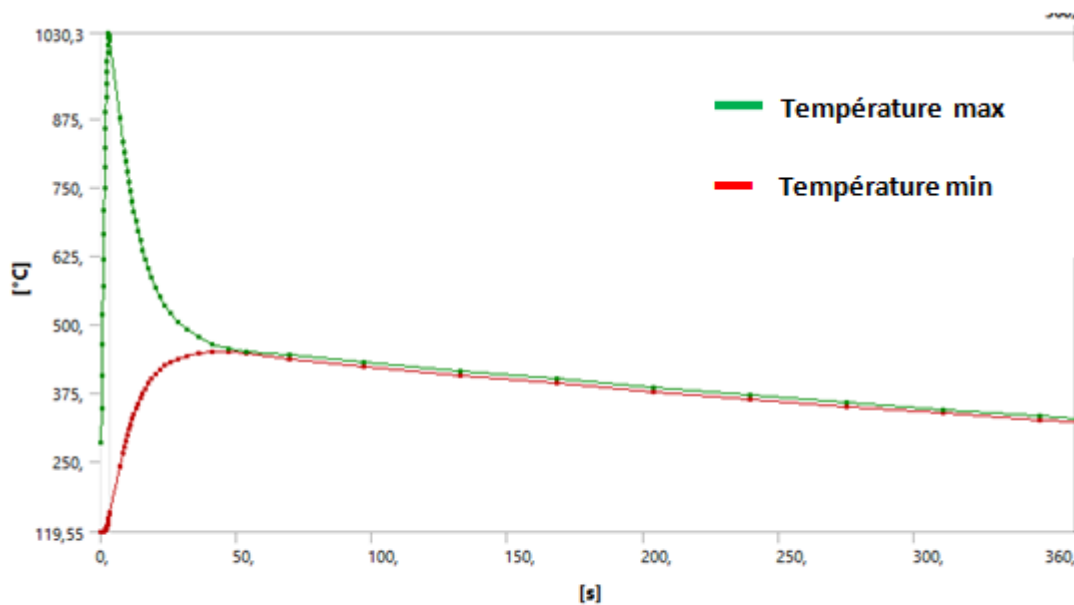


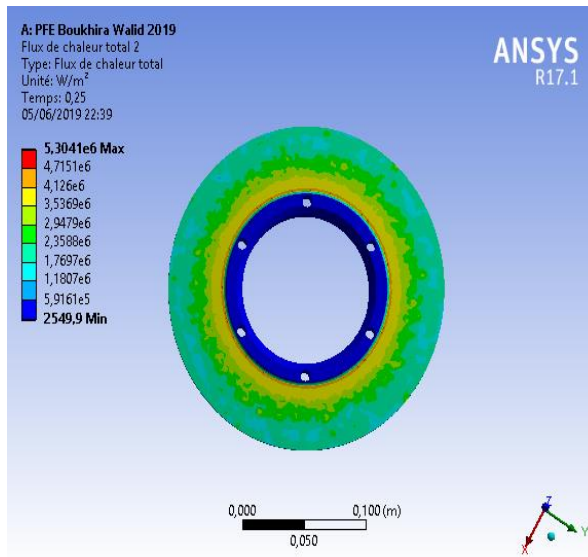
Fig. III.10.Évolution de la température en fonction du temps (Alliage d'aluminium)

Les figures III.9 et III.10 montre l'évolution de la température en fonction du temps de disque simple en Alliage d'aluminium.

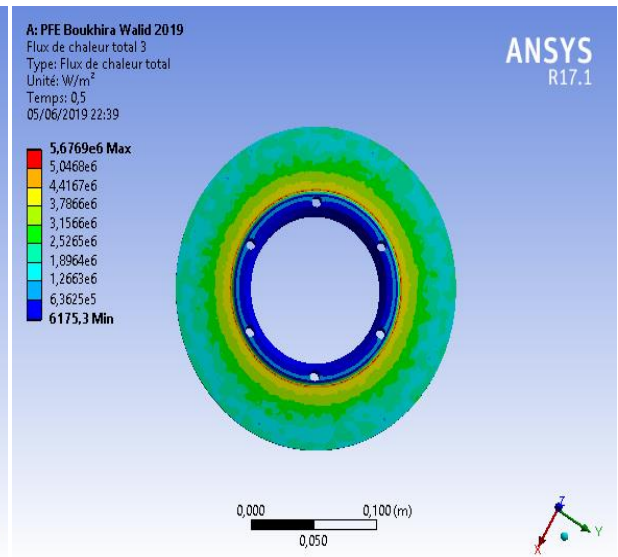
On remarque qu'à l'instant $t=3,5$ s, la température a rapprochée d'atteindre son maximum de 1030.3 C°. De l'instant $t= 4$ s à $t= 360$ s, la variation de la température en fonction du temps devient moins importante

III.2.2.2.b. Flux de chaleurs :

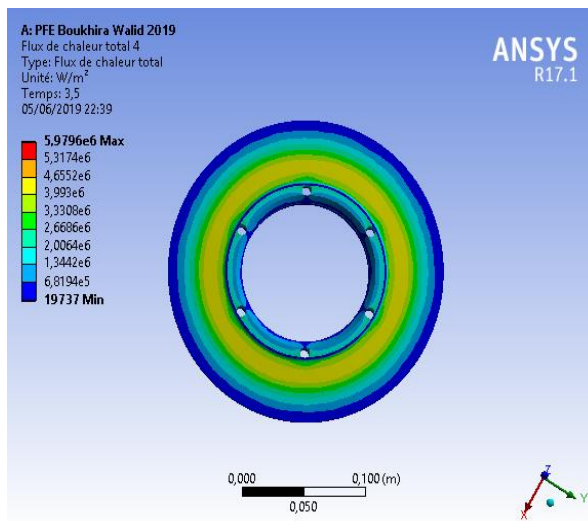
Les figures ci-dessous présentes la distribution de flux de chaleurs.



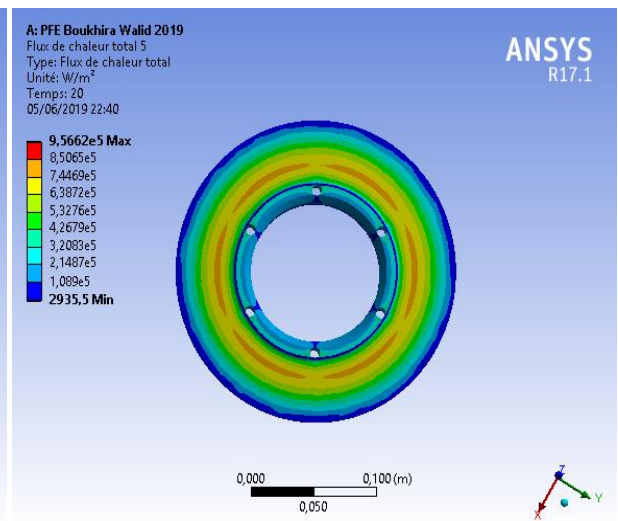
t=0,25s



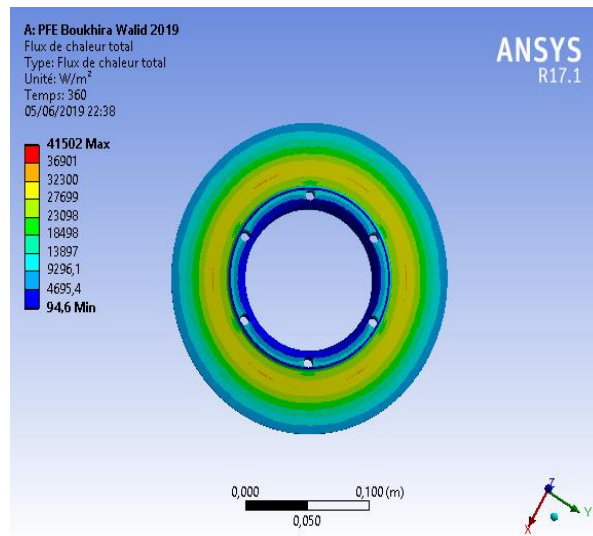
t=0,5s



t=3,5s



t=20s



T=360s

Fig. III.11. Distribution de flux de chaleurs dans le disque simple en Alliage d'aluminium à différents instants

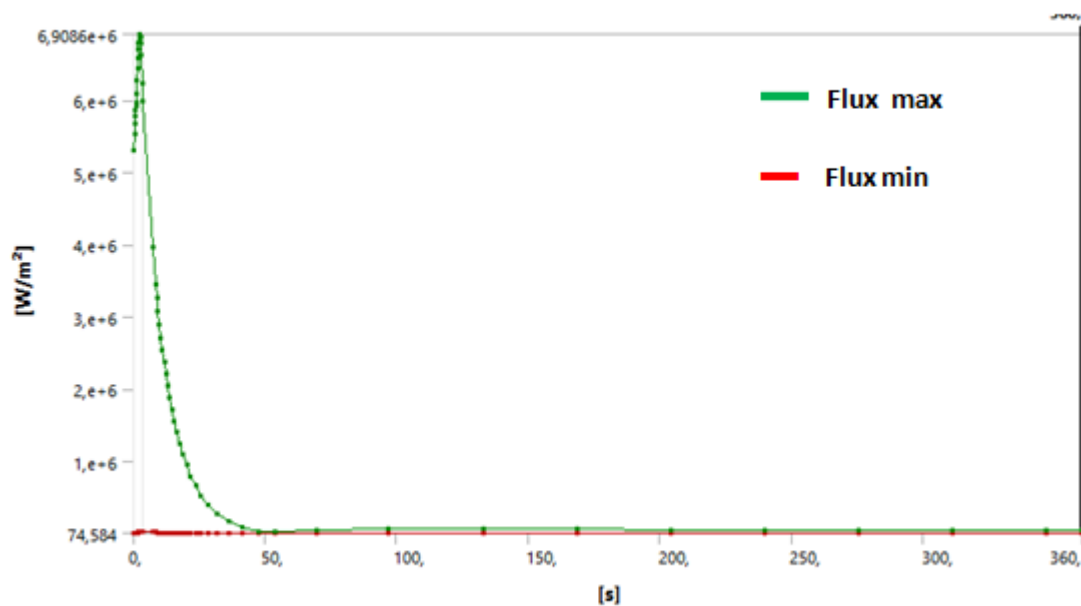


Fig. III.12. Évolution de flux de chaleur en fonction du temps (Alliage d'aluminium)

Les figures III.11 et III.12 montre l'évolution de flux de chaleur en fonction du temps de disque simple en Alliage d'aluminium.

On remarque qu'à l'instant $t=3,5$ s, le flux de chaleur a rapprochée d'atteindre son maximum de 6.9806^e+6 w/m³.

De l'instant $t = 3.5s$ à $t = 360s$, la variation de flux de chaleur en fonction du temps devient moins important.

III.2.3.Fonte grise

III.2.3.1. Les propriétés mécaniques de Fonte grise

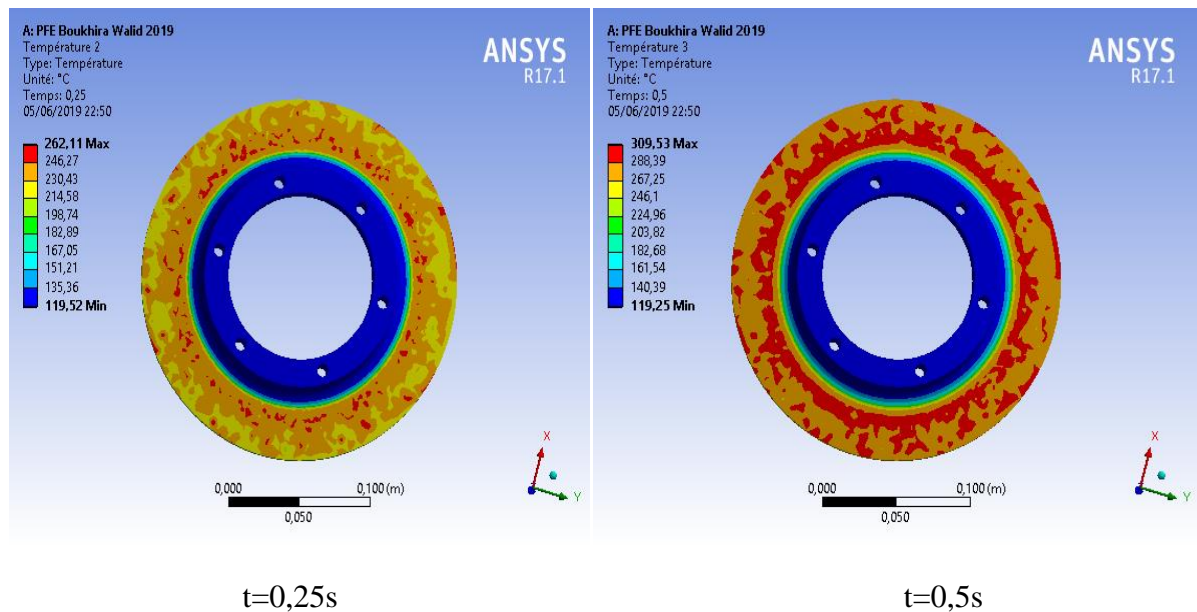
Le tableau III.4 est données les propriétés mécaniques de fonte grise.

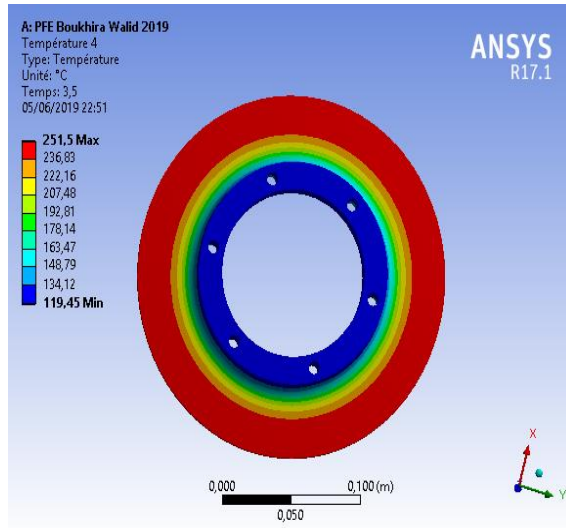
Tab.III.4.Les caractéristiques de fonte grise

Masse volumique	7200	kg/m^3
Conductivité thermique	52	$W/m\ c^\circ$
Chaleur spécifique	447	$J/kg\ c^\circ$

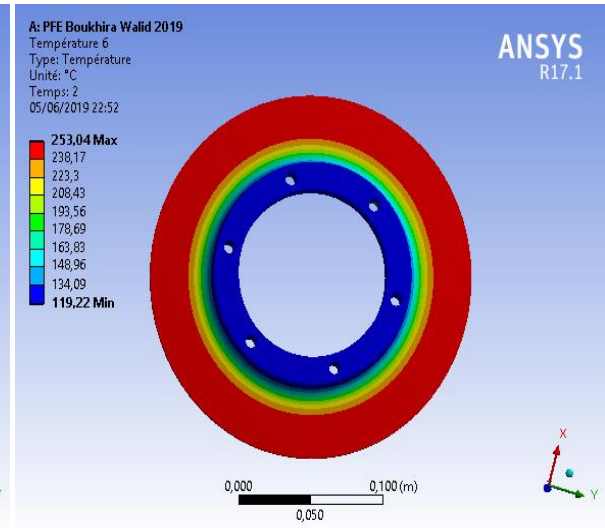
III.2.3.2.Résultats numériques : Apres les calculs on a trouvé.

III.2.3.2.a. Température : Distribution de la température.

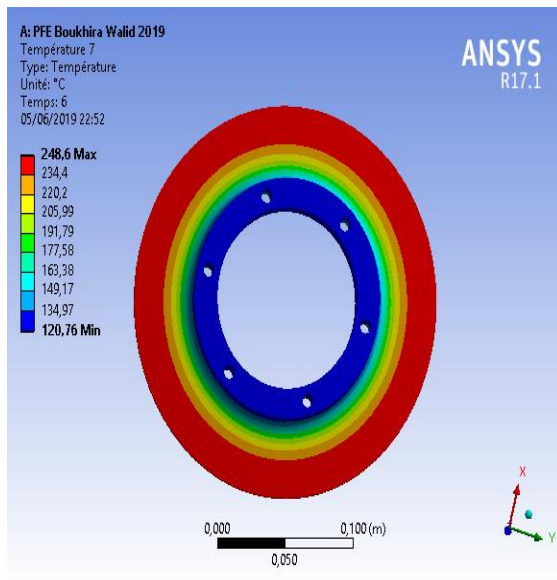




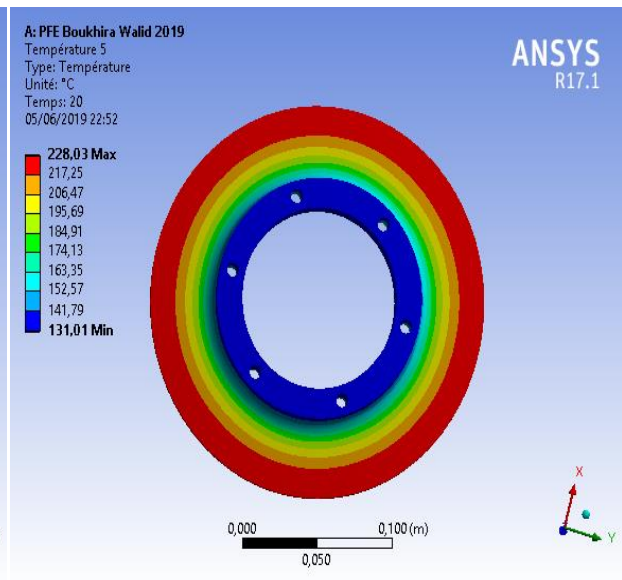
t=2s



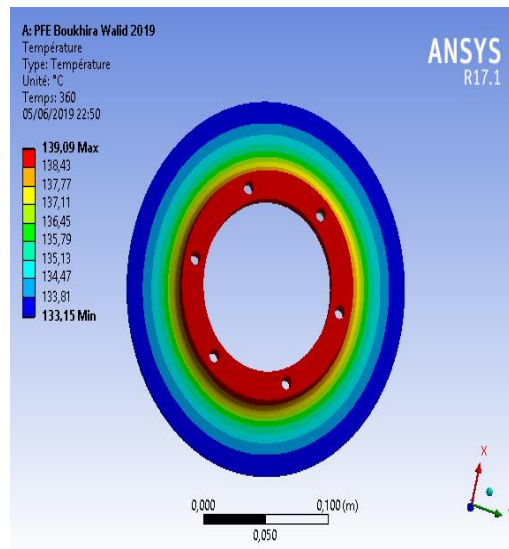
t=3,5s



t=6s



t=20s



t=360s

Fig. III.13. Distribution de la température dans le disque simple en Fonte grise à différents instants

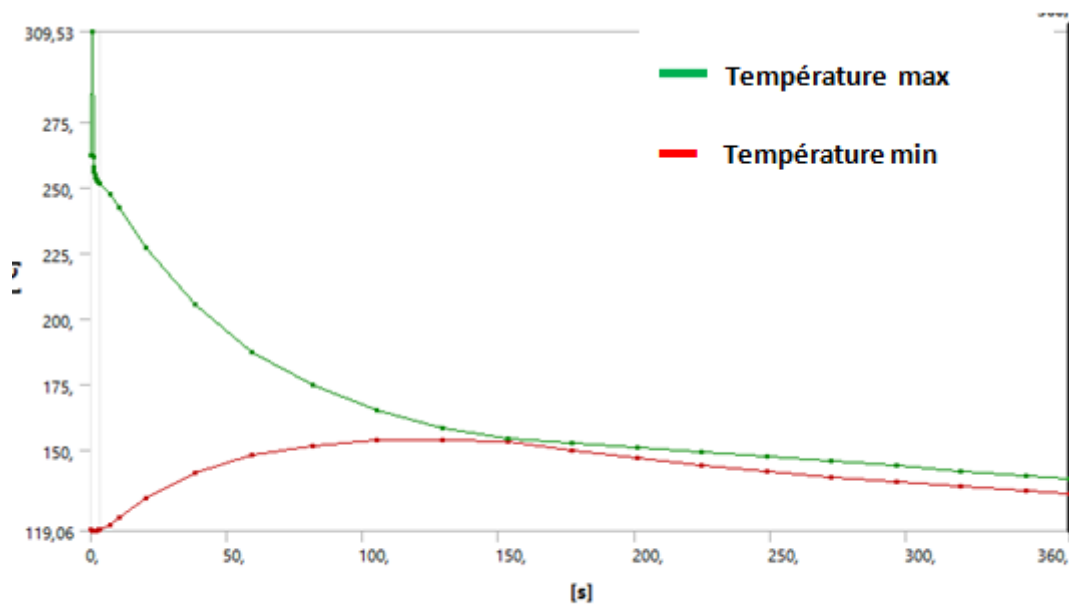


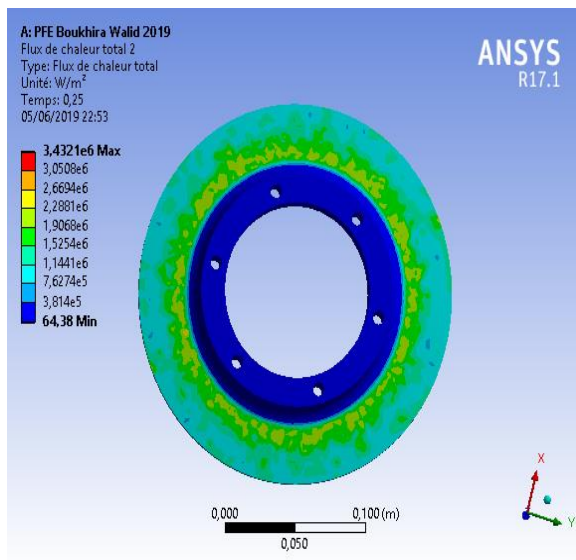
Fig. III.14. Évolution de la température en fonction du temps (Fonte grise)

Les figures III.13 et III.14 montre l'évolution de la température en fonction du temps de disque simple en Fonte grise.

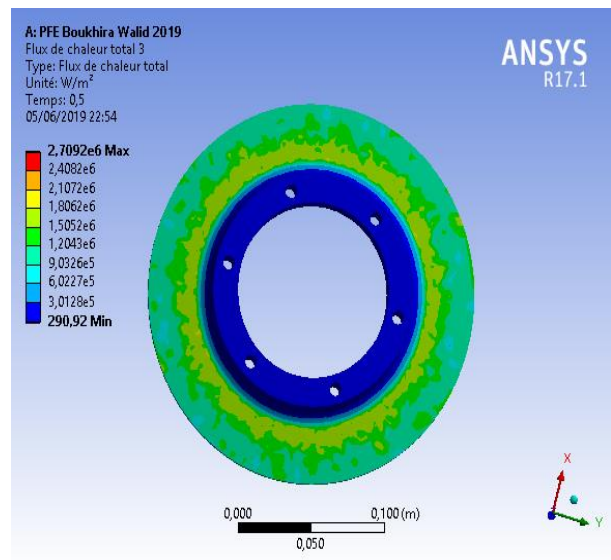
On remarque qu'à l'instant $t=0,5$ s, la température atteint son maximum de 309.53 °C.

De l'instant $t= 0,5$ s à $t= 360$ s, la variation de la température en fonction du temps devient moins importante.

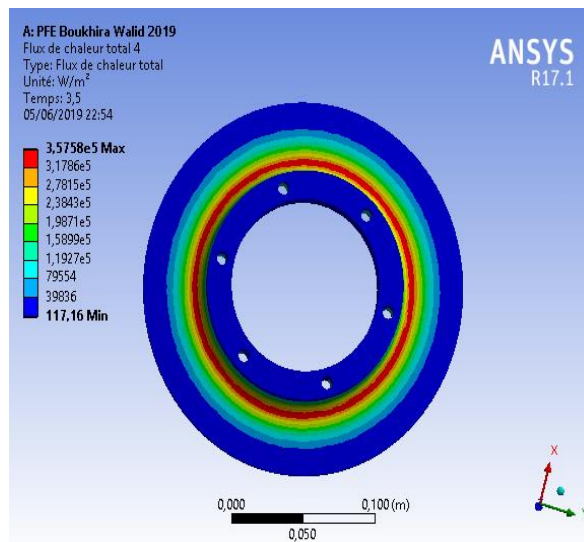
III.2.3.2.b. Flux de chaleurs : Distribution de flux de chaleurs.



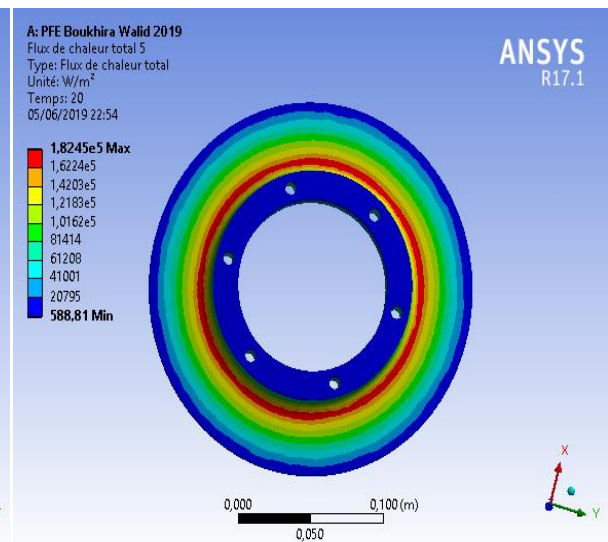
t=0,25s



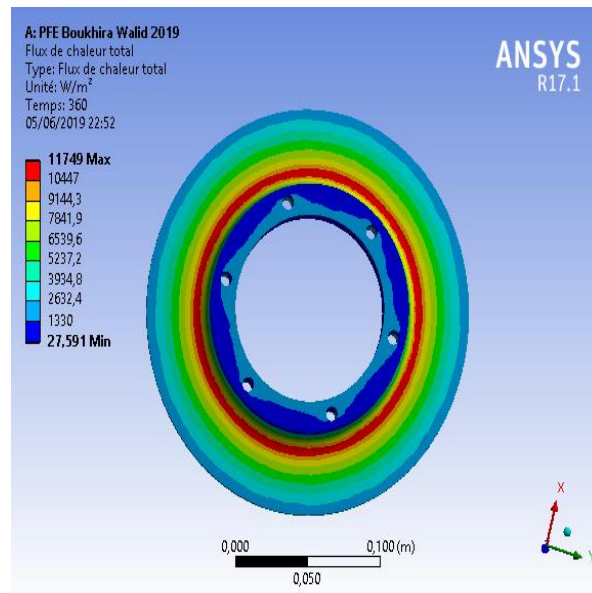
t=0,5s



t=3,5s



t=20s



t=360s

Fig. III.15. Distribution de flux de chaleurs dans le disque simple en Fonte grise à différents instants

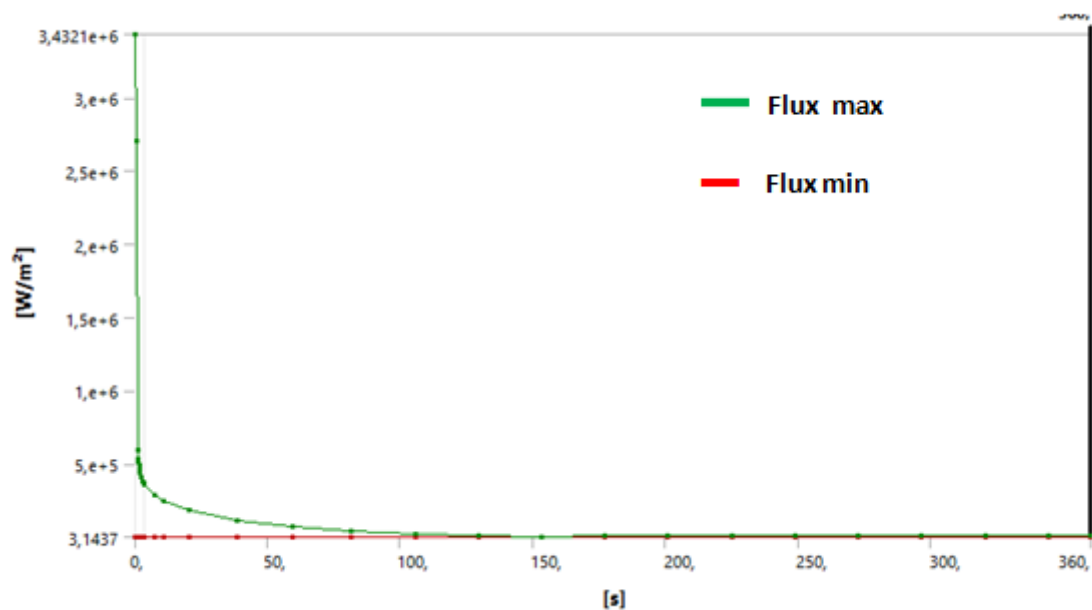


Fig. III.16. Évolution de flux de chaleurs chaleur en fonction du temps (Fonte grise)

Les figures III.15 et III.16 montre l'évolution de flux de chaleur en fonction du temps de disque simple en fonte grise.

On remarque qu'à l'instant $t=0,25$ s, le flux de chaleur atteint son maximum de $3,4321^e+6$ w/m³.

De l'instant $t = 0.25s$ à $t = 360s$, la variation de flux de chaleur en fonction du temps devient moins important.

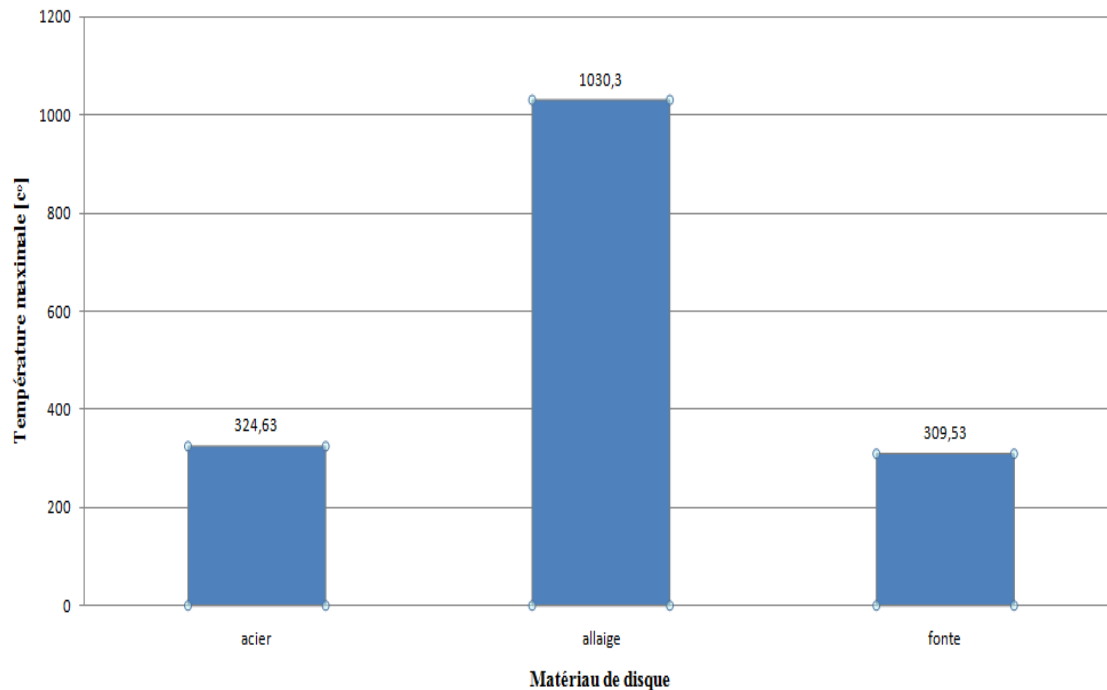


Fig. III.17. Les températures maximales selon le type du matériau

Remarque : Le matériau en fonte grise est le meilleur par rapport aux autres matériaux car sa température est toujours dans un niveau normal contrairement aux autres.

III.3. Influence du nombre des trous sur le matériau en fonte grise

Nous faisons l'étude suivante sur deux disques différents (disque simple et disque à huit trous) avec le matériau fonte grise.

III.3.1. Disque de frein simple

Cette étude nous avons déjà vu et fais dans le titre **III.2.1**

III.3.2. Disque de frein à huit trous : Géométrie de disque de frein à huit trous.

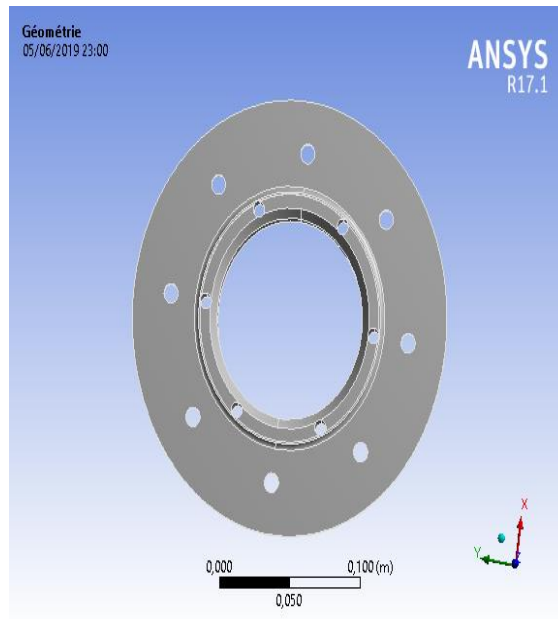


Fig.III.18. Géométrie de disque de frein à huit trous ANSYS

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques de maillage et les données pour le disque huit trous.

Tab.III.5.Caractéristiques de maillage

Pièce	Convection	Flux de chaleur	
Disque huit trous	17.407	4197000	
	Type des éléments	Nombre de nœuds	Nombre d'éléments
	Tétraédrique à 10 nœuds	129629	649368

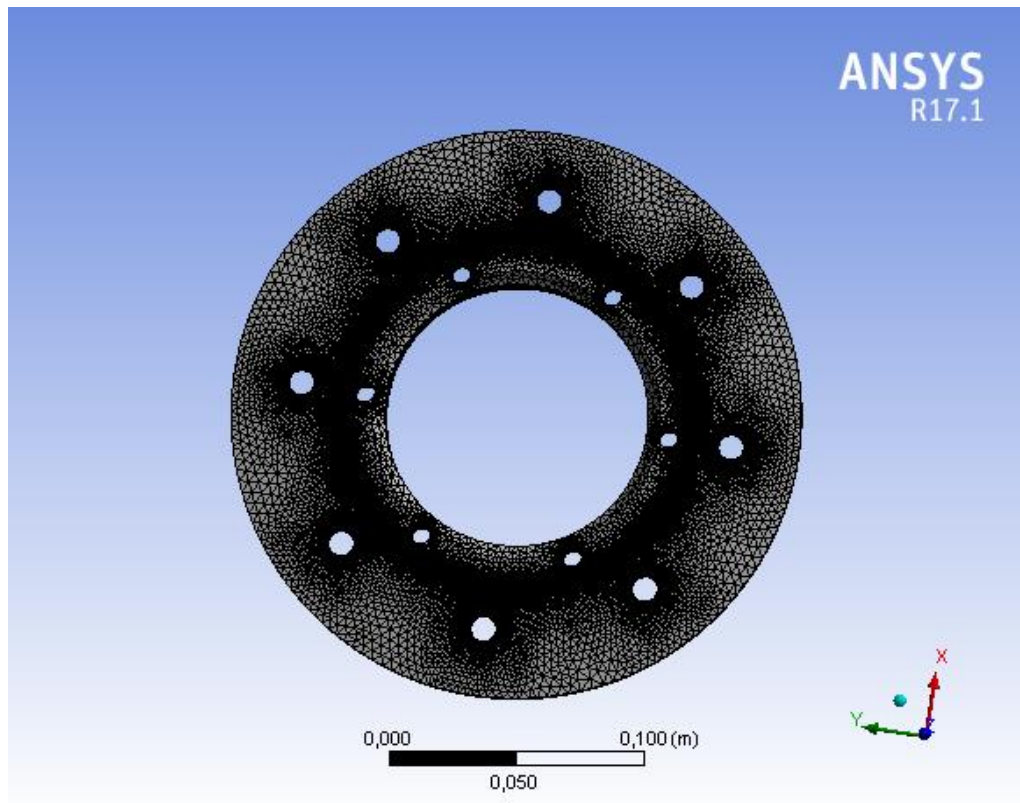
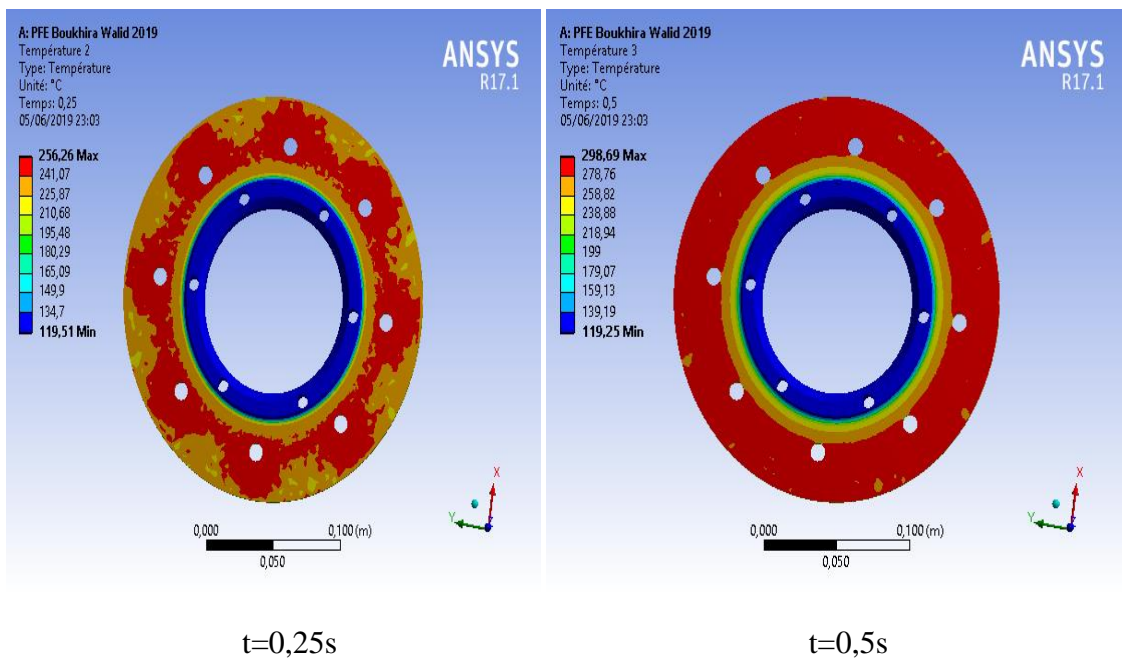


Fig. III.19. Maillage de disque huit trous

III.3.2.1. Résultats numériques : Après les calculs on a trouvé.

III.3.2.1.a. Température : Distribution de la température.



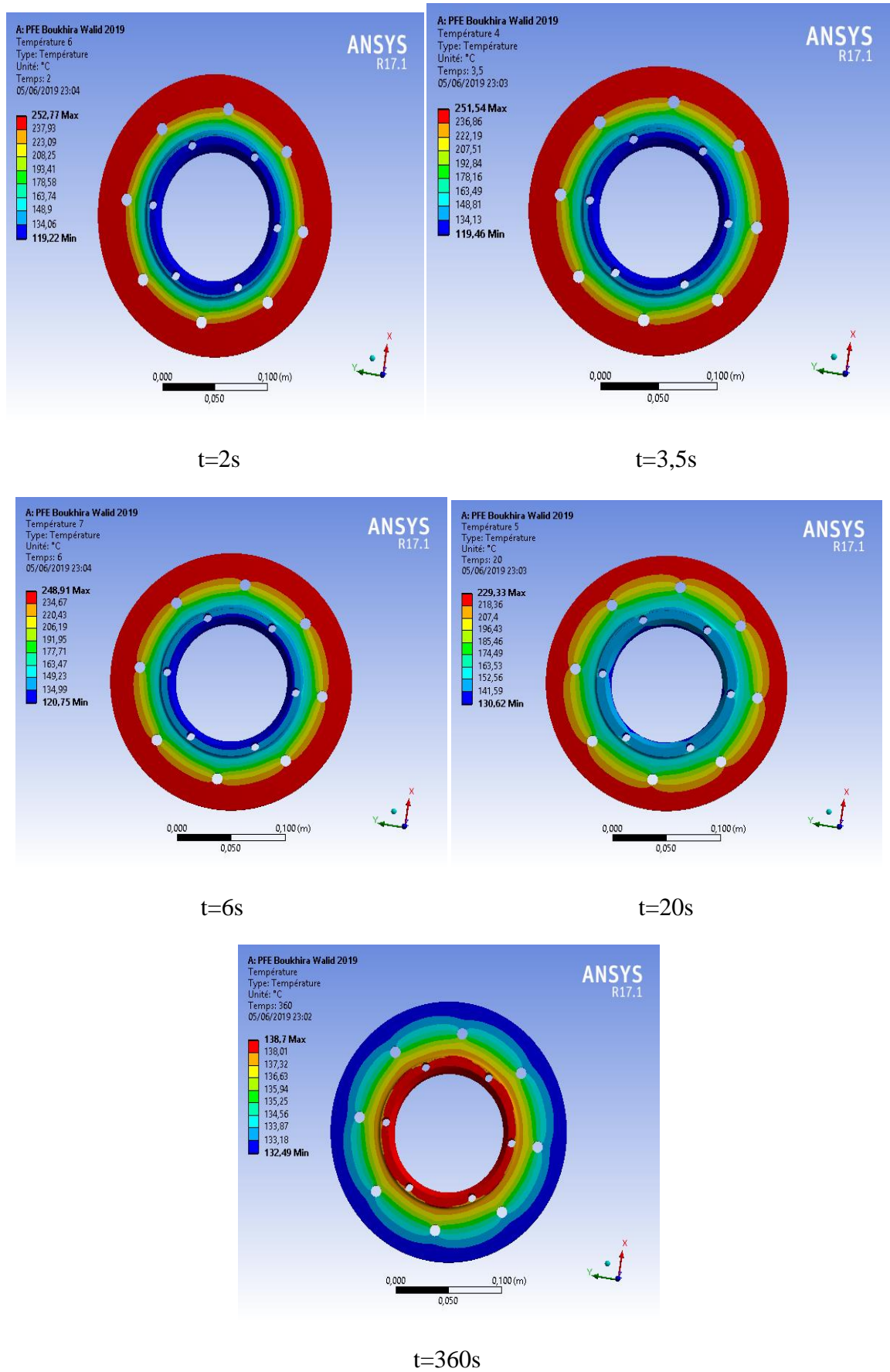


Fig. III.20. Distribution de la température dans le disque a huit trous en Fonte grise à différents instants

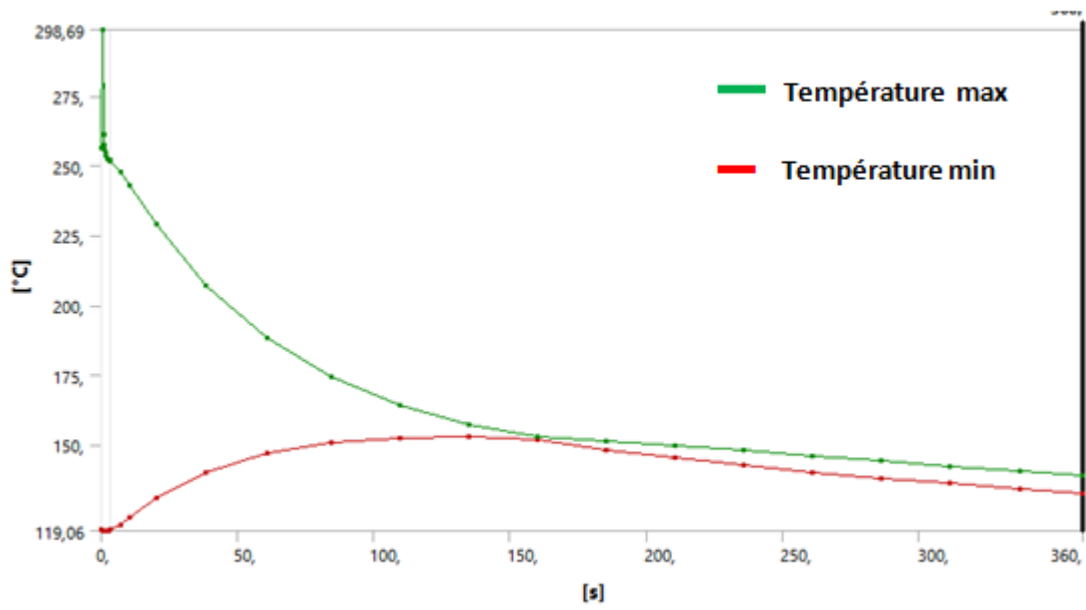


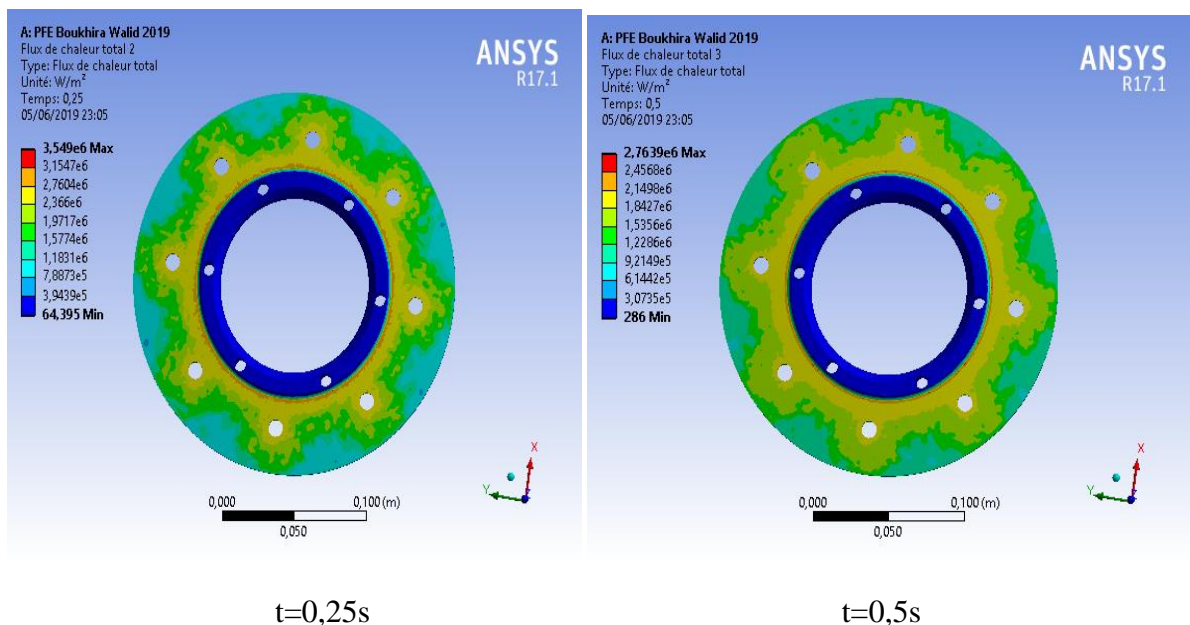
Fig. III.21.Évolution de la température en fonction du temps (Fonte grise)

Les figures III.20 et III.21 montre l'évolution de la température en fonction du temps de disque huit trous en Fonte grise.

On remarque qu'à l'instant $t=0,5$ s, la température atteint son maximum de 298.69 C°.

De l'instant $t=0.5$ s à $t= 360$ s, la variation de la température en fonction du temps devient moins importante

III.3.2.2.b. Flux de chaleurs : Distribution de flux de chaleurs.



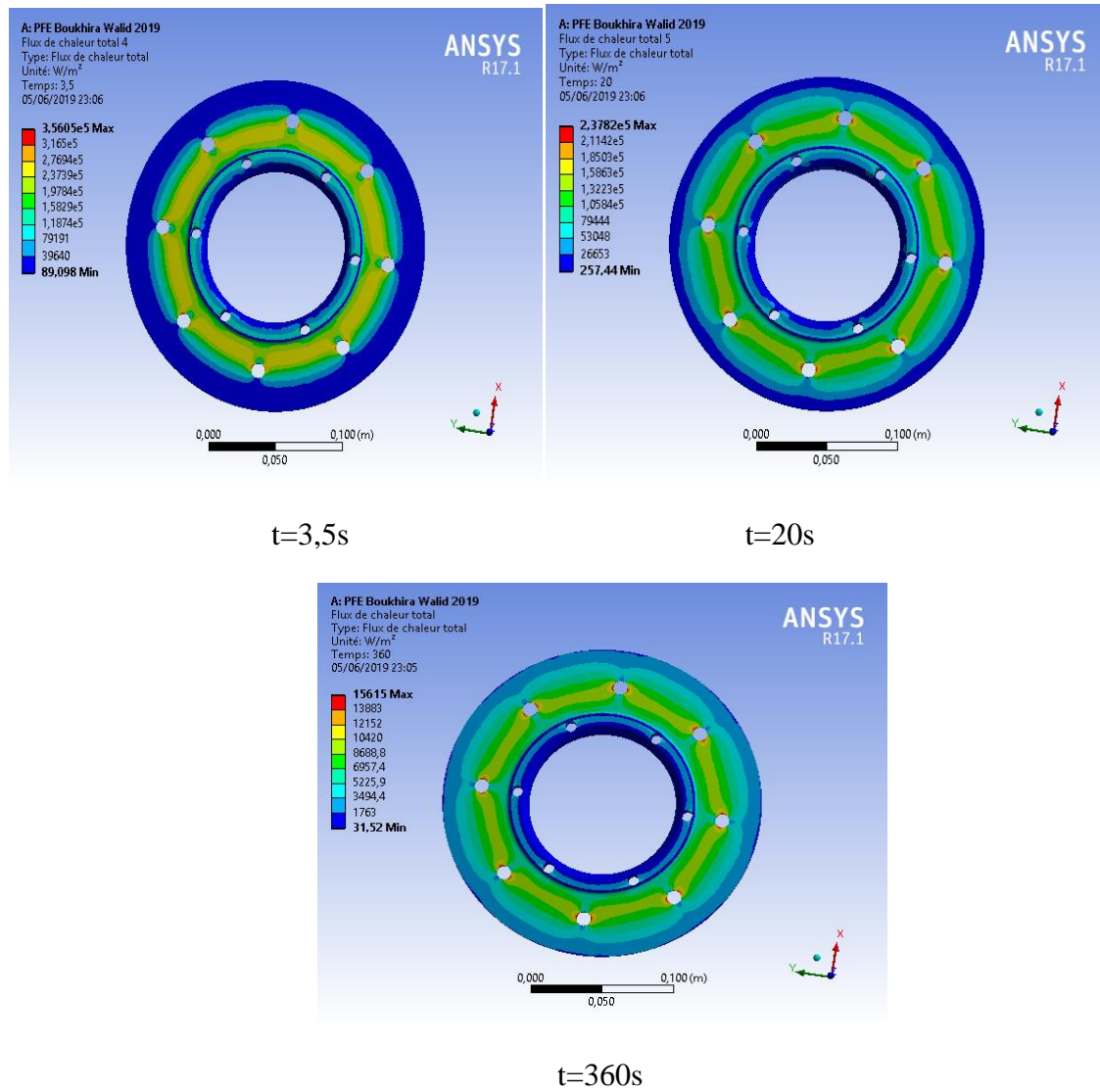


Fig. III.22. Distribution de flux e chaleurs dans le disque huit trous en Fonte grise à différents instants

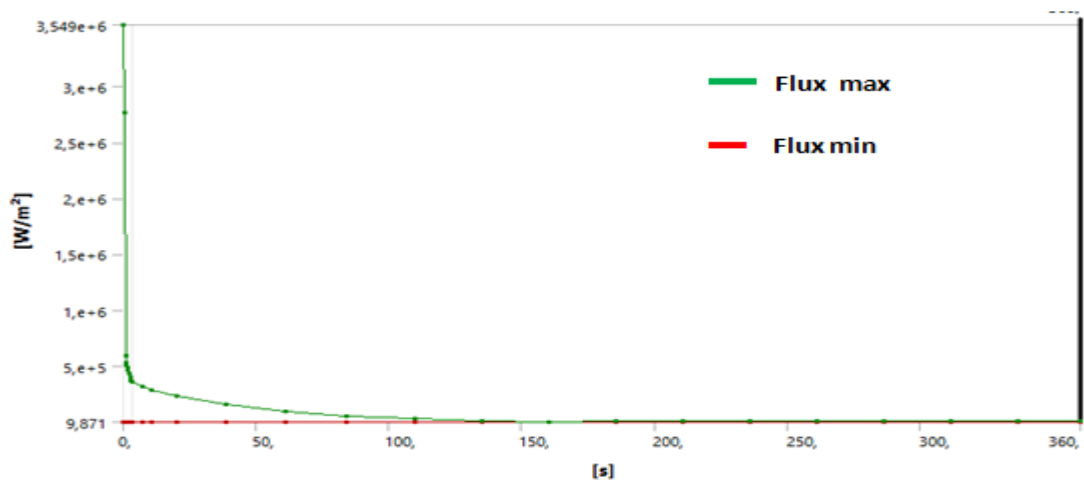


Fig. III.23. Évolution de flux de chaleurs en fonction du temps (Fonte grise)

Les figures III.22 et III.23 montre l'évolution de flux de chaleur en fonction du temps de disque simple en fonte grise.

On remarque qu'à l'instant $t=0,25$ s, le flux de chaleur atteint son maximum de $3.549e^+6$ w/m³.

De l'instant $t= 0.25$ s à $t= 360$ s, la variation de flux de chaleur en fonction du temps devient moins important.

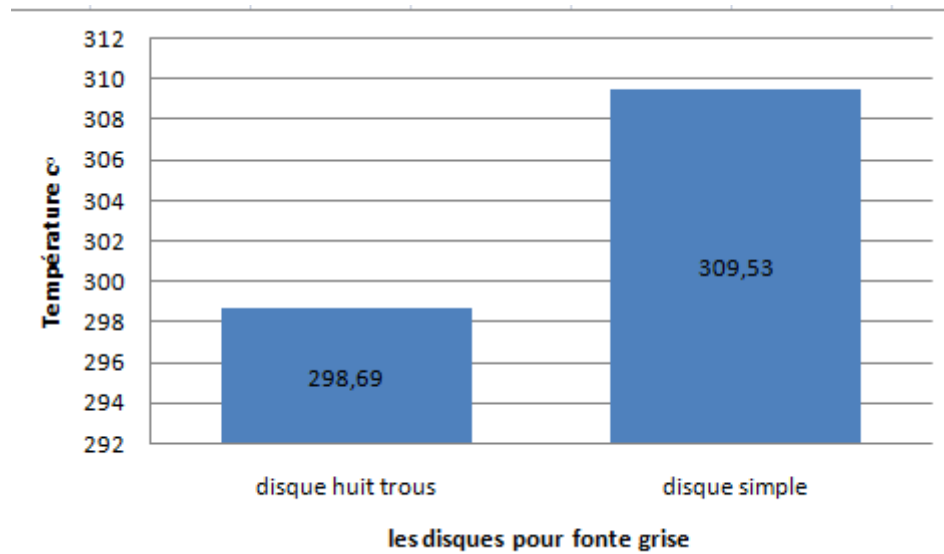


Fig. III.24. Les températures maximales selon le type du disque

Remarque : À la fin de nos expériences et calculs nous avons découvert qu'un disque de huit trous est plus utile qu'un disque simple

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

On procède à une simulation numérique dans le logiciel SOLIDWORKS et ANSYS pour la détermination du coefficient de convection pour deux géométries différentes et trois matériaux distincts (Acier standard, Alliage d'aluminium et Fonte grise), faisant ainsi, on cherche à étudier l'efficacité d'échange de la chaleur par convection.

Les résultats seront exploités pour lancer une simulation avec ANSYS WORKBENCH afin de déterminer l'évolution du champ de température en fonction du temps et également les champs de contraintes et déformations mécaniques.

La remarque que nous pouvons constater dans le chapitre III est le disque durant le freinage subit deux variations brusques de la température et de flux de chaleur, il existe un instant $t=0.5s$ où la température et le flux de chaleur atteignent leurs maximums.

Dès le début de freinage et jusqu'à l'instant $t=0.5s$ il y a une élévation brusque et rapide de la température et flux de chaleur, après cet instant et jusqu'à la fin du freinage la température et le flux de chaleur diminuent rapidement.

Ce changement brusque de température et flux de chaleur est à l'issue du phénomène de Craquelures par chocs thermiques.

- [1] Rudolf Limpert, Brake Design and Safety ,3 ed, USA, 2011, p415, ISBN 978-0-7680-3438-7.
- [2] Konrad Reif, Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems,ed, USA,2014,p 284, ISBN 978-3-658-03977-6.
- [3]J.J. Carré, "Technologie du Freinage - Freins à Disque", Techniques de l'Ingénieur, B-5574, pp. 1-17, 1993.
- [4] Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme de Master. Thème : Le frein automatique d'un véhicule. BOUKHEDDIA F.Z Promotion: 2011-2012.
- [5] GANESH D, ARUNACHALAM V. "On-road brake testing,"*Evaluation Engineering*, vol. 40, pp. 30-32, Nov. 2001.
- [6] Alainfrancis.free.fr/mecanique/Ralentisseurs/les_ralentisseurs.htm
- [7] [Hubert Mèmeteau.Technologie fonctionnelle de l'automobile: Tome 1, Le moteur et ses auxiliaires, Dunod, 13 juin 2002 - page 33.
- [8] G.R. Nicolet, "Conception et calcul des éléments de machine volume 1", version 1, juin 2006 école d'ingénieurs de FRIBOURG (E.I.F).
- [9] Intersection, Le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel, « » juin 2004.
- [10] www.seneauto.com/docs/freinage.pdf - Sénégal «Le Freinage ».
- [11] Hennequet G. : "Martèlement en cours de freinage", BT RNUR, NR71, pp.32-37, 1994.
- [12] A. Belhocinea, C.-D. Chob, M. Noubyc, Y. B.Yid, A. R. Abu Bakare, Thermal analysis of both ventilated and full disc brake rotors with frictional heat generation, *Applied and Computational Mechanics* ,2014 pp 5–24.
- [13] .BELHOCINE ALI, Etude thermomécanique des disques de frein, thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012, vol1.

- [14] M. Benramdane¹, Y. Khadraoui¹ et N. Bibi-Triki² " Analyse de la contribution du transfert thermique des disques tournants (disque de frein) uniformément chauffés " Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- [15] S. Mačuzić^{1*}, I. Saveljić^{1,2}, J. Lukić¹, J. Glišović¹ and N. Filipović^{1,2}, Thermal analysis of solid and vented disc brake during the braking process, Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics / Vol. 9 / No. 2, 2015 / pp. 19-26..
- [16] YVES JANNOT. " Transferts Thermiques " Ecole des mines Nancy 2009.
- [17] PHILIPPE MARTY. " Cours de transferts thermiques conduction et rayonnement" Université Joseph fourier Grenoble septembre 2001.
- [18] Claude SAINT-BLANQUET. Bernard FOURCHER "Conduction de la chaleur" Université de Nantes 2001.
- [19] Oswald Martin. "Development of a Methodology for Design and Optimization of Multi-Material Objects for enhanced Thermal Behavior Application: Brake Disk Rotor".
- [20] Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali, "Introduction au transfert thermique", 2014 (2ème édition).
- [21] J.BRAU, 2006 INSA de Lyon, "cours de transfert de chaleur par rayonnement".
- [22] Y. Berthier ; Mécanismes et tribologie ; Thèse d'état ; N° 88 ISAL 0050 ; INSA de Lyon ; 1988.
- [23] M. Godet ; Aspects mécaniques de la tribologie ; 6^{ème}, congrès français de mécanique ; Lyon ; 5-9 septembre 1983.
- [24] 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.