

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : FABRICATION MECANIQUE

PAR :

BENDRIS KARIM

BENGADI MOHAMED AMINE

Thème

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE CONTACT SUR L'USURE DES DISQUES DE FREINS

Soutenu le 03 JUILLET 2018 devant le jury composé de:

PR. BRADAI MOHAND AMOKRANE

Président

Mr. SAD-EDDINE A/HAMID

Rapporteur

Mr. YOUNES RASSIM

Examineur

Mme. IKHELOUFI MALIKA

Invitée

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

"La perfection est atteinte, non pas lorsqu'il n'y a plus rien à ajouter, mais lorsqu'il n'y a plus rien à retirer"

A. de SAINT EXUPERY

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu notre encadrant **Monsieur SAD-EDDINE A/Hamid**, pour son parrainage exemplaire et pour les efforts qu'il a consentis durant tout le temps d'élaboration de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à **Mr BRADAI Mohand Amokrane** et **Mr YOUNES Rassim**.

Nous en sommes reconnaissants à tous les enseignants de l'université de Bejaia en générale et ceux du département Génie mécanique en particulier, pour le savoir qu'ils nous ont donné toute au long de notre formation. Nous les remercions pour le savoir qu'ils nous ont donné et l'esprit critique qu'ils nous ont inculqué.

Le mémoire est parfois un travail d'équipe, c'est pour cela que nous remercions tous les enseignants qui nous ont aidés le long de notre travail. Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce modeste travail.

Nous tenons à saluer tous ceux qui nous ont conseillé et ceux qui nous ont guidé durant toute l'année.

Nous remercions vivement **Mr BELAMRI** et **Mr SAHALI** pour leurs conseils précieux.

Nous tenons à remercier chaleureusement tout le personnel du HALL DE TECHNOLOGIE, le responsable du HALL : **Mr YOUSFI Rachid**, le magasinier : **Mr ATOUB Noureddine**, nous remercions aussi **Abdellah** et **Rabah** pour leurs aides et leur présence avec nous.

Nous remercions les travailleurs de l'entreprise ENMTP, pour l'accueil qu'ils ont réservé au sein de l'entreprise et nous ont permis de réaliser nos tests de dureté.

Nous remercions vivement le chargé du bureau de méthodes de l'entreprise ENMTP **Mr ISSBIKHEN Nadjim** pour le temps et la disponibilité qu'il nous a accordée, il nous a très bien orientés pour réaliser les tests de dureté.

Nous remercions ainsi **Mme IKHELOUFI Malika** pour son aide et pour le temps qu'elle nous a attribué.

Dédicace

*Je tiens vivement, à dédier ce travail en signe de respect et
de
reconnaissance*

*Aux deux personnes très chères qui ont partagé mes joies et
mes
peines, qui ont été toujours à mes cotes, qui ont fait de moi se
que je suis aujourd'hui : ma mère et mon père
Et à tous mes frères : Kaci, Oussama, Ali, Sidou
Ma chère sœur : Rawnek*

*Et à tous mes proches sans exception, et surtout notre promo
fabrication mécanique et productique*

2017/2018

*A Tous ceux qui ont contribué à m'aider à la réalisation de
ce*

Mémoire.



DEDICACES

JE DEDIE CE TRAVAIL POUR MA FAMILLE, MA MERE
ET MES SŒURS

CE MEMOIRE EST DEDIE A MON PERE DEFUNT,
QU'IL REPOSE EN PAIX

JE DEDIE CE TRAVAIL A MON ONCLE SALAH
A TOUS MES COUSINS ET COUSINES

JE DEDIE CE TRAVAIL A TOUTE LA FAMILLE
BENDRIS

A MES ADORABLES NEVEUX
ELINE ET RACIM

JE DEDIE CE TRAVAIL A TOUS MES AMIS
TOUS MES COLLEGUES DE PROMO DE
GENIE MECANIQUE

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les différents paramètres de l'usure.	5
Tableau III.1 : Composition chimique de la fonte à graphite lamellaire des disques d'essais en % massique.....	47
Tableau III.2 : Vitesses de glissement balayées.	49
Tableau III.3 : Paramètres et résultats des essais.	50
Tableau III.4 : Méthode des moindres carrées d'évolution des températures de contact.	51
Tableau III.5 : Résultats des essais avec air comprimé.....	52
Tableau III.6 : Méthode de moindre carrée d'évolution des températures avec air comprimé suivant les vitesses de rotation du disque.....	54
Tableau III.7 : Evolution de la perte de masse et la température en fonction du temps.	55
Tableau III.8 : Méthode de moindre carrée d'évolution de la perte de masse en fonction du temps.	57

Figure I.1 : Photo qui montre au temps des égyptiens, un bon homme qui faisait de la tribologie	5
Figure I.2 : Différents modes d'usure, présents dans l'industrie.....	6
Figure I.3: Illustration de l'usure abrasive.	6
Figure I.4 : Cas usure adhésive douce.....	7
Figure I.5 : Cas usure adhésive sévère.	7
Figure I.6 : Schéma d'implantation du système de freinage [2].	8
Figure I.7 : Vue 3D d'un frein à tambour [4].....	9
Figure I.8 : Différentes technologies utilisées [5].	10
Figure I.9 : Exemple d'un étrier fixe [6].....	11
Figure I.10 : Exemple de plaquettes de marque FERODO [7].	11
Figure I.11 : Plaquettes de frein semi-métalliques [8].	11
Figure I.12 : Mécanisme simplifié du frein à disque [9].....	12
Figure I.13 : Disques de frein plein [10].	13
Figure I.14 : Différentes géométries d'ailettes [11].	13
Figure I.15 : Disque de frein ventilé [12].....	14
Figure I.16 : Circulation de l'air dans les canaux d'un disque ventilé [13].	14
Figure I.17 : Coupe sur un disque ventilé [14].....	15
Figure I.18 : Disques de frein rainurés [16].	15
Figure I.19 : Disques de freins percés [17].	16
Figure I.20 : Fissure radiale visible, qui se propage le long de la piste de frottement [19].	16
Figure I.21 : Ramification de fissure, phénomène appelé faïençage.....	17

Figure I.22 : Disque de frein rouillé [21].	18
Figure I.23 : Haut fourneau pour obtention de fontes [25].	20
Figure I.24 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [26].....	20
Figure I.25 : La structure caractéristique du Lédéburite [32].	24
Figure I.26 : Graphite sphéroïdales en noir.....	27
Figure I.27 : Distribution des lamelles dans un échantillon de fonte.....	28
Figure I.28 : Désignation des fontes à graphites lamellaires [25].....	28
Figure I.29 : Désignation normalisée des fontes à graphite sphéroïdal [25].....	28
Figure I.30 : Les Constituants des plaquettes de frein [12].....	31
Figure I.31 : Procédé de fabrication des plaquettes de freins [27].....	32
Figure I.32 : Détails des procédés de fabrication [27].	33
Figure II.1 : Polisseuse mécanique de marque (METASERV 2000).....	36
Figure II.2 : Machine de dureté universelle Brinell, Vickers et Rockwell de l'UGB.....	36
Figure II.3 : Principe de mesure de la dureté Vickers (pénétrateur pyramidal) [28].	38
Figure II.4 : Diffractomètre RX/Panalytical X'pert Pro.	39
Figure II.5 : Dispositif d'usure.	40
Figure II.6 : La zone en rouge est la zone la plus sollicitée.	40
Figure II.7 : Dispositif de fixation avec l'étrier.....	41
Figure II.8 : Montage du dispositif sur le tour.	41
Figure II.9 : Conception pièce de fixation (téflon) du disque.	42
Figure II.10 : Thermomètre à infrarouge.	43

Figure II.11 : Clé dynamométrique de couple de 5 à 25 N.m.	43
Figure II.12 : Balance analytique utilisée.....	44
Figure II.13 : Montage du dispositif, du disque et du thermomètre sur le tour.....	44
Figure III.1 : Echantillons ayants subi le polissage.....	47
Figure III.2 : a) Morphologie du graphite b) Microstructure de la fonte à graphite lamellaire [12].	48
Figure III.3 : Diffractogramme de nos échantillons.	48
Figure III.4 : L’empreinte carrée laissée par le pénétrateur est visible.	49
Figure III.5 : Evolutions des températures de contact plaquettes/disques.	50
Figure III.6 : Application d’air comprimé sur la zone de contact.	52
Figure III.7 : Evolutions des températures de contact plaquettes/disques avec air comprimé.	53
Figure III.8 : Graphique combiné des évolutions des températures où on constate l’effet positif de l’air comprimé sur la diminution de la température.	53
Figure III.9 : Graphe de l’évolution de la perte de masse en fonction du temps.	56

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	3
CHAPITRE I : Bibliographies	
PREAMBULE.....	5
I.1 La tribologie.....	5
I.2 Définition de la tribologie	6
I.3 Notion de systèmes tribologiques	7
I.4 Notions sur l'usure	7
I.4.1 L'usure comme défi	7
I.4.2 Classification d'usure : mécanismes et modes.....	9
I.4.3 Les différents modes de l'usure	10
I.4.3.1 Usure abrasive.....	11
I.4.3.2 Usure adhésive	11
I.4.3.3 Usure corrosive	12
I.5 Exemples de systèmes tribologiques.....	12
I.6 Les systèmes de freinages	12
I.7 Structure générale des systèmes de freinages	13
I.8 Les différents types de freins à friction.....	13
I.8.1 Freins à sabots.....	13
I.8.2 Les freins à tambours	14
I.8.3 Les freins à disques	15
I.9 Les composants des freins à disques.....	15
I.9.1 Etrier	15
I.9.2 Les plaquettes de freins.....	15
I.9.3 Le disque.....	16
I.10 Les type de disques de freins	16
I.10.1 Les disques pleins	17
I.10.2 Les disques ventilés	17
I.10.2.1 Les ailettes.....	18
I.10.3 Les disques rainurés	19
I.10.4 Les disques percés.....	20
I.11 Problèmes récurrents et dommages typiques des disques de freins	20
I.11.1 La fissuration.....	20

I.11.2	La corrosion	21
I.11.3	L'usure des disques de freins	22
I.12	Les matériaux de prédilection pour les disques de freins.....	22
I.12.1	Les fontes	22
I.12.1.1	Structures métallographiques de la fonte	25
I.12.1.2	Influence des principaux éléments présents dans les fontes.....	26
I.12.1.3	Les type de fontes.....	27
I.12.1.4	Désignation normalisée des fontes selon AFNOR.....	29
I.12.1.5	Fontes blanches	29
I.12.1.6	Fontes grises.....	29
I.12.1.7	Désignation des fontes non alliées	29
I.12.1.8	Désignation des fontes alliées	30
I.12.1.9	Fontes grises à graphites sphéroïdales	31
I.12.1.10	La fonte grise avec graphite lamellaire (FG)	33
I.13	Matériaux de friction utilisés pour les plaquettes de freins.....	34
I.13.1	Matières premières	34
I.13.2	Procédés de fabrication	37
I.13.3	Description des opérations	38
I.14	Problèmes fréquents des plaquettes de freins.....	39
I.14.1	Arrachement du matériau de friction en raison de la corrosion	39
I.14.2	Arrachement du matériau de friction en raison de contraintes thermiques	39
I.14.3	Arrachement du matériau de friction en raison de contraintes mécaniques.....	39
I.14.4	Détachement du matériau de friction en raison d'un défaut de fabrication.	39
CHAPITRE II : Techniques expérimentales		
II.1	Préparation des échantillons avec le polissage	40
II.2	Les essais de dureté du disque de frein utilisé dans cette étude.....	40
II.2.1	Test Brinell	41
II.2.2	Test Rockwell	41
II.2.3	Dureté Vickers	41
II.3	Diffraction aux rayons x	42
II.4	Microscopie à balayage	43
II.5	Dispositif d'usure.....	44
II.6	Reconstitution du processus de freinage.....	44
II.6.1	Dispositif de fixation de l'étrier.....	44
II.6.2	Pièce de fixation du disque	46

II.6.3 Instrument de mesures	47
II.6.3.1 Le thermomètre à infrarouge	47
II.6.3.2 Clé dynamométrique.....	47
II.6.3.3 Balance analytique.....	48
II.6.4 Déroulement des essais.....	49
II.7 Méthodes mathématiques utilisées	49
II.7.1 Méthodes des moindres carrées	49
CHAPITRE III : Résultats et Discussions	
III.1 Opérations de polissage.....	50
III.2 Composition chimique	50
III.3 Observation de la microstructure.....	50
III.4 : Diffractions aux rayons x	51
III.5 Essais dureté.....	52
III.6 Détermination des températures de contact suivant les vitesses de glissement.....	52
III.6.1 Première partie : conditions ambiantes.....	52
III.6.1.1 Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrées :.....	54
III.6.2 Deuxième partie : freinage avec application d'air comprimé à la zone de contact	55
III.6.2.1 Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrées.....	57
III.6.3 Conclusion partielle	57
III.7 Essais sur dispositif d'usure	58
III.7.1 Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrées.....	60
III.7.2 Calcul de la corrélation.....	61
III.7.3 Conclusion partielle.....	61
CONCLUSION GENERALE	62
Références Bibliographiques.....	63

INTRODUCTION GENERALE

Les industries automobiles n'ont cessé de nous épaté, par l'élan et le degré de performances atteintes, en matières de puissances et de vitesses, des véhicules puissants se déplaçant à des vitesses importantes, ajoute à cela le confort et surtout la sécurité que garantissent ces véhicules, car comme les puissances moteurs ont pris un élan exceptionnel, les systèmes de freinages doivent suivre la tendance, ils doivent eux aussi répondre à des critères de performances très importants.

Il existe plusieurs technologies de freinages, à commencer par les freins à sabots en passant par les freins tambours et enfin les freins à disques, ces derniers sont les plus répandus et les plus utilisés, ils sont jugé comme fiables et plus performants et ils existent sous différents types : disques pleins, disques ventilés et autres comme : les disques percés et les disques rainurés.

Les freins à disque sont utilisé dans plusieurs véhicules de tous types : légers ou lourds, ils sont utilisé dans toute l'industrie automobile, le ferroviaire et même l'aéronautique.

Chaque véhicule (léger dans notre cas), est équipé de 2 disques au minimum et dans d'autres véhicules, les quatre roues sont équipées chacune avec un disque.

En Algérie, selon l'ONS (Office National des Statistiques), le parc national automobile au 31/12/2016 est d'environ 6 millions de véhicules en circulation, tout genre confondu, admettons que chaque véhicule est doté de deux disques de freins, le nombre de disques en action serons de 12 millions avec un prix de 2000 DA le disque, le montant total des disques sera de 24 000 000 000 DA, une somme colossale, en durée de vie d'un disque estimée par les constructeurs de 100 000 KM à 120 000 KM, ou 2 ans de service, d'où la nécessité vitale de contribuer à augmenter la durée de vie du disque, une telle contribution nous fera gagner une somme très importante et nous fera épargné des dizaines de millions de dinars.

D'autres parts, nous nous intéressons à ce problème d'usure du fait, que notre pays investit dans le domaine de la fabrication des véhicules, la fabrication des pièces détachées localement, cela constitue un segment de sous-traitance intéressant, ce qui amène à diminuer le nombre de disques importés.

Pour en faire, notre travail s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré entièrement à la partie bibliographique, où on aborde les types des disques existants, les matériaux de fabrication utilisés, les problèmes fréquents que rencontrent les disques...

Dans le second chapitre, on présente les expérimentations adoptées et les différents protocoles expérimentaux utilisés, ainsi que les différents moyens utilisés.

Et enfin dans le troisième chapitre, on présentera les résultats obtenus au cours de notre travail et on terminera par la conclusion et perspectives.

Chapitre I

Eléments Bibliographiques

PREAMBULE

Le disque de frein est un organe clé dans les systèmes de freinages, garant de sécurité, il demeure très étudié par les ingénieurs et fait partie des freins à friction, technologie omniprésente et largement employée, comme technologie de freinage de mouvement, dans le domaine automobile, aéronautique, ferroviaire et autres. Associé avec des plaquettes de frein, le disque de frein constitue un système tribologique (disque de frein/plaquettes de frein) ; un système tribologique, bien entendu, soumis au frottement et confronté à *l'usure*.

LA TRIBOLOGIE

Au début du 20ème siècle, l'humanité a connu un sursaut industriel énorme dans divers domaines et par conséquent plusieurs nouvelles sciences émergent, dont fait partie la TRIBOLOGIE.

En vrai, la tribologie a une longue histoire à travers les temps et les civilisations du fait que la plus ancienne application connue, de la tribologie, remonte à la civilisation pharaonique (Figure I.1). Donc, ce n'est pas du tout un domaine récent, cependant le vocable fut pour la première fois utilisé par le Dr Peter JOST¹, un ingénieur mécanique britannique, dans un rapport qu'il ait rédigé en 1966 adressé au gouvernement britannique, dans lequel il avise le gouvernement, des pertes colossales que subie l'industrie britannique et qu'ils pourront épargnés jusqu'à 500M£ en appliquant les pratiques et les principes tribologiques.

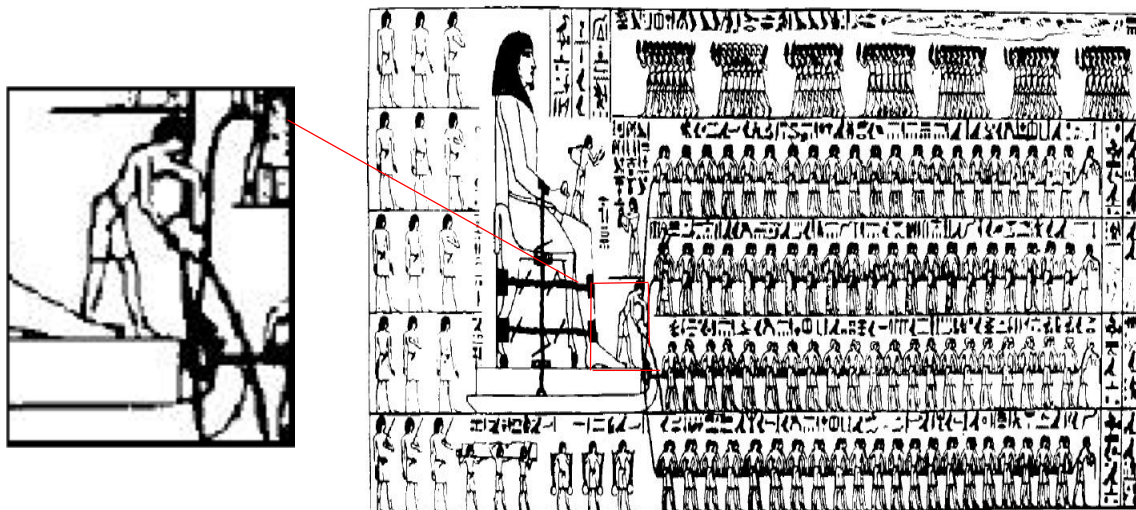


Figure I.1 : Photo qui montre au temps des égyptiens, un bon homme qui faisait de la lubrification [1].

¹ Peter Jost, un ingénieur mécanique britannique, considéré comme étant le père de la tribologie.

Définition de la tribologie

La tribologie, étymologiquement, vient du mot grec « tribos » qui veut dire « frottement » et du suffixe « logy » qui signifie « science » donc la tribologie c'est la science qui étudie les phénomènes de frottement.

En plus du frottement, la tribologie s'intéresse aussi à l'étude des surfaces en contact, de la lubrification et de l'usure ; des phénomènes omniprésents dans l'ensemble des domaines industriels. Elle permet donc d'englober toutes les informations afin de comprendre ces phénomènes pour mieux les traiter et mieux les contrôler. La tribologie s'étend sur divers domaines d'applications et sur plusieurs industries même en médecine, elle s'intéresse aux mécanismes d'opérations des articulations entre les os.

Notion de systèmes tribologiques

Les systèmes tribologiques peuvent être scindés en deux catégories : systèmes ouverts, comme le système : outil/pièce lors des opérations d'usinages, systèmes fermés comme les roulements. Tous les deux peuvent être définis comme étant : ensemble d'éléments en interaction et en mouvement relatif les uns contre les autres.

Nous vient à l'esprit, frottement et usure, en parlant des systèmes tribologiques ; et ce n'est pas uniquement dépendant des propriétés intrinsèques des matériaux mais aussi des interactions et des degrés de sollicitations du tout, et parfois un tout petit changement sur le système peut affecter le coefficient du frottement et le degré d'usure.

Les facteurs principaux qui déterminent un système tribologique sont : le type du matériau, la nature du mouvement, la géométrie des éléments en contact, la nature et l'amplitude du chargement, la température qui en résulte et d'autres aussi.

Afin de choisir les tribo-éléments, qui constituent le système tribologique, certaines mesures doivent être prises en considération tels que les matériaux à utilisés, l'environnement de travail du système, le chargement du système, les mouvements et les sollicitations du système.

Notions sur l'usure

L'usure ou la perte de matière des surfaces est un phénomène très récurrent dans l'industrie. Elle est une réalité très présente et très fréquente, elle demeure centre de préoccupation pour les ingénieurs. L'usure est définie comme étant la perte progressive de matière d'une surface opérante, qui résulte d'un mouvement relatif sur la surface [Peterson and W.O Winer, 1980]

ou -d'une manière simple et caricaturale- la démangeaison des surfaces, en contact direct, en interaction les unes contre les autres. L'usure peut avoir des formes différentes correspondantes aux différents mécanismes d'usure ; à noter qu'une surface peut être sujette aux différents mécanismes d'usure simultanément. Notre compréhension de ce phénomène nous permet de prédire le degré de l'usure, de savoir comment les matériaux réagissent à l'usure ; ce qui nous permettra d'apporter des améliorations sur ces matériaux et par conséquent, nous améliorons l'efficacité, la performance, la durée de vie et le coût de revient des systèmes mécaniques.

L'usure comme défi

Tandis que les systèmes mécaniques-exempts d'usure-et les infailibles modèles prédictifs d'usure, demeurent utopiques, il est à signaler que les ingénieurs tribologistes avancent à pas fermes sur les connaissances des différents aspects d'usure et cela se répercute sur la science des matériaux, la lubrification et les études munies sur les surfaces...

Dans certaines applications telles que, les roulements, il y a un souci majeur de l'usure, du coup, des défis s'imposent aux ingénieurs, cependant, les conditions à lesquelles sont soumises ces surfaces pendant l'usure, sont différentes des conditions présentes lors de la mesure des propriétés mécaniques conventionnelles comme, la dureté, la limite d'élasticité...

Les surfaces font contact aux points de saillis ou aspérités des matériaux, qui interagissent les unes les autres, ce qui conduit à de fortes tensions locales et des déformations plastiques, en plus, toute l'énergie, engendrée par ce frottement se dissipe par le biais de ces interactions, donnant place à de températures transitoires très élevées [Ashby, M.F, Abulawi, J. Kong, H.S, 1991].

Les difficultés que rencontrent, les tribologistes, c'est de décrire avec précision et de modéliser les comportements des surfaces pendant l'usure car cela n'est pas seulement associé aux conditions locales extrêmes, mais à vrai dire, la situation est beaucoup plus compliquée que cela, pour de multiples raisons, premièrement : le processus de l'usure change les compositions et les propriétés des surfaces ; les minuscules particules qui se détachent des deux surfaces, se traitent distinctement comme troisième corps « third body » avec ses propres propriétés et caractéristiques. Les difficultés quant à modéliser les différents aspects, que peuvent avoir ces particules, ont fait eux seuls, coulé beaucoup d'encre [Stachowiak, G.W, 2006], ajoute à cela que le tout change, le long de la durée de vie du système [Berthier, Y, 2006], deuxièmement : la topographie des surfaces changent constamment pendant l'usure

troisièmement : les mécanismes de l'usure sont souvent compliqués où s'entremêlent des processus mécaniques et chimiques, par exemple : dans le cas d'un environnement non lubrifié de deux pièces d'acier en contact, il y a présence d'un arrachement, mécanique, de matière, tandis que dans le cas un environnement où il y a un « tribofilm » de lubrifiant, la source de l'usure dans ce cas est souvent, la réaction chimique entre la surface de l'acier et les additifs du lubrifiant. Ni les interactions mécaniques ni chimiques ne peuvent être à ce jour modélisées parfaitement.

De nombreux auteurs ont proposé des formules empiriques pour décrire l'usure [J.F.ARCHARD, 1953].

Loi d'Archard :

$$Q = K \cdot \frac{F \cdot L}{H} \quad (\text{I.1})$$

Q : représente le volume de matière arraché ;

K : coefficient d'usure ;

F : le chargement normal en newton ;

L : distance de glissement en mm ;

H : dureté du matériau le plus tendre dans le contact.

Classification d'usure : mécanismes et modes

L'usure n'est pas une propriété des matériaux, mais une réaction des systèmes [Kato, K, 1997]. Le taux d'usure varie selon les conditions de contact, telles que : la nature des matériaux, la vitesse du déplacement relatif, la géométrie du contact, le degré de pression du contact, l'environnement et la lubrification [Winner, W.O, 1980].

classes	paramètres					
Type de frottements	roulement	roulement-glissement		glissement	fretting	impacts
Géométrie du contact	Sphère/sphère	cylindre/cylindre	Plan/plan	Sphère/plan	Cylindre/plan	
Degré de pression de contact	Elastique		Elasto-plastique		plastique	
Degré de vitesse du glissement/chargement	faible		moyen		fort	
température	faible		moyenne		fort	
Nature des matériaux en contact	pareil	doux	durs	compatibles	incompatibles	
Environnement	vide	gaz	liquide		Pâte/graisse	
Phases d'usure	solide	gaz	liquide	atome	ion	
Unités de taille d'usure	Echelle de mm		Echelle de μm		Echelle de nm	
Mécanismes d'usure	mécanique		chimique		thermique	
Modes d'usure	Abrasion	Adhésion	Fatigue	Corrosion	Érosion	Fusion

Tableau I.1 : Les différents paramètres de l'usure.

Les différents modes de l'usure

Dans leur livre : physique et ingénierie des surfaces, [Cornets et Deville, 1998] ont proposé des répartitions des différents modes et types, les plus fréquents, à l'origine de l'usure dans le milieu industriel, il est à noter, que la fréquence de chaque type diffère d'un domaine industriel à l'autre.

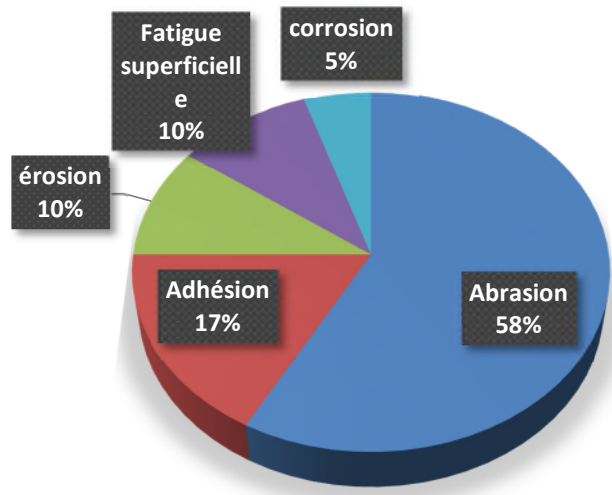


Figure I.2 : Différents, modes d'usure, présents dans l'industrie.

Usure abrasive

Une surface est poncée par un corps de dureté supérieure, qui est la surface opposée ou les particules dures présentes ; ces particules peuvent être étrangères ou issues de la dégradation des surfaces en contact, elles peuvent être incrustées à la surface la moins dure (abrasion à deux corps) ou se loger entre les deux surfaces (abrasion à trois corps).

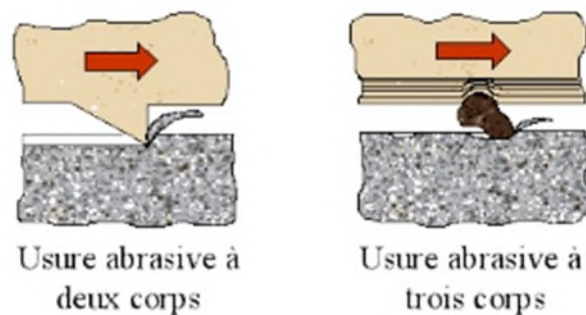


Figure I.3 : illustration de l'usure abrasive.

Usure adhésive

L'usure de type adhésive est souvent engendrée, soit par un mécanisme mécanique, soit par une réaction physico-chimique, entre les surfaces en contact. Les énergies très élevées mises en jeu, causent les microsoudures des micro-aspérités des matériaux en contact, donc il y a deux cas de figures ; dans le cas où il y aurait rupture des microsoudures, on dit qu'il y a eu usure douce, dans le cas où l'adhésion n'est pas rompue et il y a eu rupture d'un des matériaux constituant le système, on dit qu'il y a eu usure sévère (Figure I.4).

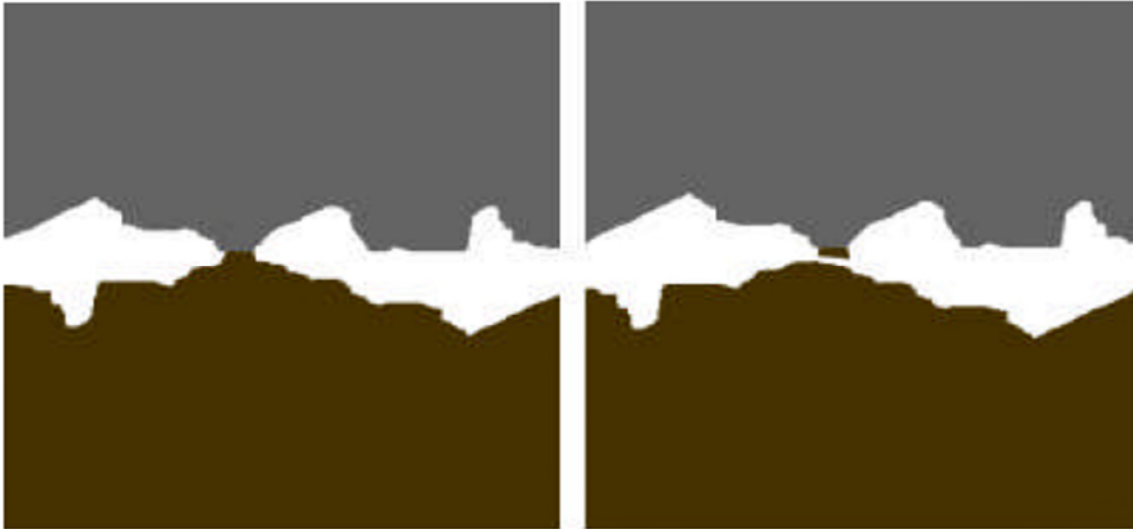


Figure I.4a : cas usure adhésive douce.

Figure I.4b : cas usure adhésive sévère.

Usure corrosive

En présence d'un phénomène de corrosion pur, on peut atteindre un état stationnaire correspondant à la formation d'une couche superficielle jouant le rôle de barrière entre les deux phases susceptibles d'interagir ; sous l'effet d'une action mécanique cette couche peut être partiellement détruite (dé-passivation mécanique) et deux mécanismes vont alors intervenir : mécanique, l'attaque et la reconstitution de la couche passivante attaque le métal par corrosion, reconstitution de la couche superficielle.

Le résultat global dépend des cinétiques relatives entre la dé-passivation [A. Cornet et J.-P. Deville, 2002].

Exemples de systèmes tribologiques

Nous vivons dans un monde où la vie est tellement riche et diverse, que nous sommes entourés d'un tas de phénomènes et de systèmes en interactions, qui sont considérés comme systèmes tribologiques -même en nous-mêmes, autant qu'êtres humains-, dans notre corps certains mécanismes peuvent être énumérés comme étant systèmes tribologiques tel que : nos articulations.

On peut citer d'autres aussi comme :

- Les roues du train sur rails ;
- Les roulements ;
- Outils/pièces, lors des opérations d'usinage ;
- Cylindre/piston, dans les moteurs à combustions interne ;

- Les systèmes de freinages.

Les systèmes de freinages

Ces dernières années, le domaine de transport a connu un élan spectaculaire en matière de performances et de puissances ; les systèmes de freinages eux aussi doivent accompagner la tendance, d'autant qu'ils sont des organes garants de sécurité et de confort, ils sont appelés à transformer la totalité de l'énergie cinétique du véhicule en énergie calorifique pour freiner le véhicule (cas des freinages à frictions), pour cela, ils doivent répondre à de fortes exigences et critères en matière de performances et d'efficacité.

Les principales exigences, auxquelles les systèmes de freinages doivent satisfaire, peuvent être résumées comme suit :

- Distances de freinage aussi courtes que possible, quelles que soient les conditions de service
- Bon confort de freinage (pas de broutage, pas de crissement)
- Durée de la vie des pièces d'usure suffisante [1].

Structure générale des systèmes de freinages

Les technologies de freinages sont diverses et multiples, qui sont montés sur tous les véhicules, (Figure I.5). Au début du 20^{ème} siècle les véhicules étaient équipés de frein à tambour ; ce système est devenu progressivement obsolète avec l'accroissement de l'énergie cinétique à dissiper et s'est vu progressivement remplacé par le frein à disque. Aujourd'hui, il existe beaucoup de technologies employées pour les freinages, comme les freins aérodynamiques, les freins rhéostatiques, les freins régénératifs, utilisés dans les ascenseurs et dans la plupart des véhicules électriques et hybrides, cependant dans ce travail, nous y intéressons seulement aux systèmes de freinages à friction, plus précisément aux freins à disques ; des systèmes dont le principe de fonctionnement est de transformer l'énergie cinétique du déplacement en énergie thermique ou calorifique, sous forme de chaleur engendrée par le frottement.

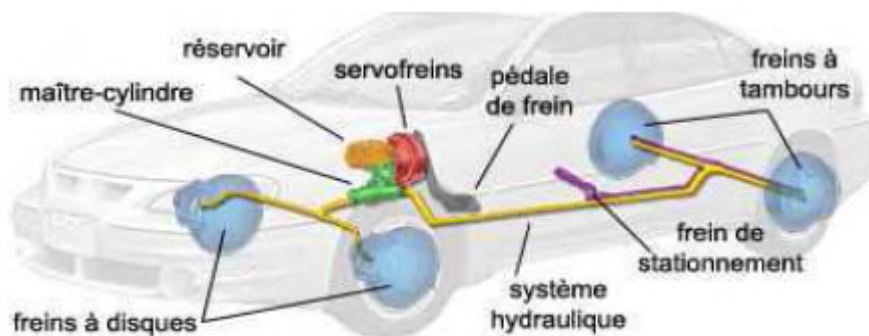


Figure I.5 : Schéma d'implantation du système de freinage [2].

Les différents types de freins à friction

Freins à sabots

Apparus pour la première fois sur les chariots tirés par les animaux, il sera vite remplacé par les freins à tambour. Le premier frein à friction est apparu sous forme de sabots sur les chariots tirés par des animaux. Pour freiner le mouvement, on pressait les sabots contre les roues du chariot. Ce dispositif, toujours utilisé dans l'agriculture et parfois dans le domaine ferroviaire, a été repris par l'automobile lorsque la vitesse des voitures ne dépassait pas les 25km/h [3].

Les freins à sabots ont vite été remplacés par les freins à tambour et les freins à disques, beaucoup plus efficaces.

Les freins à tambours

Très souvent en fonte, utilisé généralement à l'arrière des véhicules, composés : d'un tambour solidaire du moyeu et qui tourne avec la roue, de composants qui génèrent la force de freinage, qui sont généralement montés sur un plateau circulaire qui ferme le tambour et qui est fixé rigidement au porte-moyeu.

Des ressorts hélicoïdaux tirent en permanence sur les deux segments, ou mâchoires en les empêchant de frotter contre le tambour lorsque les freins ne sont pas actionnés.

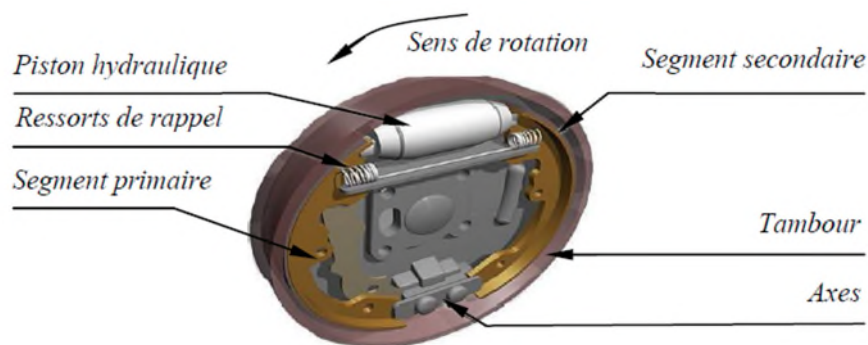


Figure I.6 : Vue 3D d'un frein à tambour [4].

D'autres techniques aussi sont employées pour commander les deux mâchoires de freinage (Figure I.7).

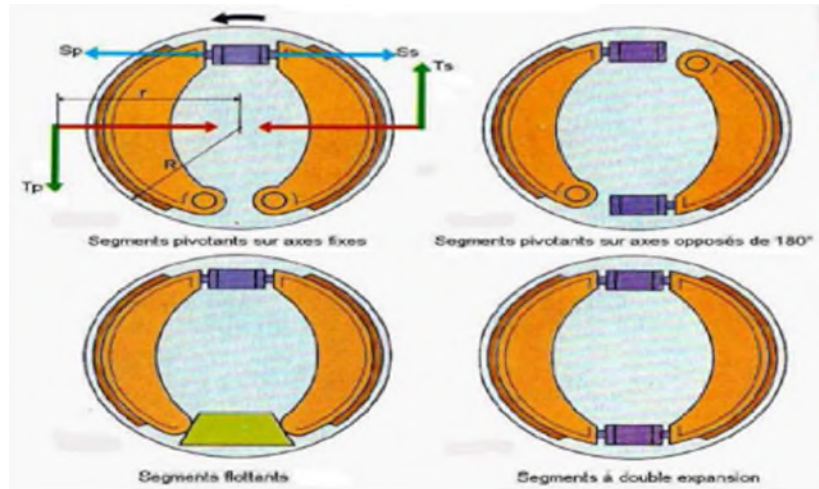


Figure I.7 : Différentes technologies utilisées [5].

Les freins à disques

C'est des systèmes de freinages, apparus dans les années 1950, ils sont les systèmes les plus utilisés de nos jours, très performants et très efficaces, ils sont largement utilisés en automobile, aviation, ferroviaire et autres.

Les composants des freins à disques

Le système de freinage à disque se réunit de trois éléments majeurs pour un fonctionnement optimal.

Etrier

L'étrier (Figure I.8) est un support sur lequel viennent s'insérer les deux plaquettes de freins, qui est lui-même monté sur un support étrier, il est muni d'un piston, qui lui est raccordé à un circuit hydraulique ou pneumatique, qui débouche jusqu'à la pédale de frein



Figure I.8 : Exemple d'un étrier fixe [6].

Les plaquettes de freins

Les plaquettes de freins représentent le corps de friction sur le disque, elles sont faites à base de matériaux organiques ou semi-métallique collés ou rivetés sur une plaque support et sous-couche réduisant les transferts thermiques (Figure I.9).

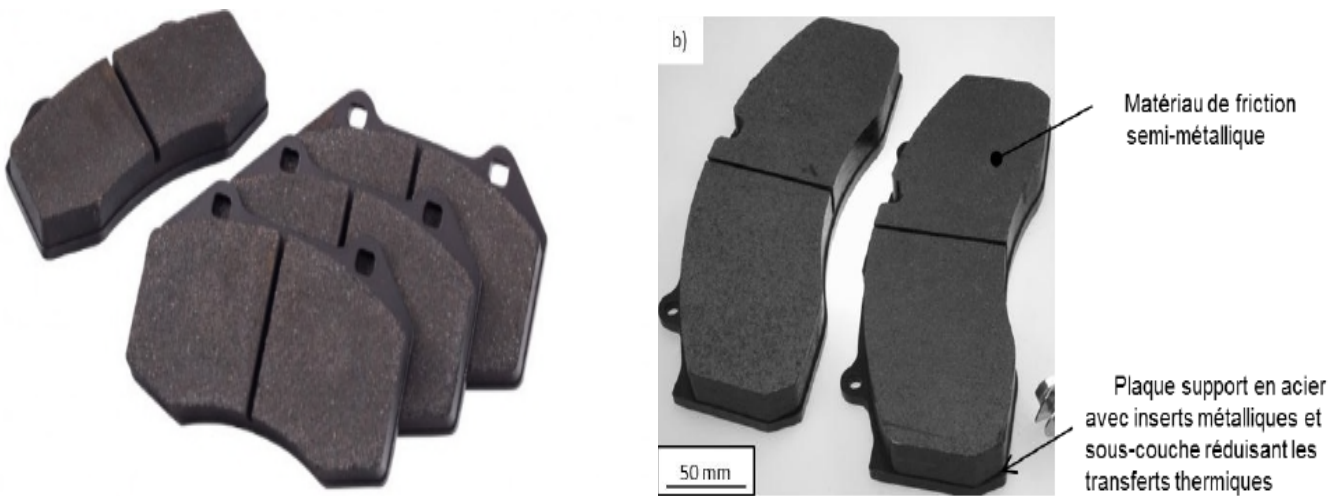


Figure I.9a : Exemple de plaquettes de marque FERODO [7]. Figure I.9b : Plaquettes de frein semi-métalliques [8].

Le disque

C'est un élément qui est monté sur le moyeu, et que les deux plaquettes viennent le prendre en sandwich, (Figure I.10), il est généralement en fonte, le disque doit présenter des caractéristiques mécanique exemplaires et faire objet d'un bon comportement thermique et tribologique.

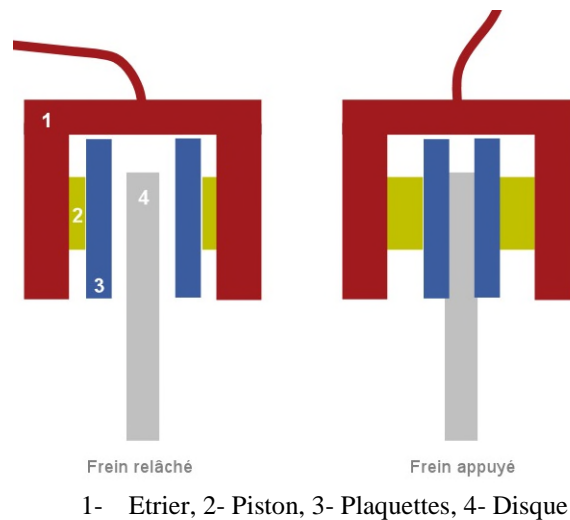


Figure I.10 : Mécanisme simplifié du frein à disque [9].

Les types de disques de freins

Les disques sont des composants soumis à de fortes températures. Ils existent sous formes pleines, afin d'augmenter l'échange thermique entre le disque et l'air environnant, ou sous formes ventilés. En diminuant la température, on garantit un meilleur frottement des garnitures sur les disques. On peut énumérer deux grandes catégories de disques de freins : disques pleins et disques ventilés.

Les disques pleins

Ils sont les plus simples, ils se composent d'une couronne, comme piste de frottement, avec les deux plaquettes et d'un bol sur lequel il est monté sur le moyeu du véhicule (Figure I.11).



Figure I.11 : Disques de frein plein [10].

Les disques ventilés

Ils sont de géométrie plus complexe, ils sont d'utilisation récente par rapport aux disques pleins. Composés de deux couronnes appelées -flasques- séparées par des ailettes de géométries diverses (Figure I.12) ; ils refroidissent mieux, par convection avec le milieu environnant. Le disque ventilé comporte plus de matière que le disque plein, il permet donc une meilleure absorption d'énergie calorifique.

Il existe plusieurs géométrie d'ailettes parmi lesquelles différents paramètres sont pris en compte.

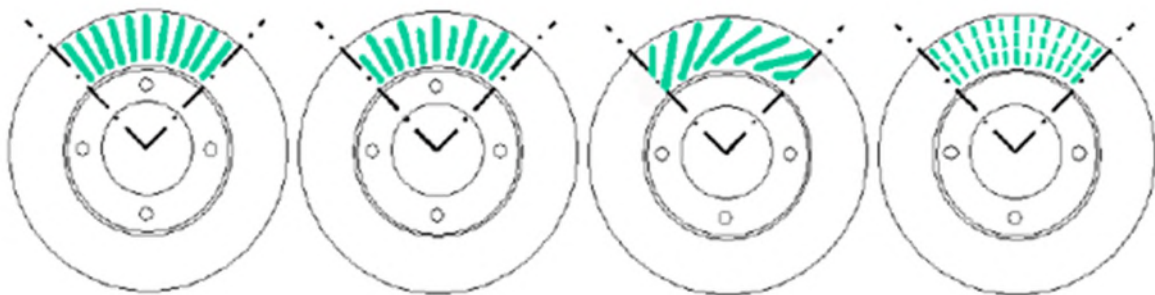


Figure I.12 : Différentes géométries d'ailettes [11].



Figure I.13 : Disque de frein ventilé [12].

Les ailettes

Les ailettes sont conçues pour mieux refroidir le disque et pour une meilleure évacuation de la température (Figure I.14). Une coupe sur la face d'un disque ventilé montre clairement l'ingénierie et la finesse dans la conception des ailettes (Figure I.15).

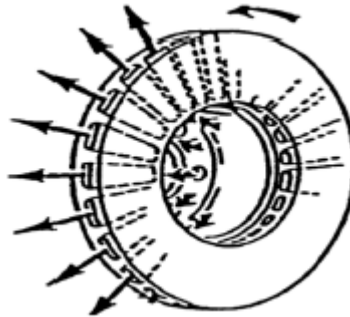


Figure I.14 : Circulation de l'air dans les canaux d'un disque ventilé [13].



Figure I.15 : Coupe sur un disque ventilé [14].

Les disques rainurés

Conçus pour des raisons, généralement, mal comprises ; combien d'entre nous ont cru, que les rainures sont là pour un souci de refroidissement !? En vérité les rainures sont-là pour leurs rôles autonettoyants des surfaces des plaquettes et pour briser la couche gazeuse, qui se forme entre les garnitures et le disque, une fois des températures très élevées atteintes [15].



Figure I.16 : Disques de frein rainurés [16].

Les disques percés

Le perçage des disques permet en plus du refroidissement, le nettoyage des disques, les trous sont plus efficaces avec le temps car ils sont plus ou moins autonettoyants. Mais l'augmentation du nombre de trous réduit la surface de friction ; un disque avec une masse insuffisante a tendance à craqueler et à se fissurer (Figure I.17).



Figure I.17 : Disques de freins percés [17].

Problèmes récurrents et dommages typiques des disques de freins

La fissuration

La fissuration des disques de freins (Figure I.18) se produit souvent sur les disques à causes des fortes températures que les disques atteignent pendant les opérations de freinages. Lors du freinage le disque de frein subit une forte variation de la température induite par le frottement avec les plaquettes, à vrai dire la température peut varier de 20°C à plus de 700°C en l'espace de quelques secondes [18].

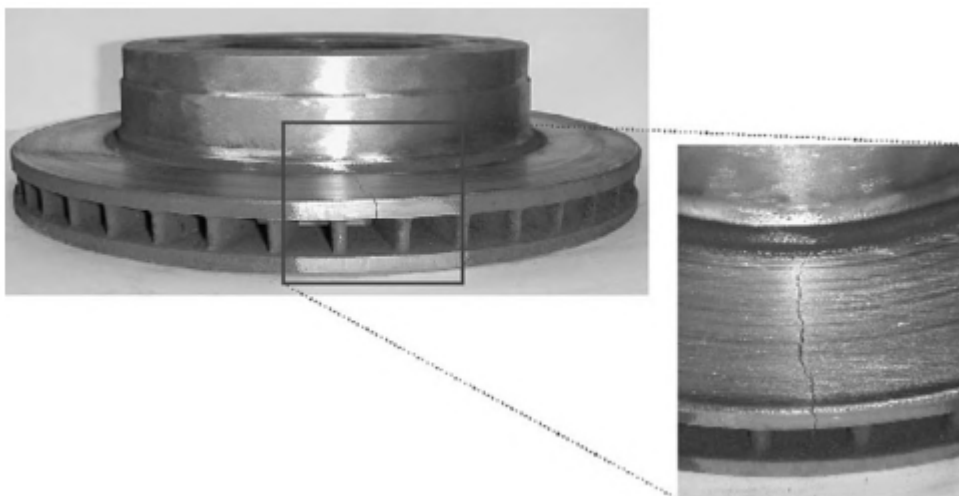


Figure I.18 : Fissure radiale visible, qui se propage le long de la piste de frottement [19].

Ces variations abruptes ne permettent pas à la température de s'homogénéiser ce qui conduit à des fissurations et d'autres anomalies qui seront traités plus tard. Souvent aussi des ramifications de fissures minimales apparaissent sur le disque, on parle alors de faïençage thermique (Figure I.19).

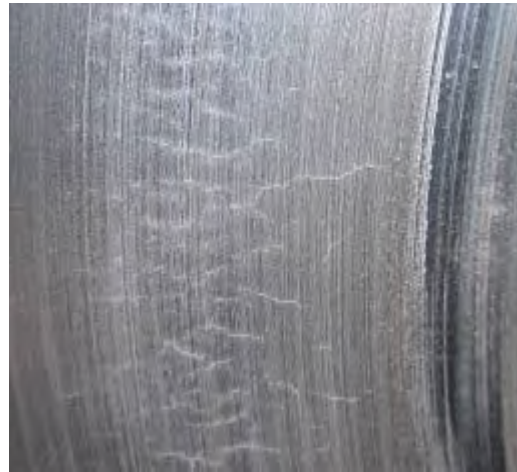


Figure I.19 : Ramification de fissure, phénomène appelé faïençage.

La fissuration radiale est due à des cycles de fatigue thermomécaniques et à des contraintes résiduelles de traction dans le sens circonférentiel apparaissant au cours du refroidissement [20]. Nguyen [20] décrit les étapes conduisant à ces contraintes résiduelles au cours de cycles freinage d'arrêt–refroidissement successifs. Nombre de solutions ont été dégagées des travaux de recherches qui ont été réalisés sur ce sujet de déformation thermiques, on se permet de citer les suivantes :

- Accroître la résistance à la rupture et la résistance à la fatigue des matériaux de fabrication ;
- Diminuer les températures de contact ;
- Repenser le design du disque-moyeu d'une façon à réduire les contraintes résiduelles [21].

La corrosion

Les surfaces de frottement des disques de frein peuvent présenter une formation importante de rouille, (Figure 20) par l'effet des agents environnementaux par exemple l'humidité, atmosphère salée. Les disques peuvent être protégés par des revêtements adéquats des surfaces de contact.



Figure I.20 : Disque de frein rouillé [22].

L'usure des disques de freins

L'usure des disques de freins est le problème majeur que rencontrent les ingénieurs

Les disques de frein doivent à la fois supporter les fortes variations de températures et aussi résister aux fortes sollicitations mécaniques, c'est pour cela qu'ils sont généralement fabriqués à base de matériaux avec un bon comportement thermomécanique, ajoute à cela le paramètre coût, il faut qu'ils soient rentables. La fonte grise à graphites lamellaires est communément le matériau le plus utilisé pour fabriquer les disques de frein pour le secteur automobile, justement à cause de sa haute résistance à l'usure et cela en ajoutant une riche plage des additives qui peuvent être incorporés, ce qui nous permet de jouer sur les différentes caractéristiques thermomécanique du matériau.

Les matériaux de prédilection pour les disques de freins

Les fontes

Les fontes sont des alliages de fer et de carbone en proportions allant de 2,11% à 6.67% de carbone, en masse (Figure I.22). Les fontes se distinguent des aciers au carbone par une sursaturation en carbone, qui peut précipiter sous la forme de graphite au moment de la solidification.

Les fontes sont réputées pour leur excellente coulabilité.

La fonte a une température de fusion allant de 1 135 °C à 1 450 °C, essentiellement en fonction du pourcentage de carbone et de silicium qu'elle contient. Lorsqu'elle est en fusion, sa teneur maximale en carbone dépend de sa température. Au moment de la solidification, la quantité de carbone précipitant sous la forme de graphite dans la matrice métallique dépend

des autres éléments d'addition présents (essentiellement le silicium) et des vitesses de refroidissement [23].

Le moyen principal utilisé pour l'élaboration de la fonte est le haut fourneau, dans lequel se déroule le processus métallurgique de réduction, fusion, ainsi que la carburation du fer.

Le but principal du haut fourneau est d'extraire le métal (fer) de son minerai et sa séparation des impuretés.

Le haut-fourneau est un four à forme circulaire (Figure I.21) destiné à l'élaboration de la fonte, son espace de travail se compose du bas vers le haut des parties suivantes :

1- Le creuset : partie cylindrique, dont la partie supérieure est appelée ouvrage et porte les tuyaux qui amènent l'air chaud. La partie inférieure porte deux trous, l'un pour la coulée de la fonte et l'autre pour la scorie (laitier).

2- L'étagage : tronc de cône évasé vers le haut ;

3- Le ventre : partie cylindrique ;

4- La cuve : tronc de cône évasé vers le bas ;

5- Le gueulard : ouverture par laquelle on introduit la charge et d'où s'échappent les gaz ;

6- Blindage métallique ayant même profil que le haut-fourneau ;

7- 8 éléments de refroidissement du blindage métallique ;

9- fondation ;

10- minerais de fer + fonte ;

11- coke ou charbon ;

12- évacuation des gaz ;

13- tuyère.

Les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte sont :

- Le minerai de fer

- Le coke ou charbon.

- Les additifs.

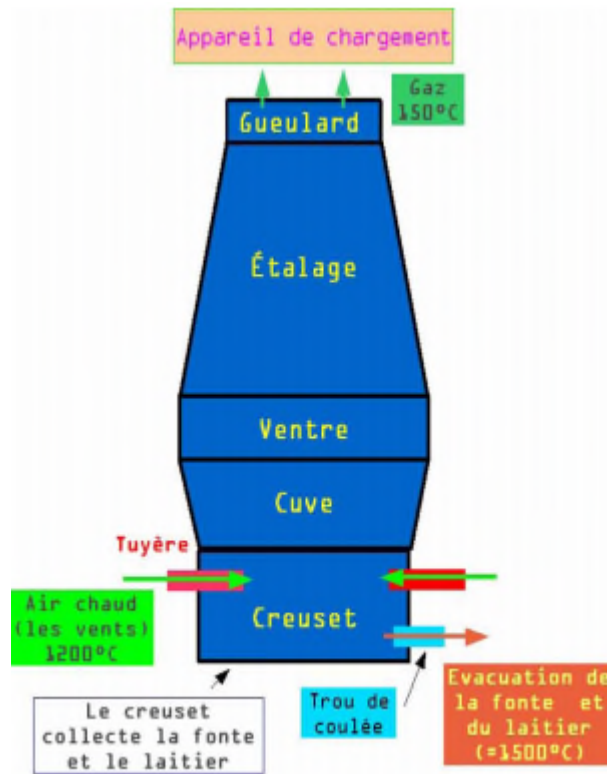


Figure I.21 : Haut fourneau pour obtention de fontes [25].

Le produit principal du haut fourneau est la fonte appelée aussi fonte de première fusion. Elle est obtenue à l'état liquide à une température près de 1400°C et avec une teneur en carbone de 3,5 à 4,5% et de teneur variable en Si, Mn, P, S. Elle peut aussi renfermer d'autres éléments tels que Ti, Cr, etc. Le produit secondaire obtenu lors de l'élaboration de la fonte est le laitier (scorie) dont les principaux composants sont CaO, SiO₂, Al₂O₃ et MgO [24].

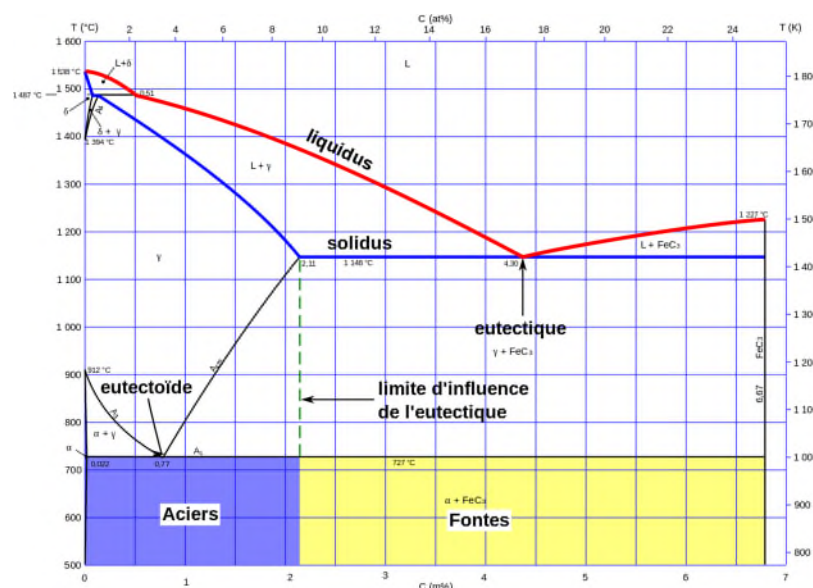


Figure I.22 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [26].

D'un point de vue chimique, les fontes sont des alliages fer-carbone contenant une phase eutectique, appelée lédéburite. Sur le diagramme de phase fer-carbone métastable, il s'agit donc des alliages fer-carbone ayant plus de 2,11 % de carbone. On distingue les différentes fontes par leur pourcentage de carbone. Dans le cas d'un alliage pur de fer et de carbone, on relève les seuils suivants :

Fonte hypo eutectique : de 2,11 à 4,3 % de carbone ;

Fonte eutectique, appelée lédéburite : 4,3 % de carbone, cette fonte a la température de fusion la plus basse à 1 148 °C ;

Fonte hyper eutectique : de 4,3 à 6,67 % de carbone.

On a deux types de fontes :

Les fontes blanches, à cémentite ;

Les fontes grises, à graphite.

Structures métallographiques de la fonte

Bainite

Constituant de trempe, structure en aiguilles de ferrite+cémentite. Dure et facile à usiner [27, 28].

Cémentite Fe₃C

C'est le composant principal des fontes à maille orthorhombique elle est très dure (750 HB), Fragile ($R_m = 700\text{N/mm}^2$, $A = 0\%$). Confère une bonne tenue à l'érosion et à l'abrasion. Contient environ 6,7% C [27, 28].

Martensite

Constituant de trempe composé de carbone en insertion saturée dans le Fer α , très dure (800Hv) et fragile [27, 28].

Perlite

Alliage de fer et de carbone à 0.83% de carbone et qui a une structure lamellaire ou globulaire (coalescée) de ferrite+cémentite. Elle est dure (400 HB), tenace ($R_m = 850\text{N/mm}^2$), ductile ($A\% = 10\%$). Facile à usiner, bonne résistance aux efforts statiques et à l'usure par frottements [27, 28].

Troostite

Constituant obtenu par trempe après revenu, c'est un agrégat ferrite + cémentite. HB = 250 à 400 [27, 28].

Influence des principaux éléments présents dans les fontes

Cuivre

Élément graphitisant qui contribue fortement au raffinement de la perlite par son action γ -gène. En outre, le cuivre est fortement antiferritisant, alors que le nickel est sans effet.

L'introduction dans la fonte de cet élément entraîne une augmentation de la résistance et de la dureté. Élément soluble dans le fer jusqu'à 1.5%. 1% de cuivre équivaut à 0.3% de silicium. Il stabilise le graphite et affine la perlite [29, 30].

Manganèse

Empêche la graphitisation et renforce les liaisons atomiques entre le fer et le carbone dans la cémentite. Il est maintenu à une teneur suffisante pour neutraliser le soufre en formant du sulfure de manganèse (MnS). Au-dessus de cette proportion, il agit comme un faible stabilisant des carbures. En outre il affine la perlite et de ce fait élève la résistance à la traction. Sa teneur dans les fontes grises est généralement de 0.5 à 0.8% [29, 30].

Molybdène

Élément carburigène, il favorise la formation de structure aciculaire et affine celle-ci bonne action sur la résistance aux chocs. On l'associe souvent au nickel et au chrome en addition de 0.3 à 1%. On peut en trouver jusqu'à 10% dans les fontes blanches [4].

Nickel

Élément graphitisant, il contribue aussi au raffinement de la perlite.

Soluble dans le fer, il n'est pas carburigène, trois fois moins énergétique que le silicium. Il affine la structure et plus on en ajoute, plus il modifie celle-ci qui passe de perlite en martensite, puis en austénite [29, 30].

Silicium

Élément graphitisant de base dans les fontes grises ($\% > 3$) qui diminue la solubilité du carbone à l'état liquide dans l'eutectique et solide dans l'austénite. Il augmente le caractère réfractaire des fontes et leurs tenus à certaines corrosions.

C'est un graphitisant puissant, il déplace les points de transformation vers la gauche ainsi pour 2% de silicium, l'eutectique se trouve à 3.7% au lieu de 4.3% de carbone, et l'eutectoïde à 0.6% de carbone au lieu de 0.8% de carbone. Il augmente également la température eutectique. Ces deux actions combinées font diminuer l'intervalle de solidification pour une teneur en carbone donné, d'où une meilleure fluidité. On en trouve généralement de 1% à 3%. Le silicium augmente la résistivité des fontes [29, 30].

Soufre

C'est un élément nuisible qui diminue la coulabilité, qui dégrade les propriétés mécaniques de la fonte. Il stabilise les carbures et rend la fonte dure, fragile et poreuse. On combat son effet par une addition de manganèse [30].

Chrome

C'est un élément très durcissant et carburigène. Il favorise l'extension du domaine ferritique et affine la perlite, ainsi le domaine de présence de la phase γ est réduit, améliorant ainsi les caractéristiques mécaniques.

Avec 1% de chrome, apparition des carbures.

Avec 2% de chrome, la fonte devient blanche.

Avec 12% de chrome les carbures s'affinent.

Avec 30% de chrome la structure est une ferritique au chrome donnant une bonne résistance à la corrosion [30].

Les types de fontes

Fontes hypoeutectiques

Fontes à 2.15% C

A partir de l'alliage liquide et à la température de 1380°C se précipite l'austénite primaire pauvre en carbone, le reste du liquide s'enrichit en carbone. A la température $T = 1147^\circ\text{C}$ l'austénite contenant 2,06% C (point E) et le reste du métal contenant 4,3% C (point C) se solidifient dans le palier eutectique en formant le Lédéburite.

Avec l'abaissement de la température et lors du refroidissement se reproduisent des transformations dans l'alliage, à partir de l'austénite primaire se trouvant dans le Lédéburite se précipite la cémentite secondaire (CmII), jusqu'à la température $T = 723^\circ\text{C}$ l'austénite à 0,8% se transforme en perlite (eutectoïde). A la température ambiante la structure d'une telle fonte

se compose de l'austénite primaire dissoute dans la perlite, du Lédéburite et de la cémentite secondaire dans les joints de grains.

Fonte à 2,5% C

Lors du refroidissement et à partir de la température $T = 1350^{\circ}\text{C}$ se précipite l'austénite primaire suivant la ligne BC. Jusqu'à la température $T = 1147^{\circ}\text{C}$ le reste du métal liquide contient 4,3% C (point C) et se transforme eutectique en Lédéburite, si on poursuit le refroidissement se précipite la cémentite secondaire à partir de l'austénite et jusqu'à

$T = 723^{\circ}\text{C}$ l'austénite décarburée jusqu'à 0,8% C se transforme en perlite.

A la température ambiante la structure d'une telle fonte se compose de la perlite, de l'austénite dendritique et du lédéburite.

Fonte eutectique (fonte à 4,3% C)

L'alliage liquide à 4,3% C se solidifie sans précipitation primaire et donne directement à $T = 1147^{\circ}\text{C}$ (point C) l'eutectique le Lédéburite. La structure caractéristique du Lédéburite est représentée par la figure 89.

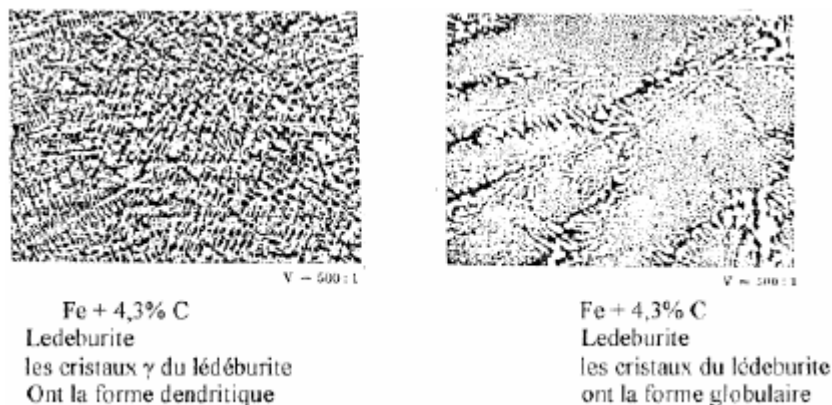


Figure I.23 : La structure caractéristique du Lédéburite [32].

Fontes hypereutectiques

Fonte à 5,5% C

Lors du refroidissement et lorsque le liquidus Cd est atteint, il y a précipitation de la cémentite primaire. Avec la diminution de la température le reste du liquide devient pauvre en carbone et contient à $T = 1147^{\circ}\text{C}$ une teneur en carbone de 4,3%, à cette température et à cette concentration il se solidifie au palier eutectique en libérant du lédéburite [32].

Désignation normalisée des fontes selon AFNOR

La fonte est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2%, éventuellement une fonte contient d'autres éléments introduits volontairement ou non. Les fontes se divisent en deux groupes selon leur mode d'élaboration (suivant l'état d'existence du carbone sous forme de cémentite ou de graphite).

Fontes blanches

La totalité du carbone se trouve sous forme de cémentite Fe_3C . Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide et la température de coulée est assez basse. La cémentite n'a pas de temps pour se décomposer et on obtient une fonte sans graphite. Cette fonte est dite blanche car la cassure présente un aspect métallique blanc, il y a absence de carbone libre. La teneur en Si, C, P est relativement faible, tandis que la teneur en Mn est élevée. Ces types de fontes sont obtenus dans le haut fourneau et sont généralement utilisés pour l'élaboration de l'acier ou de la fonte grise.

Fontes grises

La totalité du carbone est libre et se trouve sous forme de graphite, elles sont obtenues lors du refroidissement lent et température de coulée assez élevée, alors la cémentite peut se décomposer en donnant du carbone libre sous forme de graphite.

L'aspect de la cassure à une couleur grise ce qui prouve la présence du carbone libre. L'élément indispensable pour obtenir une fonte grise est le silicium jusqu'à une teneur de 3% ; ensuite viennent le cuivre et le nickel dont le premier possède un pouvoir antiferritisant énergétique au cours du refroidissement mais facilitant la formation de carbure libre (point dur) et la ferrite libre (point doux) et le second (nickel) possède un pouvoir graphitisant plus meilleur que celui du cuivre, mais un pouvoir antiferritisant négligeable. Généralement les fontes grises sont obtenues dans des fours appelés cubulots. Pour leur désignation normalisée, les fontes sont classées en deux catégories :

- Fontes non alliées.
- Fontes alliées [33].

Désignation des fontes non alliées

Fontes grise à graphite lamellaire

Pour leur désignation on utilise le symbole normalisé **Ft** suivi de la valeur en daN/mm de la résistance minimale à la rupture de traction. Elles possèdent une excellente coulabilité et

usinabilité mais présentent des propriétés mécaniques assez défavorables (fragiles et non malléables).

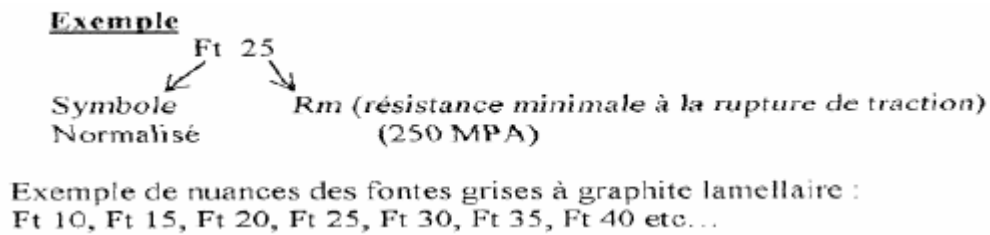


Figure I.24 : Désignation des fontes à graphites lamellaires [33].

Fontes grises à graphite sphéroïdal

Les fontes à graphites sphéroïdal sont désignées par le symbole FGS, suivi de la valeur en N/mm^2 de la résistance minimale à la rupture de traction et de la valeur de l'allongement après rupture en %.

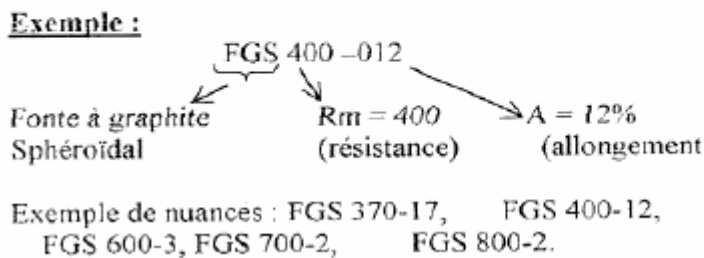


Figure I.25 : Désignation normalisée des fontes à graphite sphéroïdal [33].

Désignation des fontes alliées

Les fontes alliées sont obtenues par addition d'éléments d'alliages lors de la fusion. Ces éléments sont le Ni, Cr, Mo, Ti, Va, Si etc...

Elles possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles des fontes déjà considérées.

Elles sont à graphite lamellaire ou sphéroïdal et ferritiques ou austénitiques.

Elles sont désignées par :

- Lettre L ou S : lamellaire ou sphéroïdal.
- Symboles normalisés des éléments d'addition rangés par teneur décroissante.
- Teneur moyenne en % des éléments d'addition rangés dans le même ordre que ces éléments sans facteur multiplicatif [33].

Exemple

L-NSC-30-5-5;

Fonte austénitique à graphite lamellaire ayant des teneurs moyennes en Ni (30%) en Si (5%) et en Cr (5%).

Fontes blanches

On sait que le silicium est un élément graphitisant, contrairement au manganèse, qui facilite la formation de cémentite, on sait aussi que la composition chimique ne suffit pas à elle seule pour définir le caractère blanc de la fonte, car la sélection de la structure se fait au moment de la solidification. Lorsque la vitesse de solidification est rapide, on obtient de la fonte blanche [31].

Fontes grises

Famille des fontes où le carbone se trouve sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, ou l'ajout de composants graphitisants comme le silicium.

L'appellation de fonte grise est due à l'aspect de la cassure qui est grise contrairement à la fonte blanche dont la couleur de la cassure est blanche.

Fontes grises à graphites sphéroïdales

Les fontes à graphite sphéroïdal possèdent de bonnes propriétés mécaniques par rapport aux fontes Ft. Plus la sphéricité des particules est élevée plus les propriétés sont bonnes. La modification de la structure du graphite (passage du graphite lamellaire au graphite sphéroïdal) est obtenue par addition d'éléments d'alliages dans le métal liquide lors de sa coulée. Le premier élément ayant été utilisé est le cérium, mais aujourd'hui on utilise le plus souvent le magnésium sous forme d'alliages nickel-magnésium ou ferrosilicium-magnésium le procédé d'obtention des fontes à graphite sphéroïdal consiste à un traitement au préalable de la fonte tels que :

- Désulfuration

- Démanganisation si nécessaire, car la teneur en manganèse doit être fixée à l'avance si on veut obtenir des structures ferritiques ou perlitiques. Pour les structures ferritiques (Mn = 0,10 à 0,30) %, pour les structures perlitiques (Mn jusqu'à 0,90%).

L'introduction du magnésium s'effectue lors de la coulée et à une température de 1350 à 1500°C et selon différentes méthodes.

Méthode sandwich

Avant la coulée le magnésium est introduit dans la poche sous forme d'alliage, recouvert de rébus de tôles d'acier. La fonte à modifier est coulée directement sur sandwich.

Méthode plongeur

Une "cloche en réfractaire percée de trous et contenant le magnésium est entraînée mécaniquement vers le fond de la poche remplie de fonte liquide.

Pour la fabrication des disques de freins, le matériau le plus utilisé est la fonte grise à graphite lamellaire, pour des raisons multiples, tel que la facilité d'obtention, elle a une coulabilité excellente, en plus de cela la fonte à graphite lamellaire possède une très grande résistance à l'usure et à l'abrasion dans les contacts frottant à sec, elle est dotée également d'une grande résistance à la traction.

La fonte à graphite lamellaire présente également, une bonne conductivité et diffusivité thermiques.

En plus des tous les avantages physiques et mécaniques cités ci-dessus, la fonte à graphite lamellaire est avec coût relativement bon.

Elle est fabriquée à partir du même métal brut que la fonte grise mais requiert une pureté plus élevée. La coulée ne devra pas contenir de Pb, As, Sb, Ti, et Al et très peu de phosphore et de soufre. En ajoutant des quantités minimales de magnésium à la coulée avant la fonte, le graphite sera formé en forme sphérique et non en lamelles (Figure I.26). La fonte ductile montre une plus grande résistance et ductilité que la fonte grise de composition similaire. La présence de carbone dont la teneur est de l'ordre de 3% en masse pour faciliter leur élaboration, en abaissant la température de fusion en améliorant le remplissage des moules (coulabilité) et en évitant la formation des défauts par retrait du matériau lors de sa solidification (retassure). Le carbone étant présent en quantité trop importante pour se dissoudre dans la matrice, il apparaît sous la forme de carbure, graphite lamellaire ou sphéroïdales.

La fonte ductile a de bonnes qualités d'usinage et elle est utilisée pour les engrenages de série lourde, les pistons, les rouleaux de laminoirs, les carters d'engrenage les soupapes, tubes et charnières de porte. La fonte ductile perlitique est le matériau de base des arbres à cames et vilebrequins qui sont trempés en surface pour une meilleure résistance à l'usure.

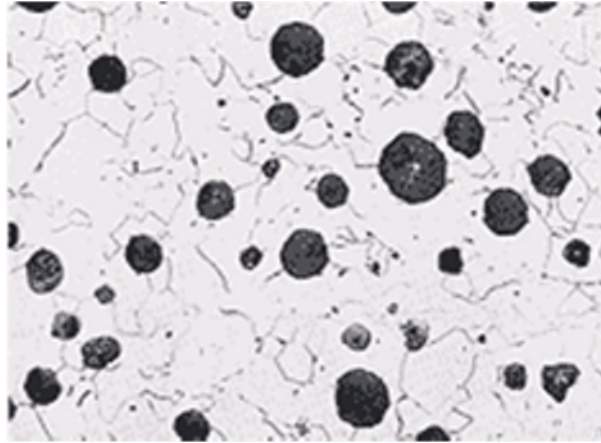


Figure I.26 : Graphite sphéroïdales en noir.

La fonte grise avec graphite lamellaire (FG)

Contient entre 2,5 et 4% de carbone, 1 à 3% de silicium et 0,2 à 1% de manganèse. Le carbone et le silicium activent la formation de lamelles de graphite et de ferrite. Le phosphore, en petites quantités, augmente la fluidité de la fonte grise. Il forme également un eutectique phosphoreux-ternaire appelé “stéatite”, qui constitue une structure en toile, augmentant la résistance à l’usure. Dans sa forme lamellaire, le graphite interrompt la matrice métallique et il s’agit aussi comme des entailles diminuant la résistance à la traction, tout particulièrement lorsque les lamelles sont très grandes. Dans une fonte grise alliée, les meilleures propriétés mécaniques peuvent être obtenues par des lamelles de graphites fines et uniformément réparties dans la matrice perlitique (Figure I.27). La fonte grise a une capacité élevée d’amortissement des vibrations, des propriétés de glissement et une conductivité thermique excellente, la rendant idéale pour les bases de machine, les plaques amortissantes pour pianos, les blocs-moteur, les volants, les garnitures de piston, les disques de frein et les tambours.

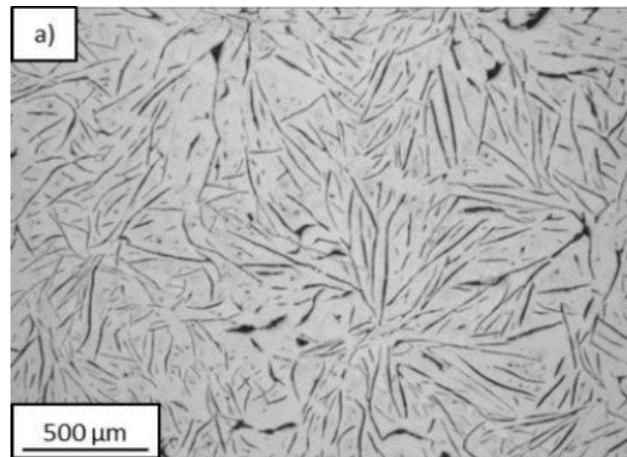


Figure I.27 : Distribution des lamelles dans un échantillon de fonte.

Matériaux de friction utilisés pour les plaquettes de freins

Matières premières

Une plaquette de frein est composée de deux éléments : le socle en tôle d'acier et le matériau de friction qui comme son nom l'indique, entre en friction avec le disque de frein.

Pour les matériaux de friction, il existe deux familles de matériaux de friction pour les plaquettes:

Les matériaux organiques et les matériaux métalliques ou semi - métalliques.

Seuls les matériaux frittés peuvent répondre à l'ensemble des sollicitations d'une voiture : freinages puissants, échauffement, utilisation sous eau, poussière et boue, réactivité à froid.

Les plaquettes en matériaux frittés sont fabriquées à partir de poudres. Le produit de friction contient au moins dix constituants (cuivre, bronze, fer, céramiques, graphites...). Chacun de ces constituants a un rôle essentiel au cours du frottement de la plaquette sur le disque (confort, bruit, performance). Une fois mélangés, ces constituants forment le mélange de friction. Ce mélange est ensuite comprimé dans un outil qui lui donne sa forme finale.

La pièce obtenue est ensuite positionnée sur son support métallique cuivré puis introduite dans un four à 900°C. C'est le processus du frittage: un constituant du produit fond, consolide le matériau et le brase sur son support. La composition des garnitures comporte :

- un liant, mélange de résines thermodurcissables, caoutchoucs, etc., fondant à 100-200 °C pour permettre la mise en forme du produit et se polymérisant par maintien en température. On utilise aussi des liants minéraux, entre autres des phosphates.
- des fibres de renforcement. L'amiante, interdite est remplacée par des fibres de substitution, synthétiques (polyamides, Kevlar), métalliques (acier essentiellement), naturelles (sisal, coton), minérales (verre, carbone, céramique, bore, silice) ...

- des charges permettant de modifier les caractéristiques mécaniques, le coefficient de frottement, l'usure, etc. On utilise couramment la silice, le barite, le talc, les poudres métalliques ainsi que le graphite qui, par ses propriétés lubrifiantes, permet de diminuer l'usure.

La majorité des garnitures en service actuellement sont de type organo-métallique. On appelle garnitures minérales celles qui sont à base de liants minéraux et semi-métalliques celles qui contiennent plus de 50% de métaux (en masse). Certaines garnitures sont obtenues par frittage sans utilisation des liants habituels. Les garnitures au graphite sont dites grasses [34].

Ajoute à cela, que dans un secteur très confidentiel, peu d'informations sont disponibles sur la composition exacte et le procédé de fabrication des matériaux de friction. Les différents constituants d'un matériau de friction peuvent être classés suivant trois catégories en fonction de leur rôle [Carré, 1990, Pompon, 1997, Blau, 2001] : les liants qui permettent la cohésion de l'ensemble des constituants, les fibres qui jouent le rôle de renfort et les charges diverses qui permettent de modifier le frottement et l'usure. Les matériaux de friction semi-métalliques utilisés dans les garnitures de freins sont généralement composés de matériaux inorganiques et de matériaux organiques. Les composés inorganiques sont principalement des fibres d'acier et des poudres métalliques. Ces composés sont mélangés à une résine phénolique haute température et à d'autres liants minéraux (Figure I.28).

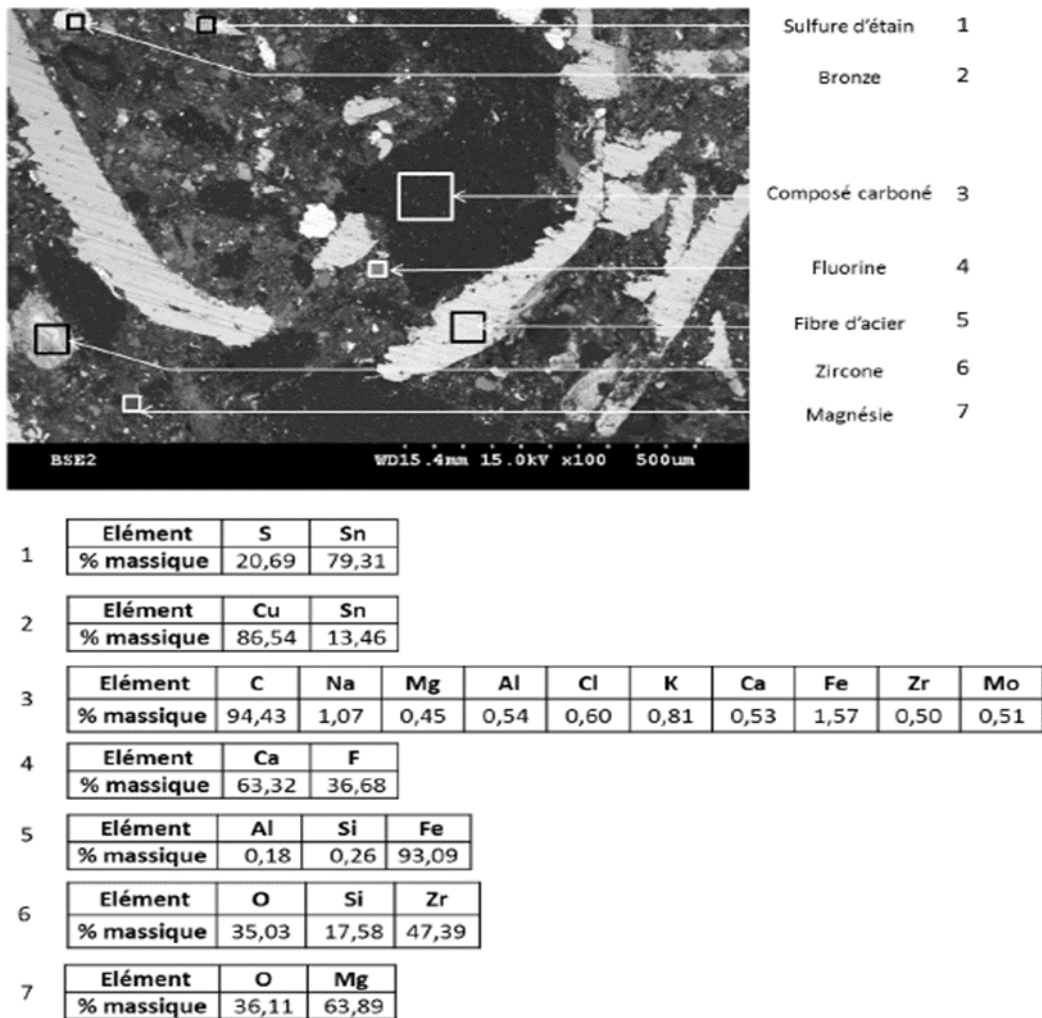


Figure I.28 : Les Constituants des plaquettes de frein [35].

En conclusion de ces observations et analyses, et en utilisant la classification des composants, le matériau de friction semi-métallique étudié se constitue de :

- **Liants** : de la fluorine CaF₂ et probablement des liants céramiques type spinelle et chromite couramment utilisés dans les matériaux réfractaires, auquel s'ajoute une résine,
- **Fibres** : des fibres d'acier d'une longueur d'environ 1 mm dont la teneur en silicium est faible,
- **Charges diverses** : des particules abrasives comme le zircon ZrSiO₄, des oxydes de fer, de la magnésie MgO, ainsi que des modificateurs du coefficient de frottement comme des particules de bronze, des composés carbonés (type coke, graphite) ou des sulfures d'étain SnS.

Il est à signaler, que les données industrielles concernant les matériaux de friction étant confidentielles pour la plupart, les propriétés des garnitures semi-métalliques sont évaluées à partir des références bibliographiques disponibles.

Procédés de fabrication

Les schémas 1 et 2 suivants nous simplifient les procédés de fabrication des plaquettes de freins (Figure I.29)

PROCEDE DE FABRICATION

La fabrication de la plaquette s'effectue sur 2 lignes parallèles :

SCHEMA DES PRINCIPALES ETAPES DE LA FABRICATION DE LA PLAQUETTE

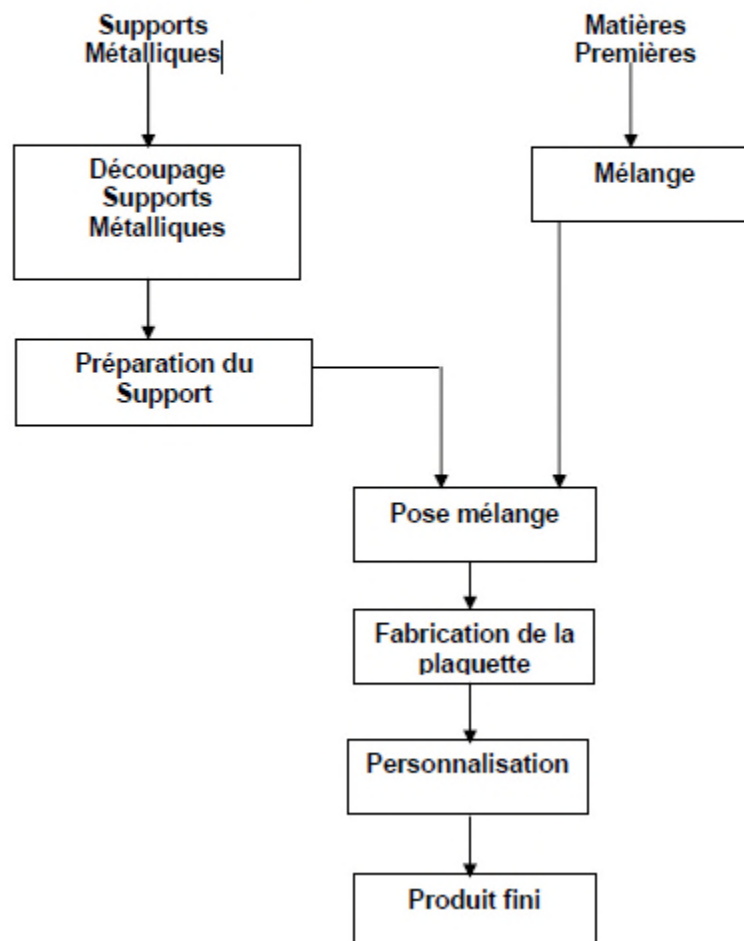


Figure I.29 : Procédé de fabrication des plaquettes de freins [34].

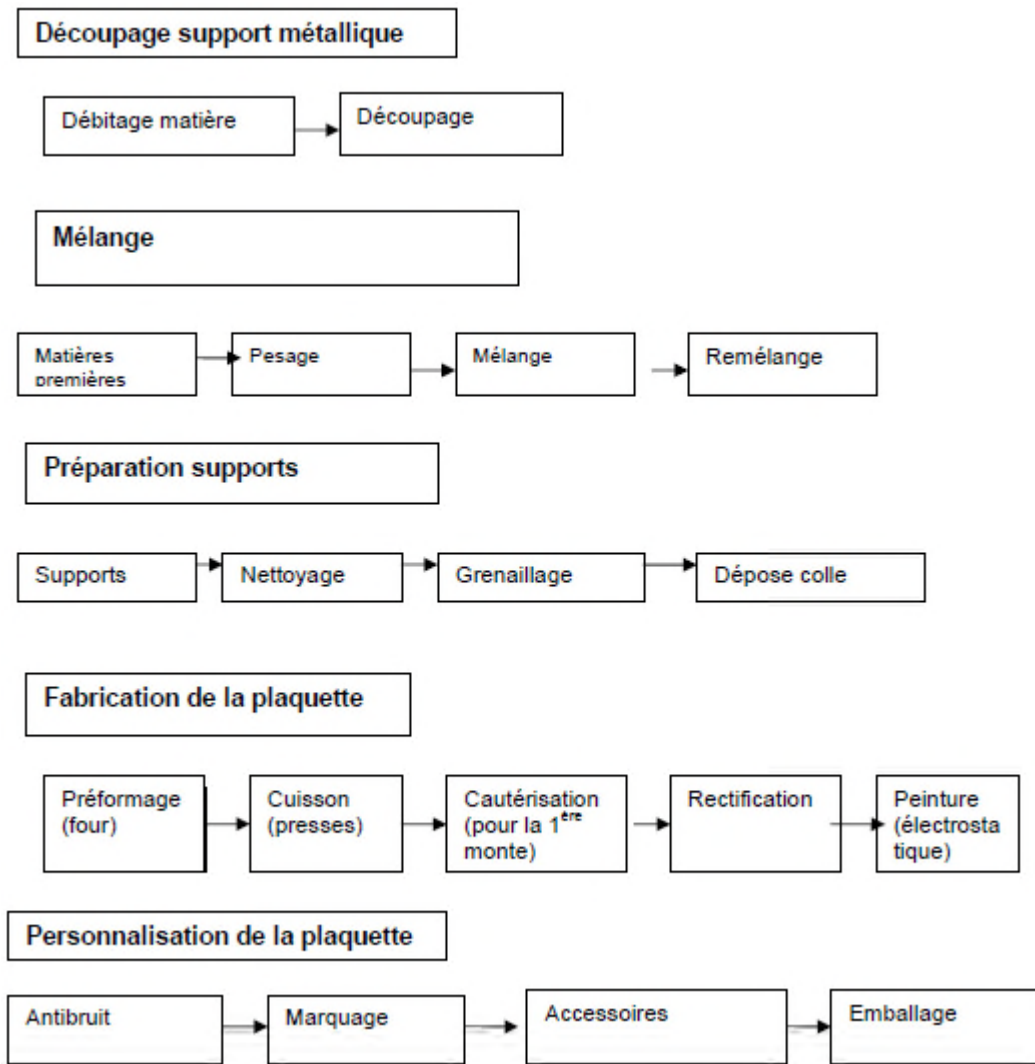


Figure I.30 : Détails des procédés de fabrication [34].

Description des opérations

- La préparation de la matière passe par les phases de pesage, de mélange et de remélange.
- D'un autre côté, le support métallique est nettoyé et grenaillé, puis une colle est posée sur une de ses faces.
- La matière première et le support métallique sont ensuite assemblés dans un moule chauffant à 160 °C, puis pressés.

Problèmes fréquents des plaquettes de freins

Beaucoup d'anomalies des plaquettes de freins sont responsables de la détérioration et l'usure des disques de freins, c'est pour cela qu'il faut comprendre les sollicitations et les problèmes que les plaquettes peuvent rencontrés en service, pour mieux optimiser leurs rendement d'une part et d'autre part comprendre les impacts sur les disques de frein et apporter des corrections et des améliorations. On se permet d'énumérer les problèmes suivants :

Arrachement du matériau de friction en raison de la corrosion

Cela peut se produit à cause de contrainte thermique élevée permanente sur les plaquettes de frein. Le matériau de friction devient très poreux (en totalité ou de manière localisée). Le matériau de friction se détache à cause de la rouille.

Arrachement du matériau de friction en raison de contraintes thermiques

Les plaquettes de frein ont dépassé la température maximale acceptable pendant plus de 15 à 20 minutes. Les composants essentiels à la solidité du matériau ont été détruits

Arrachement du matériau de friction en raison de contraintes mécaniques

Détachement du matériau de friction en raison d'un défaut de fabrication

Techniques expérimentales

Préparation des échantillons avec le polissage

Avant l'entame des tests, un polissage fin des surfaces à observer, est indispensable afin qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de fausser les examens. Le polissage est obtenu en utilisant une polisseuse, (Figure II.1) progressivement (180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 grains/cm²) sous lubrification avec eau.



Figure II.1 : Polisseuse mécanique de marque (METASERV 2000).

Les essais de dureté du disque de frein utilisé dans cette étude

Les tests de dureté ont été faits sur une machine de dureté universelle Diastor de l'UGB (Figure II.1). La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.



Figure II.2 : Machine de dureté universelle Brinell, Vickers et Rockwell de l'UGB.

Donnée normalisées sur les différents tests de dureté

- NF A 03-152 (19SO) : Essai de dureté Brinell.
- NF A 03-153 (1986) : Essai de dureté Rockwell
- NF A 03-154 (19S3) : Essai de dureté Vickers.
- Dominique François, "*Essais mécaniques des métaux - Essais dureté*", Fascicule M123 des Techniques de l'ingénieur.

Test Rockwell

Le pénétrateur est soit une bille en acier (diamètre $D = 1,5875$ ou $3,175$ mm) soit un cône à 120° avec une pointe en diamant de rayon $0,2$ mm. Une pré-charge P_0 de $98,07$ N est d'abord appliquée sur la surface par le pénétrateur.

Elle permet de "faire le zéro" en fixant la profondeur de mesure de référence h_0 .

La surcharge de mesure, P est alors appliquée. Il existe trois valeurs de surcharges normalisées $490,3$ - $882,6$ et 1373 N.

Après un temps de l'ordre de la dizaine de secondes, la charge P est retirée et la profondeur de pénétration du pénétrateur, h' , avec la pré-charge P_0 maintenue, est mesurée.

Dureté Vickers

La mesure de dureté Vickers se fait avec un pénétrateur en forme de pyramide normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° sur lequel on applique une force. L'empreinte que laisse le pénétrateur peut être utilisée pour calculer la dureté du matériau. La force et la durée de l'appui sont normalisées. Cette mesure est très utilisée au laboratoire pour sa précision ; un peu moins dans les milieux de production où l'on préférera des méthodes plus rapides comme la Dureté Rockwell qui ne demande pas autant de soin dans la préparation de l'échantillon.

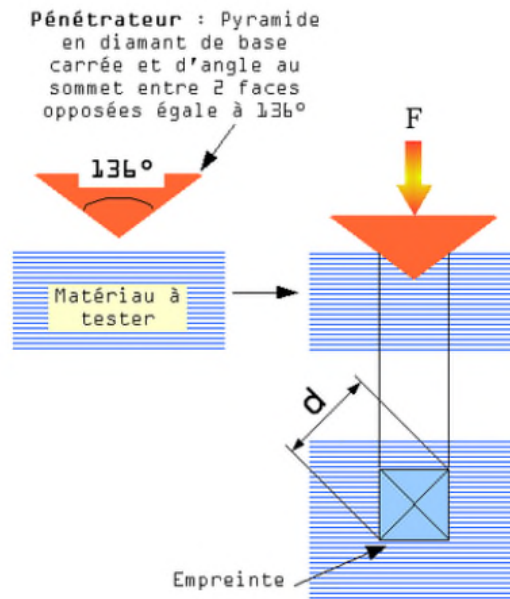


Figure II.3 : Principe de mesure de la dureté Vickers (pénétrateur pyramidal) [36].

Formule utilisée pour le calcul de la dureté Vickers avec la charge $F = 30\text{Kgf}$:

$$HV = 0.102 \times \left(\frac{2 \times F \times \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d} \right) \quad (\text{II.1})$$

Diffraction aux rayons x

Le phénomène des rayons X a été découvert par Max Von Laue (prix Nobel, en 1914) et longuement étudié par sir William Henry Bragg et son fils sir William Lawrence Bragg (prix Nobel commun en 1915). On sait que les rayons X sont diffractés par les réseaux cristallins des solides. Suivant l'angle d'incidence d'un faisceau de rayon X et la nature cristallographique du solide étudié, les rayons X diffractés viennent ensuite interférer de manière constructive ou destructive. La diffractométrie de rayons X est en fait une méthode d'analyse chimique. Elle est utilisée sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés), mais pas sur la matière amorphe (liquides, polymères, verres) [37,38]. Les échantillons utilisés pour la caractérisation DRX peuvent être sous forme de poudre ou solide. Le principe de la méthode consiste à bombarder des échantillons avec

des rayons X et à retenir l'intensité de rayons X qui sont diffusés selon l'orientation dans l'espace par un détecteur qui fait le tour de l'échantillon.

La connaissance des angles θ et l'intensité des pics permettent l'obtention d'une série de valeur $d \{h, k, l\}$ qui constitue la signature d'un solide cristallisé. Comme les plans cristallographiques peuvent être repérés par les indices de Miller, on peut donc indexer les pics de diffraction selon ces indices. Cette méthode d'analyse permet de caractériser l'arrangement des couches d'atomes au sein de cristaux.

Dans notre étude, Les diagrammes de diffraction RX ont été enregistrés à l'aide d'un diffractomètre de type Panalytical X'pert Pro (Figure II.3). La forte présence de défauts dans ce type de matériaux engendre un bruit de fond important ; pour améliorer la statistique de comptage et augmenter le rapport pics/fond continu, un temps d'acquisition de 40 s par pas angulaire de $0,02^\circ$ a été utilisé sur l'intervalle s'étalant entre 35° et 100° (2θ). L'identification des phases cristallines présentes est faite par comparaison des raies observées avec celles des phases appropriées contenues dans la base de données PDF2.



Figure II.4 : Diffractomètre RX/Panalytical X'pert Pro.

Dispositif d'usure

Le mécanisme pion-disque (Figure II.5) qui est parmi les dispositifs les plus utilisés. Il se compose d'un disque en rotation à vitesse variable sur lequel vient se poser en appui normal, le pion ou l'échantillon à tester. Une force normale est appliquée par l'intermédiaire de charges, au support de manière à presser l'échantillon pion sur le disque. Puis le disque est mis en rotation et la force tangentielle est mesurée.



Figure II.5 : Dispositif d'usure.

Reconstitution du processus de freinage

Pour reproduire le mécanisme de freinage, afin de mesurer les températures de contact suivant différentes vitesses de glissement de la plaquette sur les pistes du disque, un tour mécanique a été utilisé (Figure II.6), mais avant cela, un dispositif de fixation de l'étrier destiné à contenir les plaquettes de frein a été conçu pour ensuite être monté sur la table du tour.

Dispositif de fixation de l'étrier

Avant de procéder à la fabrication du dispositif, nous avons opté pour une conception puis simulation sur le logiciel solidworks du dispositif pour mieux visualiser les sollicitations et les déformations, que le dispositif rencontra en service.

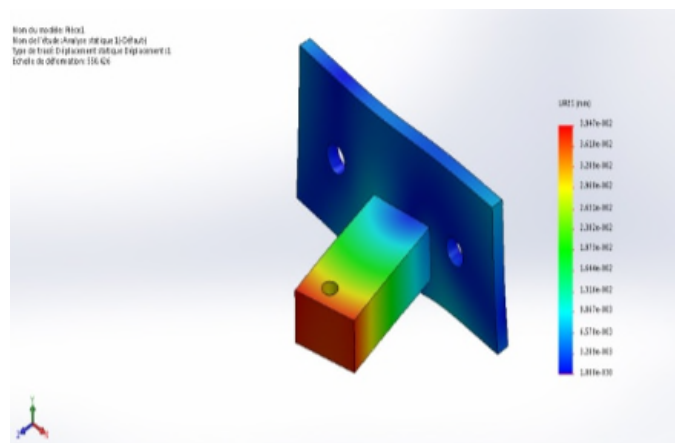


Figure II.6 : La zone en rouge est la zone la plus sollicitée.

Après simulation et prise des dimensions adéquates du dispositif, le dispositif est alors soudé et boulonné avec l'étrier en-dessus (Figure II.7) et ensuite, le tout est monté sur la table du tour (Figure II.8).



Figure I.7 : Dispositif de fixation avec l'étrier.



Figure II.8 : Montage du dispositif sur le tour.

Pièce de fixation du disque

Le disque est monté sur le mandrin du tour par l'intermédiaire d'une pièce en téflon, la pièce est d'abord conçue et calculée sur solidworks (Figure) puis usinée.

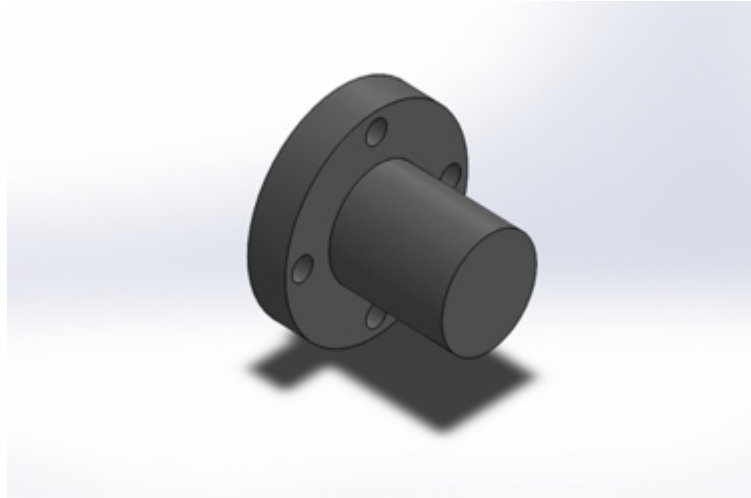


Figure II.9 : Conception pièce de fixation (téflon) du disque.

Instrument de mesures

Le thermomètre à infrarouge

Tout objet émet des radiations. Un thermomètre à infrarouge ou pyromètre (figure II.10) mesure l'énergie correspondante aux radiations émises par un objet dans le domaine de l'infrarouge.

Cette énergie est convertie en une valeur de température. Un pyromètre est donc un appareil qui permet de mesurer la température de l'objet sans contact direct avec celui-ci. Le pyromètre est composé d'une lentille qui focalise l'énergie des radiations infrarouges émises par l'objet sur un détecteur puis convertit cette énergie en un signal électrique lui-même converti en température.



Figure II.10 : Thermomètre à infrarouge.

Clé dynamométrique

Pour la force normale exercée sur le piston et sur les plaquettes, elle est fixe pour toutes les vitesses, elle est transmise au piston par l'intermédiaire d'une vis guidée avec une clé dynamométrique (figure II.11).



Figure II.11 : Clé dynamométrique de couple de 5 à 25 N.m.

Balance analytique

Pour les prises de masses des échantillons une balance analytique (Figure II.12) est utilisée, avant et après chaque essai sur le dispositif d'usure, les pions sont contrôlés afin de détecter une éventuelle perte de masse. La balance utilisée est de capacité max de 210g et de précision de 10^{-4} g.



Figure II.12 : Balance analytique utilisée.

Déroulement des essais

Le disque de frein est monté sur le mandrin du tour par l'intermédiaire de la pièce en téflon (Figure II.9) d'une manière à exclure toutes les vibrations et les mouvements indésirables lors de la rotation du disque.

Le thermomètre à infrarouge est fixé sur le porte-outil du tour avec le fuseau laser qui pointe sur la zone la plus proche possible du contact (Figure II.13).



Figure II.13 : Montage du dispositif, du disque et du thermomètre sur le tour.

Méthodes mathématiques utilisées

Méthodes des moindres carrées

Cette méthode consiste à analyser les données déjà enregistrées, en vue de déterminer une droite d'ajustement qui consiste à calculer l'équation de la droite, qui minimise les écarts types à la moyenne, elle consiste à comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure à un modèle mathématique censé décrire ces données. Ce modèle peut prendre diverses formes. Il s'agira en général de lois de conservation que les quantités mesurées doivent respecter. La méthode des moindres carrés permet alors de minimiser l'impact des erreurs expérimentales et évaluer les valeurs plus probables des paramètres de la loi recherchée, ainsi « ajoutant de l'information » dans le processus de mesure [39].

Résultats et discussions**Opérations de polissage**

Nos éprouvettes découpées d'un disque de frein ont subi des opérations de polissage (Figure III.1), afin de présenter un état de surface miroir pour des résultats exemplaires.

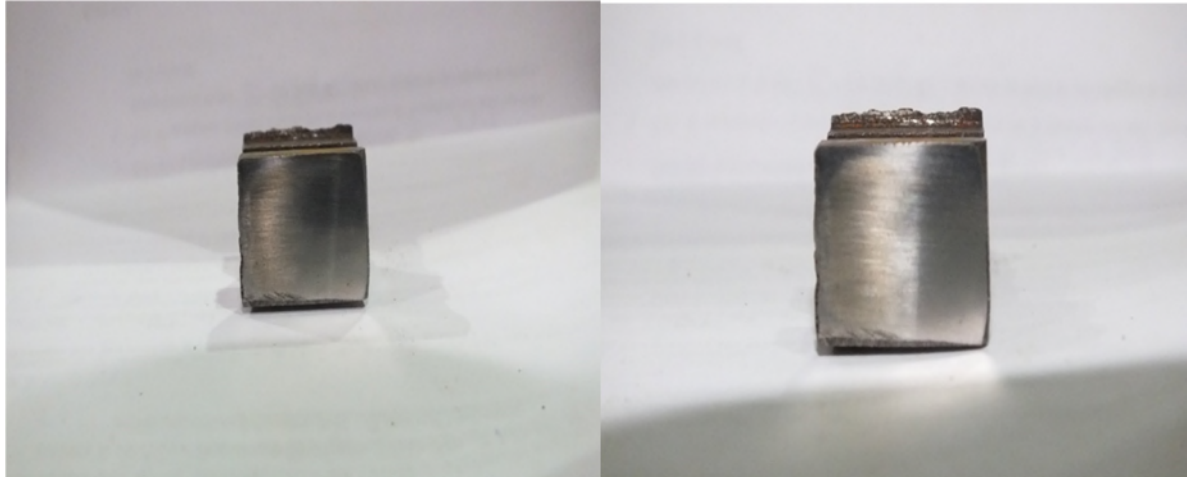


Figure III.1 : Echantillons ayant subi le polissage.

Composition chimique

Les analyses chimiques sur les disques permettent de connaître la composition chimique de la fonte des différents disques utilisés. La teneur en soufre et carbone est déterminée par analyse par combustion. La teneur des autres espèces chimiques est déterminée par fluorescence X. La teneur en fer correspond à la balance. Le Tableau III.1 nous montre compare la composition chimique réalisée auparavant [40] de d'un disque en fonte à graphite lamellaire REF.

Symboles	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr
Composition (%)	3,77	1,75	0,85	0,08	0,04	0,41	0,32

Tableau III.1 : Composition chimique de la fonte à graphite lamellaire des disques d'essais en % massique.

Observation de la microstructure

La microstructure finale obtenue dépend entre autres, de la composition chimique, du procédé de fabrication ainsi de la vitesse de solidification comme relaté au chapitre I.

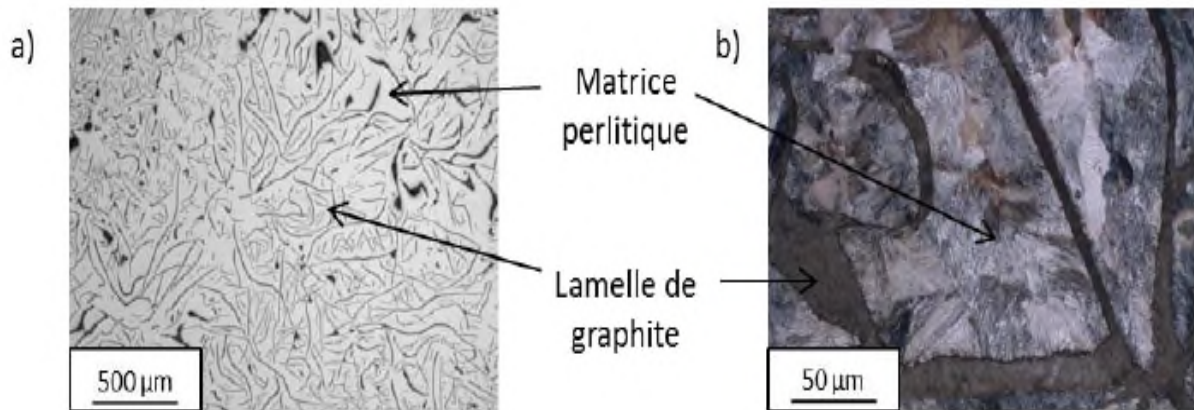


Figure III.2 : a) Morphologie du graphite b) Microstructure de la fonte à graphite lamellaire [41].

Il s'agit bien d'un graphite lamellaire de type A/B, dont la longueur des lamelles est de 500 μm . Certaines lamelles en surface sont arrachées lors de la préparation de l'échantillon ou leur plan de coupe est orienté différemment. Elles apparaissent donc plus larges sur la micrographie. La micrographie Figure III.2b de l'échantillon après attaque au Nital 4% permet d'observer la microstructure. La perlite est lamellaire. D'une manière générale la microstructure est assez grossière. La microstructure comme le graphite est homogène dans toute la couronne. La fonte REF des disques d'essais présente donc une composition chimique et une microstructure équivalente à celle des disques industriels [41].

Diffractions aux rayons x

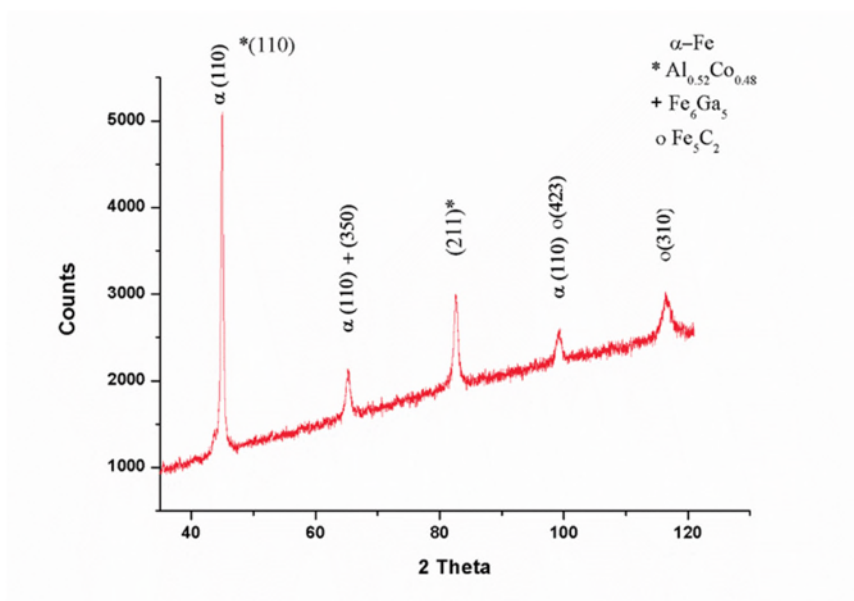


Figure III.3 : Diffractogramme de nos échantillons.

Essais duresté

Des essais de duresté Vickers ont été réalisés sur le disque de frein (Figure III.4).

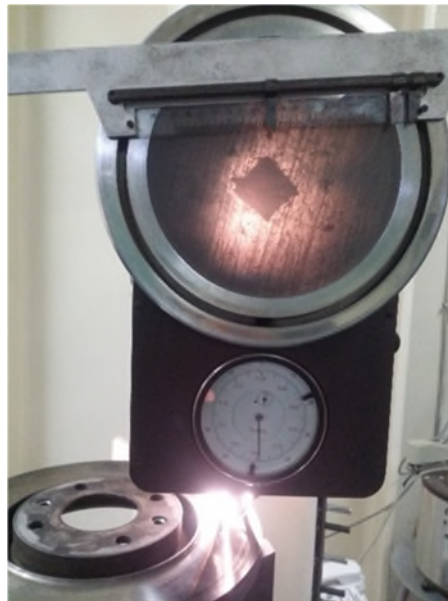


Figure III.4 : L’empreinte carrée laissée par le pénétrateur est visible.

Avec la charge $F = 30\text{Kgf}$ et en utilisant la formule (II.1).

La duresté Vickers du disque est $HV = 224$

A l’aide des tables de correspondances des durestés [42], la duresté $HV = 224$ correspond à :

$HB = 212$, $HRB = 95$, $HRC < 20$.

Détermination des températures de contact suivant les vitesses de glissement

Première partie : conditions ambiantes

Nous avons une plage de six vitesse (Tableau III.2), puis application de la force de freinage et une fois une température maximale atteinte, cette dernière est notée, les résultats sont réunis dans le (Tableau III.3) et illustrés dans le graphe (Figure III.5).

Vitesse de glissement en m/s	0,7	1,4	2,8	3,9	11	21,8
------------------------------	-----	-----	-----	-----	----	------

Tableau III.2 : Vitesses de glissement balayées.

Vitesses en m/s	0,7	1,4	2,8	3,9	11	21,8
Températures °C	40	49	70	85	102	120
Couple de serrage de la vis sur le piston en N.m	5	5	5	5	5	5

Tableau III.3 : Paramètres et résultats des essais.

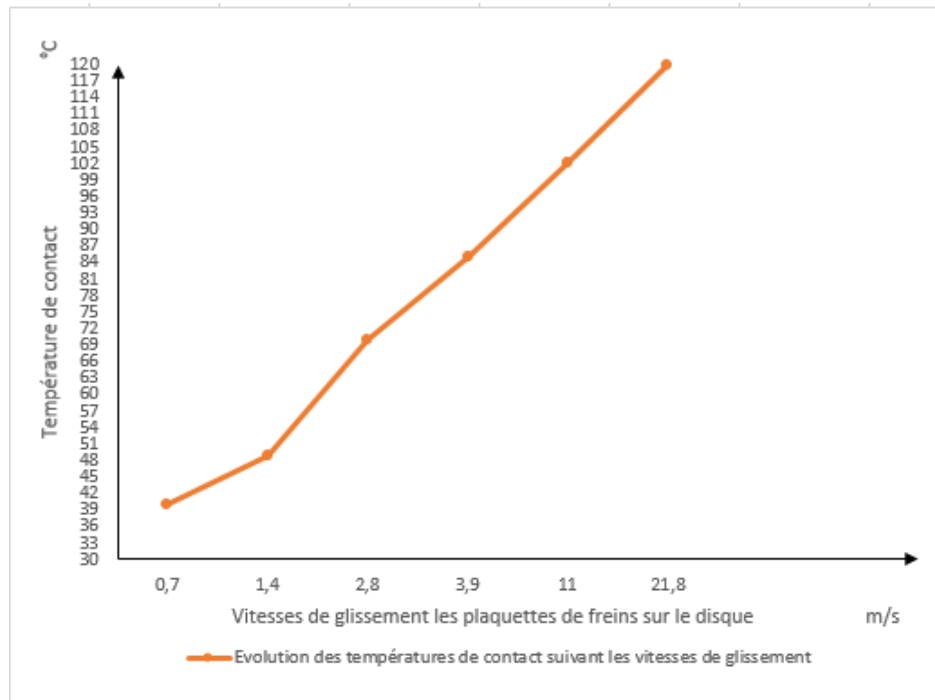


Figure III.5 : Evolutions des températures de contact plaquettes/disques.

Dans le graphe ci-dessus on remarque la linéarité de la progression de la température en augmentant la vitesse de glissement, à partir des données soutirées des six vitesses expérimentées et en employant la méthode des moindres carrées, une formule mathématique peut être érigée pour l'estimation des températures que le disque avoisinera pour n'importe quelle vitesse de glissement.

Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrés :

x_i : la vitesse de glissement (m/s)

y_i : la température de contact disque/plaquettes, aux conditions ambiantes °C.

$$x' = \sum \frac{x_i}{6}$$

$$y' = \sum \frac{y_i}{6}$$

x_i	y_i	$(x_i - x')$	$(y_i - y')$	$(x_i - x')^2$	$(x_i - x')(y_i - y')$	
0,7	40	-6	-37,66	36	225,96	
1,4	49	-5,5	-28,66	30	157,63	
2,8	70	-4	-7,66	16	30,64	
3,9	85	-3	7,34	9	-22,02	
11	102	4	24,34	16	97,36	
21,8	120	15	42,34	225	635,1	
Total	41,6	466	0,5	0	332	1124,05

Tableau III.4 : Méthode des moindres carrés d'évolution des températures de contact.

Les formules de calcul de la méthode des moindres carrés sont les suivantes :

- L'équation de la droite d'ajustement : $y = ax + b$
- $a = Cov(x, y) / V(x)$

$$a = \frac{\sum(x_i - x')(y_i - y')}{\sum(x_i - x')^2} \quad (III.1)$$

- Le paramètre (b) :

$$b = y' - ax' \quad (III.2)$$

AN :

$$a = 3,39 ;$$

$$b = 54,16$$

$$y_1 = 3,39x + 54,16 \quad (\text{III.3})$$

Exemple

Pour une vitesse de glissement de 33,33 m/s qui équivaut à 120 km/h, la température de contact sera donc aux alentours de 167 °C.

Deuxième partie : freinage avec application d'air comprimé à la zone de contact

Les même processus d'expérimentation et pour la même plage de vitesse décrite auparavant (Tableau III.2), les essais sont reproduits, avec cette fois, l'application d'air comprimé (Figure III.3) d'une pression de 0,6 MPa sur la zone de contact, les résultats sont affichés dans le tableau III.4. Le graphe (Figure III.4) illustre explicitement les conditions et les résultats des essais.

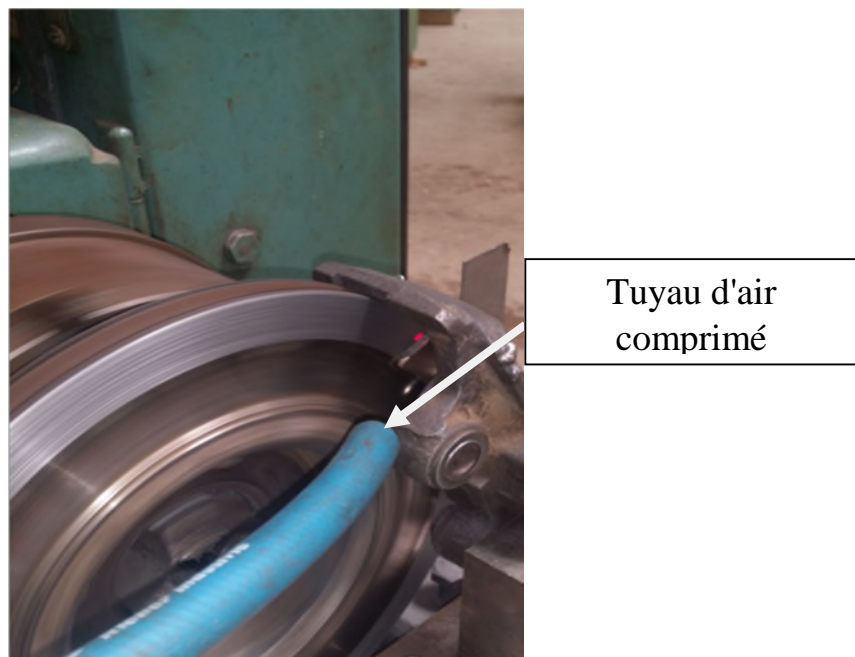


Figure III.6 : Application d'air comprimé sur la zone de contact.

Vitesses en m/s	0,7	1,4	2,8	3,9	11	21,8
Températures °C	34	42	63	78	91	103
Couple de serrage de la vis sur le piston en N.m	5	5	5	5	5	5

Tableau III.5 : Résultats des essais avec air comprimé.

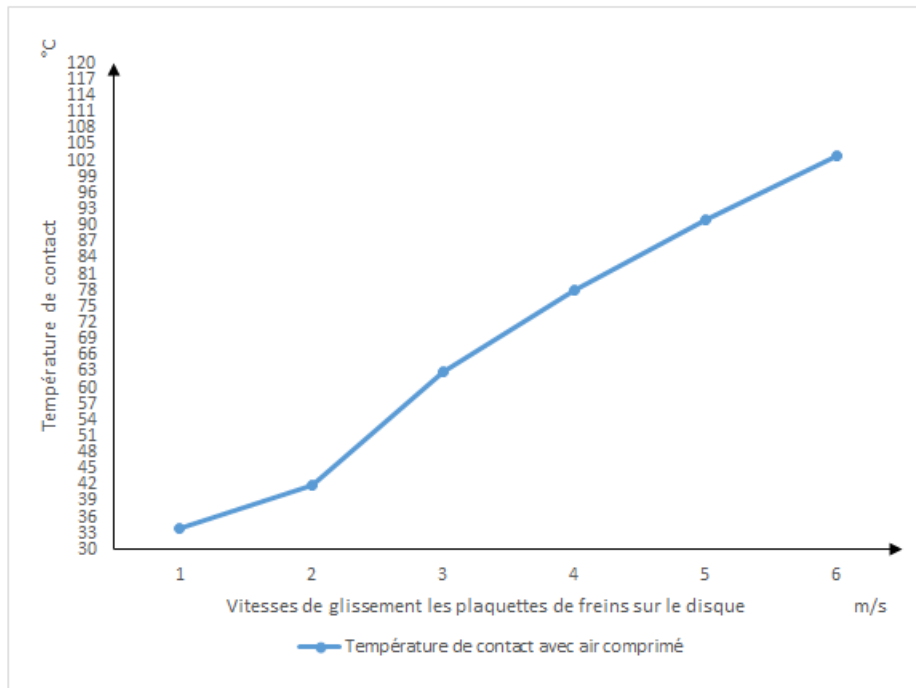


Figure III.7 : Evolutions des températures de contact plaquettes/disques avec air comprimé.

Après ajout d'air comprimé, ce dernier à influencer positivement sur la diminution de la température de contact, comme le montre clairement la figure III.8, ci-dessous. On constate aussi particularité linéaire de l'évolution de la température ce qui nous permet d'élaborer un modèle mathématique à son tour.

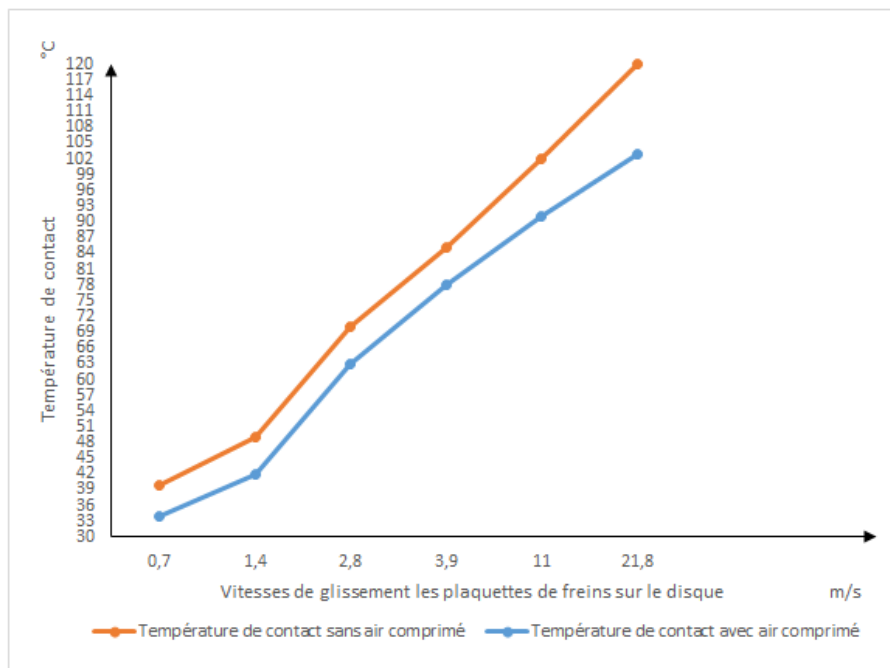


Figure III.8 : Graphique combiné des évolutions des températures où on constate l'effet positif de l'air comprimé sur la diminution de la température.

Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrés

Suivant la même démarche, calcule de l'équation de la courbe après ajout de l'air comprimé sur le disque.

Xi	yi	(xi - x')	(yi - y')	(xi - x')²	(xi-x')(yi-y')	
0,7	34	-6	-34.5	36	207	
1,4	42	-5,5	-26.5	30	145,75	
2,8	63	-4	-5.5	16	22	
3,9	78	-3	9.5	9	-28,5	
11	91	4	22.5	16	90	
21,8	103	15	34.5	225	517,5	
Total	41,6	411	0,5	0	332	953,75

Tableau III.6 : Méthode de moindre carrée d'évolution des températures avec air comprimé suivant les vitesses de rotation du disque.

Avec les formule III.1 et III.2 on calcule les paramètres a et b.

L'équation est de la forme :

$$y_2 = a x + b$$

AN :

$a = 2,87 ;$

$b = 48,6.$

$$y_2 = 2,87 x + 48,6 \quad \text{(III.4)}$$

Exemple

Pour la même vitesse de glissement qu'est 120 km/h, la température de contact sera aux alentours de 141 °C.

Conclusion

Vu les très hautes températures que le disque subi, qui engendrent des déformations et qui peuvent affecter même le coefficient de frottement, (phénomène de fading), la contribution de techniques de refroidissement s'avèrent utiles pour réduire les fortes variations de température, comme constaté, dans le cas étudié auparavant, l'air comprimé contribue à réduire la température de contact, en tenant compte du débit d'air soufflé et l'endroit où projeter ce dernier, des perspectives futures peuvent être déceler et mises à essai dans les véhicules lourd par exemple et même autres.

Essais sur dispositif d'usure

Avec une charge normale de $F = 25 \text{ N}$, les pions d'échantillons de disque sont engagés sur le périmètre du disque en acier fortement allié Z200 de dureté $\text{HRC} = 70$, qui est alimenté d'une vitesses de rotation de 500 tr/min, ce qui équivaut à une vitesse de glissement de 2,7 m/s, pour des intervalles de temps allant de 5mn à 40mn avec un intervalle de 5mn. Les résultats et conditions de travaux sont portés dans le tableau III.7 et illustrés dans le graphe (Figure III.9).

Temps (min)	Température °C	Perte de masse (g)
5	62,8	0.33
10	70	0.51
15	68	0.30
20	70,4	0.08
25	74,5	0.02
30	77,4	0.03
35	67	0.03
40	78,1	0.22

Tableau III.7 : Evolution de la perte de masse et la température en fonction du temps.

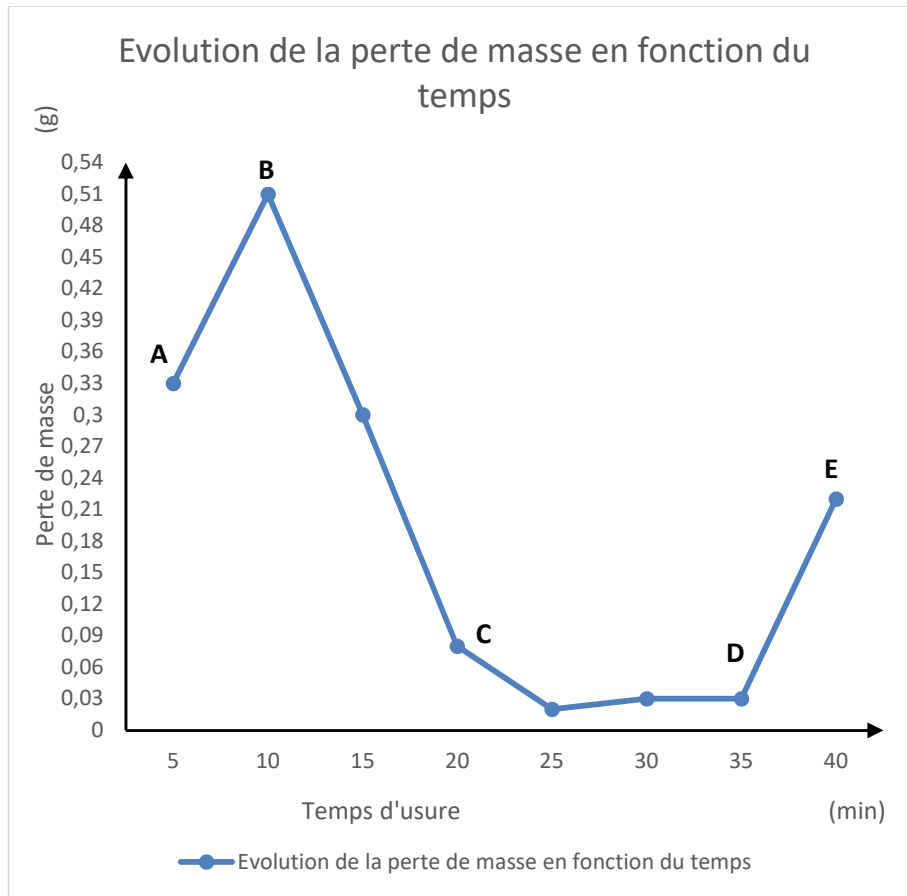


Figure III.9 : Graphe de l'évolution de la perte de masse en fonction du temps.

Le graphe présente 4 segments principaux :

- Segment **AB** : c'est une phase qui s'explique par l'arrachement important de matière qui présente le début du cisaillement des aspérités que représentent les surfaces en contact ;
- Segment **BC** : correspond à une perte de masse importante mais décroissante c'est le rodage, cela s'explique par le cisaillement des aspérités des surfaces en contact, c'est le phénomène dit de rodage ;
- Segment **CD** : C'est l'usure de fonctionnement ou de service, c'est l'utilisation normale de l'organe mécanique, elle est traduite par une usure relativement stable en fonction du temps ;
- Segment **DE** : C'est la période de fin de vie (vieillesse), caractérisé par un accroissement d'usure des organes mécaniques.

Pour l'évolution d'usure de service la courbe présente un aspect linéaire, on appliquera la méthode des moindres carrés pour élaborer une équation de perte de masse pour une durée quelconque de fonctionnement.

Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrés

Suivant la même démarche qu'auparavant, on élabore l'équation de perte de masse pour les éprouvettes de disque de freins réalisés sur le dispositif d'usure (Figure II.5).

xi	Yi	(xi - x')	(yi - y')	(xi - x')²	(xi-x')(yi-y')	
5	0.33	-17.5	-0.03	306.25	0.525	
10	0.51	-12.5	0.20	156.25	2.5	
15	0.30	-7.5	0	56.25	0	
20	0.08	-2.5	0.5	6.25	1.25	
25	0.02	2.5	-0.1	6.25	0.25	
30	0.03	7.5	-0.27	56.25	2.025	
35	0.03	12.5	-0.27	156.25	3.375	
40	0.22	17.5	0.08	306.25	1.4	
Total	180	2.42	0	0.47	1050	11.325

Tableau III.8 : Méthode de moindre carrée d'évolution de la perte de masse en fonction du temps.

Avec les formule III.1 et III.2 on calcule les paramètres a et b.

L'équation est de la forme :

$$y_3 = a x + b$$

AN :

$a = 0.010;$

$b = 0.075.$

$$y_3 = 0.010 x + 0.075 \quad (III.5)$$

Calcul de la corrélation

Etudier la corrélation entre deux ou plusieurs variables, c'est étudier l'intensité de la liaison qui peut exister entre ces variables.

$$r = \frac{\sum(xi-x')(yi-y')}{\sqrt{\sum(xi-x')^2 \sum yi-y')^2}} \quad (\text{III.6})$$

AN:

$$r = \frac{11.325}{1050 \times 0.4531}$$

$r = 0.02$

$r > 0$; donc les variables x, y évoluent dans le même sens

Les disques utilisés dans cette étude

Conclusion

Le test sur dispositif d'usure, ainsi que la connaissance de l'évolution des températures de contact pourront éventuellement, nous éclairer sur la tenue et le comportement du disque en fonte à graphite lamellaire à dureté connue, face à l'usure ainsi qu'aux températures de contact, la prise en compte d'autres paramètres tels que la masse du véhicule, la capacité calorifique du disque de frein et l'étude rigoureuse de l'usure par abrasion et par adhésion, en tenant compte des caractéristiques indépendantes des particules d'abrasifs comme troisième corps, pourra nous aider énormément dans le calcul et l'estimation de la durée de vie du disque.

Chapitre II

Techniques Expérimentales

Techniques expérimentales**Préparation des échantillons avec le polissage**

Avant l'entame des tests, un polissage fin des surfaces à observer, est indispensable afin qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de fausser les examens. Le polissage est obtenu en utilisant une polisseuse, (Figure II.1) progressivement (180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 grains/cm²) sous lubrification avec eau.



Figure II.1 : Polisseuse mécanique de marque (METASERV 2000).

Les essais de dureté du disque de frein utilisé dans cette étude

Les tests de dureté ont été faits sur une machine de dureté universelle Diastor de l'UGB (Figure II.1). La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.



Figure II.2 : Machine de dureté universelle Brinell, Vickers et Rockwell de l'UGB.

Donnée normalisées sur les différents tests de dureté

- NF A 03-152 (1950) : Essai de dureté Brinell.
- NF A 03-153 (1986) : Essai de dureté Rockwell
- NF A 03-154 (1953) : Essai de dureté Vickers.
- Dominique François, "*Essais mécaniques des métaux - Essais dureté*", Fascicule M123 des Techniques de l'ingénieur.

Test Rockwell

Le pénétrateur est soit une bille en acier (diamètre $D = 1,5875$ ou $3,175$ mm) soit un cône à 120° avec une pointe en diamant de rayon $0,2$ mm. Une pré-charge P_0 de $98,07$ N est d'abord appliquée sur la surface par le pénétrateur.

Elle permet de "faire le zéro" en fixant la profondeur de mesure de référence h_0 .

La surcharge de mesure, P est alors appliquée. Il existe trois valeurs de surcharges normalisées $490,3$ - $882,6$ et 1373 N.

Après un temps de l'ordre de la dizaine de secondes, la charge P est retirée et la profondeur de pénétration du pénétrateur, h' , avec la pré-charge P_0 maintenue, est mesurée.

Dureté Vickers

La mesure de dureté Vickers se fait avec un pénétrateur en forme de pyramide normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° sur lequel on applique une force. L'empreinte que laisse le pénétrateur peut être utilisée pour calculer la dureté du matériau. La force et la durée de l'appui sont normalisées. Cette mesure est très utilisée au laboratoire pour sa précision ; un peu moins dans les milieux de production où l'on préférera des méthodes plus rapides comme la Dureté Rockwell qui ne demande pas autant de soin dans la préparation de l'échantillon.

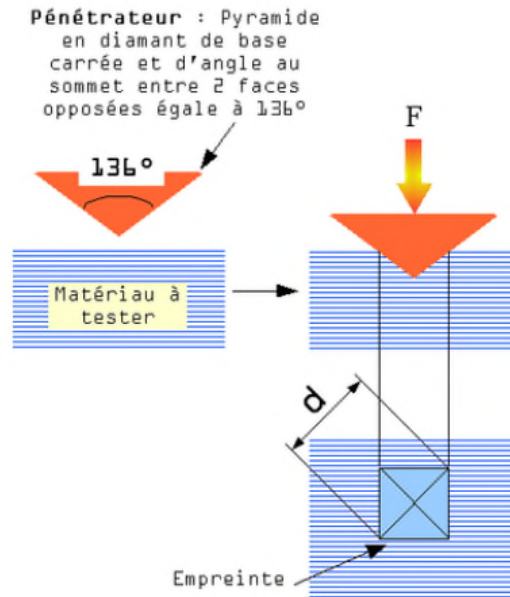


Figure II.3 : Principe de mesure de la dureté Vickers (pénétrateur pyramidal) [36].

Formule utilisée pour le calcul de la dureté Vickers avec la charge $F = 30\text{Kgf}$:

$$HV = 0.102 \times \left(\frac{2 \times F \times \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d} \right) \quad (\text{II.1})$$

Diffraction aux rayons x

Le phénomène des rayons X a été découvert par Max Von Laue (prix Nobel, en 1914) et longuement étudié par sir William Henry Bragg et son fils sir William Lawrence Bragg (prix Nobel commun en 1915). On sait que les rayons X sont diffractés par les réseaux cristallins des solides. Suivant l'angle d'incidence d'un faisceau de rayon X et la nature cristallographique du solide étudié, les rayons X diffractés viennent ensuite interférer de manière constructive ou destructive. La diffractométrie de rayons X est en fait une méthode d'analyse chimique. Elle est utilisée sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés), mais pas sur la matière amorphe (liquides, polymères, verres) [37,38]. Les échantillons utilisés pour la caractérisation DRX peuvent être sous forme de poudre ou solide. Le principe de la méthode consiste à bombarder des échantillons avec des rayons X et à retenir

l'intensité de rayons X qui sont diffusés selon l'orientation dans l'espace par un détecteur qui fait le tour de l'échantillon.

La connaissance des angles θ et l'intensité des pics permettent l'obtention d'une série de valeurs $\{h, k, l\}$ qui constitue la signature d'un solide cristallisé. Comme les plans cristallographiques peuvent être repérés par les indices de Miller, on peut donc indexer les pics de diffraction selon ces indices. Cette méthode d'analyse permet de caractériser l'arrangement des couches d'atomes au sein de cristaux.

Dans notre étude, Les diagrammes de diffraction RX ont été enregistrés à l'aide d'un diffractomètre de type Panalytical X'pert Pro (Figure II.3). La forte présence de défauts dans ce type de matériaux engendre un bruit de fond important ; pour améliorer la statistique de comptage et augmenter le rapport pics/fond continu, un temps d'acquisition de 40 s par pas angulaire de $0,02^\circ$ a été utilisé sur l'intervalle s'étalant entre 35° et 100° (2θ). L'identification des phases cristallines présentes est faite par comparaison des raies observées avec celles des phases appropriées contenues dans la base de données PDF2.



Figure II.4 : Diffractomètre RX/Panalytical X'pert Pro.

Dispositif d'usure

Le mécanisme pion-disque (Figure II.5) qui est parmi les dispositifs les plus utilisés. Il se compose d'un disque en rotation à vitesse variable sur lequel vient se poser en appui normal, le pion ou l'échantillon à tester. Une force normale est appliquée par l'intermédiaire de charges, au support de manière à presser l'échantillon pion sur le disque. Puis le disque est mis en rotation et la force tangentielle est mesurée.



Figure II.5 : Dispositif d’usure.

Reconstitution du processus de freinage

Pour reproduire le mécanisme de freinage, afin de mesurer les températures de contact suivant différentes vitesses de glissement de la plaquette sur les pistes du disque, un tour mécanique a été utilisé (Figure II.6), mais avant cela, un dispositif de fixation de l’étrier destiné à contenir les plaquettes de frein a été conçu pour ensuite être monté sur la table du tour.

Dispositif de fixation de l’étrier

Avant de procéder à la fabrication du dispositif, nous avons opté pour une conception puis simulation sur le logiciel solidworks du dispositif pour mieux visualiser les sollicitations et les déformations, que le dispositif rencontra en service.

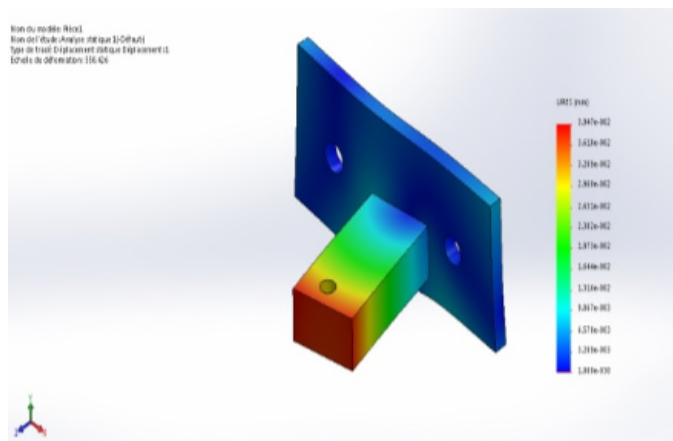


Figure II.6 : La zone en rouge est la zone la plus sollicitée.

Après simulation et prise des dimensions adéquates du dispositif, le dispositif est alors soudé et boulonné avec l'étrier en-dessus (Figure II.7) et ensuite, le tout est monté sur la table du tour (Figure II.8).



Figure I.7 : Dispositif de fixation avec l'étrier.



Figure II.8 : Montage du dispositif sur le tour.

Pièce de fixation du disque

Le disque est monté sur le mandrin du tour par l'intermédiaire d'une pièce en téflon, la pièce est d'abord conçue et calculée sur solidworks (Figure) puis usinée.

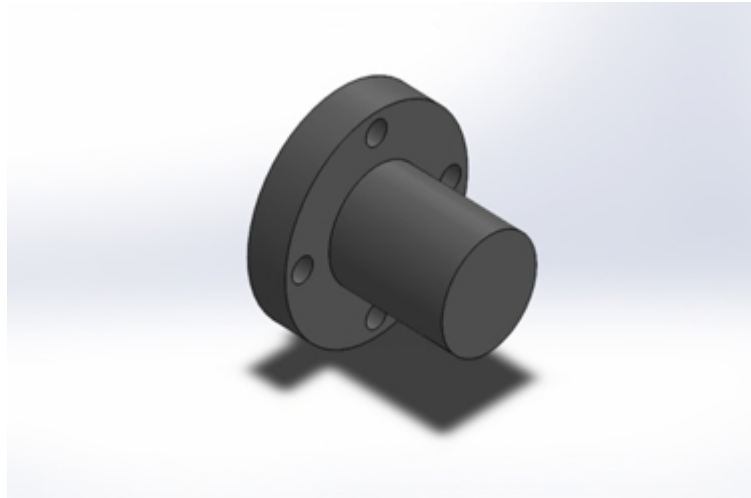


Figure II.9 : Conception pièce de fixation (téflon) du disque.

Instrument de mesures**Le thermomètre à infrarouge**

Tout objet émet des radiations. Un thermomètre à infrarouge ou pyromètre (figure II.10) mesure l'énergie correspondante aux radiations émises par un objet dans le domaine de l'infrarouge.

Cette énergie est convertie en une valeur de température. Un pyromètre est donc un appareil qui permet de mesurer la température de l'objet sans contact direct avec celui-ci. Le pyromètre est composé d'une lentille qui focalise l'énergie des radiations infrarouges émises par l'objet sur un détecteur puis convertit cette énergie en un signal électrique lui-même converti en température.



Figure II.10 : Thermomètre à infrarouge.

Clé dynamométrique

Pour la force normale exercée sur le piston et sur les plaquettes, elle est fixe pour toutes les vitesses, elle est transmise au piston par l'intermédiaire d'une vis guidée avec une clé dynamométrique (figure II.11).



Figure II.11 : Clé dynamométrique de couple de 5 à 25 N.m.

Balance analytique

Pour les prises de masses des échantillons une balance analytique (Figure II.12) est utilisée, avant et après chaque essai sur le dispositif d'usure, les pions sont contrôlés afin de détecter une éventuelle perte de masse. La balance utilisée est de capacité max de 210g et de précision de 10^{-4} g.



Figure II.12 : Balance analytique utilisée.

Déroulement des essais

Le disque de frein est monté sur le mandrin du tour par l'intermédiaire de la pièce en téflon (Figure II.9) d'une manière à exclure toutes les vibrations et les mouvements indésirables lors de la rotation du disque.

Le thermomètre à infrarouge est fixé sur le porte-outil du tour avec le fuseau laser qui pointe sur la zone la plus proche possible du contact (Figure II.13).



Figure II.13 : Montage du dispositif, du disque et du thermomètre sur le tour.

Méthodes mathématiques utilisées**Méthodes des moindres carrées**

Cette méthode consiste à analyser les données déjà enregistrées, en vue de déterminer une droite d'ajustement qui consiste à calculer l'équation de la droite, qui minimise les écarts types à la moyenne, elle consiste à comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure à un modèle mathématique censé décrire ces données. Ce modèle peut prendre diverses formes. Il s'agira en général de lois de conservation que les quantités mesurées doivent respecter. La méthode des moindres carrés permet alors de minimiser l'impact des erreurs expérimentales et évaluer les valeurs plus probables des paramètres de la loi recherchée, ainsi « ajoutant de l'information » dans le processus de mesure [39].

Chapitre III

Résultats et Discussions

Résultats et discussions

Opérations de polissage

Nos éprouvettes découpées d'un disque de frein ont subi des opérations de polissage (Figure III.1), afin de présenter un état de surface miroir pour des résultats exemplaires.

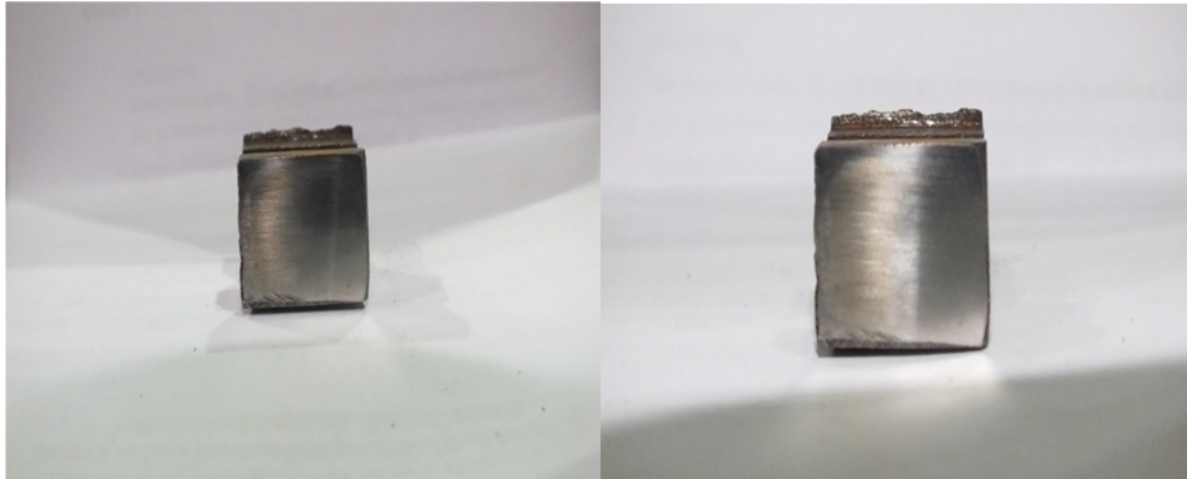


Figure III.1 : Echantillons ayant subi le polissage.

Composition chimique

Les analyses chimiques sur les disques permettent de connaître la composition chimique de la fonte des différents disques utilisés. La teneur en soufre et carbone est déterminée par analyse par combustion. La teneur des autres espèces chimiques est déterminée par fluorescence X. La teneur en fer correspond à la balance. Le Tableau III.1 nous montre compare la composition chimique réalisée auparavant [40] de d'un disque en fonte à graphite lamellaire REF.

Symboles	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr
Composition (%)	3,77	1,75	0,85	0,08	0,04	0,41	0,32

Tableau III.1 : Composition chimique de la fonte à graphite lamellaire des disques d'essais en % massique.

Observation de la microstructure

La microstructure finale obtenue dépend entre autres, de la composition chimique, du procédé de fabrication ainsi de la vitesse de solidification comme relaté au chapitre I.

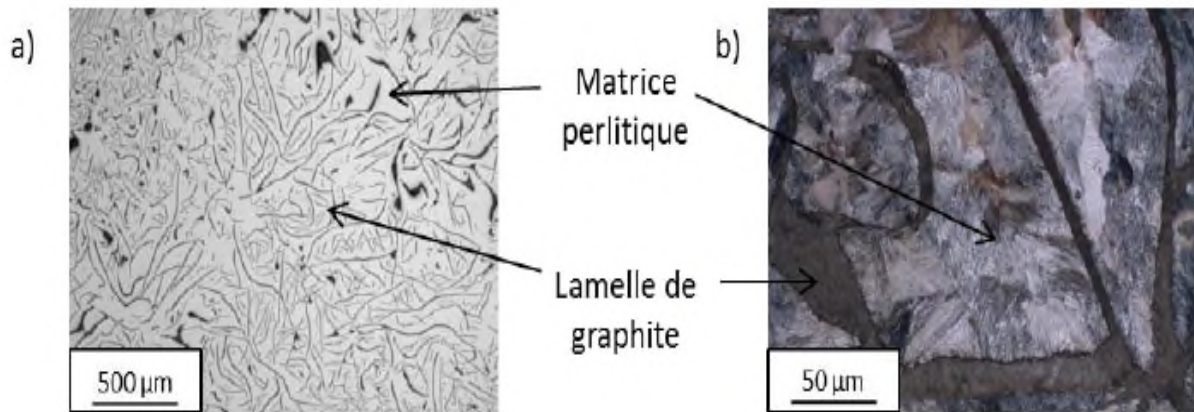


Figure III.2 : a) Morphologie du graphite b) Microstructure de la fonte à graphite lamellaire [41].

Il s’agit bien d’un graphite lamellaire de type A/B, dont la longueur des lamelles est de 500 μm . Certaines lamelles en surface sont arrachées lors de la préparation de l’échantillon ou leur plan de coupe est orienté différemment. Elles apparaissent donc plus larges sur la micrographie. La micrographie Figure III.2b de l’échantillon après attaque au Nital 4% permet d’observer la microstructure. La perlite est lamellaire. D’une manière générale la microstructure est assez grossière. La microstructure comme le graphite est homogène dans toute la couronne. La fonte REF des disques d’essais présente donc une composition chimique et une microstructure équivalente à celle des disques industriels [41].

Diffractions aux rayons x

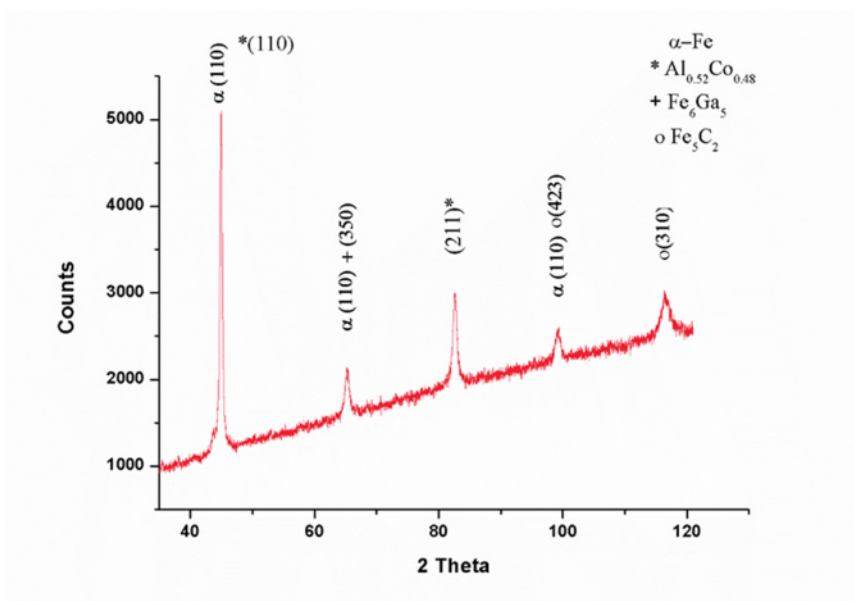


Figure III.3 : Diffractogramme de nos échantillons.

Essais duresté

Des essais de duresté Vickers ont été réalisés sur le disque de frein (Figure III.4).

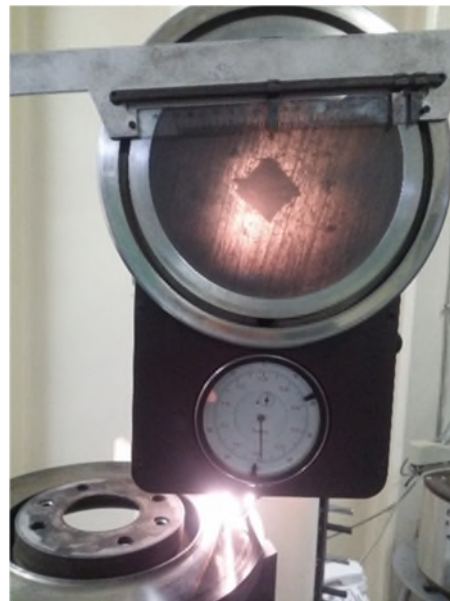


Figure III.4 : L’empreinte carrée laissée par le pénétrateur est visible.

Avec la charge $F = 30\text{Kgf}$ et en utilisant la formule (II.1).

La duresté Vickers du disque est $HV = 224$

A l’aide des tables de correspondances des durestés [42], la duresté $HV = 224$ correspond à :

$HB = 212$, $HRB = 95$, $HRC < 20$.

Détermination des températures de contact suivant les vitesses de glissement

Première partie : conditions ambiantes

Nous avons une plage de six vitesse (Tableau III.2), puis application de la force de freinage et une fois une température maximale atteinte, cette dernière est notée, les résultats sont réunis dans le (Tableau III.3) et illustrés dans le graphe (Figure III.5).

Vitesse de glissement en m/s	0,7	1,4	2,8	3,9	11	21,8
------------------------------	-----	-----	-----	-----	----	------

Tableau III.2 : Vitesses de glissement balayées.

Vitesses en m/s	0,7	1,4	2,8	3,9	11	21,8
Températures °C	40	49	70	85	102	120
Couple de serrage de la vis sur le piston en N.m	5	5	5	5	5	5

Tableau III.3 : Paramètres et résultats des essais.

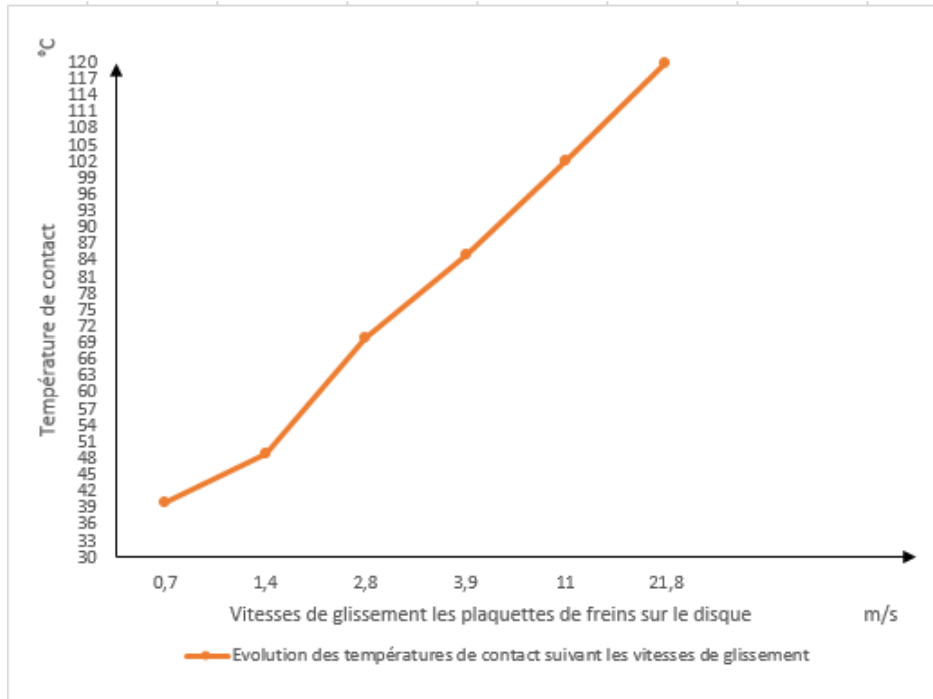


Figure III.5 : Evolutions des températures de contact plaquettes/disques.

Dans le graphe ci-dessus on remarque la linéarité de la progression de la température en augmentant la vitesse de glissement, à partir des données soutirées des six vitesses expérimentées et en employant la méthode des moindres carrées, une formule mathématique peut être érigée pour l'estimation des températures que le disque avoisinera pour n'importe quelle vitesse de glissement.

Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrées :

x_i : la vitesse de glissement (m/s)

y_i : la température de contact disque/plaquettes, aux conditions ambiantes °C.

$$x' = \sum \frac{x_i}{6}$$

$$y' = \sum \frac{y_i}{6}$$

x_i	y_i	$(x_i - x')$	$(y_i - y')$	$(x_i - x')^2$	$(x_i - x')(y_i - y')$	
0,7	40	-6	-37,66	36	225,96	
1,4	49	-5,5	-28,66	30	157,63	
2,8	70	-4	-7,66	16	30,64	
3,9	85	-3	7,34	9	-22,02	
11	102	4	24,34	16	97,36	
21,8	120	15	42,34	225	635,1	
Total	41,6	466	0,5	0	332	1124,05

Tableau III.4 : Méthode des moindres carrées d'évolution des températures de contact.

Les formules de calcul de la méthode des moindres carrés sont les suivantes :

- L'équation de la droite d'ajustement : $y = ax + b$
- $a = Cov(x, y) / V(x)$

$$a = \frac{\sum(x_i - x')(y_i - y')}{\sum(x_i - x')^2} \quad (III.1)$$

- Le paramètre (b) :

$$b = y' - ax' \quad (III.2)$$

AN :

$$a = 3,39 ;$$

$$b = 54,16$$

$$y_1 = 3,39x + 54,16 \quad (\text{III.3})$$

Exemple

Pour une vitesse de glissement de 33,33 m/s qui équivaut à 120 km/h, la température de contact sera donc aux alentours de 167 °C.

Deuxième partie : freinage avec application d'air comprimé à la zone de contact

Les mêmes processus d'expérimentation et pour la même plage de vitesse décrite auparavant (Tableau III.2), les essais sont reproduits, avec cette fois, l'application d'air comprimé (Figure III.3) d'une pression de 0,6 MPa sur la zone de contact, les résultats sont affichés dans le tableau III.4. Le graphe (Figure III.4) illustre explicitement les conditions et les résultats des essais.

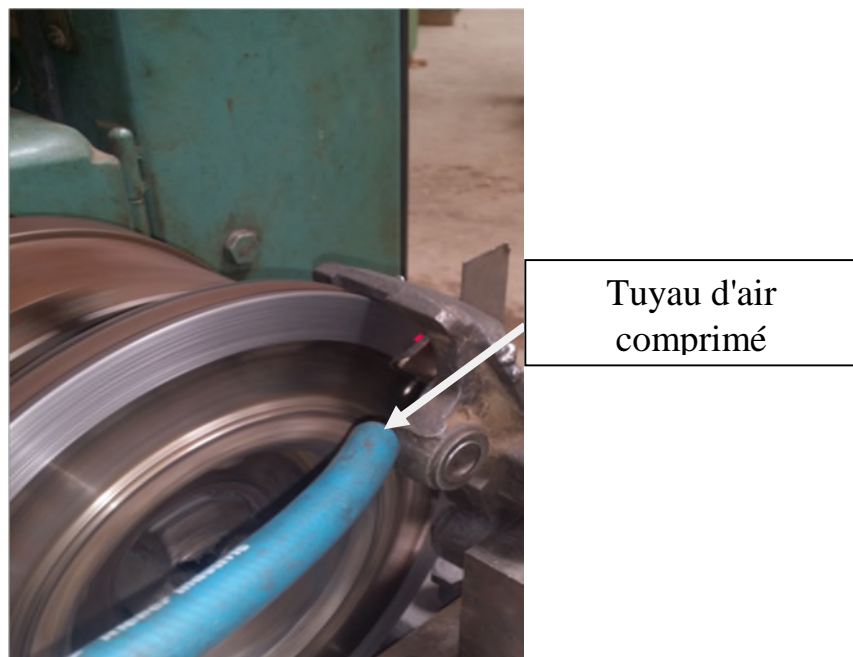


Figure III.6 : Application d'air comprimé sur la zone de contact.

Vitesses en m/s	0,7	1,4	2,8	3,9	11	21,8
Températures °C	34	42	63	78	91	103
Couple de serrage de la vis sur le piston en N.m	5	5	5	5	5	5

Tableau III.5 : Résultats des essais avec air comprimé.

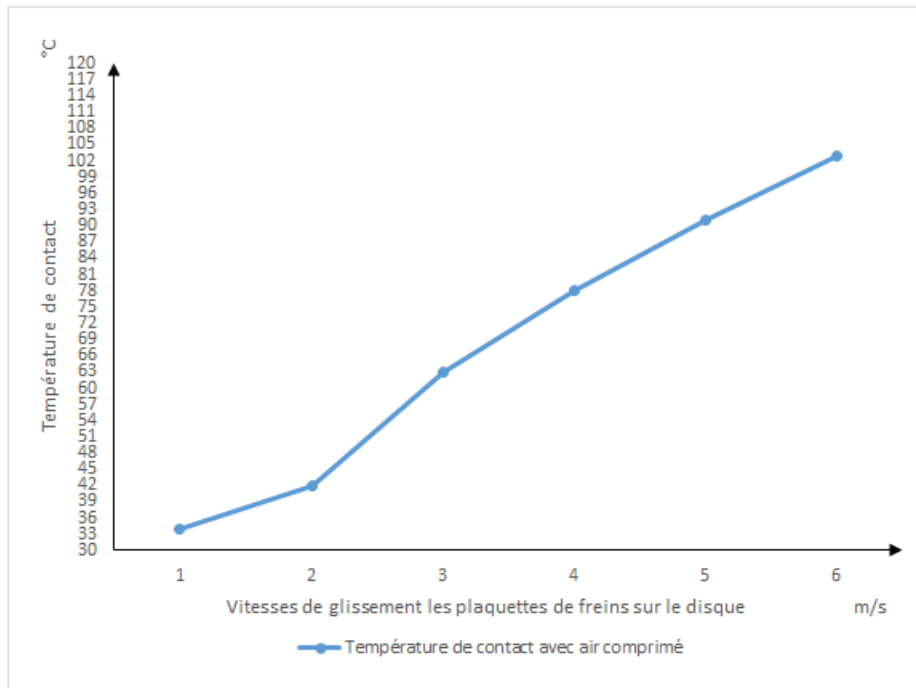


Figure III.7 : Evolutions des températures de contact plaquettes/disques avec air comprimé.

Après ajout d'air comprimé, ce dernier à influencer positivement sur la diminution de la température de contact, comme le montre clairement la figure III.8, ci-dessous. On constate aussi particularité linéaire de l'évolution de la température ce qui nous permet d'élaborer un modèle mathématique à son tour.

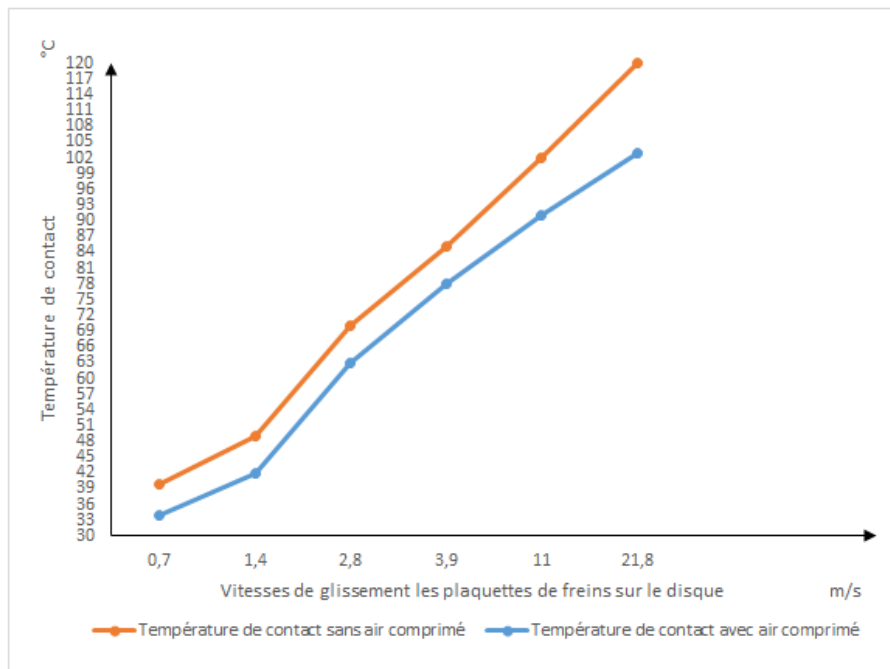


Figure III.8 : Graphique combiné des évolutions des températures où on constate l'effet positif de l'air comprimé sur la diminution de la température.

Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrées

Suivant la même démarche, calcule de l'équation de la courbe après ajout de l'air comprimé sur le disque.

Xi	yi	(xi - x')	(yi - y')	(xi - x')²	(xi-x')(yi-y')	
0,7	34	-6	-34.5	36	207	
1,4	42	-5,5	-26.5	30	145,75	
2,8	63	-4	-5.5	16	22	
3,9	78	-3	9.5	9	-28,5	
11	91	4	22.5	16	90	
21,8	103	15	34.5	225	517,5	
Total	41,6	411	0,5	0	332	953,75

Tableau III.6 : Méthode de moindre carrée d'évolution des températures avec air comprimé suivant les vitesses de rotation du disque.

Avec les formule III.1 et III.2 on calcule les paramètres a et b.

L'équation est de la forme :

$$y_2 = a x + b$$

AN :

$a = 2,87 ;$

$b = 48,6.$

$$y_2 = 2,87 x + 48,6 \quad \text{(III.4)}$$

Exemple

Pour la même vitesse de glissement qu'est 120 km/h, la température de contact sera aux alentours de 141 °C.

Conclusion

Vu les très hautes températures que le disque subi, qui engendrent des déformations et qui peuvent affecter même le coefficient de frottement, (phénomène de fading), la contribution de techniques de refroidissement s'avèrent utiles pour réduire les fortes variations de température, comme constaté, dans le cas étudié auparavant, l'air comprimé contribue à réduire la température de contact, en tenant compte du débit d'air soufflé et l'endroit où projeter ce dernier, des perspectives futures peuvent être déceler et mises à essai dans les véhicules lourd par exemple et même autres.

Essais sur dispositif d'usure

Avec une charge normale de $F = 25$ N, les pions d'échantillons de disque sont engagés sur le périmètre du disque en acier fortement allié Z200 de dureté HRC = 70, qui est alimenté d'une vitesses de rotation de 500 tr/min, ce qui équivaut à une vitesse de glissement de 2,7 m/s, pour des intervalles de temps allant de 5mn à 40mn avec un intervalle de 5mn. Les résultats et conditions de travaux sont portés dans le tableau III.7 et illustrés dans le graphe (Figure III.9).

Temps (min)	Température °C	Perte de masse (g)
5	62,8	0.33
10	70	0.51
15	68	0.30
20	70,4	0.08
25	74,5	0.02
30	77,4	0.03
35	67	0.03
40	78,1	0.22

Tableau III.7 : Evolution de la perte de masse et la température en fonction du temps.

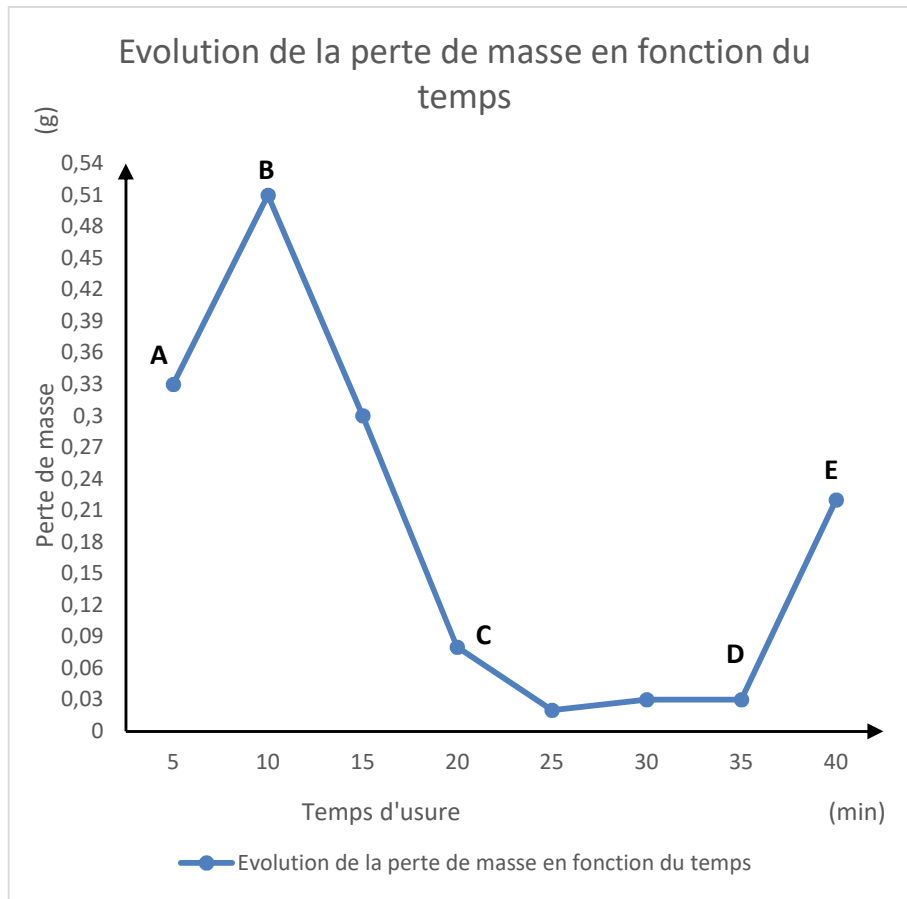


Figure III.9 : Graphe de l'évolution de la perte de masse en fonction du temps.

Le graphe présente 4 segments principaux :

- Segment **AB** : c'est une phase qui s'explique par l'arrachement important de matière qui présente le début du cisaillement des aspérités que représentent les surfaces en contact ;
- Segment **BC** : correspond à une perte de masse importante mais décroissante c'est le rodage, cela s'explique par le cisaillement des aspérités des surfaces en contact, c'est le phénomène dit de rodage ;
- Segment **CD** : C'est l'usure de fonctionnement ou de service, c'est l'utilisation normale de l'organe mécanique, elle est traduite par une usure relativement stable en fonction du temps ;
- Segment **DE** : C'est la période de fin de vie (vieillesse), caractérisé par un accroissement d'usure des organes mécaniques.

Pour l'évolution d'usure de service la courbe présente un aspect linéaire, on appliquera la méthode des moindres carrés pour élaborer une équation de perte de masse pour une durée quelconque de fonctionnement.

Elaboration d'équation de la courbe par la méthode des moindres carrés

Suivant la même démarche qu'auparavant, on élabore l'équation de perte de masse pour les éprouvettes de disque de freins réalisés sur le dispositif d'usure (Figure II.5).

xi	Yi	(xi - x')	(yi - y')	(xi - x')²	(xi-x')(yi-y')	
5	0.33	-17.5	-0.03	306.25	0.525	
10	0.51	-12.5	0.20	156.25	2.5	
15	0.30	-7.5	0	56.25	0	
20	0.08	-2.5	0.5	6.25	1.25	
25	0.02	2.5	-0.1	6.25	0.25	
30	0.03	7.5	-0.27	56.25	2.025	
35	0.03	12.5	-0.27	156.25	3.375	
40	0.22	17.5	0.08	306.25	1.4	
Total	180	2.42	0	0.47	1050	11.325

Tableau III.8 : Méthode de moindre carrée d'évolution de la perte de masse en fonction du temps.

Avec les formule III.1 et III.2 on calcule les paramètres a et b.

L'équation est de la forme :

$$y_3 = a x + b$$

AN :

$a = 0.010;$

$b = 0.075.$

$$y_3 = 0.010 x + 0.075 \quad \text{(III.5)}$$

Calcul de la corrélation

Etudier la corrélation entre deux ou plusieurs variables, c'est étudier l'intensité de la liaison qui peut exister entre ces variables.

$$r = \frac{\sum(xi-x')(yi-y')}{\sqrt{\sum(xi-x')^2 \sum yi-y')^2}} \quad (\text{III.6})$$

AN:

$$r = \frac{11.325}{1050 \times 0.4531}$$

$$r = 0.02$$

$r > 0$; donc les variables x, y évoluent dans le même sens

Les disques utilisés dans cette étude

Conclusion

Le test sur dispositif d'usure, ainsi que la connaissance de l'évolution des températures de contact pourront éventuellement, nous éclairer sur la tenue et le comportement du disque en fonte à graphite lamellaire à dureté connue, face à l'usure ainsi qu'aux températures de contact, la prise en compte d'autres paramètres tels que la masse du véhicule, la capacité calorifique du disque de frein et l'étude rigoureuse de l'usure par abrasion et par adhésion, en tenant compte des caractéristiques indépendantes des particules d'abrasifs comme troisième corps, pourra nous aider énormément dans le calcul et l'estimation de la durée de vie du disque.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

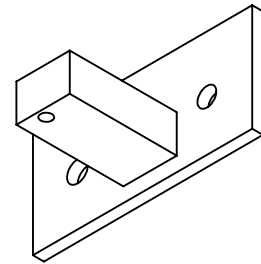
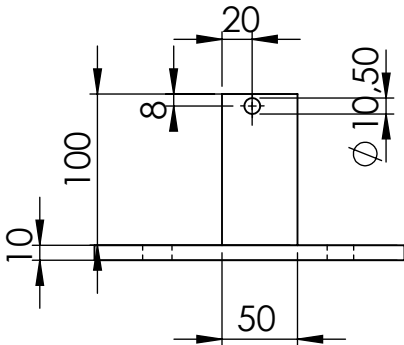
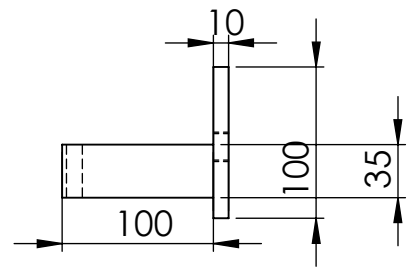
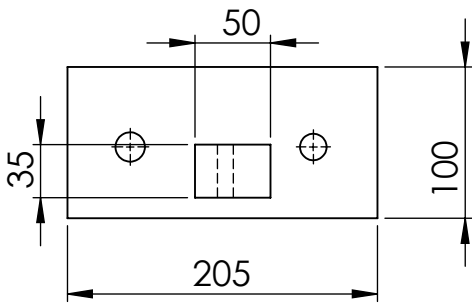
Les fontes à graphite lamellaire sont très destinées pour les opérations faisant intervenir l'usure, elles couvrent un large domaine d'exploitation où des exigences particulières sont requises.

Dans des applications très exigeantes, comme les systèmes de freinages, les fontes à graphite lamellaires représentent le matériau de prédilection pour la fabrication des disques de freins, grâce au compromis qu'elles offrent entre les propriétés mécaniques telles que la résistance à l'usure par abrasion et la résistance à la compression... et aussi les propriétés thermiques telles que, la conductivité thermique, la diffusivité thermique et autres. Ce travail a été principalement basé sur la variation des températures de contact des disques de freins/plaquettes, en vue de comprendre les liens d'influence des hautes températures sur la perte de masse des disques de freins et pour un souci de réduction de ces fortes variations de températures, vu les effets néfastes de ces dernières sur les organes de freinages et le disque plus précisément. En effet un processus comme le freinage, où s'entremêlent thermique, tribologie, dynamique, caractéristiques intrinsèques des matériaux, vibrations voire même acoustique, demeure très compliqué à étudier et exige nombre de matériels et de techniques sophistiqués, néanmoins, en se basant sur nos manipulations, on se permet toutefois de dégager certaines perspectives.

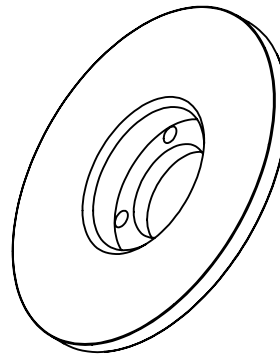
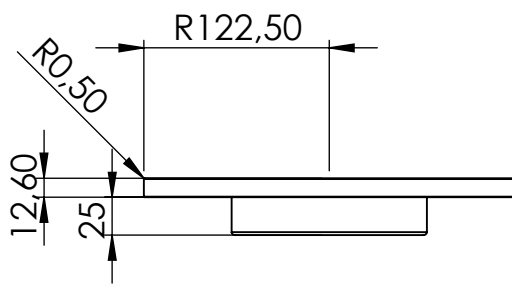
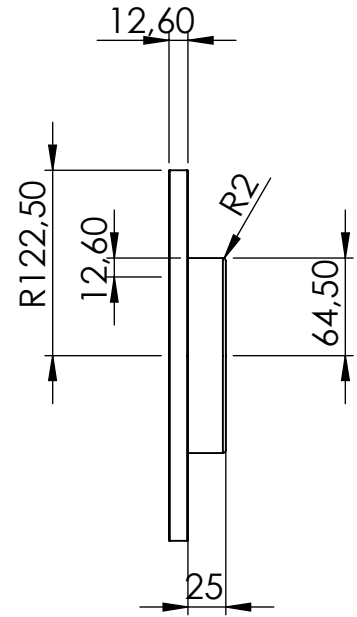
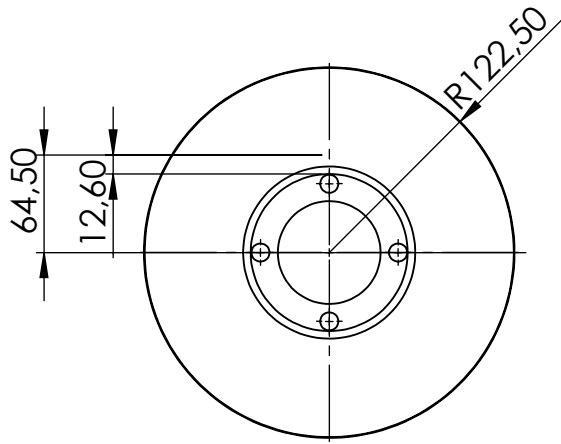
Selon les essais réalisés sur le tour et les essais menés sur le dispositif d'usure les propositions suivantes sont décelées :

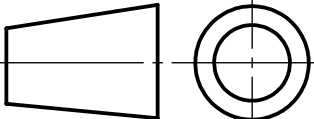
- Les températures élevées influence d'une certaine manière le comportement du disque vis-à-vis de l'usure ;
- Le refroidissement avec air comprimé du contact de freinage, contribue à la baisse des variations de température ;
- Le refroidissement par air comprimé pourra éventuellement un être intégré aux systèmes de freinage actuels en continu et cela, en vue de prolonger la durée de vie du disque de frein.

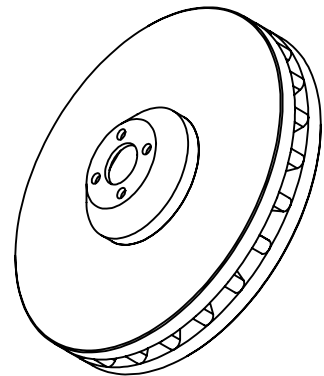
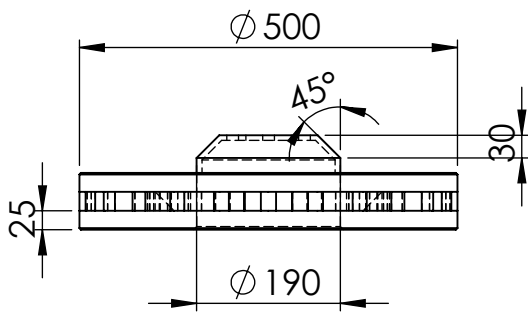
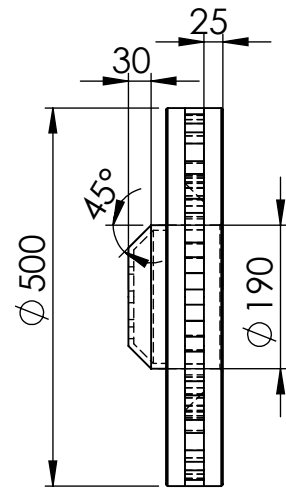
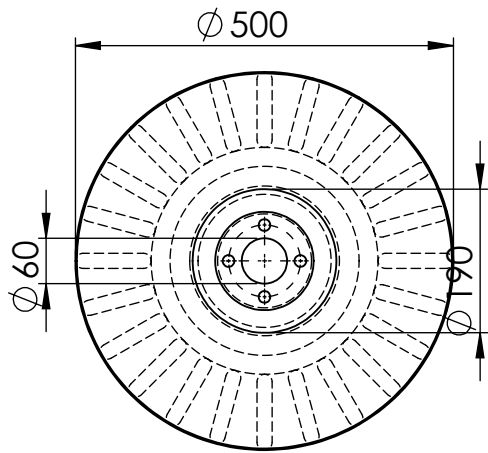
ANNEXES

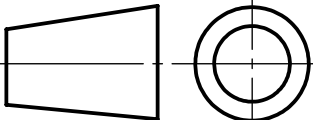


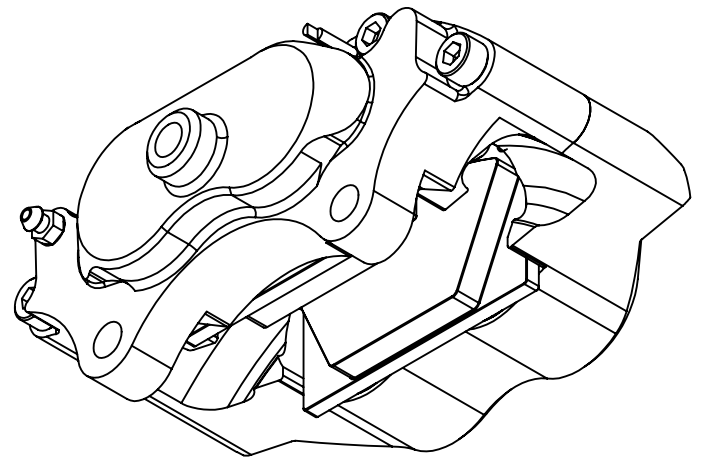
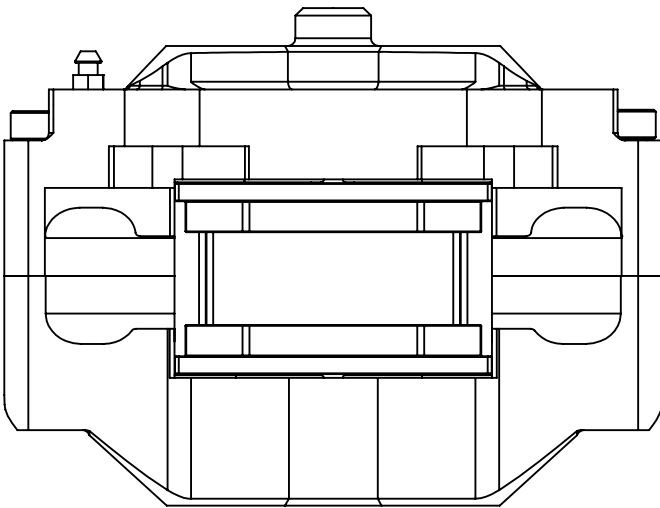
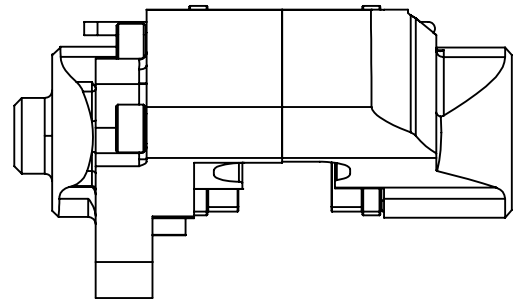
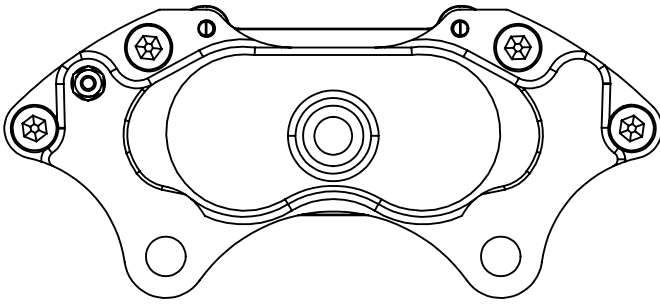
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 FMP
Echelle 1:5	Dispositif de fixation	Le 14/06/2017
		Acier
	BENGADI Amine et BENDRIS Karim	



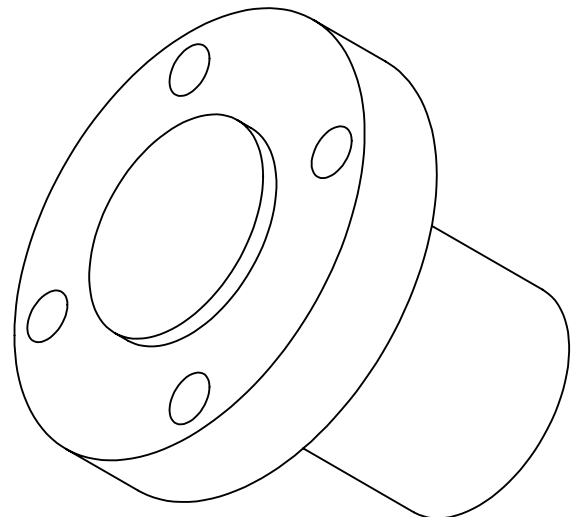
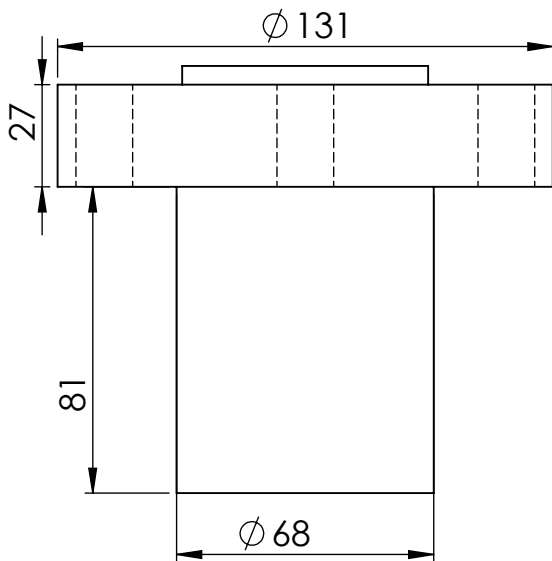
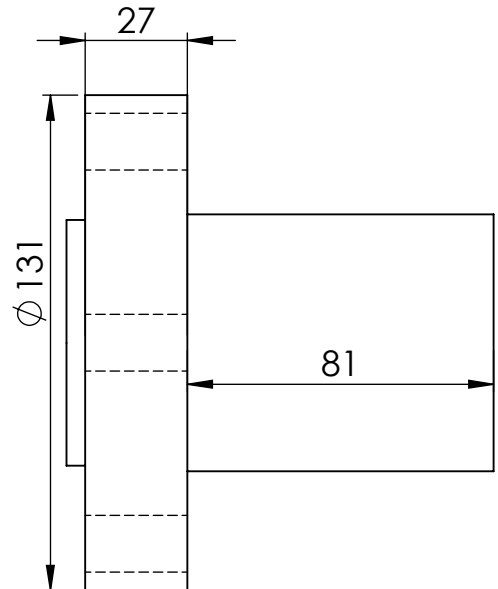
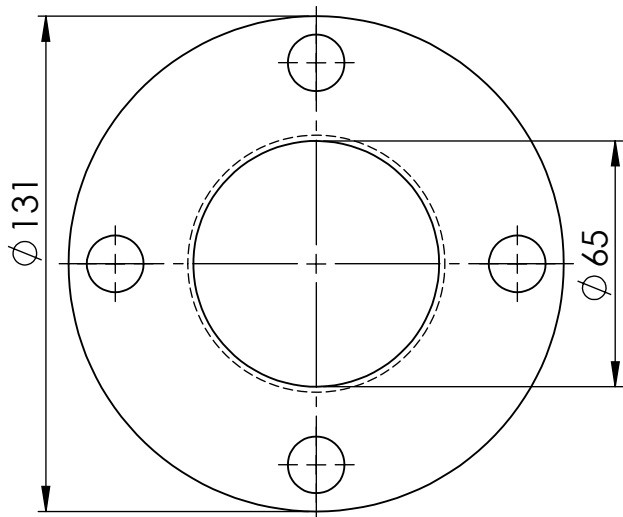
UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F . M
Echelle 1:5	Disque de frein plein	Le 14/06/2017
		Fonte grise
BENGADI Amine et BENDRIS Karim		PFE Fabrication



UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F . M
Echelle 1:10	Disque de frein ventile	Le 14/06/2017
		Fonte grise
	BENGADI Amine et BENDRIS Karim	



UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F . M
Echelle 1:2	Etrier fixe	Le 14/06/2017
		Fonte
BENGADI Amine et BENDRIS Karim		PFE Fabrication



UNIVERSITE A - MIRA BEJAIA		M2 F . M
Echelle 1:2	dispositif de fixation disque	Le 14/06/2017
		Teflon
BENGADI Amine et BENDRIS Karim		PFE Fabrication

Références Bibliographiques

- [1] NOEL BRUNETIERE, « INTRODUCTION A LA TRIBOLOGIE », page 7, 2016
- [2] PETERSON AND W.O WINER « WEAR CONTROL HANDBOOK », 1980
- [3] ASHBY, M.F, ABULAWI, J. KONG, H.S, « WEAR MECHANISM », 1991
- [4] STACHOWIAK, G.W, 2006, « WEAR : MATERIALS, MECHANISMS AND PRACTICE », 2006
- [5] J.F.ARCHARD, « CONTACT AND RUBBING OF FLAT SURFACES », 1953
- [6] CORNETS ET DEVILLE, 1998, « PHYSIQUE ET INGENIERIE DES SURFACES », 1998
- [7] TEXTAR, « ANALYSE DES DOMMAGES SUR PLAQUETTES DE FREINS A DISQUES VL INFORMATIONS TECHNIQUES », page 3
- [8] A. BELHOCINE, Thèse pour l'obtention du Diplôme de doctorat en génie mécanique « ETUDE THERMOMECHANIQUE DES DISQUES DE FREIN APPLICATION DU CODE DE CALCUL ANSYS v11.0 », page 3, 2011
- [9] NGUYEN-TAJAN Thi Mac-Lan, Thèse présentée pour obtenir le titre de docteur de l'école polytechnique en mécanique des solides « MODELISATION THERMOMECHANIQUE DES DISQUES DE FREINS PAR UNE APPROCHE EULERIENNE », page 8, 2002
- [10] <http://www.auto-facile.com/p/freinage-hazell-etrier>
- [11] <https://www.shop-racing.ch/shop16/plaquettes-de-frein-sport/1881-bmw-serie-3-e30-320-323-325-82-91-ferodo-ds2500-avant.html>
- [12] MATHILDE COLLIGNON, thèse présentée en vue d'obtenir le grade de docteur en mécanique « COMPREHENSION DES MECANISMES DE DEGRADATION DE DISQUES DE FREIN POUR VEHICULE « POIDS LOURD » ET DEFINITION DE NOUVELLES SOLUTIONS MATERIAUX », page 13, 2013
- [13] <http://voiture.imgdiode.com/comment-fonctionne-le-systeme-de-freinage-d-une-voiture/>
- [14] <https://www.gt2i.com/fr/bratex-gr-a/75476-disque-de-frein-perce-avant-bratex-renault-clio-4-09l-258x22.html>
- [15] <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1254-types-de-disques-de-frein.php>
- [16] M. BENRAMDANE et al, « ANALYSE DE LA CONTRIBUTION DU TRANSFERT THERMIQUE DES DISQUES TOURNANTS (DISQUE DE FREIN) UNIFORMEMENT CHAUFFES, page 30, 2009

- [17] <https://www.sc42.net/freins>
- [18] <https://www.bpsracing.com/disque-de-frein-zimmermann-bmw-e30-m3-282x12-ar-perce-piece.html>
- [19] THOMAS J. MACKIN ET AL, « THERMAL CRACKING IN DISCS BRAKES », page 64, 2000
- [20] <http://www.metabricoleur.com/t801-remise-en-etat-disques-de-frein>
- [21] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonte_\(m%C3%A9tallurgie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonte_(m%C3%A9tallurgie))
- [22] S.BENSAADA, « ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS) », page 54
- [23] <http://wiring-diagram.co.uk/diagram-fer-carbon.html>
- [24] M. SAHLI, R. BENNICHE, PFE en vue d'obtention du diplôme de master en génie mécanique, « EFFETS DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LA MICROSTRUCTURE D'UNE FONTE FORTEMENT ALLIEE AU CHROME UTILISE POUR LA FABRICATION DES BOULETS DE BROYAGE », page 9, 2012
- [25] S.BENSAADA, « ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS) », page 68
- [26] JEAN LE COZE, « HISTOIRE DE FONTES. ENTRE LE PHLOGISTIQUE ET LA PLOMBAGINE : Où SITUER LA FONTE A L'OXYGENE »
- [27] Etude de positionnement des branches composantes automobiles
Cahier du CEPI N°9 - API décembre 2000
- [28] K. BOUHAMLIA, mémoire de magistère en vue d'obtention du diplôme de magistère « EVOLUTION STRUCRURALE DES FONTES AU CHROME ALLIEES », page 71, 2009
- [29] RENE GUINEBRETIERE, « X RAY DIFFRACTION BY POLYCRYSTALLINE MATERIALS », 2007
- [30] http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/metrologie/cours/5_Moindres%20carres.pdf
- [31] https://www.aubertduval.com/wp-media/uploads/sites/2/2017/07/Conversion_table-1.pdf

Résumé

Il est indiscutable qu'il y a nécessité vitale de réduire et de diminuer les fortes températures de contact engendrées par le frottement entre disque et plaquettes lors du freinage, pour éviter la baisse et la perte du coefficient de frottement, ou que la chaleur se transfère aux composants de freinage ; ce qui engendrera la vaporisation du liquide de frein. Dans ce travail, des essais de freinage ainsi que des essais d'usure et de perte de masse du disque, ont été réalisés et nous avons tenté d'appréhender l'influence de la température de contact sur l'usure des disques de freins, en tenant compte des différents paramètres, tel que la durée et l'intensité du freinage, la nature du matériau du disque et des plaquettes ainsi que leurs géométries. Enfin, nous avons utilisé la méthode des moindres carrés pour l'estimation des températures et de la perte de masse suivant une vitesse de glissement donnée.

Mots clé : Disque de frein, usure, freinage, perte de masse, température de contact.

Abstract

It is concluded that the heat generated due to friction between the disk and the pad should be ideally dissipated to the environment to avoid decreasing the friction coefficient between the disk and the pad and to avoid the temperature rise of various brake components and brake fluid vaporization due to excessive heating. Ventilated disks are widely used for the fabrication of the brake disk rotor for its properties of dissipating heat.

In this paper, braking process is simulated using mechanical turning machine where the brake disk is mounted on the spindle, and the mechanism that holds the pads is assembled on the cross slide. This paper is to establish a link between the high degrees and variation of heat generated by the friction during braking and the disk wear and loss of mass. Friction material and metal wear consequences are discussed as they relate probably to the high degrees of heat reached during braking, and parameters such as the duration of braking, velocity of the vehicle, dimensions and geometry of the brake system, materials of the disk brake rotor and the pad are discussed too. Finally estimation of contact heat and wear loss of mass are investigated and mathematic models were calculated using the method of least squares.

Key words: Disk brakes, wear, braking, loss of mass, frictional heat.