

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergétique

Option : Énergétique en Génie Mécanique

Intitulé :

ÉTUDE DU TRANSFERT THERMIQUE DANS UN SYSTÈME DE FREINAGE À DISQUE

Présenté par :

- AMARA El Hocine
- Zellat Abdelhak

Soutenu le : ...27/09/2020

devant le Jury :

<i>M.DR.Kaid Nourddine</i>	<i>MAA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. DR. Gourari Djamel</i>	<i>MAB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M.DR.Benameur Benamar</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>M.DR.medjahed driss</i>	<i>MAA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE	01
<u>chapitre i : Généralités sur le système du freinage</u>	
I.1.Introduction	03
I.2.Le système de freinage	03
I.2.1.Freinage par frottement	04
I.2.1.a. frein à tambour	04
I.2.1.b. frein disque	06
I.3.les composants d'un frein disque	10
I.4.disque frein	10
I.4.1.1.Description d'un disque	11
I.4.1.a. Types disque frein	11
I.4.1.b. Autres types	14
I.4.2.étrier	15
I.4.2. a. Flottants	15
I.4.2. b. fixes	16
I.4.3.piston	17
I.5.capteur	17
I.6. Plaquette de frein	18
I.7.phénomènes thermiques dans disque	18
I.8. phénomènes mécaniques dans disque	19
I.9.Martiaux conventionnels	19
I.10.Défaillance des systèmes de freinage	22
I.10.1.Plaquette de frein pour disque	22
I.10.2.disque de freins	24
I.11. problème de disque de freins	25
<u>Chapitre ii : Etude thermique</u>	
II.1.Introduction	27
II.2.Champ de température	28
II.3. Phénomène de transfert thermique	28

Sommaire

II.3.1. Transfert Thermique par conduction	28
II.3.1.a. loi de Fourier	29
II.3.1.b. Résistance thermique	30
II.3.2. La convection	31
II.3.2.a. l'expression du flux de chaleur en convection et la suivante (loi de Newton)	31
II.3.3. transfert par rayonnement	32
II.3.3.a. la loi de Stefan Boltzmann	32
II.3.3.b. flux thermique	33
II.3.3.c. Densité de flux thermique	33
II.4. comparaison des modes de transfert de chaleur	34
II.5. équation de chaleur	34

chapitre iii : La méthode des éléments finis

III.1. Introduction	36
III.2. Géométrie du problème	36
III.3. Modélisation du phénomène de transfert thermique	37
III.4. Conditions aux limites	38

chapitre iv : Résultats et Discussions

IV.1. Introduction	41
IV.2. l'évolution des profils de vitesse et accélérations	41
IV.3. Simulation de disque patin	42
IV.3.1. l'outil COMSOL multiphysiques	42
IV.3.2. Etude de la zone de contact	42
IV.3.3. Etude des zones profondes	48
IV.4. Conclusion	50

CONCLUSION Général

CONCLUSION Général	51
--------------------	----

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	52
---------------------------	----

LISTE DES FIGURES

Chapitre i : Généralités sur le système du freinage

Fig. I.1. Système de freinage	04
Fig. I.2. Frein à tambour	05
Fig. I.3. Vue 3D d'un frein à tambour	05
Fig. I.4. Frein disque	06
Fig. I.5. Schéma du fonctionnement des freins à disque	07
Fig. I.6. Les composants frein disque	10
Fig. I.7. Description d'un disque	11
Fig. I.8. Ventilé	12
Fig. I.9. Pleins	13
Fig. I.10. Disques Rainurés	14
Fig. I.11. Disques Percés	15
Fig. I.12. Étrier Flottants	16
Fig. I.13. Étrier fixes	17
Fig. I.14. Plaquette de frein	18
Fig. I.15. Mise en cône d'un disque de frein	19
Fig. I.15. Plaquettes de frein effilées	22
Fig. I.16. Plaquette dénaturée	23
Fig. I.17. Plaquettes Fissurées	23
Fig. I.18. Contaminée de surface	24
Fig. I.19. Disque fissurés	24
Fig. I.20. Disque endommagé par le fer d'une plaquette	25

Chapitre ii : Etude thermique

Fig. II.1. Schéma de transfert thermique par conduction	29
Fig. II.2. Résistance thermique	30
Fig. II.3. Bilan thermique pour un système unidirectionnel	34

Sommaire

Chapitre iii : La méthode des éléments finis

Fig. III.1. Définition géométrique du problème	37
Fig. III.2. domaine d'étude	39

Chapitre iv : Résultats et Discussions

Fig. VI.1. profils vitesse et accélération du mobile	41
Fig. VI.2. logiciel comsol multiphysiques	42
Fig. VI.3. Champ de température avant l'opération de freinage	43
Fig VI. 4 - A :champs de température début de l'opération de freinage	45
Fig VI. 5	45
Fig VI. 6.	46
Fig. VI. 7. variation temporelle au plan (r-z) du point chaud au niveau du patin	47
Fig. VI. 8. variation temporelle au plan (r-z) du point chaud au niveau d'un point inverse du patin	48
Fig VI. 9. variation temporelle de température au plan solide interieur	49
Fig VI. 10. variation temporelle de température au plan solide interieur	49

Sommaire

liste des tableaux

Chapitre ii : Etude thermique

Tableau. II.1. COMPARISON DES MODES DE TRANSFERT de Chale	34
---	----

Chapitre iii : La méthode des éléments finis

Tableau. III.1. Données géométriques du système de freinage	37
Tableau. III.2. Données physiques des deux antagonistes patin-disque à une température moyenne de 200°C (Choi et al. 2004)	37

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] LE SYSTEME DE FREINAGE Pierre Duysinx Ingénierie des Véhicules Terrestres Université de Liège Année Académique 2009-2010
- [2] <https://slideplayer.fr/slide/513832/>
- [3] <http://www.palais-de-la-voiture.com/article-pour-tout-savoir-sur-les-systemes-de-freinage-113041976.html>
- [4] <https://www.avatacar.com/blog/mecanique-auto/comment-fonctionnent-vos-freins/>
- [5] <http://blog.autochoc.fr/le-fonctionnement-des-freins-a-tambour/>
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Frein_%C3%A0_disque
- [7] http://www.autotekno.com/frein_a_disque.php
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Frein_%C3%A0_tambour
- [9] <https://www.linternaute.fr/auto/guide-pratique-auto/1408996-disque-de-frein-comment-ca-marche/>
- [10] <https://www.ferberstireandauto.com/Blog/ArticleID/473/Whats-the-difference-between-disc-brakes-and-drum-brakes>
- [11] <https://www.goodmecano.com/articles/disque-de-frein/Les-disques-de-frein-comment-ca-marche>
- [12] A. Belhocine, thermomécanique des disques de frein Application du Code de Calcul ANSYS
- [13] <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1254-types-de-disques-de-frein.php>
- [14] Analyse de la contribution du transfert thermique des disques tournants (disque de frein) uniformément chauffés
- [15] <https://docplayer.fr/13629235-Materiaux-utilises-dans-la-conception-de-disques-de-freins.html>
- [16] TABLEAUX D'ANALYSE DE PANNES DES PLAQUETTES DE FREIN
- [17] <https://www.mister-auto.com/conseils-entretien/quand-faut-il-changer-ses-disques-de-frein/>
- [18] <https://www.auto-doc.fr/info/surchauffe-des-disques-de-frein-symptomes-causes-et-resolution-du-probleme>
- [19] https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/ctcd_yk.pdf
- [20] <http://www.thermique55.com/principal/thermique.pdf>

Sommaire

- [21] Claude SAINT-BLANQUET. Bernard FOURCHER "**Conduction de la chaleur**"
Université de Nantes 2001.
- [22] *Transferts Thermiques*, Bruno Chéron, Édition Ellipses, 1999.
- [23] *Les bases de la mécanique des fluides et des transferts de chaleur et de masse pour l'ingénieur*, Esteban Saadjan, Sapientia Éditions 2009,
- [24] Didier Majcherczak, étude thermique d'un contacte glissant: Approche numérique et expérimentale, Application au freinage, thèse de doctorat, 25 septembre (2003).
- [25] Newcomb T.P., Transient temperatures attained in disk brakes, *British Journal of Applied Physics*, vol. 10 (1959), pp. 339-340.
- [26] R.Limpert; Brake design and safety ; Editions Elsevier ; (1992).

Dédicace

Je dédie ce mémoire
A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour(B.D), leur soutien et leurs encouragements.

A mes frères

« Assona, mohammed ».

A mes amies et mes camarades

« zaki ,sofain ».

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du
secondaire ou de l'enseignement supérieur.

AMARA EL Hocine



Dédicace

Je dédie ce mémoire
A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

A mes frères

A mes amies et mes camarades

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du
secondaire ou de l'enseignement supérieur.

Zalat a.elhaq



Remerciements

Ma reconnaissance éternelle et mes vifs remerciements à notre grand créateur, « ALLAH », qui m'a donné la santé et la volonté afin d'accomplir ce P.F.E.

*Tout d'abord nous tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur « **Mr Gourai Mohammed** » de m'avoir orienté et pour ces conseils judicieux, ses riches enseignements et ses orientations, ses suggestions et ses encouragements dans le but de mener à bien ce projet de fin d'études.*

Mes remerciement vont également à :

Tous mes enseignants du Génie Mécanique

Tous les membres de jury qui mes feront l'honneur d'apprécier nôtre travail.

Mes derniers remerciements vont à ma famille, mes amis et toute personne qui m'a aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.

Merci à tous.



Introduction général

Introduction Générale :

Lorsque deux corps entrent en contact avec frottement, il y a dissipation d'énergie et donc de la chaleur produite au niveau du contact, ce qui entraîne une dilatation pouvant accroître le champ de pression, Ce phénomène s'accroît si les contraintes tangentielles ainsi que les vitesses relatives de glissement entre les deux corps sont importantes .Ces effets thermomécaniques se traduisent la plus part du temps par la formation de zones localisées à très forts gradients thermiques, les points chauds. Il y a apparition de déformations thermiques et des concentrations de contraintes pouvant générer des fissures, des vibrations, etc.

Avec le développement des nouvelles technologies dans l'industrie automobile, les véhicules sont devenus de plus en plus performants. Les systèmes de freinage doivent suivre ce même rythme. Le frein, comme organe majeur de sécurité, suscite constamment un grand intérêt pour les ingénieurs. Outre la concurrence dans le domaine de l'automobile de plus en plus rude s'ajoute les soucis d'efficacité, de fiabilité, de confort, du coût et du délai de fabrication. L'objectif de l'ingénieur est donc de trouver le meilleur compromis entre ces exigences de sécurité et de ces contraintes technico-économiques. Pour pouvoir réaliser une conception optimale, il convient de mettre en œuvre des techniques numériques complétant les études expérimentales.

Dans l'industrie aéronautique et automobile, de nombreuses pièces sont soumises simultanément à des sollicitations thermiques et mécaniques. Les sollicitations thermomécaniques peuvent provoquer des déformations et mêmes des endommagements .Par exemple, le frottement dans un système de freinage génère de la chaleur dans le disque laquelle peut engendrer des déformations et des vibrations.

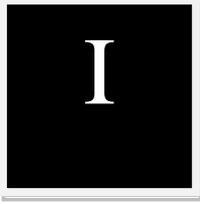
Le chapitre I présente une étude bibliographique fondée sur les disques de frein, la composition, les types et les matériaux utilisés,

Le chapitre II les différents phénomènes thermiques et mécaniques rencontrés (généralités sur les transferts de chaleur).

Le chapitre III est consacré à la formulation analytique de l'équation de chaleur tout en décrivant les modes de transfert thermique y intervenant. Une méthode de calcul est illustrée dans ce sens pour évaluer la quantité du flux thermique de friction entrant dans le disque

Introduction général

Le chapitre IV est consacré à la présentation et à l'interprétation des différents résultats thermomécaniques obtenus à l'aide du code de calcul.



Bibliographe de système freinage

I.1.Introduction :

Les freins sont principalement utilisés pour ralentir un véhicule au-delà de la résistance à la route et la traînée de freinage du moteur .Les freins transforment généralement l'énergie cinétique du véhicule en chaleur, Les freins peuvent également être utilisés pour: Gardez une vitesse constante et Gardez le véhicule à l'arrêt [1].

Le frein est donc un système d'absorption de chaleur. Son efficacité est liée à la capacité de ses constituants d'absorber de la chaleur et d'y résister, et au coefficient de frottement entre eux.

Les freins constituent un organe de sécurité important sur les véhicules, ils permettent de réguler la vitesse, et de s'arrêter, donc notamment d'éviter une collision (freinage d'urgence) [2].

Les premières automobiles, dès 1851, disposaient de freins très rudimentaires, composés de patins, actionnés par un câble ou un volant. Il faut attendre 1884 et les premiers pneus pour que les freinages gagnent en efficacité mais nous en sommes encore très loin d'un "bon" freinage. Le frein à tambour est apparu au début des années 1900 tandis qu'il a fallu patienter jusqu'en 1953 pour que les freins à disques fassent leur apparition. La Citroën DS 19, en 1955, est la première voiture de série à intégrer les freins à disques à l'avant. L'ABS arrive en 1978 chez BMW et Mercedes. Enfin, les premiers disques de frein en carbone-céramique sont montés sur la Mercedes SLR McLaren en 2003 [3].

I.2.système de freinage :

Système primordial de la voiture, le système de freinage est le mécanisme qui assure notre sécurité ainsi que celle de nos passagers. Le système de freinage d'une voiture doit être entretenu et contrôlé régulièrement afin de garder un fonctionnement optimum. Tout conducteur est amené à utiliser trois types de freinage sur sa voiture : le freinage principal, celui actionné grâce à la pédale de frein, le frein moteur, souvent utilisé lors des descentes et

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

le frein de stationnement, utilisé pour immobiliser le véhicule ou en cas de freinage d'urgence.

La structure ci-dessous (Figure. I.1) représente une structure de base système de freinage [4].

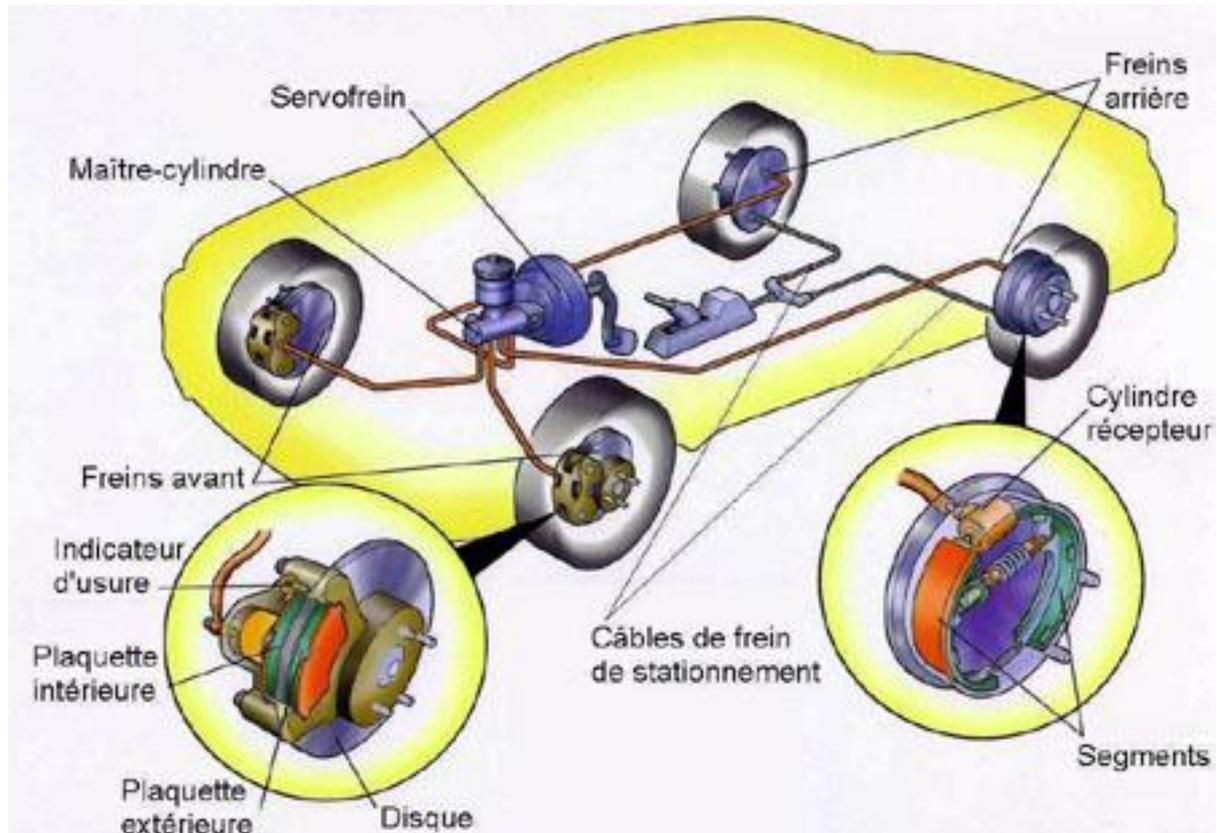


Fig. I.1. Système de freinage. [12].

I.2.1. Freinage par frottement :

I.2.1.a. frein à tambour :

C'est dans le domaine de l'automobile que les freins à tambour ont été utilisés en premier. Ensuite les constructeurs ont majoritairement évolué vers les freins à disque qui offrent des freinages plus progressifs, plus précis et qui éliminent les risques de blocage. Mais de nombreuses voitures sont aujourd'hui encore équipées de freins à tambour notamment sur les roues arrière. [5].

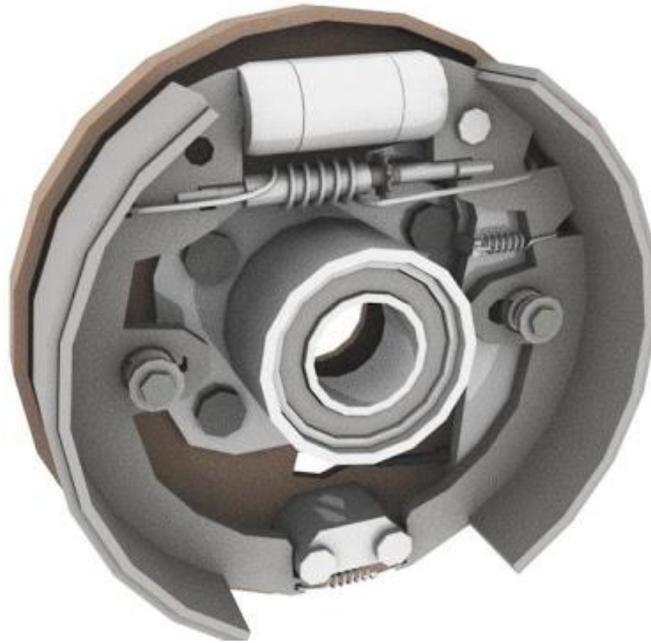


Fig. I.2. Frein à tambour

❖ Fonctionnement

On dit souvent que c'est l'inverse du frein à disque. En effet, au lieu d'avoir des plaquettes qui viennent se serrer sur un disque, le frein à tambour est constitué d'une cloche, le fameux tambour, dans laquelle il y a des mâchoires avec des garnitures qui en s'écartant viennent frotter sur l'intérieur du tambour. [5].

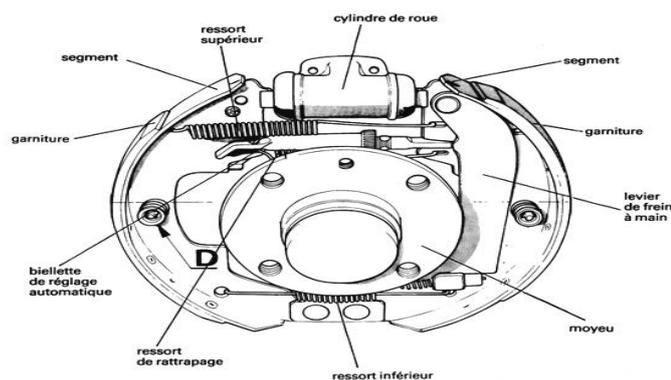


Fig. I.3. Vue 3D d'un frein à tambour

Chapitre 1 : Bibliographie de système freinage

I.2.1.b. frein à disque :

Le frein à disque est un système de freinage performant pour les véhicules munis de roues en contact avec le sol : automobile, avion, train, vélo tout terrain, etc. et pour diverses machines réclamant des freins performants et durables.

Ce système transforme l'énergie cinétique du véhicule en chaleur qui doit être dissipée rapidement. [6].

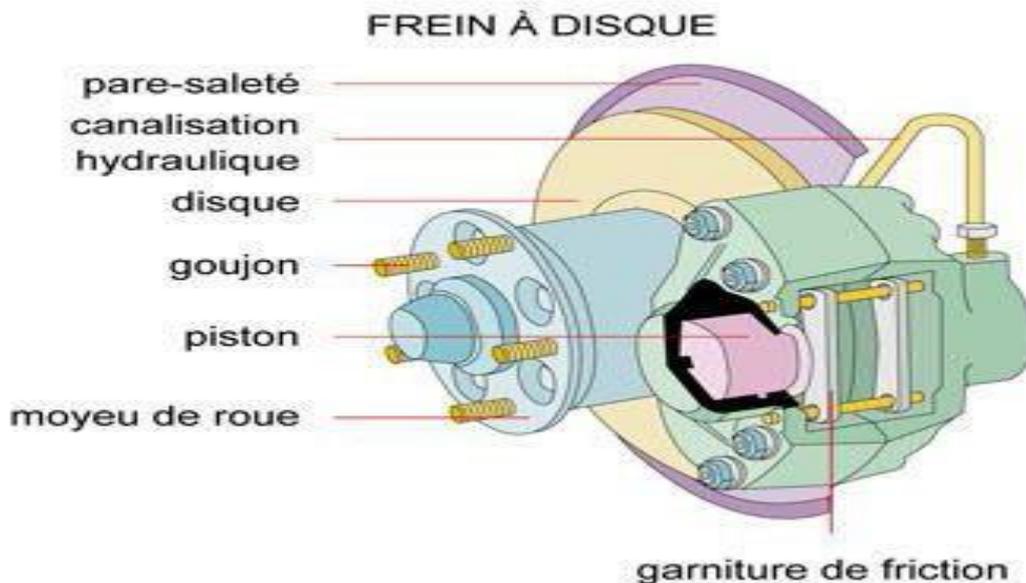


Fig. I.4.Frein disque

❖ *Historique*

Le frein à disque est environ aussi ancien que les véhicules à roues motorisés. Il est d'ailleurs particulièrement proche du frein à patin des vélos. Seul le manque de fiabilité dû aux fortes contraintes imposées aux matériaux du dispositif a freiné son utilisation massive.

Sur les motocyclettes, son utilisation a été rare jusqu'à la Honda CB 750 Four de 1969, qui a imposé le disque à commande hydraulique.

Ce même type de freinage a rapidement été repris sur les machines de compétition. Il s'est peaufiné en se perforant et en devenant double (à l'avant). Dans le domaine automobile, les freins à disques ont commencé à se généraliser dans les années 60 sur les véhicules haut de gamme, avant de s'étendre à l'ensemble des véhicules sur le train avant. En 2005, seules les petites automobiles utilisent toujours les freins à tambours sur l'essieu arrière.

Chapitre 1 : Bibliographie de système freinage

La première voiture à adopter les freins à disques à l'avant de série fut la Citroën DS en 1955. En aviation, ce type de frein, plus léger, plus facile d'entretien que les autres dispositifs, dans un domaine où les coûts sont accessoires, est utilisé depuis plus longtemps.

En 2003, Mercedes Benz innove en proposant des disques de freins en céramique. [7].

❖ Fonctionnement

Le principe de base du disque de frein se résume en la transformation de l'énergie cinétique d'un véhicule en chaleur. Concrètement, un disque de frein est un système qui utilise un disque et des plaquettes. Le premier est fixé sur le moyeu de la roue, les secondes, maintenues dans un étrier ou une chape, ont pour mission de frotter de chaque côté du disque. Lorsqu'un freinage est nécessaire, un mécanisme pousse les plaquettes qui viennent frotter sur le disque, entraînant une force de frottement et la création d'un couple de freinage. Cette action engendre une production de chaleur, nécessitant elle-même la présence d'un mécanisme de refroidissement. On distingue dans ce domaine deux types de disque de frein : le disque plein et le disque ventilé. [6].

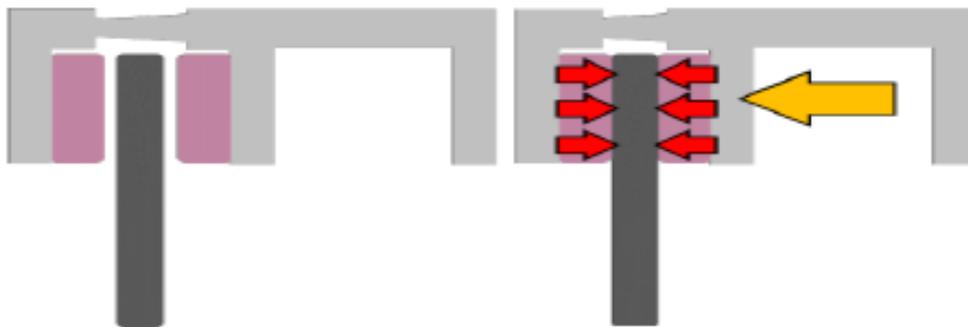


Fig. I.5. Schéma du fonctionnement des freins à disque

❖ Avantage et inconvénient tambour

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 comme « aspirées » par le tambour (effet dû aux formes et forces en jeu). Lorsque le frein à tambour est puissant, cela provoque facilement des blocages de roues dangereux pour la stabilité du véhicule, d'autant plus avec les commandes par câbles, dont le réglage est délicat.

Lorsque les mâchoires sont écartées par une seule came, le frein est peu efficace mais le risque de blocage est faible.

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

Lorsqu'elles sont écartées en plusieurs points (frein double came, ou plus), le nombre de points d'aspiration des garnitures augmente, et avec lui, la force de freinage et le risque de blocage.

C'est la raison pour laquelle la plupart des véhicules, surtout les véhicules à deux roues, sont maintenant équipés de freins à disque.

Sur le plan technique, le frein à tambour est étanche aux poussières et à l'eau. Cette étanchéité lui confère un inconvénient, le refroidissement, qui n'est pas très efficace et peut entraîner une surchauffe en cas de freinages longs ou répétés. Un frein à tambour se refroidit généralement par son pourtour extérieur, muni d'ailettes pour dissiper la chaleur. Certains modèles disposent d'ouïes de refroidissement qui forcent l'air à circuler à l'intérieur, mais au détriment de l'étanchéité, donc de la poussière et de l'usure mais aussi de l'introduction d'eau et du risque de gel de la mâchoire et des patins.

Un autre inconvénient du frein à tambour est sa faculté à parfois s'encrasser de manière importante, chose qui n'arrive pas avec un frein à disque, car les poussières issues du freinage sont automatiquement évacuées vers l'extérieur par la force centrifuge.

Les déformations des tambours et leur faible endurance à l'échauffement entraînent la disparition progressive de ce type de frein sur les véhicules récents. De plus, les freins à disques engendrent moins d'effet gyroscopique particulièrement préjudiciable à une motocyclette. [8].

❖ Avantage et inconvénient disque

Un disque de frein offre une grande puissance de freinage, et un excellent contrôle. Il est plus progressif dans son action, mais nécessite en revanche une plus grande pression de la part du conducteur. Pour remédier à cet inconvénient, le système hydraulique transmettant cette pression est généralement doté d'une assistance afin de réduire la pression que se doit d'appliquer le conducteur. Un témoin d'usure permet d'identifier le moment où il devient nécessaire de changer les disques de frein. La détection d'anomalies sur un disque de frein, comme une déformation, une rayure, une fissure ou encore une cassure est également le signe qu'il est temps de les remplacer. Il est par ailleurs vivement recommandé de changer simultanément le disque et les plaquettes. [9].

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

❖ DIFFÉRENCES ENTRE LES FREINS À DISQUES ET À TAMBOUR

À mesure que les voitures évoluent, les systèmes de freinage font de même. La technologie nous permet de concevoir les meilleures pièces pour maximiser la sécurité sur la route. Nous allons comparer et contraster les deux pour avoir une meilleure idée de leur fonctionnement.

Freins à tambour:

- Nommé pour sa forme de tambour. Toutes les pièces de frein sont stockées dans le tambour.
- Le plus ancien des deux systèmes de frein de service.
- Pivote le long de la roue. Lorsque les freins sont appliqués, les freins, les sabots sont forcés contre les côtés du tambour et la roue est ralentie.
- Sujet à la décoloration des freins, où vous perdez la puissance de freinage au fil du temps à cause de l'accumulation de chaleur dans le système de freinage.
- Toujours utilisé dans les véhicules modernes, mais généralement juste à l'arrière.

Freins à disque:

- Apparue au début des années 60 comme alternative.
- Construit avec un grand rotor métallique, deux plaquettes de frein et une pince hydraulique appelée l'étrier.
- Plus de puissance de freinage que les freins à tambour.
- Dissipe mieux la chaleur que les freins à tambour.

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

- Plus facile à inspecter, pas besoin de retirer les roues.

Bien que ces deux systèmes utilisent la chaleur et la friction pour arrêter complètement votre véhicule, comme vous pouvez le voir, ils sont très différents. Le système de freinage à disque est peut-être supérieur, mais cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de place pour les freins à tambour dans l'industrie. Comme toujours [10].

I.3.les composants d'un frein à disque

Les composants de l'ensemble du disque de frein :

- Disque
- étrier
- plaquette de frein

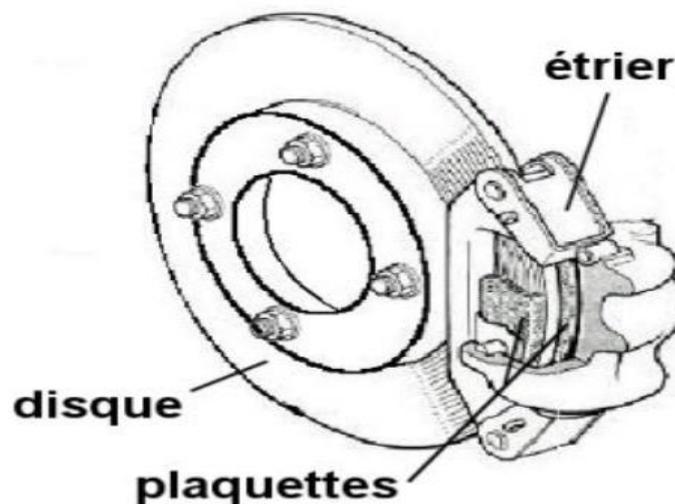


Fig. I.6.Les composants frein disque.

I.4.disque frein

Disque circulaire relié par des boulons au moyeu de la roue et qui tourne avec cette dernière. Les disques de frein sont le plus souvent fabriqués en fer ou en acier, bien que certaines voitures haut de gamme utilisent des disques de frein en carbone et céramique. Les disques de frein peuvent être à fente ou percés pour une meilleure dispersion de la chaleur [11].

Chapitre 1 : Bibliographie de système freinage

I.4.1.1. Description d'un disque

Le disque est constitué d'un anneau plein avec deux pistes de frottement, d'un bol qui est fixé sur le moyeu et sur lequel est fixée la jante et d'un raccordement entre les pistes et le bol. Ce raccordement est nécessaire car l'anneau et la partie du bol qui est fixée au moyeu ne sont pas sur un même plan pour des questions d'encombrement et de logement des plaquettes et de l'étrier. La jonction entre le bol et les pistes est souvent usinée en forme de gorge pour limiter le flux de chaleur issu des pistes vers le bol afin d'éviter un échauffement excessif de la jante et du pneumatique.

Les pistes de frottement sont dites extérieures quand elles se situent du côté de la jante et intérieures quand elles se situent du côté de l'essieu. [12].

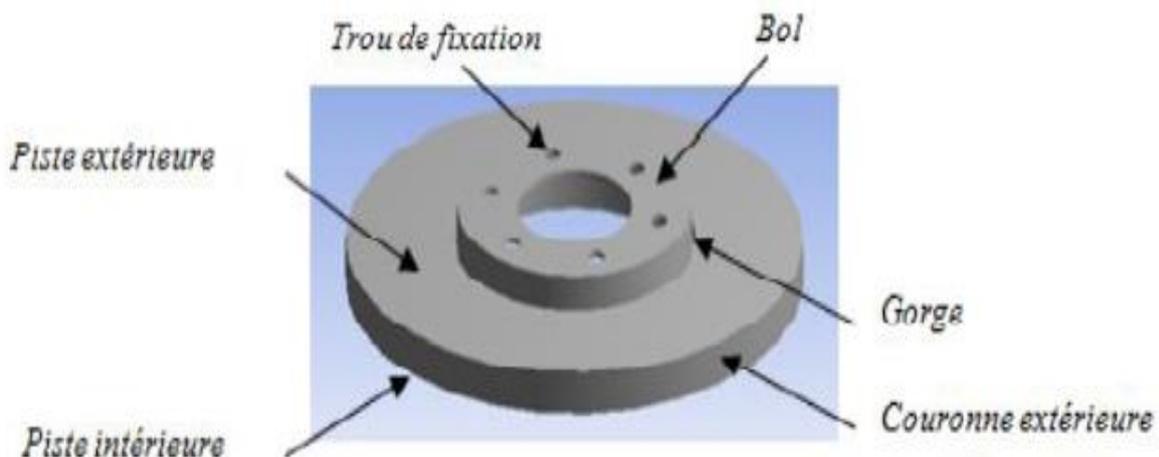


Fig. I.7. Description d'un disque

I.4.1.a. Types disque de frein

La différence est assez simple, un disque plein est ce qu'il y a de plus simple à savoir un disque pur et simple sans aucune particularité. Un disque ventilé ressemble à deux disques pleins superposés avec un espace entre les deux pour améliorer le refroidissement (elle peut en effet se dissiper aussi par le centre du disque). Généralement, les freins avant sont ventilés et ceux de l'arrière sont pleins pour des raisons de coût (les freins arrière étant moins sollicités, il n'est pas indispensable d'y mettre des disques ventilés). [13].

Chapitre 1 : Bibliographie de système freinage

Il existe deux types de disques :

- Ventilé
- Pleins

❖ Disque Ventilé

Est en réalité composé de deux disques pleins accrochés l'un à l'autre par des ailettes. Lors du mouvement de l'automobile, l'air entre librement dans l'espace formé entre les deux disques ce qui permet de les refroidir plus efficacement. On installe généralement les disques ventilés sur les roues avant du véhicule. [14]



Fig. I.8.Ventilé.

❖ Pleins

Étant moins chers sont souvent utilisés sur les freins arrière moins sollicités. [14].



Fig. I.9.Pleins.

I.4.1.b. Autres types

❖ Disques Rainurés

La raison pour laquelle on rainure les disques est trop souvent mal comprise. Les gens pensent 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. [14].



Fig. I.10. Disques Rainurés.

❖ 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, une analyse de la contribution du transfert thermique des disques tournants...

Disque avec une masse insuffisante (diamètre trop petit ou trop fin) a tendance à Craqueler et casser. [14].



Fig. I.11. Disques Percés.

I.4.2.étrier

Boîtier qui s'adapte au disque de frein et maintient les plaquettes de frein et les pistons, et qui contient un conduit pour le liquide de frein.

Il existe 2 types d'étriers de frein : flottants (ou coulissants) et fixes.

I.4.2. a. Flottants

« Flottent » au-dessus du disque de frein et ne comportent des pistons que sur un seul côté. Quand le conducteur actionne les freins, les pistons pressent les plaquettes sur un côté du disque de frein, ce qui fait coulisser l'étrier afin que les plaquettes du côté sans piston de l'étrier entrent aussi en contact avec le disque de frein [11].

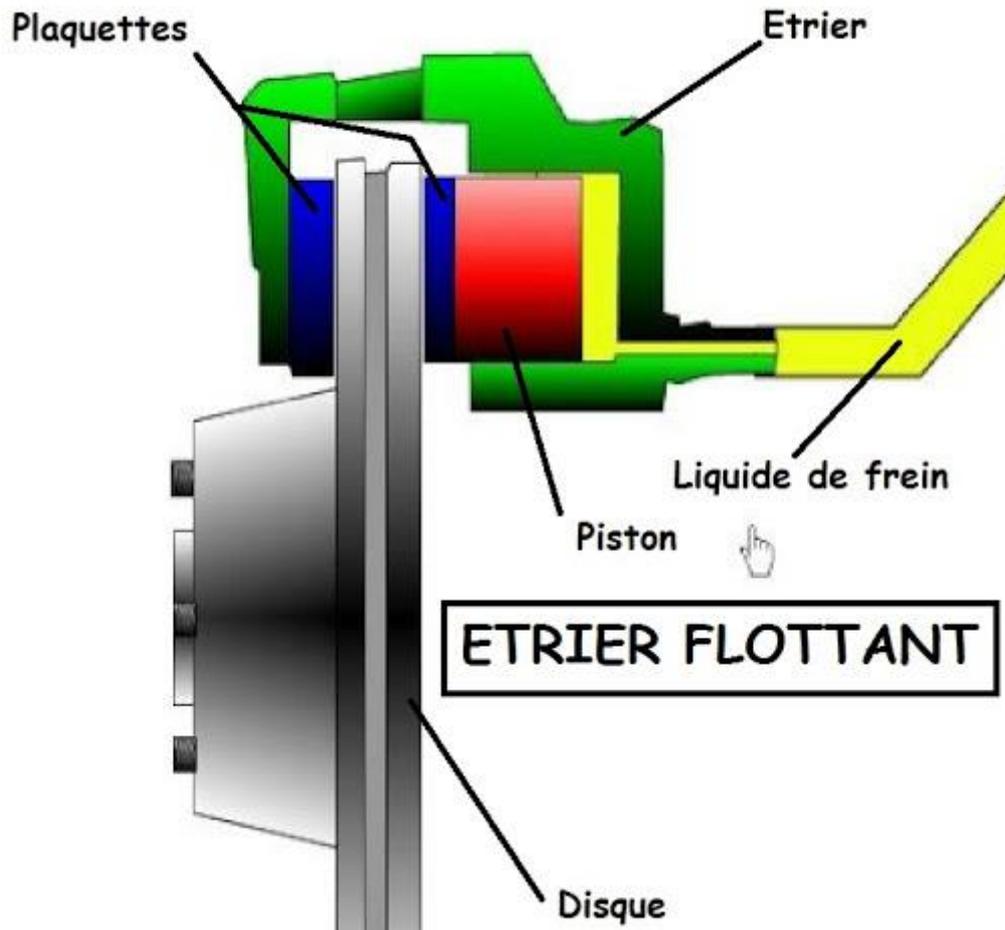


Fig. I.12. Étrier Flottants.

I.4.2. b. fixes

Sont boulonnés et ont quant à eux des pistons sur les 2 côtés du disque de frein, qui s'actionnent quand le conducteur freine. Les étriers fixes exercent une pression de façon plus uniforme sur les freins et serrent plus fermement le disque de frein, alors que les étriers flottants se retrouvent sur la plupart des véhicules et conviennent tout à fait pour une conduite quotidienne. [11].

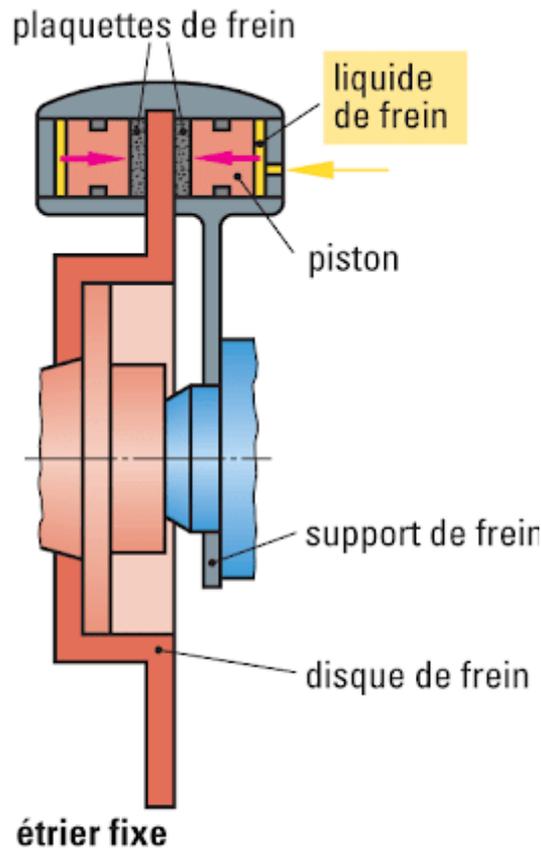


Fig. I.13. étrier fixes.[12].

I.4.3.piston

Cylindre connecté au système de freinage hydraulique. Le piston est ce qui pousse les plaquettes de frein contre le disque quand le conducteur presse la pédale. Certains systèmes de frein disposent d'un seul piston qui fait bouger les plaquettes tandis que d'autres comportent 2 pistons qui poussent les plaquettes de chaque côté du disque de frein. D'autres sont composés de 4, 6 voire 8 pistons pour une meilleure performance de freinage, en contrepartie d'un coût plus élevé et d'un fonctionnement plus complexe. [11]

I.5.capteur

Certains véhicules ont des freins qui comportent des capteurs incorporés dans les plaquettes de frein et qui permettent au conducteur de savoir quand les plaquettes sont usées. D'autres capteurs jouent un rôle dans le système ABS du véhicule. [11].

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

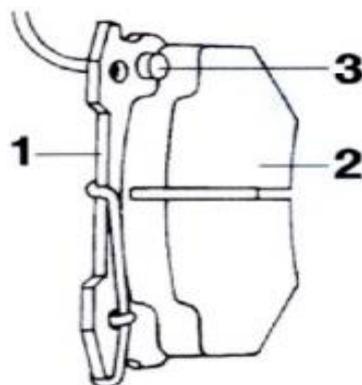
I.6. Plaquette de frein

Composant qui presse le disque de frein, créant la friction qui ralentit et arrête la voiture. Les plaquettes se composent d'une partie métallique appelée un sabot et d'une garniture de frein attachée à ce sabot. La garniture est le composant qui entre en contact avec le disque de frein et qui s'use au fil de l'utilisation. Les garnitures de frein sont composées de plusieurs matériaux et sont réparties en 3 catégories : les matériaux naturels, semi-métalliques, et en céramique. Le matériau choisi aura un impact sur la durée de vie du frein, le volume de bruit émis quand les freins sont utilisés et la performance de freinage pour arrêter plus ou moins vite la voiture.

Elles doivent :

- Présenter une bonne résistance à l'usure et ne pas être agressive vis-à-vis du disque
- Fonctionner sans bruit
- Résister à des températures de fonctionnement pouvant atteindre 800°C.

[11]



1. Support métallique
2. Garniture
3. Plot de témoin d'usure

Fig. I.14. Plaquette de frein.[12].

I.7. PHENOMENES THERMIQUES DANS LE DISQUE

Lors de la phase de freinage, il existe des **gradients thermiques** qui apparaissent dans le disque qui causent son endommagement. En effet, le disque tend à se dilater dans les zones chaudes, mais il est finalement "maintenu" par les zones froides. Cela donne lieu à des contraintes de compression avec plastification. Lors du refroidissement, il y a apparition de

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

contraintes résiduelles de traction. Le disque subit donc des cycles de contraintes traction/Compression qui s'apparente à des cycles de fatigue thermique. Il existe différents types de Gradients thermiques :

- les gradients dans l'épaisseur des pistes ;
- les gradients surfaciques (radiaux et surtout ortho radiaux) ;
- les gradients dans la gorge du disque [12].

I.8. Phénomènes mécaniques dans le disque :

Les phénomènes mécaniques peuvent être classés en trois catégories :

- le chargement (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 qui Donnent la déformation globale du disque, La dissymétrie de dilatations engendrée favorise la mise en cône du disque (Fig. I.15).
- le contact entre le disque et les plaquettes.
- l'usure [12].

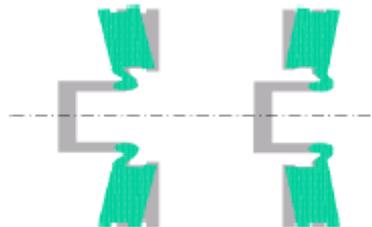


Fig. I.15. Mise en cône d'un disque de frein.

I.9. Matériaux conventionnels :

Les matériaux les plus souvent utilisés pour la fabrication de disques sont des fontes ou des aciers inoxydables. Dans la compétition de haut niveau (Formule 1, sport prototype) ainsi que dans l'aéronautique, on utilise maintenant des freins en Carbone

MATERIAUX CONVENTIONNELS : ACIERS, FONTES. [15].

➤ **Acier :**

L'acier et la fonte sont les matériaux utilisés le plus couramment de nos jours dans L'industrie automobile. 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

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

Sont une grande ductilité ainsi qu'une grande résilience, en particulier à haute température.[15].

➤ Fontes:

Sont des fontes à graphite sphéroïdale du type FGS 350-22 (norme AFNOR : NF A32 201) dont les caractéristiques sont une très grande ductilité et une grande résilience. Leur usinabilité est excellente ainsi que leur capacité d'amortissement des vibrations.

Caractéristiques :

- Masse volumique (g/cm³) : 7,1 à 7,3
- Conductibilité thermique (W.m⁻¹.°C⁻¹) : 35
- Dilatation linéaire (10⁻⁶.C⁻¹) : 11 à 12
- R (MPa) : 350
- Rp0,2 (MPa) :220
- A% : 22
- HB : 150
- Limite de fatigue (MPa) : 185 à 200
- Module d'élasticité (10⁴ MPa) : 17
- Températures d'utilisation (°C) : de 0 à 600
- Aptitude au moulage et à l'usinage : très bonne

D'autres fontes plus élaborées sont aussi utilisées comme les fontes perlitiques, élément d'alliage Ni -Mo, Cr-Mo, Mo, Cr-Ni. Résistance mécanique 300 à 420 MPa, résistance à la compression de 800 à 1400 MPa, dureté HB 240-280 (caractéristiques mécaniques meilleures qui conduisent à une diminution de l'épaisseur du disque).

La différence entre les aciers et les fontes se situe aussi au niveau du film de transfert qui se forme entre le disque et la plaquette de frein. Pour un acier, on a un dépôt à microstructure bien cristallisée et une composition chimique fonction des réactivités entre la matière de frottement et les oxydes de fer. Pour une fonte, le dépôt présente un caractère plus complexe avec l'existence de matériaux amorphes et de composition chimique plus complexe. D'où deux hypothèses :

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

- les températures de surface atteintes sur les aspérités de contact où se génère le dépôt sont très différentes du fait des caractéristiques thermiques différentes de l'acier et de la fonte (en particulier de l'effusivité)

-les actions mécaniques sont différentes à l'interface du fait de caractéristiques mécaniques différentes entre l'acier (ductile) et la fonte (fragile) entraînant des ruptures de nature différentes au niveau des aspérités de surface.. [15].

➤ **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 premier temps

Pour une application dans le domaine aéronautique.

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 fatigue Mécanique.
- Ils sont invulnérables à l'oxydation jusqu'à 500°C. Une couche antioxydation permet Une protection à plus haute température.
- Ils ont une capacité d'absorption thermique double de l'acier
- Ils ont des caractéristique mécaniques spécifiques (comparable, quelle que soit la Température, à l'aluminium quand il est froid) qui augmentent avec la température Jusqu'à 2000° C [15].

➤ **Conditions d'utilisation :**

De façon à fonctionner avec le meilleur rendement et durer le plus longtemps possible, les températures des disques doivent être correctes et équilibrées. En général, les disques d'un véhicule devraient tous fonctionner à des températures identiques. 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 type de

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

plaquette. Avec une qualité CM 83 la température du disque doit être entre 400° C et 600°C.[15].

I.10. Défaillance des systèmes de freinage

Il existe plusieurs types de défaillance dans les systèmes de freinages mais nous intéressons les défaillances des plaquettes et le disque frein :

I.10. 1 .Plaquette de frein pour disque

➤ Plaquettes de frein effilées

Les défaillances des plaquettes de frein sont les suivantes:

- Aspect : Usure irrégulière ou plaquettes effilées

Cause : Déformation de l'étrier, coulisseaux collants et jeu excessif à l'étrier

- Conséquences : Usure prématurée des plaquettes et bruit au freinage. Pression de freinage inégale.
- Solution : Remplacez le jeu de plaquettes de frein [16].



Fig. I.16. Plaquettes de frein effilées.[10]

➤ Dénaturation

- Aspect : Matériau de friction partiellement carbonisé ou brûlé (voir côtés blancs).
- Cause : Surchauffe extrême des plaquettes pendant une période prolongée due à un freinage intensif ou au frottement de la plaquette de frein sur le disque.
- Conséquences : Réduction de l'efficacité de freinage initiale, détérioration excessive du matériau et usure anormale. Le matériau s'effrite et se fissure

Solution : Remplacez le jeu de plaquettes [16].



Fig. I.16. Plaquette dénaturée. [10]

➤ **Plaquettes Fissurées**

- Aspect : Petites fissures au milieu de la plaquette
- Cause : Les fissures indiquent que l'étrier est grippé. Le piston déforme la plaque d'appui de la plaquette ce qui fissure le matériau de friction.
- Conséquences : Bruit lors du freinage, usure irrégulière des plaquettes, le véhicule se déporte pendant le freinage et surchauffe d'un côté de la voiture.
- Solution : Faites l'entretien de l'étrier ou réparez-le et remplacez le jeu de plaquettes de frein [16].



Fig. I.17. Plaquettes Fissurées.. [10]

➤ **Plaquette contaminée**

- Aspect : Le matériau de friction est contaminé par de l'huile, de la graisse ou du liquide de frein.
- Cause : Écoulement de liquide lors de l'entretien ou fuite au niveau de l'étrier.
- Conséquences : Le véhicule se déporte latéralement lors du freinage et les performances de freinage diminuent.

Solution : Identifiez et réparez la cause de la contamination. Nettoyez la surface du disque. Remplacez le jeu complet de plaquettes de frein [16].



Fig. I.18. Contaminée de surface.. [10]

I.10.2. disque de freins

Il existe plusieurs cas des défaillances des disques de freins sont :

➤ **Le disque à atteint son épaisseur minimale**

L'épaisseur minimale est généralement inscrite sur la tranche du disque [17].

➤ **Un disque de frein fissuré ou cassé**

Le remplacement est impératif. Vous devrez également changer les plaquettes de frein et faire contrôler vos étriers de frein. [17].



Fig. I.19. Disque fissurés..[10]

Chapitre 1 : Bibliographe de système freinage

➤ Les plaquettes trop usées ont légèrement attaqué la tôle du disque

Les plaquettes de frein ont été changées tardivement et la partie métallique de celles-ci ont légèrement frotté et marqué le disque à l'intérieur ou à l'extérieur [17].



Fig. I.20. Disque endommagé par le fer d'une plaquette [10]

➤ Le disque a bleuie

Le disque a bleuie lorsqu'il a chauffé de façon excessive. Ce phénomène est dû à un freinage trop fort et prolongé. Ainsi, préférez un freinage du véhicule au frein moteur surtout si vous circulez en montagne ou si vous tractez une remorque lourde ou une caravane.

Si les normes d'épaisseur sont respectées et que les disques ne sont pas voilés, alors ils sont encore bons [17].

I.11. PROBLEME DU DISQUE DE FREIN

La cause principale d'une surchauffe de disque de frein est le frottement. Le principe de fonctionnement du système de freinage est bien entendu basé sur le frottement, mais un style de conduite agressif peut augmenter cet effet. Cela peut provoquer une augmentation de température des disques de frein qui peuvent atteindre 600 à 700°C. De plus, la surchauffe peut être provoquée par :

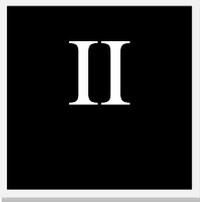
- Défaillance du système de freinage ;
- Mauvaise installation des plaquettes de frein ;
- Utilisation de disques et de plaquettes de frein après la date recommandée d'utilisation ;
- Déformation des disques de frein ;

Chapitre 1 : Bibliographie de système freinage

- Mauvaise qualité des disques et des plaquettes de frein ;
- Grippage des étriers de frein.

N'oubliez pas que si vous avez des freins à tambour à l'arrière, la majorité des sollicitations liées au freinage sont appliqués sur les disques de frein avant. Cela peut avoir un effet sur la surchauffe des disques de frein.

De ce fait, le disque est le lieu de très forts gradients thermiques dans l'épaisseur des pistes de frottement, mais aussi dans la direction circonférentielle. Ces derniers gradients sont dus 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 apparait ce qu'on appelle des points chauds; ce sont des zones circulaires régulièrement espacées sur les pistes où la température est localement plus 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 [18].



généralités sur le transfert de chaleur

II.1. Introduction

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie. Lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un système à des températures différentes sont mises en contact, on constate une tendance à l'égalisation des températures. On dit qu'il y'a transfert de chaleur.

Le transfert de chaleur obéit aux principes fondamentaux de la thermodynamique, mais les lois de la thermodynamique ne suffisent pas pour expliquer de quelle manière s'effectue le transfert de chaleur ou pour prévoir la vitesse de ce transfert. Le transfert de chaleur est donc régit par d'autres lois, très importantes dans différentes branches de l'industrie. Citons par exemple pour le génie chimique. La conception et le fonctionnement des évaporateurs, des condenseurs, des échangeurs entre fluide chaud et froid, des colonnes à distillation, des réacteurs, etc....

Pour l'ingénieur de génie chimique les problèmes des transferts thermiques se ramènent généralement à l'une ou l'autre de ces deux formes :

- 1- Rechercher la manière la plus efficace de transmettre une quantité de donnée de chaleur entre deux systèmes par unités de temps.
- 2- Rechercher comment limiter les déperditions (ou les gains) calorifiques à travers une surface.

La résolution de ces problèmes est souvent complexe car le transfert de chaleur peut résulter de trois mécanismes de propagation obéissant à des lois bien différentes et mis en jeu parfois simultanément.

- La conduction.
- La convection.
- Le rayonnement.

Chapitre 2 : Généralité sur transfert de chaleur

Toutefois, le développement de l'un quelconque de ces mécanismes nécessite l'existence d'une différence de température qui joue le rôle de différence de potentiel pour l'échange de chaleur. [19].

II.2. 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 :

- 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 **in** stationnaire. [20].

II.3. Phénomène de transfert thermique

Il existe 3 modes fondamentaux de transfert de température :

II.3.1. Transfert Thermique par conduction

La conduction thermique est un transfert de chaleur qui se réalise sans déplacement de matière. Et transfert de chaleur est rencontré le plus souvent dans des matériaux solides, mais il peut aussi être étudié dans des fluides, liquide ou gaz. est spécifique aux solides (bois, métaux, etc.), Le mouvement d'agitation thermique (flux de chaleur) va toujours des zones chaudes vers les zones froides. Les mauvais conducteurs (gaz, laine de verre ou polystyrène) sont appelés isolants.

► Flux de chaleur :

Quantité de chaleur transférée par unité de *temps*

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

► Densité de flux de chaleur :

Quantité de chaleur transférée par unité de temps par unité de surface

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

Comment calculer flux de chaleur conductivité :

$$\Phi = \frac{T_2 - T_1}{R_{th}} \quad (\text{II.3})$$

R_{th} : La résistance thermique = e/λ

λ : la conductivité thermique unité (en $\text{w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$)

II.3.1.a. Loi de Fourier

La Loi de Fourier exprime que la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température :

$$\Phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II.4})$$

La conductivité thermique λ s'exprime en $\text{J. m}^{-1} . \text{K}^{-1} . \text{s}^{-1}$ ou, soit des $\text{W. m}^{-1} . \text{K}^{-1}$

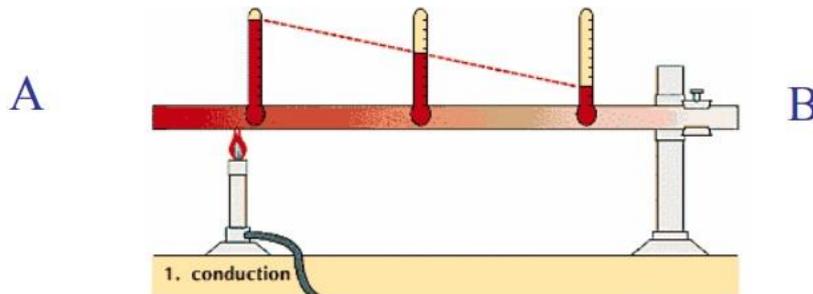


Fig. II.2. schéma de transfert thermique par conduction

Dans cette barre métallique chauffée en son extrémité A, on observe un gradient longitudinal de température $T(x)$: $T(A) > T(B)$. Cette différence de la potentielle température $T(A) - T(B)$ provoque un flux de chaleur Φ :

$$\Phi = h S [T(A) - T(B)] \text{ en } \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (\text{II.5})$$

(h) : est défini comme un coefficient de transfert de chaleur

II.3.1.b. 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 conductor en régime permanent sans source interne, le bilan thermique s'écrit : [21].

$$\text{div}(\vec{J}Q)=0 \quad (\text{II.6})$$

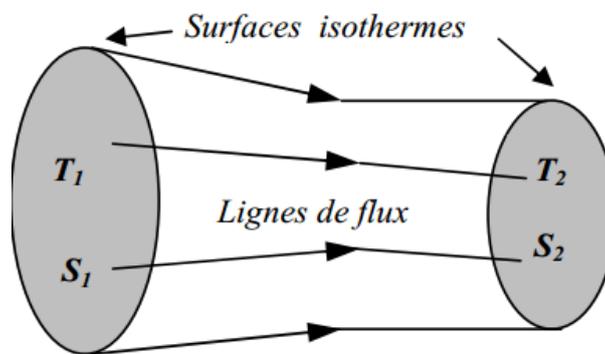


Fig. II.3. Résistance thermique.

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 .

$$\iiint_V \text{div}(\vec{J}Q) dV = 0 = \iint_{S_1} \text{div}(\vec{J}_1 Q) ds_1 + \iint_{S_2} \text{div}(\vec{J}_2 Q) ds_2 = -\Phi_1 + \Phi_2 \quad (\text{II.7})$$

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

$$\gamma \iint_S -(\overline{\text{grad}T})_s d\vec{s} = \Phi = \text{Cst} \quad (\text{II.8})$$

Chapitre 2 : Généralité sur transfert de chaleur

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 :

$$\int_{i \text{ flux}} - \overrightarrow{\text{grad} T} d\vec{l} = T_1 - T_2 \quad (\text{II.9})$$

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

On obtient donc la relation :

$$T_1 - T_2 = R\Phi \quad (\text{II.10})$$

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 : [4].

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = h (T_p - T_{\text{car}}) \Rightarrow R = \frac{1}{hS} \quad (\text{II.11})$$

II.3.2. Transfert Thermique par convection

La convection thermique est un transfert de chaleur qui se réalise avec déplacement de matière. est spécifique aux fluides (liquide, gaz, air), ainsi qu'aux éléments déformables (comme les roches à hautes pressions dans le manteau terrestre), elle est liée au mouvement du fluide, donc à un transport de matière.

II.3.2.a. L'expression du flux de chaleur en convection est la suivante (Loi de Newton)

$$\Phi = h \cdot S (T_s - T_\infty) \quad (\text{II.12})$$

Chapitre 2 : Généralité sur transfert de chaleur

(Φ) : Flux de chaleur transmis par convection [W].

(h) : Coefficient de transfert [$W.m^{-2} K^{-1}$].

(T_s) : Température de la surface d'échange [K, °C].

(T_∞) : Température de la fluide loin de la surface d'échange [K, °C].

(S) : La surface d'échange solide/fluide [m^2].

II.3.2.b. L'expression de la résistance thermique de convection

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} = \frac{1}{h \cdot S} \quad (II.13)$$

II.3.3. Transfert par rayonnement

Est une émission de rayonnement électromagnétique par un corps chaud, le rayonnement a la particularité de se déplacer dans le vide (rayonnement solaire). L'énergie électromagnétique reçue par le système est absorbée et convertie en énergie thermique (chaleur)

II.3.3.a. La loi de Stefan-Boltzmann (ou loi de Stefan)

$$\varphi = F \varepsilon \sigma (\Delta T)^4 \quad (II.14)$$

Soit, le flux rayonné (noté Φ) :

$$\Phi = S x \varphi = S F \varepsilon \sigma (\Delta T)^4 \quad (II.15)$$

(F) : Le facteur de forme.

(ε) : L'émissivité.

(σ) : La constante de Stephan-Boltzmann

$$\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4} \quad (II.16)$$

II.3.3.b. Flux thermique

Chapitre 2 : Généralité sur transfert de chaleur

Le flux thermique est la quantité d'énergie thermique qui traverse une surface isotherme par unité de temps. Il est appelé « puissance thermique » pour les équipements thermiques tels que les radiateurs.

$$\Phi = \frac{\sigma Q}{dt} \quad (\text{II.17})$$

II.3.3.c. Densité de flux thermique

La densité de flux thermique (ou flux thermique surfacique), c'est le flux thermique par unité de surface.

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{1}{s} \frac{\sigma Q}{dt} \quad (\text{II.18})$$

Si la densité de flux est uniforme sur la surface considérée :

$$\varphi = \frac{\Phi}{s} \quad (\text{II.19})$$

II.4. COMPARISON DES MODES DE TRANSFERT de Chaleur

Tableau. II.4. COMPARISON DES MODES DE TRANSFERT de Chaleur [22]

Mode de transfert	Matière de transfert	Milieu de transfert	Transport de matière
Conduction	Solides et fluides	Au sein d'un seul corps ou par contact entre deux corps	Non
Convection	Fluides	Au sein d'un seul fluide ou un contact entre un solide et un fluide	Oui
Rayonnement	Solides ; fluides et vide	A partir d'un corps rayonnant vers un autre	Non

II.5. Equation de Chaleur

Dans sa forme monodimensionnelle, elle décrit le transfert de chaleur unidirectionnel au travers d'un mur plan : [23]

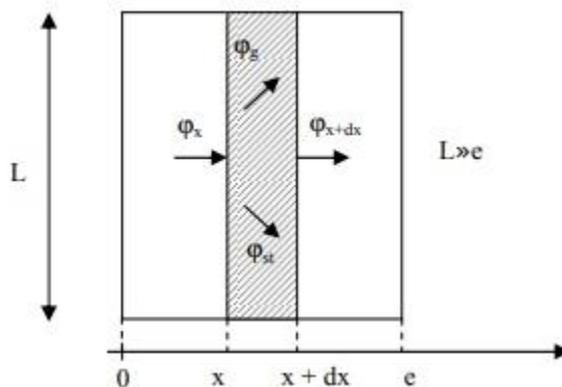


Figure. II.5 : Bilan thermique pour un système unidirectionnel

Chapitre 2 : Généralité sur transfert de chaleur

-Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit :

$$\phi_x + \phi_g = \phi_{x+dx} + \phi_{st} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$\phi_x = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x \quad \text{Et} \quad \phi_{x+dx} = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} \quad (\text{II.21})$$

$$\phi_g = \dot{q} S dx \quad (\text{II.22})$$

$$\phi_{st} = \rho c_p S dx \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.23})$$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par dx, nous obtenons :

$$\frac{-\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} - \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x}{dx} + \dot{q} S = \rho c_p S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.24})$$

Soit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} S = \rho c_p S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.25})$$

Nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas tridimensionnel :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.26})$$

-Equation de la chaleur en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.27})$$

-Equation de la chaleur en coordonnées sphériques :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2(r T)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.28})$$



modèle mathématique

III.1.Introduction

Le L'objectif de ce travail consiste à apporter une connaissance finalisée portant sur la répartition des températures dans un disque d'un système de freinage de type ABS, en réponse à différents scénarios de freinage caractérisés par les différents paramètres se rapportant au contact roue-chaussée. Une telle analyse permet de déterminer l'histoire thermique transitoire du disque pour une meilleure compréhension de la réponse mécanique de la structure des organes de freinage.

Le dispositif étudié est un disque de frein de type ABS à canaux de ventilation ou plein (on verra avec le temps de simulation si on prend les deux) (figure 1). Les propriétés thermo physiques du disque sont déterminées à une température moyenne de 200°C. Les caractéristiques géométriques ainsi que les propriétés thermo physiques des deux antagonistes patin-disque sont récapitulées dans les tableaux 1 et 2. Par ailleurs, nous supposons que le coefficient d'adhérence reste constant pendant l'opération de freinage et que le flux de dégradation d'énergie mécanique en chaleur est uniformément réparti sur le secteur de contact patin-disque. [24]

III.2.l'outil consol multiphysiques :

Est un **logiciel** de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce **logiciel** permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques

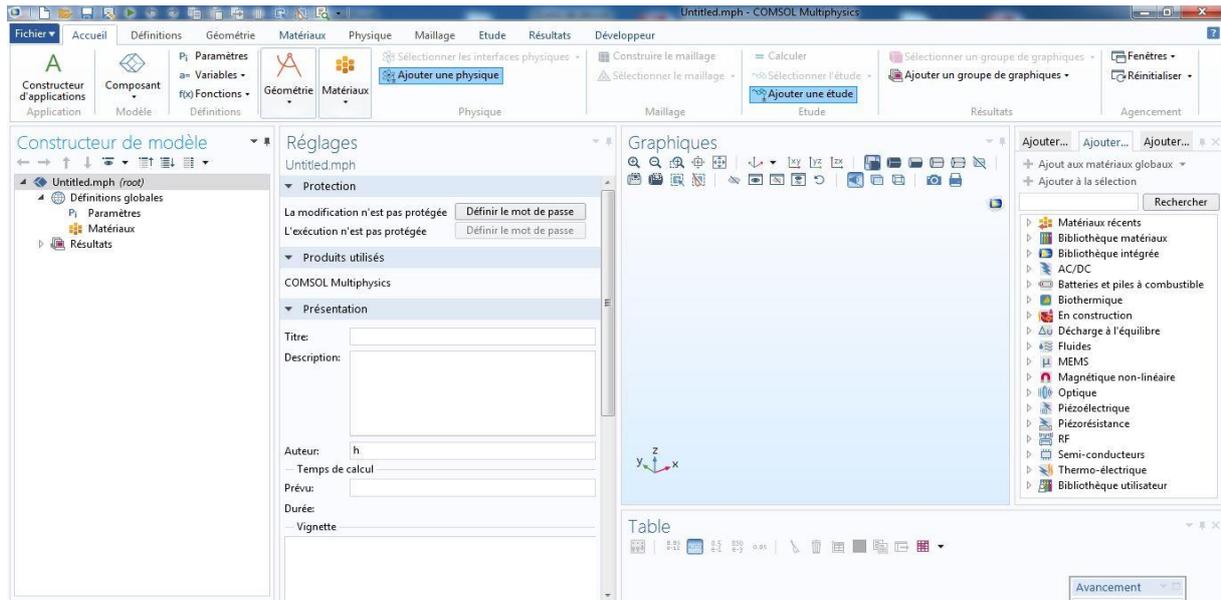


Fig. III.1. schéma d'un comsol multiphysiques

III.3. Géométrie du problème

Lors du freinage la grande part de l'énergie cinétique, développée par le véhicule, est convertie en énergie thermique dissipée par frottement entre le disque et les plaquettes. Cette conversion provoque une augmentation de température dans les organes en contact. Notre étude consiste à la caractérisation, par une méthode numérique, de l'évolution de la température dans le disque et dans la garniture à chaque instant de la période de freinage.

Pour cela nous avons défini le système de freinage par un modèle géométrique simplifié (figure1).[24]

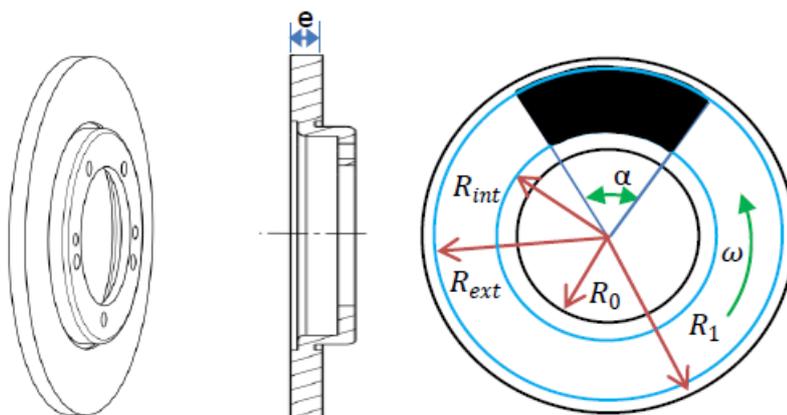


Fig. III.3. Définition géométrique du problème.

Tableau. III.4. Données géométriques du système de freinage

Rayon intérieur du disque	$R_i = 45 \text{ mm} = R_0$
Rayon extérieur du disque	$R_e = 125 \text{ mm} = R_1$
Epaisseur du disque	$e = 15 \text{ mm}$
Rayon intérieur du patin	$R_{ip} = 83 \text{ mm} = R_{int}$
Rayon extérieur du patin	$R_{ep} = 122 \text{ mm} = R_{ext}$
Surface du patin	$S_p = 2384 \text{ mm}^2$

Tableau. III.4. Données physiques des deux antagonistes patin-disque à une température moyenne de 200°C (Choi et al. 2004)

Propriétés thermo physiques	Disque	patin
Masse volumique	$\rho_d = 7100 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$\rho_p = 1400 \text{ Kg m}^{-3}$
Chaleur volumique	$C_d = 452 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$C_p = 1000 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Conductivité thermique	$\lambda_d = 57 \text{ w m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$\lambda_p = 5 \text{ w m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

III.4. Modélisation du phénomène de transfert thermique

D'après M. Maniana [25] en 2009, Le phénomène de transfert thermique par conduction-convection et les conditions aux limites, dans les matériaux où les caractéristiques thermo physiques varient avec la température est modélisé dans les différents éléments du frein par les équations (1), (2), (3) et (4).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{III.1})$$

Par raisonnement de symétrie axiale par rapport au plan médian du disque, on s'est limité à l'étude de la moitié du disque. Dans cet article, les résultats sont présentés pour un maillage uniforme de 153 nœuds suivant la direction radiale, XXX nœuds suivant la direction angulaire et XX nœuds suivant la direction axiale.

III.5. Conditions aux limites

Pour appliquer les conditions aux limites au niveau du contact patin-disque, nous avons convenu de donner un mouvement de rotation aux patins par rapport à un observateur lié au disque. Ainsi, les conditions aux limites au niveau du contact disque-patin, seront animées d'un mouvement de rotation uniformément retardé et glissant dans le sens opposé à celui des roues.

Au cours d'un freinage d'arrêt, l'énergie cinétique du véhicule est convertie en chaleur et travail mécanique : [26]

$$\frac{dEc}{dt} = w + Q \quad (\text{III.2})$$

Le mouvement étant uniformément retardé, la puissance totale de freinage à dissiper n'est pas constante. Elle est maximale au début du freinage et décroît avec la vitesse du véhicule :

$$Q = M(V_i + \gamma t)\gamma - mR^2 \ddot{\theta} \dot{\theta} \quad (\text{III.3})$$

Cette puissance est absorbée à la fois par le disque et le patin. En supposant que la densité de flux thermique fournie à la garniture du patin Q_p et du disque Q_d varient dans les mêmes proportions que leurs effusivités respectives ξ_p et ξ_d on peut écrire alors (Roussette et al. 2003 ; Bodovillé., 2001)

$$Q_p = \frac{S_p \xi_p}{S_p \xi_p + S_d \xi_d} Q \quad (\text{III.4})$$

$$Q_d = Q - Q_p$$

Ce flux de chaleur est réactualisé à chaque pas de temps en vue de tenir compte de la décélération du mouvement. Parallèlement, et pour tenir compte du déplacement relatif du patin contre la surface du disque (figure III.5), nous avons développé une technique dite de condition limite glissante qui permet de réactualiser la position du patin après un laps de temps 'n Δt ' correspondant à l'équivalent d'un pas angulaire $\Delta\theta$. Il s'agit en fait du temps

Chapitre 3 : Modèle mathématique

s'écoulant entre deux positions angulaires consécutives du secteur patin-disque. Ainsi, pendant l'intervalle de temps $[t, t+n \Delta t]$, le patin est supposé restant figé dans une même position.

Le pas angulaire étant fixé par le maillage, le pas de temps Δt est alors calculé pour chaque position du patin par rapport au disque, par résolution de l'équation du mouvement donnant $\Delta\theta$ en fonction de Δt , en prenant délibérément $n = 3$:

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \ddot{\theta}(n\Delta t)^2 + \dot{\theta} n \Delta t \quad (\text{III.5})$$

Ainsi, après trois incréments de temps, cette égalité étant vérifiée, on fait alors subir au patin un saut ou un glissement d'un pas angulaire $\Delta\theta$.

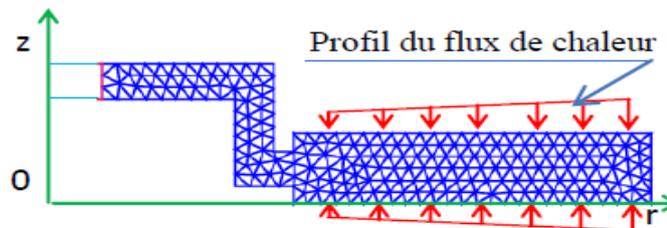


Figure 2 : Modélisation du Disque.

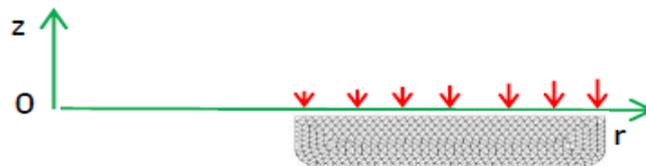


Fig. III.5. domaine d'étude

Au cours de l'opération de freinage, la chaleur due au frottement patin-disque est partiellement dégagée dans l'air ambiant baignant les surfaces du disque. Ainsi, en dehors de la portion de surface de contact patin-disque, la surface du disque est refroidie par convection, ce qui nous permet d'écrire au niveau du plan $z = e/2$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h (T_s - T_f) \quad (\text{III.6})$$

Chapitre 3 : Modèle mathématique

Le coefficient superficiel d'échange h est égal à $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ (Floquet et al. 1996). T_s et T_f sont respectivement la température à la surface du disque et celle de l'air en contact qui est supposée constante.

Si l'on considère un scénario de freinage quelconque, tant que le capteur de vitesse ne détecte aucun blocage, le contact patin-disque est maintenu et le flux dissipatif est pris en considération moyennant la technique de condition limite glissante. A l'instant du déblocage, les deux antagonistes patin-disque sont libérés, et la portion de surface qui était en contact avec le patin de vient exposée à l'air libre pour être refroidie.

Pour tenir compte de la ventilation interne, nous avons supposé que l'air ambiant s'engage dans les cannelures de refroidissement à très grande vitesse, si bien que le coefficient superficiel d'échange entre l'air de refroidissement et les parois internes des canaux, puisse être supposé très grand. Par voie de conséquence, nous avons admis dans notre calcul que la température des parois internes des cannelures est égale à celle de l'air.

Sur les surfaces latérales interne et externe du disque (surfaces cylindriques en $r = R_i$ et $r = R_e$), nous avons imposé des températures constantes égales à la température du milieu ambiant. Au niveau du plan médian coupant une nervure solide du disque de frein ($z = 0$), nous imposons, par raisonnement de symétrie, une dérivée nulle de la température

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (\text{III.7})$$

IV

Résultat et discision

IV.1.Introduction

Un système de freinage a pour fonction principale de transformer une énergie mécanique en une énergie thermique. Cette énergie se caractérise par un échauffement du disque et des plaquettes lors de la phase de freinage. La modélisation du comportement thermomécanique de l'ensemble disque plaquettes permet d'analyser l'évolution et la répartition des contraintes et les températures au niveau des zones de contact. Grâce aux résultats obtenus à partir du modèle développé, il devient possible d'optimiser le système. La modélisation de ce système permet de comprendre et de quantifier les phénomènes physiques sans avoir recours à des essais expérimentaux

IV.2. l'évolution des profils de vitesse et accélérations

Nous avons présenter sur la figure .VI.1. l'évolution des profils de vitesse et accélérations que nous avons considéré durant notre étude. Avec une vitesse initiale de l'ordre de 120 Km/h et une opération de freinage entre dans l'intervalle [2s-4s].

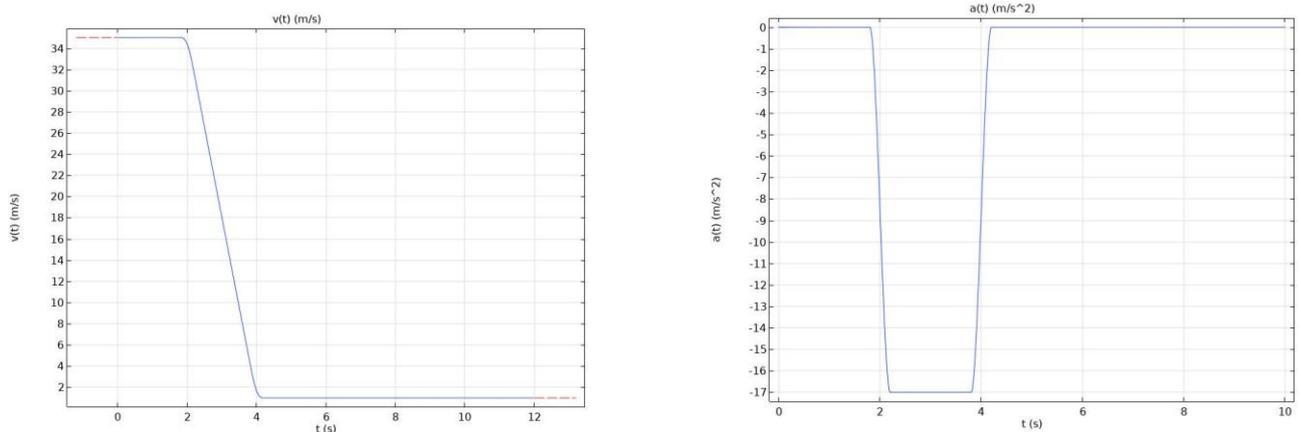


Fig.VI.1. profils vitesse et accélération du mobile.

IV.3.Simulation de disque patin

IV.3.1.Etude de la zone de contact :

la première phase (0 à 1.85s) le frein est désengagé ,donc aucun contat patin- disque est présent,ce qui est traduit par l'absnce de toute variation thermique dans le système, le système se trouve à la température de l'air ambiant.- Figure .VI.2.

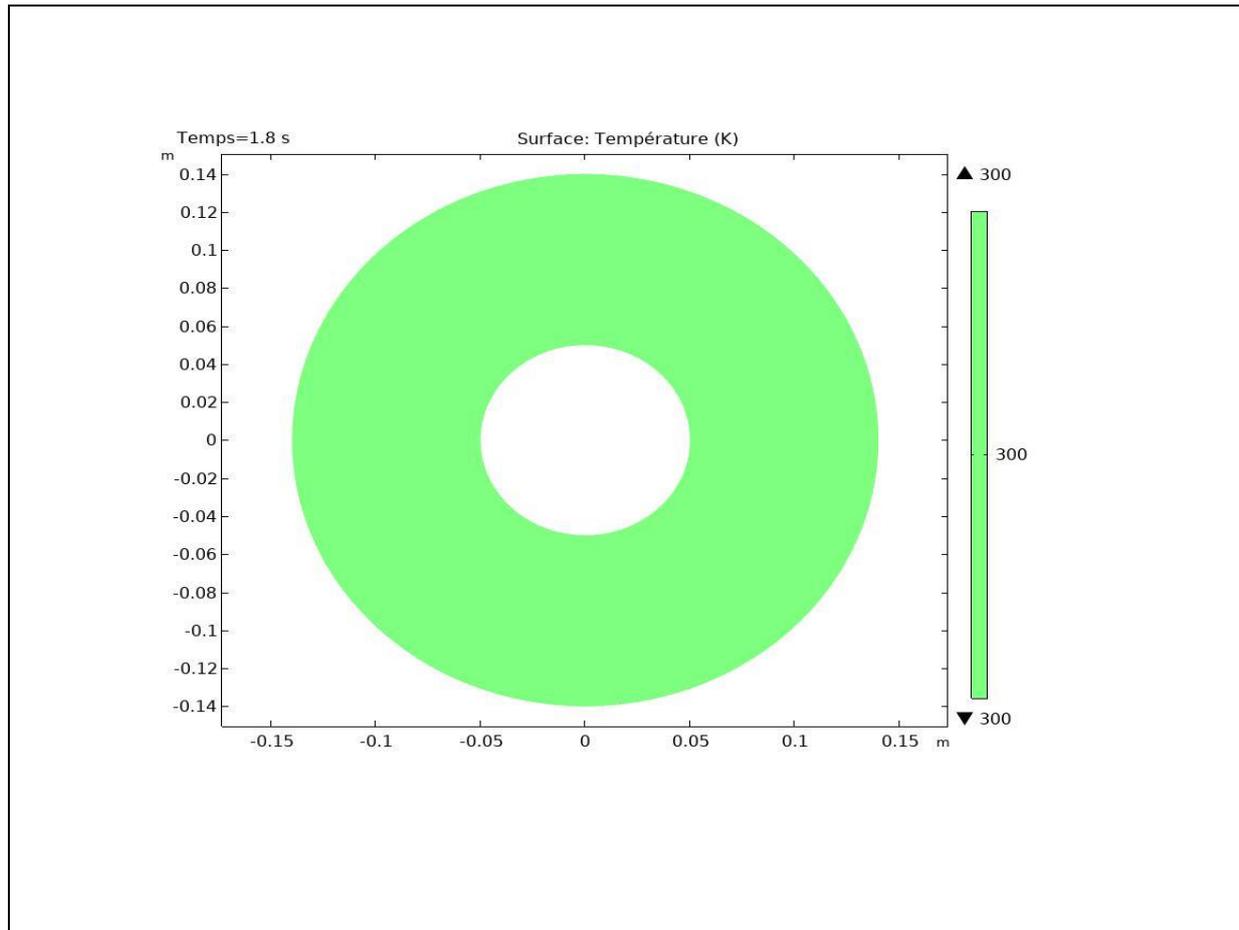
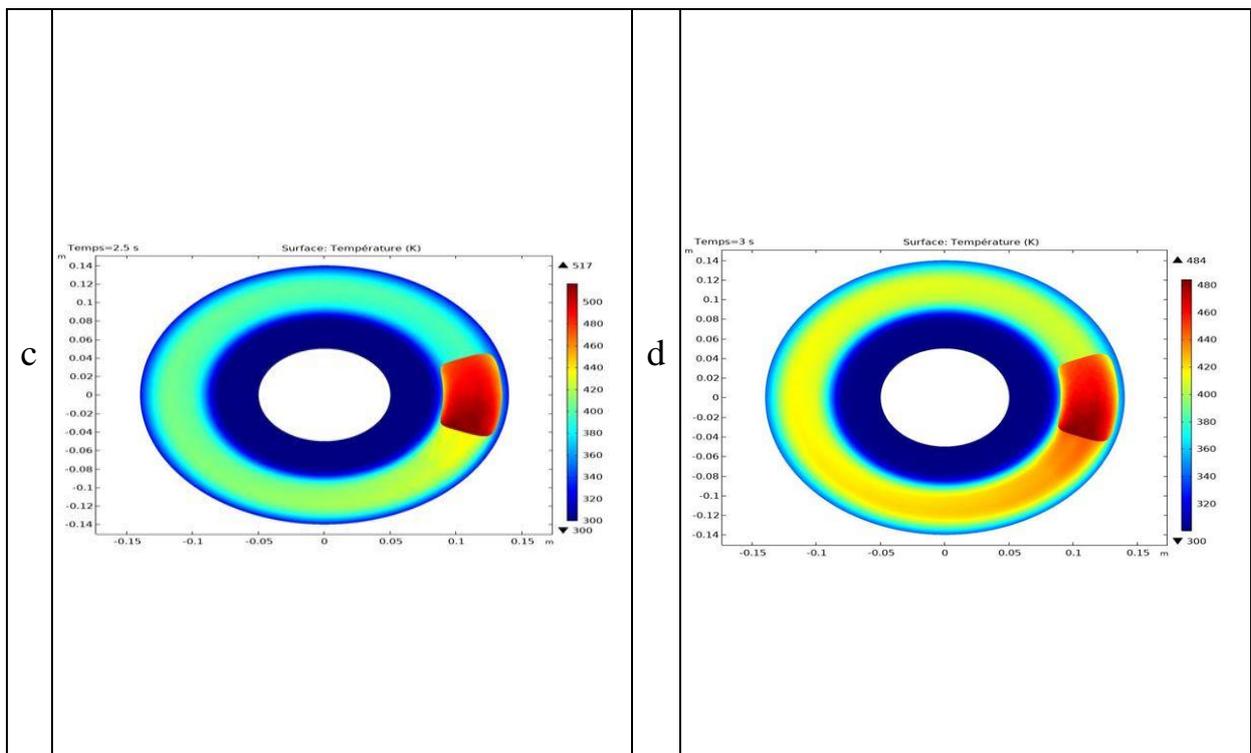
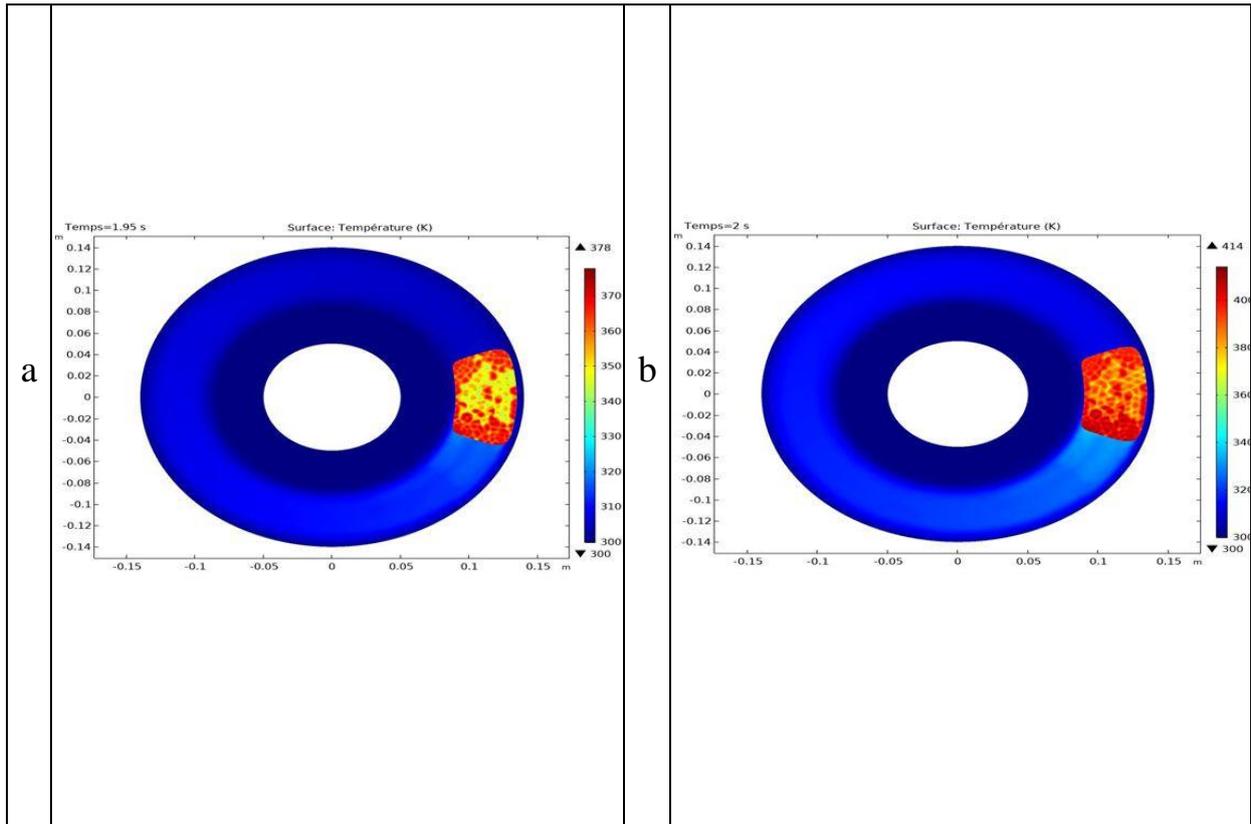


Fig.VI.2. Champ de température avant l'opération de freinage

Pendant la phase de freinage déroulant entre le (2s à 4s). On est face à un contact progressif patin-disque et des variations du champ de température vont avoir lieu.

Nous avons présenté les cartographies thermiques donnant l'évolution des champs de température au plan de contact disque-patin sur les figures suivantes –Figures. VI. 3.a. à Figures. VI. 3.f. :

Chapitre 4 : Résultat et discision



Chapitre 4 : Résultat et discision

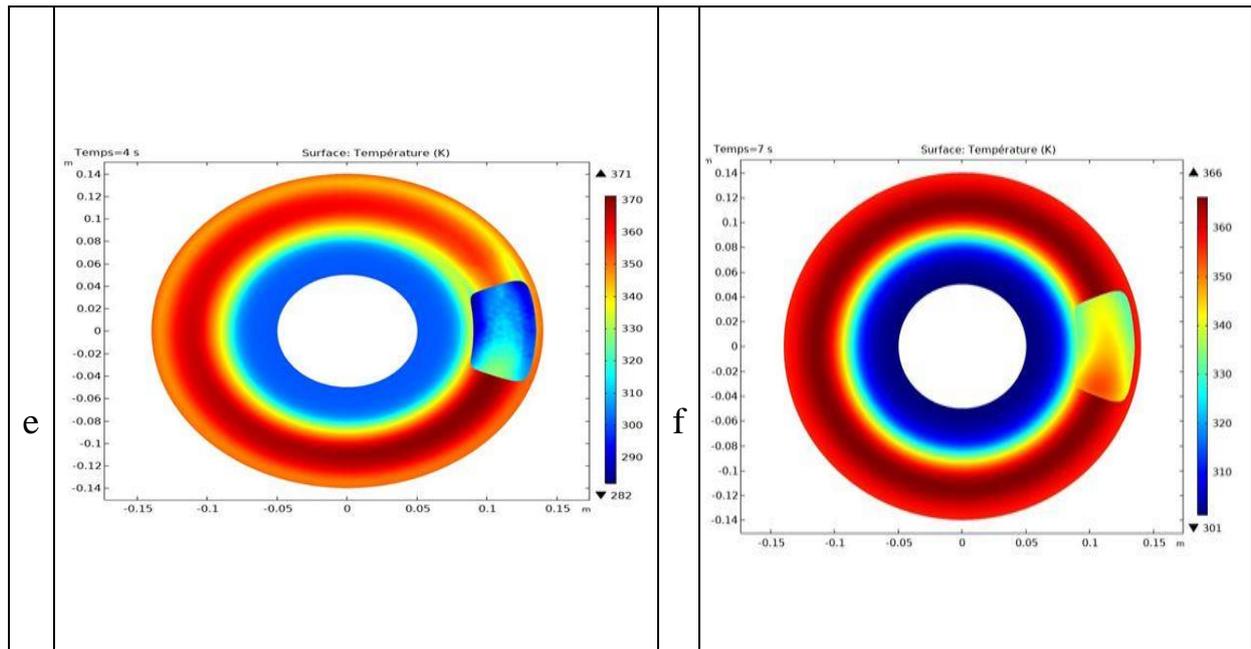


Fig VI. 4 - a :champs de température début de l'opération de freinage.

Nous assistons au début de l'opération de freinage $t=2s$ à une augmentation de la température dans la zone de contact disque-patin d'une valeur de 100° au bout de 0.15 s .

Dans le reste du disque balayé antérieurement avec le patin la température passe de 300 K à 350 K. le saut de la température au niveau de contact patin-disque peut être expliqué par un flux important déposé au seins de patins (une grande partie de l'énergie cinétique est convertie sous forme de chaleur).

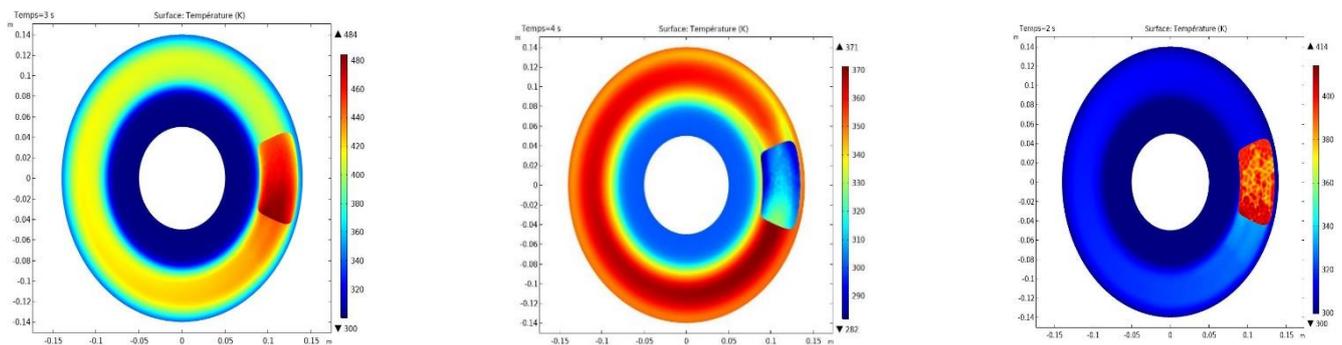


Fig VI. 4. température dans la zone de contact disque-patin

Après 1s du scénario antérieur (après la 3 eme seconde), on se trouve face à une température de l'ordre de 500 K contre un abaissement de la température à la fin de l'opération de freinage càd la 4 eme seconde où la température ne dépasse pas les 370 K suite

Chapitre 4 : Résultat et discision

à une fin de contact patin-disque en laissant un refroidissement de disque par échange thermique avec l'air ambiant.

Cette différence peut être expliquée par le fait que le flux de chaleur dégagé par le contact disque patin diminue avec le ralentissement de la voiture c'est-à-dire une vitesse initiale beaucoup moins importante que la 1^{ère} -cf courbe de vitesse Fig VI.1.

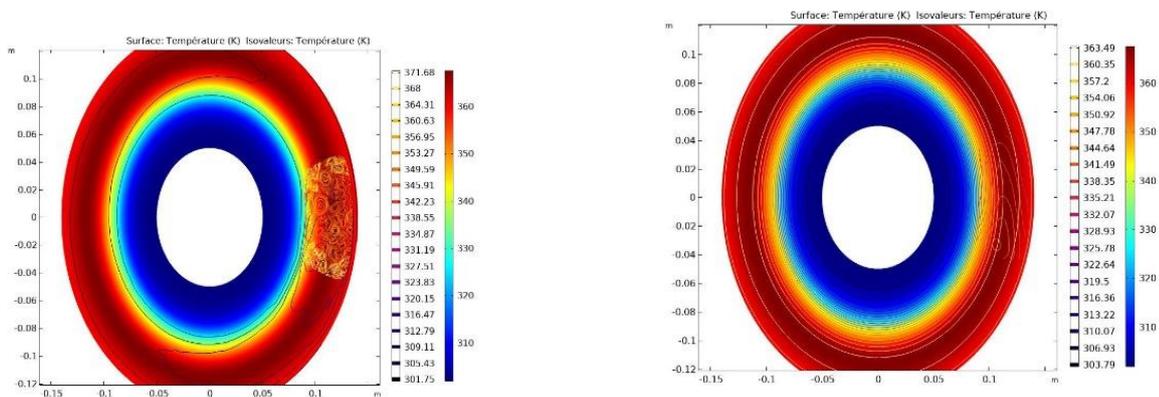


Fig VI. 5. influence de flux de chaleur

L'image de cette inhomogénéité est observée au niveau des isothermes correspondant à des instants différents dans l'opération de freinage où on constate nettement qu'au début la forme des isothermes non-régulières (qui tend à prendre des formes circonférentielles montre que la tendance est à l'homogénéisation du champ de température).

Pour suivre la variation du chargement thermique du disque, nous avons convenu de reproduire sur la figure VI. 7. l'évolution de température du point chaud au niveau du patin-disque. Il apparaît qu'à l'instant $t=1.5s$ avant le début de l'opération de freinage le patin et le disque sont séparés et la température reste celle de l'air ambiant.

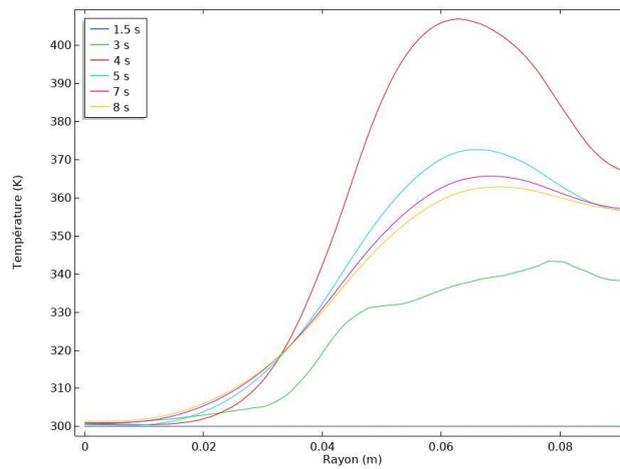


Fig. VI. 6. variation temporelle au plan (r-z) du point chaud au niveau du patin.

La température monte jusqu'à ce quelle atteinte une valeur maximale locale de 410 K à la fin de l'opération de freinage s'en suit une chute naturelle dans les instants 5s,7s et 8s. ces observations confirment nos constats et discussion sur le comportement du champ de température dans le paragraphe précédente. Dans la même optique nous avant procédé à suivre l'évolution de la température au point inverse du point chaud pour voir les effets thermiques sur le reste du disque, l'évolution de la température est présentée sur la figure XX

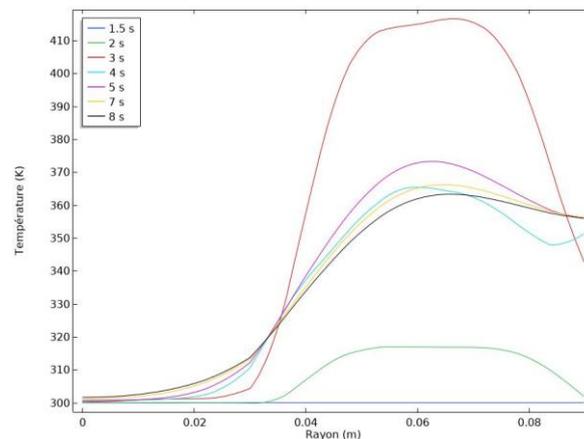


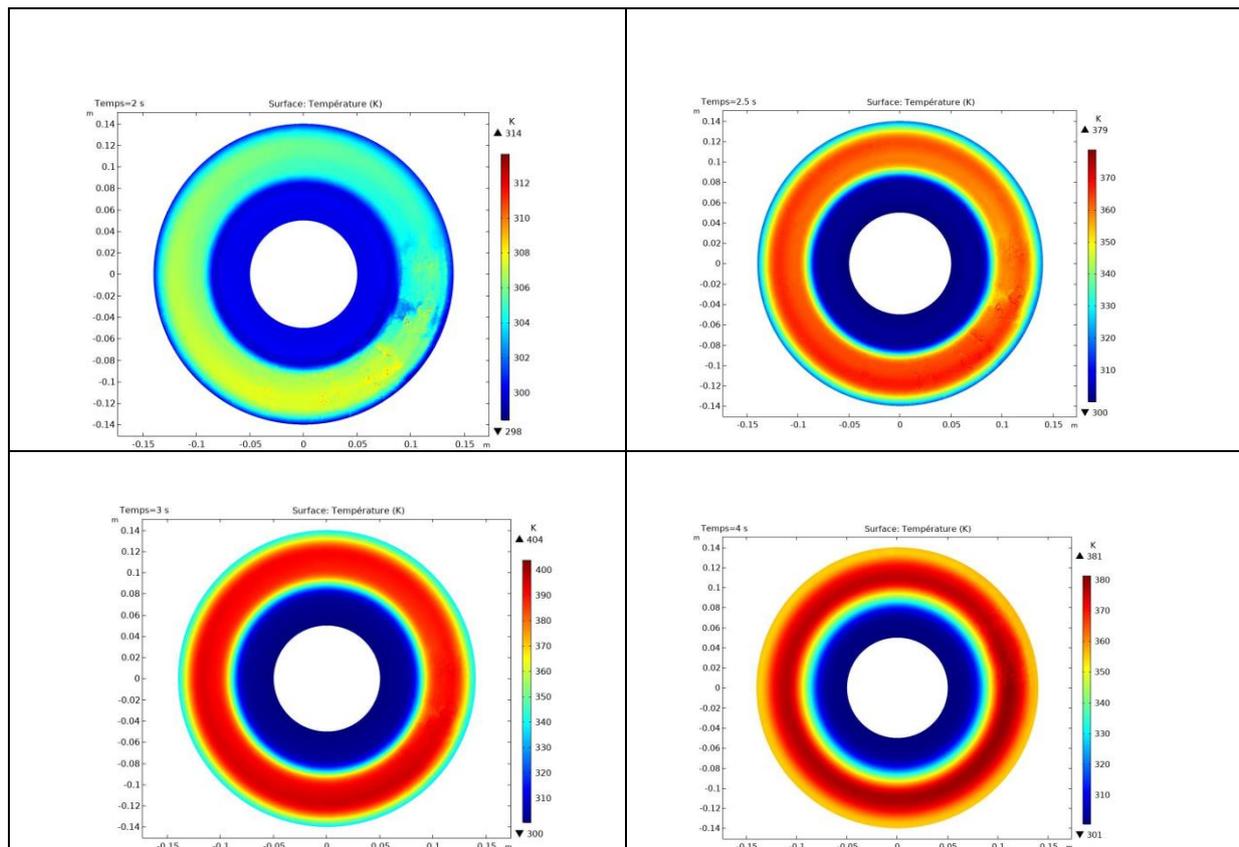
Fig. VI. 7. variation temporelle au plan (r-z) du point chaud au niveau d'un point inverse du patin.

Chapitre 4 : Résultat et discision

Nous remarquons que l'allure est la meme suivant l'évolution au niveau du point chaud patin-dique néamoins nous remarquons une différence à l'instant $t=3s$. qui peut etre expliqué par le fait qu'au début de l'opération de freinage on est face à une vitesse trop importante (vitesse initiale le plus élevée) et ce point-ci regagne un deuxième passage au niveau du patin provoquant de nouveau son échauffement.

IV.3.2.Etude des zones profondes

L'étude de la pénétration thermique (ce qu'on appelle fréquemment les ZAT acronyme de Zone Affecté Thermiquement) à l'intérieur du matériaux formant le disque permet de localiser les forts gradients thermomécanique favorisant une usure prématurée de la piste de frottement .les figures VI. 9. et VI. 10. montrent la variations temporelle du deux plans transversaux au niveau des trous de ventilation et un plan solide au dessous du plan de contact.



Chapitre 4 : Résultat et discision

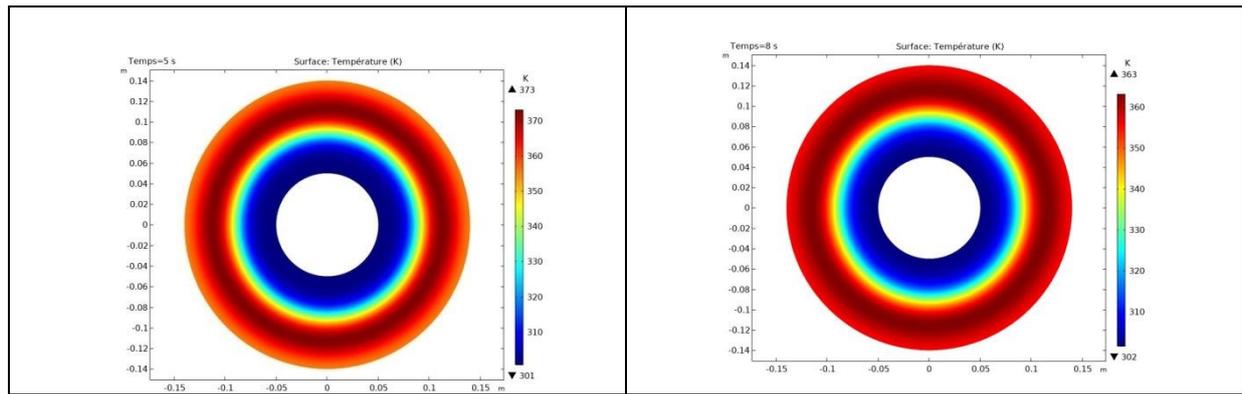


Fig VI. 8. variation temporelle de température au plan solide interieur.

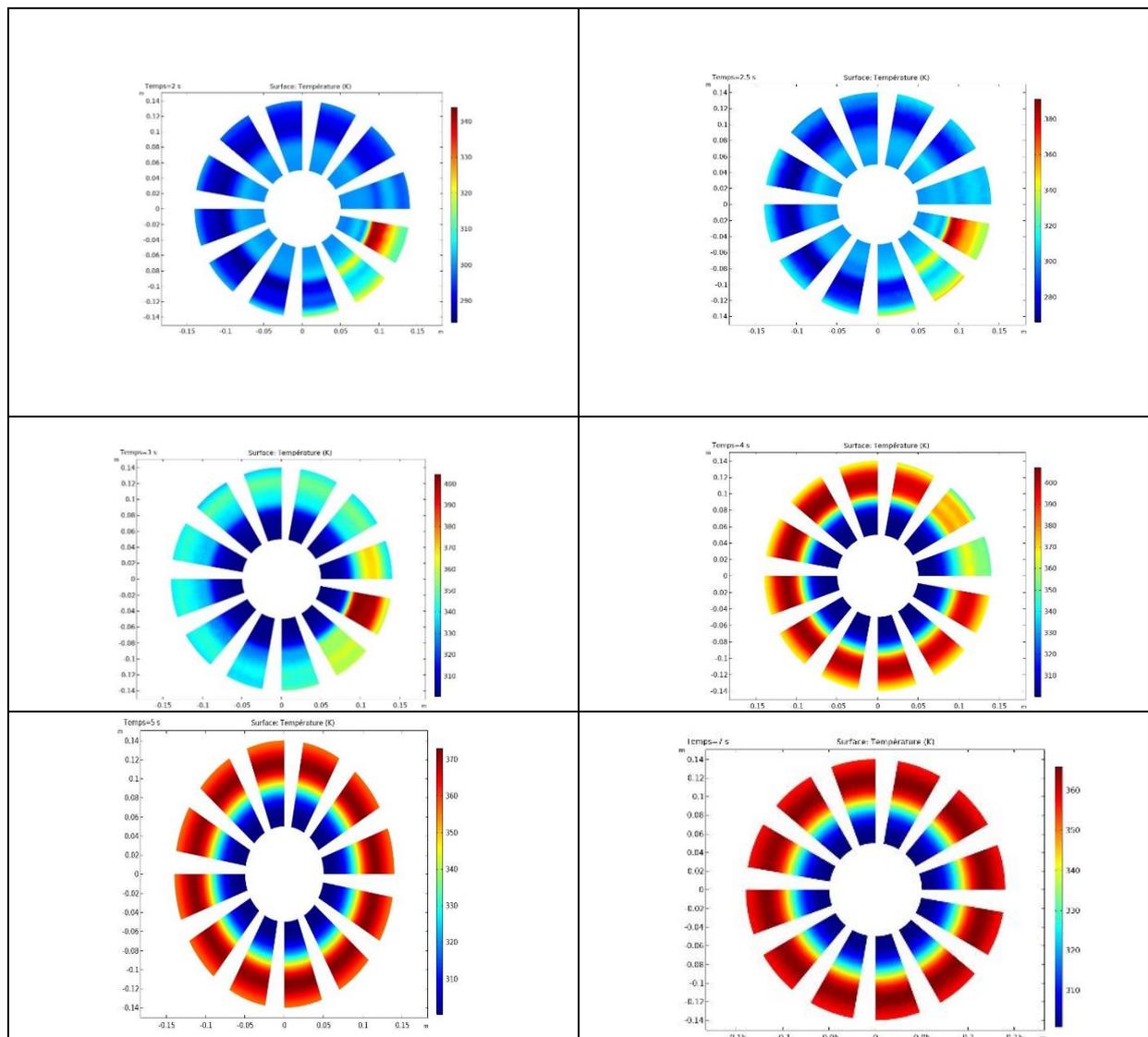


Fig VI. 9. variation temporelle de température au plan solide interieur.

Chapitre 4 : Résultat et discision

Nous remarquons sur la variation temporelle pour chaque instant dans les deux plans comparée deux à deux l'effet de la présence des trous dans les diques ventilés où on assiste à des températures moins élevées i.e une pénétration thermique moins profonde ceci est à l'origine des flux thermiques radiaux moins importants et aux échanges convectifs suivant les "ailettes".la température élevée remarquer au niveau du plan de symétrie à la fin de l'opération peut etredu à un équilibre thermique suite au variation des températures élevées venant de part et d'autre de ce plan.

IV.4.Conclusion :

- la première phase le frein est désengagé ,donc aucun contat patin- disque, le système se trouve à la température de l'air ambiant
- Pendant la deuxième phase de freinage déroulant. On est face à un contact progressif patin-disque et des variations du champ de température vont avoir lieux.

Conclusion General

CONCLUSION GENERAL :

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du disque frein.

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes freinage, types systèmes freinage et les types de disque frein. Ainsi, on a fait une explication leur avantages et leur inconvénient

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques généralités sur le transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement)

Finalement, on a étudié la modélisation de disque frein . Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation disque frein par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire disque frein.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- la première phase le frein est désengagé ,donc aucun contact patin- disque, le système se trouve à la température de l'air ambiant
- Pendant la deuxième phase de freinage déroulant. On est face à un contact progressif patin-disque et des variations du champ de température vont avoir lieux.
- une grande partie de l'énergie cinétique est convertie sous forme de chaleur .
- L'étude de la pénétration thermique (ce qu'on appelle fréquemment les ZAT acronyme de Zone Affecté Thermiquement) à l'intérieur du matériaux formant le disque permet de localiser les forts gradients thermomécanique favorisant une usure prématurée de la piste de frottement .