REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA



Facult é de **T**echnologie

M émoire de fin d'études de Master

Fili ère : G énie m écanique
Sp écialit é : ing énierie des mat ériaux et des surfaces

Caract érisation des propri ét és m écaniques des disques de frein ventil és et plein pour usage des v éhicules

---

Pr ésent é par

- **MENACER Ibrahim**
- **HEDJRI M'hamed**

Dirig é par

Dr BELHADJ Abd-Elmoune ïm

Promotion : Juin 2019

Remerciements

Avant tout nous remercions ALLAH de nous avoir accordé des connaissances de la science et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements a nos familles pour tout l'aide, qu'elles nous ont apportées tout le long de nos études.

Nous tenons à remercier chaleureusement et respectueusement notre promoteur Mr BELHADJ Abd-Elmouneïm pour son aide et son soutien tout au long de notre projet.

Nous remercions aussi tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude, sans oublier d'adresser nos remerciements à tous les enseignants du département Génie mécanique notamment la spécialité ingénieur des matériaux et des surfaces

Nos vifs remerciements aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur et le plaisir d'accepter de juger notre travail.

Ibrahim et Mhamed

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont beaucoup soutenu, encouragé

et qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui ;

A mes frères ;

A toutes ma famille ;

A mes amies ;

Qu'Allah les garde…

الملخص:

تم تنظيم هذه الرسالة في ثلاثة فصول. يقدم الفصل الأول مفاهيم عامة حول أقراص الفرامل. مراجعة ببليوغرافية. الفصل الثاني يعرض مواد الدراسة وأساليب التوصيف الرئيسية المستخدمة. الفصل الثالث مخصص للنتائج التجريبية والمناقشات حول أقراص الفرامل وتوصيف شكل الجرافيت للحديد المصبوب من الجرافيت. يتم إيلاء اهتمام خاص بالمجهر بسبب المعلومات التي توفرها هذه التقنية حول الخصائص الهيكلية للجرافيت. أخيرًا ، يشير استنتاج عام إلى النتائج الرئيسية ويعرض وجهات النظر التي فتحتها هذه الدراسة.

الكلمات المفتاحية: قرص الفرامل المهواة، قرص الفرامل ممتلئة، حديد الزهر رمادي، منصات الفرامل، الاحتكاك، الخواص الميكانيكية، فحص المعادن.

Abstract :

This dissertation is organized in three chapters. The first chapter presents general notions about the brake discs. A bibliographic review. The second chapter presents the study materials and the main characterization techniques used. The third chapter is dedicated to the experimental results and discussions on the brake discs and the graphite shape characterization of lamellar graphite cast iron. Particular attention is given to microscopy because of the information that this technique brings about the structural characteristics of graphite. Finally, a general conclusion recalls the main results and presents the perspectives opened by this study.

Keywords :

Ventilated disc brake, Plain disc brake, Gray cast iron, Pads, Caliper, Constraints, Traction, Mechanical Properties, Metallographs.

Résumé:

Ce mémoire de thèse est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente des notions générales sur les disques de frein. Une revue bibliographique. Le deuxième chapitre présente les matériaux d'étude et les principales techniques de caractérisation employées. Le troisième chapitre est consacré aux résultats expérimental et discussions sur les disques de frein et la caractérisation de forme de graphite issu de fontes graphite lamellaire. Une attention particulière est accordée à la microscopie en raison des informations que cette technique apporte sur les caractéristiques structurales du graphite. Finalement, une conclusion générale rappelle les principaux résultats et présente les perspectives ouvertes par cette étude.

Mots clés : Disque de frein ventilé, Disque de frein plein, Fonte grise, plaquettes, Etrier, Contraintes, Traction, Propriétés mécanique, Métallographies.

Sommaire

Sommaire

Remerciement……...

Dédicace……

Sommaire……..

Résumé…….

Introduction Générale……1

Chapitre I : Généralités sur les disques de frein

I.1 Introduction 3

I.2 Structure Générale d'un système de freinage 3

I.2.1 Définition.....3

I.2.2 Fonction Globale 4

I.3 Les Technologies principales qui sont utilisées pour le freinage 5

I.3.1 Le frein à tambour 5

I.3.2 Le frein à disque: 6

I.4 Freinage et transfert de chaleur 15

I.4.1 Définition.....15

I.4.2 Champ de température.....15

I.4.3 Gradient de température 15

I.4.4 Flux de chaleur et la densité de chaleur.....16

I.4.5 Les Modes de transfert de chaleur.....17

I.5 Conclusion.....20

Chapitre II: Matériaux et Techniques exprimentales

II.1 Introduction 21

II.2 Matières utilisées 21

II.2.1 Mise en forme des échantillons pour fabriquer les éprouvettes 22

II.3 Caractérisation des propriétés mécaniques de disque de frein 26

II.3.1 Traction 26

II.3.2 La dureté 28

II.4 Caractérisation microstructurale et micrographique 30

II.5 Balance 31

II.6 Préparation de l'examen micrographique 34

II.6.1 Prélèvement de l'échantillon 34

II.6.2 Préparation de la surface à examiner 36

II.7 Examen micrographique 38

II.7.1 Microscope utilisé 39

Chapitre III: Résultats et discussions

III.1 Introduction 41

III.2 Les caractéristiques mécaniques 41

III.2.1 Les résultats des essais de dureté 41

III.2.2 Les résultats d'essai de traction 41

III.3 Les résultants Microstructure et cristallographie Avant l'attaque chimique 43

III.4 Le graphite 46

III.4.1 Le graphite dans la fonte graphite lamellaire 47

III.5 Résultats de l'essai de carbone et du soufre 48

Conclusion Générale 51

Liste des Figures

Chapitre I

Figure 1 : Schéma d'implantation du système de freinage.....3

Figure 2: Schéma du système de freinage. 4

Figure 3 : schéma de la fonction globale du système de freinage. 4

Figure 4 : Illustration d'un frein à tambour. 5

Figure 5 : Fonctionnement d'un frein à tambour, au repos (a) et lors du freinage (b) 6

Figure 6 : Illustration d'un frein à disque ventilé. 7

Figure 7 : Fonctionnement d'un frein à disque, au repos (a) et lors du freinage (b) 7

Figure 8 : Schéma explicatif d'un système de frein à disque. 8

Figure 9 : Comparaison des technologies d'étrier fixe (a) et flottant (b) 9

Figure 10 : Illustration d'un disque de frein plein 10

Figure 11 : Le disque plein. 10

Figure 12 : Le disque percé, ventilé 11

Figure 13 : Le disque en carbone.....11

Figure 14 : Exemple domaine utilisation de disque de frein a carbone –formule 1-.....12

Figure 15 : Disque rainuré.....13

Figure 16 : Disque percé.....13

Figure 17 : Disque ventilé. 14

Figure 18 : Différentes technologies de ventilation des disques schématisées sur une portion de disque de 30 14

Figure 19 : Gradient de température.....16

Figure 20 : Loi de Fourier.....17

Figure 21 : Définition d'un élément de surface d'échange 18

Figure 22 : Elément en rayonnement.....19

Chapitre II

Figure 23 : Photographie de disque de frein plein qui a servi à notre étude 21

Figure 24 : Photographie de disque de frein ventilé qui a servi à la présente étude.....22

Figure 25 : Prise de vue des deux différents types de disque freins (plein / ventilé) employés pour le présent travail 22

Figure 26 : L'éprouvette de traction en FGL20 23

Figure 27 : Photo du montage d'une éprouvette dans la machine du Tour 24

Figure 28 : Tour type 16K20F3C35 « Photo de Tour » 24

Figure 29 : Les barreaux de FGL20 24

Figure 30 : Les étapes de tournage l'éprouvette de FGL20 25

Figure 31 : Vérification des mesures des éprouvettes de traction uniaxiale 26

Figure 32 : Machine de traction type Z-40 utilisée. 27

Figure 33 : Capteur d'extensomètre 28

Figure 34 : Photographie de l'essai Brinell 30

Figure 35 : Machine de fraiseuse 31

Figure 36 : les grains de disque de freins 31

Figure 37 : Prise de vue de la balance utilisée 32

Figure 38 : Machine ultra Modèle CS 100/1000 RF Carbone Sulfer Analyse 33

Figure 39 : La machine polissage (tank) Metasinex Lux - Automatisation des équipements de découpe métallographique 36

Figure 40 : Dégrossissage des échantillons 37

Figure 41 : La machine polissage (touret) 38

Figure 42 : La Pâte d'alumine 38

Figure 43 : Microscope optique type Neophot 2 40

Chapitre III

Figure 44 : Courbe représentative des propriétés mécaniques du matériau déduite de l'essai de traction unixiale 42

Figure 45 : Six images-type représentent les principales formes de graphite selon la norme NF A 32-100. 43

Figure 46 : Classification du graphite lamellaire en fonction de sa taille et sa distribution selon la norme ASTM-A-247 44

Figure 47 : Aspect microstructure de disque de Frein ventilé observée à l'aide d'un microscope optique dont le grossissement est X100 45

Figure 48 : Aspect microstructure de disque de frein plein observée à l'aide d'un microscope optique dont le grossissement est X100 45

Figure 49 : Observation au microscope optique de différent disque de freins après polissage et attaque chimique. 46

Figure 50 : Structure du graphite hexagona 47

Figure 51 : Précipités de graphite lamellaire et eutectique fin (a) et attaque profonde montrant le réseau interconnecté de lamelles (b) 48

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau 1 : Les dimensions de L'éprouvette de traction en FGL20 23

Tableau 2 : Les réactifs correspondant pour chaque matériau étude..... 39

Chapitre III

Tableau 3 : Résultant de la dureté Brinell 41

Tableau 4 : représente forme de graphite 45

Introduction Générale

Avec le développement de nouvelles technologies dans l'industrie automobile, les véhicules sont devenus de plus en plus performants. Les systèmes de freinage qui a pour rôle de réduire la vitesse ou d'immobiliser le véhicule 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'ajoutent 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 ou des endommagements qui peuvent entrainer l'inefficacité dans le cas du système de freinage .Par exemple, le frottement dans le système de freinage génère de la chaleur dans le disque laquelle peut engendrer des variations des propriétés mécaniques des matériaux de ses organes pouvant résulter en des déformations, vibrations et ruptures (usures et fissures) inacceptables.

Le disque de frein automobile (objet de l'étude) peut subir des dégradations (usures, fissures déformations) 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). En raison de la complexité du système, les modélisations numériques ne sont envisageables que si on se base sur des hypothèses simplificatrices. L'hypothèse d'axisymétrie est communément adoptée ce qui implique que la rotation du disque et les phénomènes tridimensionnels seront négligés. Ces simplifications ne permettent qu'une prédiction quantitative approximative de la réponse thermomécanique du disque.

L'objectif de notre travail est de présenter une caractérisation des propriétés mécanique des disques de freins ventilés et pleins (essence et diesel) pour usage des véhicules.

Ce travail qui constitue le thème du projet de fin d'études, adoptant le principe de superposition, les contraintes générées par ces efforts, ensuite à déterminer et à ajouter les contraintes thermiques qui résultant du dégagement de chaleur à contrôler afin de ne pas atteindre les températures critiques à éviter, d'où la nécessité d'imaginer une géométrie favorable au refroidissement des pièces en contact.

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

Le chapitre I présente une étude bibliographique fondée sur les disques de frein, la composition et les matériaux utilisés, ainsi que les différents phénomènes thermiques et mécaniques rencontrés.

Le chapitre II présente la description des méthodes et des moyens expérimentaux utilisés durant notre travail.

Le chapitre III présente les résultats obtenus par des différentes techniques appliquées sur les types de disque de frein qui ont servi à l'étude.

Chapitre I:

Généralités sur les disques de freins

I.1 Introduction

Grâce aux continuels 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. Et comme le frein est un organe important 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 (grenaillage, 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.

I.2 Structure Générale d'un système de freinage

I.2.1 Définition

Nous entends par système de freinage, l'ensemble des éléments permettant de ralentir ou de stopper le véhicule suivant le besoin du conducteur.

La structure ci-dessous (Figure 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.

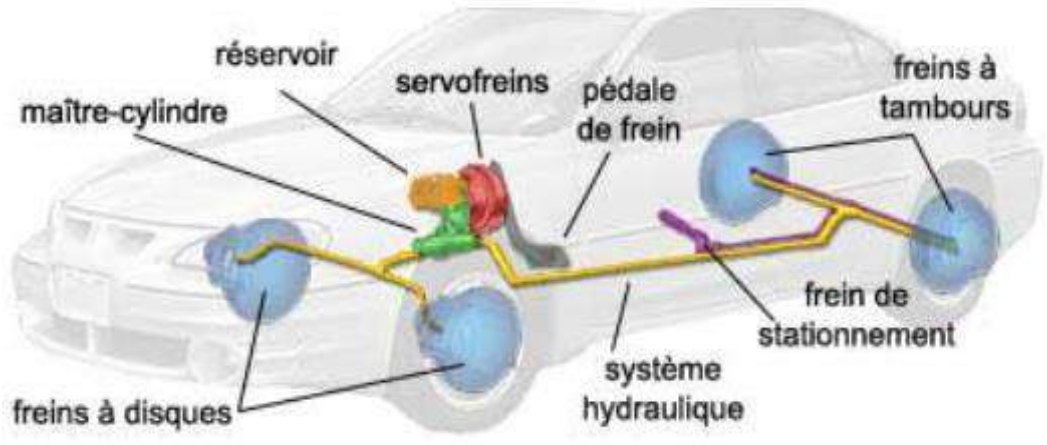


Figure 1 : Schéma d'implantation du système de freinage **[1]**

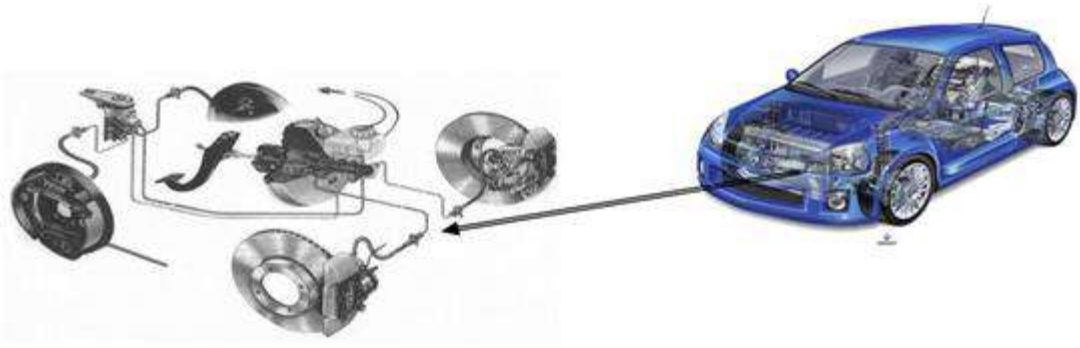


Figure 2: Schéma du système de freinage **[1]**

Dans un système de freinage, nous distinguons deux parties:

- La partie commande
- La partie opérative sur les quelles nous allons les écrires par la suite.

I.2.2 Fonction Globale

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.

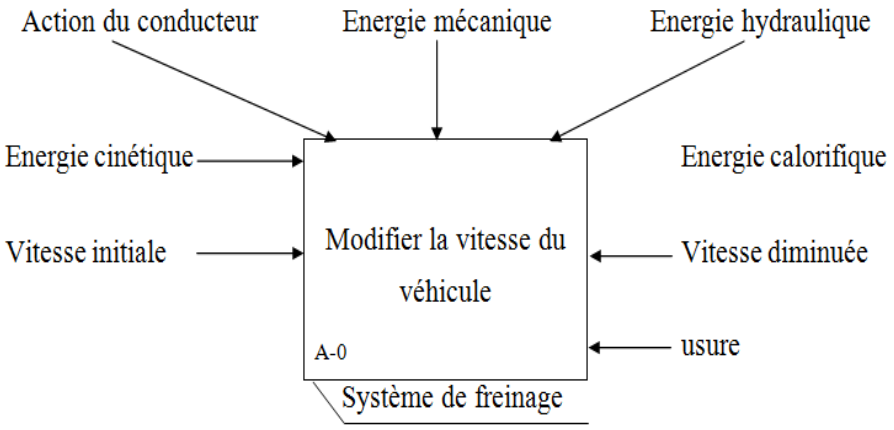


Figure 3 : schéma de la fonction globale du système de freinage.

I.3 Les Technologies principales qui sont utilisées pour le freinage

Nous comptons aujourd'hui deux technologies principales qui sont utilisées pour le freinage automobile, à savoir:

- Les freins à tambour,
- Les freins à disque.

Les principales technologies et leurs mécanismes sont détaillés dans les sections suivantes :

I.3.1 Le frein à tambour

I.3.1.1 Définition

Cette technologie a été utilisée majoritairement sur les véhicules jusqu'à l'arrivée des freins à disque. Cela dit, son faible coût lui permet d'être toujours utilisée sur l'essieu arrière des véhicules, notamment en tant que frein de stationnement. Une illustration de ce type de système est présentée à la **(figure 4)** :



Figure 4 : Illustration d'un frein à tambour **[2]**

I.3.1.2 Fonctionnement

Le tambour est entrainé par la rotation de la roue. Les mâchoires, situées à l'intérieur de ce tambour, sont liées par un ressort de rappel qui les empêche, quand le conducteur n'appuie pas sur la commande de freinage, d'entrer en contact avec le tambour **(figure 5 (a))**. Ces mâchoires sont recouvertes d'une garniture composée d'un matériau de friction. Une fois que le frein est actionné, le piston vient pousser les mâchoires qui pivotent et entrent ainsi en contact avec le tambour en rotation, ce qui a pour action de ralentir le véhicule **(figure 5(b))**. C'est le ressort de rappel qui, en fin de freinage, permet d'éviter le blocage des roues en décollant les mâchoires du tambour.

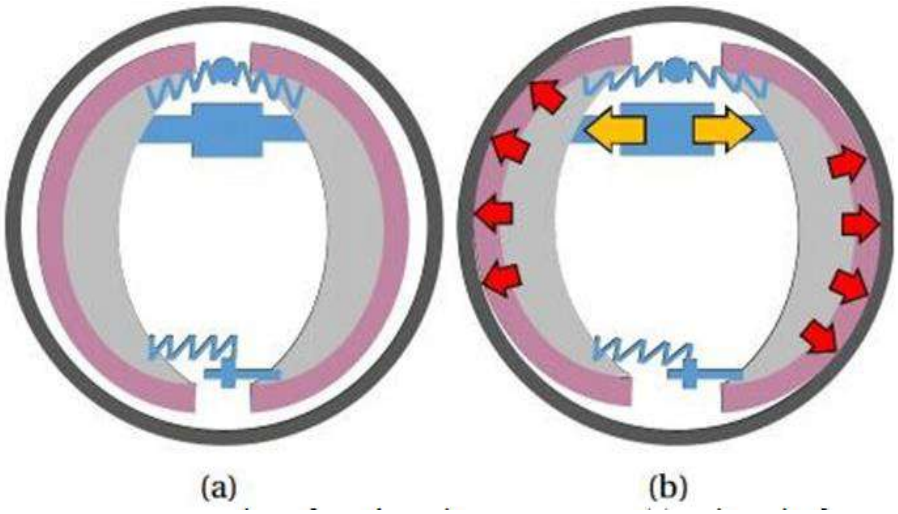


Figure 5 : Fonctionnement d'un frein à tambour, au repos (a) et lors du freinage (b)

I.3.2 Le frein à disque:

I.3.2.1 Historique:

Le frein à disque est environ aussi ancien que les véhicules à roues motorisés. Il est d'ailleurs particulièrement proche du frein à patin des vélos. Seul le manque de fiabilité dû aux fortes contraintes imposées aux matériaux du dispositif a freiné son utilisation massive. Sur les motocyclettes, son utilisation a été rare jusqu'à la Honda CB 750 Four de 1969, qui a imposé le disque à commande hydraulique. Ce même type de freinage a rapidement été repris sur les machines de compétition. Il s'est peaufiné en se perforant et en devenant double (à l'avant).

Dans le domaine automobile, les freins à disques ont commencé à se généraliser dans les années 60 sur les véhicules haut de gamme, avant de s'étendre à l'ensemble des véhicules sur le train avant. En 2005, seules les petites automobiles utilisent toujours les freins à tambours sur l'essieu arrière. La première voiture à adopter les freins à disques à l'avant de série fut la Citroën DS en 1955. En aviation, ce type de frein, plus léger, plus facile d'entretien que les autres dispositifs, dans un domaine où les coûts sont accessoires, est utilisé depuis plus longtemps. En 2003, Mercedes Benz innove en proposant des disques de freins en céramique **[3]**.

En comparaison aux freins à tambours, les freins à disque freinent plus efficacement, refroidissent plus vite et présentent des propriétés autonettoyantes, du fait des forces centrifuges mises en jeu. Ces nombreux avantages leur ont permis de s'imposer comme la référence des systèmes de freinage équipant l'essieu avant des automobiles. Une illustration de ce type est présentée à la **(figure 6)**.



Figure 6 : Illustration d'un frein à disque ventilé.

I.3.2.2 Fonctionnement

Le système se compose d'un disque solidaire de la roue qui est donc mis en rotation quand le véhicule se déplace. Un jeu de plaquettes est placé de part et d'autre de ce disque. On nomme plaquette intérieure celle qui est placée côté véhicule et plaquette extérieure celle du côté roue **(figure 7 (a))**.

Ces plaquettes .sont maintenues dans l'étrier et peuvent translater de manière normale à la surface du disque sous l'action d'un ou plusieurs pistons. Elles viennent alors, au cours d'une opération de freinage, pincer le disque et ralentir sa rotation jusqu'à stopper le véhicule **(figure 7(b)) [4]**.

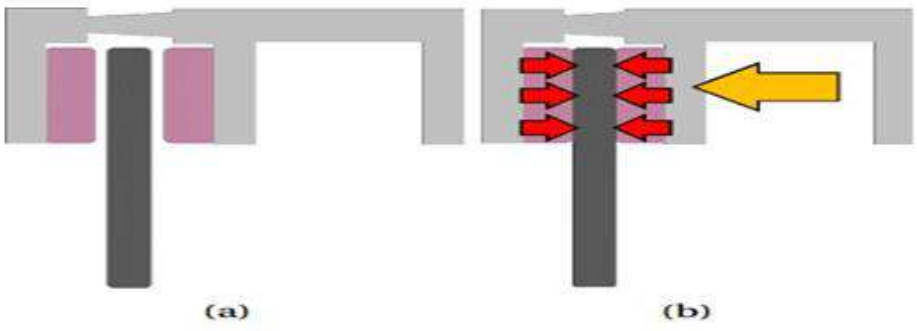


Figure 7 : Fonctionnement d'un frein à disque, au repos (a) et lors du freinage (b)

I.3.2.3 Avantages / Inconvenients

Comparé au frein à tambour, le frein à disque a l'avantage d'être plus progressif car il n'est pas auto serrant. Par contre, il nécessite une plus grande pression pour être efficace, la pression du conducteur est transmise par un dispositif hydraulique fréquemment assisté (c'est pourquoi la commande en est rarement mécanique, car il est malcommode d'obtenir une démultiplication suffisante par un dispositif de leviers).

I.3.2.4 Les Composant d'un frein 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 8)** :

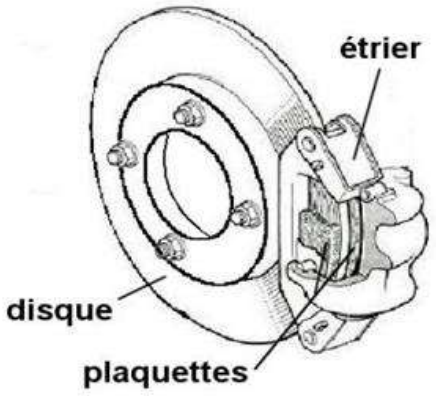


Figure 8 : Schéma explicatif d'un système de frein à disque.

I.3.2.4.1 Etrier

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

- **Les Étrier (fixe vs flottant)**

L'étrier est la pièce du système de freinage qui contient les plaquettes et vient les mettre en mouvement à l'aide d'un ou plusieurs pistons. Deux technologies sont aujourd'hui utilisées pour cette pièce en fonction de la performance de freinage recherchée: l'étrier fixe et l'étrier flottant.

- **Étrier fixe**

Un étrier fixe se compose au minimum de deux pistons alors qu'il n'en faut qu'un pour un étrier flottant. Pour un étrier fixe, un piston est placé de chaque côté du disque, au dos de chacune des plaquettes, intérieure comme extérieure. Lorsque le conducteur freine, chaque piston pousse alors la plaquette qui lui est associée contre la surface du disque en rotation. L'étrier est lui fixe et ne sert que de guide à la translation du piston et des plaquettes.

- **Étrier flottant**

Dans le cas de l'étrier flottant, un seul piston est nécessaire du côté intérieur du système. La plaquette extérieure est alors plaquée contre le disque par le coulissement de l'étrier dans un porte étrier. Quand la pression est appliquée, le piston avance et vient pousser la plaquette intérieure contre le disque. Quand la plaquette intérieure est en contact avec le disque, l'effort

de réaction appliqué à l'étrier le fait coulisser dans la direction opposée au mouvement de la plaquette, de sorte qu'il vient également déplacer la plaquette extérieure contre le disque. Cette conception a l'avantage d'être plus légère et moins coûteuse, ce qui en fait la solution la plus répandue dans l'industrie automobile.

En effet, les véhicules nécessitent un freinage de haute performance. Notamment, en sport automobile, sont eux équipés de systèmes à étrier fixe possédant plusieurs pistons par plaquettes **[4]**.

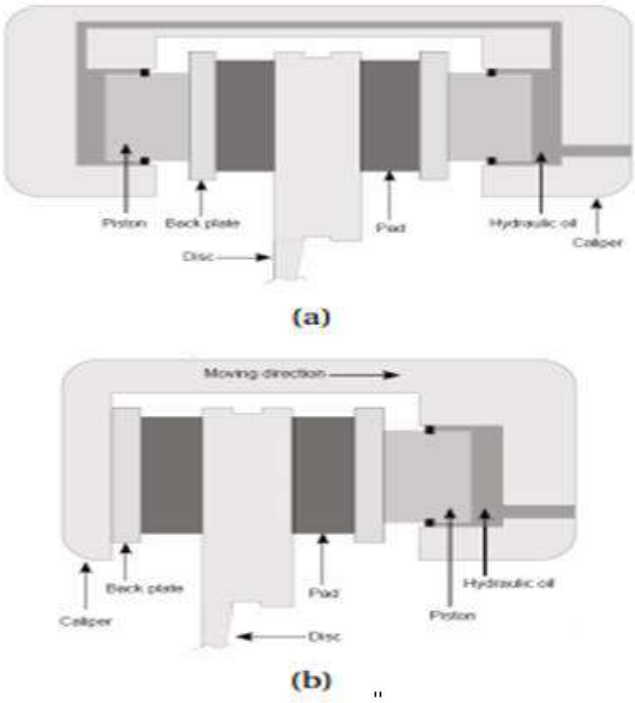


Figure 9 : Comparaison des technologies d'étrier fixe (a) et flottant (b)

I.3.2.4.2 Le disque

Le disque est constitué d'un anneau plein avec deux pistes de frottement **(Figure 10)**, 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 **[5]**.

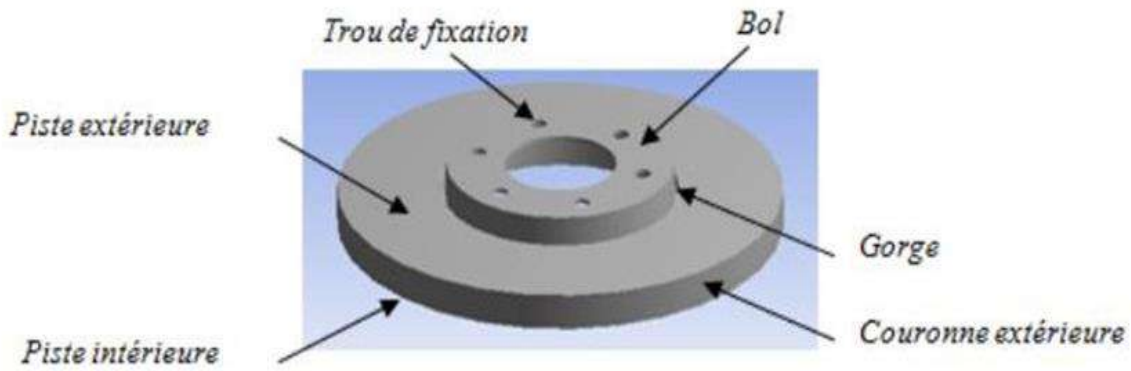


Figure 10 : Illustration d'un disque de frein plein

- **Les différents Types de disque frein**

Le disque, solidaire de l'axe de roue, tourne à la même vitesse que celle-ci. Plus la quantité d'énergie cinétique convertie en chaleur sera élevée, plus le freinage sera efficace. Cependant, il ne faut pas que l'échauffement des pièces du système dû à cette dissipation d'énergie ne vienne influer sur les performances du freinage. On trouve donc dans la conception des disques de nombreuses solutions pour dissiper cette chaleur. L'introduction d'une cloche de montage permet d'augmenter la surface globale du disque ce qui facilite le refroidissement **[5]**.

a) Le disque plein (Le plus courant)



Figure 11 : Le disque plein.

b) Le disque percé, ventilé (il est utilisé sur des véhicules de sport et en compétition)

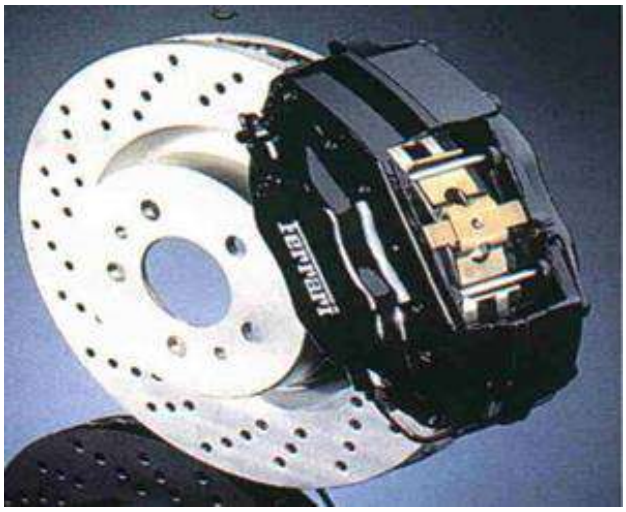


Figure 12 : Le disque percé, ventilé

c) Le disque en carbone: (il est utilisé en Formule 1 et pour des véhicules de prestige)

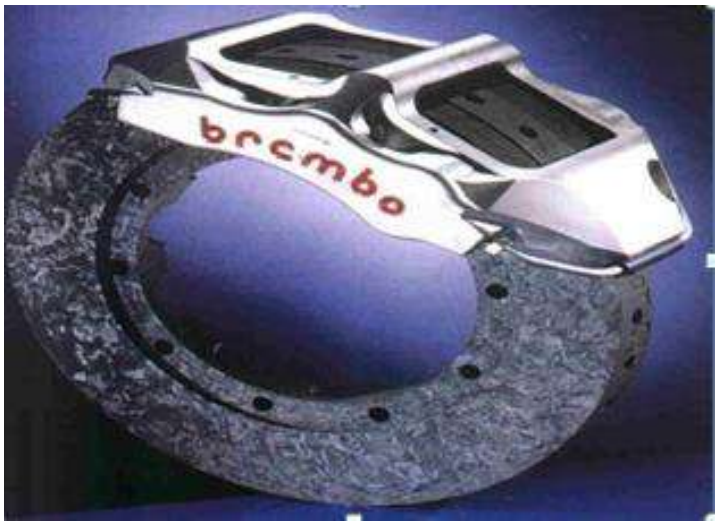


Figure 13 : Le disque en carbone

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, Compose d'un renforcement de carbone et d'une matrice carbone, ont été développés dans un premier temps pour une application dans le domaine aéronautique.

Les disques en carbone sont dotés des propriétés suivantes :

- Un coefficient de frottement exceptionnel quelle que soit la température.
- Ils possèdent une grande stabilité physico-chimique, même à des températures supérieures à 1000 °C.
- Ils ne sont pas sensibles aux chocs thermiques (dilatation négligeable) ou à la fatigue mécanique.
- Ils sont invulnérables à l'oxydation jusqu'à 500°C. Une couche 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.
- L'extension de cette technologie à toute forme de freinage en conditions extrêmes (freinage intensif ou répétitif) est rendu possible et ce par la fabrication d'unité complète (disques + plaquettes) en carbone dont les principales caractéristiques sont les suivantes :
- Un niveau de performance constant qu'il fasse chaud ou froid aussi bien à grande vitesse qu'à faible vitesse.
- Une sécurité assurée lors de freinages répétitifs ou à très haute vitesse.
- Des économies de poids non négligeable par rapport aux disques traditionnels.



Figure 14 : Exemple domaine utilisation de disque de frein a carbone –formule 1-

d) Les disques rainurés



Figure 15 : Disque rainuré

e) Les disques percés



Figure 16 : Disque percé

f) Le disque ventilé

Il permet de mieux dissiper la chaleur de plus, il existe désormais des disques appelés ventilés dont différentes configurations sont présentées à la **(figure 16)** La piste de frottement n'est plus une pièce volumique pleine, elle est creusée de nombreux canaux qui, avec la rotation, facilitent l'écoulement d'air permettant le refroidissement du disque. Les disques sont majoritairement faits en fonte grise, ce qui leur confère une très bonne tenue à l'usure. On trouve certaines applications spécifiques de disque en carbone, notamment pour la compétition automobile. Cependant, leur performance n'est observée que pour de très hautes températures, causées par d'importantes puissances de freinage. Cela ne représente donc pas les cas d'application les plus communs dans l'industrie automobile **[4]**.

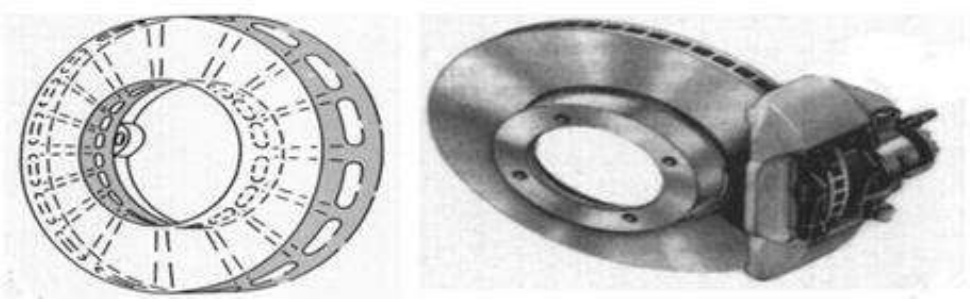


Figure 17 : Disque ventilé

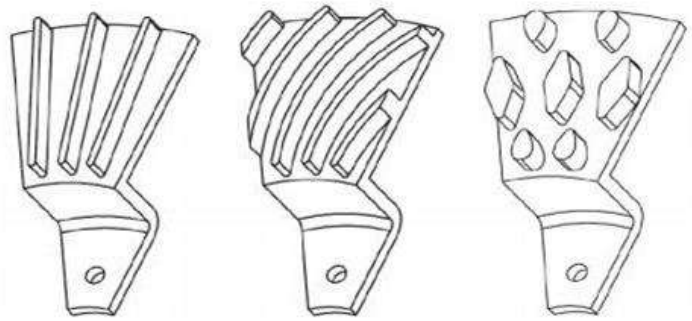


Figure 18 : Différentes technologies de ventilation des disques schématisées sur une portion de disque de 30

Conditions d'utilisation

De façon à fonctionner avec le meilleur rendement et durer le plus longtemps possible, les températures des disques doivent être correctes et équilibrées.

En général, les disques d'un véhicule devraient tous fonctionner à des températures identiques.

La température maximale du disque doit être accordée avec la qualité des plaquettes utilisées. Les faces du disque ne doivent pas dépasser les températures maximales recommandées pour chaque type de plaquette.

Selon la température atteinte, les disques doivent être refroidis ou non.

Afin de favoriser le refroidissement du disque on usine le disque. Outre les disques ventilés classiques présents sur les modèles de tourisme, les disques de compétition haute performances sont percés afin d'améliorer leur refroidissement et d'augmenter la vitesse de mise en température des plaquettes. Ils sont également rainurés de façon spécifique pour un nettoyage constant des plaquettes et un grip immédiat par temps de pluie.

I.4 Freinage et transfert de chaleur

Les phénomènes de freinage montrent que la contrainte principale est due à variations de température induites par le frottement entre les plaquettes et le disque. Celles-ci variations brusques ne permettaient pas l'homogénéisation de la température, ces variations créer un gros problème dans le disque et les plaquettes, et aussi ce problème est appelé par le Phénomènes de fatigue thermique.

I.4.1 Définition

- **La chaleur:** c'est une forme d'énergie qui correspond à l'échelle microscopique à l'agitation des particules (énergie cinétique des électrons et atomes).
- **La température:** c'est un moyen de quantifier cette agitation. Il y a une relation entre quantité de chaleur et température. Les notions de quantité de chaleur et de température sont définies par la thermodynamique dans ses principes mêmes :

1ère principe: L'énergie ne peut être ni créée, ni détruite, elle peut seulement se transformer d'une forme à une autre.

2ème principe: La chaleur se propage du système le plus chaud vers le système le plus froid spontanément (tendance à l'uniformisation des températures) **[6]**.

I.4.2 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température: T= f(x, y, z, t). La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. On distingue deux cas **[7]**:

- 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 un stationnaire.

I.4.3 Gradient de température

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

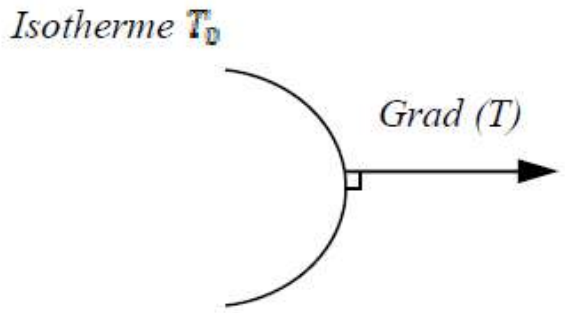


Figure 19 : Gradient de température

$$\overrightarrow{grade(T)} = \vec{n}\frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{……Équation 1}$$

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

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

I.4.4 Flux de chaleur et la densité de chaleur

Un flux de chaleur est une quantité d'énergie transférée sous forme de chaleur par unité de temps. C'est donc une puissance, qui s'exprime en W (J/S)

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad \text{……...Équation 2}$$

En général, le flux échangé à travers une surface n'est pas uniforme sur toute la surface. On définit alors une densité de flux de chaleur ϕ, qui correspond à un flux de chaleur par unité de surface en (Wm^{-2}).

$$\phi = \frac{1}{S}\frac{dQ}{dt} \quad \text{……...Équation 3}$$

I.4.5 Les Modes de transfert de chaleur

I.4.5.1 Conduction

Est spécifique aux solides (bois, métaux, etc.), elle est un transfert direct au sein d'un milieu matériel, qui se fait par propagation de proche en proche de la chaleur. Le mouvement d'agitation thermique (flux de chaleur) va toujours des zones chaudes vers les zones froides.les mauvais conducteurs (gaz, laine de verre ou polystyrène) sont appelés isolants **[8]**.

Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier :

$$\vec{\varphi} = \overrightarrow{kgradt} \quad \text{.....Équation 4}$$

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

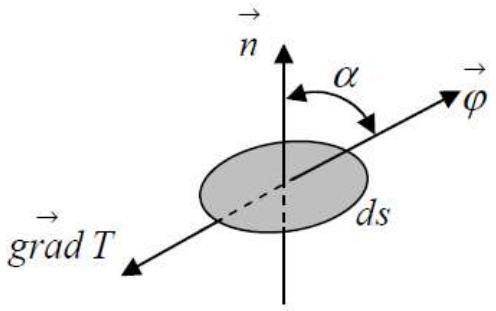


Figure 20 : Loi de Fourier

I.4.5.2 Les régimes permanents

Ce sont les régimes pour lesquels la température en tout point du milieu est indépendante du temps, le déséquilibre est entretenu par les sources de chaleur **[9]**.

$$\Delta T(M) = -\frac{P(M)}{\lambda} \quad \text{.....Équation 5}$$

Il s'agit de résoudre le système d'équations linéaire.

$$(\lambda \frac{\partial T}{\partial n_i} + n_i T)_{S_i} = f_i(M_i) \quad \text{.....Équation 6}$$

S_i Représente la surface de la frontière extérieure, i est l'indice qui peut prendre une valeur maximale égale à 6.

I.4.5.3 Les régimes transitoires

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

Les régimes transitoires ne doivent pas être confondus avec les régimes variables pour lesquels les sources évoluent au cours du temps **[9]**.

$$\Delta T(M)) \frac{1\partial T}{a\partial t} = -\frac{P(M)}{\lambda} \quad \text{.....Équation 7}$$

Le champ de température est régi par le système d'équation

$$(\lambda \frac{\partial T}{\partial n_i} + n_i T) = f_i(M_i) \quad \text{.....Équation 8}$$

$$T(M \cdot 0) = F(M) \quad \text{.....Équation 9}$$

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

I.4.5.4 Convection

La convection est un transfert de chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert ne concerne donc que les fluides ou les échanges entre un solide et un fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton **[9]**:

$$\varphi = hS(T_p - T_\infty) \quad \text{.....Équation 10}$$

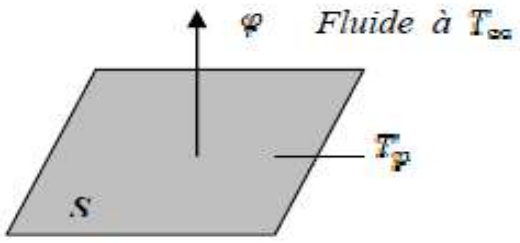


Figure 21 : Définition d'un élément de surface d'échange

φ Flux de chaleur transmis par convection (W)

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

Tp Température de la surface (℃)

$T\infty$ Température de milieu environnant la surface (℃)

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

I.4.5.5 Rayonnement

Est une émission de rayonnement électromagnétique par un corps chaud, le rayonnement a la particularité de se déplacer dans le vide (rayonnement solaire). L'énergie électromagnétique reçue par le système est absorbée et convertie en énergie thermique (chaleur).nous avons la relation **[8]**.

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S(T_p^4 - T_\infty^4) \quad \text{……Équation 11}$$

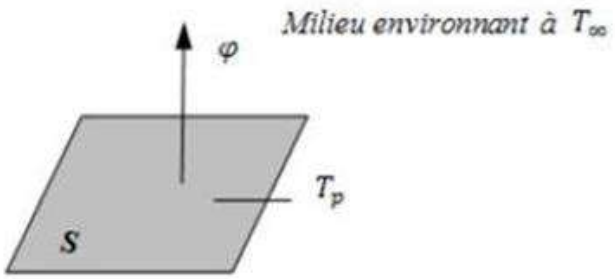


Figure 22 : Elément en rayonnement

φ Flux de chaleur transmis par rayonnement (W).

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

ε_p Facteur d'émission de la surface.

Tp Température de la surface (℃).

$T\infty$ Température de milieu environnant la surface (℃).

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

Prenons un exemple pour modéliser l'élévation de température d'un disque de frein avant d'une voiture de masse 1000 kg allant à 180 km/h (sur circuit) soit 50 m/s.

L'énergie cinétique acquise par un véhicule est donnée sous la forme :

$$E = \frac{1}{2}.m.v^2 \qquad \textbf{……Équation 12}$$

Cela fait donc une énergie de 1250 kJ à dissiper sous forme de chaleur.

En partant du principe que l'essieu avant dissipe 60 % de l'énergie du véhicule, un disque dissipera donc 30 % de l'énergie.

Cela nous donne une énergie de 375 kJ à dissiper sous forme de chaleur pour une roue avant.

I.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer les principales technologies de frein couramment utilisés sur les véhicules utilitaires. Les freins à disque sont désormais la référence en matière de sécurité et d'efficacité. La maîtrise de cette technologie est cependant dépendante des nuisances vibratoires ou sonores intrinsèques à ces systèmes complexe.

Chapitre II:

Matériaux et Techniques expérimentales

II.1 Introduction

Les propriétés mécaniques des matériaux sont caractérisées par différents paramètres. Notons par exemple, la résistance aux chocs, la dureté, la limite de fatigue le module d'élasticité et l'allongement à la rupture sont aussi des paramètres cruciaux. Il est important de connaitre ces différents paramètres sur le matériau en jeu lors de la conception d'une pièce ou encore après sa fabrication. Il est alors possible de vérifier si le matériau de la pièce est conforme au cahier de charge.

Le présent chapitre est consacré à la description des méthodes et des moyens expérimentaux utilisés durant notre travail.

II.2 Matières utilisées

Fonte de nuance FGL-20 usiné par l'entreprise POVAL de Berrouaghia-Médéa.

Ce dernier c'est le type de fonte le plus employé dans la fabrication des disques de freins. La structure d'une fonte grise est constituée par une matrice métallique contenant du graphite qui apparait au microscope sous forme de lamelles. Ce graphite peut également ce présenté sous un aspect rayonnant autour d'un centre de cristallisation. Il est alors appelé « graphite en rosettes ».

Ci-dessous nous présentons les photographies des différents disques de freins utilisés lors de notre étude :



Figure 1 : Photographie de disque de frein plein qui a servi à notre étude



Figure 2 : Photographie de disque de frein ventilé qui a servi à la présente étude



Figure 3 : Prise de vue des deux différents types de disque freins (plein / ventilé) employés pour le présent travail

II.2.1 Mise en forme des échantillons pour fabriquer les éprouvettes

II.2.1.1 Géométrie des éprouvettes

L'éprouvette **(Figure26)**, a été usinée à partir des barreaux cylindriques représentatifs de chacun des matériaux. Leurs formes et dimensions sont dictées par les normes **[10]** :

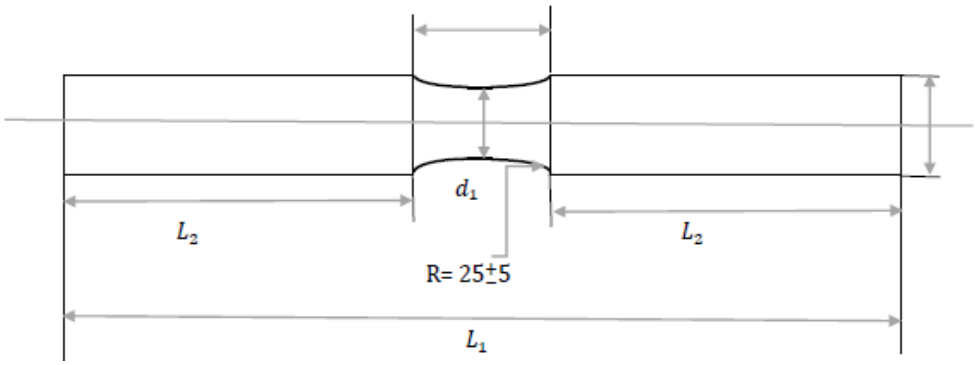


Figure 4 : L'éprouvette de traction en FGL20

Dimensions

*d*1= diamètre nominal des barreaux d'essai

*d*1= diamètre des têtes cylindriques

*L*1= longueur totale des barreaux

*L*1= longueur des têtes cylindriques

Tableau 1 : Les dimensions de L'éprouvette de traction en FGL20

Diamètre nominale (mm)						Echantillon
d_1	Ecart admissible	d_2	L_1	L_2	Diamètre du spécimen brut	Longueur nominale du spécimen brut
20	±0.1	28	207	90	30±	250

L'éprouvette présente la tête d'amarrage de forme cylindrique lisse ce qui leur permet une adaptation simple et une prise rapide par les mors doux sur la machine d'essai. La longueur utile qui permet d'enregistrer les allongements finaux d'éprouvette est marquée par deux points distant de :

$L_0 = K\sqrt{S0}$ ……**Équation 1**

Soit $L_0 = 100 \pm 1$

II.2.1.2 Gamme de préparation

Les éprouvettes ont été préparées par tournage, model 16K20F3C35. La machine- outil est destiné au tournage extérieur et intérieur des pièces type « corps de révolution » aux profils étagés et curvilignes de différente complexité en cycle semi-automatique fermé à une ou plusieurs passes ainsi qu'à la production de différents types de filetage **(Figure 28) [11]**.



Figure 5 : Photo du montage d'une éprouvette dans la machine du Tour



Figure 6 : Tour type 16K20F3C35 «Photo de Tour »

A) Prélèvement de l'échantillon





Figure 7 : Les barreaux de FGL20

B) Tourner les barreaux de FGL-20



Figure 8 : Les étapes de tournage l'éprouvette de FGL20

C) Vérifier les mesures



Figure 9 : Vérification des mesures des éprouvettes de traction uniaxiale

II.3 Caractérisation des propriétés mécaniques de disque de frein

II.3.1 Traction

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts F de tension de sens opposés et de même valeurs absolues. La ligne d'action étant confondue avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette. On mesure instantanément l'allongement correspondant **[12]**.

Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Pour ce faire, on rapporte la charge à la section initiale S_0 de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte nominale σ:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \qquad \text{……Équation 2}$$

Et on apporte l'allongement ΔL à la longueur initiale entre repères L_0, pour obtenir la déformation nominale ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad \text{……Équation 3}$$

II.3.1.1 Réalisation l'essai de traction

Les essais de traction ont été effectués au sein du laboratoire des essais mécaniques au l'entreprise POVAL de Berrouaghia-Médea.

La machine d'essai utilisée est une machine universelle *MFL* de type Z-40 **(Figure 32)**, est une machine de traction dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement **[13]**.



Figure 10 : Machine de traction type Z-40 utilisée.

Le dispositif d'amarrage est composé d'une paire de mordaches ou d'un autre système de fixation adapté à la forme de l'éprouvette (p.ex: pour éprouvette avec tête filetée ou tête à épaulement).

Afin d'éviter tous moments de flexion, il est important que les fixations soient bien orientées et alignées suivant l'axe de traction. Ceci n'est pas toujours facile à réaliser, mais est particulièrement critique lorsqu'on doit mesurer des matériaux fragiles, tels que les fontes, qui ne peuvent pas s'adapter. De même toute composante de torsion est à éviter.

L'effort est exercé par l'entraînement soit mécanique soit hydraulique sur l'une des fixations.

Un système de réglage assure une vitesse de déformation constante. Ce système permet également d'effectuer des cycles de déformation, ou d'imposer la contrainte au lieu de la déformation. Bien que les machines de traction soient rigides, il ne suffit normalement pas de prendre le déplacement de la traverse comme mesure pour l'allongement.

Notamment pour des éprouvettes courtes, l'allongement élastique du bâti de la machine et des dispositifs d'amarrage n'est d'habitude pas négligeable par rapport à celui de l'échantillon. Il est en tout cas préférable de fixer un extensomètre **(Figure 33)** aux extrémités de la longueur de mesure et d'utiliser ce signal pour tracer les courbes **[13].**



Figure 11 : Capteur d'extensomètre

Normalement une paire d'interrupteurs est prévue pour la protection de l'extensomètre. Une description du fonctionnement des capteurs de force et des extensomètres est donnée au chapitre "Mesure des déformations élastiques" et "Contraintes thermiques" **[13]**.

La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre et l'allongement par un extensomètre. On obtient alors un enregistrement de la courbe brute de traction= (ΔL), caractéristique de l'échantillon.

II.3.2 La dureté

La dureté d'un matériau peut être définie comme la « résistance du matériau à la déformation permanente sous l'effet de la pénétration par un autre matériau dur», et une valeur quantitative devrait toujours être évaluée en fonction de :

- la charge exercée sur le pénétrateur.
- un profil de temps de charge spécifique et une durée de charge spécifique ;
- une géométrie de pénétrateur spécifique.

L'objectif principal de l'essai de dureté est de déterminer l'aptitude d'un matériau, ou le traitement particulier auquel le matériau a été soumis **[14]**.

L'essai de dureté est généralement réalisé en mesurant la taille de l'empreinte laissée par le pénétrateur (Brinell).

La méthode d'essai de dureté la mieux adaptée dépend de la microstructure du matériau, par ex. de son homogénéité. Il est important que le matériau soumis à l'empreinte de l'appareil d'essai de dureté soit représentatif de l'intégralité de la microstructure, sauf si l'objectif est d'étudier les différents composants de la microstructure. Cela signifie que si la microstructure est très grossière ou hétérogène, l'empreinte requise devra être plus grande que pour un matériau homogène **[14]**.

A. Essais de dureté Brinell

L'essai Brinell implique l'application d'une bille en carbure de tungstène de 1, 2,5, 5 ou 10 mm dans l'échantillon et la mesure du diamètre de l'empreinte laissée. Les charges utilisées varient de 1 kgf à 3000 kgf **[14].**

$$HB = \frac{2p}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \times 0.102 \qquad \text{……Équation 4}$$

P = Force appliquée [N]

D= diamètre de l'empreinte laissée [mm]

d = diamètre de la bille [mm]





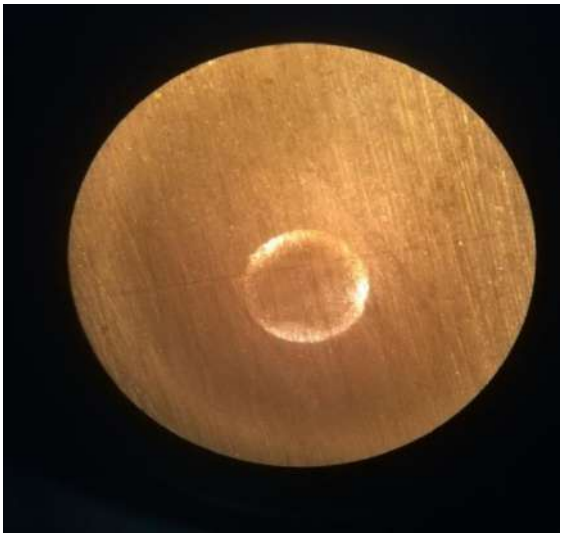


Figure 12 : Photographie de l'essai Brinell

II.4 Caractérisation microstructurale et micrographique

Le but de l'examen micrographique des métaux et alliages est de définir leur structure avec précision, c'est-à-dire de déterminer qualitativement la nature, la forme, la répartition de leurs constituants. De plus, on peut parfois mesurer au moins approximativement les dimensions, le nombre et la proportion des particules, grains ou inclusions, sous la forme desquels se présentent ces constituants.

En effet, dans le cas des pièces moulées, on peut considérer comme facteurs principaux des fabrications :

La composition chimique (teneur en carbone silicium, élément d'alliage)

Voici les différentes étapes de cette expérience



Figure 13 : Machine de fraiseuse



Figure 14 : les grains de disque de freins

En mesure les grains dans la balance

II.5 Balance

Les balances de laboratoire sont une combinaison parfaite de performances, de fiabilité et de simplicité d'utilisation la **(figure 37)** présente la balance de précision utilisée pour la mesure de petite masse avec précision



Figure 15 : Prise de vue de la balance utilisée







Figure 16 : Machine ultra Modèle CS 100/1000 RF Carbone Sulfer Analyse

Pour une analyse rapide et précise du carbone et du soufre jusqu'à des niveaux en ppm, l'analyseur automatique G4 ICARUS CS HF est très efficace, en particulier avec les matériaux métalliques.

L'échantillon solide est placé dans un creuset en céramique, puis brûlé dans un four à haute fréquence dans un flux d'oxygène. La puissance du four HF est ajustable pour obtenir une combustion optimale. Les gaz de réaction de CO_2 et de SO_2 résultants sont mesurés par des détecteurs IR à semi-conducteurs de sélectivité et de sensibilité maximale. Le système se caractérise par une utilisation facile et une évaluation automatique à l'aide d'un PC externe.

Le G4 ICARUS CS HF convient à la détermination rapide du carbone et du soufre, acier, fer, alliages, métaux non ferreux, aluminium, alliages, zirconium et alliages, minerais, céramique, ciment, calcaire, etc.

Avantages

- Temps d'analyse court, opération presque sans entretien.
- Puissance du four HF réglable en continu pour une combustion optimale des échantillons.
- Analyseur avec système de détection NDIR sélectif, stable à long terme et à haute résolution, deux plages de mesure pour le CO_2 et une pour le SO_2.
- Contrôle de base automatique (ALC).
- Sélection automatique optimale de la plage.
- Facile à utiliser via un PC externe avec évaluation automatique, stockage des informations sur les échantillons et stockage des données pour l'évaluation ultérieure de toutes les analyses.

- Transfert de données via FTP ou connexion au réseau local possible.

Les conditions d'élaboration : (fusion au cubilot ou au four électrique, constitution des charges. température de surchauffe et de coulée, inoculation)

Les conditions de moulage : (nature du moule, sable ou coquille. Forme et épaisseur ou module de refroidissement des pièces...) régissant les vitesses de solidification et de refroidissement et de refroidissement des diverses parties moulées.

Les traitements thermiques: (recuit, trempe) et revenu. Malléabilisation. Traitements superficiels...)

Or, c'est par leur action sur la structure finale de l'alliage que ces facteurs fabrication influent sur les propriétés d'utilisation des pièces ; comme par exemple les caractéristiques mécaniques, l'usinabilité, le comportement au frottement, la résistance aux corrosions, les propriétés thermiques. Magnétiques électriques...

D'où l'intérêt fondamental de observation des structures comme contrôle fabrication, parfois comme contrôle de réception et aussi comme de recherche.

II.6 Préparation de l'examen micrographique

II.6.1 Prélèvement de l'échantillon

A. Choix de l'emplacement du prélèvement

L'échantillon que l'on prélève en vue de l'examen métallographique doit présenter une surface de 3 à 6 cm^2 et avoir une hauteur compatible avec une manipulation commode. La surface subira les préparations nécessaires à l'observation à l'aide du microscope métallographique fortement grossissant.

Il est important de noter que l'échantillon prélevé devra être représentatif de la structure de la pièce intéressée. (La pièce peut d'ailleurs n'être qu'une éprouvette.)

La structure d'une pièce moulée en fonte diffère dans une large mesure d'un point à un autre, suivent les vitesses de solidification ou de refroidissement dans le moule (parties minces – partie épaisses ; partie proches de la surface ou situées à cœur; voisinage d'un noyau, d'une masselotte ou d'un refroidisseur).

Il est souhaitable de procéder à un examen macrographique (observation à faible grossissement ou même à l'œil nu d'une coupe convenablement préparée d'une pièce ou large partie de pièce) qui fera apparaitre les hétérogénéités de structure.

Lorsqu'on a choisi l'endroit précis ou veut examiner dabs tous ses détails la structure de la pièce (ou de l'éprouvette) on procède en général au prélèvement de l'échantillon.

Exceptionnellement, il arrive que, pour éviter de détruire une pièce, il faille recourir à la méthode dite « par réplique ». Cette méthode consiste a effectuer, sur un endroit da la surface choisi à l'avance, un polissage correct à la main suivi de l'attaque convenable. Sur cette surface ainsi préparée on dépose un vernis spécial. Après durcissement, cette pellicule de vernis est enlevée avec précaution et fixée sur une lame de verre mince pour procéder à l'examen micrographique qui sort du cadre de cet atlas et dont nous ne faisons ici qu'une simple mention.

B. Découpage

Il y a deux cas à considérer :

- 1er Dans le cas des pièces usinables il n'y a pas de difficultés, le découpage fait à la scie et le dégrossissage préalable à la lime.
- 2ème Dans le cas des pièces inusinables le découpage se fait par tronçonnage à l'aide de disques abrasifs, il est important que pendant le tronçonnage l'échantillon ne subisse pas d'échauffement exagéré pour éviter toute transformation de la structure et il est nécessaire d'arroser abondamment l'échantillon pendant le tronçonnage

C. Repérage

Le repérage de l'échantillon est important afin de pouvoir s'y référer par la suite. Il sera souvent utile de joindre à l'échantillon un croquis qui permettra de bien se rendre compte de l'endroit du prélèvement par rapport à l'ensemble de la pièce.

D. Enrobage

Il est nécessaire d'enrober l'échantillon dans le cas suivent :

- 1er Echantillon trop petits pour être tenus à la main ou de forme incommode (ex : grenaille de fonte).
- 2ème Examen particulier des bords de l'échantillon (ex : trempe superficielle, oxydation superficielle, protection de surface, nickelage, chromage).

Il y a deux procède d'enrobage

- A chaud, l'enrobage s'effectue avec des poudres spécialement étudiées (bakélite, plexiglass etc.) et compressées dans une chambre chauffée (ex: bakélite 120-130 °C, pression 80-100Kg/cm²).
- A froid, il s'effectue avec des résines synthétiques liquides auxquelles on ajoute au

moment de l'emploi un durcisseur et éventuellement un catalyseur, des fronçons de tube métallique ou d'autre nature conviennent parfaitement pour y mouler la résine encore liquide sur l'échantillon.

II.6.2 Préparation de la surface à examiner

A. Dégrossissage

Les échantillons enrobés ou non doivent être d'abord dégrossis.

Le dégrossissage s'effectue sur une bande de toile abrasive grossière (par exemple, n° 60) entrainée par un moteur électrique (appareille appelé « tank ») **(Figure 39).**

Cette opération demande peu de temps main il faut veiller également à ce que l'échantillon ne chauffe pas exagérément.

A ce stade, il est possible de procéder à un examen macrographique pour observer éventuellement les défauts apparents (soufflures, retassures, criques, etc.



Figure 17 : La machine polissage (tank) Metasinex Lux - Automatisation des équipements de découpe métallographique



Figure 18 : Dégrossissage des échantillons

B. Polissage par papiers abrasifs fins

Les abrasifs sont généralement, soit de l'émeri (corindon naturel impur).

Soit du carbure de silicium.

Le polissage peut s'effectuer de deux manières :

A sec ou avec arrosage sous l'eau.

Dans les deux cas le polissage se fait sur plateau tournant garni de disques de papier abrasif de granulométrie de plus en plus fine ; en principe n) 150 µ, 220 µ,320 µ, 400 µ ,600 µ

On utilise, également des bandes de même granulométrie, mais fixes et le polissage s'effectue alors par un mouvement manuel de va-et-vient.

Il faut, à chaque changement de papier, faire des rayures perpendiculaires aux précédentes jusqu'à leur disparition.

C. Finition

Avent de passer à la finition du polissage sur le drap, il est important de bien laver l'échantillon (ainsi que les mains) pour éviter de transporter sur le drap de finition de grains d'abrasif qui compromettraient absolument le polissage final.

La finition du polissage s'effectue sur un disque recouvert de feutre ou de drap, animé d'un mouvement de rotation (550 et 150 tr/min) (appareil dénommé « touret ») **(Figure 41).**



Figure 19 : La machine polissage (touret)



Figure 20 : La Pâte d'alumine

II.7 Examen micrographique

Apres la finition du polissage, il est recommandé d'attaque et de polir plusieurs dois l'échantillon afin d'enlever la pellicule de métal écroui.

Pour étudier les autres constituants de la matrice métallique on doit procéder à une attaque par un réactif approprié pour chaque matériau étude **(Tableau 2)**.

Lorsque la matrice comprend une phase divisée en grains polyédrique bien nettement délimités (ferrite-austénite) on peut apprécier la dimension moyenne de ces grains à l'aide d'images types normalisée (voir norme française NF A O4- 102 aout 1950).

Certains réactifs ont été spécialement étudies pour l'examen macrographique.

Enfin, souvent la description des structures observée devra être illustrée par des photographies (macrographies ou micrographies) réalisées grâce aux dispositifs appropries dont sont équipées la plupart des microscopes.

Tableau 2 : Les réactifs correspondant pour chaque matériau étude

Matériau	Désignation de réactif	Composition	Emploi et observations
	Examen micrographique		
FGL-20	Nital 4%	Alcool éthylique → 96 cm^2 Acide nitrique → 4 cm^2	Réactif le plus couramment employé pour l'attaque des fontes ordinaires. Mise en évidence des structures : perlite, martensite, sorbite, etc. Fait apparaitre les joints de grains de ferrite des fontes non alliées. Durée d'attaque : 5s à 3min

II.7.1 Microscope utilisé

La microstructure des précipités des matériaux a été étudiée par microscopie optique **(Figure 43).** Le microscope optique utilise la lumière. Il est doté de deux lentilles :

- l'objectif, pour agrandir l'objet que l'on souhaite observer (il existe plusieurs grossissements).
- l'oculaire pour que les rayons arrivent à l'œil de manière parallèle, ce qui permet à l'œil de se reposer.

Des instruments supplémentaires permettent de régler la quantité de lumière (le diaphragme) ou la mise au point (molettes liées à un système de crémaillère) pour affiner l'observation de l'échantillon placé sur la platine porte-échantillon.

La résolution des microscopes optiques ne peut être supérieure à 0,2 micromètre, cette résolution étant limitée par la diffraction de la lumière. Des techniques permettent de s'approcher de cette limite : l'utilisation d'un objectif à immersion (dans l'huile), ou en diminuant la longueur d'onde de la lumière (toutefois limitée au visible).



Figure 21 : Microscope optique type Neophot 2

Chapitre III:

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Ce chapitre regroupe tous les résultats obtenus par des déférentes techniques appliquées sur les types de disque de frein qui ont servi à l'étude. La connaissance des propriétés mécanique de disque de frein (ventilé/plein) est remarquable. A cet effet, un dépouillement des propriétés relatives à la structure des disques de frein étudiés est nécessaire afin d'expliquer leurs aptitudes d'adsorption.

III.2 Les caractéristiques mécaniques

III.2.1 Les résultats des essais de dureté

III.2.1.1 La dureté Brinell

Tableau 1 : Résultant de la dureté Brinell

				Moyenne
Diamètre de l'empreinte (mm)	1.2	1.21	1.19	1.2
la dureté Brinell	217	214	222	218

Donc : la dureté Brinell en valeur moyenne est égale à 218

III.2.2 Les résultats d'essai de traction

III.2.2.1 Essais mécaniques de traction uniaxiale

Les essais mécaniques de traction uniaxiale ont été réalisés à vitesse de déformation constante (2mm/min), jusqu'à ce que l'échantillon atteigne la phase de rupture.

A. Courbes contrainte-déformation :

Pour rappel :

Contrainte = force/ section

$$\partial = \frac{F}{S_0} \quad \text{……Équation 1}$$

Déformation = allongement / H_0

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{……Équation 2}$$

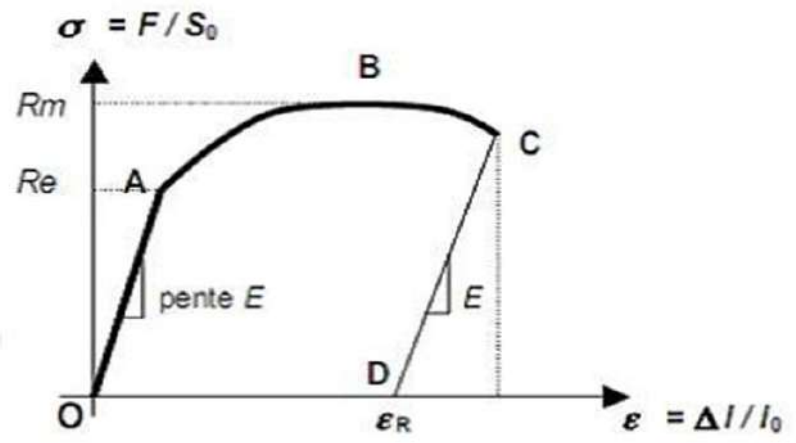


Figure 1 : Courbe représentative des propriétés mécaniques du matériau déduite de l'essai de traction uniaxiale **[15]**

OA : régime élastique (réversible), généralement linaire.

AB : déformation plastique uniforme (écrouissage).

BC : réduction localisé de la section (striction).

C : rupture.

CD : retrait élastique.

E : module de Young /

Re : limite élastique

Rm : résistance à la traction (contrainte maximale).

ε_R : $\Delta l_R/li$: déformation rémanente ou après rupture.

Z%= $(S_0-S_f)/S_0$ x 100% : coefition de striction.

Échantillon	Contrainte MPa	Module de young GPa	Rm
FGL 20	6.3	150	25.15

L'éprouvette ne se rompt pas à iso déformation ce qui peut être dû au taux de graphite présent dans la zone de rupture, nous avons néanmoins pu obtenir le comportement élastique du matériau.

III.3 Les résultants Microstructure et cristallographie Avant l'attaque chimique

L'examen du graphite au microscope par toute autre méthode est généralement effectue sur la section polie non attaquée d'un échantillon à l'aide comparaison de la forme et de la répartition du graphite avec les images types des **(Figure 45 et 46)**

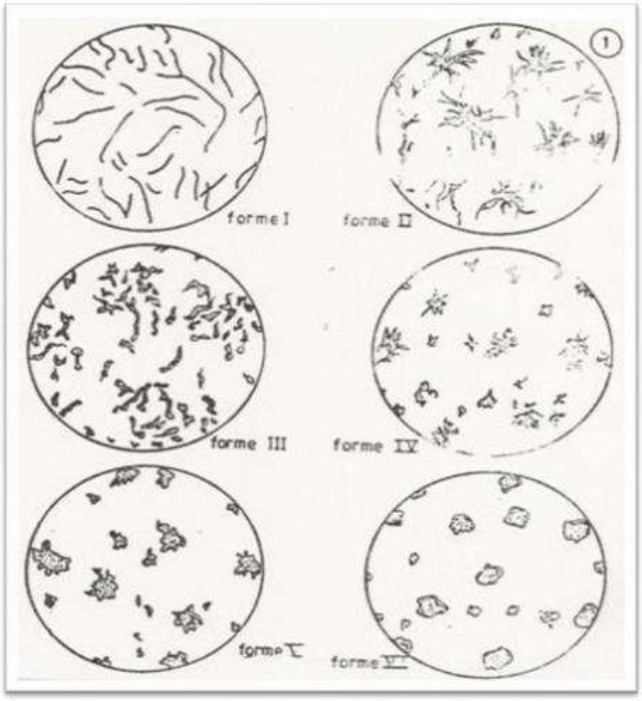


Figure 2 : Six images-type représentent les principales formes de graphite selon la norme NF A 32-100.



Figure 3 : Classification du graphite lamellaire en fonction de sa taille et sa distribution selon la norme ASTM-A-247 **[16]**

Détermination au grossissement 100 des dimensions des particules de graphite.

Nous obtenons les résultats suivants :



Figure 4 : Aspect microstructure de disque de Frein ventilé observée à l'aide d'un microscope optique dont le grossissement est X100



Figure 5 : Aspect microstructure de disque de frein plein observée à l'aide d'un microscope optique dont le grossissement est X100

Tableau 2 : représente forme de graphite

Type de disque de frein	% de graphite	Dimension de graphite µm	Type de répartition	Type de matrice
Disque de frein plein	10-15%	25-40	régulière	Perlitique
Disque de frein ventilé	>15%	125-250	Irrégulière	Perlitique

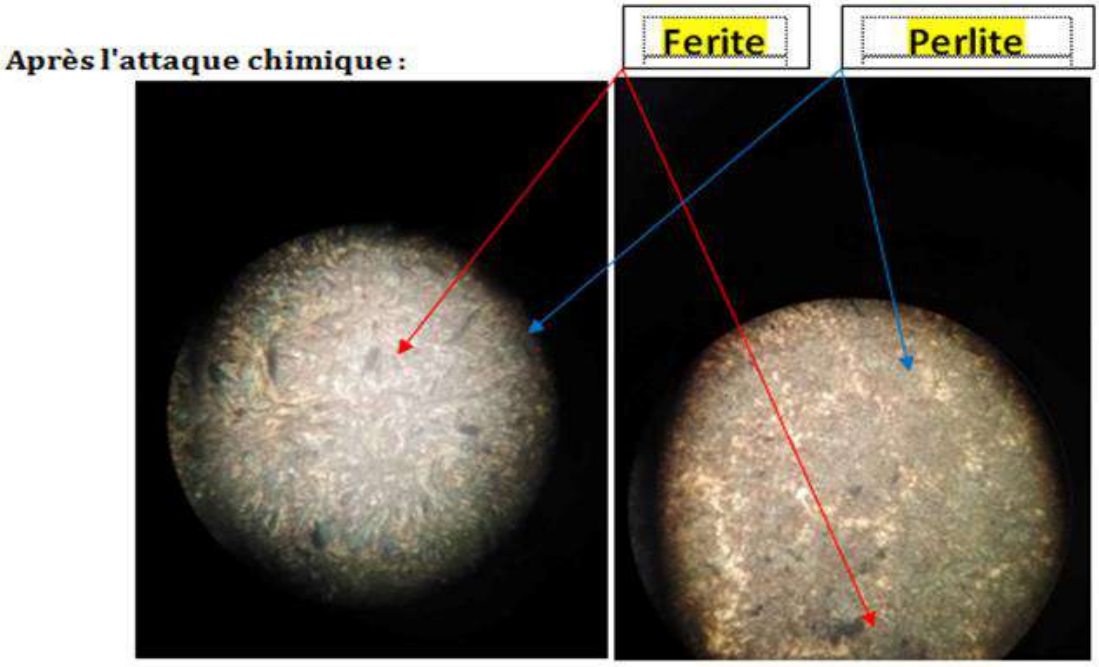


Figure 6 : Observation au microscope optique de déférent disque de freins après polissage et attaque chimique.

Le pourcentage de ferrite (10 à 30%) donc c'est matrice Perlito-ferritique. Fonte grise Perlito-ferritique : les lamelles de graphite sont entourées d'auréoles blanches de ferrite, le fond sombre est de la perlite.

III.4 Le graphite

Le graphite est la forme de carbone la plus répandue à l'état naturel, il a une structure en feuillets, constituée de couches poly-aromatiques planes appelées graphènes qui peuvent être agencées pour donner deux variétés structurales différentes :

- Le graphite hexagonal (empilement ABAB...): le plan B est translaté par rapport au plan

- A de la longueur d'une double liaison carbone-carbone (égale à 1,42 Å) suivant la direction de la liaison. Les paramètres de maille sont: a =b = 2,461 Å et c = 6,708 Å **[14]**.

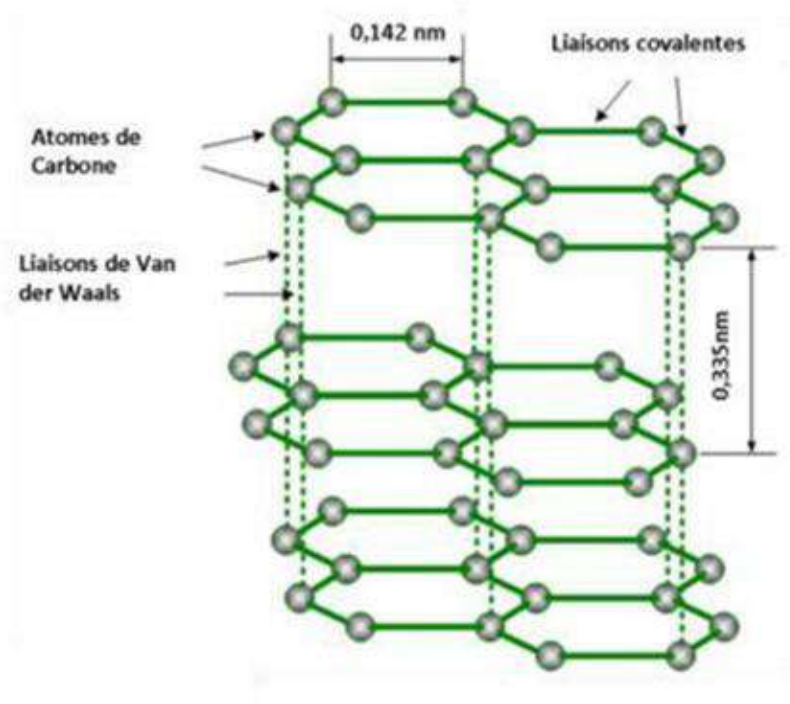


Figure 7 : Structure du graphite hexagona **[17]**

III.4.1 Le graphite dans la fonte graphite lamellaire

Sur une section métallographique, le graphite apparaît sous forme de lamelles plus ou moins épaisses qui présentent des branchements fréquents et forment un réseau tridimensionnel. Dans les fontes hypereutectiques des lamelles de graphite primaires se forment par croissance libre dans le liquide puis sont entourées par un halo d'austénite **(Figure 51.a)**. Dans le cas des fontes hypoeutectiques, la formation d'austénite précède la croissance des lamelles de graphite eutectiques. Une structure constituée de dendrites d'austénite et de graphite fin dit de surfusion est observée suite à la réaction eutectique. La **(Figure 51.b)** montre un réseau de lamelles de graphite eutectique après une attaque profonde.

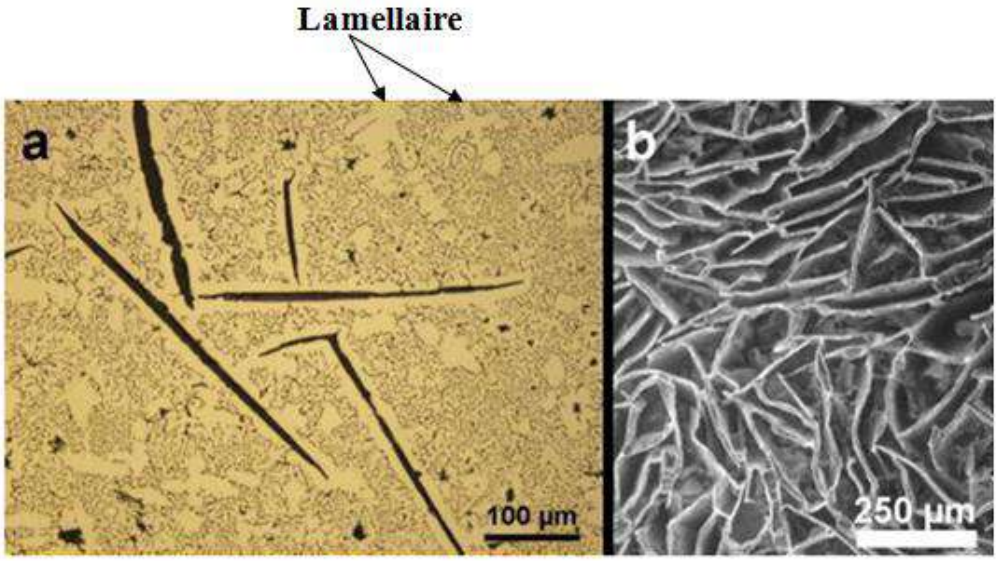


Figure 8 : Précipités de graphite lamellaire et eutectique fin (a) et attaque profonde montrant le réseau interconnecté de lamelles (b) **[16]**.

III.5 Résultats de l'essai de carbone et du soufre

L'examen de deux disque (plein / ventilé) nous donne les résultats dans le tableau si dessous :

Tableau 5 : Tableau regroupe les résultats obtenus par l'essai de calcul des [%] des concentrations des éléments d'additions

Type de disque	C%	Si%	S%	Mn%
Disque de frein plein	3.40	2.35	0.09	0.59
Disque de frein ventilé	3.34	2.07	0.08	0.60

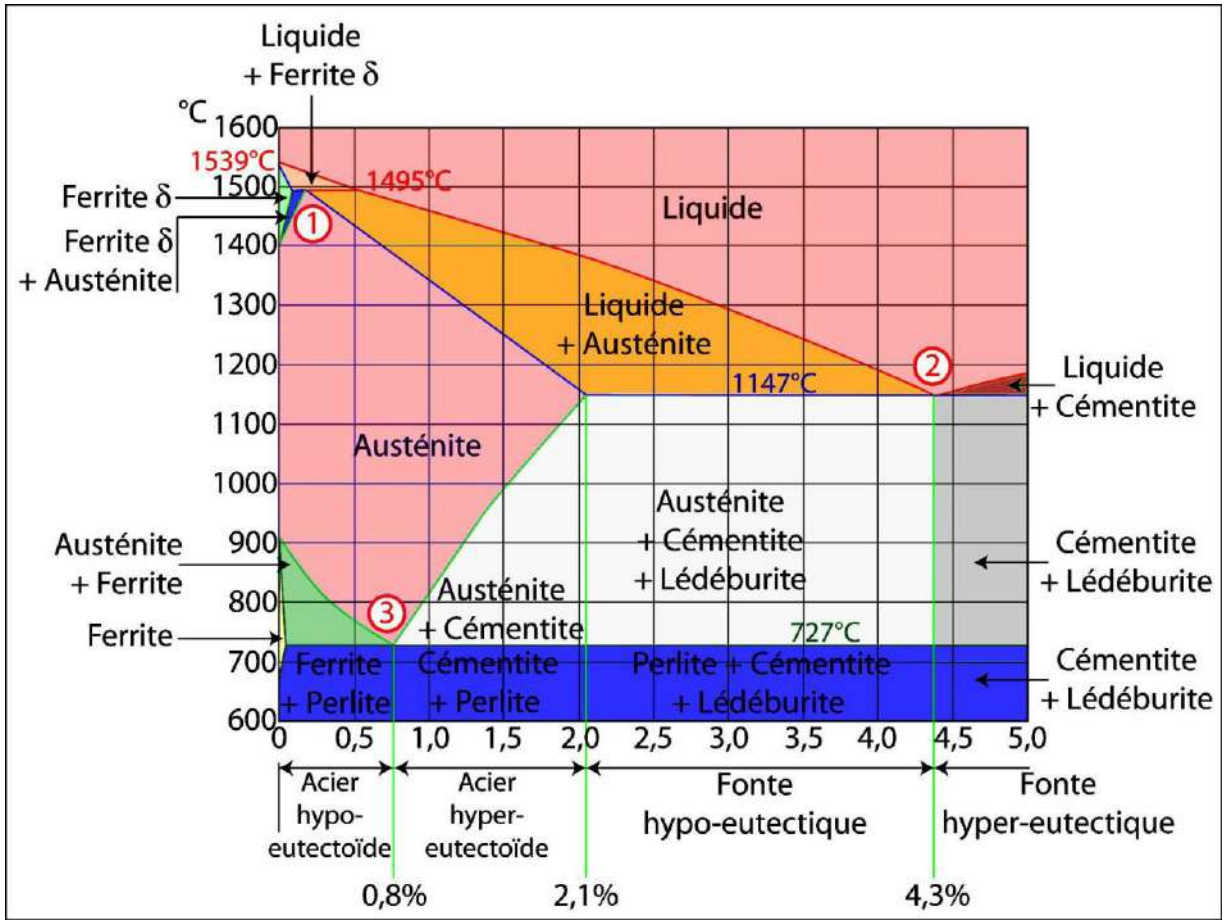


Figure 52: Diagramme de phases des alliages Fer-Carbone (en concentration massique) **[18]**

En 1 : transformation péritectique En 2 : transformation eutectique En 3 : transformation eutectoïde (solide-solide)

Les alliages dont la composition est inférieure à celle de P1 (32% Pt) et ceux dont la composition est supérieure à P2 (86% Pt) se comportent comme des solutions solides à un seul fuseau.

Les alliages dont la composition est comprise entre P1 et P vont voir apparaître dans un premier temps dans la phase liquide, une phase β dont la composition va évoluer progressivement jusqu'à la concentration en P2 (86% Pt). Lorsque la température péritectique est atteinte, il se produit une transformation isotherme de ce solide b (86% Pt) en solide α (55% Pt). Après cette transformation, il subsiste encore une phase liquide. La solidification va se poursuivre en évoluant vers une phase α unique.

Les alliages dont la composition est comprise entre P et P2 débutent de façon identique aux précédents, mais lorsque la température péritectique est atteinte, une partie de la phase b va disparaître, combinée avec le liquide pour former la phase α. Cependant la quantité de liquide n'est pas suffisante pour faire disparaître la totalité de la phase β. Celle-ci va coexister avec la phase a et donnera donc un alliage biphasé.

Les échantillons qu'ont servis à la présente étude sont des fontes hypo-eutectique.

Ceci a été montré par la déduction de la composition du carbone qui vaut 3,40% pour les disques plein et 3,34% relative aux disques ventilés.

Conclusion Générale

L'objectif de ces travaux était la contribution à la compréhension et de la caractérisation mécanique et microstructurale des disques de freins plein et ventilé

Les propriétés mécaniques des disques de frein sont d'un grand intérêt puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. Le choix du matériau d'un disque de frein dépendra des propriétés mécaniques tel que : résistance, dureté, ductilité ainsi du cout et du durée de fabrication d'une autre part. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques par des essais mécaniques.

L'examen au microscope optique montre que le matériau FGL20 est la base de composition des deux disques de frein d'après cela, le graphite existe dans la fonte FGL20 et peut être classée d'après :

- Forme de graphite (Comparer les résultats obtenus avec images-type des principaux types de graphite observables dans les fontes). Donc la Forme c'est lamellaire dans les deux cas.
- Répartition du graphite est régulière dans le disque de frein plein et irrégulière dans le disque de frein ventilé
- Diamètre de grain (Au grossissement 100) est de 25-40 µm dans le disque de frein plein et de 125-250 µm dans le disque de frein ventilé

Pourcentage de graphite dans le disque de frein ventilé est supérieur 15% et dans le disque de frein plein est entre 10-15%

Dans les deux cas on a observé que le ferrite et le perlite existe dans la structure des ces matériaux avec un coefficient de déformation plastique à la rupture de 25.15

Finalement, un examen des teneurs en carbones nous a aidé a montré que les matériaux formant les disques sont à base des fontes hypo-eutectique

Références Bibliographiques

Références bibliographique

[1] SCHMITT. Emmanuelle, GAGNE .Wilfrid. " Etude sur le freinage automobile ". Préparation à l'agrégation de mécanique 2002-2003.

[2] M. AUBLIN, R .BONCOMPAIN ,M .BOULATON,D.CARON,E.JEAY,B. LALAGE, J. REA : " Systèmes mécaniques – Théorie et dimensionnement " , 2 ème édition, Editions DUNOD, 2004

[3] http://www.autotekno.com/frein_a_disque.php, consulté le: 18/06/2019

[4] retrotech.free.fr/technologie/freinage/06.pdf, consulté le : 25/06/2019

[5] www.theses.fr/2016LYSEC006.pdf, consulté le : 05/06/2019

[6] step.ipgp.fr/images/2/27/L2S4_GdE_TTT_partB.pdf, consulté le : 21/06/2019

[7] www.tunisieindustrie.nat.tn/fr/download/fichesPro/IME/01.pdf, consulté le : 10/06/2019

[8] P. Dufrenoy, Etude du comportement mécanique des disques de frein vis avis des risques de défaillances, Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 1995

[9] A. Belhocine, thermomécanique des disques de frein Application du Code de Calcul ANSYS v11.0

[10] Mechanical Metallurgy, G.E. Dieter, chap. 9, The Tension Test, p. 329-377, Internatl. Student Edition McGraw-Hill, 1976.

[11] Mechanical Metallurgy, M.A. Meyers, K.K. Chawla, chap. 16, Tensile Testing, p. 559-599, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1984.

[12] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.

[13] Metals Handbook, A.S.M., 9th edition, vol. 8, Mechanical Testing, p. 19-51 : Tensile Testing, Tension Testing Machines, Extensometers.

[14] « Metallography and practice », George F. Vander Voort

[15] Belhadj A. ; Kaoua S-A. ; Azzaz M. ; Bartout J.D. ; Bienvenu Y. ; « Elaboration and characterization of mettalic foams based on tin-lead », Materials science and Engineering A ; 2008, Vol. 494, pp.425-428.

[16] ERG (1998) Duocel aluminium foam. ERG Corporate Literature and reports, 29 september <http://ergaerospace.com/lit.html

[17] Arnaud, D., et al. 2012. *Propriétés du cuivre et de ses alliages.* s.l. : Techniques de l'ingénieur, 2012.

[18] T. Massalski (éditeur), Binary phase diagrams , ASM international, Materials Park, Ohio (1990) (Ouvrage de référence pour les diagrammes de phase binaires).