

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



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Mécanique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique
Thème

Modélisation de la génération de chaleur Dans un frein à disque

- 1) Melle. MOKDAD Ghizlene.
- 2) Melle. MORAKCHI Sihem.

Devant le jury composé de :

Dr. BENZENINE Hamidou	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. NEHARI Tayeb	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur
Dr.DORBANE Abdelhakim	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2021/2022

Dédicace

À qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à ma très chère maman, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite.

Sans elle, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

À mes très chères sœurs

À toute la famille

À mes chers amis

*À ma chère amie et binôme **Simo***

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

M. Ghizlene

Dédicace

Je dédis ce modeste travail à

Mes chers parents

*« Ma mère et mon père » qui m'ont poussé à terminer mes études qui m'ont
tellement encouragé*

A mon frère « Billel »

A ma sœur « Hanaà »

A nos chers enfants « Razane » et « Mohamed »

A mon binôme « SOFI »

Et tout ma famille son exception

Et tous qui m'ont aidé dans ma vie

M. Sihem

Remerciements

En premier lieu, on tient à remercier le bon Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force d'accomplir ce travail.

On tient à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant Dr. DORBANE pour sa collaboration et pour son orientation avec nous.

À tous les enseignants qui nous ont aidés tout au long de notre étude. Nous exprimons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin durant toutes nos études, en particulier nos familles.

Contexte de ce projet fin d'étude

Dans le cadre des projets de fin d'études, notre projet a pour objectif de concrétiser nos connaissances théoriques et nos savoir, par une étude approfondie qui répond à un besoin de formation en travaux pratique, ou plus avancé vers une industrialisation d'un équipement plus développés en mécanique d'automobile.

Le frein à disque et un système de freinage performant pour les véhicules munis des roues en contact avec le sol : automobile, moto, avion, train, camion, vélo tout terrain etc. pour déverses machines réclament des freins performant et durants.

En vue d'intégrer un nouveau produit, tout véhicule industriel passe par deux phases principales avant sa réalisation en atelier de production, ce sont la phase d'étude et de conception et la phase d'analyse et de simulation de la résistance des principaux éléments pendant le fonctionnement. Nous avons opté pour le choix de ce sujet « **Modélisation de la génération de chaleur dans un frein à disque** » qu'on a réalisé cette étude avec logiciel COMSOL5.6 Multiphysics pour avoir efficacité et l'importance de la génération de chaleur durant l'utilisation de frein à disque avec les simulations qui nous avons fait.

D'après notre suivi de l'équipement et de ses paramètres dans les meilleures conditions, nous avons constaté que certains points doivent être suivis ; parmi eux on cite :

- ✚ Généralité sur le transfert de chaleur
- ✚ Généralité sur le système de freinage avec les frottements exercés sur l'automobile

Résumé

Le freinage est un processus qui convertit l'énergie cinétique du véhicule en énergie mécanique qui doit être dissipée sous forme de chaleur. Sans système de freinage dans le véhicule mettra un passager dans une position dangereuse. Les freins convertissent la friction en chaleur, mais si les freins deviennent trop chauds, ils cesseront de fonctionner, car ils ne peuvent pas dissiper suffisamment de chaleur. L'objectif de notre thèse est d'étudier et d'analyser la distribution de température du disque de frein à l'aide d'un logiciel COMSOL 5.6 multi-physiques, et de proposer une modélisation du comportement thermomécanique des disques de frein automobiles pour la prédiction de sa durée de vie. Une analyse des phénomènes physiques opérant dans un disque de frein en service est présentée (gradients thermiques élevés, frottement disque/plaquette, etc...).

Mots clés: COMSOL5.6 multi-physiques, disque de frein, modélisation, transfert de chaleur, système de freinage, simulation.

ملخص

الكبح هو عملية تحول الطاقة الحركية للسيارة إلى طاقة ميكانيكية يجب أن تتبدد كحرارة. بدون وجود نظام فرامل في السيارة يضع الراكب في وضع خطير. تقوم الفرامل بتحويل الاحتكاك إلى حرارة ، ولكن إذا ارتفعت درجة حرارة الفرامل بشكل كبير ، ستتوقف عن العمل لأنها لا تستطيع تبديد الحرارة الكافية. الهدف من أطروحتنا هو دراسة وتحليل توزيع درجة متعدد الفيزياء ، واقتراح نمذجة للسلوك الحراري الميكانيكي COMSOL 5.6 حرارة قرص الفرامل باستخدام برنامج لأقراص مكابح السيارات للتنبؤ بعمرها. يتم تقديم تحليل للطواهر الفيزيائية التي تعمل في قرص الفرامل أثناء الخدمة (التدرجات الحرارية العالية ، احتكاك القرص / الوسادة ، إلخ)

الكلمات المفتاحية: COMSOL 5.6 متعدد الفيزياء- قرص الفرامل- النمذجة- نقل الحرارة- نظام الكبح - المحاكاة.

Abstract

Braking is a process that converts the vehicle's kinetic energy into mechanical energy that must be dissipated as heat. Without a brake system in the vehicle will put a passenger in a dangerous position. Brakes convert friction into heat, but if the brakes get too hot, they will stop working because they cannot dissipate enough heat. The objective of our thesis is to study and analyze the temperature distribution of the brake disc using a multi-physics COMSOL 5.6 software, and to propose a modeling of the thermomechanical behavior of automotive brake discs for predicting its lifespan. An analysis of the physical phenomena operating in a brake disc in service is presented (high thermal gradients, disc/pad friction, etc.).

Keywords: COMSOL 5.6 multi-physics break disc modeling, heat transfer, braking system, simulation.

Abréviations

ABS : Système de freinage antiblocage.

ESP : Programme de stabilité électronique.

CAO : Conception assisté par ordinateur.

CFD: Computational fluid dynamics.

AFU: Aide aux freinages d'urgence.

Nomenclature

a : Décélération	(m ² /s)
A_d : Surface de disque balayée par une plaquette	(mm ²)
A_c : Surface de plaquette en contact avec le disque	(mm ²)
c : Chaleur massique	(J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
C :Carbone	
C_p : Capacité thermique massique	(J/ (kg K))
C_x : Coefficient de forme	
[C] : Matrice de capacité thermique	(J/K)
d :Diamètre, ou distance	(m)
E : Le module d 'Young	(GPa)
f_h : Facteur de répartition de l'effort de freinage, essieu arrière	
f_v : Facteur de répartition de l'effort de freinage, essieu avant	
F : Force	(N)
{F} : Vecteur des flux nodaux	(W)
F_D : Force motrice	(N)
F_{FH} : Effort de freinage rapporté à l'essieu arrière	(N)
F_{FV} : Effort de freinage rapporté à l'essieu avant	(N)
F_G : Effort de pesanteur	(N)

F_P : Effort exercé par le conducteur	(N)
F_R : Force de frottement	(N)
F_{RA} : Force de résistance de l'air	(N)
F_{RP} : Force de résistance due à la pente	(N)
F_{RRAH} : Force de résistance au roulement de la roue arrière	(N)
F_{RRAV} : Force de résistance au roulement de la roue avant	(N)
F_{QH} : Charge statique rapportée à l'essieu arrière	(N)
F_{QV} : Charge statique rapportée à l'essieu avant	(N)
F_s : Effort de freinage	(N)
g : Accélération de la pesanteur	(ms ⁻²)
h : Coefficient d'échange	(Wm ⁻² K ⁻¹)
k : Conductivité thermique du matériau	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)
[K] : Matrice de conductivité thermique	(W/K)
L : Distance entre l'essieu avant et l'essieu arrière	
L_H : Distance entre l'axe de l'essieu avant et le centre de gravité du véhicule	
L_V : Distance entre l'axe de l'essieu arrière et le centre de gravité du véhicule	
m : Masse du véhicule	(kg)
M_n : Manganèse	
M_o : Molybdène	
n : Nombre de nœuds de l'élément.	
\vec{n} : Vecteur unitaire de la normale	
P : Pression hydraulique	(MPa)
P : Phosphore	
P_F : Puissance de freinage	(W)
P_{FVI} : Puissance de freinage rapporté au disque de frein	(W)
P_R : Puissance de freinage due au roulement	(W)

Q : Puissance thermique	(W)
Q_v : Flux de chaleur	(W)
Q'_v : Flux de chaleur par unité de surface	(W/m ²)
R : Résistance thermique	(W ⁻¹ K)
R : Rayon	(m)
R_m : Résistance à la rupture	(N/mm ²)
S : Surface	(mm ²)
S_c : L'indice de saturation du carbone	
S_f : Surface frontale du véhicule	(mm ²)
S_i : Silicium	
t : Temps	(s)
T : Champ de température	(°C)
{T} : Vecteur des températures nodales	(K)
T_i : Titane	
T₀ : Température initiale	(°C)
T_p : Température de la surface	(°C)
T_∞ : Température du milieu environnant la surface	(°C)
u_m : Vitesse moyenne	(m/s)
v : Vitesse	(m/s)
v₀ : Vitesse initiale	(m/s)
V : Volume	(m ³)
x : Coordonnées cartésiennes	
y : Coordonnées cartésiennes	
z : Coordonnées cartésiennes, ou cylindriques	

Caractères grecs

δ_{ij} :Symbole de Kronecker

ϵ_p :Facteur d'émission de la surface

ϵ_p :Facteur d'exploitation

λ : Conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$)

θ : Coordonnée angulaires, ou angle

μ : Coefficient de frottement

μ : Viscosité dynamique du fluide ($kg\ m^{-1}s^{-1}$)

ρ : Densité

ρ_a :Masse volumique de l'air (kgm^{-3})

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

σ_{xx} :Contrainte normale dans la direction x

σ_{xy} :Contrainte de cisaillement dans le plan xy

σ_{xz} :Contrainte de cisaillement dans le plan xz

σ_{yy} :Contrainte normale dans la direction y

σ_{yz} :Contrainte de cisaillement dans le plan yz

σ_{zz} :Contrainte normale dans la direction z

φ : Flux de chaleur (W)

ϕ : Densité de flux de chaleur (W/m^2)

ω : Vitesse de rotation (rad/s)

Opérateurs mathématiques

\overrightarrow{Grad} : Gradient

div : Divergence d'un vecteur

∇ : Nabla

∂ : Dérivée première partielle

Nombres sans dimensions

Nu: Le nombre de Nusselt

Pr: Le nombre de Prandtl

Re: Le nombre de Reynolds

Exposants*

(e): élastique

(m): mécanique

(th): thermique

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I. Recherche bibliographique.....	4
I.1 Conclusion	11
Chapitre II. Généralités sur les freins à disque.....	12
II.1 Introduction	13
II.2 Historique du freinage	13
II.3 Structure Generale d'un Systeme de Freinage	14
II.3.1 Fonction Global	15
II.3.2 Nécessités du système de freinage.....	15
II.3.3 Principe de fonctionnement	15
II.4 Evolution du Freinage	15
II.4.1 Freins en bois	15
II.5 Freins Travaillant Par Frottement.....	16
II.5.1 Frein à tambour	16
II.5.2 Frein à disque.....	18
II.6 Elements d'un Frein a Disque	23
II.7 Types des Etriers	23
II.7.1 <i>Frein à étrier coulissant</i>	24
II.7.2 Frein à étrier fixe.....	25
II.8 Les Types de Disque Frein	25
II.9 AUTRES TYPES DE DISQUES ET LEURS CARACTERISTIQUES.....	27
II.9.1 Les disques rainurés	27
II.9.2 Les disques percés.....	27
II.10 Comparaison Entre Tambour Et Disque	28

II.10.1	Avantages	28
II.10.2	Inconvénients.....	28
II.11	Les Plaquettes	29
II.12	Probleme Du Disque De Frein.....	30
II.13	Les Materiaux Du Disque De Frein	30
II.13.1	Le disque.....	31
II.13.2	Les garnitures	32
II.13.3	Les supports.....	32
II.14	Phenomenes Thermiques Dans Le Disque	32
II.15	Phenomenes Mecaniques Dans Le Disque	33
II.16	Materiaux Conventionnels : Aciers, Fontes.....	33
II.16.1	Acier	33
II.16.2	Fontes.....	34
II.16.3	Carbone.....	35
II.16.4	Conditions d'utilisation	35
Chapitre III.	Généralités sur le transfert de Chaleur	36
III.1	Introduction.....	37
III.2	Definitions.....	38
III.2.1	Champ de température.....	38
III.2.2	Gradient de température	39
III.2.3	Flux de chaleur	40
III.3	Modes De Transfert De Chaleur	40
III.3.1	Conduction.....	40
III.3.2	Les régimes transitoires.....	43
III.3.3	Convection.....	43
III.3.4	Rayonnement.....	45
III.4	Bilan D'energie	46
III.5	Stockage D'énergie:.....	47

III.6	Les Equations Gouvernantes Du Transfert De Chaleur Transitoire Par Conduction	47
III.7	Conclusion	48
Chapitre IV. Généralités sur les systèmes de freinage.....		49
IV.1	Introduction.....	50
IV.2	Physique Du Systeme De Freinage.....	50
IV.2.1	Partie Structurelle	50
IV.3	Les Efforts Agissant Aux Roues Lors Du Freinage.....	52
IV.4	Puissance De Freinage Totale.....	53
IV.5	Expression Du Flux Thermique Initial	54
IV.6	Principe De Fonctionnement De Systeme De Freinage D'une Automobile.....	54
IV.6.2	Les aides au freinage	57
IV.6.3	Comment prévenir les pannes de freins ?	58
IV.7	Critere D'evaluation D'un Systeme De Freinage	59
IV.7.1	Efficacités	59
IV.7.2	Confort.....	60
IV.7.3	Endurance	60
IV.7.4	Autres critères.....	62
IV.8	Conclusion	62
Chapitre V. Modélisation thermomécanique d'un frein à disque.....		63
V.1	Introduction.....	64
V.2	Presentation Du Logiciel Comsol 5.6 Multiphysics	64
V.2.2	Principe d'utilisation	65
V.3	Definition De Modele	66
V.3.1	Matériaux composites	66
V.4	Resultats et Discussion	71
V.5	Les principales etapes pour la simulation numerique d'un frein a disque :	75
V.6	Conclusion	80

Conclusion générale 81
Références bibliographiques 82

Liste des figures

Figure I-1: creation du modèle sur ANSYS 11.....	7
Figure I-2: Ensemble disque plaquette	7
Figure I-3: Géométrie du disque sur SOLIDWORDS	8
Figure I-4: Flux de chaleur	8
Figure I-5: Le modèle de disque ventilé avec plaquette	9
Figure I-6: Configuration de disque essayé	10
Figure I-7: Disque de frein.....	10
Figure I-8: Creation de la surface de contact.....	11
Figure II-1: Schéma d'implantation du système de freinage	14
Figure II-2 : Frein à tambour	16
Figure II-3 : Vue 3D d'un frein à tambour.....	17
Figure II-4 : Différentes technologies de freins à disques	17
Figure II-5 : Désignation des principaux éléments	19
Figure II-6 : Exemples de freins à disque	19
Figure II-7 : Le disque plein	21
Figure II-8 : Gorge calorifique	22
Figure II-9 : Disque ventile et disque plein.....	22
Figure II-10 : Les éléments d'un frein avant.....	23
Figure II-11 : <i>Types d'étriers</i>	24
Figure II-12 : Le système à étrier flottant. Figure II-13 : Le système à étrier à chape flottante.	24
Figure II-14 : Le système à étrier fixe.....	25
Figure II-15: Exemple de disque plein. Figure II-16 : Exemple de disque ventilé	26
Figure II-17: Différentes géométries d'ailettes.....	26
Figure II-18 : Disques ventilés : différentes conceptions.....	26
Figure II-19 : Circulation de l'air dans les canaux d'un disque ventilé.....	27

Figure II-20 : Disquerainuré.....	27
Figure II-21 : Disque percé	28
Figure II-22 : Plaquette de frein.....	29
Figure II-23 : Disque carbone-céramique.....	31
Figure II-24 : Mise en cône d'un disque de frein	33
Figure III-1: schéma de transfert de chaleur	38
Figure III-2 : définition du gradient thermique.....	39
Figure III-3 : Transfer par conduction	41
Figure III-4: Lois de Fourier	42
Figure III-5: Conduction dans une vitre.....	42
Figure III-6: Définition d'un élément de surface d'échange.....	44
Figure III-7 : Élément en rayonnement.....	46
Figure IV-1 : système de freinage.....	51
Figure IV-2 : Définition des forces agissant sur une automobile lors du freinage	52
Figure IV-3 : Efforts agissant sur une voiture freinée, freinage d'arrêt sur plat.....	53
Figure IV-4 : Système de freinage d'une voiture	55
Figure IV-5 : pédale de frein.....	56
Figure IV-6 : Frein à main.....	56
Figure IV-7 : Observation d'une fissure radiale de la bordure extérieure du disque jusqu'au bol	61
Figure IV-8 : <i>Faïençage sur les pistes de frottement</i>	61
Figure IV-9 : <i>Fissure radiale sur les pistes de frottement</i>	61
FigureIV-10 : Fissure en pied d'ailette	61
Figure IV-11 : Rupture dans la gorge du bol	61
FigureIV-12: Section de disque fissuré	61
Figure IV-13 : Fissure dans la gorge.....	61
Figure IV-14 : Usure des pistes.....	61
Figure IV-15 : Usure non-uniforme	61
Figure IV-16 : Dépôts de matière sur les pistes du disque	62

Figure IV-17 : Usure excessive des plaquettes	62
Figure V-1 : constitution d'un matériau composite.....	67
Figure V-2: Géométrie du modèle, y compris le disque et le tampon.	69
FigureV-3: Profil de vitesse du disque.	70
FigureV-4: Profil d'accélération du disque.	70
Figure V-5: Température de surface du disque et de la plaquette de frein juste avant de relâcher le frein (t = 3,8 s).	72
Figure V-6:La ligne radiale sondée dans le tracé de la température en fonction du temps de la Figure V.5	72
FigureV-7: Profil de température le long de la ligne indiquée sur la Figure V.5 à la surface du disque	73
FigureV-8: Comparaison de la chaleur totale produite (trait plein) et de la chaleur dissipée (pointillés).	74
FigureV-9:Ggéométrié de modèle de plaquette de frien cubique bézer 2.....	75
Figure V-10: Géométrié de modèle de plaquette de frien cubique bézer 4.....	75
Figure V-11: Modèle d'un frein à disque.....	76
Figure V-12: Modèle de maillage d'un frein à disque	79

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Composition et résistance des 03 sortes de fontes pour la conception des disques	34
Tableau V-1: Propriétés des matériaux	69
Tableau V-2 : L'intervalle et les valeurs de la fonction.....	76
Tableau V-3 : Propreté de conductivité et de densité.	78
Tableau V-4 : Les paramètres du matériau.	78
Tableau V-5 : Les valeurs e chaleur dissipé et produite.....	78

Introduction Générale

Le frein à disque est un système de freinage performant pour les véhicules munis de roues en contact avec le sol, par exemple l'automobile, l'avion, le train, et pour diverses machines. Ce système utilise un disque fixé sur les moyeux ou sur la jante de la roue et des plaquettes, lesquelles sont maintenues dans un étrier fixé au véhicule, venant frotter de chaque côté du disque. Un ou plusieurs mécanismes poussent sur les plaquettes, le plus souvent des pistons hydrauliques, les plaquettes viennent serrer fortement le disque. Comme ça, la force de frottement entre les plaquettes et le disque crée le couple de freinage.

Il y a différents types de disques de frein. Quelques-uns sont en acier massif, tandis qu'il y a des autres qui sont râpés sur la surface ou ont des trous. Grâce à ces trous, c'est plus facile de dissiper la chaleur.

Les gradients thermiques établis dans un disque de frein contribuent à sa déformation et à l'apparition de fissures. Dans certains cas une perte d'efficacité du frein et une accentuation de l'usure sont les conséquences d'une surchauffe du disque et des plaquettes. C'est la raison pour laquelle le principal but de ce projet est d'étudier la chaleur générée à cause du frottement entre le disque et la plaquette.

La figure au dessous montre un exemple de disque de frein d'une voiture et aussi l'approximation qu'on a faite pour réaliser l'étude thermique. On doit remarquer que le modèle réalisé sur Gambit® est en réalité la moitié d'un disque, car il est symétrique par rapport au plan XY. En effet, on a seulement besoin d'étudier cette moitié puisque la partie où on a fait la coupe est adiabatique.



Figure à gauche disque de frein réelle et à droite disque de frein modélisé

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 plupart 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 la quelle peut engendrer des déformations et des vibrations.

Dans cette étude, on s'intéressera à la modélisation de la génération de chaleur dans un frein à disque en appliquant le code de calcul **COMSOL 5.6** on établit le champ de température du disque et des plaquettes de frein en fonction des conditions aux limites thermiques et mécaniques.

Le disque de frein automobile peut subir des dégradations dont l'origine réside dans les sollicitations couplées mécaniques (pression des garnitures sur le disque et serrage du disque sur le moyeu) et thermiques (échauffement par frottement).

L'objectif de cette thèse est de modéliser la génération de chaleur dans les disques de frein. Cette étude est réalisée à l'aide du logiciel **COMSOL Multiphasiques 5.6** version propose des solveurs plus rapides et plus économes en mémoire pour les calculs multi-cœurs et cluster, une gestion plus efficace des assemblages CFD des modèles de disposition d'application et une

gamme de nouvelles fonctionnalités graphiques, notamment des plans de découpage, un rendu de matériau réaliste et une transparence partielle.

La présentation de ce travail s'articule autour de quatre chapitres.

Le chapitre I présente une étude bibliographique sur les études précédentes faites sur la modélisation des disques de freins.

Le chapitre II présente des généralistes sur les disques de frein, la composition et les matériaux utilisés.

Le chapitre III est consacré à la formulation analytique de l'équation de chaleur tout en décrivant les modes de transfert thermique y intervenant dans un système de freinage.

Le chapitre IV présente des généralités sur les systèmes de freinage.

Le chapitre V porte sur la modélisation numérique du problème thermomécanique du disque de frein et la mise en œuvre du logiciel **COMSOL 5.6** utilisé dans cette modélisation.

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

Chapitre I. **Recherche bibliographique**

Dans cette partie on s'intéresse aux travaux précédents qui ont contribué à l'amélioration des freins à disque présenté par des défèrent logiciel.

Actuellement, des nombreux chercheurs ont apporté plusieurs modélisations de la génération de chaleur de frein à disque avec des études numériques, expérimentales et mathématiques.

A. Talati et Jalalifar ont présenté un article sur l'analyse de la conduction thermique dans un système de frein à disque (Talati & Jalalifar, 2009). Dans cet article, les équations de chaleur déterminantes pour le disque et le tampon sont extraites sous la forme d'équations de chaleur transitoires avec une génération de chaleur qui dépend du temps et de l'espace. Dans la dérivation des équations de chaleur, des paramètres tels que la durée de freinage, la vitesse du véhicule, les géométries et les dimensions des composants de frein, les matériaux du rotor de frein à disque et la répartition de la pression des plaquettes et des contacts ont été pris en compte. Le problème est résolu analytiquement en utilisant l'approche de la fonction de Green. Il est conclu que la chaleur générée par le frottement entre le disque et la plaquette doit être idéalement dissipée dans l'environnement pour éviter de diminuer le coefficient entre le disque et la plaquette et pour éviter l'échauffement des différents composants du frein et la vaporisation du liquide de frein due à l'échauffement excessif.

B. Zaid, et al. ont présenté un article sur une étude du rotor de frein à disque par analyse par éléments finis. Dans cet article, l'auteur a mené une étude sur un rotor de frein à disque ventilé d'un véhicule de tourisme normal à pleine capacité (Zaid et al., 2009). L'étude porte plus probablement sur la répartition de la chaleur et de la température sur le rotor de frein à disque. La modélisation est effectuée dans CATIA et ABAQUS/CAE a été utilisé comme logiciel d'éléments finis pour effectuer l'analyse thermique sur une réponse transitoire. Le matériau utilisé est la fonte grise, avec une température totale maximale admissible de 550 C. Pour l'analyse de la charge, 10 cycles de rupture et 10 cycles sans rupture (ralenti) sont considérés comme une opération de 350 secondes. Résultat fourni lors du 1er, 5ème et lors du 10ème cycle. Ainsi, cette étude sûre permet de mieux comprendre les caractéristiques thermiques du rotor de frein à disque et aide l'industrie automobile à développer un rotor de frein à disque optimal et efficace.

De plus, Singh et Shergill (Singh & Shergill, 2012) ont présenté un article sur l'analyse thermique du frein à disque à l'aide de COMSOL, dans cet article Des techniques d'analyse par éléments finis sont utilisées pour prédire la distribution de la température et identifier la température critique du disque de frein. Compte tenu des trois modes de transfert de chaleur

(conduction, convection et rayonnement), trois matériaux différents de disque de rotor ont été utilisés (fonte, aluminium et céramique). Il est conclu que la fonte peut être utilisée dans un disque de frein qui donnera un refroidissement modéré à basse température par rapport aux autres. La céramique a de bonnes caractéristiques de refroidissement mais elle est coûteuse et peut être utilisée dans les voitures de course où une température élevée est produite.

Dans une autre étude, (Bashir et al., 2019) ont effectués le chauffage par frottement et l'analyse thermique sur un modèle simple d'éléments finis de disque de frein et de plaquette pour établir la distribution de température, la contrainte de Von-mises et la variation d'épaisseur du disque en utilisant COMSOL Multiphysics. La technique d'analyse par éléments finis est utilisée pour prédire la chaleur de frottement, la répartition de la température et la variation de l'épaisseur du disque du frein à disque. Les paramètres du disque et du tampon ont été choisis dans la littérature existante. Un modèle tridimensionnel de frein à disque a été créé et simulé. Le modèle simule la dynamique et l'échauffement par friction entre la plaquette et le disque. La chaleur de frottement est calculée dans le module de dynamique multi-corps du COMSOL tandis que la distribution de température est calculée par le module de transfert de chaleur. Les contraintes et la variation d'épaisseur du disque sont également calculées à l'aide du module de mécanique des solides. Les résultats obtenus à partir de la simulation fournissent une justification claire de l'utilisation de COMSOL Multiphysics pour l'évaluation de la chaleur de frottement et de la dilatation thermique

Dans une autre étude, BELHOCINE Ali (Belhocine, 2012) a étudié expérimentalement une modélisation de frein à disque et la plaquette. Il utilise logiciel des éléments finis multiphysics ANSYS 11 ; il caractérise pour chaque pièce les propriétés mécaniques des matériaux. Le type d'analyse choisie est structurelle statique. La simulation a lieu pour une durée totale de freinage $t=45$ (s) et il a adopté le pas de temps pour les mêmes conditions.

Il a utilisé ANSYS 11(3D) dans cette partie pour simuler le comportement du mécanisme de contact par frottement des deux corps « disque – plaquette » lors d'un freinage et le matériau choisi est fon gris FG15, il a constaté que :

- Le module de Young de disque était environ 138 fois plus élevé que celui de la plaquette

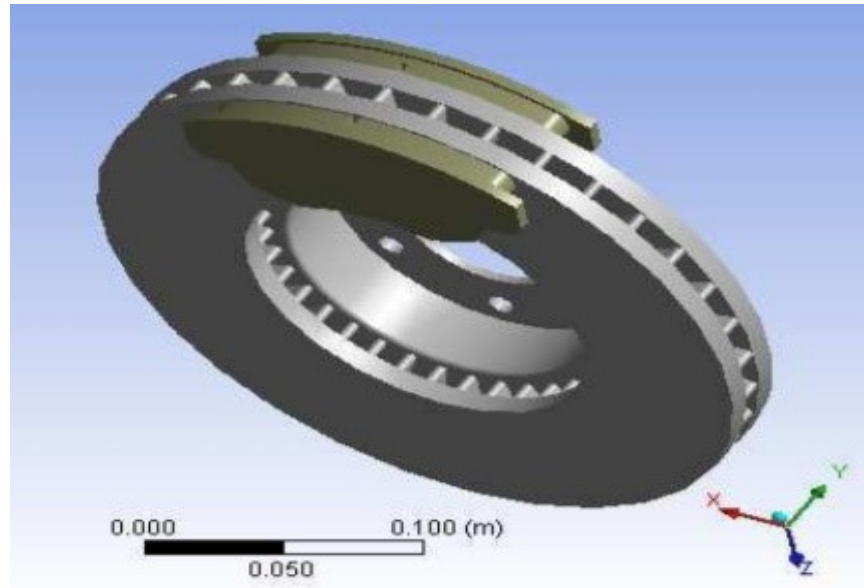


Figure I-1: creation du modèle sur ANSYS 11

Dans son travail il a étudié le comportement thermique d'un disque de frein en 3D ; lequel inclus le flux de chaleur généré à l'intérieur de celui-ci les températures maximales et minimales avec une autre version d'ANSYS CFX. Il a conclu les valeurs de coefficient d'échange thermique h en fonction du temps.

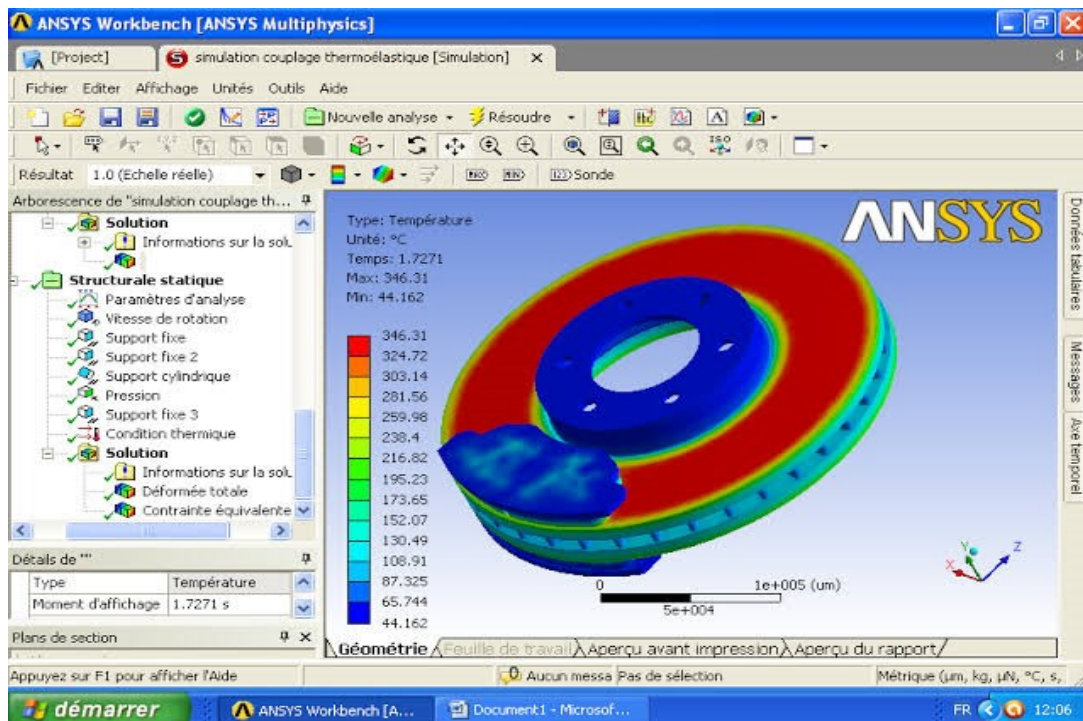


Figure I-2: Ensemble disque plaquette

Dans une autre étude de « PAU-ANTON MALAUD DOS SANTOS » ont réalisé une étude expérimentale de disque traité par logiciel de SOLIDWORDS a été utiliser lors de la préparation des modèles 3D ; crée par formule polytechnique de monte réal ; pour calculer les conditions aux limites et la validation des résultats ils ont employé le logiciel d'acquisition de données AIM Race studio.

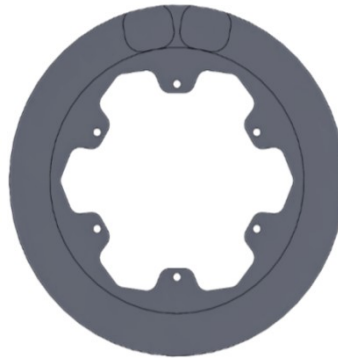


Figure I-3: Géométrie du disque sur SOLIDWORDS

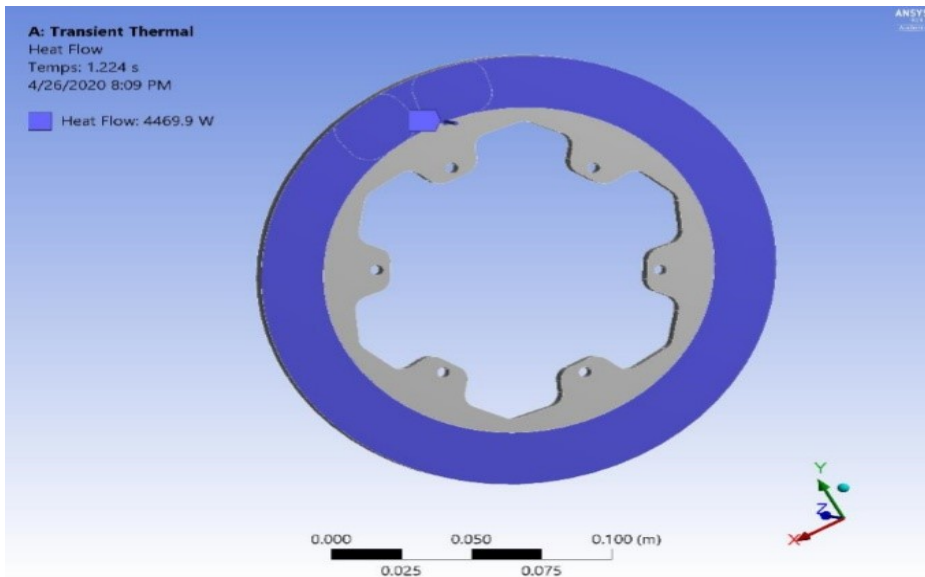


Figure I-4: Flux de chaleur

Une autre étude effectuée par les frères **MOKADDEM Abderraouf et Yousef** (Mokaddem&Mokaddem, 2020). Dans ce travail, les auteurs sont créé par logiciel ANSYS un

logiciel moderne utilise la méthode les éléments finis bénéficient d'une interface graphique rendent leurs utilisations relativement simples. Ils ont conclu que les partie à forte concentration de contraintes dans le disque se trouvent généralement dans le disque au niveau les pieds des ailettes que peuvent être assimilées aux zones d'encastrement d'une poutre console quant à la plaquette les concentrations de contraintes ce trouve sur les côtes de la plaquette inférieur, et ils ont observé que la température d'analyse montre que la température est maximale sous la plaquette.

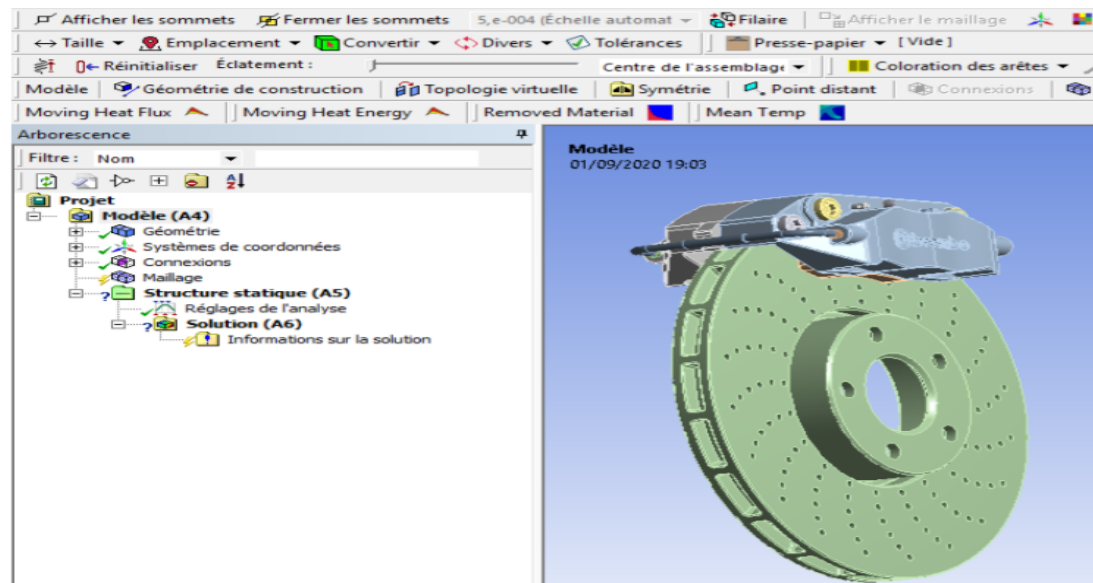


Figure I-5: Le modèle de disque ventilé avec plaquette

AOUEB CHERIROU & SAMI BOUDAB(Cherirou&Boudab, 2015)ont effectué une modalisation de frein à disque par un programme développé en **MATLAB** ils sont données au départ les rayons intérieurs et extérieur, le module de Young, coefficient de pression et la masse volumique ; et à la sortie les fréquences propres. Le programme calcule les fréquences propres du disque sans rotation et sans chargement parce que le disque réel à une géométrie complexe, on l'a simplifié en disque en géométrie suivant.

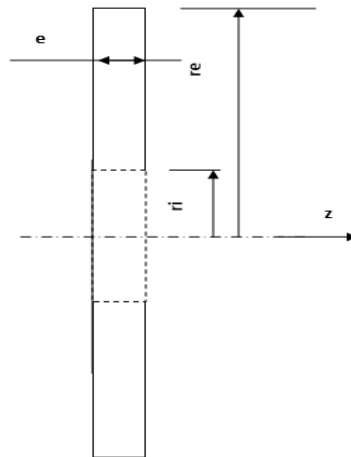


Figure I-6: Configuration de disque essayé

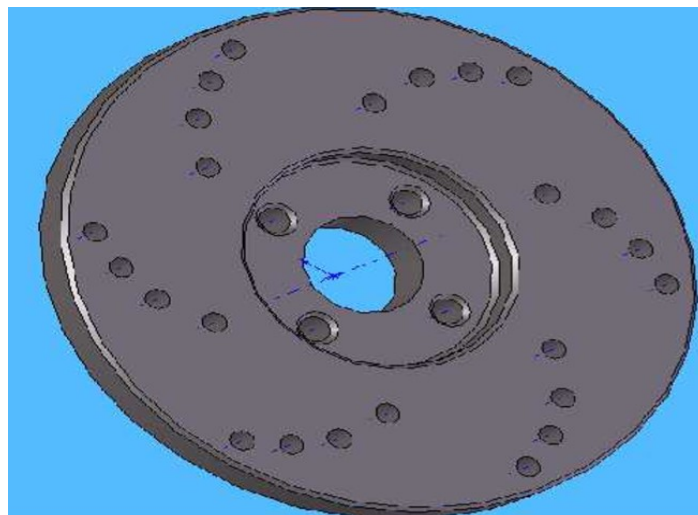


Figure I-7: Disque de frein

Une autre étude présentée par « Marina Carrion Sola et Iria Vela Villares »(Carrion Solla& Vela Villares, 2008), les auteurs ont réalisé sur logiciel Fluent pour analyser ce qui passe pendant le régime stationnaire et ils sont comparé entre deux logiciel **Fluent** et **Fortran** et ils sont conclue que les résultats entre tous les deux logiciel sont assez similaires avec une différence de 2-3°.

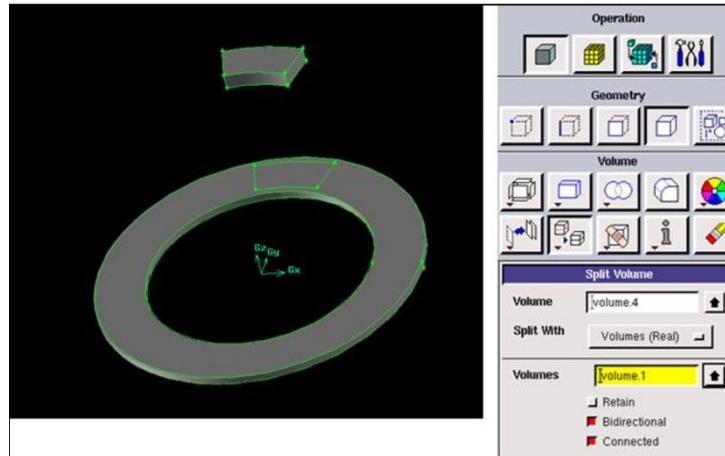


Figure I-8: Creation de la surface de contact

Un autre chercheur a réalisé une modalisation avec Solidworks présenté par « REBBAH Abderraouf »(Rebbah, 2019), l'auteur a fait une étude et une analyse complète, du système de freinage ABS afin d'apporter des améliorations, en ajoutant un sous-système EBD. Ce travail lui a permis de manipuler le logiciel de CAO, dite SOLIDWORDS, et d'appliquer nos connaissances théoriques en calcul et en recherches scientifiques sur la conception des systèmes appliqués en industrie d'automobile en particulier en freinage des roues des véhicules. En perspective, notre son étude s'étale en large application dans le domaine de la production en vue de sa réalisation.

I.1 Conclusion

On peut avoir dans ce chapitre les recherches bibliographiques précédentes de la génération de chaleur dans un frein à disque avec un exemplaire d'une modalisation déjà fait par des logiciels différents.

Chapitre II. **Généralités sur les freins à disque**

Dans ce chapitre on s'est intéressé de discuter sur la généralité du frein à disque, ces types, les matériaux, les critères et phénomène mécanique et physique.

II.1 Introduction

Grâce aux continus progrès technologiques dans l'industrie du transport, les véhicules sont devenus plus puissants et plus rapides. De ce fait, les systèmes de freinage doivent aussi suivre cette progression pour assurer un fonctionnement adéquat avec les dernières améliorations. Le frein, organe de sécurité, reste ainsi un sujet d'étude très actuel pour les ingénieurs. L'apparition de nouveaux matériaux (alliages divers, céramique, etc.) et de nouveaux procédés de fabrication ou de traitement de surface (grenailage, trempe par induction, etc.) génère de nouveaux types de frein et donc la nécessité de nouvelles études. De plus, avec la concurrence industrielle toujours croissante, les problématiques changent : en plus du souci d'efficacité, de fiabilité et de confort, s'ajoute ceux du moindre coût et du délai de fabrication. L'objectif pour l'ingénieur est de trouver le meilleur compromis entre ces exigences. Il s'agit alors remplacer, du moins, compléter les essais expérimentaux par des analyses numériques afin de tester plus de possibilités pour mieux s'approcher du meilleur compromis, réduire les coûts en fabriquant moins de prototypes et minimiser les durées d'étude en limitant le nombre d'essais.

II.2 Historique du freinage

Depuis l'invention de la roue, la problématique de l'immobilisation de celle-ci, dans certaines circonstances, s'est posé. Sur les véhicules à traction animale le frein consistait en un patin ou sabot actionné par un levier, frottant sur la circonférence de la roue. Système efficace seulement lorsque la roue était propre et sèche. Pour l'immobilisation on plaçait une cale devant la roue.

Les premières automobiles utilisaient toujours ce système de sabot, avec une commande par câble ou par levier. Il présentait l'inconvénient de ne pas pouvoir être très puissant, même en appuyant très fort sur la pédale et d'être très sensible à l'encrassement, poussières, boue, graviers.

Les freins à tambours furent inventés dans les années 1900, améliorant notablement le freinage des automobiles de l'époque, au début la commande était encore à câbles.

Le premier frein à commande hydraulique est inventé par l'Américain Malcolm Lockheed (frère d'Allan, tous deux cofondateurs de Lockheed) en 1919, ce dernier fonde la Lockheed «Hydraulic Brake Company » à Detroit et les véhicules Chrysler seront les premiers équipés en 1924.

La Lockheed « Hydraulic Brake Company » deviendra Bendix en 1932. Avec le passage à une liaison hydraulique, la force appliquée a pu être beaucoup plus importante, rendant les freins plus efficaces, mais aussi plus sollicités.

Dans les années 1950, les freins à disque commencent à remplacer les tambours sur des véhicules de série.

En 1978, l'Allemand Bosch commercialise son ABS électronique, un système Antiblocage des roues sur lequel la firme avait commencé à travailler dès 1936. Il équipe la nouvelle Mercedes Classe S et les BMW Série 7.

Dernièrement, sur certaines voitures de sport « haut de gamme », les disques en acier ont été remplacés par de la céramique, voire du carbone sur certaines voitures de course comme les Formule 1 (ces derniers nécessitant une température de 250 à 300 °C minimum pour fonctionner). Le carbone est aussi utilisé en freinage aéronautique (« Frein », 2022).

II.3 Structure Generale d'un Systeme de Freinage

La structure ci-dessous (Figure II-1) représente une structure de base que l'on retrouve dans tous les véhicules de tourisme dit bas de gamme. On pourra cependant trouver des variantes telles que la disposition de freins à disque sur l'essieu arrière, ou bien la mise en place de système tels que l'ABS ou bien ESP(SCHMITT & GAGNE, 2002).

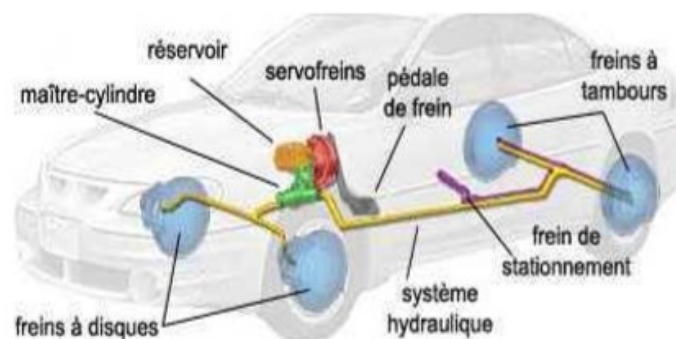


Figure II-1: Schéma d'implantation du système de freinage

Dans un système de freinage, on distingue deux parties :

- Partie commande
- Partie opérative

II.3.1 Fonction Global

Le freinage automobile a pour fonction principale de ralentir la vitesse ou d'arrêter le véhicule en fonction des conditions de trafic. Le principe de base qui repose sur ce phénomène est de convertir l'énergie cinétique du véhicule en une autre forme d'énergie. Le phénomène du crissement est directement lié à la dissipation d'une part de cette énergie cinétique sous forme d'énergie vibratoire. La majeure partie de cette énergie est transformée en chaleur à l'aide d'un système de friction. Ce système de friction, qui agit sur les éléments en rotation, est placé dans chaque roue du véhicule. On demande au matériau de friction d'avoir des propriétés constantes malgré l'augmentation de température qu'il peut y avoir au cours du freinage (TAHAR, 2018).

II.3.2 Nécessités du système de freinage

L'utilisation d'un véhicule oblige le conducteur à régler sa vitesse, en fonction de la circulation (trafic, feux tricolores, stop, cède le passage...) et des différents obstacles rencontrés, les résistances à l'avancement (résistance au roulement, à l'air ou la pente) n'étant pas suffisantes pour ralentir ou arrêter rapidement le véhicule, il sera nécessaire d'avoir recours à un système de freinage. Le système de freinage permet de réduire, de manière contrôlée par le conducteur, la vitesse du véhicule et de l'immobiliser lorsqu'il est à l'arrêt.

II.3.3 Principe de fonctionnement

La décélération du véhicule est obtenue mécaniquement par le ralentissement des roues. Ce ralentissement s'accomplit par transformation de l'énergie cinétique en énergie calorifique, au moyen d'un frottement entre deux éléments : l'un lie au châssis du véhicule, l'autre lie à la roue.

II.4 Evolution du Freinage

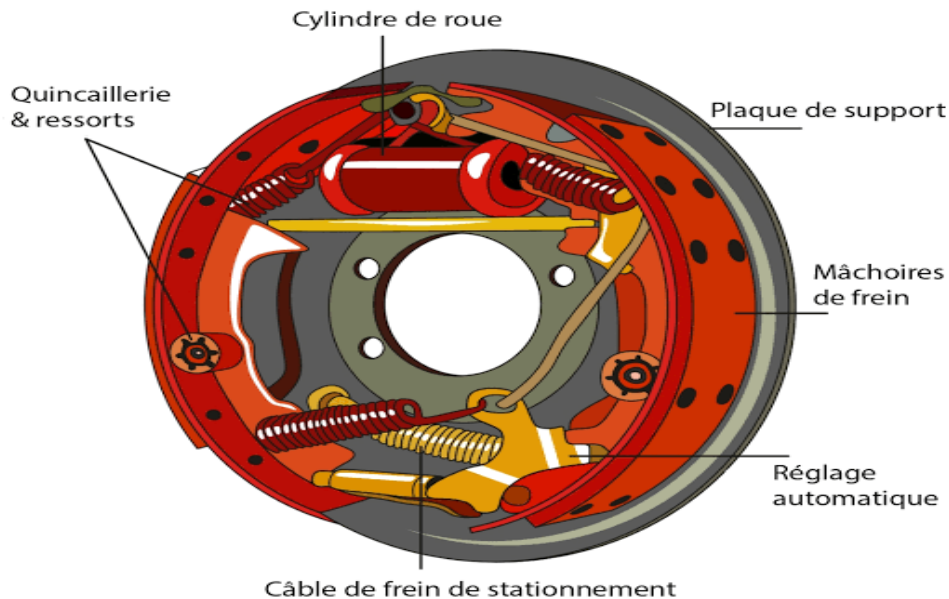
II.4.1 Freins en bois

Les premiers systèmes de freinage impliqués un levier et un bloc de bois. Ce système a été utilisé pour les voitures avec des roues cerclées d'acier. Le pilote tirait un levier pour pousser un bloc de bois contre les pneumatiques, ce qui ralentit la voiture. Ce système était efficace et cela a bien fonctionné, mais n'était plus viable lorsque le caoutchouc des pneus a été introduit. À ce moment, un autre type de système de freinage devait être exploré.

II.5 Freins Travaillant Par Frottement

II.5.1 Frein à tambour

Il se compose d'un tambour en fonte solidaire de la roue, de mâchoires solidaires du châssis, garnies d'un matériau à haute résistance au frottement et à l'échauffement et d'un cylindre qui presse les mâchoires contre le tambour (Figure II-2). Les mâchoires sont en acier recouvert d'une garniture d'un matériau composite ayant un bon coefficient de frottement (0,35 à 0,40) avec le matériau du tambour et s'usant plus vite. L'usure peut être rattrapée par un mécanisme de réglage accessible de l'extérieur (non automatique). (Aublin Michel & Delette Bernard, 1992).



Le frein à tambour

Figure II-2 : Frein à tambour

II.5.1.1 Principe de fonctionnement

Le tambour est solidaire du moyeu de roue et tourne avec lui. Les segments et les composants qui génèrent la force de freinage sont généralement montés sur un plateau circulaire en tôle emboutie nommé flasque qui ferme le tambour et est fixé rigidement au porte-moyeu.

Des ressorts hélicoïdaux travaillant en traction connectent les deux segments et les empêchent de frotter contre la couronne du tambour lorsque les freins ne sont pas actionnés). Figure II-3

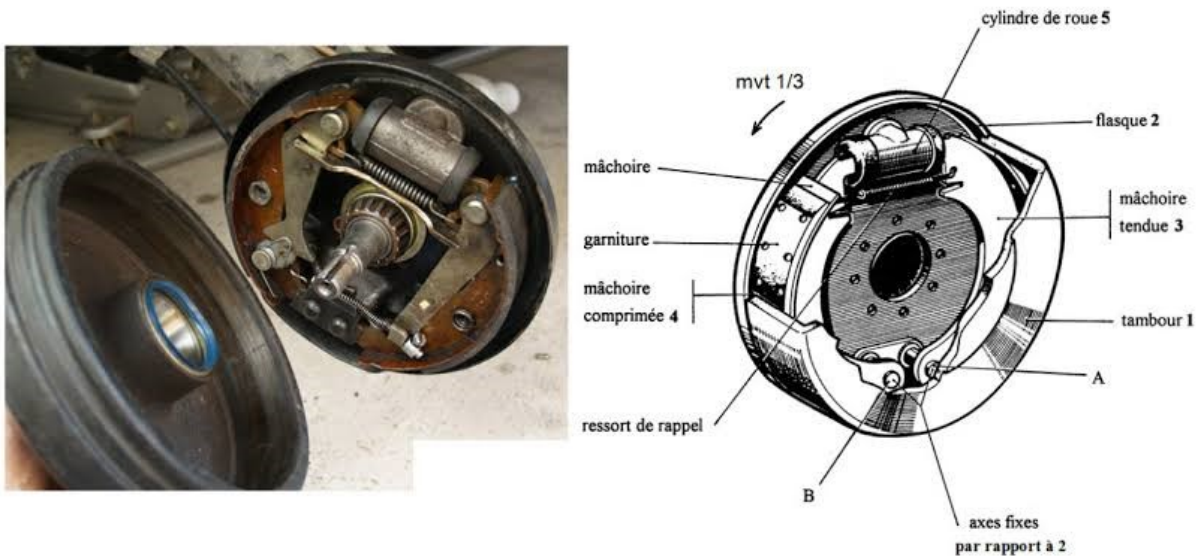


Figure II-3 : Vue 3D d'un frein à tambour

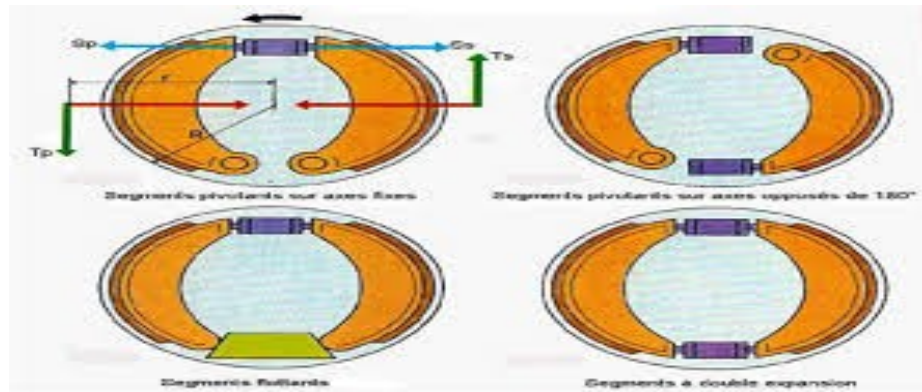


Figure II-4 : Différentes technologies de freins à disques

Différentes façons d'articuler et de commander les deux segments sont possibles suivant la configuration adoptée, l'effet d'auto-serrage est plus ou moins fort, obtenu dans un seul sens de rotation ou dans les deux, sur une seule des mâchoires ou sur les deux (Figure II-4). Les deux segments sont actionnés par un piston qui génère une force de serrage $\vec{S}_p = -\vec{S}_s$. Une force tangentielle \vec{T}_f due à la rotation du tambour qui agit sur le segment amont (primaire) engendre un moment sur son axe de pivotement qui est dans le même sens que la force de serrage \vec{S}_p : c'est

l'auto-serrage. Sur le segment aval (ou secondaire), la force Tangentielle \vec{T}_f s'oppose à l'action de la force de serrage \vec{S}_p : c'est l'auto-desserrage. Le Serrage de la mâchoire secondaire est donc plus faible que le serrage de la mâchoire primaire ce qui entraîne une usure inégale puisque les freins sont généralement utilisés en marche avant. Ainsi il existe d'autres configurations permettant de rendre l'usure égale et une puissance de freinage accrue. Si les axes des segments sont intervertis, l'auto-serrage agit sur les deux mâchoires, mais n'est effectif que dans un seul sens de rotation du tambour. On peut également remplacer les pivots des deux segments par un palier flottant. Au freinage, l'extrémité aval du segment primaire s'appuie sur le palier et pousse l'extrémité amont du segment secondaire, qui devient auto-serrant lui aussi. Ce montage est valable pour les deux sens de rotation et est la technique la plus répandue aujourd'hui. Une autre configuration consiste également à serrer les deux mâchoires à l'aide de deux cylindres hydrauliques à leur extrémité, mais ce type de frein est très peu employé en raison de son rapport efficacité/prix peu favorable.

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

La principale caractéristique requise est un coefficient de frottement relativement constant avec la température et assez élevé, de l'ordre de 0,5. Les freins à tambour sont encore bien répandus aujourd'hui sur l'essieu arrière des véhicules légers, aux performances modestes.

II.5.2 Frein à disque

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

Le frein à disque (Figure II-5) 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.

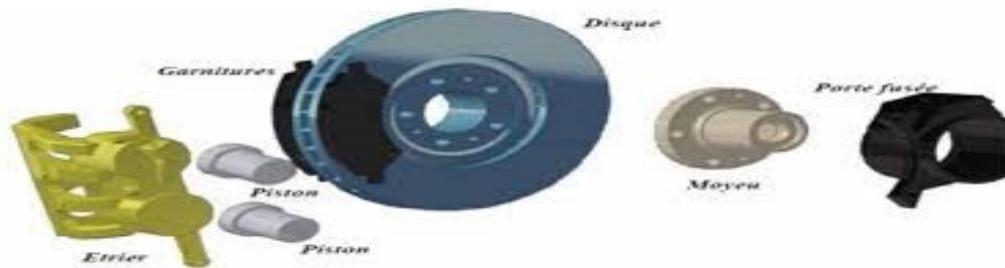


Figure II-5 : Désignation des principaux éléments

Les disques sont des composants soumis à de fortes températures. De manière générale, on trouve sur les véhicules de série des disques pleins. Afin d'augmenter l'échange thermique entre le disque et l'air environnant, on peut utiliser des disques ventilés. En diminuant ainsi la température, on garantit un meilleur frottement des garnitures sur les disques (SCHMITT & GAGNE, 2002).

Si les systèmes de frein à disque sont utilisés dans tous les domaines du transport (automobile, ferroviaire et aéronautique), les caractéristiques techniques dépendent des exigences de freinage ce qui donne des technologies différentes (Figure II-6).

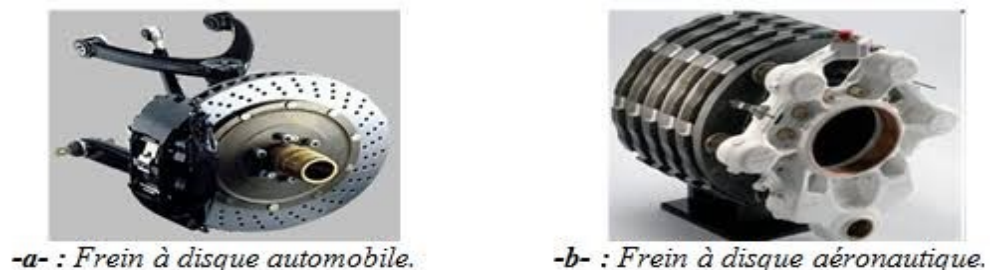


Figure II-6 : Exemples de freins à disque

II.5.2.1 Historique

Bien que Frederick William Lan chester soit généralement reconnu comme étant le premier constructeur automobile britannique à breveter version mécanique du frein à disque automobile en 1902. L'ingénieur automobile basé à Birmingham ne peut vraiment être crédité que pour l'amélioration d'une technologie existante.

En effet, un système de freinage à disque et étrier très basique avait été construit aux Etats-unies par Elmer Ambrose Cleveland en 1898 les performances du système de freinage à disque motté sur les voitures de Lan chester étaient gravement limités car le moyen de freinage agissant sur le disque était en cuivre. Non seulement ces « tampons » de cuivre étaient bruyants en fonctionnements, mais ils se sont également rapidement usés en raison des conditions poussiéreuses qui régnaient sur les routes à l'époque.

Bien que les versions ultérieures aient des patins doublés d'amiante plus efficaces, les systèmes de freinage à tambour se sont avérés plus simple et moins cher à fabriquer et sont devenus la chaux préférée des constructeurs automobiles jusqu'au milieu des années cinquante.

En comparaison aux freins à tambours, les freins à disque freinent plus efficacement refroidissement plus vite et présentent des propriétés autonettoyantes, du fait des forces centrifuges mises en jeu.

II.5.2.2 Description d'un disque

Le disque est constitué d'un anneau plein avec deux pistes de frottement (**Figure II-7**), d'un bol qui est fixé sur le moyeu et sur lequel est fixée la jante et d'un raccordement entre les pistes et le bol. Ce raccordement est nécessaire car l'anneau et la partie du bol qui est fixée au moyeu ne sont pas sur un même 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.

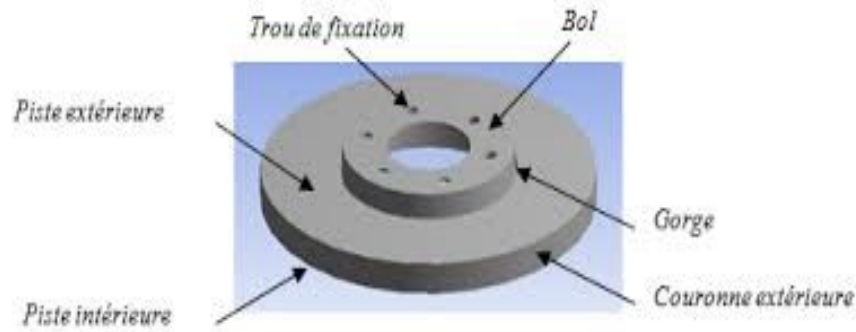


Figure II-7 : Le disque plein

La région de la gorge du bol est aussi très sévèrement sollicitée. En effet, le disque tend à se mettre en cône à cause des dilatations des pistes chaudes, mais ce déplacement est retenu par la présence du bol qui est moins chaud et par celle de l'étrier. De ce fait, de grandes concentrations de contraintes naissent dans cette zone. Lors d'essais très sévères sur banc dynamométrique, on peut parfois voir apparaître une fissure circonférentielle (du côté externe et/ou du côté interne du disque) qui se propage et provoque la rupture brutale du bol.

Les gradients dans la gorge du bol s'expliquent de la même manière. En début de freinage, la température du bol est à 20° C tandis que celle des pistes est de quelques centaines de degrés. De plus, dans le but d'éviter que la température du moyeu ne soit trop élevée (ce qui engendrerait des élévations de température du pneu, très critique pour son comportement), la gorge est usinée de manière à ne pas transmettre trop de chaleur au bol (**Figure II-8**). Avec cet usinage, la température du bol baisse effectivement, mais les gradients thermiques augmentent conséquemment dans cette zone. Ceux-ci engendrent des contraintes thermiques qui expliquent les ruptures de bol observées lors d'essais expérimentaux sévères.

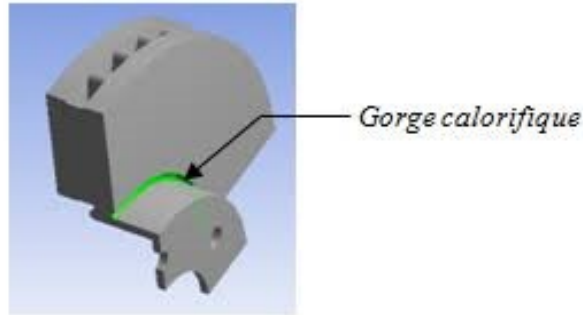


Figure II-8 : Gorge calorifique

II.5.2.3 Rôle D'un Frein A Disque

Le disque de frein est le dispositif technique utilisé pour ralentir la roue et donc pour stopper le véhicule. Le moyeu fait le lien entre la roue et le véhicule. Le disque de frein se pose sur le moyeu.

Les plaquettes de frein viennent pincer le disque et créer la friction qui va ralentir la rotation de la roue.

Cette friction provoque un échauffement important qui a pour conséquence directe de réduire l'efficacité du freinage.

Selon la taille, le poids et la puissance d'un véhicule, le disque aura besoin d'un système de refroidissement plus ou moins efficace. Pour cela il existe deux types de disques : les disques de frein pleins et les disques de frein ventilés. Le disque ventilé offre une meilleure évacuation de la chaleur que le disque plein. Ceci étant, il est impératif de respecter le type de disque monté sur la version d'origine de votre auto.



Figure II-9 : Disque ventilé et disque plein

Disque de frein plein (à gauche) et disque de frein ventilé (à droite).

Au cours du freinage, la perte de matière occasionnée par la friction entre le disque et les plaquettes provoque l'amincissement du disque ainsi que la formation d'une bordure.

En dessous d'une certaine épaisseur, les disques doivent être remplacés.

II.6 Elements d'un Frein a Disque

Le disque de frein est un organe de friction fortement sollicité, il doit résister à des températures de 600° C à 800° C dont les éléments sont illustrés sur la **Figure II-10**:

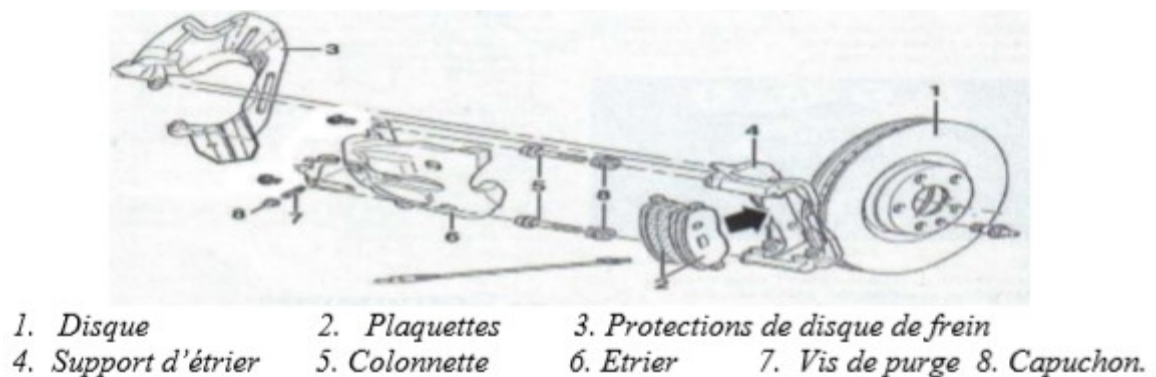


Figure II-10 : Les éléments d'un frein avant.

II.7 Types des Etriers

On peut distinguer principalement, dans le secteur automobile, deux types de réalisations. Les freins à étriers coulissants ou à étriers fixes (**Figure II-11**). Les premiers sont les plus répandus. Les étriers fixes sont surtout utilisés dans le domaine des motos(**SCHMITT & GAGNE, 2002**).

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

Le diamètre des pistons récepteurs hydrauliques dans les étriers est plus grand que celui des pistons actionnant les segments des freins à tambour et la pression dans le circuit hydraulique peut dépasser 100 bars alors que 15 bars suffisent avec des freins à tambour.

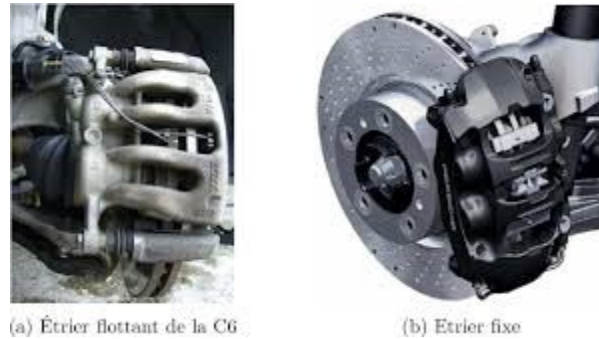
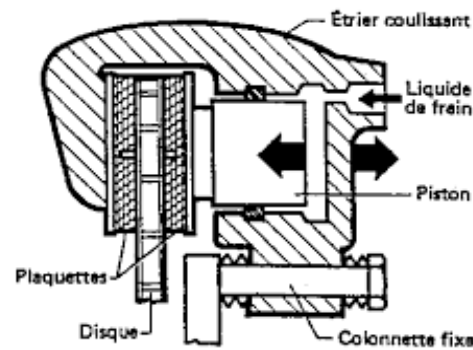


Figure II-11 : Types d'étriers

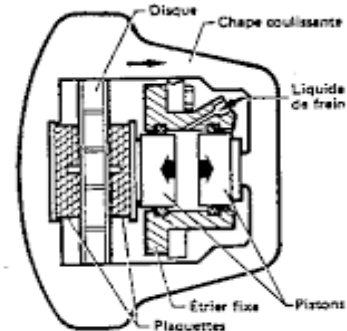
II.7.1 Frein à étrier coulissant

Lorsque le véhicule est en mouvement, le disque est en rotation. Dans le cas d'un système à étrier coulissant (Figure II-11), pendant la phase de freinage, un circuit hydraulique commandé par la pédale de frein actionne le piston qui presse la première plaquette (plaquette interne) contre le disque. Lorsque celle-ci est en contact avec le disque, l'étrier se déplace par réaction grâce à un système de coulissage et entraîne la seconde plaquette contre le disque.

On pourra également trouver des freins à chape coulissante au fonctionnement quasi identique que les freins à étriers coulissants (SCHMITT & GAGNE, 2002)(Figure II-12).



Coupe schématique de l'étrier coulissant monté sur colonnettes solidaires de la fusée.



Principe de l'étrier à chape coulissante et étrier fixe. Un piston agit directement sur une plaquette et le second piston agit sur l'autre plaquette par l'intermédiaire de la chape coulissante.

Figure II-12 : Le système à étrier flottant.

Figure II-13 : Le système à étrier à chape flottante.

II.7.2 Frein à étrier fixe

Dans le cas de l'étrier fixe, qui est rigidement attaché à l'essieu et qui comporte deux pistons opposés alimentés par un même circuit hydraulique, les deux pistons viennent presser les deux plaquettes sur le disque lors de la mise en pression (**Figure II-14**). L'avantage de ce dispositif par rapport à l'étrier coulissant est la moindre quantité de liquide mise en jeu (puisque chaque piston ne parcourt qu'une demi-distance).

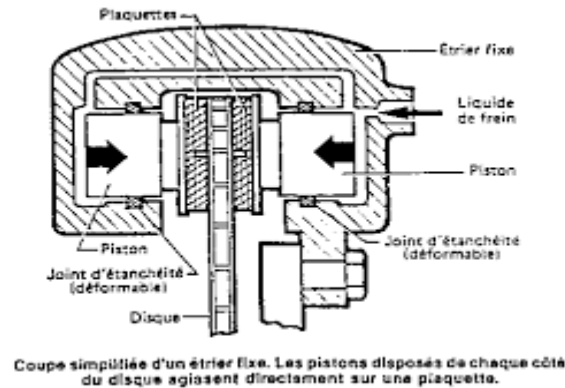


Figure II-14 : Le système à étrier fixe

II.8 Les Types de Disque Frein

Il existe deux types de disque : les disques pleins et les disques ventilés. Les disques pleins, de géométrie simple et donc de fabrication simple, sont généralement placés sur l'essieu arrière de la voiture. Ils se composent tout simplement d'une couronne pleine reliée à un "bol" qui est fixé sur le moyeu de la voiture (**Figure II-15**). Les disques ventilés, de géométrie plus complexe, sont apparus plus tardivement. Ils se trouvent la plupart du temps sur le train avant. Toutefois, ils sont de plus en plus à l'arrière et à l'avant des voitures de haut de gamme. Composés de deux couronnes - appelées flasques - séparées par des ailettes (**Figure II-15**), ils refroidissent mieux que les disques pleins grâce à la ventilation entre les ailettes qui, en plus, favorisent le transfert thermique par convection en augmentant les surfaces d'échange. Le disque ventilé comporte plus de matière que le disque plein ; sa capacité d'absorption calorifique est donc meilleure. Le nombre, la taille et la forme (ailettes radiales, incurvées, pions circulaires...) des ailettes sont variables (**Figure II-17**).

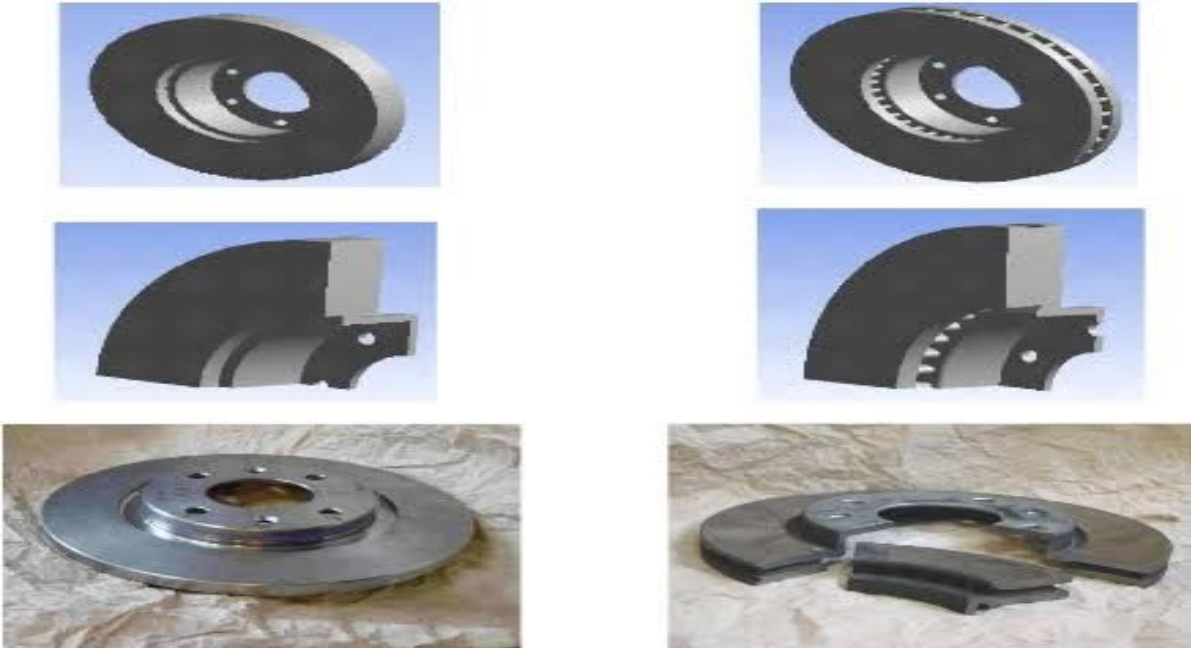


Figure II-15: Exemple de disque plein.

Figure II-16 : Exemple de disque ventilé



Figure II-17: Différentes géométries d'ailettes

La (Figure II-18) représente deux types de disque ventilé. Le modèle « a » présente une moins bonne ventilation que le « b », mais possède une meilleure rigidité. (Figure II-18) montre également la déformation du deuxième type de disque soumis à un fort gradient de température. La rotation du disque entraîne une circulation d'air dans les canaux (CARRÉ, 1993), d'où une amélioration du refroidissement (Figure II-19).

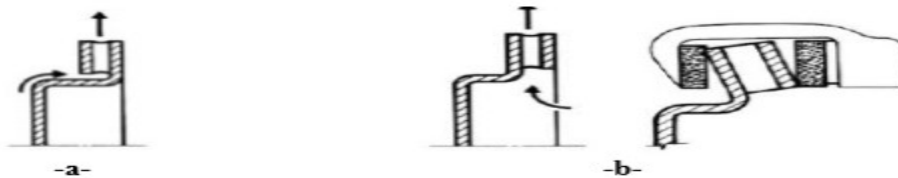


Figure II-18 : Disques ventilés : différentes conceptions

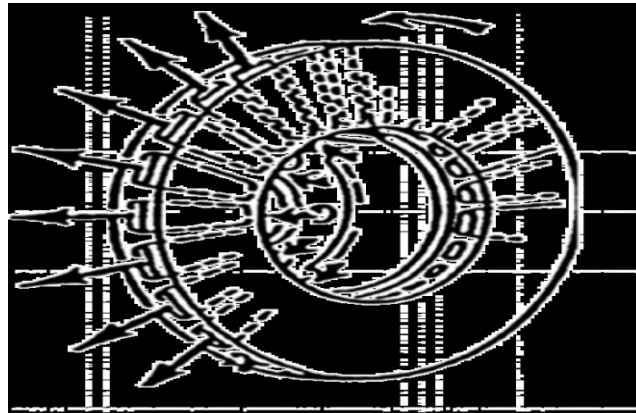


Figure II-19 : Circulation de l'air dans les canaux d'un disque ventilé

II.9 Autres Types de Disques et Leurs Caracteristiques

II.9.1 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 (Benramdane & Khadraoui, 2009). En pratique, la chaleur crée des poussières et des gaz entre le disque et la surface de la plaquette, réduisant ainsi l'efficacité, (Figure II-20).

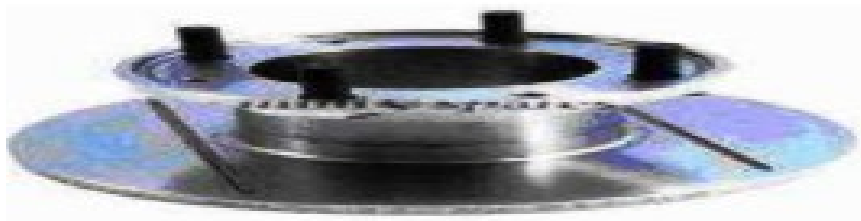


Figure II-20 : Disque rainuré

II.9.2 Les disques percés

Le perçage des disques permet en plus du refroidissement, le nettoyage des disques, (Figure II-21). 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) à tendance à craqueler et casser (Benramdane&Khadraoui, 2009).



Figure II-21 : Disque percé

II.10 Comparaison Entre Tambour Et Disque

II.10.1

Avantages

Par rapport aux freins à tambour, les freins à disque se distinguent par les avantages suivants (GUICHARD, 1996)

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

II.10.2 Inconvénients

Les inconvénients des freins à tambour se résument comme suit (GUICHARD, 1996) :

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

II.11 Les Plaquettes

Les plaquettes de frein sont composées d'une plaque en métal relativement rigide sur laquelle est collée une garniture, semblable à celle que l'on peut trouver dans les freins à tambour. Elle est toutefois soumise à des pressions plus élevées, la surface de contact étant plus réduite. La garniture est l'élément d'usure d'un système de frein et sa périodicité de changement est plus courte que celle du disque. La surface d'une garniture est très réduite comparativement à la puissance de freinage qu'elle doit fournir. Elle doit avoir de bonnes propriétés thermomécaniques et également fournir un coefficient de frottement relativement 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 métallique au dos de la garniture se doit d'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 du 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)(**FAUQUERT & LE PICHOIRON, 2003**). Les plaquettes de frein automobile comportent des rainures (**Figure II-22**). Outre leurs caractères d'évacuation des poussières et de l'eau, ces rainures influent elles sur le comportement thermique de la plaquette. Cette dernière doit présenter :

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

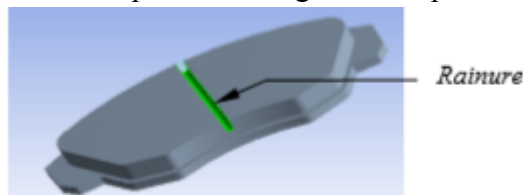


Figure II-22 : Plaquette de frein

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

La fabrication de la plaquette nécessite l'application de plusieurs techniques(**Cahier du CEPI N°09, 2000**) :

- **support métallique** : obtenu par découpage (découpage fin pour la première monte), il subit des opérations de nettoyage et de grenailage
- **matériau de friction** : pesage mélange (et remélange)
- **l'ensemble** : cuisson, cautérisation (pour la première monte), rectification et peinture.
- **personnalisation** : plaque antibruit, marquage

II.12 Probleme Du Disque De Frein

L'analyse bibliographique des phénomènes de freinage montre que la principale sollicitation vient des fortes variations de température induites par le frottement des plaquettes contre le disque. En effet, la température peut varier de 20° C à plus de 700° C en quelques secondes seulement. Ces brusques variations ne permettent pas à la température de s'homogénéiser. De ce fait, le disque est le lieu de très 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 apparaît 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. La prédiction numérique des champs thermomécaniques qui s'établissent dans le disque, a été mise en place la méthode de calcul fondamental qui prenne en compte les couplages essentiels entre les différents phénomènes, le caractère transitoire de l'histoire thermique du disque, le comportement anélastique du matériau, les gradients thermomécaniques ortho radiaux et la rotation du disque. Dans cette étude, On se rend vite compte que la simulation d'un freinage par une méthode classique par éléments finis engendrerait des temps de calcul exorbitants.

II.13 Les Matériaux Du Disque De Frein

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

II.13.1 Le disque

Afin d'assurer un bon comportement thermique et mécanique, le matériau idéal pour le disque de frein doit pouvoir emmagasiner beaucoup de chaleur et supporter un effort mécanique important, sur une large gamme de température de fonctionnement (dans l'automobile, les températures d'utilisation varient entre 0 °C et 800 °C ; dans l'aviation les températures peuvent atteindre les 3000°C). De plus, il doit être bon marché et être de fabrication relativement facile.

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

Les proportions de carbone et les ajouts de différents types d'éléments d'addition (phosphore, potassium, silicium, manganèse, cuivre, soufre, nickel, chrome, molybdène, aluminium, autres éléments d'alliages et des impuretés diverses) permettent de faire varier légèrement les propriétés thermomécaniques de la fonte qui reste ainsi en perpétuelle évolution (**Carneiro et al., 1992; Jimbo et al., 1990; Kim et al., 1995**)

On rappelle que plus la teneur en carbone n'est élevée, plus la résistance mécanique de la fonte n'est mauvaise. Par contre, la conductivité augmente, ce qui diminue les contraintes thermiques.

Il existe néanmoins dans le cas de véhicules à hautes performances des disques bi matière avec un moyeu (ou bol) en aluminium ou acier et une piste de freinage (couronne) en carbone-céramique vissée ou rivetée (**Figure II-23**). Ces disques sont particulièrement coûteux mais plus légers et plus résistants à l'usure, à la corrosion et aux hautes températures.



Figure II-23 : Disque carbone-céramique.

II.13.2 Les garnitures

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

Les garnitures sont faites de matériaux dits de friction. Ceux-ci sont composés d'abrasifs et de lubrifiants, d'élastomères, de poudre de métaux et autrefois, d'amiante. Leur composition est souvent mal connue, restant confidentielle chez les équipementiers.

II.13.3 Les supports

Les supports sont fabriqués avec un acier doux. Leur rôle est de répartir l'effort exercé par le piston hydraulique sur la totalité de la surface des garnitures, dans le but d'obtenir une surface de contact disque/plaquette la plus large et la plus homogène possible. Cela constitue un des critères de bon fonctionnement du frein.

Le support est la pièce intermédiaire entre les garnitures et le piston. Elle transmet donc la chaleur des garnitures (qui peut être élevée) vers le liquide dans le piston. Afin d'éviter ce phénomène, on utilise parfois des sous-couches qui servent d'isolant thermique.

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

II.14 Phénomènes 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 contraintes résiduelles de traction. Le disque subit donc des cycles de contraintes traction/ compression qui

s'apparentent 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.

II.15 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 (**Figure II-24**) ;
- le contact entre le disque et les plaquettes ;
- l'usure

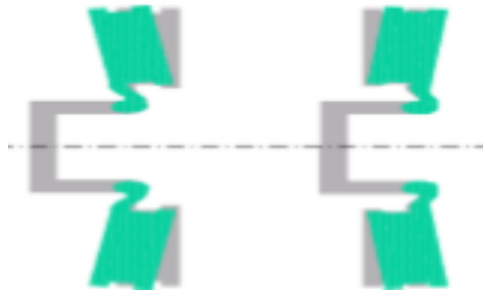


Figure II-24 : Mise en cône d'un disque de frein

II.16 Matériaux Conventionnels : Aciers, Fontes

II.16.1 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 tel que un **X2 Cr NiMo 17-12** (ancienne désignation : **Z2 CND 17-12** soit **0,02%** de carbone, **17%** de chrome et **12%** de nickel ainsi que des traces de molybdène). Les propriétés mécaniques de ces aciers sont une grande ductilité ainsi qu'une grande résilience, en particulier à haute température (*Matériaux utilisés dans la conception de disques de freins, 2015*).

II.16.2 Fontes

Les fontes à forte teneur en carbone sont aussi les matériaux les plus couramment utilisés dans l'industrie automobile, le tableau ci-après donne les compositions des alliages en fontes (FG) destinés à la fabrication des disques de frein.

Elément d'alliage	FG 25 allié	FG 20 HC	FG 20 HC
C%	3.0 à 3.5	3.62 à 3.86	3.7 à 3.9
Si%	1.9 à 2.9	Max 2.1	1.8 à 2.2
Mn%	0.6 à 0.9	0.65 à 0.80	0.5 à 0.8
P%	Max 0.12	Max 0.085	Max 0.12
S%	Max 0.10	Max 0.095	Max 0.10
Cr%	0.2 à 0.4	0.18 à 0.300.1
Mo%	0.3 à 0.5	0.3 à 0.45	---
Cu%	0.2 à 0.3	0.3 à 0.45	0.25
Ni%	0.1 à 0.3	---	---
Ti%	---	0.03 à 0.05	---
Sc%	0.82 à 1.01	1.0 à 1.03	1.01 à 1.10
Dureté HB 30.750/50	---	180 à 225	160 à 200
R _m N/mm	250 à 300200150

Tableau II-1 : Composition et résistance des 03 sortes de fontes pour la conception des disques(Carrión Solla & Vela Villares, 2008)

L'indice de saturation du carbone a été calculé par la formule de Jungbluth :

$$S_c = 4.3 - \frac{1}{3}(Sc - P) \quad (I.1)$$

C : teneur en carbone.

Si : teneur en silicium.

P : teneur en phosphore

II.16.3 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 (*Matériaux utilisés dans la conception de disques de freins*, 2015).

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 anti oxydation 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.

II.16.4 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 (*Matériaux utilisés dans la conception de disques de freins*, 2015). 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 plaquette. Avec une qualité **CM 83** la température du disque doit être entre **400° C** et **600°C**.

Chapitre III. **Généralités sur le transfert de Chaleur**

Le deuxième chapitre présente, le transfert de chaleur et ces types (convection, conduction, rayonnement), la génération de chaleur dans les cordonnés (cylindrique, sphérique, plane) et les régimes permanents et transitoires.

III.1 Introduction

Les transferts thermiques font partie des Sciences de base de l'ingénieur, tant il est vrai qu'il est peu de domaines industriels où la thermique ne joue un rôle petit ou grand. Au minimum, l'ingénieur doit donc :

- En connaître les principes fondamentaux,
- Être capable d'évaluer leur importance dans un problème particulier,
- Dégager les ordres de grandeur par une modélisation simple.

Les multiples procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur, soit parce que c'est le but recherché (fours, coulée, freinage, échangeurs, thermoformage, induction, lits fluidisés, trempe, refroidissement), soit parce que ceux-ci interviennent d'une manière inévitable (chocs thermiques, pertes de chaleurs, rayonnement). Des connaissances de base en ce domaine sont donc nécessaires à l'ingénieur de production ou de développement pour:

- Comprendre les phénomènes physiques qu'il observe ;
- Maîtriser les procédés et donc la qualité des produits.(*Cours de Transfer de chaleur*, 2021)

Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont(Oschwald, 2004) :

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

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons :

- Par conduction.
- Par rayonnement.
- Par convection.

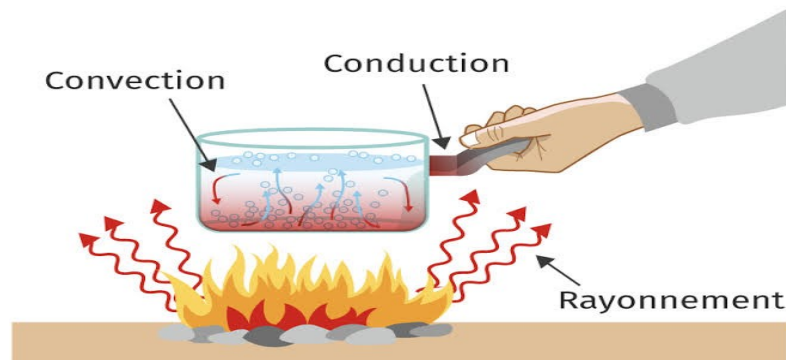


Figure III-1: schéma de transfert de chaleur

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 modéliser ce problème précisément, nous nous intéressons dans cette partie par le calcul du flux de la chaleur initial entrant dans le disque au niveau de la zone de contact.

III.2 Définitions

Chaleur : la chaleur est une forme d'énergie. Il a ses origines aux niveaux moléculaires. Les molécules d'une substance vibrent dans leurs position fixes ou fixes lorsque l'énergie leurs est fournies lorsqu'ils vibrent, ils transfèrent leurs énergie aux molécules environnantes, ce que les fait également vibrer.

Température : la température d'un corps est de mesurer leur quantité chaleur dont il dispose. Il est mesure en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou Kelvin ($^{\circ}\text{K}$). La température d'une substance est une grandeur physique qui mesure le degré de chaleur ou du froid d'un corps

Transferts Thermique = Energie en transit due à Une différence de température.

III.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(Kennedy & Ling, 1974) :

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

Pour des conditions de régimes permanent, le champ de température est indépendant du temps. Dans de nombreux cas, la dépendance du champ de température sur deux coordonnées- et parfois sur une coordonnée – peut être considérée. Un champ de température est représenté graphiquement au moyen de surfaces isothermes, dans chacune relie tous les points du champ ayant la même distance entre les isothermes est inversement proportionnelle au gradient de température ; dans ce cas, le champ de température scalaire est associé au champ de vecteurs des gradients de température(*Température Field*, s. d.)

III.2.2 Gradient de température

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

La deuxième grandeur qui définit le gradient de température est la longueur. Le gradient thermique est défini comme le rapport de la différence de température entre deux points et la distance entre les deux points voir la **Figure III-2** pour l'illustration. La température aux points A est **Ta** la température aux point B et **Tb** la distance entre deux points est **Dx**. Si **Tb-Ta** est appelé **Dt**.

Alors le gradient thermique comme définie $(Tb-Ta)/Dx$ ou Dt/Dx (Oschwald, 2004).



Figure III-2 : définition du gradient thermique.

III.2.3 Flux de chaleur

Le flux thermique, également appelé flux thermique, est appelé densité de flux thermique, la densité du flux thermique est un flux d'énergie par unité de surface par unité de temps. En SI, ses unités sont des watts par mètre carré ($\frac{W}{m^2}$). Comme le flux de chaleur à la fois une direction et une grandeur, ils s'agit donc d'une quantité vectorielle (« Heat Flux Formula », 2020)

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

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

III.2.3.1 Densité de flux ϕ

Elle représente la puissance qui traverse l'unité de surface. Pour une surface perpendiculaire aux flux de chaleur :

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

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

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

III.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, etc..., électronique ou domestique (chauffage de l'habitat) (« Heat Flux Formula », 2020). 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.

III.3.1 Conduction

Est spécifique aux solides (bois, métaux, etc.). La conduction est la méthode de transfert de chaleur à l'intérieur d'un corps ou d'un corps à l'autre en raison de transfert de chaleur par des

molécules vibrantes à leurs positions moyennes. Les corps à travers les quels le transfert de chaleur doit être en contact les uns avec les autres. Il n'y a pas de mouvement réel de matière lors du transfert de chaleur d'un endroit à l'autre

La conduction se produit généralement dans les solides ou les molécules de la structure sont fortement maintenues ensemble par des forces d'attraction intermoléculaire entre elles et ainsi elles ne vibrent de leurs positions moyennes lorsqu'elles reçoivent de l'énergie thermique et la transmettent ainsi aux molécules environnantes par des vibrations (« Heat Transfer », 2018) :

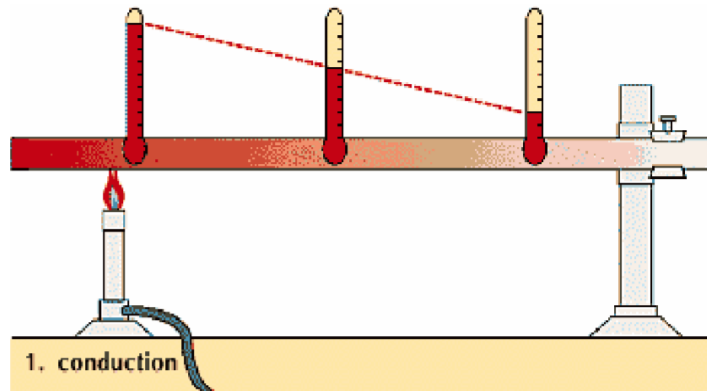


Figure III-3 : Transfer par conduction

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

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

Q'' : densité de flux de chaleur dans la direction x W/m²

K : conductivités thermique du milieu W/ (m.°C) ou W/ (m. °K)

T : température (K) ou (°C)

x position axiale (m)

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

Un bon isolant thermique est un matériau qui a une conductivité thermique la plus basse possible (exemple : l'air) Un bon conducteur thermique est un matériau qui a une conductivité thermique élevée (exemple le cuivre).

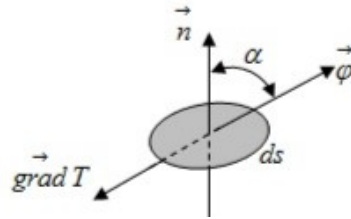


Figure III-4: Lois de Fourier

Exemple: conduction dans une vitre.

Si les faces intérieure et extérieure d'une vitre d'une maison sont à des températures différentes il y a conduction thermique dans l'épaisseur de la vitre. En hiver par exemple, si la température de la face extérieure est de - 10 C° et celle de la face intérieure est de 20C°, le transfert de chaleur se fait de l'intérieur vers l'extérieur (il y a donc des pertes thermiques).(*Cours de Transfer de chaleur, 2021*)

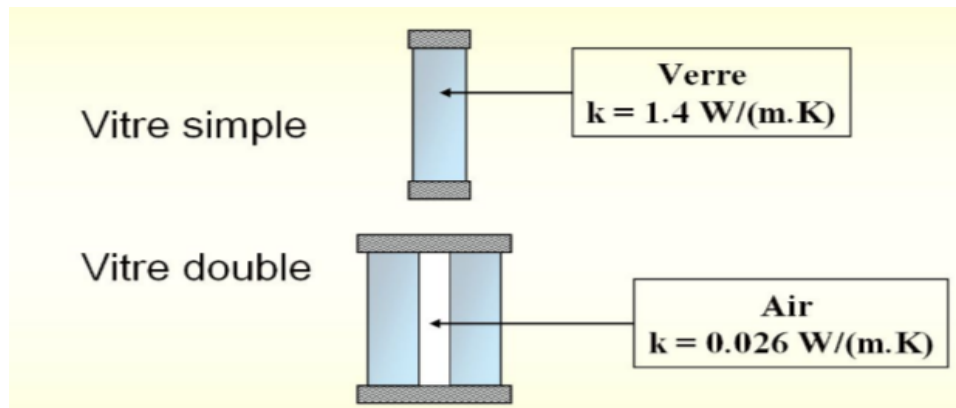


Figure III-5: Conduction dans une vitre.

III.3.1.1 Loi de Fourier généralisée

Dans un champ de température tridimensionnel $T(x, y, z)$ dans un milieu isotrope (les propriétés sont les mêmes dans toutes les directions), la loi de Fourier s'exprime sous forme vectorielle suivant la relation:

$$\mathbf{Q}'' = -K \nabla T \tag{II.4}$$

On rappelle que les composantes de l'opérateur gradient, ∇ sont :

En coordonnées rectangulaires(x ; y ; z):(Oschwald, 2004)

$$\nabla = \delta_x \frac{\partial}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial}{\partial y} + \delta_z \frac{\partial}{\partial z} \tag{II.5}$$

En coordonnées cylindriques (r ; ϕ ; z) :

$$\nabla = \delta_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \delta_\phi \frac{\partial}{\partial \phi} + \delta_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{II.6})$$

En coordonnées sphériques (r ; ϕ ; θ) :

$$\nabla = \delta_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \delta_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \delta_\phi \frac{\partial}{\partial \phi} \quad (\text{II.7})$$

III.3.1.2 Conductivité thermique (k)

Les valeurs de k varient suivant les composés considérés de 10-2 à 103 W/ (m. K). En général:

K gaz < K Liquide K solide non-conducteur < K solide conducteur

Pour un composé donné, k peut varier avec la température et avec la pression (pour les gaz, k augmente si p augmente).(Oschwald, 2004)

III.3.1.3 Les régimes permanents

La température eu un point d'un système à un instant donné dépend de la position de ce point par rapport à un repaire de cordonnées

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

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

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

III.3.2 Les régimes transitoires

Si la température dépend du temps on dit que le régime est transitoire. Dans cecaspeutécire.

$$\phi = \phi(x, y, z, t) \text{ ou } T(x, y, z, t) \quad (\text{II.8})$$

III.3.3 Convection

Est spécifique aux fluide (liquide, gaz, air). La convection est le mode de transfert de chaleur qui se produit principalement dans les liquides et les gaz. Dans cette méthode, le transfert de chaleur a lieu avec le mouvement réel de la matière d'un endroit à l'autre dans le corps. Souvent, lorsque nous faisons bouillir de l'eau, nous avons vu des bulles et des courants se développer dans l'eau après une observation attentive (« Heat Transfer », 2018).

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

On à la loi de Newton sa forme différentielle est (*propagation de la chaleur*, s. d.).

$$\varphi = hS(T_p - T_\infty) \quad (\text{II.9})$$

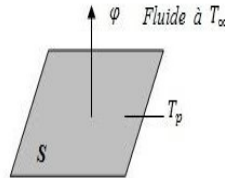


Figure III-6: Définition d'un élément de surface d'échange.

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection	(W)
h : Coefficient de transfert de chaleur par convection	($Wm^{-2}K^{-1}$)
T_p : Température de la surface	(K)
T_∞ : Température du milieu environnant la surface	(K)
S: Aire de la surface de contact solide / fluide	(m^2)

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 simplement 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**.

Voici des exemples de situations avec transfert de chaleur par convection: échangeur de chaleur, sèche cheveux, ventilateur, quand on souffle sur son café pour le refroidir !

On distingue:

- la convection forcée pour laquelle le mouvement du fluide est induit par une source externe (pompe, ventilateur...);
- la convection naturelle pour laquelle le mouvement du fluide résulte directement de l'existence des gradients de température et de densité dans le fluide;

-
- Les échanges avec changement de phase (condensation ou ébullition) sont aussi des modes de transfert par convection.

III.3.3.1 Le nombre de Reynolds

Ce nombre joue un rôle fondamental dans la caractérisation de l'écoulement, il est défini par l'expression suivante (Carrion Solla & Vela Villares, 2008).

$$R_e = \frac{U_m d}{\nu} \quad (\text{II.20})$$

Avec ν est la viscosité cinématique du fluide.

- Si $R_e < 2400$ on est en régime laminaire
- Pour des vitesses plus élevées, $R_e \gg 2400$, le régime turbulent apparaît.

III.3.3.2 Le nombre de Nusselt

Ce nombre caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi, il est défini comme suit (Carrion Solla & Vela Villares, 2008) :

$$N_u = \frac{hd}{k} \quad (\text{II.21})$$

III.3.3.3 Le nombre de Prandtl

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

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

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

$$P_r = \frac{\mu C_p}{k} \quad (\text{II.22})$$

III.3.4 Rayonnement

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

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

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.23})$$

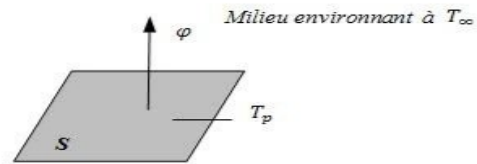


Figure III-7 : Élément en rayonnement.

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)

III.4 Bilan D'énergie

Soit un volume de contrôle donné, à chaque instant, le bilan de conservation d'énergie (énergie mécanique + énergie interne) sur ce volume s'écrit:

$$[\text{CE QUI RENTRE}] - [\text{CE QUI SORT}] + [\text{CE QUI EST GÉNÉRÉ}] = [\text{CE QUI S'ACCUMULE}]$$

$$E_{in} - E_{out} + E_g = E_{acc} \quad (\text{II.24})$$

Le terme "énergie générée" est à considérer au sens large: énergie produite (en +) ou consommée (en -). Il en est de même pour le terme d'accumulation (variation dans le temps de l'énergie dans le volume de contrôle).

Dans le cadre du cours, le bilan d'énergie se limitera à un bilan d'énergie thermique.

Le terme de génération, EG, pourra apparaître dans les cas suivants:

- réactions chimiques exo ou endothermique,
- réactions nucléaires.
- dissipation visqueuse.
- effet Joule dans une résistance électrique.

Au travers d'une surface, le bilan se réduit simplement à :

$$E_{in} - E_{out} = 0 \quad (II.25)$$

III.5 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)(Kennedy & Ling, 1974) :

$$\Phi_{st} = \rho V c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II.26)$$

Avec :

Φ_{st} : Flux de chaleur stocké (W)

ρ : Masse volumique (kgm^{-3})

V : Volume (m^3)

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

T : Température ($^{\circ}C$)

t : Temps (s)

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

III.6 Les Equations Gouvernantes Du Transfert De Chaleur Transitoire Par

Conduction

Considérons un matériau isotrope dans le système tridimensionnel dans un domaine Ω .

Si l'écoulement de la chaleur dans les directions x , y et z par unité de surface et par unité de temps, et respectivement, la différence entre le flux sortant et le flux entrant pour un élément de volume $dx dy dz$ est donnée comme suit(Oschwald, 2004),

$$dy dz \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} - q_x \right) + dx dz \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial x} - q_y \right) + dx dy \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial x} - q_z \right) \quad (II.27)$$

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,

$$-\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (II.28)$$

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 :

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - \rho Q - c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz = 0 \quad (II.29)$$

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

$$\begin{cases} q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

La substitution de ces flux de la chaleur dans l'équation (II.24) mène à une équation d'ordre plus supérieur dans une variable indépendante simple T ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz = 0 \quad (\text{II.31})$$

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

$$\nabla \cdot k \nabla T + Q = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (\text{II.32})$$

III.7 Conclusion

Le chapitre se propose de faire acquérir les connaissances nécessaires à la compréhension des différents mécanismes de transfert de chaleur et la résolution de problèmes simples de transfert thermique.

Chapitre IV. **Généralités sur les systèmes de freinage**

Le troisième chapitre, s'intéresse de système freinage (ABS, ESP,AFU) et les frottements exercés sur les automobiles.

IV.1 Introduction

Les performances en freinage des véhicules sont de toute évidence une des caractéristiques cruciales pour la sécurité. Dans la perspective d'accroître la sécurité, des efforts importants ont été consentis ces dernières années pour améliorer le freinage. Des normes réglementent le freinage dans la plupart des pays.

IV.2 Physique Du Systeme De Freinage

Tout système de freinage automobile tient comme objectif transformé l'énergie mécanique d'un véhicule, plus précisément l'énergie cinétique, en énergie thermique transmise sur un des composants du mécanisme de freinage.

Dans le sport automobile depuis quelques années la majorité des systèmes de freinage sont des systèmes de freinage à disque. Les composants du mécanisme de freinage qui absorberont la majorité de l'énergie thermique, pour réduire la vitesse du véhicule, seront les disques.

Pour diminuer la vitesse du véhicule les plaquettes et le disque entrent en contact avec frottement. La dissipation d'énergie, engendré par le frottement disque-plaquette, produit une dilatation qui va causer un accroissement du champ de pressions et en conséquence de forts gradients thermiques et des points chauds vont apparaitre. Les caractéristiques de cette transformation énergétique dépendent des conditions d'opération (pression, vitesse, température des freins, etc.), et des spécifications géométriques et matérielles du modèle. L'efficacité de cette transformation énergétique et l'efficacité du refroidissement du disque avec l'environnement, définira la performance du système de freinage du véhicule(Belhocine, 2012).

La physique du système de freinage à disque nous porte à comprendre le phénomène structurel séparément du phénomène thermique puis étudier l'interaction des deux avec l'évolution du temps

IV.2.1 Partie Structurelle

Le disque de frein n'a pas une fonctionnalité structurelle principale dans la conception d'une automobile. Tous les efforts structuraux auxquels les disques sont soumis sont de moindre échelle en comparaison à la charge structurelle d'autres composants du véhicule. Cependant, la fatigue structurelle des disques de frein existe et est fortement liée au problème

thermomécanique. Les disques sont soumis à des efforts structuraux dus principalement à une dilatation du matériau, causé par les forts gradients thermiques. Les forces de serrage de l'étrier engendrent le contact disque-plaquette et en conséquence une force de friction tangentielle opposée au mouvement de rotation du disque apparaît. La combinaison de ses deux forces produit des contraintes à l'union du disque avec les composants structuraux du système de freinage.



Figure IV-1 : système de freinage

IV.2.1.1 Contact disque-plaquette

La pression de contact faite par les plaquettes sur le disque de frein en rotation produit la fatigue structurelle et l'expansion thermique, celle-ci est une conséquence directe des points chauds du disque et des gradients thermiques, causés par le frottement. L'interaction des plaquettes avec les disques de frein engendre un problème thermomécanique qui englobe une déformation thermique du disque et des concentrations des contraintes. Ces deux éléments, peuvent créer des fissures et des vibrations pendant la vie utile du système de freinage.

De plus, le contact disque-plaquette, produit aussi de l'usure. L'usure par frottement peut être définie comme la perte de matière d'une surface à cause du glissement au long d'une autre surface. Cette perte de matière a lieu sur la surface de glissement des plaquettes car l'usure sur la surface du disque est minimale étant donné la dureté des disques en comparaison à celle des plaquettes (Belhocine, 2012).

Le frottement mécanique peut se classer en fonction des conditions dans lesquelles il a lieu ou en fonction du mécanisme à travers lequel se produit le frottement. Les conditions définissent le frottement lubrifié et le frottement sec, au même temps, le mécanisme classe le frottement abrasif ou le frottement adhésif. Les frottements abrasif et adhésif ont lieu lors d'un contact

plastique. Dans le cas d'un contact plastique entre deux matériaux semblables l'interface de contact a un pouvoir adhésif. Quand la rupture est causée par la forte adhésion des matériaux sur l'interface de contact, le frottement est adhésif. Le frottement abrasif a lieu quand il y a un contact plastique parmi un matériel dur et tranchant et un matériel doux, la surface plus dure pénètre la plus douce. Le frottement engendré par le contacte disque-plaquette est un frottement abrasif et sec (Kato&Adachi, 2000).

IV.3 Les Efforts Agissant Aux Roues Lors Du Freinage

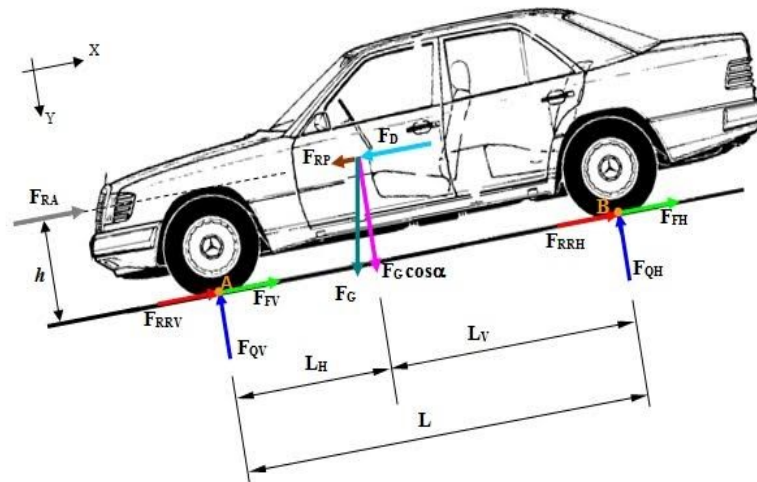


Figure IV-2 : Définition des forces agissant sur une automobile lors du freinage

En observant la situation décrite à la Figure II.6, on peut écrire l'équilibre longitudinal et transversal du véhicule selon les axes x, y locaux de la voiture.

- $\sum F_X = 0 \Rightarrow F_{RRV} + F_{FV} + F_{RRH} + F_{FH} + F_{RA} - (F_{RP} + F_D)$ (III.1)
- $F_{FV} + F_{FH} = F_{RP} + F_D - F_{RRV} - F_{RA} - F_{RRH}$ (III.2)
- $F_F = F_{RP} + F_{RF} - F_{RR} - F_{RA}$ (III.3)

Avec:

$$F_F = F_{FV} + F_{FV}$$

$$F_{RR} = F_{RRV} + F_{RRH}$$

- $\sum F_Y = 0 \Rightarrow F_G \cos \alpha - (F_{QV} + F_{QH}) = 0$ (III.4)
- $F_{QM} = F_G \cos \alpha - Q_V$ (III.4)
- $\sum M_B = 0 \Rightarrow F_{QV}L + F_{RA}h - h(F_{RF} + F_{RP}) - hF_G \sin \alpha$ (III.5)
- $F_{QV} = \frac{[(F_{RF}+F_{RP})h+F_GL_H-F_{RA}h]}{L}$ (III.6)

Pour un véhicule routier, la force au roulement $F_{RR} = F_c f_r \cos \alpha$ est due au plat formé par un pneumatique sur la route, f_r est le coefficient de résistance au roulement. Pour un pneu haut pression ($f_r = 0.015$)

$$F_{RP} = F_c \sin \alpha \quad (III.7)$$

La force aérodynamique est donnée par:

$$F_{RA} = C_x A_F \frac{\rho_a}{2} V^2 \quad (III.8)$$

Avec C_x coefficient de forme, égal à : 0,3 à 0,4 sur voiture

A_F (m²) surface frontale ; en première approche, pour un véhicule routier de tourisme, on peut prendre : $A_F = 0.6 \times hauteur \times largeur$

ρ_a Masse volumique de l'air.

IV.4 Puissance De Freinage Totale

$$P_{tot} = P_R + P_F \quad (III.9)$$

$$P_F = \sum F_F v = (F_{FV} + F_{FH})v \quad (III.10)$$

$$P_R = \sum F_R v = (F_{RR} + F_{RP} + F_{RA})v \quad (III.11)$$

Dans le cas d'un freinage sur plat, on néglige les résistances dues au roulement et à la pente ($F_{RR} = 0$ et $F_{RP} = 0$). la pénétration dans l'air est généralement négligeable, pour cette raison on prend ($F_{RA} = 0$).

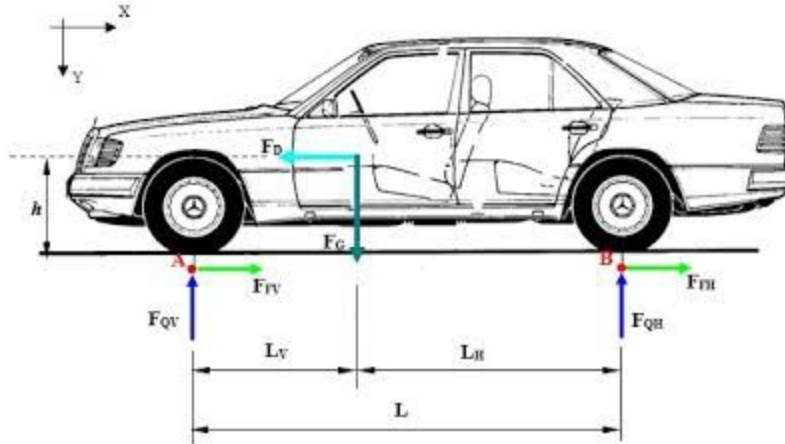


Figure IV-3 : Efforts agissant sur une voiture freinée, freinage d'arrêt sur plat.

$$P_R + \sum F_R v = (F_{RR} + F_{RP} + F_{RA})v = 0 \quad (III.12)$$

$$P_F = \sum F_F v = (F_{FV} + F_{FH})v \quad (III.13)$$

$$(F_{FV} + F_{FH}) = F_D = ma \quad (III.14)$$

$$P_{tot} = P_F = mav \quad (III.15)$$

Soit ϕ le coefficient qui représente la proportion de l'effort de freinage rapportée aux roues arrière $P_{FH} = \Phi mav$ alors $P_{FV} = (1 - \phi) mav$ si a est constante, on a :

$$v(t) = v_0 - at \quad (III.16)$$

$$P_F = (1 - \phi) ma(v_0 - at) \quad (III.17)$$

La puissance de freinage apportée au disque de frein est égale à la moitié de la puissance totale:

$$P_{FV1} = \frac{1-\phi}{2} ma(v_0 - at) \quad (\text{III.18})$$

A l'instant $t=0$, on a donc

$$P_{FV1} = \frac{1-\phi}{2} mav_0 \quad (\text{III.19})$$

On définit alors l'efficacité du freinage par le rapport entre la décélération (a) et l'accélération (g) :

$$z = \frac{a_d}{g} \quad (\text{III.20})$$

$$P_{FV1} = \left(\frac{1-\phi}{2}\right) m z g v_0 \quad (\text{III.21})$$

IV.5 Expression Du Flux Thermique Initial

Les disques de frein ont pour but de dissiper l'énergie mécanique en chaleur. Pour les trains ou les voitures, c'est l'énergie cinétique du véhicule qui est dissipée par le frottement des patins sur les disques. L'ensemble patin - disque s'échauffe sous cette action et refroidit à l'air ambiant. Ces freinages étant répétés, les disques de frein sont soumis à de la fatigue +thermomécanique. Dans l'automobile, de nombreuses études ont montré que les freinages pouvaient engendrer des températures pouvant dépasser 700°C en quelques secondes. Si on considère que le disque de frein peut absorber totalement la quantité de chaleur produite.

$$Q_v = \frac{(1-\phi)}{2} m_{tot} g v \left[\frac{Nm}{s} \right] = [W] \quad (\text{III.22})$$

L'expression de la puissance de frottement transformée par unité de surface est donc:

$$Q'_v = \frac{(1-\phi)}{2} \frac{m_{tot}}{2A_d} \left[\frac{Nm}{Sm^2} \right] = \frac{W}{m^2} \quad (\text{III.23})$$

La grandeur Q'_v caractérise le flux de chaleur injecté dans le disque, Il doit donc être uniquement localisé sur la surface réelle de contact. Où A_d la surface de disque balayé par une plaquette de frein.

Si on introduit le facteur d'exploitation de la surface frottante

$$S_p = \frac{Q'_v}{Q'_{vmax}} \quad (\text{III.24})$$

On obtient ainsi, l'équation du flux thermique initial de friction entrant dans le disque, qui est se calcule comme suit:

$$Q'_{v_{max}} = \frac{(1-\phi)(m_{tot}-gv)}{2} \frac{[Nm]}{2A_d S_p [Sm^2]} = \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (III.25)$$

IV.6 Principe De Fonctionnement De Systeme De Freinage D'une Automobile

Le système de freinage d'une voiture fonctionne par friction entre deux éléments : les disques, ou les cylindres, et les plaquettes de frein. D'autres surfaces de freinage sont également liées entre elles pour permettre au véhicule de ralentir ou de stopper, suivant les situations. La pression hydraulique, alors exercée, permet le bon fonctionnement des freins.

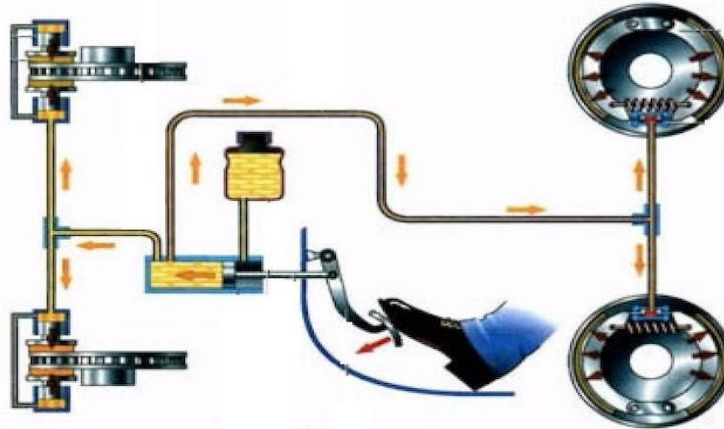


Figure IV-4 : Système de freinage d'une voiture

Voici comment ça marche étape par étape :

- La commande de frein est équipée d'un maître-cylindre qui est relié à un réservoir de liquide de frein.
- Lorsque le conducteur exerce une pression sur la pédale de frein, le maître-cylindre exerce une pression (dite hydraulique) sur le liquide de frein, comme un piston
- Par cette action, les étriers (dans le cas de freins à disque) ou les cylindres de roues (dans le cas de freins à tambour) sont activés.
- Une friction se fait alors entre les plaquettes et les disques (pour les véhicules équipés de freins à disque) ou entre les segments et les tambours (pour ceux équipés de freins à tambour).
- Ce qui permet le blocage des roues qui va ralentir le véhicule, voire le stopper (*Le Guide Complet du Système de Freinage, 2021*).

IV.6.1.1 Les différents types de freinage



Figure IV-5 : pédale de frein.

Premier élément du circuit de freinage, c'est évidemment la pédale de frein. Elle se situe au niveau du pédalier sous le volant du conducteur, pour les voitures équipées d'une boîte de vitesses manuelle. Elle permet d'actionner la commande de freinage par un circuit très précis qui permet le blocage des roues par friction.

Petit rappel du pédalier automobile :

- La pédale de gauche : l'embrayage,
- La pédale du milieu : le frein,
- La pédale de droite : l'accélérateur. (*Le Guide Complet du Système de Freinage*, 2021)

IV.6.1.2 Le frein à main ou frein de parcage



Figure IV-6 : Frein à main.

Le frein à main, encore appelé frein de parcage ou frein de stationnement, est un levier situé entre les deux sièges avant, juste derrière la boîte de vitesses. Il permet de maintenir le véhicule stable lorsqu'il est stationné ou à l'arrêt.

Il peut également être actionné en marche en cas de danger ou de sol glissant. C'est le cas lorsqu'il neige ou qu'il y a du verglas sur la route et que la voiture glisse. Il faut savoir bien utiliser le frein à main, tout en douceur, pour s'arrêter de cette manière.

Vous pouvez aussi l'utiliser pour un démarrage en côte. Il permet de maintenir les roues à l'arrêt avant de passer la première vitesse pour avancer.

De plus en plus de voitures sont équipées de frein à main électrique. Le levier à relever lorsqu'on stationne sa voiture est alors remplacé par un bouton électrique qui se trouve au même endroit, soit entre les deux sièges avant(*Le Guide Complet du Système de Freinage*, 2021).

IV.6.1.3 Le frein moteur

Quand on parle de frein moteur, cela signifie que l'on peut ralentir jusqu'à stopper complètement une voiture en utilisant l'inertie du moteur. Pour utiliser le frein moteur, relâchez le pied de l'accélérateur progressivement tout en rétrogradant, c'est-à-dire en diminuant vos vitesses une à une. Ce qui va permettre au véhicule de naturellement réduire sa vitesse.

IV.6.2 Les aides au freinage

L'aide au freinage la plus connue est le système **ABS**. Cet antiblocage de roues, qui est présent dans tous les nouveaux modèles de voiture, accompagne en douceur le freinage d'urgence.

D'autres aides au freinage s'associent à l'**ABS** :

→ Le système d'urgence de freinage (**AFU**) qui permet de freiner sans danger à la puissance maximale.

→ Les électro stabilisateurs programmés (**ESP**) permettant de corriger la trajectoire du véhicule lorsqu'on freine, mais aussi de freiner s'ils détectent une possible collision(*Le Guide Complet du Système de Freinage*, 2021).

IV.6.2.1 Le fonctionnement de système ABS

IV.6.2.1.1 Principe de fonctionnement

L'ABS doit éviter le blocage des roues avant et arrière lors de freinage et maintenir le glissement de chaque roue environ 10 et 30 %.

Le système ABS doit donc calculer en permanence le glissement de chacune des roues par rapport au sol pour moduler la pression de freinage alimentant leur frein respectif et ainsi maintenir la valeur de ce glissement dans une zone où le coefficient d'adhérence de chaque roue sur le sol conserve une valeur optimale.

Le glissement de chacune de roues est déterminé par le calculateur:

- à partir du signal émis par le capteur de chaque roue,
- en fonction de la consigne e de procédures mémorisées.

Le système gère alors la pression de freinage appliquée aux étriers de frein pour chaque roue (KOROLITSKI, 2008).

IV.6.2.2 La fonction de système AFU « aide aux freinages d'urgence »

IV.6.2.2.1 Assistance classique

Afin d'améliorer l'agrément de conduite, tous les dispositifs de frein actuels sont assisté par un amplificateur de freinage qui à pour but de diminuer l'effort de commande sur la pédale de frein.

C'est un système avec deux chambres séparées par une membrane. Lors de freinage un coté de cette membrane est soumis à la dépressions (tubulure d'admission pour les moteurs à essence ou pompe à vide pour les moteurs diesel) et l'autre à la prissions atmosphérique. L'effort génère par cette déférence de pressions aide le conducteur à la mise en action des freins(KOROLITSKI, 2008).

IV.6.2.2.2 Principe de fonctionnement

Une vanne commandée par inertie dans le servofrein. Dès que la vitesse d'actionnement de la pédale de frein dépasse une certaine valeur, la vanne ouvre soudainement la communication entre la chambre et la et la prissions atmosphérique ce qui a pour effet de généré une amplification maximale de la force de freinage. En conclusion l'aide de freinage d'urgence permet :

- Une décélération maximale malgré un effort insuffisant de conducteur.
- Une distance de freinage plus court en cas de réaction de panique (KOROLITSKI, 2008).

IV.6.3 Comment prévenir les pannes de freins ?

Des voyants lumineux existent sur le tableau de bord pour vous prévenir d'une défaillance du système de freinage. Manque de liquide de frein, frein à main bloqué, ABS défectueux, etc., dès qu'un témoin s'allume, il est conseillé d'amener votre voiture chez un garagiste pour connaître la cause et faire les réparations nécessaires.

De la même manière, il est important de contrôler régulièrement les plaquettes et les disques de freins. Ces pièces s'usent plus que les autres, car elles sont très souvent sollicitées. Prévoyez de changer les plaquettes de freins tous les 30 000 à 70 000 km.

Ce guide touche à sa fin, vous savez désormais comment fonctionnent les freins d'une voiture. Il est important de suivre les conseils du moniteur d'auto-école lors de vos cours de conduite. Une mauvaise utilisation des freins peut vous mettre en danger et abîmer la mécanique de votre véhicule. Donc, soyez prudent sur la route et respectez bien les distances de freinage

Le système de frein est vaste, il se compose de plusieurs pièces automobiles qui garantissent la sécurité des automobilistes, comme les disques et les plaquettes. Voyons de plus près, quels sont les autres éléments qui complètent le système de freinage (*Le Guide Complet du Système de Freinage*, 2021)

IV.7 Critere D'évaluation D'un Systeme De Freinage

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

IV.7.1 Efficacités

L'efficacité du frein se mesure par son aptitude à arrêter un véhicule en mouvement, sur une distance minimale, quelles que soient les conditions extérieures. L'effort qui sert à ralentir la rotation du disque doit donc être le plus élevé possible. En d'autres termes, il faut optimiser l'effort tangentiel issu du frottement des plaquettes sur le disque. Ainsi, plusieurs paramètres interviennent : **la pression de contact, la surface de frottement et le coefficient de frottement**. Plus ces valeurs sont élevées, plus la distance d'arrêt du véhicule est faible.

La pression de contact disque/garnitures dépend essentiellement de la pression hydraulique dans le piston. Celle-ci varie entre 0 *bar* et 80 *bars* pour une voiture particulière. La pression de contact dépend aussi de l'état de surface des deux pièces frottantes, de l'usure, des rigidités des matériaux, des dilatations thermiques, etc.

Le coefficient de frottement, noté, doit aussi rester le plus stable possible, afin d'assurer un freinage constant, quelles que soient les conditions de freinage. Or, une fois les matériaux choisis, va dépendre de la pression de contact, de la vitesse de rotation mais aussi de l'hygrométrie et de la température de fonctionnement. En effet, la valeur de baisse par temps de

pluie. De même, quand la température atteint 400° C environ, chute brutalement. C'est ce qu'on appelle le *fading*.

Kennedy et Ling (Kennedy & Ling, 1974) pour l'aéronautique puis Tirovic et Day (Tirovic & Day, 1991) pour l'automobile ont mis en évidence que la surface réelle de contact peut être très différente de la surface potentielle de contact (surface totale des garnitures) avec des variations permanentes dues au couplage entre les dilatations thermiques, les pressions de contact et l'usure. Ces investigations ont été menées pour des géométries simples de type annulaire avec l'hypothèse de matériaux à comportement élastique linéaire.

IV.7.2 Confort

Les problèmes de confort rencontrés avec le frein à disque résident dans l'apparition de bruits et de vibrations dans certaines configurations de freinage. Théoriquement, les vibrations et les bruits sont reliés puisque le bruit est toujours engendré par des vibrations. Cependant, on appelle communément **vibrations** les vibrations qui sont ressenties autrement que par les bruits. Dans le problème du frein, il s'agit principalement des vibrations de la pédale de frein et du volant. Elles sont essentiellement dues aux chocs entre le disque et les plaquettes et sont donc liées à la vitesse de rotation de la roue. Les fréquences de ces vibrations varient de quelques hertz à quelques centaines de hertz.

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

IV.7.3 Endurance

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

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

- du faïençage sur les pistes de frottement (**Figure. IV. 8**) ;
- des fissures radiales sur les pistes de frottement (**Figure IV.9**) ;
- des fissures au pied des ailettes (**Figure IV.10**) ;
- Rupture dans la gorge du bol (**Figure IV.11**)
- Section de disque fissuré (**Figure IV.12**)
- Fissure dans la gorge (**Figure IV.13**)
- Usure des pistes (**Figure IV.14**)
- Usure non-uniforme (**Figure IV.15**)

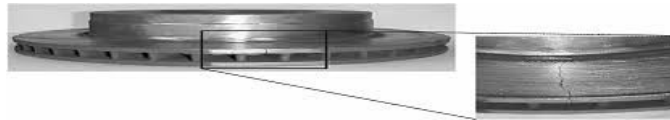


Figure IV-7 : Observation d'une fissure radiale de la bordure extérieure du disque jusqu'au bol



Figure IV-8 : *Faïençage sur les pistes de frottement*



Figure IV-12: Section de disque fissuré



Figure IV-9 : *Fissure radiale sur les pistes de frottement*



Figure IV-13 : Fissure dans la gorge



Figure IV-10 : Fissure en pied d'ailette



Figure IV-14 : Usure des pistes



Figure IV-11 : Rupture dans la gorge du bol



Figure IV-15 : Usure non-uniforme

IV.7.4 Autres critères

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



Figure IV-16 : Dépôts de matière sur les pistes du disque



Figure IV-17 : Usure excessive des plaquettes

IV.8 Conclusion

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

Chapitre V. **Modélisation thermomécanique d'un frein à disque**

Le cinquième chapitre est modélisation de la génération de chaleur de frein à disque avec logiciel COMSOL 5.6 multiphysics.

V.1 Introduction

Les voitures ont besoin de freins pour des raisons évidentes, et vous ne voulez pas qu'ils tombent en panne. Une panne de frein peut être causée par plusieurs choses, dont l'une est la surchauffe du disque de frein. Cet exemple modélise la génération et la dissipation de chaleur dans un frein à disque d'une voiture ordinaire en cas de panique freinage et la période de relâchement suivante. Lorsque le conducteur appuie sur les freins, l'énergie cinétique est transformée en énergie thermique. Si les disques de frein surchauffent, le frein les plaquettes cessent de fonctionner à cause de la décoloration des freins où les propriétés matérielles du frein changent en raison de la surcharge de température. La puissance de freinage commence déjà à s'estomper à températures supérieures à 600 K. C'est pourquoi il est si important lors des phases de conception de simuler le chauffage transitoire et le refroidissement par convection pour déterminer ce que le minimum intervalle entre une série de freinages est.

Dans cette application, une voiture de 1 800 kg roule à 25 m/s (90 km/h ou environ 56 mph), jusqu'à ce que le conducteur panique soudainement et freine pendant 2 secondes. À ce stade, les huit plaquettes de frein ralentissent la voiture descend à une vitesse de 10 m/s² (en supposant que les roues ne patinent pas contre la route).

Après avoir freiné pendant deux secondes, le conducteur relâche le frein, laissant la voiture rouler à 5 m/s pendant huit secondes sans actionner les freins. Les questions à analyser avec le

Modèle sont :

- Quelle est la température des disques et des plaquettes de frein lorsque le frein est engagé ?
- De combien les disques et les plaquettes refroidissent-ils pendant le repos qui suit le freinage?

V.2 Présentation Du Logiciel Comsol 5.6 Multiphysics

Les ingénieurs et les scientifiques utilisent le logiciel **COMSOL Multiphysics®** est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Pour simuler des conceptions, des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche scientifique. **COMSOL Multiphysics®** est une plateforme de simulation qui offre des capacités de modélisation multi physique et mono physique entièrement couplées. Le Constructeur de modèles comprend toutes les étapes de la méthodologie de travail

de la modélisation — définition des géométries et des propriétés des matériaux, spécification de la physique qui décrit des phénomènes spécifiques à la résolution, jusqu'au post-traitement des modèles pour produire des résultats précis et documentés.

Lorsque vous avez développé un modèle, vous pouvez utiliser le Constructeur d'applications pour le transformer en une application de simulation munie d'une interface utilisateur dédiée qui peut être utilisée par des collaborateurs et des clients qui ne sont pas des experts en logiciels de simulation. Pour vous aider à organiser vos modèles et vos applications, la plateforme **COMSOL Multiphysics®** comprend également le Gestionnaire de modèles, qui est un outil de modélisation et de gestion des simulations permettant le contrôle de versions et un stockage efficace des données.

Vous pouvez ajouter n'importe quelle combinaison de produits complémentaires de la suite de produits **COMSOL** à la plateforme logicielle **COMSOL Multiphysics®**. Cela vous permet d'accéder à des caractéristiques spécialisées répondant à vos besoins particuliers en matière de modélisation dans une interface utilisateur toujours identique, quel que soit le domaine d'ingénierie ou le phénomène physique à traiter.

V.2.1.1 Historique

Le logiciel **COMSOL** et la société correspondante ont été créés en **1986** par des étudiants de Germond Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'Institut royal de technologie (**KTH**)(*GermundDahlquist, 2021*) à Stockholm en Suède. La première version de **COMSOL Multiphysics** est sortie en **1998**.

La version initiale (avant **2005**) de **COMSOL Multiphysics** s'appelait **FEMLAB**.

V.2.2 Principe d'utilisation

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats - sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, **MEMS**, ainsi qu'avec les logiciels de **CAO** et **Matlab**.

Ce logiciel est multiplateforme (**Windows, Mac, Linux**). En plus des physiques précitées, **COMSOL Multiphysics** autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (**EDP**), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (**EDO**) et des équations algèbre-différentiels (**EAD**) sont également possibles.

V.3 Définition De Modele

Pour faire une modélisation de disque de frein on a utilisé la fonte comme un matériau prend des valeurs comprises entre 0.4 et 0.6 et pour le coefficient de frottement de frein standard national entre 0.35-0.40 s'il est inférieur à 0.35 le frein dépassera la distance de freinage de sécurité ou même de la défaillance du frein. Nous avons utilisé la fonte car c'est la matière la plus fréquemment utilisée pour la fabrication des disques et la plus lourde et plus disposée à la rouille par rapport à l'acier son oublier qu'il est moins cher est fourni une meilleure friction pour le freinage.

Et pour les plaquettes on a prendre le socle en tôle d'acier, un matériau defrictions (garniture) composée de plusieurs éléments organiques ou métalliques avec n coefficient de frottement de 0.25-0.35 sont suffisantes pour arrêter un véhicule lors d'une conduite souple. Ce sont les valeurs typiques des pièces équivalentes aux pièces d'origine. Le coefficient de frottement des plaquettes de frein d'origine est légèrement plus élevé, de 0.3 à 0.5. La composition implique des différences sur les performances, le confort ou le bruit lors du freinage.

V.3.1 Matériaux composites

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté rigidité à un effort, etc) explique l'utilisation croissante des matériaux composites employés dans la construction des disques de freins, on a le carbone-carbone (C-C), les composites à matrice métallique (CMM) et les composites à matrice céramique (CMC) (« Matériau composite », 2022)

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

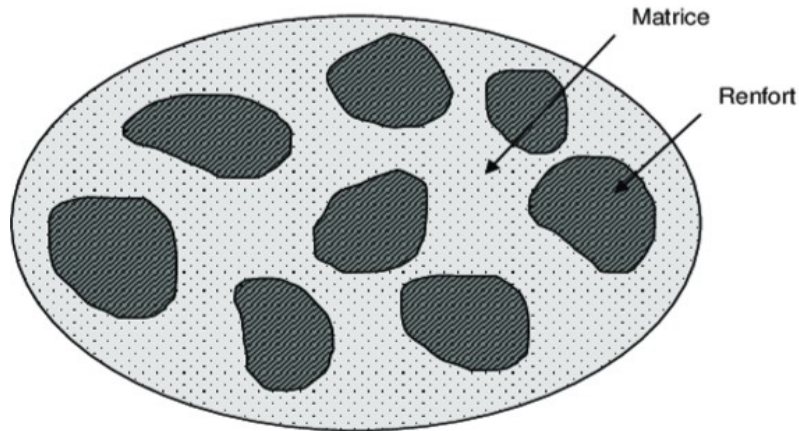


Figure V-1 : constitution d'un matériau composite.

V.3.1.1 Composition carbone-carbone

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

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

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

V.3.1.1.1 Propriétés des composites carbone-carbone (C-C)

Les composites carbone-carbone (C-C) peuvent s'adapter ou être adapté à de nombreuses fonctions aux activités différentes. Les composites de carbone-carbone (C-C) ont des propriétés significatives par rapport aux matériaux conventionnelle ou aux composite céramique. Ces propriétés font des composites les matériaux de choix pour les applications environnementales sévères. Les propriétés d'intérêt sont chimiques, physiques, mécaniques et de fabrication. Ces propriétés dépendent de la conception spécifique de l'application souhaitée.

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

➤ **Propriété chimiques**

- 1- Carbone-carbone (C-C) sont des matériaux non inflammables résistants au feu qui peuvent être utilisés dans des applications nécessitant une résistance à la chaleur élevée tels que les réservoirs d'essence et certains appareils médicaux.
- 2- Le carbone-carbone a une haute résistance à la corrosion et à l'oxydation. car ce sont des matériaux complètement inertes, même dans des conditions environnementales sévères.

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

➤ **Propriétés physiques**

- 1- Les composites carbone-carbone (C-C) sont conçus dans une dilatation thermique et une conductivité thermique idéales pour être similaires aux structures environnantes afin de réduire la contrainte thermique à la valeur la plus basse.
- 2- Les composites carbone-carbone (C-C) sont structurés pour absorber ou transmettre l'énergie magnétique et électrique. Certains avions militaires sont fabriqués à partir de composites de Carbone absorbant les signaux radar.
- 3- Le point de fusion et de la chaleur spécifique des composites carbone-carbone sont nettement supérieurs à ceux d'autres matériaux dans les propriétés échouent ou fondant, c'est pourquoi les composites de carbone sont les meilleurs matériaux pour les applications à haute température telles que les embouts de nez de rentrée et les pièces aérospatiales.

➤ **Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques des composites carbone-carbone (C-C) restent en plus élevées, en particulier à des températures supérieures à 3000 °C, là où d'autres matériaux présentent une faiblesse et une dégradation. En utilisant les fibres dans le sens de l'épaisseur, ce qui conduit à une augmentation du transport thermique, de la résistance et du module de composite carbone-carbone (Rosen, 1965).

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

- 1- résistance plus élevée et matériaux plus légers cinq fois plus légers que l'acier est trois fois plus léger que l'aluminium. les rapports résistance/ poids (rigidité) sont importants dans les applications aérospatiale et automobile.
- 2- résistances à la dégradation dans les applications à forte fatigue bien meilleure que les matériaux conventionnels.

3- capacité et capacité ductilité, dureté, élasticité, effraction et résistance à la rupture.

Modélisez le disque de frein comme un solide **3D** avec la forme et les dimensions comme dans la (**Figure V-2**) Le disque a un rayon de **0,14 m** et une épaisseur de **0,013 m**.

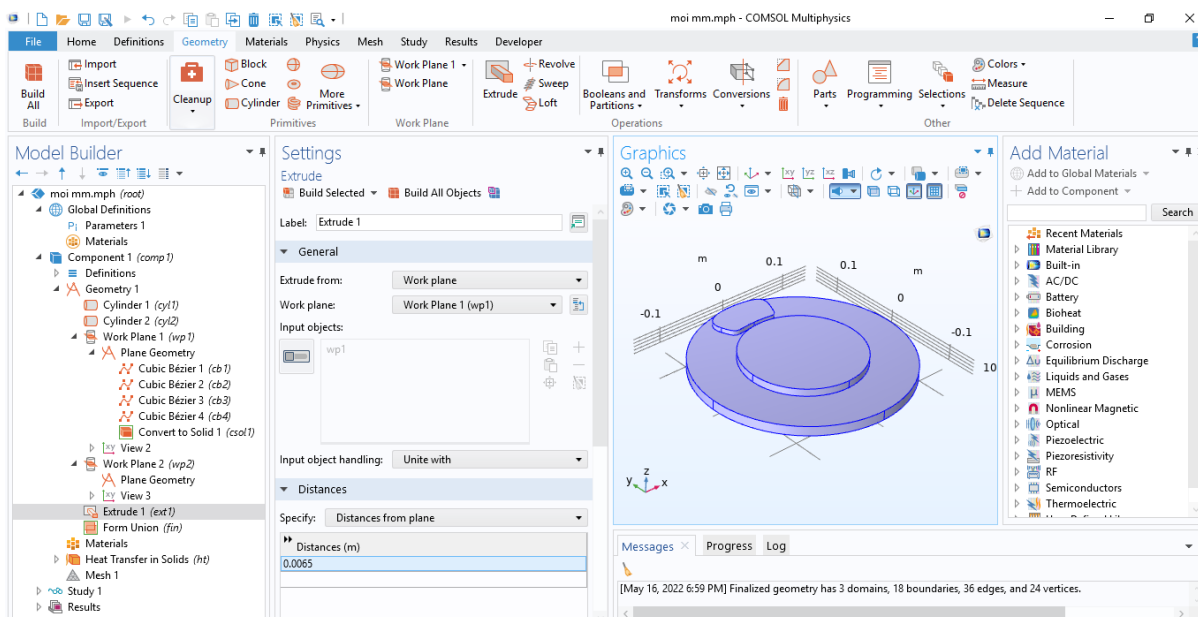


Figure V-2: Géométrie du modèle, y compris le disque et le tampon.

Le modèle inclut également la conduction thermique dans le disque et le tampon à travers la chaleur transitoire équation de transfert. La dissipation thermique des surfaces du disque et des plaquettes vers l'environnement l'air est décrit à la fois par convection et par rayonnement. Le **tableau 1** résume les propriétés des matériaux utilisés dans cette application (*Chemical Engineering Volume 1 - 6th Edition, 1999*).

Après 2s, le contact se fait à l'interface entre le disque et la pastille. Négliger la traînée et d'autres pertes en dehors des freins, la puissance de ralentissement des freins est donnée par le de la dérivée temporelle de l'énergie cinétique de la voiture :

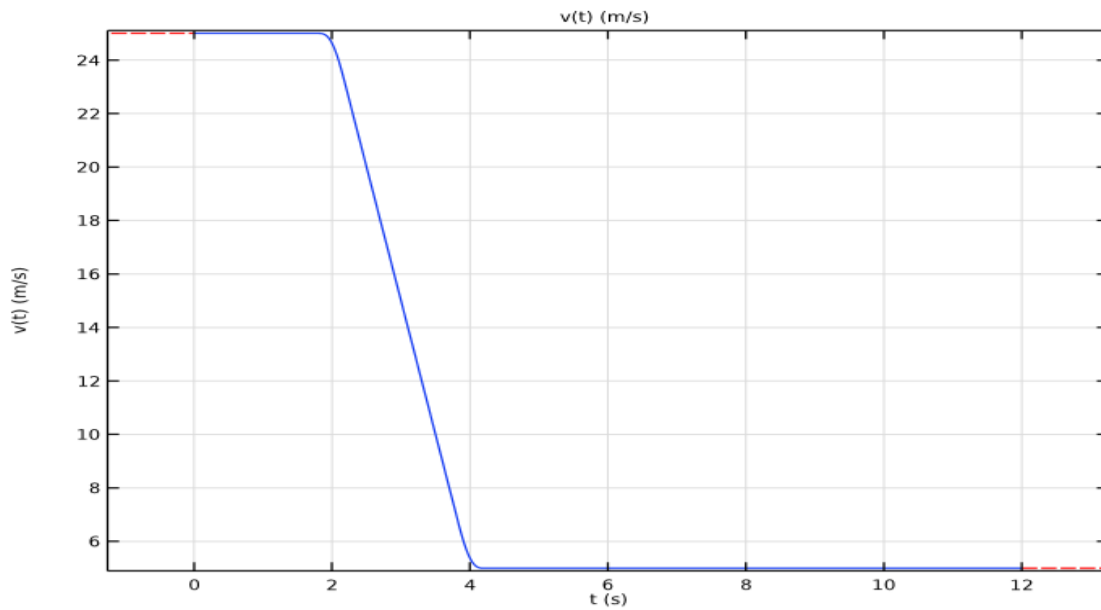
Propriétés	Description	disque	Pad	Air
ρ (kg/m ³)	Densité	7870	2000	1.170
C_p (J/ (kg .K))	Capacité calorifique à pression constante	449	935	1100
\mathcal{K} (W/ (m .k))	Conductivité thermique	82	8.7	0.026
E	Emissivité de surface	0.28	0.8	—

Tableau V-1: Propriétés des matériaux

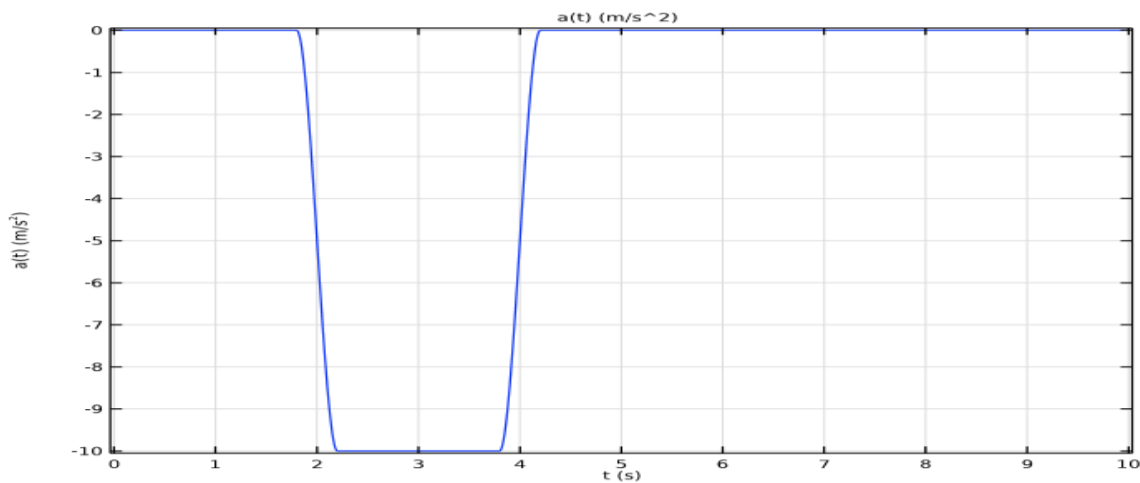
Après 2 s, le contact se fait à l'interface entre le disque et la pastille. Négliger la traînée et d'autres pertes en dehors des freins, la puissance de ralentissement des freins est donnée par la dérivée temporelle de l'énergie cinétique de la voiture :

$$P = -\frac{d}{dt}\left(\frac{mv^2}{2}\right) = -mv \frac{dv}{dt}$$

Ici m est la masse de la voiture (1800 kg) et v désigne sa vitesse. La **(FigureV-3)** montre le profil de v et la **(FigureV-4)** montre le profil d'accélération correspondant



FigureV-3: Profil de vitesse du disque.



FigureV-4: Profil d'accélération du disque.

Au niveau de l'un des huit freins, la source de chaleur par friction est :

$$P_b = \frac{P}{8} = -\frac{1}{8} m v \frac{dv}{dt}$$

La pression de contact entre le disque et la plaquette est liée à la source de chaleur de friction par unité de surface, P_b , selon:

$$P = \frac{P_b b}{\mu v}$$

Où le coefficient de frottement μ est ici égal à 0,3.

Le disque et la plaquette dissipent la chaleur produite à la limite entre la plaquette de frein et le disque par convection et rayonnement. Cet exemple modélise la rotation sous forme de convection dans le disque. Le vecteur de vitesse du disque local est :

$$V_d = \frac{v}{R}(-y, x)$$

À la fin du calcul, la chaleur produite et dissipée peut être récupérée à l'aide de rapports

$$W_{\text{prod}} = \int_0^t Q_{\text{prod}} dt$$

$$W_{\text{diss}} = \int_0^t Q_{\text{diss}} dt$$

V.4 Resultats et Discussion

Les températures de surface du disque et de la plaquette varient avec le temps et la position. À la surface de contact entre la plaquette et le disque, la température augmente lorsque le frein est engagé puis diminue à nouveau lorsque le frein est relâché. On peut mieux remarquer ces résultats dans **COMSOL Multiphysics**. La Figure V-5 affiche la surface températures juste avant la fin du freinage. Un « hot spot » est visible au contact entre la plaquette de frein et le disque, juste au bord de la plaquette. C'est la zone qui pourrait surchauffer jusqu'au point de défaillance des freins. La figure montre également la diminution de la température le long de la trace de rotation après le patin. Pendant le repos, la température devient nettement plus basse et plus uniforme dans le disque et le tampon.

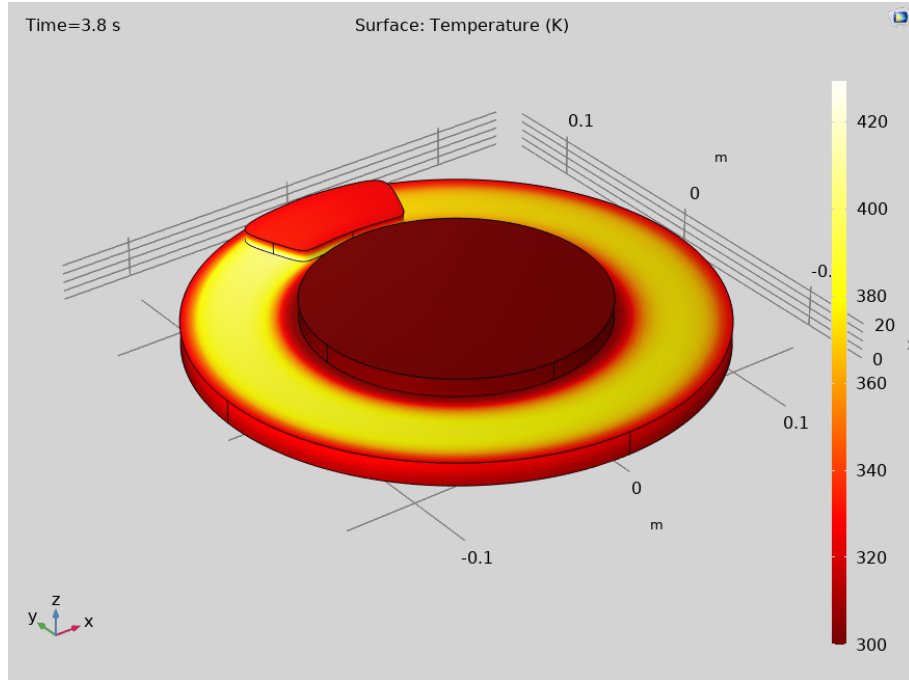


Figure V-5: Température de surface du disque et de la plaquette de frein juste avant de relâcher le frein (t = 3,8 s).

Pour étudier la position du point chaud et l'heure du maximum de température, il est utile pour tracer la température en fonction du temps le long de la ligne du centre au bord du tampon illustré à la Figure V-6. Le résultat est affiché à la Figure V-7. Vous pouvez voir que la température est d'environ 430 K. Le point chaud est positionné à proximité de l'abord du tampon. La température la plus élevée se produit environ 1 s après l'enclenchement du frein.

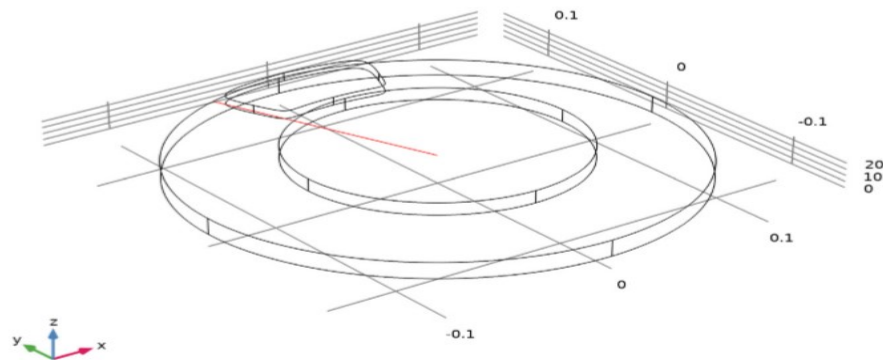
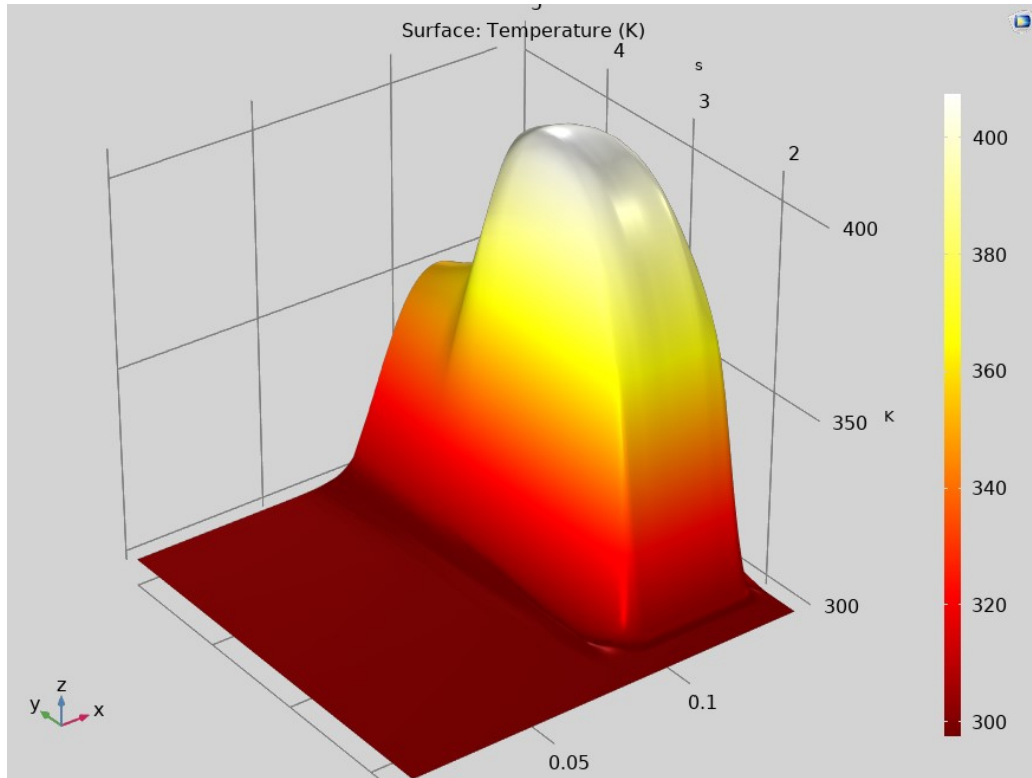


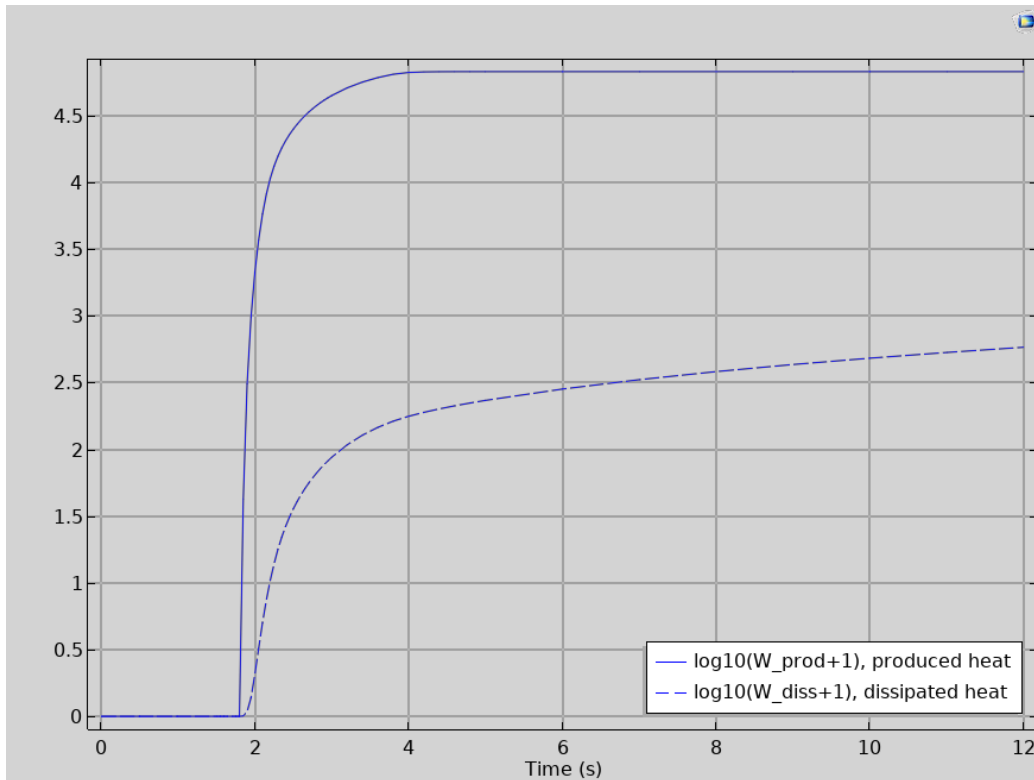
Figure V-6: La ligne radiale sondée dans le tracé de la température en fonction du temps de la Figure V-5



FigureV-7: Profil de température le long de la ligne indiquée sur la Figure V-5 à la surface du disque ($z = 0,013 \text{ m}$) en fonction du temps.

Pour étudier la quantité de chaleur générée qui est dissipée dans l'air, étudiez la surface intégrale de la chaleur produite et de la chaleur dissipée. Ces intégrales donnent la chaleur totale (W) pour la production de chaleur, Q_{prod} , et la dissipation de chaleur, Q_{diss} , en fonction du temps pour le disque de frein. Les intégrales temporelles de ces deux grandeurs, W_{prod} et W_{diss} , donnent la totale chaleur (J) respectivement produite et dissipée dans le disque de frein.

La figure V.8 montre un graphique de la chaleur totale produite et la chaleur dissipée en de fonction du temps. Huit secondes après que le conducteur a arrêté de freiner, une simple fraction de la chaleur produite s'est dissipée. En d'autres termes, dans Afin de refroidir suffisamment le système, le frein doit rester desserré pendant une longue période plus longue que ces huit secondes (100 secondes, en fait).



FigureV-8: Comparaison de la chaleur totale produite (trait plein) et de la chaleur dissipée (pointillés).

Les résultats de cette application peuvent nous aider à déterminer le degré d'abus, en termes de séquences de freinage spécifiques, une certaine conception de disque de frein peut tolérer avant la surchauffe. Cet est également possible de faire varier les paramètres affectant la dissipation thermique et d'étudier leur influence.

V.5 Les principales étapes pour la simulation numérique d'un frein à disque

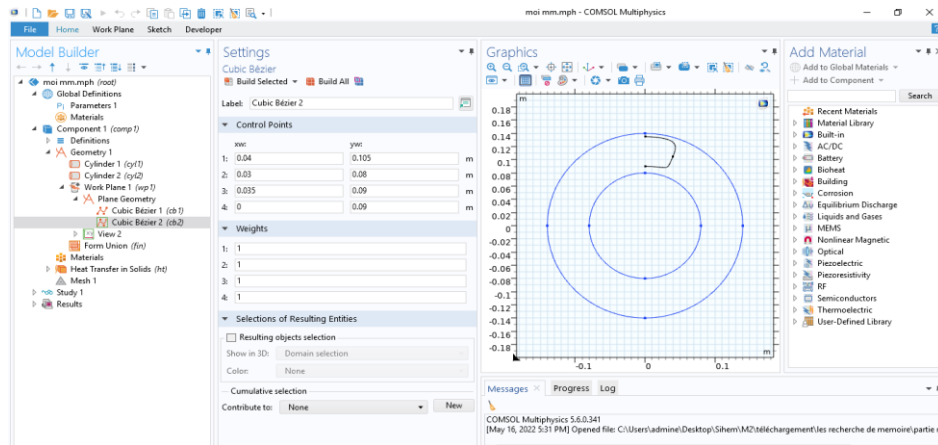


Figure V-9: Géométrie de modèle de plaquette de frein cubique bézier 2

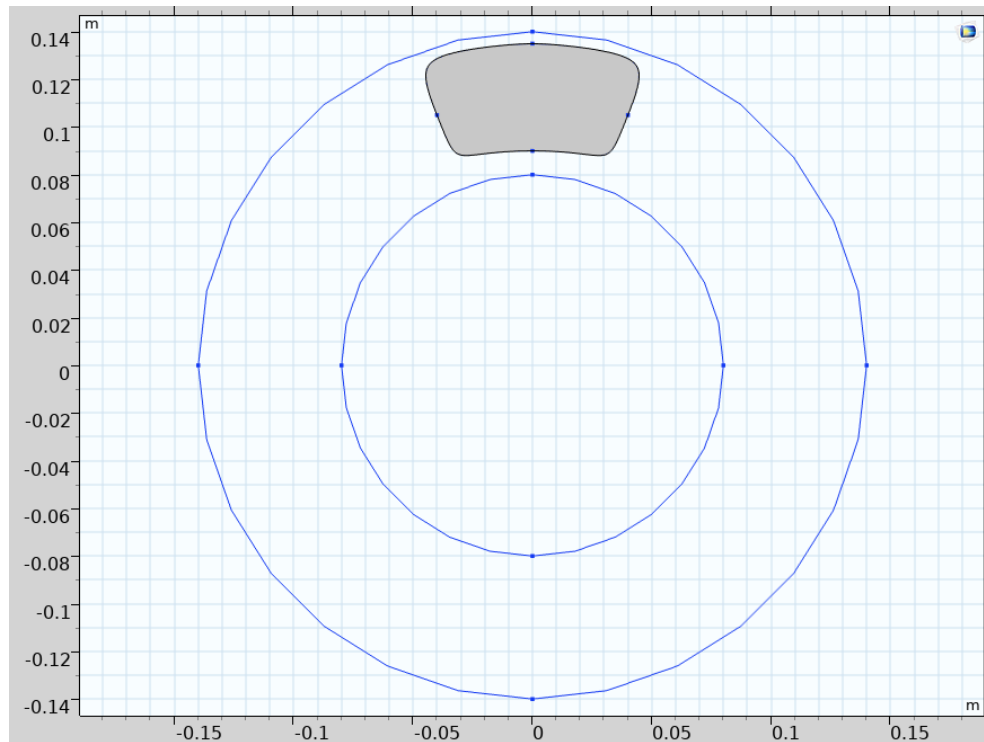


Figure V-10: Géométrie de modèle de plaquette de frein cubique bézier 4.

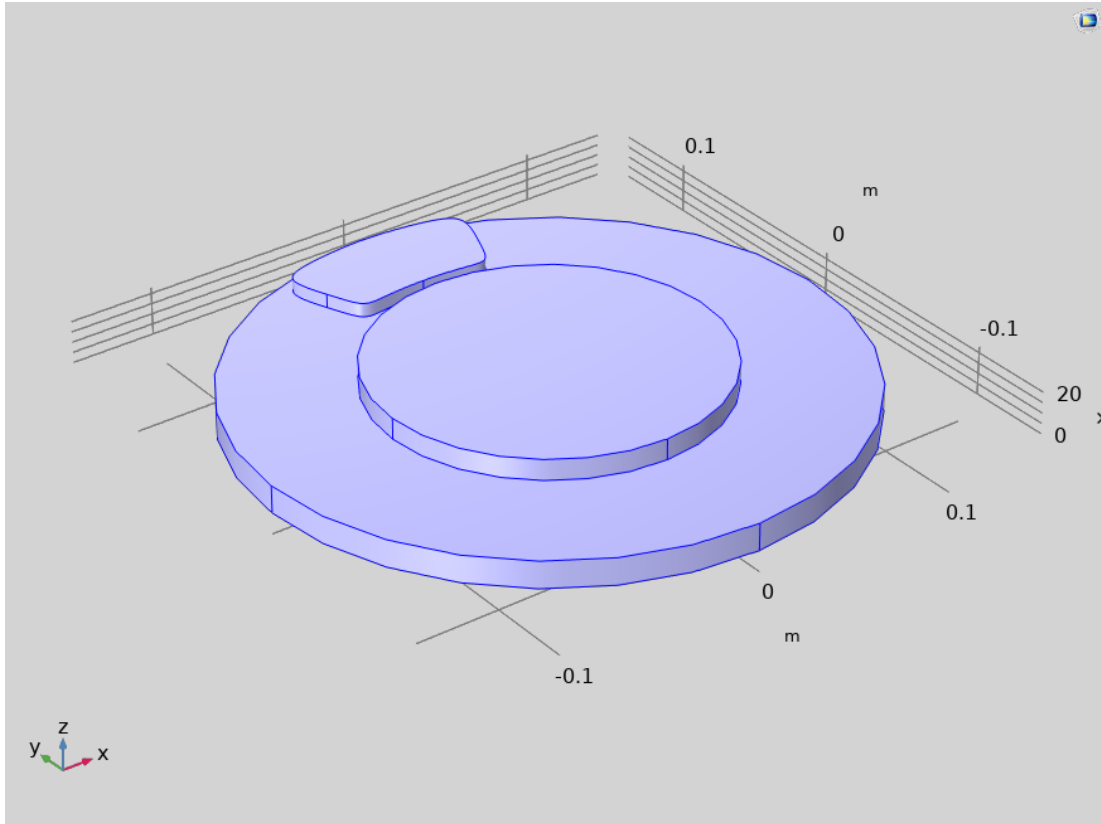


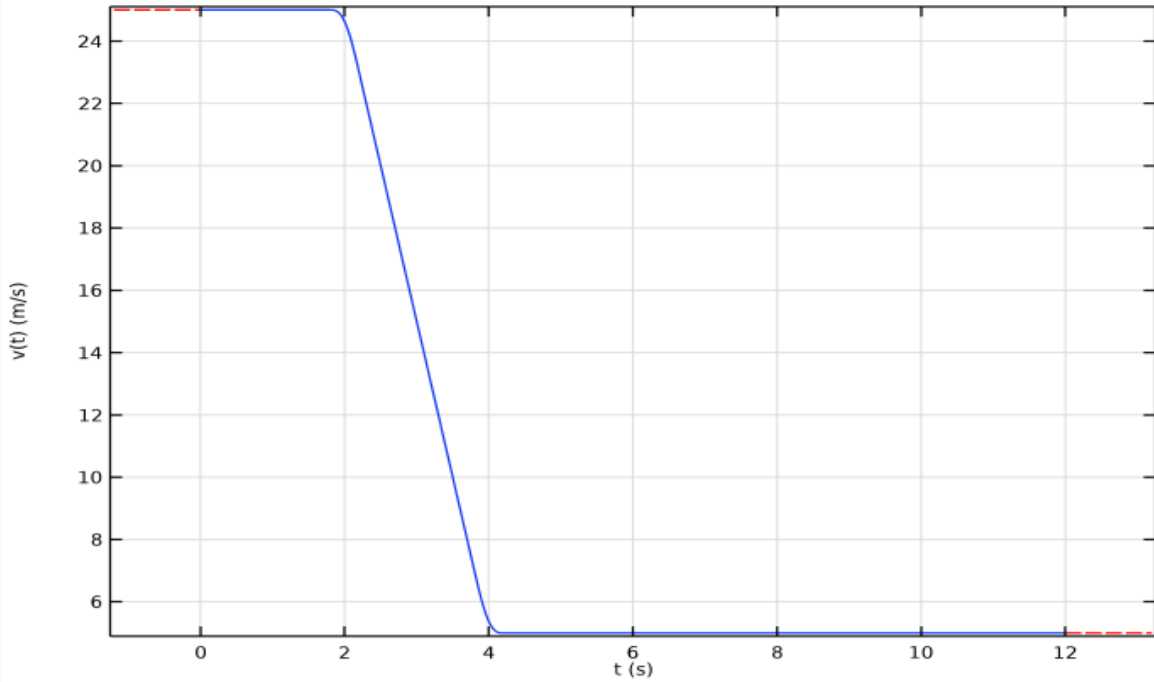
Figure V-11: Modèle d'un frein à disque

Ensuite, définissez quelques sélections de certaines limites. Vous les utiliserez lors de la définition des paramètres pour les couplages de composants, les conditions aux limites, etc. On voudra définir la vitesse et l'accélération de la voiture à travers ces deux éléments par morceaux et fonctions analytiques.

Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants :

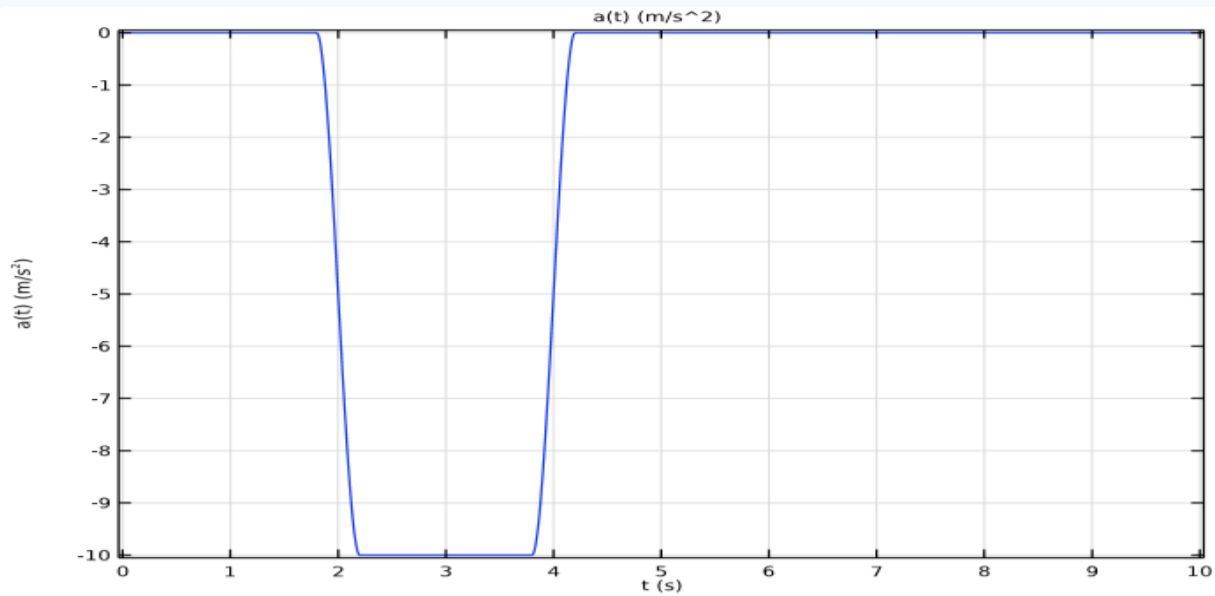
Début	La fin	Fonction
0	t_barke_start [1/s]	V_0 [1/s]
t_barke_start [1/s]	t_barke_end [1/s]	V_0 [s/m]+a*0(t[s]-t_barke_start)[s/m]
T_bake_end [1/s]	12	V_0 [s/m]+a*0(t_barke_end-t_barke_start)[s/m]

Tableau V-2 : L'intervalle et les valeurs de la fonction.



➤ Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants :

Argument	Limite inférieur	Limite extérieur
T	0	10



Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants :

Propriété	Variable	Valeur	Unité	Groupe de propriété
Densité	rho	7870	Kg/m ³	Basic
Capacité thermique constant à pression	cp	449	j/(kg/k)	Basic

Tableau V-3 : Propriété de conductivité et de densité.

Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants :

Propriétés	Variable	Valeur	Unités	Groupe de propriété
Conductivité thermique	K_ iso ;k _{ii} =	87	W/(m/k)	Basic
Densité	K_ iso ;k _{ii} =	0		
Capacité thermique	rho	2000	Kg/m ³	Basic
constant à pression cst	cp	935	j/ kg. k	Basic

Tableau V-4 : Les paramètres du matériau.

Spécifiez le vecteur **u_{trans}** comme

$-y \cdot v(t) / r_{wheel}$	X
$X \cdot v(t) / r_{wheel}$	y
0	z

Dans le tableau, saisissez les paramètres suivants :

Nom	F (u, ut, utt, t)(W)	La valeur initiale (u_0) (J)	La valeur initiale (u_t0)(W)	Description
W_prod	w. prod t intop 1(ht.tc1.Qb)	0	0	Chaleur produite
W.dissit	w.dissit +(intop 2 (ht.q0.ht.rflux)	0	0	Chaleur dissipé

Tableau V-5 : Les valeurs e chaleur dissipé et produite.

Ici, W_prodt (resp. W_disst) est la syntaxe COMSOL Multiphysics pour la dérivée temporelle de W_prod (resp. W_diss). Les quantités $intop1$ (ht.tc1.Qb) et $intop2$ (ht. q0+ht. rflux) correspondent à Q_prod et Q_diss . Le tableau définit ainsi le premier ordre

ODE correspondant à l'équation 1, de sorte que W_prod et W_diss hébergent les chaleurs dissipées. Les valeurs initiales découlent du réglage $t = 0$.

Un maillage (en anglais : mesh) est une structure de données géométriques permettant de représenter des subdivisions de surface à l'aide d'un ensemble de polygones. Les maillages sont particulièrement utilisés en infographie, pour représenter des surfaces, ou en modélisation, pour discrétiser un espace continu (par exemple pour la méthode des éléments finis ou la mécanique des fluides numérique).

Un maillage est constitué de sommets, connectés les uns aux autres par des faces ou facettes de forme polygonale. Lorsque toutes les faces sont des triangles, on parle de maillage triangulaire (trimesh), ou de triangulation selon les domaines. Les maillages par quadrilatères sont aussi très courants. En 3 dimensions, il est aussi possible d'utiliser des maillages volumiques, qui relient les sommets par des tétraèdres, des hexaèdres (cuboïdes) et des prismes. (« Maillage (structure de données) », 2021). Le type de maillage utilisé est le **triangulaire libre**.

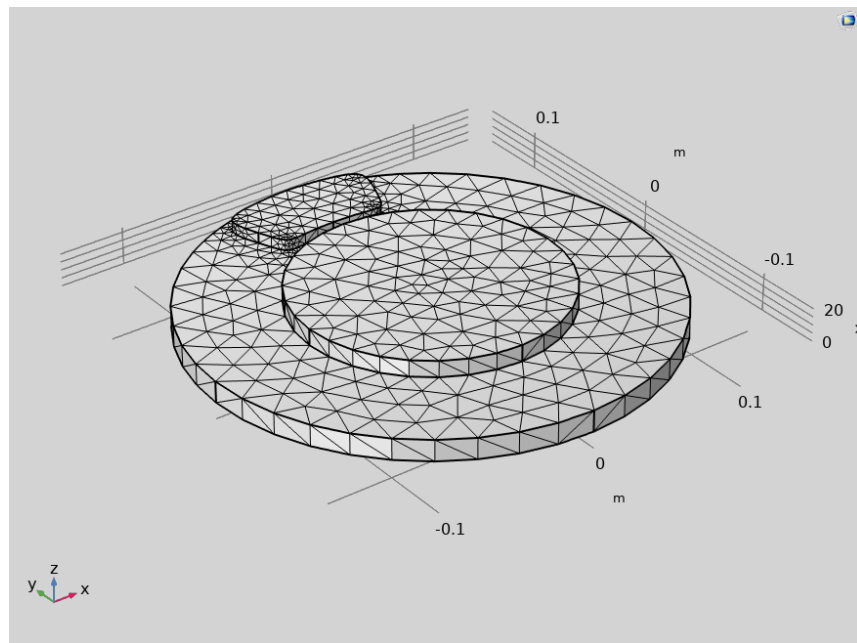


Figure V-12: Modèle de maillage d'un frein à disque

Légende
Log10 (W_prod+1), production de la chaleur
Log10 (W_diss+1) chaleur dissipée

V.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a remarqué que les températures et les surface dans disque de frein et les plaquettes varient avec le temps et la position. Les températures deviennent nettement plus basse uniforme entre le disque et le tampon.

Conclusion générale

Pour la raison de la sécurité des passagers, la construction optimale des disques de freins est actuellement l'objet de nombreuses études. Le frein à disque génère la chaleur et le contact disque-plaquette implique de nombreux phénomènes ; tels que l'élévation de la température ; l'usure des pièces et les vibrations.

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

Dans cette étude, on a travaillé sur la modalisation de la génération de chaleur et de transferts de chaleur dans un système de freinage à l'aide de logiciel COMSOL5.6 MULTYPHYSICS basé sur les méthodes des volumes finis pour analyser la génération de chaleur dans un frein à disque.

Dans la première partie dans ce travail, on a présenté une recherche bibliographique et des exemplaires sur des études précédentes de la modalisation de génération de chaleur de frein à disque avec des logiciels.

Dans la deuxième partie, on a présenté des généralités sur les freins à disque.

Dans la troisième partie de cette étude, on a discuté sur le transfert thermique et ces types (convection, conduction et rayonnement) et les équations de la génération de chaleur dans les coordonnées sphérique, cylindrique et plane.

Dans la quatrième partie de cette recherche, on a étudié le principe de fonctionnement d'un système de freinage (ABS, AFU et ESP) et ces types, les efforts du frottement exercés sur la voiture. Et la dernière partie de ce projet, nous avons créé un modèle de frein à disque sur logiciel COMSOL 5.6.

Par rapport aux perspectives, on trouve intéressant de réaliser aussi une étude expérimentale du disque de frein. Cela permettra d'avoir des résultats pratiques pour les comparer avec les résultats obtenus analytiquement et numériquement. Aussi, il pourrait être intéressant utile pour réaliser d'autres études comme par exemple l'étude thermique de cas des disques du frein percé. Pour finir, on constate que les freins à disque sont en développement remarquable et permanent avec plusieurs technologies, programmes et matériaux différents pour prolonger leur durée de vie afin d'éviter un mauvais freinage.

Références bibliographiques

- Aublin Michel & Debette Bernard. (1992). Systèmes mécaniques : Théorie et dimensionnement / Michel Aublin,... René Boncompain, Michel Boulaton... [Et al.] ; préface de Bernard Debette,... Dunod.
- Bashir, M., Qayoum, A., & Saleem, S. (2019). Analysis of frictional heating and thermal expansion in a disc brake using COMSOL. *Journal of Physics: Conference Series*, 1240(1), 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012094>
- Cours de Transfer de chaleur, (2021) (testimony of Mohamed BELHAMIANI).
- Belhocine, A. (2012). THERMOMECHANIQUE DES DISQUES DE FREIN Application du Code de Calcul ANSYS v11.0. PhD thesis, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- Benramdane, M., & Khadraoui, Y. (2009). Analyse de la contribution du transfert thermique des disques tournants (disque de frein) uniformément chauffés. *Revue des Energies Renouvelables*, 15.
- Cahier du CEPI N°09. (2000, décembre). Etude de positionnement stratégique de la branche « Composants automobiles mécaniques et leurs accessoires ».
- Carneiro, E. A., Winocq, L., & Berthaud, J. (1992). Disc brakes of trucks : A technical innovation for heavy vehicles. Warrendale SAE.
- CARRÉ, J.-J. (1993). Technologie du freinage Freins à disque. In *Techniques de l'ingénieur Fonctions et composants mécaniques: Vol. base documentaire : TIP152WEB*. (Numéro ref. article : b5574). Editions T.I. <https://doi.org/10.51257/a-v1-b5574>
- Carrión Solla, M., & Vela Villares, I. (2008). ETUDE THERMIQUE D'UN FREIN A DISQUE [Rapport de projet]. LABORATOIRE THERMIQUE INTERFACES ENVIRONNEMENT, Université Paris ex Nanterre.
- Chemical Engineering Volume 1—6th Edition. (1999). <https://www.elsevier.com/books/chemical-engineering-volume-1/chhabra/978-0-08-050101-7>
- Cherirou, A., & Boudab, S. (2015). Etude D'un Système De Frein À Disque [Memoire de Master]. Université Larbi Ben M'hidi.
- FAUQUERT, G., & LE PICHOURON, E. (2003). Modélisation et calculs sur un étrier de frein automobile. Projet CAO - Calculs Maîtrise IUP GMP option MPC.
- Frein. (2022). In Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Frein&oldid=192016645>

- Germund Dahlquist. (2021, octobre 21). wikimonde.com. https://wikimonde.com/article/Germund_Dahlquist
- GUICHARD, J. (1996). Freinage à très hautes performances—Exemple aéronautique. In *Techniques de l'ingénieur Systèmes aéronautiques et spatiaux: Vol. base documentaire : TIP603WEB*. (Numéro ref. article : b5580). Editions T.I. <https://doi.org/10.51257/a-v1-b5580>
- Heat Flux Formula : Meaning, Methods, Formulas, Examples. (2020, avril 22). Toppr-Guides. <https://www.toppr.com/guides/physics-formulas/heat-flux-formula/>
- Heat Transfer : Conduction, Convection, Radiation, Videos and Case Study. (2018, avril 19). Toppr-Guides. <https://www.toppr.com/guides/physics/thermal-properties-of-matter/heat-transfer/>
- Jimbo, Y., Mibe, T., Akiyama, K., Matsui, H., Yoshida, M., & Ozawa, A. (1990). Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disk Rotors. 900002. <https://doi.org/10.4271/900002>
- Kato, K., & Adachi, K. (2000). Wear mechanisms. In *Modern Tribology Handbook* (p. 273-300). CRC Press. <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=84983023721&partnerID=8YFLogxK>
- Kennedy, F. E., Jr., & Ling, F. F. (1974). A Thermal, Thermoelastic, and Wear Simulation of a High-Energy Sliding Contact Problem. *Journal of Lubrication Technology*, 96(3), 497-505. <https://doi.org/10.1115/1.3452024>
- Kim, S. S., Lee, S. H., & Lee, S. M. (1995). Thermomechanical wear mechanism of friction brake. pp.1567-1572.
- KOROLITSKI, J.-P. (2008). Brevet de technicien supérieur APRÈS-VENTE AUTOMOBILE (Enseignement supérieur, recherche et technologie Patent N° ESRS0757330A).
- Le Guide Complet du Système de Freinage. (2021, septembre 30). Infos code de la route. <https://codedelaroute.io/blog/systeme-de-freinage/>
- Maillage (structure de données). (2021). In Wikipédia. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Maillage_\(structure_de_donn%C3%A9es\)&oldid=187055794](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Maillage_(structure_de_donn%C3%A9es)&oldid=187055794)
- Matériau composite. (2022). In Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mat%C3%A9riau_composite&oldid=191640738
- Matériaux utilisés dans la conception de disques de freins. (2015, décembre 13). <https://www.fichier-pdf.fr/2015/09/13/disque-de-freins/>
- Mokaddem, A., & Mokaddem, Y. (2020). Simulation Numérique Du Comportement D'un Disque De Frein Sous L'effet De Température De Frottement [Mémoire de Master]. Université Saad Dahleb.

- Oschwald, M. (2004). Development of a Methodology for Design and Optimization of Multi-Material Objects for enhanced Thermal Behavior Application : Brake Disk Rotor. Mechanical Engineering Department College of Engineering & Science Clemson University South Caroline.
- Propagation de la chaleur. (s. d.). Consulté 10 juin 2022, à l'adresse <https://www.lyc-diderot.ac-aix-marseille.fr/eleves/cours/bts-tp-bat/propachaleur.htm>
- Rebbah, A. E. (2019). Etude, Conception et Simulation Sous-SOLIDWORKSd'un Système de freinage « frein-disque type ABS et EBD ». <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/8899>
- Rosen, B. W. (1965). Mechanics of composite strengthening.
- SCHMITT, E., & GAGNE, W. (2002). Etude sur le freinage automobile. Préparation à l'agrégation de mécanique.
- Singh, H. O., & Shergill, H. (2012). Thermal Analysis of Disc Brake Using Comsol. 2249-3255.
- TAHAR, S. (2018). Etude du comportement thermomécanique du contacte disque-plaquette de frein.
- Talati, F., & Jalalifar, S. (2009). Analysis of heat conduction in a disk brake system. Heat and Mass Transfer, 45(8), 1047-1059. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0476-y>
- Temperature Field. (s. d.). TheFreeDictionary.com. Consulté 18 juin 2022, à l'adresse <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Temperature+Field>
- Tirovic, M., & Day, A. J. (1991). Disc Brake Interface Pressure Distributions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 205(2), 137-146. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1991_205_162_02
- Zaid, M. A., Radzai, M. S., Ahmad, R., Mansor, M. R., Nurfaizey, A. H., & Afzanizam, M. M. R. (2009). An investigation of disc brake rotor by finite element analysis. J. Adv. Manuf. Technol., 3, 37-48.